Wie kann Nordrhein-Westfalen auf den 1,5-Grad-Pfad kommen?

Studie im Auftrag der Grünen Landtagsfraktion NRW

Karl-Martin Hentschel
Steffen Krenzer
Lea Johannsen
Claudia Bielfeldt
Anja Twest
Holger Busche

Fakten, Wege, Maßnahmen und Alternativen für ein klimaneutrales NRW

Projektleitung
Karl-Martin Hentschel
24226 Heikendorf, Am Steinkamp 7
Tel. +49 151 5908 4268
Mail. karl.m.hentschel@mehr-demokratie.de

Auftraggeber
Fraktion Bündnis 90/Die Grünen im Landtag Nordrhein-Westfalen
Platz des Landtags 1
40221 Düsseldorf
Tel. +49 211 844 2281
Mail. gruene@landtag.nrw.de

Autorinnen und Autoren
Karl-Martin Hentschel, Mathematiker
Steffen Krenzer, Umweltpsychologe
Lea Johannsen, Mathematikerin, Psychologin
Claudia Bielfeldt, Biologin
Anja Twest, biologische Ozeanographin
Holger Busche, Geophysiker

Redaktion & Layout
Steffen Krenzer
Karl-Martin Hentschel

Vorwort

Im Jahr 2018 brachte der Weltklimarat ein Sondergutachten heraus.[1] Dieses stellte fest, dass die Klimaerwärmung noch schneller verläuft, als bis dahin angenommen wurde. Auch die Folgen sind dramatischer, als die Wissenschaft bisher dachte. Der Weltklimarat empfiehlt deshalb, alles dafür zu tun, damit die durchschnittliche Klimaerwärmung unter 1,5 Grad im Vergleich zum vorindustriellen Niveau bleibt. Das ist das „1,5-Grad-Ziel". Bis dahin dachten viele Fachleute, es würde ausreichen, die Erderwärmung auf zwei Grad zu beschränken.

*Noch ist das 1,5-Grad-Ziel erreichbar. Es sind aber große Anstrengungen dafür erforderlich. Die bisher veranlassten Maßnahmen wie das Klima-Paket der Bundesregierung und auch die darauf basierenden Planungen der Landesregierung in NRW reichen nicht annähernd aus, um einen für Deutschland angemessenen Beitrag zu leisten. Das EU-Parlament und die Kommission haben bereits eine Beschleunigung der Anstrengungen beschlossen. Doch selbst diese Zielvorgaben halten die meisten Wissenschaftler*innen noch nicht für ausreichend. Andere Staaten lassen sich noch viel mehr Zeit. Wenn die Entwicklung so weitergeht wie bisher, erwärmt sich die Erde wahrscheinlich um 3 Grad oder mehr.*

In dieser Situation hat mich die Grüne Landtagsfraktion in Nordrhein-Westfalen beauftragt, darzustellen, wie NRW auf den 1,5-Grad-Pfad kommen kann. Die Ausgangslage in Nordrhein-Westfalen stellt sich ernüchternd dar. Die Treibhausgas-Emissionen pro Kopf lagen 2018 um 40 Prozent über dem Bundesschnitt. Deshalb ist eine 1,5-Grad-Studie für NRW eine echte Herausforderung. Man kann es aber auch so formulieren: Wenn es gelingt, NRW in den kommenden 20 Jahren treibhausgasneutral zu machen, dann kann es auch weltweit gelingen.

*Meine Koautor*innen und ich haben uns bemüht, auf Basis der verfügbaren Quellen[2] möglichst neutral Fakten und Handlungsmöglichkeiten zusammenzustellen. Dabei geht es nicht nur um die technische Machbarkeit der Umstellung. Es geht auch um die Finanzierung und die politische Machbarkeit der Transformation, die für alle staatlichen Ebenen von der EU bis zu den häufig hoch verschuldeten Kommunen in NRW große Anstrengungen erfordern wird. Dies wird nur gelingen, wenn die Belastungen sozial gerecht verteilt werden, sodass die einkommensschwachen Schichten nicht zusätzlich belastet werden.*

Die Studie gliedert sich in drei Teile und enthält zusätzlich umfangreiche Anlagen:

In Teil 1 wird die Ausgangslage in Deutschland und in NRW beschrieben und dargestellt, welche grundsätzlichen Veränderungen notwendig sind, damit die Umstellung rechtzeitig gelingt.

---

[1] Siehe IPCC (2018/1)

[2] Grundlage dieser Studie ist die Metastudie »Handbuch Klimaschutz« (siehe MD (2020/1)); zu den weiteren Quellen siehe das Quellenverzeichnis

In Teil 2 werden die erforderlichen Rahmenbedingungen und Sektor übergreifende Maßnahmen für die Umstellung der Gesellschaft beschrieben – wie zum Beispiel die Rolle der Digitalisierung, der CO_2-Preis oder die Finanzierung der Transformation.

In Teil 3 wird dargestellt, welche Maßnahmen zur Umstellung der einzelnen Sektoren der Gesellschaft (Industrie, Häuser, Verkehr, Landwirtschaft usw.) in NRW erforderlich sind.

Im Anhang befinden sich Informationen über unsere Methodik[3] und unsere Annahmen, sowie zahlreiche Anlagen mit Zusammenstellungen von Zahlen, eigenen Modellrechnungen und weitere Hintergrundinformationen zum Verständnis unserer Ergebnisse.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass NRW einen wichtigen Beitrag zur Erreichung des 1,5-Grad-Zieles leisten kann. Zu unserer eigenen Überraschung konnten wir auf Basis der Quellen darstellen, dass es technisch möglich ist, dass NRW etwa 2040 klimaneutral sein kann. Unter den derzeitigen Rahmensetzungen der EU würde es mindestens fünf Jahre länger dauern. Würde das Budget der Welt nach Einwohnerzahl aufgeteilt, stünde Deutschland etwa ein Prozent zu. Dann müsste Deutschland und damit auch NRW bereits 2028 klimaneutral werden, dies wird jedoch für nicht machbar gehalten. Gleichwohl müssen die Anstrengungen von Deutschland und NRW so ambitioniert sein, dass alles unternommen wird, um möglichst frühzeitig Klimaneutralität zu erreichen. Der dargestellte Weg wäre ein ganz wesentlicher Beitrag zur Erreichung des Ziels. Für die Kompensation der überschüssigen Emissionen wird NRW dabei auf die Kooperation mit anderen Bundesländern und mit anderen Staaten, die heute wesentlich weniger Emissionen freisetzen, angewiesen sein. Diese Kooperation und Kompensation halten wir aber durchaus für realistisch.

Der dargestellte Transformationsprozess beinhaltet aber auch große Chancen. Die erforderlichen Investitionen rechnen sich mittelfristig betriebswirtschaftlich, eröffnen zugleich die Möglichkeit, die Infrastruktur des Landes für die Zukunft zu erneuern und fit zu machen und im globalen Wettbewerb industrielle fossilfreie Problemlösungen günstig anzubieten.

*Ich bedanke mich bei allen Fachleuten und Wissenschaftler*innen, die uns mit großer Hilfsbereitschaft unterstützt und zum Erfolg beigetragen haben. Ich danke den Abgeordneten und Mitarbeiter*innen der Grünen Landtagsfraktion, die mit ihren zahlreichen Hinweisen geholfen haben, zusätzliche Quellen zu finden und die Darstellung zu vertiefen.*

Wir hoffen, mit dieser Studie einen Beitrag geleistet zu haben, dass NRW die bevorstehende Transformation erfolgreich bewältigen kann.

Karl-Martin Hentschel, 16. April 2021

[3] Siehe im Anhang: »Zur Methodik dieser Studie und dem Zeitproblem«

Inhalt

Vorwort 2
Inhalt 4
Zusammenfassung 6
Teil 1 Ausgangslage und Wege für ein treibhausgasneutrales NRW 16
1 Klimaerwärmung: Ursachen und Folgen 16
1.2 Das 1,5-Grad-Ziel 20
1.3 Die Treibhausgasquellen in Nordrhein-Westfalen 23
1.4 Der Emissionspfad für Deutschland und NRW 26
1.5 Das klimaneutrale Energiesystem 29
1.6 Minderungspfade für die Sektoren 32
Teil 2 Rahmenbedingungen und sektorübergreifende Maßnahmen 35
2.1 Die Rolle der Kommunen und Regionen 37
2.2 Varianten des Energiesystems: E-Brennstoffe und Importe 40
2.3 Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft 54
2.4 Planungsrecht und Bürgerbeteiligung 60
2.5 Zur Rolle der Digitalisierung 64
2.6 Treibhausgaspreise 70
2.7 Die Ökonomie der Umstellung 73
2.8 Klima-Handelspolitik 81
2.9 Effizienz und Suffizienz 83
Teil 3 Maßnahmen in den einzelnen Sektoren 90
Sektor 1 Energiebedarf und Stromversorgung 92
Sektor 2 Industrie 141
Sektor 3 Hauswärme (Heizung und Warmwasser) 174
Sektor 4 Verkehr 206

Sektoren 5 und 6 Landwirtschaft, Ernährung, Bodennutzung und Kompensation 245

Sektor 7 Abfälle und Abwässer 282

Anhänge 286

Übersicht der Anhänge 286

Zur Methodik dieser Studie und dem Zeitproblem 291

Energieflussdiagramm 294

Anlagen 305

Quellen 416

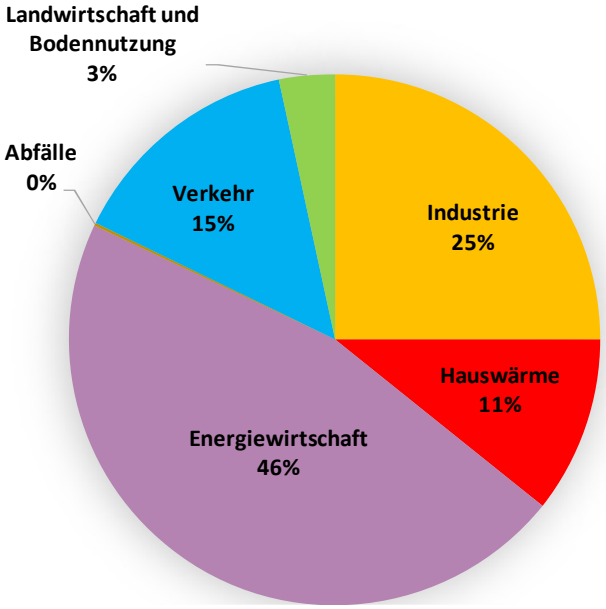
Zusammenfassung

Der Bericht des Weltklimarates[4] von 2018 enthält folgende Eckpunkte:

- Die Erderwärmung sollte unbedingt auf 1,5 Grad begrenzt werden, da schon bei 2 Grad Erwärmung die Folgen unkontrollierbar werden können.
- Dafür bleibt nicht viel Zeit. Das 1,5-Grad-Ziel erfordert daher „rasche, weitreichende und beispiellose Veränderungen“ in unserer Gesellschaft und „hohe Investitionen".[5]

Es ist aber finanziell tragbar und rechnet sich langfristig. Die Energieversorgung mit Erneuerbaren Energien wird langfristig sogar billiger als heute.

Grafik 1: Treibhausgasquellen in Nordrhein-Westfalen



Quelle: LANUV[6]

[4] „Weltklimarat“ ist die in Deutschland übliche Bezeichnung des „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC). Er wurde im Auftrag der UNEP (Umweltorganisation der Vereinten Nationen) einberufen. Mitglied sind 195 Regierungen der Welt. Er besteht aus ca. 3.500 Wissenschaftler*innen, die ehrenamtlich und ohne Vorgaben die Ergebnisse der Klimaforschung zusammentragen.

[5] Siehe IPCC (2018/1)

[6] Siehe Anlage 1

Im Jahre 2018 betrugen die Treibhausgasemissionen in Nordrhein-Westfalen 266 $MtCO_{2eq}$.[7] Das waren 31 Prozent der deutschen Emissionen – pro Kopf 42 Prozent mehr als im deutschen Durchschnitt. Trotzdem kommen wir nach Auswertung der von uns ausgewerteten Quellen zum Ergebnis, dass es technisch möglich ist, dass NRW etwa 2040 klimaneutral sein kann. Unter den derzeitigen Rahmensetzungen der EU würde es mindestens fünf Jahre länger dauern. Die nach 2040 verbleibenden ca. vier Prozent der Emissionen von 2018 können in NRW durch die Wälder kompensiert werden. Dafür müssen fast alle Bereiche (siehe Grafik 1) so umgestellt werden, dass sie keine Treibhausgase mehr ausstoßen. Damit würde das Land NRW zwar nicht die Reduktion erreichen, die ihm bei einem 1,5-Grad-Kurs rechnerisch zustünden. Es würde aber einen wichtigen Beitrag dazu leisten, damit dieses Ziel weltweit erreicht werden kann. Dazu könnte nach den vorliegenden wissenschaftlichen Studien folgender Weg beschritten werden:

A. Allgemeine Maßnahmen

1. Die Rolle der Kommunen: Eine zentrale Rolle bei der Gestaltung der Transformation werden die Städte, Gemeinden, Kreise und Regionen spielen, da wesentliche Veränderungen, vor allem die notwendigen Sektorkopplung und das in bestehenden Strukturen, nur vor Ort gestaltet werden können. Dafür müssen die Kommunen und Regionalverbände die erforderlichen Aufgaben, Kompetenzen und Finanzmittel übertragen bekommen.

2. Energie und Ressourcen einsparen – wenige Verhaltensänderungen: Knapp die Hälfte des Primärenergieverbrauchs und erhebliche Ressourcen können durch technologische Umstellungen eingespart werden. Die Studien rechnen mit einer Effizienzrevolution im Verkehr, bei den Heizungen der Häuser und in den Grundstoffindustrien, die in NRW eine besondere Rolle spielen. Mit größeren Einsparungen bei den Verhaltensweisen wird nur in begrenztem Umfang gerechnet (zum Beispiel im Bereich der Ernährung), da solche Verhaltensveränderungen nur begrenzt politisch beeinflusst

[7] Wir geben in dieser Studie die Emissionen stets in $MtCO_{2eq}$ (Megatonnen CO_2-Äquivalente) an. Diese Angabe enthält jeweils die Mt (Megatonnen) Kohlendioxid plus die Äquivalente der anderen Treibhausgase. Diese werden dazu jeweils aufgrund ihrer unterschiedlichen Treibhausgaswirkung umgerechnet. So hat Methan den Faktor 28, Lachgas den Faktor 265 und andere Treibhausgase sogar Faktoren über 1.000.

werden können. Durch einen entsprechenden Kulturwandel sind natürlich noch weitere Einsparungen möglich und denkbar.

3. Erneuerbare Importe einplanen: Der Industriestandort NRW importiert heute einen Großteil der Rohstoffe und der fossilen Energieträger Steinkohle, Öl und Erdgas. Auch in Zukunft werden Importe erforderlich sein, obwohl die Art der Importe sich grundlegend verändern wird. Künftig werden vor allem Stromimporte aus den Offshore-Windparks von Nord- und Ostsee und aus Skandinavien, treibhausgasneutral produzierte synthetische Rohstoffe für die chemische Industrie und treibhausgasneutral produzierte synthetische Treibstoffe für die Industrie, den Flugverkehr und die Binnenschifffahrt von NRW importiert werden müssen. Dafür muss die benötigte Infrastruktur wie Stromtrassen, Leitungen und Speicher bereitgestellt werden.

4. Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft: Ein zentraler Bestandteil der Transformation gerade im Industrieland NRW ist der vollständige Umbau zu einer Kreislaufwirtschaft (Circular Economy). Dabei geht es um ein weitgehendes Recycling aller Metalle und eine erhebliche Ausweitung des Recyclings der Kunststoffe und des Bauschutts. Dies erfordert ein umfassendes Ausrollen und Anwenden der Ökodesign-Richtlinie, die Verstärkung des Produkthaftungsrechts und eine deutliche Ausweitung von Pfandsystemen insbesondere für alle Waren, Verpackungen und Materialien, die nicht natürlich abbaubar sind. Dadurch wird sich die Menge der benötigten Rohstoffe um bis zu 80 Prozent reduzieren und es wird einfacher, den restlichen Bedarf an Roh- und Basisstoffen treibhausgasneutral zu produzieren.

5. Planungsrecht und Bürgerbeteiligung: Der größte Teil der Transformation wird in den kommenden 15 Jahren stattfinden. Die dafür erforderlichen Planungsprozesse für die großen Projekte wie Solar- und Windenergieanlagen, Stromtrassen, Bahntrassen, Industrieanlagen, Neuaufforstung von Wäldern usw. stellen im dicht besiedelten NRW eine besondere Herausforderung dar. Dazu müssen die Planungsverfahren beschleunigt und die Verfahren der Beteiligung von Bürger*innen, Verbänden und Kommunen verbessert werden.

6. Zur Rolle der Digitalisierung: Beim Übergang in eine Ressourcen und Energie sparende Gesellschaft wird die Digitalisierung in nahezu allen Bereichen eine wichtige Rolle spielen. Die Stichworte dazu lauten: Smart Grid, Smart Home, Autonomes Fahren, Industrie 4.0, Online Business, digitale Landwirtschaft bis hin zu neuen Formen der Bürgerbeteiligung und Demokratie. Ohne diese Konzepte wird ein Leben von 10

Milliarden Menschen mit einem hohen Lebensstandard auf unserem Planeten wohl kaum möglich sein. Dieser Übergang erfordert jedoch die Bewältigung einer Vielzahl von neuen Herausforderungen wie Datenschutz, Recht auf Privatheit, sparsamer Energieeinsatz, Strategien zur Vermeidung von Rebound-Effekten, Regulierung der Plattformökonomie und von digitalen Monopolen, Besteuerung von Digitalkonzernen und vieles andere mehr.

7. Treibhausgasen einen Preis geben: Eine wirksame CO_2-Bespreisung ist ein wichtiges Instrument des Klimaschutzes. Prioritär muss der europäische Emissionshandel auf alle Sektoren ausgeweitet und den Zielen der Klimaneutralität angepasst werden. Sollte dies kurzfristig nicht gelingen, soll national eine wirksame Treibhausgas-Steuer in 2023 mit etwa 60 Euro für eine Tonne Kohlendioxid starten und dann jährlich um zehn Euro steigen. Diese Maßnahme muss von einem klaren politischen Willen getragen sein. Nur so entsteht das Vertrauen für die nötigen Investitionen von Wirtschaft und Privatpersonen. Neben dem einheitlichen Preis werden aber Ausnahmen und Sonderregelungen nötig sein. Nur so kann in allen Bereichen rechtzeitig mit den nötigen Maßnahmen begonnen werden.

8. Sozialen Ausgleich sichern: Die Transformation kann nur gelingen, wenn sie sozial ausgewogen umgesetzt wird. Dazu bietet sich insbesondere ein festes monatliches Klimageld für jede Person an. So können von Anfang an Menschen mit geringen Einkommen Gewinner*innen der Umstellung sein. Das ist nur fair, da diese Bevölkerungsgruppe zurzeit die geringsten Emissionen verursacht.

9. Arbeitsmarkt und Fachpersonal: Die Transformation wird zu erheblichen Verwerfungen auf dem Arbeitsmarkt führen. In NRW betrifft dies zum Beispiel den Braunkohlebergbau, die Kohlekraftwerke, die Treibstoffraffinerien, die Tankstellen und Teile der Automobilindustrie. Zugleich werden zahlreiche Fachkräfte benötigt, die die Klimapolitik umsetzen und die erforderlichen Investitionen durchführen: Erneuerbare Energien, Wärmedämmung und Umbau der Heizsysteme, Umbau der Grundstoffindustrien usw. Für den Umbau werden allein in NRW Hunderttausende von Fachkräften benötigt. Dies könnte der „Flaschenhals“ der Umstellung werden. Hier muss frühzeitig damit begonnen werden, genügend Menschen auszubilden, umzuschulen und weiterzubilden.

10. Handelspolitik: Die Transformation eines global aufgestellten Industriestandortes wie NRW kann gerade auch mit dem Blick auf die vielen mittelständischen „hidden

champions“ nur gelingen, wenn Klimaschutz und Nachhaltigkeit zentrale Bestandteile der europäischen Handelspolitik und aller Handelsabkommen werden. Dabei steht die Kompatibilität von Emissionshandelssystemen und Emissionsbesteuerung im Vordergrund – möglichst ohne signifikante Absenkungen der europäischen Standards.

B. Die Umstellung der Sektoren

Bei der Transformation der Gesellschaft werden üblicherweise sieben Sektoren betrachtet. Da diese Sektoren eng miteinander verflochten sind (Sektorkopplung), müssen jeweils die Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Hier ein Überblick über die wichtigsten Ziele und Maßnahmen:

1. **Energiewende und Stromversorgung:** Nur, wenn jederzeit genug erneuerbarer Strom zur Verfügung steht, kann die Transformation in den anderen Sektoren gelingen. Daraus ergibt sich:
    - Der Ausstieg aus der Kohleverstromung soll bis 2030 erfolgen.
    - NRW kann bis 2035 zu 100 Prozent mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen versorgt werden. Die Stromproduktion durch Erneuerbare Energien in NRW steigt dabei etwa auf das Niveau des heutigen gesamten Stromverbrauchs. Zusätzlich müssen dann gut 40 Prozent des Stroms importiert werden, da der Strombedarf durch Elektroautos, Wärmepumpen und Industrie erheblich wachsen wird.
    - Die Höchstspannungstrassen müssen dazu erheblich ausgebaut werden, u.a. nach Westen und insbesondere nach Norden, um die Offshore-Windparks und die Wasserkraftwerke in Skandinavien anzubinden.
    - Weiterhin müsste künftig als Ersatz für fossile Rohstoffe und Brennstoffe ein Drittel der Energie in Form von Wasserstoff und Power to Liquid importiert werden.
    - Einige örtliche Verteilnetze müssen für die Elektroautos und für die Strom-Einspeisung durch Photovoltaik ausgebaut werden.
    - Eine wichtige Rolle wird das Lastmanagement spielen. Dazu gehören eine flexibel gesteuerte Nachfrage und variable Speichertechnologien wie Batteriespeicher, Anbindung der skandinavischen Stauseen als Wasserspeicher und Nutzung von Gaskavernen als Gasspeicher in Verbindung mit Gasturbinen als Notstromaggregate für die kalte Dunkelflaute.

- Dazu wird ein neues Strompreis-System benötigt, in dem flexible Preise dazu beitragen Angebot und Nachfrage zu steuern.

2. **Industriewende:** Technisch ist es möglich, dass die Industrie bis 2040 die Treibhausgasemissionen um 95 Prozent im Vergleich zum Jahr 1990 reduzieren kann – die Restemissionen müssen kompensiert werden.

   - Die fossilen Kraftwerke der Industrie werden nach und nach abgeschaltet. Die Industrie bezieht ihren erneuerbaren Strom dann hauptsächlich aus dem öffentlichen Netz oder über Direktlieferverträge mit Anlagenbetreibenden bzw. aus eigenen erneuerbaren Kraftwerksprojekten.
   - Die Rohstoffe (bzw. Basisstoffe) werden überwiegend durch Recycling gewonnen. Die restlichen Basisstoffe müssen soweit wie möglich treibhausgasneutral produziert werden.
   - Die Industrieanlagen werden in Richtung Elektrifizierung und/oder Wasserstoffwirtschaft umgebaut. Dies gilt besonders für die Grundstoffindustrien wie Zement, Stahl und Chemie. Dazu bedarf es staatlicher Finanzierungsinstrumente, damit die Umstellung schnell beginnt (Carbon Contract for Difference).
   - Wirtschaftszweige mit Treibhausgasemissionen, in denen eine klimaneutrale Produktion nicht möglich ist, werden soweit wie möglich auf Ersatzprodukte umgestellt.
   - Ein kritischer Punkt bleibt die Zement- und die Kalkherstellung mit erheblichen Restemissionen, die kompensiert werden muss.

3. **Haus-Wärme-Wende:** Dies ist der zeitaufwändigste und teuerste Teil der Klimawende. Technisch ist es möglich, dass bis 2040 alle Häuser treibhausgasneutral mit Wärme versorgt werden können.

   - 90 Prozent der Häuser werden bis spätestens 2045 auf Niedrigenergiestandard saniert – und zwar die neueren, bereits gut gedämmten Häuser zuletzt.
   - Kernstück der Wärmeversorgung werden elektrische Wärmepumpen, unterstützt durch Sonnenenergie, sein. Die restlichen benötigten Brennstoffe werden synthetisch treibhausgasneutral produziert.
   - Eine wichtige Rolle wird auch die Fern- und Nahwärmeversorgung spielen. Die Wärme wird durch Großwärmepumpen, Freiflächen-Solarthermie,

Tauchsieder sowie Müllverbrennung und Industrieabwärme erzeugt. Im Winter kommen Blockheizkraftwerke hinzu, in denen erneuerbarer Wasserstoff oder andere E-Brennstoffe und Bioabfälle verbrannt werden.

- Wo immer möglich werden Wärmepumpen unter Nutzung von Erdwärme, Fließgewässern oder Eisspeichern installiert.
- Für die kurz- und mittelfristige Wärme-Speicherung werden die Kraftwerke und Wohnblöcke mit Wärmespeichern ausgestattet.

4. **Verkehrswende:** Es ist technisch möglich, dass der Verkehr bis auf den Flugverkehr bereits 2035 nahezu treibhausgasfrei werden kann. Ob dies gelingt, hängt auch davon ab, wie viel Verkehr es in Zukunft geben wird und dass rechtzeitig synthetische Treibstoffe zur Verfügung stehen.
   - Möglichst viel Verkehr (Güter und Personen) wird auf Schienenverkehr, Schiffe, Busse und Fahrräder verlagert.
   - Dazu kann 50 Prozent des Verkehrs in den Städten auf ÖPNV und Fahrräder und durch Verkehrsberuhigung der Wohnviertel verlagert werden.
   - Die Verkehrsleistung der Bahn soll möglichst verdreifacht werden.
   - Der restliche Personen-Verkehr wird weitgehend auf Elektro-Autos umgestellt.
   - Die LKW werden auf elektrischen Antrieb per Oberleitung und/oder Batterien oder E-Brennstoffe umgestellt.
   - Flug- und Schiffsverkehr werden möglichst bis 2035 auf erneuerbare Brennstoffe umgestellt. Im Flugverkehr bleiben trotzdem Restemissionen.
5. **Agrarwende und Umsteuern bei der Bodennutzung:** Technisch ist es möglich, die Emissionen aus der Landwirtschaft und der Bodennutzung bis 2040 auf ein Drittel zu reduzieren. Es bleiben insbesondere Emissionen aus der Rinderhaltung und der Düngung.
   - Ein wichtiger Beitrag wird die Wiedervernässung der ehemaligen Moore und Feuchtgebiete sein, da sie Treibhausgasspeicher sind.
   - Der Konsum von Fleisch und von Milchprodukten kann entsprechend den Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung reduziert werden.

- Die Stickstoffemissionen aus Dünger können mindestens um zwei Drittel verringert werden.
- Gülle und Mist werden möglichst gasdicht verschlossen und überwiegend als Bioenergie verwertet.

Auch danach bleiben noch erhebliche Restemissionen von Methan aus der Rinderhaltung und von Lachgas durch die Düngung.

6. **Abfallwirtschaft:** Die Restemissionen der Abfallwirtschaft in NRW aus Deponien und der Abwasserentsorgung sind nur noch gering und können bis 2030 nahezu vollständig vermieden werden. Durch die Umstellung der Industrieproduktion wird mittelfristig auch die Müllverbrennung treibhausgasneutral.
7. **Kompensationsmaßnahmen:** Die verbleibenden Emissionen in den Jahren 2040 ff. von ca. 10 $MtCO_{2eq}$/a können nicht vermieden, aber weitgehend ausgeglichen werden.
   - Der Anbau von Energiepflanzen (hauptsächlich Mais und Raps) wird wieder eingestellt.[8] Die freiwerdenden Flächen werden für Neuaufforstung, Naturschutz, Erneuerbare Energien und Rohstoffanbau genutzt.
   - Durch eine naturnahe und nachhaltige Forstwirtschaft können verstärkt Treibhausgase in Holz gebunden werden.
   - Die Humusbildung in Wäldern, Wiesen und Äckern wird verstärkt. Dazu trägt auch die ökologische Bewirtschaftung bei.
   - Deutschland sollte sich zusätzlich an Aufforstungsprogrammen im Ausland finanziell beteiligen.
   - Mittelfristig sollte geprüft werden, Biokohle oder andere Kohleverbindungen in der Erde zu speichern.

C. Finanzierung

Die Transformation in eine treibhausgasneutrale Gesellschaft wird in NRW in den kommenden 20 Jahren zusätzliche Investitionen von 300 bis 400 Milliarden Euro benötigen. Davon dürfte ein Drittel auf die Sanierung der Häuser – insbesondere der Wohnungen

[8] Stattdessen soll die Vergärung von Reststoffen wie Gülle intensiviert werden, näheres s. Sektor 1.

entfallen. Die Finanzierung der Transformation kann in vielen Bereichen durch private und betriebliche Investitionen erfolgen. Es bedarf jedoch auch erheblicher finanzieller Mittel des Staates für die Sanierung der Häuser, für den Neubau der Grundstoffindustrie und für den Ausbau der Infrastruktur – also insbesondere in den Bereichen Energie, Verkehr und Wärmeversorgung. Dies ist aber zugleich ein dringend notwendiges Modernisierungsprogramm (Green New Deal). Wie hoch die staatlichen Investitionen letztlich sein müssen, um ausreichend Wirkung zu entfalten, ist sehr von unterschiedlichen politischen Rahmensetzungen abhängig. Wenn man von einer Quote von 25 Prozent ausgeht, wären staatliche Mittel für NRW in Höhe von bis zu fünf Milliarden Euro pro Jahr – in 20 Jahren bis zu 100 Milliarden Euro – notwendig. Zudem wird ein kompletter Umbau der Agrar-Zuschüsse der EU notwendig sein. Insgesamt bedarf es einer Abkehr von der Politik der schwarzen Null hin zu einer präventiven Investitionspolitik für den Klimaschutz.

Würde man die Umstellung bis 2040 über Kredite finanzieren, würde der sogenannte „Break-Even"-Punkt spätestens nach fünfzehn Jahren erreicht.[9]

D. Politische Umsetzung

Auf Grundlage der Studien kann man feststellen, dass die Transformation in eine treibhausgasneutrale Gesellschaft in NRW etwa 2040 technisch machbar und durch ein Zusammenwirken von Land, Bund und EU sowie den Kommunen auch finanzierbar ist.

Fast alle Studien sind sich einig: Die Umstellung Deutschlands auf Klimaneutralität kann und muss sozial gerecht gestaltet werden, sie schafft neue Arbeitsplätze, sie reduziert Import-Abhängigkeiten und kann als gemeinsames Ziel den geschädigten gesellschaftlichen Zusammenhalt wiederherstellen.

Die anhaltenden Proteste von Fridays for Future und anderen Gruppen, sowie die angestiegene Medienpräsenz des Themas deuten darauf hin, dass sich die notwendige Veränderung im Bewusstsein anbahnt. Es kommt nun darauf an, dass die Transformation als gesamtgesellschaftliche Aufgabe begriffen und entschlossen politisch angepackt wird.

[9] Eine ausführliche Darstellung findet sich in Kapitel 2.7 »Die Ökonomie der Umstellung«

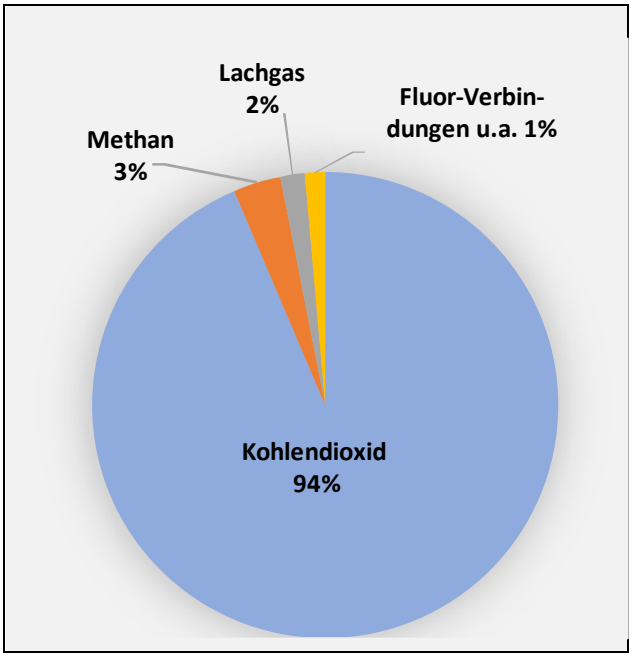
Dies kann am besten gelingen, wenn die wichtigsten klimapolitischen Entscheidungen in den einzelnen Sektoren über Legislaturen hinaus Bestand haben und deshalb über die engen Grenzen der jeweiligen Koalitionen breiter abgesichert würden, ähnlich wie der Atomausstieg.

Teil 1 Ausgangslage und Wege für ein treibhausgasneutrales NRW

1.1 Klimaerwärmung: Ursachen und Folgen

Die Temperatur auf der Erde hat sich seit der Zeit vor der Industrialisierung schon um mehr als ein Grad erhöht. Zu diesem Ergebnis kommen die Berichte des Weltklimarates und andere Studien.[11] Einige Folgen lassen sich auch in Deutschland bereits beobachten: Die Gletscher in den Alpen sind stark zurückgegangen, im Sommer werden Temperaturrekorde erzielt und im Winter gibt es an vielen Orten keinen Schnee mehr. In Brandenburg kommt es zu Dürren und Waldbränden, der Rhein hat im Sommer weniger Wasser und im Winter öfter Hochwasser. In anderen Ländern sind die Folgen schon deutlich schlimmer, wie die Waldbrände in Brasilien und Australien im Jahr 2019 gezeigt haben.

Grafik 2: Treibhausgase in NRW 2018[10]



[10] Siehe LANUV (2020/1). Angegeben ist der Anteil des Gases am von Menschen verursachten Treibhauseffekt.

[11] Siehe IPPC (2014/1), IPPC (2018/1), WRI (2017/1), World Bank Group (2019/1), EPA (2019/1), UBA (2019/1)

Ursache für die Erwärmung ist, dass sich immer mehr Treibhausgase in der Erdatmosphäre ansammeln. Diese Entwicklung wird durch menschliche Aktivitäten verursacht. Das bekannteste Treibhausgas ist Kohlendioxid (CO_2). Es entsteht vor allem bei der Verbrennung von fossilen Stoffen wie Kohle, Gas oder Öl. Es gibt noch andere wichtige Treibhausgase: Das ist vor allem Methan (CH_4), das z.B. bei der Verdauung von Kühen entsteht oder wenn Erdgas (dessen Hauptbestandteil Methan ist) in die Atmosphäre entweicht, etwa durch Löcher in Leitungen. Das dritte Gas ist Lachgas (N_2O), das z.B. bei der Düngung von Feldern freigesetzt wird. Einen kleinen Teil machen Fluor-Verbindungen aus, die beispielsweise in Kältemitteln enthalten sind. In NRW spielen die anderen Treibhausgase jedoch nur eine geringe Rolle.

Je mehr Treibhausgase ausgestoßen werden, desto größer ist die Erwärmung. Je größer die Erwärmung ist, desto schwerer sind die Auswirkungen. Für eine Erwärmung um zwei Grad nennt der Bericht des Weltklimarats u. a. diese Folgen:[12]

- Ein Anstieg des Meeresspiegels um mehrere Meter.
- Mehr Extremwetter, je nach Region Hitzeperioden, Starkregenfälle oder Dürren.
- Überflutung von Küstenregionen.
- Die Ozeane werden wärmer, sodass das Eis auf dem Nordpolarmeer schmilzt, die Versauerung der Ozeane nimmt zu, der Sauerstoffgehalt nimmt ab. Dies führt z.B. dazu, dass Korallenriffe sterben, die zentral für das Überleben von Meerestieren sind.
- Es entwickelt sich eines der größten Artensterben der Erdgeschichte und eine tiefgreifende Störung wichtiger Abläufe in den Ökosystemen der Erde.[13]
- Die Erwärmung hat starke schädliche Folgen für Gesundheit, Ernährungssicherheit und Wasserversorgung vieler Menschen.
- Die Erwärmung hat schädliche Folgen für die Wirtschaftsentwicklung und verursacht hohe Kosten durch Überschwemmungen, Sturmschäden und Missernten.
- Die Zahl der Geflüchteten aus den am stärksten betroffenen Gebieten nimmt zu, wodurch soziale Konflikte geschürt werden.

[12] Siehe IPCC (2018/1)

[13] Siehe Ostberg (2013/1)

Kipppunkte im Klimasystem

Der Sonderbericht des Weltklimarats von 2018 stellt fest, dass die meisten genannten Folgen nicht mehr ganz vermeidbar sind. Jede weitere Erwärmung verschlimmert die Auswirkungen aber enorm. Das gilt auch für die Kosten. Zudem wächst mit zunehmender Erwärmung die Gefahr, dass sogenannte Kipppunkte erreicht werden.[14] Dies sind sprunghafte Veränderungen in der Umwelt. Einige dieser Kipppunkte lösen eine Art Teufelskreis aus. Wenn ein solcher Kipppunkt erreicht ist, führt das dazu, dass weitere Treibhausgase entweichen, was die Erde weiter erwärmt und weitere Kipppunkte anstößt. Die wichtigsten dieser Ereignisse sind:

- die Dauerfrostböden in Sibirien und Kanada tauen. Die aufgetauten Pflanzen werden von Mikroorganismen zersetzt ⇒ das setzt riesige Mengen Kohlendioxid und Methan frei.
- das Eis am Nordpol schmilzt ⇒ das dunkle Meer nimmt viel mehr Wärme auf als die weiße Eisdecke vorher. Dadurch erwärmt sich das Meer weiter.
- Erwärmung und geringere Niederschläge, verstärkt durch Waldrodungen und Waldbrände, verursachen Waldsterben ⇒ die Wälder im Amazonasbecken, in Sibirien und andernorts gehen noch weiter zurück. Wälder speichern bisher große Mengen an CO_2. Diese Speicher gehen dann verloren.
- Der Jetstream (ein sehr hoher Luftstrom) über dem Atlantik nimmt ab ⇒ noch mehr Hitzewellen und Rekordniederschläge treten in Europa auf.
- Der Monsun in Indien und China wird instabil ⇒ zusätzliche Überschwemmungen und Dürren in Indien und China.
- Der Golfstrom im Nordatlantik wird schwächer ⇒ wenn der Golfstrom ausbleibt, würde Nordeuropa rapide abkühlen und es käme eine kleine Eiszeit.
- Die Methanhydrate an den Abhängen der Tiefsee werden instabil ⇒ durch Erdrutsche werden gigantische zusätzliche Methanmengen frei und Tsunamis ausgelöst.

---

[14] Die wissenschaftliche Definition eines Kipppunktes nach Lenton (2008/1):
Es findet an einem kritischen Punkt
1. ein qualitativer Sprung statt
2. in einer relevanten wichtigen Systemeigenschaft
3. bei sich veränderndem Treiber.

Zu den Auswirkungen siehe Odenwald (2019/1), PIK (2019/1), PNAS (2018/1)

- Es kommt öfter zu sogenannten Monster-El-Niños ⇒ es treten unerwartete Dürren und Überschwemmungen auf allen Kontinenten auf.

Folgen des Klimawandels in NRW[15]

Nordrhein-Westfalen ist von vielen dieser Effekte zumindest indirekt betroffen, beispielsweise wenn Nahrungsmittelimporte deutlich teurer werden. Auch die Wirtschaft wird durch die Beeinflussung von Rohstofflieferungen und Transportketten betroffen sein.

Direkte Effekte treten für die Land- und Forstwirtschaft auf, zum Beispiel wenn Unwetter, Dürren oder mehr Niederschläge zu Ernteverlusten oder Waldzerstörung führen. Seit der Jahrtausendwende hat die Anzahl der Orkane über NRW deutlich zugenommen. Insbesondere Kyrill (2007), Ela (2014) und Friederike (2018) verursachten Schäden in Milliardenhöhe.[16] Allein Kyrill entwurzelte in NRW 25 Millionen Bäume. Ein Viertel der Arten und fast 40 Prozent aller Biotope sind nach einer Studie des Umweltministeriums NRW bereits negativ betroffen. Durch die Veränderung der Niederschläge werden im Winter und Frühjahr häufiger Überschwemmungen der Flüsse vorkommen, während im Sommer mit Niedrigwasser aufgrund von längeren Trockenzeiten zu rechnen ist.[17] Dies gefährdet die anliegenden Ortschaften und beeinträchtigt die Schifffahrt, ein wichtiges Verkehrsmittel für den Gütertransport in NRW.

Das Umweltbundesamt hält daher Maßnahmen wie tiefere Brunnen, Bau von Fernwasserleitungen, Umbau von Kanälen, Bau von Wasserreservoiren insbesondere für die Industrie und den Bau von zusätzlichen Schutzwänden und Dämmen zum Schutz von Ortschaften vor Überschwemmungen für erforderlich.[18] Weiterhin sind in den Großstädten mit über 100.000 Einwohner*innen, in denen fast die Hälfte der Bevölkerung von NRW wohnt, erhebliche Anpassungsmaßnahmen wie stärkere Begrünung erforderlich, um die Städte an das Klima anzupassen und soweit möglich die Temperaturen aktiv

[15] Die meisten der folgenden Informationen stammen aus LANUV (2020/2)

[16] Siehe Rentmeister (2018/1), muenster.de (2015/1), Wupperverband (2018/1)

[17] Siehe FAZ (2019/1), Zeit (2019/1), Die Binnenschifferin (2018/1)

[18] Siehe UBA (2013/1)

zu senken. Bereits im Klimaschutzplan von 2015 wurde der Klimaanpassungspolitik große Bedeutung zugemessen und 16 Handlungsfelder beschrieben.[19] Mittlerweile liegt der Entwurf eines separaten Klimaanpassungsgesetzes vor.

1.2 Das 1,5-Grad-Ziel

Damit die Folgen des Klimawandels nicht zu groß werden, haben sich 197 Staaten der Erde im Abkommen von Paris im Jahre 2015 darauf geeinigt, die Erwärmung deutlich unter zwei Grad, möglichst auf 1,5 Grad zu begrenzen. Der Weltklimarat stellt hierzu fest: Das 1,5-Grad-Ziel zu erreichen erfordert „rasche, weitreichende und beispiellose Veränderungen in sämtlichen Bereichen der Gesellschaft wie Energieerzeugung, Bodennutzung[20], Verkehr, Gebäude und Industrie“. Die Veränderung der Gesellschaft wird kurzfristig hohe Investitionskosten und große Anstrengungen brauchen. Trotzdem empfiehlt der Weltklimarat unbedingt das 1,5-Grad-Ziel zu verfolgen. Denn die Anstrengungen machen sich bezahlt. Nicht nur können die schlimmsten Folgen so vermieden werden. Auch sind die Kosten für die Einhaltung des 1,5-Grad-Ziels erheblich niedriger als die sonst auftretenden Schäden.[21]

Die Umstellung auf eine klimaneutrale Gesellschaft hat auch positive Auswirkungen auf andere Ziele, die von der UNO formuliert wurden[22]: Beispielsweise die Bekämpfung von Hunger und Armut und das Überleben von Tier- und Pflanzenarten. Auch die Stabilität der Wirtschaft wird gestärkt. Die Umstellung kann auch in Deutschland positive Auswirkungen auf Gesundheit, Lärmschutz, Naturschutz, Wohnkomfort und Arbeitsplätze haben.

Eine wichtige Rolle spielt der Zeitfaktor. Noch vor wenigen Jahren gab es ungelöste technische Probleme, die eine schnelle Umstellung in weniger als 20 Jahren in Frage

[19] Siehe MKULNV (2015/1)

[20] Wir übersetzten in dieser Studie den Begriff „land-use“ mit „Bodennutzung“, um Verwechslungen mit der Landwirtschaft (englisch „agriculture“) zu vermeiden.

[21] Siehe Agora Energiewende (2018/1)

[22] Siehe UNO (2020/1)

stellten. Dies hat sich durch die Vielzahl von neuen Entwicklungen der letzten Jahre geändert. Hier einige wichtige Beispiele:

- Die Preise von Photovoltaik-Anlagen sind stark gesunken. Sie benötigen weniger Rohstoffe und produzieren auf der gleichen Fläche mehr Strom.[23]
- Neue Windenergieanlagen produzieren viel mehr Strom als alte, weil sie bereits bei schwachem Wind die volle Leistung bringen können (Schwachwindanlagen).
- Infolgedessen ist es an vielen Standorten bereits heute günstiger, Strom erneuerbar zu produzieren, statt durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen oder in Kernkraftwerken.[24]
- Die Preise von Batterien zur Speicherung von elektrischer Energie sind rapide gesunken und ihr Wirkungsgrad ist gestiegen.
- Es gibt neue Erdkabel-Technologien, um Gleichstrom zu transportieren.
- In wenigen Jahren werden Elektroautos günstiger als Autos mit fossilem Antrieb sein.
- Auch für andere wichtige Technologien wie Wärmepumpen, Elektrolyseure, Dämmstoffe und elektrische Oberleitungen für LKW sind die Preise rasch gesunken.
- In Luleå (Schweden) wird bereits das erste Stahlwerk gebaut, in dem ohne Kohleverbrennung aus Eisenerz CO_2-freier Stahl produziert werden soll.[25]
- Auch für die Chemieindustrie liegen konkrete Konzepte vor, wie die Produktion künftig treibhausgasfrei werden kann.[26]

Die Rolle von Deutschland und NRW

Oft wird gesagt, dass Deutschland nur gut zwei Prozent der weltweiten Emissionen verursacht und es deshalb keine Bedeutung hat, was Deutschland tut. Erst recht gilt das für NRW mit 0,7 Prozent. Es sprechen aber einige Gründe dafür, dass es sehr wohl wichtig

[23] Siehe Fraunhofer ISE (2019/1)

[24] Siehe Fraunhofer ISE (2018/1)

[25] Siehe Ehlerding (2019/1); auch in Deutschland sind Pilotanlagen in Planung – siehe Salcos-Salzgitter-AG (2020/1)

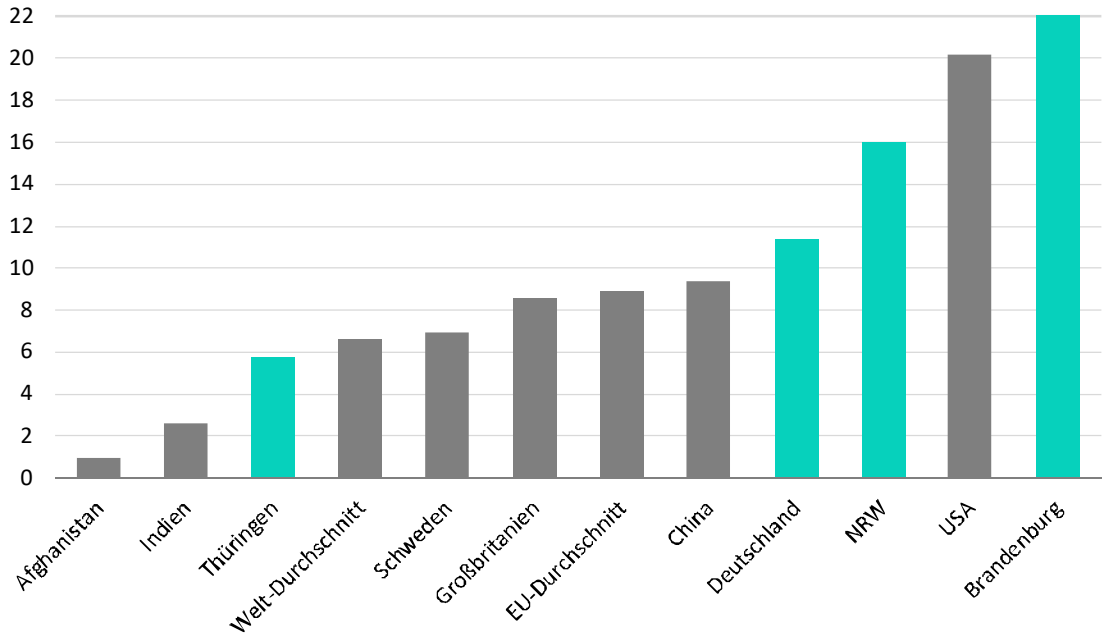
[26] Siehe VCI (2019/1), Agora Energiewende (2020/5)

ist, ob Deutschland einen engagierten Klimaschutz betreibt – und das gilt in besonderer Weise für NRW:

Erstens gilt: Deutschland hat das Pariser Abkommen unterzeichnet und sich, wie alle anderen unterzeichnenden Länder, dazu verpflichtet das 1,5-Grad-Ziel oder zumindest das 2-Grad-Ziel einzuhalten. Damit das 1,5-Grad-Ziel erreicht werden kann, müssen *alle* Länder klimaneutral werden, egal wie klein oder groß sie sind.

Zweitens: Wenn man darauf schaut, wie viel pro Kopf ausgestoßen wird („CO_2-Fußabdruck"), liegt Deutschland deutlich über dem weltweiten Durchschnitt. Zwar stoßen Länder wie Indien oder China mehr aus als Deutschland. Allerdings haben diese Länder

Grafik 3: "Fußabdruck" von ausgewählten Staaten und Bundesländern 2015 (Tonnen CO_2-Äquivalente pro Kopf)



Aktuellere Zahlen liegen nicht vor. Seither dürften sich die Zahlen etwas verschoben haben – NRW deutlich weniger, China mehr usw. Die Zahlen enthalten nicht den internationale Flugverkehr und die Seeschifffahrt. Es sind die jeweiligen lokalen Emissionen. Rechnet man nach dem Verursacherprinzip und berücksichtig die Emissionen der Importe und subtrahiert die der Exporte, dann sind die Emissionen von Deutschland um 10% höher.[27]

[27] Siehe European Commission (2020/1), Wikipedia (2021/3) und AEE (2020/1)

mehr als 15-mal so viele Einwohner*innen wie Deutschland. Auch historisch hat Deutschland eine große Verantwortung. Es gehört zu den fünf Ländern, die in der Geschichte über die Hälfte aller Treibhausgase verursacht haben.[28]

Innerhalb Deutschlands und auch in der EU spielt Nordrhein-Westfalen eine zentrale Rolle. Die Pro-Kopf-Emissionen liegen wegen dem hohen Anteil an Kohleverstromung um 41 Prozent über dem deutschen Durchschnitt und doppelt so hoch wie im EU-Durchschnitt. Auch die starke Konzentration der Grundstoffindustrie in NRW trägt zu den hohen Emissionen bei.

Drittens: Wenn es gelingt, ausgerechnet NRW auf einen Pfad zu bringen, der einen wesentlichen Beitrag in Richtung des 1,5-Grad-Kurses bedeutet, wäre das ein deutliches Signal. Darin liegt aber auch eine enorme Chance für die Modernisierung von NRW und die exportorientierte Wirtschaft. Wenn ausgerechnet Deutschland als eines der am dichtesten besiedelten Industrieländer vormacht, wie es geht und die notwendigen technischen und sozialen Entwicklungen anstößt, dann würden sich weltweit zahlreiche Staaten daran orientieren. Das wäre ein Signal dafür, dass dies der Weg in die Zukunft ist. Gerade für die ärmeren Staaten könnte es der notwendige Anstoß sein, diesen Weg direkt zu bestreiten und nicht erst auf eine fossile Industrialisierung zu setzen.

1.3 Die Treibhausgasquellen in Nordrhein-Westfalen

Im Jahre 2018 stieß Nordrhein-Westfalen 270 $MtCO_{2eq}$ Treibhausgase aus.[29] Nach den vorläufigen Schätzungen sind sie 2019 um 16 Prozent auf 227 $MtCO_{2eq}$ gesunken. Damit lag der Anteil von NRW an den gesamten Emissionen in Deutschland 2018 bei 29 Prozent. Pro Person sind das 41 Prozent mehr Emissionen als im Bundesdurchschnitt. In Grafik 4 ist dargestellt, wie hoch die Emissionen pro Einwohner*in im Vergleich zum Bundesdurchschnitt sind.

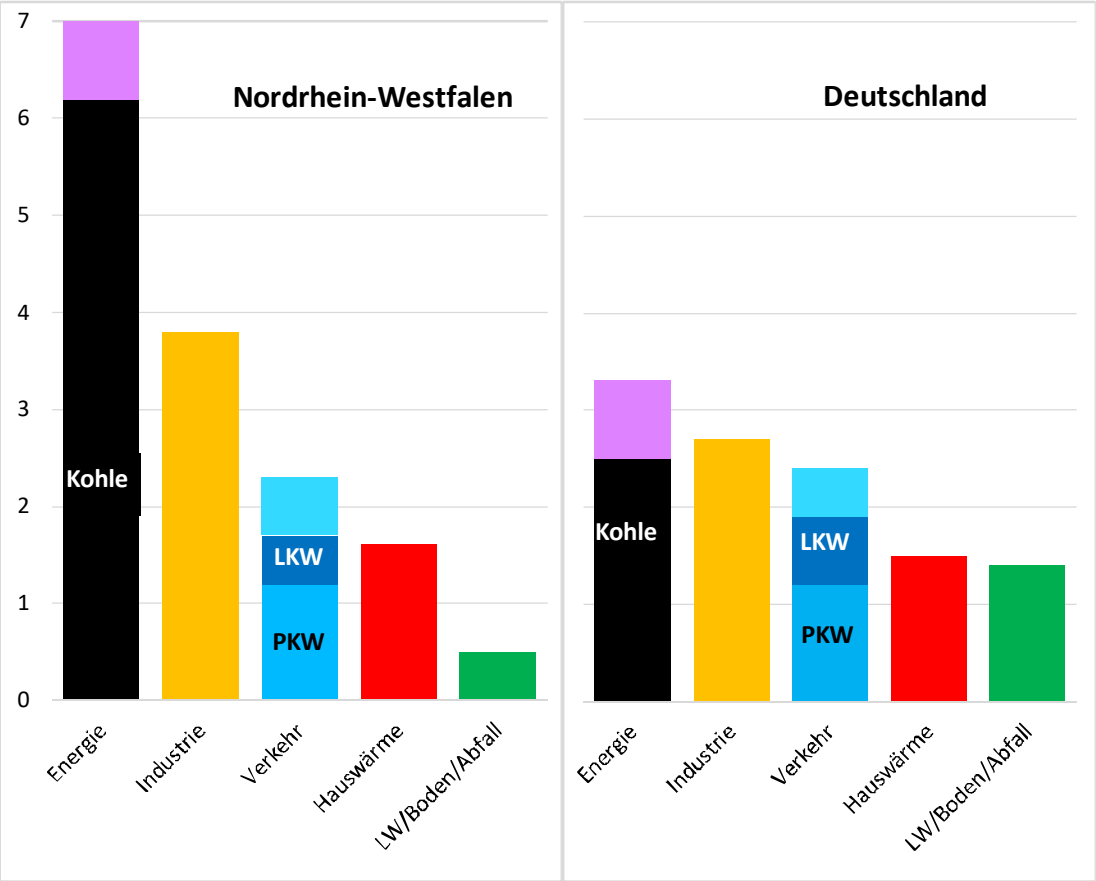
[28] Siehe Ritchie (2019/1)

[29] Wir geben in dieser Studie die Emissionen stets in $MtCO_{2eq}$ (Megatonnen CO_2-Äquivalente) an. Diese Angabe enthält jeweils die Mt (Megatonnen) Kohlendioxid plus die Äquivalente der anderen Treibhausgase. Diese werden dazu jeweils aufgrund ihrer unterschiedlichen Treibhausgaswirkung umgerechnet. So hat Methan den Faktor 28, Lachgas den Faktor 265 und andere Treibhausgase sogar Faktoren über 1.000.

Die Zusammensetzung der Emissionen unterscheidet sich erheblich vom restlichen Deutschland. Auffällig ist vor allem der große Sektor Energiewirtschaft mit fast der Hälfte der Emissionen. Dagegen fallen Landwirtschaft und Bodennutzung deutlich weniger ins Gewicht. Die wichtigsten Quellen und Unterschiede sind:

- Der Energiesektor umfasst 46 Prozent der Emissionen, davon stammen fast 90 Prozent aus der Erzeugung und Verbrennung von Kohle. 54 Prozent aller Kohle-Emissionen in Deutschland erfolgen in NRW. Die Restemissionen im Energiesektor fallen überwiegend auf die Verbrennung von Erdgas und Müll.
- Der Anteil des Sektors Industrie pro Einwohner*in ist in NRW um die Hälfte größer als in Deutschland. Grund dafür ist der große Anteil an den Grundstoffindustrien zur Erzeugung von Stahl, chemischen Grundstoffen, Zement sowie Aluminium und Papier.

Grafik 4: Die wichtigsten Treibhausgasquellen *(in Tonnen pro Einwohner*in 2018)*[30]



- Im Verkehrssektor fällt über die Hälfte der Emissionen auf den PKW-Verkehr. Dagegen sind die Emissionen des LKW-Verkehrs nur halb so groß wie im Bundesschnitt. Ursache ist die Stärke der Binnenschifffahrt und die geringen Transportentfernungen aufgrund der hohen Bevölkerungskonzentration an Rhein und Ruhr. Die Emissionen der Binnenschifffahrt in NRW machen die Hälfte der Emissionen der Binnenschifffahrt in Deutschland aus, sind aber trotzdem gering. Der Anteil der Emissionen der Bahn liegt unter einem Prozent.
- Die Emissionen im Sektor Wärme entstehen durch Öl- und Gas-Heizungen sowie durch die Erzeugung von Fernwärme. Sie sind im Verhältnis zur Bevölkerungszahl etwas höher als im Bund.

[30] Siehe Anlage 1

- Die Emissionen in der Landwirtschaft fallen deutlich geringer ins Gewicht als bundesweit. Dabei dominiert die Viehhaltung für die Fleisch- und Milchproduktion. Die Emissionen aus der Bodennutzung sind geradezu unbedeutend. Dagegen sind die Kompensationsleistungen der Wälder erheblich und können bis 2050 weiter ausgebaut werden.
- Die Emissionen im Sektor Abfälle entstehen durch Ausdünstungen von Müll-Deponien, Abwasserrohren und Kläranlagen. Sie sind aufgrund der großen Fortschritte der letzten Jahrzehnte nur noch minimal.

1.4 Der Emissionspfad für Deutschland und NRW

Wenn das 1,5-Grad-Ziel erreicht werden soll, darf weltweit nur noch eine bestimmte Menge an Treibhausgasen ausgestoßen werden. Der Weltklimarat hat diese Menge berechnet. Sie ist das sogenannte Restbudget. Wenn es aufgebraucht ist, müssen die restlichen Emissionen teuer kompensiert werden (siehe dazu unter »Negative Emissionen«).

Die Frage ist nun, wie sich das Restbudget auf die Länder der Welt aufteilt.[31] Je nachdem, welches Budget Deutschland beansprucht, ergeben sich unterschiedliche Pfade. Wenn das Budget der Welt nach Einwohnerzahl aufgeteilt würde, stünde Deutschland etwa ein Prozent[32] zu. Dann müsste Deutschland bereits 2028 klimaneutral werden. Uns ist keine wissenschaftliche Studie bekannt, die diesen Weg für machbar hält. Gleichwohl müssen die Anstrengungen von Deutschland und NRW so ambitioniert sein, dass alles unternommen wird, um möglichst frühzeitig Klimaneutralität zu erreichen. Dies ist auch deshalb geboten, weil es mit Blick auf die gerechte Verteilung von globalen Lasten und Chancen eine besondere Bringschuld der Industrieländer gibt.

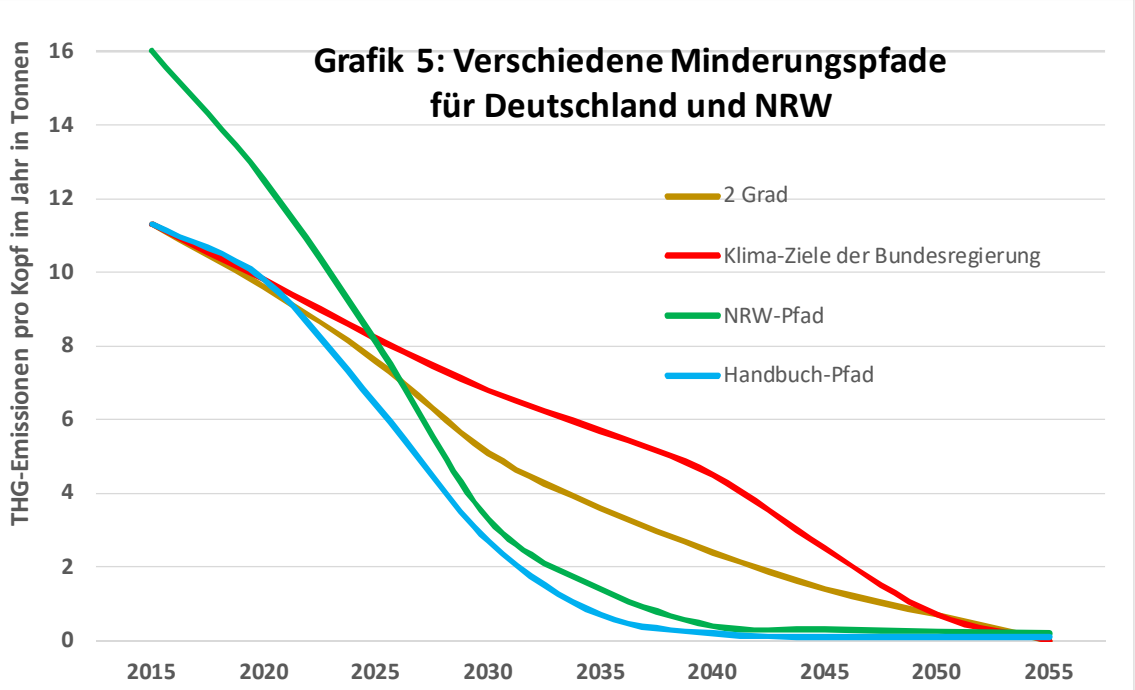
Heute emittiert Deutschland pro Kopf doppelt so viele Treibhausgase wie der Durchschnitt der Welt. Wenn wir so weiter machen, dann würden wir eine doppelt so große Menge an Emissionen verursachen.

---

[31] Zu den Budgetrechnungen für die Welt, Deutschland und NRW: Siehe Anlage 2.

[32] Deutschland hat heute 1,1% der Weltbevölkerung. Im Jahre 2050 werden es nur noch 0,9% sein. Daher rechnen wir mit 1%.

Aus den dieser Studie zugrunde liegenden Recherchen für NRW und den im Handbuch Klimaschutz Deutschland getroffenen Annahmen der Reduktionspotenziale für die einzelnen Sektoren lässt sich errechnen, dass Nordrhein-Westfalen ab 2020 noch ein Budget von circa 1.740 $MtCO_{2eq}$ bis zur Klimaneutralität benötigen wird. Die Pro-Kopf-



Kopf-Emissionen in NRW sinken schneller als in Deutschland insgesamt, dadurch nähert sich NRW dem Niveau Deutschlands an. Auf dem errechneten Weg wäre es technisch möglich, dass NRW etwa 2040 klimaneutral sein kann (s. Grafik 5).[33] Unter den derzeitigen Rahmensetzungen der EU würde es mindestens fünf Jahre länger dauern. Wir nehmen an, dass die Reduktion am Anfang schneller erfolgt. Dann bleibt am Schluss etwas mehr Zeit für die wenigen schwierigen Bereiche. Deutschland und NRW können auf diesem Weg eine wichtige Vorreiterrolle bei der Entwicklung der Technologien und Maßnahmen für die Transformation spielen.

[33] Herleitung siehe Anlage 3: Der Minderungspfad für Nordrhein-Westfalen

Negative Emissionen

Allerdings muss die Gesellschaft nicht „nur“ auf null kommen, also keine Treibhausgase mehr ausstoßen. Es müssen sogar wieder Treibhausgase aus der Atmosphäre entfernt werden. Dies nennt man „negative Emissionen“. Dafür gibt es drei Gründe:

1) Einige Kipppunkte sind bereits erreicht. Zum Beispiel schmelzen die Permafrostböden in Sibirien. Dadurch werden in den nächsten Jahrzehnten sehr viele Treibhausgase freigesetzt.

2) Manche Emissionen können nicht vermieden werden. Dies betrifft vor allem: Die Herstellung von Zement, Restemissionen des Flugverkehrs, den Methan-Ausstoß von Kühen und anderen Wiederkäuern sowie die Lachgas-Ausdünstungen bei der Düngung von Feldern. Theoretisch wäre es möglich, die Heiztemperaturen zu senken, keine Kühe mehr zu halten und nicht zu fliegen. Diese Optionen wurden bisher weder in der Wissenschaft noch in den Medien als realistische Lösungen diskutiert.

3) Langfristig muss auf jeden Fall Kohlendioxid wieder aus der Luft entfernt werden, um das Schmelzen des Eises auf Grönland und der Antarktis zu stoppen. Dies findet in dieser Studie noch keine Berücksichtigung. Hierfür müssen in den kommenden Jahrzehnten Lösungen gefunden werden.

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, *negative Emissionen* zu erzeugen. Zum einen können zusätzliche Flächen neu bewaldet werden. Zum anderen können und müssen wir vermutlich den Kohlenstoff von Pflanzen einfangen und unterirdisch lagern.[34] Zum dritten kann Kohlendioxid bei der Verbrennung abgeschieden und unterirdisch verpresst werden (Carbon Capture and Storage) – siehe dazu im Teil 3 in Kapitel »Landwirtschaft, Ernährung, Bodennutzung und Kompensation« im Abschnitt

[34] Es gibt zwei Verfahren: a) Die Pyrolyse: Die Herstellung von Pflanzenkohle (auch Biokohle genannt) erfolgt durch Erhitzung von Biomasse unter Abwesenheit von Sauerstoff. Dadurch entsteht stabile Kohle. Wenn sie tief in der Erde vergraben wird, bleibt der Kohlenstoff über Tausende von Jahren gespeichert und wird damit der Atmosphäre entzogen. Pflanzenkohle kann auch in Ackerböden eingearbeitet werden, wird dann aber nicht so lange gespeichert. b) Bei BECCS (Bio Energy with Carbon Capture and Storage) wird die Energieproduktion aus der Biomasse schnell wachsender Pflanzen oder von organischen Reststoffen mit der Abscheidung und Speicherung von CO_2 kombiniert. Dabei erfolgt eine Speicherung des gasförmigen CO_2 in unterirdischen geologischen Formationen. Diese Verfahren sind jedoch noch hoch umstritten.

»Kompensationen«. Auch andere Techniken sind in der Diskussion, z.B. gigantisch große Mengen an Gestein zu zerbröseln und in die Ozeane zu schütten, da dadurch CO_2 gebunden wird. Viele dieser Techniken sind aber noch nicht ausgereift, sehr teuer und stark umstritten. Erstens ist nicht sicher, in welcher Größenordnung sie überhaupt funktionieren. Zweitens haben sie wahrscheinlich negative Nebeneffekte.[35]

In jedem Fall ist klar: Es ist sehr viel leichter, günstiger und sicherer Treibhausgas einzusparen, als es später wieder aus der Luft zu entfernen.

1.5 Das klimaneutrale Energiesystem

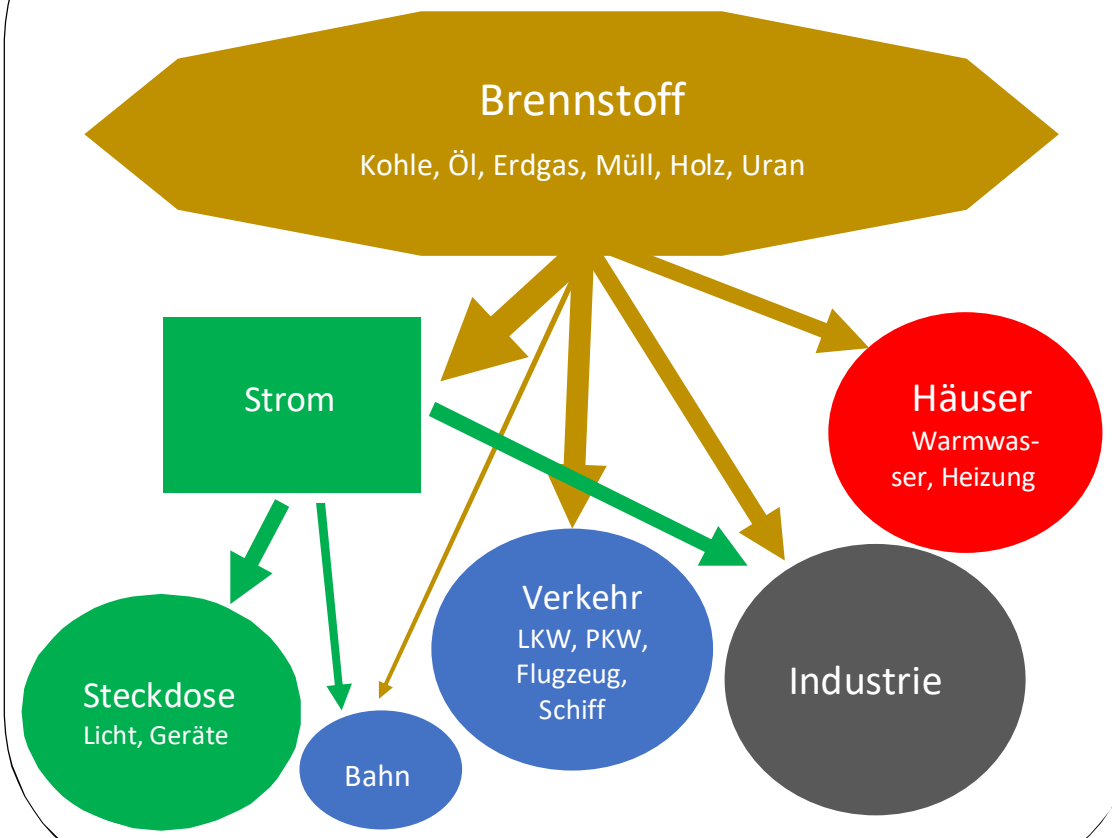
Im Zentrum der Transformation zur klimaneutralen Gesellschaft steht der Übergang vom „fossilen“ zum klimaneutralen Energiesystem. Dieser Übergang ist grundlegend für alle Sektoren und für die sogenannte Sektorkopplung.[36]

Im Zentrum des alten Energiesystems (siehe Grafik 6) stand die Energieerzeugung durch fossile Brennstoffe wie Kohle, Öl und Erdgas. Hinzu kam das Uran in den Kernkraftwerken. Der einzige relevante erneuerbare Brennstoff war das Holz. Aus den Brennstoffen wurde die Wärme für Häuser, die Motorkraft für den Verkehr und die Energie für Industrie und die Erzeugung des elektrischen Stroms gewonnen. Dieses Energiesystem war mit großen Umwandlungsverlusten verbunden. Ein Automotor kann beispielsweise nur weniger als 20 Prozent der Energie, die im Kraftstoff steckt, in Bewegung umsetzen. Der Rest geht in Form von Wärme verloren.

[35] Siehe Nature Communications (2018/1)

[36] Die Sektorkopplung wird im Teil 3 bei der Darstellung der Transformation der einzelnen Sektoren behandelt.

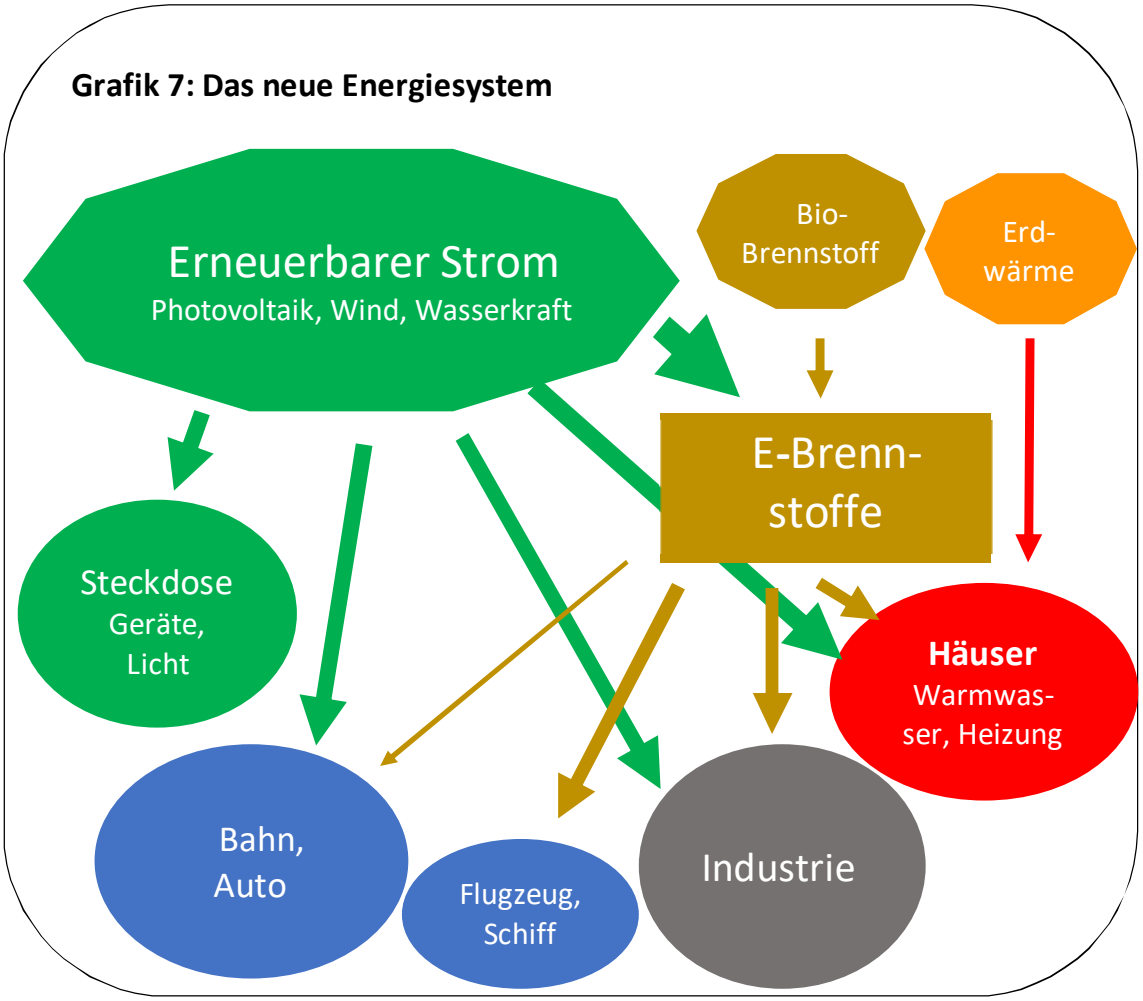
Grafik 6: Das alte Energiesystem



Das Energiesystem der Zukunft

In Zukunft wird es genau umgekehrt sein (siehe Grafik 7): Die Grundlage des Systems wird der elektrische Strom sein. Die wichtigsten Stromquellen sind Wind und Sonne, ergänzt um die Wasserkraft, Biomasse aus organischen Reststoffen und Erdwärme. Mit dem Strom werden künftig auch Straßenfahrzeuge angetrieben und Häuser mittels einer Wärmepumpe geheizt. Der Strom kann auch in Industrieprozessen eingesetzt werden, die vorher fossile Brennstoffe benötigten. Die direkte Verwendung des Stroms ist sehr effizient, denn es entstehen weniger Verluste. Aus technischen Gründen ist es jedoch nicht möglich, alle Energieverbraucher*innen auf direkte Stromnutzung umzustellen.

Die meisten Flugzeuge und Schiffe können nach aktuellem Stand der Technik nicht elektrisch betrieben werden. Auch in der Industrie, bei der Versorgung der Häuser mit



Wärme und in anderen Bereichen werden künftig noch Brennstoffe benötigt. Diese stammen aber nicht aus der Erde, sondern werden mit Hilfe von grünem Strom erzeugt.[37] Deswegen sind sie klimaneutral.

Als ergänzende Energiequellen werden künftig Bio-Brennstoffe aus organischen Reststoffen sowie Wärmequellen wie Erdwärme, Luftwärme und direkte Sonnenwärme genutzt werden. Berechnungen ergeben, dass das neue System langfristig nicht teurer werden muss als das alte. Aber es werden große Investitionen erforderlich sein, um die notwendige Infrastruktur zu schaffen. (S. Kapitel 2.7 Ökonomie der Umstellung)

[37] Zu den Begriffen „grüne Brennstoffe“, „E-Brennstoffe“, „Bio-Brennstoffe“ usw. siehe Anlage 4

1.6 Minderungspfade für die Sektoren

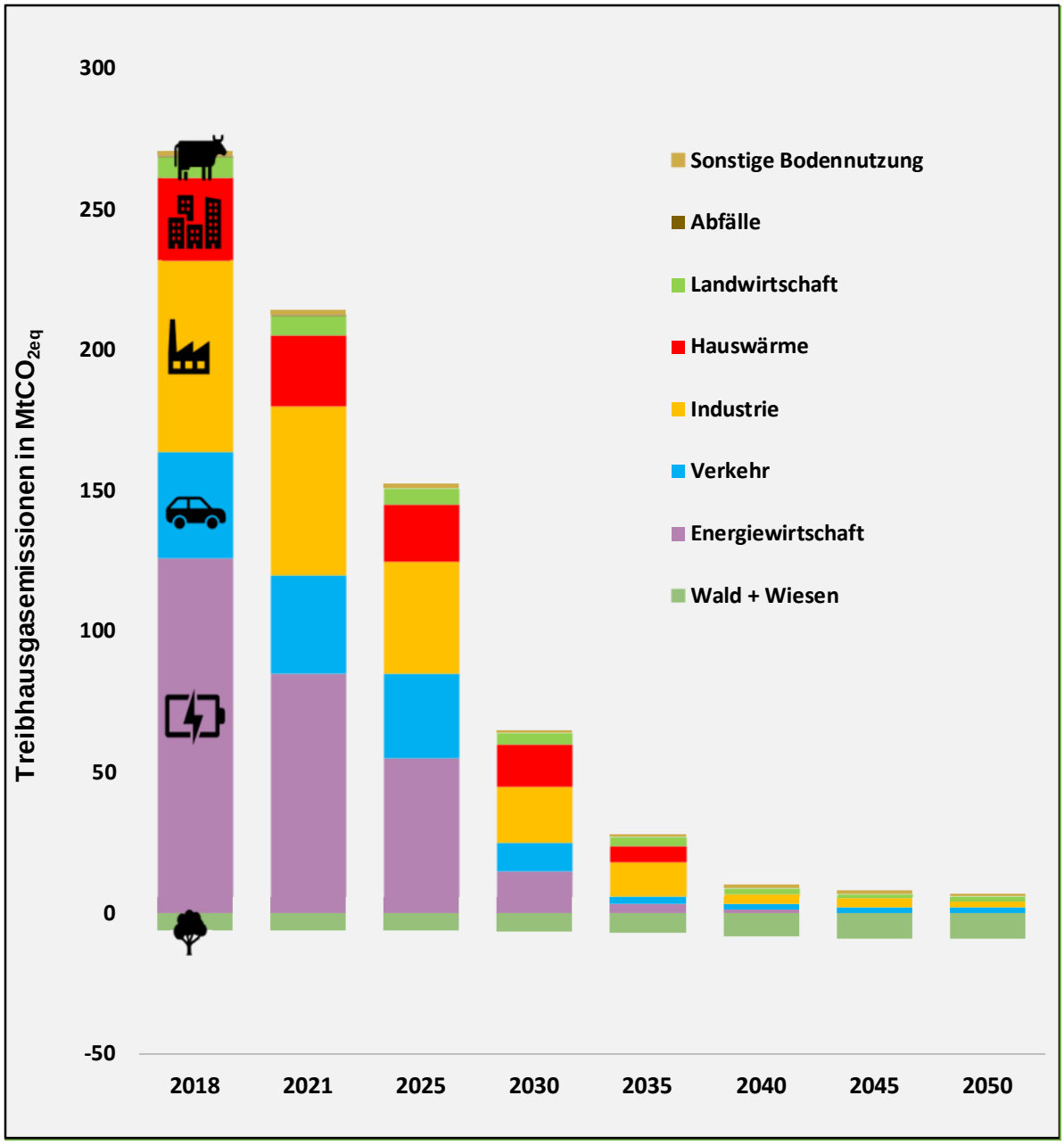
Die untenstehende Grafik 8 beschreibt einen Weg, wie sich die Treibhausgasemissionen in den einzelnen Sektoren in den kommenden Jahren entwickeln können, wenn NRW einen angemessenen Beitrag zum Erreichen des 1,5-Grad-Ziels leisten soll. Die dargestellte Entwicklung entspricht in etwa einem Mittelweg, der sich aus der Vielzahl der unterschiedlichen wissenschaftlichen Quellen ergibt. Damit soll allerdings nicht ein bestimmter Transformationspfad festgeschrieben werden. Es geht vielmehr darum, die Plausibilität des von uns auf Basis vieler wissenschaftlicher Studien dargestellten Weges darzustellen. In Teil 2 und Teil 3 dieser Studie werden unterschiedliche Varianten für diese Entwicklung beschrieben, die dann auch zu unterschiedlichen Reduktionspfaden führen können. Eine wichtige Wegentscheidung wird dabei die Debatte über die Rolle der Wasserstoffwirtschaft festlegen, die insbesondere für die künftige Entwicklung von Nordrhein-Westfalen eine entscheidende Rolle spielen wird.[38]

Egal welche Variante gewählt wird, die Herausforderungen sind groß. Bereits innerhalb der nächsten 10 Jahre können und sollten drei Viertel der heutigen Emissionen eingespart werden. Dies kann nur gelingen, wenn der Kohleausstieg bis dahin vollzogen ist und der Ausbau der Erneuerbaren Energien so schnell beschleunigt wird, dass der wachsende Strombedarf durch Elektroautos, Wärmepumpen und neue Industrieprozesse mit grünem Strom gedeckt werden kann. Ab 2035 sollte die Stromerzeugung und bis auf die Luftfahrt auch der Verkehr treibhausgasfrei sein. Die Stromerzeugung muss aber in den Folgejahren noch weiter ausgebaut werden. Dazu werden in erheblichem Umfang zusätzliche Importe von Strom und grünen Brennstoffen aus anderen Bundesländern und anderen Staaten erforderlich sein.

Die Transformation des Sektors Hauswärme braucht etwas länger und aber es ist technisch möglich, dass dieser um 2040 klimaneutral sein kann. Ab 2040 bleiben noch 10 $MtCO_{2eq}$/a (vier Prozent) der heutigen Emissionen von NRW übrig. Diese stammen überwiegend aus der Herstellung von Zement und anderen Baustoffen. Der Rest resultiert aus der Landwirtschaft und dem Flugverkehr. Sie sind, soweit wir heute wissen, nicht

[38] Siehe dazu Kapitel 2.2 »Varianten des Energiesystems: E-Brennstoffe und Importe«

Grafik 8: Ein möglicher Weg zur Klimaneutralität[39]



Anmerkung: Die ersten Abschätzungen lassen erwarten, dass das für 2021 erwartete Ausgangsniveau für die Rechnungen in dieser Studie bereits 2020 erreicht wurde. Wenn es nach der Corona-Krise nicht zu einem Anstieg kommt, würde das die Erreichung des ambitionierte Reduktionsziels für 2025 erleichtern.

[39] Für die Zahlen zur Grafik 8 siehe Anlage 3

vermeidbar. Damit NRW in der Summe klimaneutral wird, müssen diese Emissionen deshalb ausgeglichen werden. In NRW kann die Kompensation ab 2040 durch zusätzliche Wälder und Wiesen erfolgen. Dann wird NRW klimaneutral. Details zu den Entwicklungen in den einzelnen Sektoren finden sich in den entsprechenden Unterkapiteln zu den Sektoren in Teil 3.

Teil 2 Rahmenbedingungen und sektorübergreifende Maßnahmen

Die Umstellung auf Klimaneutralität ist eine große Herausforderung, die nicht durch technische Änderungen allein zu bewältigen ist. Nur wenn Politik, Wirtschaft und Gesellschaft Klimaschutz zu einem richtungsweisenden Thema machen und wirklich zu Veränderungen bereit sind, kann die »große Transformation« hin zu einer nachhaltigen Gesellschaft gelingen. Damit die Maßnahme in den einzelnen Sektoren, die in Teil 3 beschrieben werden, umgesetzt werden können, braucht es günstige Rahmenbedingungen, die in diesem Teil beschrieben werden:

Dazu gehören Veränderungen unserer Gewohnheiten, zum Beispiel in der Mobilität, die nur gelingen werden, wenn die Klimapolitik als eine gemeinsame gesellschaftliche Aufgabe verstanden wird und die Menschen vor Ort in den Regionen und Kommunen an der Gestaltung der Veränderungen beteiligt werden. Große Infrastrukturprojekte wie das Bauen von Bahntrassen oder Stromleitungen dauern heute meist zu lange und müssen beschleunigt werden. Dafür ist es auch wichtig, genügend Fachkräfte auszubilden, da der Fachkräftemangel sonst zum Flaschenhals der Umstellung werden könnte. Eine konsequente Recyclingwirtschaft soll in Zukunft garantieren, dass knappe und energieintensive Ressourcen optimal genutzt und nicht mehr verschwendet werden. Entscheidend sind natürlich auch die finanziellen Rahmenbedingungen.

Die Umstellung wird anfangs viele Investitionen erfordern. Langfristig zahlen sich diese jedoch aus. Die Studien gehen insgesamt von positiven wirtschaftlichen Effekten von Klimaschutz aus.[40] Durch gezielte Gestaltung der Maßnahmen kann deren soziale Härte abgefedert werden, sodass beispielsweise der kontrovers diskutierte Treibhausgaspreis Menschen mit niedrigem Einkommen entlastet.

---

[40] Siehe z. B. Fraunhofer IWES (2014/1)

Die Umstellung auf eine klimaneutrale Gesellschaft kann nur als gesamtgesellschaftliche Aufgabe gelingen. Sie benötigt daher ein Zusammenspiel aller politischer Ebenen und der Akteur*innen der Zivilgesellschaft. Die Zeit scheint dafür reif zu sein. Immer mehr zivilgesellschaftliche Organisationen von Umwelt- und Klimaschutzorganisationen, Gewerkschaften, Wirtschaftsverbänden, Sozialverbänden, Kirchen, Migrantenorganisationen und viele Akteur*innen beteiligen sich mittlerweile an der Transformationsdebatte und an Initiativen zu ihrer Umsetzung.

Auch in der Politik sind alle Ebenen gefragt. So werden grundsätzliche Weichenstellungen in der Agrarpolitik und die Finanzmittel dafür durch die EU im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) festgelegt. Wichtige finanzielle Rahmenbedingungen in der Verkehrspolitik (Fernverkehr, aber auch Finanzierung des öffentlichen Nahverkehrs) und in der Energiepolitik werden durch die Steuer- und Abgabenpolitik des Bundes gesetzt. Bei der Rahmenplanung für den Ausbau der Wind- und Solarenergie spielen die Länder eine wichtige Rolle. Fast immer ist aber ein Zusammenspiel von mehreren politischen Ebenen zugleich erforderlich. Erfolgreich kann diese Politik daher nur sein, wenn sich die politischen Akteur*innen der verschiedenen Ebenen und gesellschaftlichen Bereiche aufeinander abstimmen und gemeinsam agieren.

2.1 Die Rolle der Kommunen und Regionen

Eine zentrale Rolle spielen die Kommunen. Dafür gibt es zwei Gründe: Erstens sind die Kreise, Städte und Gemeinden und in gewissem Umfang auch die Regionen[41] in vielen Bereichen die wichtigste Ebene, die für die konkrete Umsetzung des Klimaschutzes vor Ort zuständig ist. Dies gilt vom Verkehr über die Energie- und Wärmeversorgung, den Wohnungsbau, die Flächennutzung, die Abwasser- und Recyclingwirtschaft bis hin zur Kommunikation und Beaufsichtigung der Wirtschaft. Gerade die Sektorkopplung, die für das Gelingen einer Transformation auf der Basis von Erneuerbaren Energien absolut zentral ist, muss auf der kommunalen Ebene gelingen – nicht am grünen Tisch, sondern im bestehenden „System“ Stadt.

Zum anderen sind Kommunen die Schnittstelle zu den Bürger*innen. Denn Bürgerbeteiligung findet in erster Linie vor Ort statt.[42] Auf den höheren Ebenen beteiligen sich dann eher Verbände und mehr oder weniger professionelle Organisationen. Zudem sind die Kommunen wichtige Vorbilder im Klimaschutz, die Privatpersonen und Unternehmen zum Nachahmen animieren können.

Viele Kommunen haben dies bereits erkannt und zum Teil sogar Beschlüsse gefasst, dass die Kommune in den kommenden Jahren bzw. Jahrzehnten klimaneutral werden soll. Allein 30 Kommunen in NRW haben den Klimanotstand ausgerufen. Auch die Länder haben dies teilweise erkannt und den Kommunen zusätzliche Aufgaben zur Bewältigung der durch den Klimawandel notwendigen Transformation übertragen.

Insbesondere in NRW befinden sich jedoch viele Kommunen in finanziell schwierigen Situationen, was eine verlässliche finanzielle Unterstützung durch Land und Bund zur Voraussetzung dafür macht, dass die Kommunen ihre Rolle in der Transformation angemessen ausfüllen können. Wir werden im Folgenden immer wieder auf diese zentrale Rolle der Kommunen eingehen. Das gilt bei »Planungsrecht und Bürgerbeteiligung«

[41] Die Regionen sind in Deutschland sehr unterschiedlich gefasst. Während man in den kleinen Flächenländern von Regionen sprechen kann, repräsentieren in NRW die Regierungsbezirke bzw. auch der Regionalverband Ruhr diese Ebene, die jeweils auch Regionalräte bzw. ein Regionalparlament besitzen.

[42] Siehe Tiddens (2014/1), Hentschel (2018/1)

(Kapitel 2.4), bei der »Digitalisierung« (Kapitel 2.5), es gilt aber ganz besonders bei der konkreten Diskussion der Umstellung der einzelnen Sektoren in Teil 3:

- Im Sektor 1 (Stromversorgung) geht es u.a. um die Rolle der Stadtwerke, die Ausweisung von Flächen für Wind- und Solarenergie, den Ausbau der lokalen Stromnetze für die Anbindung von Photovoltaik-Anlagen, Speicher und Ladestationen.
- Im Sektor 2 (Industrie) geht es um die Unterstützung der Wirtschaft bei der Transformation und die Abstimmung der Transformation in allen Bereichen (u.a. Strom, Fernwärme, Verkehr, Entsorgung) mit den Anforderungen der Wirtschaft.
- Im Sektor 3 (Hauswärme) geht es u.a. um die kommunale Wärmeplanung und die flächendeckende aufsuchende Energieberatung mit dem Ziel der schrittweisen Sanierung aller Gebäude und dem Ausbau der Fernwärme.
- Im Sektor 4 (Verkehr) geht es um den Umbau der Städte mit dem Vorrang für Fußgänger- und Fahrradverkehr sowie für den ÖPNV, um den Ausbau von ÖPNV- und Carsharing-Angeboten bis hin zur Regelung des autonomen Verkehrs sowie um die Bereitstellung der Ladeinfrastruktur für Elektro-Fahrzeuge.
- In den Sektoren 5 bis 7 (Landwirtschaft, Ernährung, Bodennutzung, Abfallentsorgung) geht es zum einen um die Flächenplanung in den Regionen, Kreisen und Städten. Zum anderen werden die Kommunen eine zentrale Rolle beim Thema Ernährung spielen. [43] Schulen, Kindertagesstätten, Kantinen in öffentlichen Einrichtungen wird eine Vorbildfunktion zugeordnet. Schließlich ist die Abfallentsorgung eine wichtige kommunale Aufgabe, sodass die Kommunen auch bei der Umsetzung der künftigen Recyclingwirtschaft eine Schlüsselrolle spielen werden.

Aufgrund dieser Herausforderungen wird die Rolle der Kommunen in den folgenden Kapiteln immer wieder ein wichtiges Thema sein. Insgesamt ergibt sich daraus eine Stärkung der Rolle der Kommunen, die auch aus anderen Gründen schon seit längerem diskutiert wird.[44]

---

[43] Siehe WBAE (2020/1)

[44] Zur Beteiligung der Bürger*innen an der Stadtgestaltung – siehe Tiddens (2014/1), zur Finanzierung der Kommunen nach dem Vorbild von Skandinavien und der Schweiz, wo die Kommunen aufgrund ihrer vorrangigen finanziellen Ausstattung (über 50% der staatlichen Mittel) eine zentrale Rolle spielen – siehe Hentschel (2018/1)

Maßnahmen

Damit die Kommunen ihre Aufgaben bei der Transformation hin zu einer klimaneutralen Gesellschaft wahrnehmen können, müssen folgende Voraussetzungen geschaffen werden:

- Die Entwicklung der Kommunen zu klimaneutralen Gemeinden, Städten und Landkreisen wird als kommunale Aufgabe definiert und muss in den jeweiligen Politikbereichen konkretisiert werden.
- Die Kommunen müssen die für die Wahrnehmung dieser Aufgaben die notwendigen Investitions- und Finanzmittel sowie die erforderlichen Kompetenzen zugewiesen bekommen.
- Die Länder müssen ein Monitoringsystem aufbauen, damit der Transformationsprozess koordiniert und wo nötig nachgesteuert werden kann.
- Alle öffentlichen beziehungsweise teilöffentlichen Einrichtungen (Energieversorger, Entsorgunger, Bildungseinrichtungen, Sparkassen, Fördereinrichtungen usw.) bekommen die Aufgabe, den Transformationsprozess zu unterstützen.[45]

[45] Siehe Anlage 7

2.2 Varianten des Energiesystems: E-Brennstoffe und Importe

In diesem Kapitel werden grundsätzliche Überlegungen zu verschiedenen Varianten für das zukünftige Energiesystem Deutschlands angestellt, um anschließend auf dieser Grundlage ein optimales Szenario für NRW zu entwerfen.

Deutschlands zukünftiges Energiesystem

Über die grundsätzliche Ausrichtung des zukünftigen Energiesystems herrscht in den Studien weitgehend Übereinstimmung (siehe auch Kapitel 1.5 »Das klimaneutrale Energiesystem«):

- Viele Prozesse werden elektrifiziert. Grüner Strom ersetzt fast alle anderen Energieträger (Öl, Erdgas, Kohle etc.) als Primärenergiequelle, was den Strombedarf stark steigen lässt. Auf Grund von Effizienzgewinnen (u.a. durch die Elektrifizierung fallen viele Umwandlungsverluste weg) sinkt aber der Primärenergiebedarf gegenüber heute deutlich.
- Power-to-X-Technologien, also die Erzeugung von synthetischen Brennstoffen und Rohstoffen sowie Wärme auf Basis von grünem Strom werden eine wichtige Rolle spielen, sowohl als Energiespeicher, als auch in der Anwendung, z.B. bei der Stahlherstellung oder im Flugverkehr, wo eine direkte Elektrifizierung nach aktuellem Technikstand nicht möglich ist.
- Durch die Zunahme Erneuerbarer Energien steigt der Bedarf an Netzen, Speichern und Flexibilitätsoptionen.
- Es werden auch weiterhin Importe von Energieträgern notwendig sein.

Unterschiedliche Strategien werden in Bezug auf zwei Fragen diskutiert:

1. Einige Autor*innen betonen stärker die Elektrifizierung – andere betonen stärker den Einsatz von Wasserstoff und anderen grünen Brennstoffen. In NRW wird diese Frage insbesondere in Zusammenhang mit dem Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft diskutiert.
2. Einige Autor*innen vertreten die Auffassung, dass Deutschland die erforderlichen Erneuerbaren Energien soweit möglich selbst produzieren sollte. Andere halten es für sinnvoll, einen erheblichen Teil der Energie auch künftig zu importieren.

Diese beiden Debatten stehen in einem engen Zusammenhang und werden daher im Folgenden gemeinsam diskutiert.

Strom oder E-Brennstoffe?

Welche Prozesse können und sollen auf Strom umgestellt werden und an welchen Stellen werden synthetisch erzeugte E-Brennstoffe[46] anstelle der heute genutzten fossilen Brennstoffe eingesetzt? Dies hängt eng mit der Frage nach der Stabilität des Stromsystems zusammen. E-Brennstoffe können sowohl konstant als auch flexibel Energie bereitstellen und dadurch dazu beitragen, die Schwankungen der Erneuerbaren auszugleichen. Manche Studien kommen zu dem Ergebnis, dass die starke Verwendung von E-Brennstoffen insgesamt kostengünstiger ist als Elektrifizierungsvarianten und damit verbundene Netz- und Speicherausbauten.[47] Andererseits benötigt die Erzeugung von E-Brennstoffen viel mehr erneuerbaren Strom.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von Elektrifizierungs- und E-Brennstoffen-Szenarien

	Pro	Contra
Elektrifizierung	+ Sehr energieeffizient	+ Hohe Infrastrukturkosten + Hoher Speicherbedarf
E-Brennstoffe	+ Bestehende Technologie kann weitergenutzt werden + Speicherung relativ einfach	+ Sehr hoher Energiebedarf

Grundsätzlich gibt es zwei Extrempole: In der Variante »Elektrifizierung« werden alle Prozesse, bei denen dies irgendwie möglich ist, so schnell wie möglich auf die Nutzung von Strom umgestellt. Die Variante »E-Brennstoffe« nutzt dagegen so weit wie möglich die heutige Technik – nur werden die fossilen Brennstoffe durch synthetisch erstellte E-Brennstoffe ersetzt. Vor- und Nachteile beider Varianten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Natürlich sind alle Abstufungen zwischen diesen Extrempolen denkbar. Zu bedenken ist, dass auch in einem stark elektrifizierten Szenario E-Brennstoffe eine große Rolle spielen werden, insbesondere auch um Energie zwischen zu speichern. Umgekehrt wird in einem Szenario, das stark auf E-Brennstoffe setzt, der Primärstrombedarf für die

[46] Zu den Begriffen „grüne Brennstoffe“, „E-Brennstoffe“, „Bio-Brennstoffe“ usw. siehe Anlage 4

[47] Siehe Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (2019/1)

Herstellung der E-Brennstoffe noch stärker steigen als im Elektrifizierungsszenario. Daher sind sowohl der starke Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung als auch der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in beiden Fällen erforderlich und in den ersten Jahren als „No-regret-Maßnahmen“ einzustufen.

Tabelle 2: Varianten des zukünftigen Energiesystems

	Vorrang Elektrifizierung	Mittelweg	Vorrang E-Brennstoffe
Benötigte Primärenergie pro Jahr	1.500 TWh	2.000 TWh	bis zu 3.000 TWh
PKW	100% E-Autos mit Batterie	Vorrang E-Autos, aber auch Hybrid-Antrieb, Brennstoffzelle und E-Kraftstoffe	Vorrang Brennstoffzelle und Gasantrieb
LKW und Bus	8.000 km Oberleitung (Autobahnen) plus Batterie: > 80% elektrisch	Oberleitung, Batterie, Hybrid und E-Kraftstoffe	überwiegend E-Kraftstoffe
Flugzeug und Schiff	E-Kraftstoffe, die mit grünem Strom erzeugt werden		
Häuser	Der Wärmebedarf wird durch Wärmedämmung halbiert		
Hauswärme	90% Wärmepumpen und Solarwärme – auch für Fernwärme	70% Wärmepumpen und Solarwärme, Rest E-Brennstoffe	40% Wärmepumpen und Solarwärme – Rest E-Brennstoffe
Industrie	maximale Elektrifizierung der Wärmeerzeugung und der Prozesse	Elektrifizierung und Wasserstoff	Vorrang Wasserstoff, E-Methan, Bio-Brennstoffe
Speicher	größerer Stromspeicherbedarf	Speichermix Batterie, Wasser, Druckluft, Gas	größerer Gasspeicherbedarf
Netz	Hochspannungsgleichstromnetz für Europa	Stromnetzausbau und Gasnetzumbau	Vorrang Gasnetz
Energieimporte	ca. 10% Importe	ca. 30% Importe	über 50% Importe

In Tabelle 2 sind Eckdaten für drei idealtypische Wege für Deutschland dargestellt: Vorrang Elektrifizierung, Vorrang E-Brennstoffe und ein Mittelweg. Am stärksten unterscheiden sich die drei Wege beim Energiebedarf: [48]

[48] Siehe Expertenkommission „Monitoring der Energiewende“ (2019/1), UBA (2019/1), Quaschning (2016/1), BDI (2018/1), DENA (2018/2) u.a. Die unterschiedlichen Angaben in den Quellen reichen von 1.300 TWh/a bis zu 3.000 TWh/a je nachdem, ob die Autor*innen stärker in Richtung „Vorrang Elektrifizierung“ oder in Richtung „Vorrang E-Brennstoffe“ tendieren. Wenn Studien den Luftverkehr, den

In der Variante „Vorrang Elektrifizierung“ werden künftig nur noch 1.500 Terawattstunden pro Jahr (TWh/a), gegenüber 3.600 TWh/a heute, an Energie benötigt. Der Grund ist: Wenn der Strom direkt genutzt wird, treten nur geringe Verluste auf. Wenn E-Brennstoffe aus Strom hergestellt werden müssen, gehen 20 bis 90 Prozent der Energie verloren. Deshalb werden bei der Variante „Vorrang Elektrifizierung“ fast zwei Drittel der heute benötigten Energie eingespart.[49] Nach einer aktuellen Studie des Potsdamer Klimafolgenforschungsinstituts ist dies auch ökologisch der beste Weg, da trotz aller Herausforderungen, die mit Windenergie und Photovoltaik verbunden sind, auf diese Weise die geringsten Umweltbelastungen und auch die geringsten Schäden für die Gesundheit der Menschen erfolgen. [50]

Bei der Variante „Vorrang E-Brennstoffe“ werden künftig noch bis zu 3.000 Terawattstunden pro Jahr benötigt. Es würde nur 20 Prozent eingespart werden.[51] Dafür müssten (in Deutschland oder im Ausland) doppelt so viele Wind- und Solarenergieanlagen installiert werden. Das dauert natürlich erheblich länger. Dafür werden aber weniger Stromspeicher und Stromleitungen benötigt. Es gibt noch einen weiteren Unterschied: Der Weg „Elektrifizierung“ erfordert große Umstellungen im Verkehr, im Wärmesektor und in der Industrie. All das dauert natürlich seine Zeit. Dagegen hat der Weg „E-Brennstoffe“ den Vorteil, dass vieles so bleiben kann wie heute. Es werden einfach nur Benzin, Diesel und Öl durch E-Brennstoffe ersetzt. Auch der massive Ausbau der Erneuerbaren Energien braucht Zeit – insofern hängt letztlich die Frage nach Elektrifizierung oder E-Brennstoffe davon ab, wie schnell und wie viel die Erneuerbaren ausgebaut werden können.

Schiffsverkehr und/oder die Rohstoffproduktion nicht berücksichtigen, haben wir dafür den nötigen Energiebedarf hinzugerechnet (siehe auch in Teil 3 in den Kapiteln »Verkehr« und »Industrie«).

[49] Wenn man allerdings annimmt, dass wir unser Verhalten grundlegend ändern – weniger reisen, Wohnraum einsparen, kaum noch Fleisch essen usw. könnte man den Bedarf noch weiter reduzieren. In der Rescue-Studie (UBA 2019/3) wird auch eine Variante mit sehr optimistischen Suffizienzmaßnahmen dargestellt, die nur 1050 TWh/a benötigt.

[50] Siehe Nature Communications (2019/1)

[51] Dies liegt daran, dass Wärmepumpen effizienter sind als Gasheizungen, Elektroautos effizienter als mit Gas betriebene Autos, und dazu das Gas auch noch mit Verlusten aus Strom erstellt werden muss (siehe Teil 3).

Der Mittelweg

Für die Darstellungen in dieser Studie orientieren wir uns an den Eckpunkten des »Mittelwegs«, der auf plausiblen Mittelwerten aus Studien beruht und als „Kompromiss“ vermutlich am ehesten die zukünftige Entwicklung abbildet.[52] Einerseits erscheint die Bereitstellung von bis zu 3.000 TWh/a erneuerbarem Strom in 20 Jahren und damit ein reines E-Brennstoff-Szenario nicht realistisch, gleichzeitig benötigt die Umstellung auf Strom ebenfalls Zeit – ein Mittelweg kann die nötigen Umbauten auf mehrere Handlungsfelder verteilen und ist daher wahrscheinlich am schnellsten umsetzbar.

Wir halten die Orientierung am Mittelweg daher für eine gute Orientierungsgrundlage. In der Praxis werden sich die Dimensionen vermutlich verschieben, etwa dann, wenn Technologien neu entwickelt oder verbessert werden, und wenn die Kosten für bestimmte Technologien schneller sinken als bei anderen. Langfristig wird sich vermutlich die Elektrifizierung überall dort durchsetzen, wo das technisch möglich ist. Sowieso kann der vorgeschlagene Weg in jedem Punkt modifiziert werden. Allerdings betont die neue Studie des Wuppertal Instituts, dass angesichts des geringen verbleibenden Zeitfensters für die Transformation, die häufig geforderte „Technologieoffenheit“ nicht mehr überall sinnvoll zu realisieren ist.[53]

Auf dem Mittelweg wird nach der kompletten Umstellung auf Erneuerbare Energien im Jahre 2040 ca. 2.000 TWh/a an Primärenergie und damit 40 Prozent weniger benötigt als heute.[54] Die großen Einsparungen erfolgen hauptsächlich durch die Wärmedämmung der Häuser, Umstellung auf elektrische Heizungen und Elektromobilität. Auch eine hohe Recyclingquote spart enorm viel Energie in der Grundstoffherstellung.[55] Nur die Hälfte des Stroms – etwa 1.000 TWh/a – wird direkt als Strom benötigt. Die andere

[52] Siehe dazu im Anhang das »Energieflussdiagramm« und Anlage 7 in MD (2020/2)

[53] Siehe Wuppertal (2020/1)

[54] Im Handbuch Klimaschutz hatten wir den Primärenergiebedarf für den Mittelweg auf 2.200 TWh/a berechnet. Aufgrund neuer Studien über den Energiebedarf der Industrie, die in 2020 veröffentlicht wurden, haben wir diesen Ansatz auf 2.000 TWh/a reduziert. Siehe dazu Agora (2020/4), Agora (2020/5) und Wuppertal (2020/1)

[55] Vgl. Agora (2020/5)

Hälfte wird genutzt, um grünen Wasserstoff und Folgeprodukte (grünes Naphtha, Methanol, Ammoniak, Diesel, Methan, Kerosin) herzustellen.

Umfang der Importe

Nun stellt sich die Frage, wie viel der 2.000 TWh/a in Deutschland erzeugt werden können und sollen und wie viel importiert werden muss. Die Extrempole in Bezug auf diese Frage sind:

1) Weiterhin den größten Teil des deutschen Energiebedarfs zu importieren
2) Deutschland vollständig ohne Energieimporte zu versorgen.

Vor- und Nachteile sind in Tabelle 3 dargestellt:

Die Entscheidung über die Menge der Importe ist letztlich keine technische, sondern eine politische Frage: Ist die Vollversorgung Deutschlands möglich? Allerdings gehen alle Studien übereinstimmend davon aus, dass Deutschland auch in Zukunft darauf angewiesen sein wird, einen erheblichen Teil seiner Energie zu importieren, da die Erzeugung

Tabelle 3: Vor- und Nachteile von Energieautarkie und Importfokus

	Pro	Contra
Viele Importe	+ Weniger Flächenverbrauch, weniger Akzeptanzprobleme in Deutschland + In Ländern mit mehr Wind oder Sonne ist der Strom günstiger + Die Exportländer haben eine Einkommensquelle	+ Importe können ggf. nicht sichergestellt werden + zusätzliche Transportkosten und Transportverluste + wird teilweise als „neoimperialistisch“ bewertet
Vollversorgung in Deutschland	+ Arbeitsplätze, Wertschöpfung und Technologie verbleiben im Land	+ Hoher Flächenverbrauch in Deutschland + ggf. höhere Kosten

der für eine Eigenversorgung erforderlichen Energiemengen durch Wind- und Sonnenstrom in Deutschland wahrscheinlich aus ökonomischen und Akzeptanzgründen nicht möglich ist.[56] Wir rechnen daher mit einem Importanteil von 600 TWh/a Primärenergie bzw. 30 Prozent. Dieser Kompromiss stellt immer noch eine deutliche Reduktion der

[56] Siehe Teil 3 im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung«

Importe im Vergleich zu heute dar, da zurzeit etwa 70 Prozent der Energie in Form von Steinkohle, Öl, Erdgas und Uran importiert wird.

Art der Importe

Neben dem Umfang der Importe gibt es auch sehr unterschiedliche Vorschläge, in welcher Form Energie importiert werden soll. Daraus ergeben sich dann Konsequenzen für die Auswahl der Importländer und für die benötigte Infrastruktur. Für die Importe bieten sich folgende Alternativen an:

Stromdirektimporte

In Zukunft wird es zu einem stärkeren Stromaustausch innerhalb von Europa kommen, um Versorgungssicherheit zu gewährleisten (siehe Teil 3 im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« im Abschnitt »Ausbau des Stromnetzes«). Gleichzeitig ist innerhalb der EU nicht mit bedeutenden Nettostromimporten zu rechnen, da die europäischen Länder zur Umstellung auf Klimaneutralität ebenfalls große erneuerbare Strommengen benötigen und grundsätzlich mit den gleichen Flächen- und Akzeptanzproblemen zu tun haben wie Deutschland.

Denkbar sind dagegen Stromimporte aus benachbarten Nicht-EU-Staaten. Dafür kommen am ehesten Russland, Norwegen und die nordafrikanischen Länder in Frage, sofern der vor Ort produzierte erneuerbare Strom den heimischen Bedarf übersteigt. Das würde dann den Bau von zusätzlichen HGÜ-Leitungen[57] erfordern. Dann könnte die Wasserstoff-Elektrolyse und die Weiterverarbeitung zu Kerosin, Schiffsdiesel oder Naphtha komplett in Deutschland durchgeführt werden. Ein Vorteil wäre auch, dass die Wertschöpfung vor Ort bleibt. Dieser Weg wäre auf jeden Fall für NRW attraktiv. Dies setzt voraus, dass die Stromnetze entsprechend ausgebaut werden. Insbesondere relevante Stromimporte aus Russland würden erfordern, dass dafür zusätzliche HGÜ-Fernleitungen gebaut werden müssten. Weiterhin müssten dazu Partnerverträge mit den entsprechenden Staaten abgeschlossen werden.

[57] HGÜ – Hochspannungsgleichstromübertragung – ist eine Technologie, Strom über große Entfernungen mit geringen Verlusten zu transportieren. Bislang werden nur HGÜ-Leitungen nach Skandinavien und innerhalb der EU geplant. Siehe dazu in Teil 3 im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung«

Wasserstoff-Importe

Eine Studie des Wuppertal Instituts[58] bewertet die Vor- und Nachteile heimischer Wasserstoff-Produktion im Vergleich zu Importen. Sie kommt zu dem Ergebnis, dass auf Grund der sehr hohen Kosten des Transports von Wasserstoff per Schiff vermutlich der Wasserstoff nur über Pipelines aus europäischen Ländern (z.B. Spanien, Großbritannien, Skandinavien – evtl. auch Russland) bezogen wird. Für andere Lieferländer ist die Lieferung von Wasserstoff eher unattraktiv. Sie würden diesen dann vor Ort zu PtX-Stoffen (Power to X – also: aus Strom grüne E-Brennstoffe oder Grundstoffe erzeugen) weiterverarbeiten.

PtG-Importe

PtG (Power to Gas) – also synthetisches Methangas – kann wie Erdgas importiert und somit als Energie- und Kohlenstofflieferant in der Industrie eingesetzt werden. Es bietet gegenüber flüssigem PtL (Power to Liquid) – also Benzin, Methanol u.a. – den Vorteil geringerer Umwandlungsverluste. Prinzipiell kann beim Transport auf die bestehende Erdgasinfrastruktur zurückgegriffen werden. Der Nachteil von Methan, auch in der „grünen“ Variante, besteht in der Gefahr von Leckagen. Methan ist ein hoch wirksames Treibhausgas, sodass Leckagen von Methan stark klimaschädlich sind. Als Lieferant kämen auf Grund der bestehenden Infrastruktur insbesondere Russland und Norwegen in Frage. Beide Länder hätten daran sicherlich ein Interesse, wenn sie künftig kein Erdgas mehr verkaufen können.

PtL-Importe

Flüssige E-Brennstoffe (PtL – Power to Liquid – also grünes Diesel, Methanol, Kerosin, Naphtha[59]) sind vielfältig einsetzbar, gut transportier- und lagerbar. Allerdings sind die Umwandlungsverluste sehr hoch. Als Energieträger kommen sie deshalb nur da in Frage, wo Alternativen noch nicht zur Verfügung stehen – also vorrangig in der Luftfahrt und im Schiffsverkehr, sowie teilweise im Schwerlastverkehr und bei Spezialfahrzeugen. Ein Haupteinsatzgebiet für PtL wird aber sicher die chemische Industrie sein (siehe Teil 3 im Kapitel »Industrie« - Abschnitt »Chemische Industrie«). Mögliche Exportländer sind

[58] Wuppertal (2020/2)

[59] Naphtha ist Rohbenzin, das als Rohstoff für die chemische Industrie genutzt wird.

weltweit verteilt. Insbesondere kommen die heute Erdöl exportierenden Golf-Staaten dafür in Frage und bereiten sich zum Teil schon darauf vor.

Fazit für die Alternativen in Deutschland

In dieser Studie legen wir einen Pfad zu Grunde, der das durch Studien ermittelte Potenzial für Erneuerbare Energien in Deutschland fast vollständig ausnutzt.[60] Wir kommen damit auf knapp 1.400 TWh/a im Inland produzierter Primärenergie. Die darüber hinaus benötigte Energie in Höhe von 600 TWh/a wird importiert. Damit ergibt sich ein Importanteil von 30 Prozent.[61]

Fast die Hälfte der Importe wird nicht energetisch verwendet, sondern für die chemische Industrie und die Stahlindustrie als Rohstoff und Reduktionsmittel benötigt (siehe Teil 3 im Kapitel »Industrie«).

Schlussfolgerungen für NRW

NRW als Teil von Deutschland sollte sich in etwa an der oben dargestellten Deutschen Gesamtstrategie orientieren. Zwar gibt es gravierende Unterschiede zwischen den Bundesländern, z.B. in Hinblick auf das Windenergiepotenzial, sodass eine reine Skalierung der oben genannten Werte auf Landesebene unzulässig wäre. Gleichzeitig lassen die wechselseitigen Abhängigkeiten, z.B. bei Infrastrukturvorhaben oder Bundesgesetzen wie dem CO_2-Preis, es nicht zu, dass alle Bundesländer grundsätzlich verschiedene Strategien ohne Abstimmung verfolgen. Daraus folgt:

- Die vorrangige Verwendung von E-Brennstoffe anstelle der Elektrifizierung würde die ohnehin schon sehr großen Mengen an benötigtem grünem Strom weiter steigern. Daher sollte dies wo immer möglich vermieden werden. Dies gilt

[60] Fast die gesamte erzeugte Primärenergie (1.100 TWh/a) besteht aus Wind- und Solarstrom, hinzu kommen geringe Anteile an Biomasse (150 TWh/a), Solarwärme (100 TWh/a) und Geothermie (10 TWh/a). Anstatt Flüssigbrennstoff (PtL) oder Methan zu importieren, kann auch Wasserstoff importiert werden, der dann in Deutschland mit nicht vermiedenen CO_2-Emissionen aus der Zement- oder Stahlherstellung zu Methan oder Flüssigbrennstoff karbonisiert wird. Es kann auch der Strom importiert werden, sodass auch die Elektrolyse in Deutschland stattfindet. Siehe dazu die Wasserstoffstudie: Ludwig Bölkow Systemtechnik 2019, Anlage 8 in MD (2020/2).

[61] Dabei handelt es sich um: 210/a TWh Wasserstoff, 50 TWh/a E-Methan und 160 TWh/a E-Brennstoffe (Kerosin, Diesel, Methanol). Zur Herstellung dieser Brennstoffe wären 820 TWh/a Strom erforderlich. Siehe MD (2020/1)

insbesondere für den großflächigen Einsatz im PKW-Verkehr, wo mit der Elektromobilität eine günstigere und bereits einsatzbereite Technologie existiert (zum Vergleich E-Auto und Brennstoffzellen-Fahrzeug siehe Teil 3 im Kapitel »Verkehr«).

- Die Importquote sollte durch die konsequente Ausnutzung heimischer Erneuerbaren Energien-Potenziale möglichst gering gehalten werden, da erstens nicht garantiert werden kann, dass Erzeugerländer in kurzer Zeit die nötige Infrastruktur aufbauen können, zweitens aus globaler Perspektive der Import von grünen Treibstoffen erst dann Sinn macht, wenn die Exportländer ihren eigenen Energiebedarf erneuerbar decken können und drittens die hohen Transportkosten die Standortvorteile der Exportländer gegenüber der heimischen Produktion zum Teil wieder zunichtemachen.[62] Dennoch werden Importe im erheblichen Umfang gebraucht und dazu werden Infrastruktur und Partnerschaften benötigt, die mit Hochdruck aufgebaut werden müssen.

Wasserstoffwirtschaft in NRW

NRW hat ein besonderes Interesse an dem Thema Wasserstoffwirtschaft. Nicht zufällig sind daher in den letzten beiden Jahren die »Wasserstoffstudie NRW« und der Plan der Landesregierung »Wasserstoff Roadmap NRW«[63] erschienen. Der Grund liegt darin, dass NRW einen überproportional hohen Anteil an Grundstoffindustrien hat und Wasserstoff (H_2) eine besondere Rolle spielt, wenn diese treibhausgasneutral werden sollen. Wir rechnen mit einem Wasserstoffbedarf von 120 TWh/a in NRW, wovon ein Drittel in NRW erzeugt wird. Haupteinsatzbereich wird die Industrie einschließlich der PtX-Produktion sein, die insgesamt 92 TWh/a Wasserstoff benötigen.[64]

Wir folgen im Wesentlichen bei unseren Berechnungen den Überlegungen dieser beiden Studien. In Bezug auf die »Wasserstoffstudie« wählen wir auch hier einen Mittelweg zwischen den dort berechneten Varianten.[65] Allerdings sehen wir den Bedarf von

[62] Siehe Wuppertal (2020/2)

[63] Siehe MWIDE (2020/4), Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (2019/1), siehe auch Anlage 5

[64] Siehe FernUni Hagen (2020/1), Anlage 5 und im Energieflussdiagramm

[65] Siehe Anlage 6; die Wasserstoffstudie berechnet ein EL-Szenario (Vorrang Elektrifizierung) und ein H_2-Szenario, aber leider keine Zwischenvariante.

Wasserstoff und PtL im Verkehrssektor geringer, da wir davon ausgehen, dass die Elektromobilität sich weitgehend durchsetzen wird. Das gleiche gilt für die Hauswärme. Hier wird ein Mix aus hocheffizienten Wärmepumpen, verbunden mit lokalen Speichern sowie Nah- und Fernwärme, die Zukunft bestimmen. Auch bei der Fernwärme werden Wärmepumpen eine wesentliche Rolle spielen. Dagegen rechnen wir mit einem erheblichen Bedarf an PtL für den Flugverkehr (grünes Kerosin) und für die Schifffahrt (erprobt werden Methanol und Ammoniak, siehe im Teil 3 im Kapitel »Verkehr«).

Wasserstoff wird künftig durch Elektrolyse aus Wind- und Solarstrom erzeugt („Grüner“ Wasserstoff). Heute wird er aus Erdgas gewonnen („Grauer“ Wasserstoff). Diskutiert wird, ob für eine Übergangszeit „blauer“ Wasserstoff genutzt sollte. Dabei wird das bei der Produktion von „grauem“ Wasserstoff entstehende CO_2 eingefangen und gespeichert. Das Hauptargument ist, dass kurzfristig nicht die benötigten Mengen „grünen“ Wasserstoffs aus Elektrolyse bereitgestellt werden könnten und daher der Rückgriff auf diese „Brückentechnologie“ notwendig sei, um Investitionen in Infrastruktur und industrielle Anwendungen zu ermöglichen. Kritiker*innen halten entgegen, dass auch „blauer“ Wasserstoff erhebliche Emissionen verursacht, die Technologien zur Abscheidung und Speicherung nicht kurzfristig zur Verfügung stehen und den Markthochlauf von „grünem“ Wasserstoff behindern könnte.[66]

Idealerweise werden für „grünen“ Wasserstoff die Zeiten genutzt, wenn Wind und Sonne mehr Strom liefern, als benötigt wird. Normalerweise würde dieser Strom die Netze überlasten und die Windräder oder PV-Anlagen würden deshalb abgeschaltet. Die Elektrolyse stellt daher einen guten Weg dar, diese Abschaltung zu verhindern. Allerdings müssen Elektrolyseure genügend Stunden im Jahr laufen, damit sie effizient sind und wirtschaftlich betrieben werden können.[67] Deshalb muss der Spitzenstrom in Batterien und anderen Speichern (z.B. Stahl-Speichern) zwischengespeichert werden, um dann nach und nach die Elektrolyseure zu speisen. Außerdem muss sichergestellt werden, dass durch den Betrieb von Elektrolyseanlagen nicht fossile Kraftwerke mehr Strom produzieren oder länger am Netz bleiben. Dies muss politisch geregelt werden.

[66] Siehe Greenpeace (2020/1)

[67] Siehe Greenpeace (2020/1)

Die Produktion von PtX erfolgt dann wiederum aus Wasserstoff mit Hilfe von erneuerbarem Strom. Die Wasserstoffstudie schlägt vor, dass einige Raffinerien, die heute Benzin und Diesel für den Straßenverkehr produzieren, dafür umgebaut werden können. Deshalb haben wir entsprechend höhere Zahlen für Wasserstoff-Elektrolyse und für die Raffinerie von PtX-Produkten in NRW im Vergleich zu anderen Bundesländern angesetzt. Dies halten wir aufgrund der im Handbuch Klimaschutz berechneten Eckdaten für die Wasserstoffwirtschaft in Deutschland für vertretbar.

Dies dient auch dazu, die in NRW stark vertretene Grundstoff-Chemie und ihre Hauptabnehmerin für Wasserstoff, die Stahlindustrie, zu stärken. Alternativ kann natürlich mehr Wasserstoff in Norddeutschland in Nähe der Offshore-Parks produziert und von dort nach NRW geliefert werden. Welche Lösungen am kostengünstigsten und sinnvollsten sind, lässt sich auf Grund der Vielzahl von Einflussfaktoren nicht sicher vorhersagen. Natürlich wäre es auch denkbar, dass in NRW künftig noch mehr Wasserstoff hergestellt wird. Das würde allerdings zusätzliche Stromimporte und in der Folge zusätzlichen Leitungsbau notwendig machen, der auch bei der von uns angenommenen Variante schon erheblich ist. Ebenfalls möglich wäre es, verstärkt Wasserstoff zu importieren und in den Raffinerien vor Ort zu PtG und PtL weiterzuverarbeiten.

Maßnahmen zur Wasserstoffwirtschaft[68]

- Ertüchtigung des Erdgasnetzes und der Salzkavernen für die Nutzung von Wasserstoff.[69]
- Schaffung eines rechtlichen Rahmens;[70] Anpassungen der Regulatorik im Bereich der Netzinfrastrukturen, um Netzbetreibern die Möglichkeit zu geben, die H_2-Technologie schon heute netzdienlich einzusetzen.
- Förderung der H_2-Produktion durch Befreiung von Abgaben (z.B. EEG- Umlage) bei der Strombeschaffung für die Elektrolyse

[68] Die Maßnahmen findet man – soweit nicht anders benannt – in Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (2019/1)

[69] Siehe DVGW (2013/1)

[70] Siehe MWIDE (2020/4)

- Förderung von Investitionen für den Einsatz von Wasserstoff u.a. in der Industrie bspw. über Carbon Contracts for Difference (s. auch Teil 3 Sektor Industrie).
- Aufbau eines Zertifizierungssystems für H_2-Herkunftsnachweise, um die Klimaneutralität der inländischen H_2-Produktion bzw. der potenziellen H_2-Importe zu gewährleisten.

Importe von NRW[71]

Aus den genannten Überlegungen ergeben sich für NRW 25 TWh/a PtL-Importe – überwiegend für die Schifffahrt und den Luftverkehr – und ca. 80 TWh/a Wasserstoffimporte – überwiegend für die Stahl- und Chemieindustrie. Ob diese Importe aus den norddeutschen Küstenländern oder aus dem Ausland erfolgen, lässt sich schwer sagen. Ein Transport von Wasserstoff per Schiff ist aber aus Kostengründen unwahrscheinlich. Denkbar sind Wasserstoffimporte aus benachbarten europäischen Ländern (Skandinavien, GB, Frankreich) mit hohen Windpotenzialen per Pipeline. Weiterhin benötigt die Chemie-Industrie den Import von 30 TWh/a an synthetischen Rohstoffen, da die Produktion an Biomasse in NRW dafür nicht ausreicht. Wir rechnen nicht mit Stromimporten aus dem Ausland, aber mit erheblichen Importen an Strom aus Deutschland – teilweise über Wechselstromleitungen aus Niedersachsen, teilweise über Gleichstromleitungen von den Offshore-Windparks in der deutschen Nordsee.

Maßnahmen zum Import von E-Brennstoffen

- Erstellung einer Gesamtrechnung, wieviel Energie in Form von Strom, Wasserstoff oder E-Brennstoffen künftig importiert werden muss.
- Dafür werden mit geeigneten Staaten langfristige Lieferverträge geschlossen. Dabei sollten vorrangig Staaten zum Zuge kommen, die demokratische Standards erfüllen.
- Durch eine Quote in Deutschland wird geregelt: In allen Brennstoffen (Diesel, Benzin, Kerosin usw.) muss ein fester Anteil E-Brennstoff sein. Der Anteil beginnt mit zehn Prozent und wächst jährlich. Ab 2035 wird nur noch reiner E-Brennstoff verkauft.

[71] Siehe im Anhang das »Energieflussdiagramm«

- Deutschland bzw. die EU helfen den Exportländern bei der Finanzierung von Kraftwerken und den Fabriken für E-Brennstoffe.
- In Deutschland muss die Infrastruktur dafür geplant und bereitgestellt werden. Das betrifft: Kabel, Pipelines, Hafenterminals usw. Soweit es sich um Quasi-Monopole handelt (zum Beispiel bei den Leitungen), sollten die Anlagen in der öffentlichen Hand bleiben.

Maßnahmen zum Stromimport aus anderen Bundesländern

- NRW sollte gemeinsam mit den Nordländern im Bundesrat darauf hinwirken, dass die Offshore-Windenergie Deutschlands entsprechend ausgebaut wird. Das aktuelle Ausbauziel von 40 GW bis 2040 ist noch nicht ausreichend.
- NRW sollte gegenüber der Bundesnetzagentur im Rahmen der Netzplanung darauf hinwirken, dass der Ausbau der Netze frühzeitig geplant und gestartet wird. Es muss die notwendige Infrastruktur gebaut werden, um große Strommengen aus Norddeutschland beziehen zu können (siehe im Teil 3 im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« im Abschnitt »Ausbau des Stromnetzes«) und den Austausch von Ost nach West in NRW insbesondere mit Belgien und den Niederlanden zu verbessern.

2.3 Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft

In diesem Kapitel werden allgemeine Fragen der Kreislaufwirtschaft und Rohstoffwirtschaft behandelt. Die speziellen Fragen des Kunststoffrecyclings, des Metallrecyclings und des Baustoffrecyclings und ihre Bedeutung für die Dekarbonisierung dieser Industriezweige werden in Teil 3 im Kapitel »Industrie« behandelt.

Rohstoffbedarf[72]

NRW verbraucht jährlich etwa 350 Mio. Tonnen nichtorganische Rohstoffe. 160 Mio. Tonnen werden importiert, während 15 Mio. Tonnen exportiert werden. Den größten Anteil des Gesamtverbrauchs machen die nichtmetallischen Rohstoffe aus. Es handelt sich überwiegend um Steine, Kies, Sand, Kalksteine und Ton für die Bauwirtschaft, in kleinerem Umfang auch um Quarzsande für die Glasherstellung und Rohstoffe für die Keramikindustrie. Dazu kommen Salze für die Industrie und die Düngemittelherstellung. Der Großteil dieser Mineralien wird in NRW produziert, das bei der Produktion von nichtmetallischen Mineralien die Nummer 1 unter den Bundesländern ist.

Bei den Importen fällt über die Hälfte auf die fossilen Energieträger Kohle, Öl und Gas, die überwiegend importiert werden. Nur die Braunkohle wird in NRW gewonnen. Die dritte große Rohstofffraktion sind die Metallerze – in erster Linie Eisenerz.

Einsparung von Rohstoffen

In der Diskussion über die Energiewende werden oft kritische Fragen zu den Rohstoffen gestellt wie z.B. die nach dem Einsatz von seltenen Erden in Windenergieanlagen oder von Lithium für Batterien von Elektroautos. Solche Zielkonflikte müssen ernst genommen werden. Sie gibt es allerdings bei jeder Art von Rohstoffgewinnung und müssen endlich gelöst werden (siehe im Kapitel 2.8 »Klima-Handelspolitik« im Abschnitt »Internationale Abkommen«).

In der Gesamtsicht kommen die Untersuchungen jedoch zu einem positiven Ergebnis für eine konsequente Klimapolitik: Die heutige Industriegesellschaft ist mit großen

[72] Siehe IT.NRW (2020/4), UBA (2018/5), MWME (2005/1); bei den Importen wird nicht mitgerechnet, wieviel Rohstoffe als Abfall im Herkunftsland anfallen und dort verbleiben – vor allem bei der Gewinnung von Metallerzen.

Umweltbelastungen verbunden. Beispiele sind Tankerhavarien, Lecks in Ölplattformen und bei der Erdgasförderung, undichte Pipelines, Grundwasservergiftung durch Fracking, große Umweltkatastrophen bei der Kupfergewinnung, Menschenrechtsverletzungen bei der Coltan-Gewinnung im Kongo und viele andere Schäden. Künftig wird der Verbrauch an nicht erneuerbaren Rohstoffen durch die Energiewende und Recyclingwirtschaft um 80 Prozent sinken. Auch der Bedarf an Metallerz wird um über 70 Prozent zurückgehen.[73] Dieser Rückgang des Rohstoffbedarfs führt auch zu großen Energieeinsparungen und damit zu einem relevanten Beitrag zur Klimapolitik.

Probleme bei der Rohstoffförderung

Trotzdem müssen die Probleme der Rohstoffgewinnung endlich angepackt werden. Dabei geht es um drei Komplexe:

- Ressourcenknappheit: Für die meisten Rohstoffe gibt es ausreichende geologische Vorkommen für Jahrhunderte – so für Eisen, Aluminium, Kupfer und übrigens auch für Lithium. Einige werden bereits knapp – zum Beispiel Iridium, das für die Elektrolyseure verwendet wird – aber auch die Vorkommen von Chrom, Zink, Zinn und Blei gehen zu Ende. Andere sind zwar nicht knapp, aber die Versorgung wird als kritisch eingestuft. So erfolgt die Versorgung durch die sogenannten seltenen Erden zu 90 Prozent durch China.[74] Viele dieser Rohstoffe werden beim Ausbau der Erneuerbaren Energien in großer Menge benötigt – so Neodym für die Permanentmagnete in einigen Bauarten von Windenergieanlagen und riesige Mengen Kupfer für die Stromspulen.[75]
- Ökologische Probleme**:** Es gibt erhebliche Umweltprobleme bei der Gewinnung der Rohstoffe – wie die Vergiftung von Grundwasser, Flüssen und Seen oder die Absenkung des Grundwassers. Nicht selten verlieren Menschen ihre Lebensgrundlage oder werden unter Zwang umgesiedelt.

---

[73] Siehe dazu Wuppertal Institut 2014, UBA 2019/6, acatech 2017

[74] Siehe BUND (2015/1)

[75] Siehe UBA 2019/6, UBA 2019/3

- Soziale Probleme: Menschenrechtsverletzungen kommen im Bergbau häufig vor. Bekannt ist der Abbau von Kobalt und Coltan unter Einsatz von Kinderarbeit zur Finanzierung des Bürgerkrieges im östlichen Kongo. In Brasilien gibt es sklavenartige Arbeitsbedingungen in den Zulieferbetrieben der Stahlindustrie und friedliche Proteste werden gewaltsam unterdrückt. Mitunter werden auch kriminelle Strukturen gefördert.[76]

Auch in NRW ist der Abbau von Rohstoffen mit erheblichen Problemen verbunden. Das gilt nicht nur für die Braunkohleförderung, die in den kommenden Jahren hoffentlich ausläuft. Auch die Förderung von Kies, Sand und anderen Mineralien führt zu erheblichen Eingriffen in die Landschaft und die Natur, die in den betroffenen Regionen zu Konflikten führen.[77] Daher ist ein sparsamer Umgang auch mit den heimischen Rohstoffen wichtig.

Die Lithium-Diskussion

Lithium-Batterien spielen zurzeit eine zentrale Rolle für E-Autos, Handys, Laptops und viele andere Geräte. Lithium wird in Südamerika u.a. aus Salzseen gewonnen, was in Bolivien in trockenen Regionen zu Problemen mit dem Trinkwasserspiegel führt. Hauptlieferland ist mittlerweile Australien, wo Lithium im trockenen Erzabbau gewonnen wird. Die Probleme bei der Rohstoffgewinnung müssen endlich gelöst werden. Sie sind aber nicht vergleichbar mit den weltweit drastischen Problemen bei der Kohle-, Erdöl- und Erdgasgewinnung.

Künftig kann Lithium auch aus Meerwasser gewonnen werden, das die größten Lithiumvorkommen enthält. Lithium kann auch als Abfallprodukt der Süßwassererzeugung produziert werden, wenn Meerwasser entsalzt wird.[78]

Quantitativ könnten alle Fahrzeuge der Welt und alle Haushalte mit Lithium-Batterien ausgestattet werden. Allerdings befindet sich die Forschung nach den besten Batterietypen und nach der Gewinnung der dafür benötigten Rohstoffe in einer schnellen

[76] Siehe Dörner u.a. 2016, Europol 2015

[77] Siehe Niederrheinappell (2020/1)

[78] Siehe Sonnenseite (2021/1)

Entwicklung, sodass noch nicht absehbar ist, wie die Batterie der Zukunft aussehen wird. Auch werden mittlerweile in mehreren Staaten Recycling-Anlagen getestet.[79]

Abfallaufkommen[80]

Das Nettoabfallaufkommen betrug 2018 in Deutschland 363 Mio. Tonnen. 63 Prozent davon fielen auf Bauschutt, 23 Prozent auf Produktions- und Gewerbebetriebe einschließlich der Rohstoffförderung. Im gewerblichen Bereich kann der Müll eher sortiert und klassifiziert werden. Siedlungsabfälle stellen dagegen ein größeres Problem bei der Sortierung und beim Recycling dar, obwohl sie nur 14 Prozent ausmachen.

Die Kreislauf-Wirtschaft

Bei der Rohstoffversorgung gibt es mehrere Grenzen:

- Zum einen sind alle Stoffe endlich. Das sollte auch bedacht werden, wenn die Vorkommen noch mehrere Jahrhunderte reichen. Schließlich sollten wir davon ausgehen, dass die Menschheit noch sehr viel länger überleben wird.
- Und selbst wenn ein Rohstoff noch in großen Mengen in der Erdkruste verfügbar ist, so wird die Konzentration in den Lagerstätten doch immer geringer und damit wird die Förderung immer teurer.
- Und schließlich ist die Förderung mit großen Mengen an Energie verbunden.

Aus diesen Gründen wird es immer mehr Konsens, dass dort, wo der Einsatz von Ressourcen nicht vermieden werden kann, ein weitgehendes Recycling von Materialien angestrebt werden sollte. Das Ziel muss künftig der Übergang in eine Kreislauf-Wirtschaft sein, in der langfristig 99 Prozent aller Rohstoffe, die nicht nachwachsen, am Ende ihres Nutzungszyklus wiederverwertet werden. Aber auch in dem hier betrachteten Zeitraum bis 2040 werden durchaus Recyclingquoten von 50 Prozent bei Kunststoffen bis hin zu 90 Prozent bei einigen Metallen für realisierbar gehalten. Dabei geht es nicht um „Downcycling“ – also Wiederverwertung als Rohstoff minderer Qualität. Das Ziel ist ein echter Kreislauf, sodass aus den alten Produkten neue Produkte gleicher Qualität

[79] Siehe Winterhagen (2019/1)

[80] Siehe UBA (2015/1)

hergestellt werden. Eine Verbrennung von Reststoffen, die oft auch als thermisches Recycling bezeichnet wird, macht mit wenigen Ausnahmen keinen Sinn.

Da es schwierig ist, den Abfall wieder in seine verwertbaren Bestandteile zu zerlegen, sollten Produkte möglichst schon bei der Produktion so designt werden, dass sie hinterher wieder in Bestandteile zerlegt und möglichst komplett recycelt werden können. Ziel muss es daher sein, dass praktisch kein Restmüll mehr anfällt. In die Müllverbrennung kommen dann nur noch organische Reststoffe, sodass die Müllverbrennung treibhausgasneutral wird.

Dazu muss die Ökodesign-Richtlinie endlich umfassend ausgerollt werden und das Produkthaftungsrecht überall Anwendung finden. Zudem ist ein umfassendes verbindlich geregeltes Recycling notwendig. Dies kann durch geeignete Rückgabesysteme geschehen. Dazu können insbesondere Pfandsysteme geeignet sein, nicht nur für Verpackungen, sondern auch für Produkte. Die wichtigsten Bereiche des Recyclings sind das Kunststoff-Recycling, das Metall-Recycling und das Recycling der Baustoffe. Diese drei Bereiche werden auch in Teil 3 im Kapitel »Industrie« behandelt.

Maßnahmen zur Abfallvermeidung und Kreislaufwirtschaft[81]

- Produkte und Geräte, bei denen eine echte Wiederverwertung und die Vermeidung von Emissionen nicht möglich sind, sollten künftig vermieden und durch andere Produkte und Geräte ersetzt werden.
- Durch Haftungsrecht und Garantievorschriften sollte die Nutzungsdauer von Geräten und Produkten verlängert werden.
- Haushaltsgeräte sollten mit einer Garantie für zehn Jahre versehen werden.
- Die Verfügbarkeit von Ersatzteilen sollte besser geregelt werden.
- Konsequente Müll-Trennung durch die Wirtschaft und Verbraucher*innen und verbesserte Müll-Sortierung durch die Entsorgung in automatischen Müll-

[81] Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie wurde gerade der Bericht zur Kreislaufwirtschaft im europäischen Parlament vorgelegt. Wir konnten ihn allerdings nicht mehr berücksichtigen. Siehe European Parlament (2021/1)

Sortieranlagen im Rahmen eines wirklich umfassenden Kreislaufwirtschaftsgesetzes.

- Ausfuhrverbote außerhalb der EU für Müll – insbesondere für Elektromüll und Plastik, Verbot der Deklarierung von Müll als Rohstoff oder Ware; sowie ein EU-weites Ablagerungsverbot von unbehandeltem Müll nach dem Vorbild der TaSi
- Umfassende Anwendung der Ökodesign-Richtlinie sowie Ausweitung des Produkthaftungsrechts.
- Ein umfassendes Pfand-System (insbesondere für Elektrogeräte wie Handys, Kühlschränke und andere Geräte) mit einer Rücknahme- und Recycling-Verpflichtung für die Hersteller*innen.
- Dazu sollten Standards für kritische Produkte wie Lithium-Batterien, Magnete, Kühlschränke usw. geschaffen werden. Die Produkte müssen so konstruiert werden, dass die Rohstoffe leichter getrennt werden können.

2.4 Planungsrecht und Bürgerbeteiligung

Viele Vorhaben zum Klimaschutz verzögern sich durch sehr lange Planungszeiten. Dies betrifft den Bau von Windenergieanlagen, von Freiflächen-Photovoltaik-Anlagen, von Stromtrassen, von Bahnstrecken, von Kraftwerken und anderer Infrastruktur. Wenn beispielsweise Windenergieprojekte weiterhin in der Regel mehr als fünf Jahre bis zur Realisierung benötigen, wird die notwendige Ausbaugeschwindigkeit zur Erreichung der Klimaziele kaum erreicht werden können. Neben den Baumaßnahmen wird in NRW künftig die Flächenplanung für Naturschutz, für Überflutungsgebiete und für Erneuerbare Energien eine wichtige Rolle spielen und vermutlich auch zu Konflikten führen.

Insbesondere beim Ausbau der Windenergie kam es in NRW in zahlreichen Fällen zu Klagen, die oft zu jahrelangem Stillstand bei den Planungen führten.[82] NRW steht im Ländervergleich bei der Anzahl der Klageverfahren hinter Niedersachsen auf Platz 2. Klagegründe waren vor allem der Vogelschutz, die Flugsicherheit und die befürchtete Lärmbelästigung von Anwohner*innen (zur Planung der Windenergieanlagen in NRW siehe im Teil 3 im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« im Abschnitt »Windenergie«).

Verbesserung des Planungsrechts

Das oft komplexe Planungsrecht ist in der Regel sinnvoll und effektiv. Es dient wichtigen Zielen: Gesundheit, Artenschutz, Flug- und Bausicherheit, Denkmalschutz usw. Es dient auch der Beteiligung der betroffenen Bürger*innen und Kommunen an den Planungen.

Mehrere Verbände und Stellungnahmen haben nun gefordert, diese Regelungen zu überprüfen, um zu schnelleren Planungsverfahren zu kommen.[83] Dies hat Aufsehen erregt, da auch Umweltverbände wie der NABU, Greenpeace, der WWF und die Deutsche Umwelthilfe sich daran beteiligt haben. Sie fordern eine erhebliche Beschleunigung der Planungszeiten für Infrastrukturvorhaben zum Klimaschutz. Insbesondere soll nicht mehr der Schutz einzelner Vögel oder anderer Lebewesen entscheidend für Genehmigungsverfahren sein, sondern es geht insgesamt um den Schutz der betroffenen Arten

[82] Siehe FA Wind (2019/1)

[83] Siehe BDEW (2019/2), NABU (2020/1)

und um den Schutz und möglichst die Verbesserung ihrer Lebensbedingungen. Diese Forderungen sind nicht von der Hand zu weisen und sollten berücksichtigt werden. Grundlegende Entscheidungen zum Planungsrecht werden auf Bundesebene getroffen, mit dem Ende 2020 beschlossenen Investitionsbeschleunigungsgesetz[84] wurde von der Bundesregierung ein erster Schritt unternommen, dem allerdings weitere Schritte auf Bundes- und Landesebene werden folgen müssen.

Da die Klimapolitik nahezu alle Bereiche der Landespolitik tangiert, sind nicht nur mehrere Ministerien beteiligt. Auch viele Institutionen, Kammern und Verbände müssen zur Gestaltung einer erfolgreichen Klimapolitik zusammenwirken.[85] Der Erfolg hängt deshalb auch entscheidend davon ab, ob es gelingt, die vielen Akteur*innen frühzeitig einzubeziehen und für das gemeinsame Ziel zu koordinieren, um mögliche Reibungspunkte und Blockaden rechtzeitig zu vermeiden oder zu überwinden.

Bürgerbeteiligung

Auch die Durchführung der Beteiligungen sollte neu gestaltet werden. In NRW wird die Digitalisierung von Verwaltungsprozessen und die Bürgerbeteiligung im Rahmen eines Beteiligungsportals vorangetrieben.[86] Es sollte das Ziel sein, dass künftig alle Unterlagen im Internet eingesehen werden können. Stellungnahmen und Einwände sollen künftig auch online eingereicht werden können, ohne dass Papierversionen nachgereicht werden müssen.

Bei den üblichen Bürgerbeteiligungen und Anhörungen kommt es oft zur Konfrontation von organisierten Gegner*innen der Baumaßnahme mit den Vertreter*innen der zuständigen Behörde, ohne dass andere Bürger*innen zur Sprache kommen. Daher sollten neue Formen von Bürgerbeteiligung genutzt werden. Geloste Bürgerräte können im Auftrag der Regierung ein Bürgergutachten erarbeiten. Bürgerinitiativen und Nichtregierungsorganisationen sind dabei ebenso wie die Planungsbehörden Beteiligte, die in

[84] Siehe Bundesanzeiger (2020/1)

[85] Siehe Anlage 7

[86] Siehe MWIDE (2020/2); siehe auch die freie Beteiligungssoftware Consul: partizipendium.de (2019/1)

einem moderierten Prozess ihre Auffassungen darlegen können. Direktdemokratische Verfahren können ebenfalls die Akzeptanz deutlich erhöhen.[87]

Auch der Zeitpunkt der Bürgerbeteiligung spielt eine wichtige Rolle. Gerade vorgezogene, frühzeitige Bürgerbeteiligung hat erfahrungsgemäß die größten Erfolge, wenn bereits in der Vorplanungsphase möglichst große Transparenz und Offenheit herrscht.

Bürgerbeteiligung und die Beschleunigung von Planungsprozessen kann am besten gelingen, wenn die notwendigen politischen Entscheidungen (Klimaschutz und Transformation als die größte Herausforderung des 21. Jahrhunderts auch in seinen Teilbereichen) als politische Leitentscheidung und Gemeinschaftsaufgabe anerkannt und breit getragen wird. Darum müssen die politischen Entscheidungsträger*innen allerdings immer erneut werben und ringen. Dies kann am besten gelingen, wenn die wichtigsten klimapolitischen Entscheidungen in den einzelnen Sektoren über Legislaturen hinaus Bestand haben und deshalb über die engen Grenzen der jeweiligen Koalitionen breiter abgesichert würden, ähnlich wie der Atomausstieg.

Insbesondere bei Projekten der Erneuerbaren Energien sollten zudem die betroffenen Kommunen an den Gewinnen der Anlagen beteiligt werden. Anwohner*innen im direkten Umfeld der Anlagen sollten zusätzlich durch vergünstigte Strompreise oder finanzielle Beteiligungsmöglichkeiten profitieren können. Dadurch wird die regionale Wertschöpfung der Anlagen erhöht und kommt den Regionen und Menschen zugute, die von der Energiewende konkret betroffen sind. Dadurch kann nachweislich die Akzeptanz für den Ausbau der Erneuerbaren Energien erhöht werden, die eine zwingende Voraussetzung für die notwendige Beschleunigung des Ausbaus ist.

Maßnahmen zum Planungsrecht

Folgende Maßnahmen wurden unter anderem vorgeschlagen:

- Es sollte gesetzlich klargestellt werden, dass an Maßnahmen zum Klimaschutz ein überwiegendes öffentliches Interesse besteht. Alle Institutionen sind daher

[87] Siehe Anlage 8

verpflichtet, das übergeordnete gesellschaftliche Ziel „Klimaschutz“ bei ihren Aktivitäten zu berücksichtigen.

- Verbände und Regierungen sollten sich auf Ziele einigen, die dann Grundlage für die Planungen der Behörden sind.
- Es sollten Ausnahmen beim Artenschutz möglich sein. Dafür sollen zum Ausgleich zusätzliche Flächen und Maßnahmen für den Natur- und Artenschutz ausgewiesen werden.
- Für Planungsverfahren sollten feste Planungszeiten vorgeschrieben werden. Dazu muss das zuständige Personal aufgestockt werden.
- Gerichtsverfahren bei zeitkritischen Vorhaben werden vorgezogen.
- Regelungen sollen wo möglich vereinfacht werden (Beispiel: Flugsicherheit).
- Die betroffenen Kommunen sollen an den Gewinnen von Anlagen der Erneuerbaren Energien beteiligt werden. Anwohner*innen im direkten Umfeld der Anlagen, sollten zusätzlich durch vergünstigte Strompreise oder finanzielle Beteiligungsmöglichkeiten profitieren können.

Bürgerbeteiligung

- Alle Informationen sollen öffentlich digital einsehbar sein. Stellungnahmen sollen online eingereicht werden können.
- Bei kritischen Projekten sollte aktiv Bürgerbeteiligung praktiziert werden. Bürgerräte und direktdemokratische Verfahren sollten von der Politik als Chance und nicht Hemmnis verstanden werden.
- Bürgerbeteiligungen sollen partizipativ – z. B. mit gelosten Bürgerversammlungen – gestaltet werden.
- Politische Leitentscheidungen über Parteigrenzen hinaus langfristig absichern

2.5 Zur Rolle der Digitalisierung

Digitalisierung bedeutet, dass immer mehr Vorgänge, die zuvor „per Hand“ und „auf Papier“ gemacht wurden, stattdessen mit Hilfe von Computern oder anderen automatischen Maschinen und gegebenenfalls via Internet erledigt werden. Beispiele sind die automatische Steuerung von Verkehrssystemen, Straßenbeleuchtungen oder Stromnetzen. Dazu kommt die digitale Steuerung in den Haushalten, in der Wirtschaft (Home-Office, Industrie 4.0) und in der Verwaltung. Ohne diese Konzepte wird ein Leben von zehn Milliarden Menschen mit einem hohen Lebensstandard auf unserem Planeten kaum möglich sein. Dieser Übergang erfordert jedoch die Bewältigung einer Vielzahl von neuen Herausforderungen, deren Konsequenzen heute noch kaum absehbar sind.

Daher ist es kein Wunder, dass die Chancen und Risiken der Digitalisierung je nach Einsatzgebiet kontrovers diskutiert werden:

Chancen der Digitalisierung

Die Digitalisierung bietet vielfältige Chancen für den Klimaschutz. Beispiele dafür sind:

- Digitale Landwirtschaft: Geforscht wird zum Beispiel an Methoden, bei denen die Äcker nicht mehr gepflügt und großflächig gedüngt werden. Stattdessen werden die Samen punktgenau von Maschinen in den Boden gespritzt. Der Dünger wird dann den Pflanzen z. B. durch Drohnen direkt zugeführt – dadurch wird insgesamt deutlich weniger Dünger verbraucht. Man hofft damit die Lachgasemissionen auf ein Drittel reduzieren zu können (siehe Teil 3, Kapitel »Landwirtschaft, Ernährung, Bodennutzung und Kompensation«).
- Smart Grids: Mit Hilfe von intelligenten Stromnetzen werden Stromerzeugung, -speicherung und -verbrauch besser aufeinander abgestimmt. In Privathaushalten können Haushaltsgeräte wie Waschmaschinen gezielt dann eingeschaltet werden, wenn das Stromangebot hoch und der Preis für die Endkund*innen niedrig ist. Gleiches gilt für Ladestationen von Elektroautos, ob Zuhause, in Unternehmen oder öffentlichen Stellen (siehe im Teil 3 im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung«).
- Smart Home/Internet of Things: Das digitale Haus kann durch die Steuerung von vernetzten Geräten den Energie- und Wärmeverbrauch optimieren. Es spart auch Kosten, wenn beispielsweise „intelligente“ Thermostate, Kühlschränke oder Lampen mit einer haushaltszentralen Steuerung vernetzt sind und (teil-)automatisch

gesteuert werden. Das Internet of Things bietet auch Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen Einsparmöglichkeiten in allen Verbrauchsbereichen (siehe im Teil 3 im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« im Abschnitt »Lastmanagement und Smart Grid«).

- Digitalisierung des Verkehrs: Carsharing mit autonom fahrenden Fahrzeugen kann dazu führen, dass Privatpersonen auf die Anschaffung eines eigenen PKW verzichten. Einige Studien halten es für möglich, dass bis zu drei Viertel aller PKW wegfallen. Dadurch werden Energie und Ressourcen zur Herstellung der PKW gespart. Auch werden Menschen, die keinen PKW besitzen, eher das Fahrrad oder den ÖPNV benutzen. Eine elektronische Fahrkarte, die für alle Verkehrsmittel gültig ist, kann für einen effizienteren Verkehr sorgen (siehe Teil 3 im Kapitel »Verkehr«).
- Die Organisation einer echten Kreislaufwirtschaft (»circular economy«) wird möglich durch die vollständige Erfassung aller Produkte und ein Pfandsystem für alle Produkte, die nicht natürlich und emissionsfrei abbaubar sind. Dies kann mit Hilfe eines digitalen Systems realisiert werden (siehe im Kapitel 2.3 »Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft«).
- Klima- und Verbrauchsdaten: Digitalisierung ermöglicht eine bessere Erhebung, Auswertung und Speicherung von Daten zu Klima sowie Energie- und Ressourcenverbrauch. Eine Offenlegung von Klimadaten, Einsparmöglichkeiten für Energie und Ressourcen sowie der bestehenden Förderprogramme im Internet sollte dem folgen. Wenn die Umstellung der Gesellschaft und Wirtschaft auf Klimaneutralität als ein gesellschaftlicher Lernprozess begriffen wird, dann sollte es ein Portal geben, das alle Informationen aus einer Hand bereitstellt.
- Digitalisierung der Bürgerbeteiligung und der Demokratie: Die Energiewende und die Verkehrswende stoßen beim Ausbau der Infrastruktur wie dem Bau von Windenergieanlagen oder von Bahnanlagen häufig auf Widerstand von betroffenen Bürger*innen. Digitale Informations- und Beteiligungsplattformen können dabei helfen, die Beteiligungsprozesse zu verbessern und neue Formen der Beteiligung zu ermöglichen (siehe auch im Kapitel 2.4 »Planungsrecht und Bürgerbeteiligung«). Denkbar sind auch neue Formen der Demokratie wie digitale Abstimmungen. In Schleswig-Holstein sind als erstem Bundesland auch Online-Volksinitiativen zugelassen.

Probleme der Digitalisierung

Digitalisierung kann auch Bemühungen des Klimaschutzes konterkarieren oder andere problematische Folgewirkungen verursachen:

- Neue digitale Technologien können zu einer erhöhten Nutzung führen und damit Effizienzgewinne wettmachen. Wenn freiwerdende Ressourcen zu zusätzlichen Aktivitäten, die das Klima belasten, eingesetzt werden, wird nichts gewonnen. Diese sogenannten „Rebound-Effekte“ sind keine Besonderheit der Digitalisierung, fallen aber hier aktuell stark ins Auge. Dies wird in der Regel nur durch eine Steuerung über die Preisgestaltung verhindert werden können.[88]
- Ein besonderes Problem ist durch den riesigen Stromverbrauch der Digitalwirtschaft entstanden. In Deutschland benötigen vor allem die Internetserver und Datenzentren bereits zwei Prozent des Stroms, obwohl viele Server im Ausland stehen. Hier gibt es mittlerweile eigene Forschungsprojekte, wie dem begegnet werden kann.[89]
- Zweischneidig ist auch die Bewertung der Künstlichen Intelligenz (KI). KI kann erheblich zu mehr Effizienz zum Beispiel in der Industrie, im Verkehr und auch von Haushaltsgeräten beitragen. Sie ist aber oft auch mit einer erheblichen Steigerung der verarbeiteten Datenmengen verbunden (Big Data), was den Energie- und Ressourcenverbrauch nach oben treiben kann. Hier kommt es neben dem Augenmerk auf die Entwicklung der Hardware in Zukunft auch auf die energieeffiziente Softwaregestaltung an.[90]
- Mit der zunehmenden Digitalisierung stellen sich auch neue Probleme, die unabhängig von der Klimaschutzpolitik gelöst werden müssen: [91]

---

[88] Siehe UBA (2016/3)

[89] Siehe Eco (2020/1)

[90] Siehe UBA (2019/14)

[91] Auch bei der Entstehung der fossilen Ökonomie Anfang des 20. Jahrhunderts kam es zur Herausbildung von Monopolen. In den USA wurde 1911 die Firma „Standard Oil“ (Rockefeller) durch das oberste Gericht in 31 Konzerne zerschlagen. Die Entwicklung der Digitalökonomie tendiert ebenfalls stark zur Bildung von Weltmonopolen. Zur Regulierung der Konzerne, der Internetökonomie und dem Recht auf Daten siehe z.B. Lanier (2013/1), Srnicek (2016/1)

- o die Gefahr der Überwachung und Steuerung der Menschen durch große Unternehmen
- o die Gefahr, dass große digitale Unternehmen die Ökonomie beherrschen
- o die Gefahr, dass der Staat durch Überwachung und Ausspähung aller Aktivitäten die persönliche Freiheit einschränkt.

Diese Probleme werden relevanter, je mehr Daten durch digitale Technologien verarbeitet oder für ihre Nutzung bereitgestellt werden. In der analogen Welt reichen meist bereits einfache Zugangsbarrieren und bestehende Entfernungen. In der digitalen Welt müssen Staat, Unternehmen und Privatpersonen umfassendere Sicherungsmechanismen schaffen und nutzen.

Bewertung der Rolle der Digitalisierung beim Klimaschutz

Die Bewertung der Auswirkungen der Digitalisierung auf die Treibhausgasemissionen fällt sehr unterschiedlich aus. Der Verband Bitkom[92] hat eine Zusammenstellung von einschlägigen Studien veröffentlicht. Die durch den Energieverbrauch verursachten Emissionen werden weltweit auf ca. zwei bis drei Prozent geschätzt. Ob es zu weiteren erheblichen Zuwächsen kommt, die von einigen Autor*innen prognostiziert werden, ist umstritten. Verursacher*innen sind in erster Linie die Rechenzentren und die Telekommunikation.

Auf der anderen Seite werden die Potenziale für eine Emissionsreduzierung durch Digitalisierung als riesig eingeschätzt. Bis 2030 sollen nach der Studie 39 Prozent bis maximal 58 Prozent aller Emissionen eingespart werden können. Die größten Einsparungen können demnach in der Industrie erfolgen, danach folgen Mobilität (intelligente Logistik und Verkehrssteuerung), Energieversorgung (Smart Grid), Gebäudesektor (Smart Home und Online Business).

Allerdings sind diese Zahlen auf Basis der heutigen Emissionen berechnet und beinhalten viele Effektivitätsgewinne, die sowieso bei den Projektionen in Teil 3 dieser Studie berücksichtigt werden. Digitalisierung geht demnach einher mit

- Effizienzsteigerungen

[92] Bitkom e.V. - Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V; siehe Bitkom (2020/1)

- Vermeidungs- und Kreislaufstrategien.

Insofern ist die in der Studie genannte Reduzierung der Treibhausgasemissionen durch Digitalisierung kein zusätzlicher Effekt, sondern die Digitalisierung ist notwendige Voraussetzung der in Teil 3 beschriebenen Maßnahmen in allen Sektoren. Die Zahlen sagen also weniger über den absoluten Beitrag der Digitalisierung aus, sondern vielmehr darüber, wie sehr die Transformation von einer erfolgreichen Digitalisierung abhängig ist. Das gleiche gilt für die Treibhausgasemissionen, die durch Rechenzentren, Funkmasten und die Herstellung von Endgeräten verursacht werden. Sie reduzieren sich in gleichem Umfang, in dem die Herstellung und der Betrieb der Geräte mit Erneuerbaren Energien erfolgt.

Die Corona-Krise hat gezeigt, dass Deutschland in einigen Bereichen eine schnelle Digitalisierung und grundlegende Veränderungen vornehmen kann, wenn es notwendig ist. Ende 2020 arbeiteten in Deutschland 25 Prozent der Beschäftigten ausschließlich im Homeoffice und weitere 20 Prozent taten dies teilweise. Einer Umfrage von Bitkom zufolge könnte dies auch in Zukunft so bleiben. [93] Würden 40 Prozent der Beschäftigten zwei zusätzliche Tage pro Woche Telearbeit machen, würde 5,4 MtCO2eq/a eingespart.[94]

Die Digitalisierung sollte daher auch in NRW sowohl als Nachhaltigkeitsmotor wie auch als wirtschaftliche Chance betrachtet werden. Die wesentlichen Rahmenbedingungen müssen auf Bundes- und EU-Ebene gestaltet werden. Aber auch auf Landesebene gibt es einige Hebel, um die Nachhaltigkeitspotenziale der Digitalisierung zu entfalten.

Maßnahmen zur Nutzung der Digitalisierung für den Klimaschutz

Das Bundesumweltministerium hat 2020 die umweltpolitische Digitalagenda vorgelegt. [95] Diese beinhaltet eine Reihe von Maßnahmen, um Digitalisierung klimaverträglicher zu machen oder mit Digitalisierung Klimaschutz zu erreichen. Die Debatte steht aber noch sehr am Anfang. Auf einige Probleme, dir durch neue

[93] Siehe Bitkom (2020/2)

[94] Siehe Greenpeace (2020/2)

[95] Siehe BMU (2019/1)

technische Entwicklungen entstanden sind, gibt es noch keine geeigneten Antworten. Es ist absolut notwendig, dass hier schnell nachhaltige Lösungen geschaffen werden. Gleichzeitig müssen die Potenziale der Digitalisierung für den Klimaschutz offensiv genutzt werden:

- Intelligente Netze können Stromerzeugung, -speicherung und -verbrauch besser aufeinander abstimmen und auch zu Kostenersparnissen führen.
- Das Internet of Things und Smart-Home-Anwendungen ermöglichen Energie- und Wärmeeinsparungen in Privathaushalten, Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen.
- Digitale Verkehrssysteme und Carsharing mit autonomen Fahrzeugen können erheblich zur Reduzierung des PKW- und Verkehrsaufkommens beitragen.
- Komplexe Systeme, wie eine echte und umfassende Kreislaufwirtschaft, können nur mit Hilfe von digitalen Datenbanken und -Netzwerken umgesetzt werden.
- Informationen, die Individuen, Unternehmen und Organisationen dazu verhelfen, nachhaltiges Verhalten und Lösungen zu realisieren, können mit digitalen Portalen einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden.
- Mit dem flächendeckenden Ausbau von Glasfaser- und 5G-Netzen, strengeren Kriterien für die öffentliche Beschaffung und Vorgaben zur Modernisierung von Rechenzentren könnten alte, weniger effiziente Technologien abgelöst werden.
- Die Förderung von Forschung und Entwicklung sollte auch die Förderung energiesparender Hard- und Software berücksichtigen.

Maßnahmen zur Regulierung der Digitalisierung

- Datenschutz und Datensicherheit gilt es umfassend sicherzustellen. Alle in der Europäischen Union angebotenen analogen Dienstleistungen und digitalen Anwendungen müssen den EU-Regularien folgen.
- Die Regulierung der Digitalisierung muss zeitnah mit neuen Entwicklungen fortgeschrieben werden.
- Das Wettbewerbsrecht muss ins Internetzeitalter geholt werden. Digitale Plattformen müssen streng reguliert werden, damit sie eine eventuelle marktbeherrschende Stellung nicht ausnutzen und unumkehrbare Lock-in-Effekte auf dem Markt verhindert oder aufgelöst werden können.
- Wir brauchen eine Steuerpolitik, die die international tätigen digitalen Konzerne in einer angemessenen Weise auch dort besteuert, wo ihre User leben.

2.6 Treibhausgaspreise[96]

Von einem Treibhausgaspreis (oder einfach CO_2-Preis) spricht man, wenn eine Person oder Firma, die Treibhausgase freisetzt, dafür etwas bezahlen muss. Alle vorliegenden Studien halten die Einführung eines Preises für Treibhausgas-Emissionen für ein sinnvolles und sehr wichtiges Instrument der Klimaschutz-Politik.

Soll das 1,5-Grad Ziel erreicht werden, dann sollte der Preis im Jahr 2030 zwischen 80 und 180 Euro pro Tonne Kohlendioxid liegen. Für 2040 liegen die Empfehlungen der Studien zwischen 140 und 325 Euro. Als Einstiegspreise werden Preise zwischen 30 und 70 Euro – bei einigen auch über 100 Euro – empfohlen. Die bestehende Preissetzung durch das Emissionshandelssystem der EU und die ergänzende Preissetzung in Deutschland sind daher ein wichtiges Signal, aber noch nicht ausreichend.[97]

Auf Basis der unterschiedlichen Studien empfehlen wir folgenden Kompromiss: Der bestehende EU-Emissionshandel muss auf alle Sektoren ausgeweitet und den Zielen der Klimaneutralität angepasst werden. Sollte dies kurzfristig nicht gelingen, soll national eine wirksame Treibhausgas-Steuer in 2023 mit etwa 60 Euro für eine Tonne Kohlendioxid starten und dann jährlich um zehn Euro steigen. Der Preis sollte jährlich von einer unabhängigen Kommission überprüft und ggf. nachjustiert werden.

Allerdings sollte der Preis um weitere begleitende Maßnahmen[98] ergänzt werden, damit er von Bürger*innen und Wirtschaft akzeptiert wird und gut funktionieren kann. Dafür sollte der CO_2-Preis durch einen sozialen Ausgleich kompensiert werden. Wichtig dabei ist, dass die Bürger*innen den sozialen Ausgleich als solchen wahrnehmen und akzeptieren. Wenn das Gefühl entsteht, dass die Maßnahmen der Klimapolitik sozial ungerecht sind, kann dies die Akzeptanz für die gesamte Klimapolitik beschädigen. Auf Grundlage der Quellen erscheint ein sozialer Ausgleich pro Kopf in Form einer Direktzahlung sinnvoll, der zu einer deutlichen Kompensation der Mehrausgaben der einkommensschwächeren Hälfte der Bevölkerung führt.

Maßnahmen zur Treibhausgas-Bepreisung

- Der bestehende nationale Treibhausgaspreis sollte auf 60 Euro pro Tonne Kohlendioxid-Äquivalent erhöht und dann jährlich um zehn Euro angehoben werden.[99]

- Dieser Preis sollte gleichzeitig als nationaler Mindestpreis im EU-Emissionshandel gelten.
- Freiwerdende EU-Emissionshandels-Zertifikate werden soweit notwendig gelöscht, damit durch den Treibhausgaspreis in Deutschland die Zertifikate nicht verbilligt und so zusätzliche Emissionen ausgelöst werden.
- Abschaffung aller klimaschädlichen Subventionen (zum Beispiel die Steuerbefreiung von Kerosin)

Maßnahmen zur Kompensation der Belastungen für die Bürger*innen

- Der Großteil der durch einen höheren CO_2-Preis entstehenden zusätzlichen Staatseinnahmen, sollten den Bürger*innen durch ein festes Klimageld pro Person zurückgezahlt werden. Dadurch würden vor allem Niedrigverdiener*innen und Eltern mit Kindern Vorteile haben. Das wäre fair, da sie heute den geringsten CO_2-Fußabdruck haben.
- Eine verstärkte Senkung der Abgaben und Umlagen auf Strom wird ebenfalls vorgeschlagen.[100]
- Für Pendler*innen wird ein Pendlergeld anstelle der Entfernungspauschale vorgeschlagen.

---

[96] Eine ausführliche Diskussion der Vor- und Nachteile von festen CO_2-Preisen und eines Emissionshandelssystems und die möglichen Gestaltungen des Treibhausgaspreises und des hier vorgestellten Kompromissvorschlags findet sich in MD (2020/1)

[97] Der nationale Emissionshandel startet nach der Bund-Länder-Einigung nun mit einem fixen CO_2-Preis von 25 Euro pro Tonne im Jahr 2021. Das entspricht brutto 7 Cent pro Liter Benzin, 8 Cent pro Liter Diesel, 8 Cent pro Liter Heizöl und 0,6 Cent pro Kilowattstunde Erdgas. Bis zum Jahr 2025 werden die Zertifikate mit einem auf 55 Euro ansteigenden Festpreis ausgegeben. Ab 2026 wird der Zertifikatspreis dann durch Versteigerungen ermittelt, wobei für 2026 ein Preiskorridor von 55 Euro bis 65 Euro pro Tonne CO_2 vorgegeben ist.

[98] Zur Kompensation der Bürger*innen siehe Agora Energiewende (2019/2) und Edenhofer (2019/1); zur Industrie siehe Matthes (2019/1), FÖS (2019/1)

[99] Im Handbuch haben wir einen Einstiegspreis von 50 Euro ab 2021 empfohlen. Deshalb empfehlen wir nun einen Preis von 60 Euro ab 2022.

[100] Die Gefahr bei dieser Alternative wird darin gesehen, dass die Menschen eine Senkung des Strompreises nicht als Kompensation wahrnehmen – ähnlich wie es bei der Ökosteuer war, die über die Rentenbeiträge kompensiert wurde. Die Gefahr besteht insbesondere deshalb, weil der CO_2-Preis sich ja nicht nur auf die Strompreise, sondern auch auf das Heizen und die Benzinpreise auswirkt. Letzteres war in Frankreich der Auslöser für den Gelbwestenaufstand.

- Für Menschen, die überproportional von der CO_2-Bepreisung betroffen sind, (bspw. mit alten großen, oft noch mit Öl beheizten Häusern) sollte es einen „Härtefall-Fonds“ oder attraktive Förderprogramme für die Investition in klimafreundliche Alternativen geben.

Maßnahmen zur Kompensationen für die Industrie

- Bei einem starken Anstieg der nationalen Treibhausgasabgaben sollten für einen Teil der Einnahmen auch Rückerstattungen an Unternehmen geprüft werden (z.B. in Abhängigkeit von der Lohnsumme des Betriebes). Es muss Sonderregelungen für Grundstoffindustrien geben, solange es keine gemeinsame europäische Regelung gibt (siehe in Teil 3 im Kapitel »Industrie«), um Carbon Leakage effektiv zu vermeiden.
- Mit den Einnahmen werden Investitionen in den Bereichen gefördert, in denen besonders hohe Einsparungen an Treibhausgas zu erwarten sind, beispielsweise über Carbon Contracts for Difference.

2.7 Die Ökonomie der Umstellung

Die Finanzierung der Umstellung

Wissenschaftler*innen unterschiedlicher Institute haben die Umstellung durchgerechnet. Das Fraunhofer IWES kam dabei zu folgendem Ergebnis: [101] Die Energiewende ist ein Investitionsvorhaben ohne Risiko. Es führt zu großen Gewinnen für die Gesellschaft (Rendite vier bis sieben Prozent). Die laufenden Kosten für neue Anlagen machen in Zukunft nur noch einen Bruchteil der heutigen Kosten für fossile Brennstoffe aus. Dazu kommen positive Auswirkungen für die Wirtschaft und neue Arbeitsplätze.

Dazu kommen positive Auswirkungen auf die Gesamtwirtschaft durch die starke dauerhafte Investitionstätigkeit in eine produktive Infrastruktur. Demnach würde sich die Energiewende sogar im nationalen Alleingang lohnen.

Die Kosten der Umstellung in Deutschland[102]

Insgesamt haben die Studien die Gesamtkosten der Umstellung auf ein klimaneutrales Deutschland auf 1,5 bis zwei Billionen Euro berechnet. Der größte Teil davon entfällt auf den Ausbau der Wind- und Solarenergieanlagen und allein ein Drittel auf die wärmetechnische Sanierung der Häuser. Aber auch der Umbau der Industrie wird erhebliche Investitionen und damit Finanzmittel benötigen.

Viele Investitionen rechnen sich über die Jahre und sind deshalb für Unternehmen und Privatpersonen attraktiv. Schon heute beteiligen sich viele Menschen und Unternehmen mit Investitionen an den Erneuerbaren Energien. Auch Investitionen in andere Bereiche der Infrastruktur wie den Bau von Stromtrassen, von Oberleitungen für LKW an den Autobahnen oder Stromspeicher können grundsätzlich durch Unternehmen erfolgen. Die Voraussetzung ist allerdings, dass die Rahmenbedingungen es erlauben, dass die Investitionen sich durch den Betrieb lohnen, ohne dass die Nutzer*innen zu hohe Preise dafür bezahlen müssen.

---

[101] Siehe Fraunhofer IWES (2014/1)

[102] Siehe MD (2020/2), dort Anlage 11

Insbesondere bei der Sanierung der Häuser stellt sich die Situation schwieriger dar. Die meisten Bürger*innen tätigen nicht gerne langfristige Investitionen oder bekommen nicht die nötigen Mittel dafür. Daher sollte der Staat im privaten Bereich einen Teil der Kosten für die Energiewende vorfinanzieren. Auch einige Wirtschaftszweige können den Übergang nicht selbst finanzieren und müssen beim Neubau oder Umbau ihrer Anlagen aus Steuermitteln unterstützt werden. Dies gilt vor allem für die Grundstoffindustrie – also die Stahlindustrie und die Grundstoffchemie, die in NRW überproportional stark vertreten sind und ohne staatliche Unterstützung erhebliche Nachteile im internationalen Wettbewerb hätten. Aber selbst diese Investitionen würden sich am Schluss volkswirtschaftlich rentieren.[103] Schließlich erfordert auch die Erhöhung des Anteils der Wälder erhebliche staatliche Mittel (siehe im Teil 3 im Kapitel »Landwirtschaft, Ernährung, Bodennutzung und Kompensation« im Abschnitt »Wald«).

Die Kosten der Umstellung in NRW

Insgesamt würde der Anteil an Investitionen in den Ausbau der Erneuerbaren Energien in NRW erheblich geringer ausfallen als im Bundesschnitt, der Anteil der Haussanierung dürfte im Bundesschnitt liegen, der Anteil der Industrie und der Anteil der Verkehrsinvestitionen dagegen deutlich höher. Das gleiche gilt für den Umbau der Städte. Wenn wir annehmen, dass sich diese Unterschiede in NRW gegenüber dem Bundesdurchschnitt in etwa ausgleichen, dann dürfte der Umbau in NRW zusätzliche Investitionen von 300 bis 400 Milliarden Euro in 20 Jahren benötigen. Davon dürfte ein Drittel auf die Sanierung der Häuser – insbesondere der Wohnungen fallen. Wie hoch die staatlichen Investitionen letztlich sein müssen, um ausreichend Wirkung zu entfalten, ist sehr von unterschiedlichen politischen Rahmensetzungen abhängig. Wenn man von einer Quote von 25 Prozent ausgeht, wären staatliche Mittel für NRW in Höhe von bis zu fünf Milliarden Euro pro Jahr – in 20 Jahren bis zu 100 Milliarden Euro – notwendig.

[103] Siehe Dechema (2019/1)

Wenn man von einem Anteil des Landes und der Kommunen von 50 Prozent ausgeht, dann muss das Land NRW jährlich 2,5 Milliarden Euro zusätzlich finanzieren – also eine durchaus realistische Größenordnung.[104]

Zudem wird ein kompletter Umbau der Agrar-Zuschüsse der EU notwendig sein. Insgesamt bedarf es einer Abkehr von der Politik der schwarzen Null hin zu einer präventiven Investitionspolitik für den Klimaschutz.

Würde man die Umstellung bis 2040 über Kredite finanzieren, würde der sogenannte „Break-Even"-Punkt spätestens nach fünfzehn Jahren erreicht. Ab diesem Zeitpunkt kann also begonnen werden, Kredite zurück zu zahlen. Je nach Annahme des Zinssatzes und der Steigerung der Energiekosten dauert es dann noch weitere zehn bis fünfzehn Jahre, bis die Kredite für die Finanzierung der Energiewende getilgt sind.[105] Sobald der Staat anfängt zurückzuzahlen, könnte er die Bürger*innen an den Einsparungen beteiligen. Nach zwanzig Jahren würden dann die Bürger*innen sogar von Jahr zu Jahr mehr von der Umstellung profitieren.

Nachhaltigkeit in der Finanzbranche

Einen wichtigen Beitrag zur Finanzierung der Umstellung kann das sogenannte „Divestment" leisten. Es ist das Gegenteil von Investment. Dabei wird Geld aus problematisch angesehenen Industrien wie Atomkraft, Erdöl- oder Kohlekraftwerken abgezogen. Danach wird es in zukunftsfähige Industrien wie Solarzellen oder Elektroautos investiert.

Eine Studie der Zeitschrift Economist hat ergeben, dass das Risiko für die weltweiten Vermögen durch die fossile Blase auf die ungeheure Summe von 43 Billionen Dollar

---

[104] Das ist nur eine pauschale Überschlagsrechnung, um eine Vorstellung von der finanziellen Dimension zu bekommen. Angenommen wurde, dass die Umstellung auf eine treibhausgasneutrale Gesellschaft in NRW pro Kopf genauso viel kostet, wie im Bundesschnitt (siehe dazu MD (2020/1)). Wieviel davon jedoch von der EU, dem Bund, dem Land und den Kommunen finanziert werden muss, hängt von der Ausgestaltung der Gesetze ab.

[105] Fraunhofer IWES (2014/1) hat die Rechnung für eine Umstellung bis 2050 aufgestellt. Will man das 1,5-Grad-Ziel erreichen, dann muss die Umstellung allerdings schon bis 2040 erreicht sein. Daher muss in den ersten Jahren deutlich mehr investiert werden. Allerdings sinken dann die Kosten für fossile Brennstoffe ebenfalls viel früher und schneller. An den grundsätzlichen Aussagen der Studie würde sich dadurch nichts ändern. Der Zeitraum bis zum Erreichen des Break-Even-Punktes könnte sich sogar verkürzen.

geschätzt wird.[106] Mittlerweile steigen bereits immer mehr Großanlegende auf „grün“ um. In der Vorreiterrolle sind die großen Versicherungsgesellschaften wie AXA, Munich RE, Swiss Re, Allianz und Züricher, die die Risiken der Klimaerwärmung in ihrer Risikoabschätzung einplanen.[107]

Allgemeine Finanzierungs-Maßnahmen

- In jedem Politikbereich sollten die Gesamtkosten der Umstellung festgestellt werden. Danach muss analysiert werden, welche Maßnahmen privat finanziert werden können und welche Investitionen oder Anreize der Staat finanzieren soll.
- Die Mittel können über Sondermittel des Staates oder über Kredite der staatlichen Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) oder der Europäischen Investitionsbank (EIB) bereitgestellt werden. So werden die optimalen Konditionen erreicht.
- Es ist absehbar, dass zusätzliche staatliche Investitionen in einer Größenordnung in den kommenden zwei Jahrzehnten notwendig sein werden, die eine Flexibilisierung der Schuldenbremse, ähnlich wie bei der Pandemiebekämpfung, auf allen staatlichen Ebenen erforderlich machen.

Maßnahmen zur Finanzierung für NRW

- Länder und Bund sollten klären, wie die Lastenverteilung zwischen EU, Bund, Ländern und Kommunen erfolgen soll. Die Schwerpunkte des Landes werden vermutlich bei der Sanierung der Häuser, beim Ausbau der Verkehrsinfrastruktur und bei der Unterstützung der mittelständischen Wirtschaft liegen.
- Das Land wird auch bei den überwiegend vom Bund (z. B. Umstellung der Industrie) und von der EU (Umstellung der Landwirtschaft) finanzierten Bereichen eine wichtige Aufgabe bei der Umsetzung der Programme haben.

[106] Siehe Rifkin (2019/1)

[107] Siehe z.B. Munich Re (2020/1)

- Dazu sollten sich alle Behörden des Landes und der Kommunen und alle öffentliche Aufgabenträger*innen auf diese Aufgabe einstellen:[108]
  - Insbesondere die Kommunen und ihre 86 Sparkassen und deren zwei Dachverbände haben bei der Beratung und der Finanzierung für die Sanierung des Gebäudebestandes eine entscheidende Aufgabe.
  - Weitere wichtige Institutionen für die Umstellung sind die Förderbank des Landes NRW.Bank, die vier regionalen Verkehrsverbünde, die Organisationen der Wirtschaftsförderung wie der Verband der Wirtschaftsförderungs- und Entwicklungsgesellschaften NRW, die IHK Beratungs- und Projektgesellschaft mbH und andere.
  - Schließlich sollten die einschlägigen Wirtschaftsvertretungen wie die sieben Handwerkskammern mit ihrem Dachverband WHKT, die 16 Industrie- und Handelskammern mit dem Dachverband IHK NRW, die Clearingstelle Mittelstand, die Technologieberatungsstelle NRW, die Landwirtschaftskammer und viele andere Aufgabenträger*innen mit eingebunden werden.

Klimapolitik und Arbeitsplätze

Es kommt immer wieder vor, dass in den Medien ein Gegensatz von Klimapolitik und Arbeitsmarktpolitik aufgemacht wird. Anstoß für diese Darstellungen sind in der Regel Äußerungen von Vertreter*innen betroffener Wirtschaftszweige. Tatsächlich sind sich die einschlägigen Studien durchweg einig darüber, dass durch eine engagierte Klimaschutzpolitik im Saldo mehr Arbeitsplätze entstehen als verloren gehen.[109] Schon heute hat der Klimaschutz die Entstehung von über einer Millionen Arbeitsplätze angestoßen.[110] Selbst in NRW kommen die Studien zu dem Ergebnis, dass die Zahl der

[108] Siehe Anlage 7

[109] Der BDI rechnet mit ca. 250.000 zusätzlichen Arbeitsplätzen. Siehe BDI (2018/1)

[110] Siehe BMU (2018/1); die Zahl der Menschen, die in der Querschnittsbranche Umwelttechnik und Ressourceneffizienz beschäftigt sind, wird bereits für 2012 auf 1,5 bis 2,2 Millionen geschätzt.

Arbeitsplätze, die im Braunkohleabbau und der damit verbundenen Energiewirtschaft verloren gehen, bereits bis 2030 durch neue Arbeitsplätze kompensiert werden wird.[111]

Die Auswirkung in den verschiedenen Branchen[112]

Hauptgewinnerin der Klimapolitik wird die Bauwirtschaft und insbesondere das damit verbundene Handwerk sein. Die Sanierung der Häuser auf Niedrigenergiestandard und der Umbau der Heizungssysteme erfordert zusätzlich Arbeit für mindestens 25 Jahre. Auch der Ausbau der Erneuerbaren Energien und die Wartung und Pflege gehören zu den Gewinnerbranchen. Weiterhin müssen die Anlagen und Geräte gebaut werden, was zu mehr Beschäftigung im Maschinenbausektor führt.

Verlierer des Klimawandels sind naturgemäß der Bergbau, die gesamte Öl- und Gaswirtschaft und die Betreiber der fossilen Kraftwerke (zum Kohleausstieg siehe die ausführliche Darstellung in Anlage 10 und im Teil 3 im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung«). Die Elektrifizierung des Straßenverkehrs führt zu einem Verlust von einem Teil der Arbeitsplätze in den beiden Raffinerien in Köln (Rheinland Raffinerie – heute 1.500 Arbeitsplätze plus 1.500 bei lokalen Geschäftspartnern) und in Gelsenkirchen (BP Gelsenkirchen – heute 2.300 Arbeitsplätze) sowie einem großen Teil der Tankstellen. Hier sollte die Politik frühzeitig Nachfolgekonzepte konzipieren, da die Tankstellen zurzeit auch eine Funktion zur Füllung von Versorgungslücken außerhalb der Geschäftszeiten haben.

Eine Sonderstellung nimmt der Fahrzeugbau ein. Auch hier werden Arbeitsplätze verloren gehen. Diese Entwicklung wird aber auch dann stattfinden, wenn keine Klimaschutzpolitik gemacht wird, da der Übergang zum Elektroauto sich auch unabhängig von der Klimapolitik aufgrund der deutlich einfacheren Bauweise und Wartung elektrischer Antriebe durchsetzen wird.

---

[111] Siehe Anlage 10, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (2019/1)

[112] Siehe FES (2020/1)

Maßnahmen zur Arbeitsmarktpolitik

- Im Braunkohlebergbau und in der Energiewirtschaft, die auf fossilen Brennstoffen basiert, sollten geeignete Programme für die Beschäftigungssicherung, Frühpensionierung und wo nötig Umschulung der Arbeitnehmer*innen finanziert werden.
- Es sollte frühzeitig identifiziert werden, in welchen Sektoren, wie zum Beispiel der Mineralölwirtschaft, Arbeitsplätze wegfallen können und welche Alternativen den Beschäftigten angeboten werden können.
- Die Erneuerbaren Energien und die Elektrifizierung der Haushalte, des Verkehrs und der Industrie sind durchweg weniger kapitalintensiv als die entsprechenden fossilen Technologien. Das bedeutet, dass Investitionen bis zu dreimal mehr Arbeitsplätze kreieren können. [113] Deswegen wird in mehreren Studien vorgeschlagen, zukünftig den Faktor Arbeit weniger mit Steuern zu belasten und dafür Ressourcenverbrauch höher zu besteuern.
- In den mit der Erstellung der Erneuerbaren-Energien-Anlagen befassten Firmen und insbesondere im Bausektor (Wärmedämmung und Wärmeversorgung) zeichnet sich ein erheblicher Arbeitskräftemangel ab. Deswegen sind entsprechende Ausbildungs- und Umschulungsprogramme erforderlich (siehe im Teil 3 in den Kapiteln »Energiebedarf und Stromversorgung« und »Hauswärme«).

Der Zeitfaktor

Ein wichtige Rolle spielt der Zeitfaktor. Die oft geäußerte Ansicht, dass ein langsamer Übergang zu einer treibhausgasneutralen Gesellschaft die Transformation erleichtern und Übergangsprobleme mildern kann, trifft insbesondere für Deutschland nicht zu. Im Gegenteil: Dies kann dazu führen, dass Wirtschaftszweige nicht schnell genug die

[113] Siehe SYSTEMIQ (2020/1),

nötigen neuen Technologien entwickeln und daher Marktchancen verpassen und im schlimmsten Fall nicht konkurrenzfähig sind.[114]

Deutschland hat die Weltmarktführung vor allem in zwei Branchen, dem Fahrzeugbau und dem Maschinenbau. Um diese Stellung zu halten, muss die Klimapolitik in Deutschland zum Ziel haben, dass die Wirtschaft in den damit verbundenen Branchen technologisch auf die bevorstehende Herausforderungen eingestellt ist. Je schneller die Transformation im Heimatmarkt Deutschland durchgeführt wird, desto mehr besteht die Chance, dass deutsche Firmen ihr Knowhow in den dadurch entstehenden neuen Wirtschaftszweigen entwickeln und die sich eröffnenden Möglichkeiten nutzen können.[115]

Der schnelle Umstieg ist aber auch in der Grundstoffindustrie und damit für NRW von großer Bedeutung. Gerade in der Stahl-, Grundstoffchemie- und Zementindustrie müssen in den kommenden Jahren veraltete Anlagen ersetzt und große Investitionen getätigt werden. Dabei besteht die Gefahr, dass Investitionen in nicht zukunftsträchtige Anlagen getätigt werden und dadurch sogenannte „stranded investments“ entstehen (siehe auch Teil 3 im Kapitel »Industrie«).[116]

[114] Siehe Heinrich Böll Stiftung (2020/1)

[115] Siehe Agora Energiewende (2020/4)

[116] Siehe MKULNV (2015/1)

2.8 Klima-Handelspolitik

Die Transformation eines global aufgestellten Industriestandortes wie NRW kann gerade auch mit dem Blick auf die vielen mittelständischen „hidden champions“ nur gelingen, wenn Klimaschutz und Nachhaltigkeit zentrale Bestandteile der europäischen Handelspolitik und aller Handelsabkommen werden. Dabei steht die Kompatibilität von Emissionshandelssystemen und Emissionsbesteuerung im Vordergrund – möglichst ohne signifikante Absenkungen der europäischen Standards.[117]

Aber auch wirksame Streitbeilegungs- und Sanktionsmechanismen, die Klimaschutzregelungen tatsächlich durchsetzen können, müssen unerlässlicher Bestandteil eines jeden Handelsabkommens sein.[118] Je nach Partnerland bzw. -region erscheinen zudem spezifische Regelungen sinnvoll, die beispielsweise den Handel mit Produkten ausschließen, für die in großem Stil (Regen-)Wälder gerodet werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für eine sozial-ökologische Ausgestaltung der Transformation in eine klimaneutrale Gesellschaft sind zudem Internationale Abkommen.

Internationale Abkommen

Um die sozial verträgliche und ökologische Rohstoffgewinnung zu regeln und für die Einhaltung der Menschenrechte zu sorgen, sind internationale Abkommen nötig . Staaten und Konzerne müssen wegen Verstößen gegen die Menschenrechte oder gegen UN-Resolutionen zum Umweltschutz, Kinderarbeit, Sklaverei, Arbeitnehmer*innenrechte, Meeresschutz und andere haftbar gemacht werden können. Dagegen muss eine Klage vor internationalen Gerichten möglich sein.

Problematisch sind Handelsabkommen vor allem dann, wenn sie genau die Wirtschaftsbereiche stärken, die maßgeblich zur Klimaerwärmung beitragen, also beispielsweise die Automobilindustrie in den Industriestaaten und die Agrarwirtschaft in Schwellenländern, wenn diese hauptsächlich auf Monokulturen und Waldrodungen fußen. Beim Abschluss neuer Handelsabkommen muss also darauf geachtet werden,

[117] Siehe Teil 3, Sektor 1 Energiebedarf und Stromversorgung, Unterkapitel Finanzielle und politische Aspekte des Kohleausstiegs.

[118] Dieser Aspekt wird am Beispiel des Mercosur-Abkommens deutlich (siehe Ghiotto (2019/1))

einzelne Wirtschaftszweige nicht überproportional zu begünstigen, sondern den Handel auf viele unterschiedliche Bereiche der beteiligten Volkswirtschaften zu erstrecken und jeden von ihnen möglichst nachhaltig aus- bzw. umzugestalten.

Maßnahmen zu internationalen Abkommen

- Deutschland soll den „Treaty-Prozess“, der von der UN vor fünf Jahren initiiert wurde, unterstützen. Dann können Unternehmen und Manager*innen bei Verstößen gegen internationales Recht haftbar gemacht werden.[119]
- Alle Handelsabkommen, die Deutschland oder die EU mit Drittstaaten abschließen, sollten hohe, einklagbare Standards zum Schutz von Klima, Umwelt und Menschenrechten enthalten. Im Rahmen der Welthandelsorganisation (WTO) sollen Verstöße gegen UN-Resolutionen als Umwelt- oder Sozialdumping eingestuft werden.
- In Deutschland könnte der Import von Waren, die unter Verstoß gegen die Menschenrechte und anderen UN-Resolutionen produziert werden, verboten werden.[120]
- Es sollten für Produkte und Produktionsverfahren Normen, Label und Zertifikate eingeführt werden, um internationale Umweltstandards, Nachhaltigkeitsanforderungen und faire Produktionsbedingungen zu gewährleisten.

[119] Siehe GPF (2016/1), Brot für die Welt (2019/1)

[120] Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Studie werden gerade eine Vorlage für ein Lieferkettengesetz im Bundestag und eine weitergehende Vorlage in den EU-Gremien diskutiert. Siehe Lieferkettengesetz (2019/1)

2.9 Effizienz und Suffizienz

Nahezu jeder Konsum von Waren und Dienstleistungen – unsere Waschmaschine, unsere Nahrungsmittel oder unsere Reisen – verursacht Treibhausgasemissionen. Dies ist bedingt durch den Energieverbrauch, durch die Herstellung und den Transport der Produkte und auch durch die Gewinnung und Bearbeitung der Rohstoffe (siehe im Kapitel 2.3 »Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft«). Darum ist es wichtig, dass zukünftig weniger Ressourcen und Energie verbraucht werden. Grundsätzlich gibt es dafür zwei Wege: technische Verbesserungen („Effizienz“) und Änderungen des Konsumverhaltens („Suffizienz“). Insgesamt rechnen wir auf Basis der wissenschaftlichen Studien damit, dass dadurch der Primärenergiebedarf in Deutschland von heute 3.600 TWh/a auf ca. 2.000 TWh im Jahr 2040 sinken wird. In NRW wird sogar einer Reduzierung von 1.100 TWh/a auf 540 TWh/a – also um etwa die Hälfte – für realistisch gehalten.

Effizienz

Dafür sind vor allem folgende Effizienzmaßnahmen verantwortlich:

- Durch das energetische Sanieren kann der Heizbedarf der Häuser mehr als halbiert werden.
- Durch den großflächigen Einsatz von Wärmepumpen für Heizung und Warmwasserbereitung geht die benötigte Energie nochmals zurück, denn Wärmepumpen sind 3- bis 5-mal so effizient in der Wärmeerzeugung wie Gas- oder Ölheizungen.
- Die Motoren von Elektroautos arbeiten mit einem mehr als 300 Prozent höheren Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren.
- Durch Car-Sharing wird die tägliche Nutzungsdauer von PKWs erheblich anwachsen. Es müssen dann weniger Autos produziert werden, was Energie spart.
- Durch energiesparende Technik in den Haushalten und der Industrie kann der Strombedarf für „klassische“ Anwendungen (Elektronik, Beleuchtung, etc.) um bis zu 20 Prozent sinken. Weitere Einsparpotenziale bei Industrieprozessen sind sehr individuell und daher schwer zu prognostizieren.

Suffizienz (= ressourcensparender Konsum)

Dennoch wird immer deutlicher, dass zusätzlich zu den technischen Veränderungen auch Änderungen des Lebensstils für den Klimaschutz notwendig sind.

Effizienzsteigerungen führen zunächst oft zu Material- und Energieeinsparungen und damit zu weniger Treibhausgasausstoß. Allerdings sinken auch die Produktkosten, was Auswirkungen auf das Verhalten von Konsument*innen hat: Das übrige Geld wird in zusätzlichen Konsum investiert und in der Summe finden keine oder nur geringe Einsparungen statt. Man spricht dann vom Rebound-Effekt.[121]

Schon in der Vergangenheit gab es zahlreiche technische Verbesserungen, beispielsweise im Bereich von Motoren, die heute größere Leistungen bei kleinerem Kraftstoffverbrauch erbringen können. Dies hat aber nicht zu einer Reduktion der Emissionen im Mobilitätssektor geführt, u.a. weil immer mehr Güter unterwegs sind und auch die Menschen längere Strecken zurücklegen. Die Zahl der PKW-Neuzulassungen erreichte zuletzt einen Höchststand, die Größe der Autos stieg über die letzten Jahre kontinuierlich. Die Zahl von Flugreisen hat seit 2004 um 64 Prozent zugenommen. Auch die Pro-Kopf-Wohnfläche ist seit 1996 um 25 Prozent gestiegen. Und der augenscheinliche Trend zu vegetarischer Ernährung seit den 1990er Jahre hat nur zu einer Reduzierung des durchschnittlichen Fleischkonsums um weniger als fünf Prozent geführt.

Bis vor kurzem setzten die meisten Studien zur Klimaneutralität vor allem auf technische Lösungen. Der Grund ist, dass die Politik annimmt, dass der größte Teil der Bevölkerung zu einer Veränderung des Konsumverhalten nicht bereit ist, selbst wenn dies zu einer höheren Lebensqualität führt. Dies scheint sich aber zu ändern.[122] Die Möglichkeiten der Politik sind auch deshalb begrenzt, da in einer Demokratie Lebensstil-Veränderungen nur schwer vorgeschrieben werden können. Verbote und höhere Preise sind unpopuläre Politikinstrumente und werden deshalb vermieden.

Allerdings wird in neueren Studien Suffizienz-Maßnahmen mehr Platz eingeräumt.[123] Sie kommen zum Ergebnis, dass durch rein technische Umstellungen das zeitnahe

[121] Neben ökonomischen gibt es auch psychische Rebound-Effekte, etwa wenn Verbraucher*innen ein umweltfreundliches Verhalten zeigen und konsequent Müll trennen und sich deswegen „berechtigt" fühlen, ein umweltschädliches Verhalten zu zeigen, z.B. in den Urlaub zu fliegen.

[122] Aktuelle Umfragen hingegen legen nahe, dass bis zu 80 Prozent der Menschen zu entsprechenden Veränderungen bereit sind. Siehe Der Tagesspiegel (2020/1)

[123] Siehe UBA (2019/3), Wuppertal (2020/1)

Erreichen von Klimaneutralität, geschweige denn ein 1,5-Grad-Pfad, nur noch schwer erreicht werden kann.[124] Je länger die Umstellung hinausgezögert wird, desto drastischer werden die Einschränkungen am Ende ausfallen müssen.

Der Einfluss von Verhaltensänderungen auf das Klima wird unterschiedlich eingeschätzt: Die Vorlage für den Klimabürgerrat in Frankreich, der 2019 und 2020 tagte, spricht davon, dass auf diesem Wege etwa ein Viertel der Emissionen eingespart werden könnten.[125] Manche Studien gehen sogar von mehr als der Hälfte aus.[126] Änderung des Konsumverhaltens ist nicht immer und für alle Menschen in gleichem Maße möglich. Dennoch ist er oft die schnellste, einfachste und günstigste Klimaschutzmaßnahme. Das Konsumverhalten der Deutschen hat dabei nicht nur direkte Effekte in Deutschland, sondern auch große Auswirkungen auf die Emissionsentwicklung und den Flächenverbrauch anderer Länder.[127] Durch den zunehmenden Welthandel gibt es immer mehr Emissionen, die in einem Land ausgestoßen werden, aber durch den Konsum eines anderen Landes verursacht werden.[128]

Ein weiterer Grund spricht dafür, dass Verhaltensänderungen wichtiger Bestandteil des deutschen Klimaschutzes sein sollten: Ein Großteil der Menschen, die in den reichen Industriestaaten ein gutes Leben führen können, hat eine besondere Bringschuld im Sinne globaler Gerechtigkeit gegenüber Menschen, die in den armen „globalen Süden“ geboren wurden und die um ein Vielfaches mehr die Lasten und Folgen der Klimaveränderung tragen müssen – ohne dass sie oder ihre Vorfahren zu den Ursachen wesentliche Beiträge geleistet hätten.

---

[124] Ein Grund ist, dass die technischen Umstellungen seltene Ressourcen benötigen, die allerdings auch von anderen Ländern gebraucht werden. Will Deutschland einen fairen Beitrag zur globalen Transformation leisten, darf es deshalb nicht zu viele dieser Rohstoffe beanspruchen.

[125] Siehe Convention Citoyenne (2019/1)

[126] Siehe Ivanova (2020/1)

[127] Siehe Destatis (2019/1), Destatis (2019/2)

[128] Siehe Hertwich (2018/1)

Suffizienz konkret: Was könnten wir ändern?

Es gibt eine große Anzahl von Lebensstiländerungen, die unter den Begriff Suffizienz fallen. Es lassen sich allerdings einige besonders wirkungsvolle identifizieren:

- Mehr Bahn statt Flugzeug – durch eine Stärkung der Bahn kann der Flugverkehr reduziert werden. Dieser macht in Deutschland lediglich 3 Prozent der Treibhausgase aus. Allerdings ist die Klimawirkung von Flugzeugen deutlich größer als die des reinen CO_2-Ausstoßes.[129] Betrachtet man die Klimawirksamkeit von Einzelhandlungen haben Flugreisen die schlechteste Bilanz.[130]
- Stärkung des ÖPNV, Rad- und Fußverkehrs – dadurch kann der motorisierte Individualverkehr reduziert werden. Neben dem Umstieg auf ÖPNV, Rad und die Nutzung von Fahrgemeinschaften, kann eine Reduktion der Fahrten auch durch steigende Homeoffice-Zeiten erreicht werden. Das Wuppertal Institut hat ein Szenario gerechnet, dass eine Halbierung des PKW-Verkehrs bis 2035 vorsieht.[131]
- Ausgewogenen Ernährung – mehr Gemüse und pflanzliche Lebensmittel und weniger Konsum von Fleisch- und Milchprodukten. Das ist gesund und schont das Klima. Die Zucht von Nutztieren, insbesondere Rindern, führt zu großen Emissionen sowohl in Deutschland (ca. 3,5 Prozent), als auch im Ausland, bedingt durch den Import von Nahrung und Futtermitteln.

Ob sich zukünftig ein relevanter Trend hin zu mehr Suffizienz zeigt, ist auf Grundlage der Studien nicht abschätzbar. Einerseits erachten Studien Suffizienz zunehmend für notwendig. Gleichzeitig prognostizieren viele Studien eher eine Zunahme des Verkehrs, der Wohnfläche etc. Wir rechnen daher in den meisten Punkten konservativ nur mit geringfügigen Änderungen der Verhaltensmuster:

---

[129] Siehe UBA (2012/1)

[130] Hin- und Rückflug Frankfurt-Mallorca verursachen zusammen ca. 0,5 Tonnen CO_2. Hin- und Rückflug Frankfurt-New York zusammen fast 4 Tonnen. Siehe UBA (2021/1). Dabei sind andere Klimaeffekte noch nicht einberechnet. Zum Vergleich: Pro Kopf emittiert ein*e deutsche Bürger*in pro Jahr ca. 10 Tonnen CO_2-Äquivalente.

[131] Wuppertal Institut (2020/1)

- Flugverkehr: Wir haben angenommen, dass der Flugverkehr weiter anwächst, aber wegen steigender Preise nicht ganz so schnell wächst, wie vom Bundesverkehrsministerium prognostiziert.
- Weniger PKW-Verkehr: Viele Städte arbeiten bereits daran, fußgänger- und fahrradfreundlicher zu werden sowie den ÖPNV auszubauen und attraktiver zu machen. Car-Sharing-Angebote nehmen zu. Die Corona-Pandemie sorgt dafür, dass im Arbeitsleben Präsenztreffen durch digitale Formate ersetzt werden. Dies wird vermutlich auch nach Ende der Pandemie in Teilen erhalten bleiben. Wir rechnen mit einem Rückgang des PKW-Verkehrs um 15 Prozent.
- Wir rechnen damit, dass der Konsum von (Rind-)Fleisch und Milchprodukten bedingt durch Aufklärungskampagnen und Preissteigerungen für Treibhausgasemissionen zurückgehen wird.[132]
- Es wurde ein Rückgang an Lebensmittelabfällen von 25 Prozent unterstellt.

Weitere Einsparungen durch Verhaltensänderungen, wie sie zum Teil gefordert werden[133] haben wir nicht oder nur teilweise berücksichtigt, da wir eine Umsetzung durch politische Maßnahmen nicht für realistisch halten. Dazu zählen:

- Heiztemperatur in der Wohnung senken und Warmwasserverbrauch verringern (nicht berücksichtigt)
- Wohnfläche reduzieren: Seit Jahren wächst die Fläche pro Person stetig. Wir nehmen an, dass sich das Wachstum fortsetzt, aber der Zuwachs sich im Vergleich zu den letzten 30 Jahren halbiert.[134]
- Rückgang der Nutzung von energieintensiven Haushaltsgeräten – zum Beispiel Verzicht auf Geräte wie Wäschetrockner und Klimaanlagen (nicht berücksichtigt)

---

[132] Dies halten wir für Deutschland für realistisch. International stellt sich die Situation anders dar, da gerade in den großen Schwellenländern Indien und China der Fleischkonsum zunimmt. Aber auch hier ist es denkbar, dass eine Neuorientierung in Europa und USA auch für diese Länder zum Vorbild ("Trend“) wird.

[133] In der Studie des Wuppertal Instituts für Fridays for Future werden z. B. weitergehende Annahmen behandelt (siehe Wuppertal (2020/1)).

[134] Mittlerweile gibt es Vorschläge und erste Modellprojekte in Baden-Württemberg, wie durch aufsuchende Beratung von älteren Menschen in großen Immobilien begleitet von finanziellen Fördermaßnahmen Wohnraum für die Nutzung von jungen Familien oder für die Untervermietung von abgetrennten Wohnungen gewonnen werden kann. (siehe Fuhrhop (2020/1)).

- Grundsätzliche Rückgänge des Kaufverhaltens (nicht berücksichtigt)

Zu Fragen von Effizienzsteigerungen und Recycling siehe auch im Kapitel 2.3 »Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft«.

Maßnahmen zur Unterstützung von Suffizienz und Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen

Grundsätzlich können Lebensstilveränderungen durch Regelungen und Preisanreize unterstützt werden. Suffizienz sollte deshalb durch politische Maßnahmen unterstützt werden, die die Akzeptanz in der Bevölkerung fördern.

- Finanzielle Förderung und curriculare Einbindung von Projekten der Klima(schutz)bildung in die Bildung für nachhaltige Entwicklung und von Ideen-/Projektwettbewerben in schulischer, frühkindlicher und beruflicher Bildung, Hochschulbildung sowie informellen Bildungsangeboten.[135]
- Aufklärungskampagnen zu den persönlichen, gesellschaftlichen und politischen Risiken der Klimakrise (Förderung der Risikowahrnehmung) und den Chancen von Klimaschutz, Mobilitätswende, Ernährungswende und Energiewende (Aufbau von positiven Emotionen gegenüber einem gemeinsamen Ziel)
- Kennzeichnungspflichten, die Verbraucher*innen besser über Umweltwirkungen von Produkten informieren, z.B. Öko-Ampel, Energiepass, Gerätelabels etc. – ggf. unterstützt durch eine offizielle Klimaschutz-Verbraucher-App.
- Finanzielle Anreize: Hierzu gehören die Streichung von klimaschädlichen Subventionen (Steuerbefreiung von Flugbenzin und internationalen Flügen oder das Dienstwagenprivileg), aber auch Prämien für Umzüge in kleineren Wohnraum, Subventionen für vegetarisches Essen in Mensen, Besteuerung von PKW in Abhängigkeit von der Motorleistung etc.. Auch die Idee des Energiegeldes gehört zu diesen Maßnahmen. Mit ihm sollen die Mehrkosten für die stärkere

[135] Hier gibt es schon gute Ansätze in NRW – siehe Landesregierung NRW (2019/2)

CO_2-Bepreisung von Energieträgern an die Bürger*innen zurückverteilt werden, was insbesondere einkommensschwachen Haushalten zugutekäme.

- Nicht-finanzielle Anreize: z.B. vollbesetzte Autos dürfen auf der „Bus-Spur“ fahren, Privilegierung von E-Autos bei der Parkplatzvergabe etc.

Teil 3 Maßnahmen in den einzelnen Sektoren

In diesem Teil werden die einzelnen Sektoren diskutiert und die Maßnahmen beschrieben, wie die jeweiligen Sektoren in den kommenden Jahrzehnten treibhausgasneutral werden können. Dazu hier einige Erläuterungen:

Zuordnung der Emissionen

Bei der Gliederung der Sektoren folgen wir weitgehend der Zuordnung, wie sie für die internationale Emissionsstatistik vorgegeben wird, nach der das Umweltbundesamt die Emissionszahlen an die EU meldet. In einigen Punkten sind wir davon abgewichen. So haben wir bei den Emissionen auch die internationale Luftfahrt und die Seeschifffahrt berücksichtigt und anteilmäßig NRW nach Anteil der Bevölkerung (21 Prozent) zugeordnet, um ein realistisches Bild der Emissionen zu bekommen, die NRW zugeordnet werden müssen.

Nicht berücksichtigt haben wir (wie international vereinbart) die Emissionen, die mit den Importen (die also in den Herkunftsländern der Waren anfallen) verbunden sind. Berücksichtigt man diese, müsste man die Exporte (die dann anderen Ländern zugeordnet werden müssen) wieder rausrechnen. Dann würden die Emissionen, die Deutschland zugeordnet werden, sogar noch um 10 Prozent höher ausfallen. Entsprechend würden sich auch die Emissionen von NRW erhöhen.

Zuordnung der Energie und der Rohstoffe

Beim Energiebedarf sind wir anders als bei den Emissionen vorgegangen. Hier haben wir mit dem Bedarf gerechnet, der in NRW anfällt. Daher haben wir den Energiebedarf der Seeschifffahrt nicht berücksichtigt, da die Treibstoffe für Waren, die nach NRW oder von NRW aus geliefert werden, in Hamburg, Rotterdam oder sonst wo getankt werden. Bei der Binnenschifffahrt und entsprechend auch beim Flugverkehr rechnen wir mit dem Treibstoff, der in den Häfen bzw. Flughäfen in NRW getankt wird. Der Großteil der

internationalen Flüge von NRW-Bürger*innen, die in Frankfurt starten, werden demnach nicht in NRW berücksichtigt, sondern dem Energiebedarf Hessens zugeordnet.

Entsprechend dieser Logik berücksichtigen wir natürlich auch die Energieimporte, die zukünftig im Wesentlichen aus grünen Treibstoffen wie Wasserstoff, Methan, Methanol, Kerosin und Ammoniak bestehen werden (siehe dazu auch im Kapitel 2.2 »Varianten des Energiesystems: E-Brennstoffe und Importe«), da sie in NRW verarbeitet werden. Ebenso werden die Importe von Rohstoffen für die chemische Industrie und die für deren Erzeugung erforderliche Energie berücksichtigt, da diese Rohstoffe Importe von Erdgas, Erdöl oder Kohle ersetzen.

Der Strombedarf und die Stromproduktion wird im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« behandelt, Wärme im Kapitel »Hauswärme«. Allerdings wird die Energie, die von der Industrie nicht aus dem öffentlichen Netz, sondern in eigenen Kraftwerken und Anlagen erzeugt wird, der »Industrie« zugeordnet – wie es auch in der internationalen Statistik üblich ist. Die Emissionen der Biomasseproduktion zur Erzeugung von Energie oder von Rohstoffen wird im Kapitel »Landwirtschaft, Ernährung, Bodennutzung und Kompensation« besprochen. Die Verwendung als Brennstoff oder als Rohstoff wird dagegen in den Kapiteln »Energiebedarf und Stromversorgung«, »Hauswärme« bzw. »Industrie« je nach der Verwendung behandelt.

Sonstiges

Die Landwirtschaft und die Bodennutzung haben wir in einem Kapitel zusammengefasst, da sie eng zusammenhängen, auch wenn sie in der Statistik getrennt geführt werden. Im Kapitel »Abfälle und Abwässer« behandeln wir nur die Emissionen der Kläranlagen, Deponien und Abwässer. Dagegen wird die Müllverbrennung in den Kapiteln »Energiebedarf und Stromversorgung« und »Hauswärme« behandelt.

Flussdiagramme

Im Anhang befindet sich das »Energieflussdiagramm«, in dem der Energiefluss über alle Sektoren zusammengestellt ist. Ergänzend dazu befindet sich in Anlage 30 das »Wärmeflussdiagramm«.

Sektor 1 Energiebedarf und Stromversorgung

In diesem Kapitel wird vorrangig die Stromerzeugung betrachtet. Die Wärmeerzeugung, einschließlich der Dekarbonisierung der Fernwärme behandeln wir im Kapitel 3.2. »Hauswärme«. Allerdings sind beide Sektoren eng verknüpft. Neben der Stromerzeugung umfasst dieses Kapitel auch die Müllverbrennung, die Stromleitungen und Stromspeicher. Allgemeine Überlegungen zum Verhältnis von Strom und E-Brennstoffen, Importen sowie der Wasserstoffwirtschaft werden im Kapitel 2.2 »Varianten des Energiesystems« behandelt.

Die Ausgangslage

Nordrhein-Westfalen galt als Deutschlands Energieland. 1990 wurden noch 31 Prozent des in Deutschland produzierten Stroms in NRW bereitgestellt.[136] Heute wird nach den vorläufigen Zahlen für 2019 durch den Rückgang der Kohleproduktion und den Ausbau der Erneuerbaren nur noch 25 Prozent des in Deutschland produzierten Stroms in NRW bereitgestellt[137] und 29 Prozent werden in NRW direkt verbraucht.[138] Der Trend geht also dahin, dass NRW vom Stromexporteur zum Stromimportland wird.

Trotz deutlicher Rückgänge in der Kohleverstromung in den vergangenen Jahren macht Kohlestrom in NRW immer noch mit Abstand den größten Anteil aus. Der Anteil der Erneuerbaren Energien am Stromverbrauch liegt mit 16 Prozent[139] weit unter dem Bundesdurchschnitt von 42 Prozent.[140] Fast die Hälfte des (Netto-)Stromverbrauchs wird durch die Industrie verbraucht, danach folgen Haushalte und GHD (Gewerbe,

[136] Siehe LANUV (2020/4), BMWi (2020/1)

[137] Stand 2019, siehe MWIDE (2020/3)

[138] Bezugsjahr ist 2017, da für dieses Jahr die letzten vollständigen Daten vorliegen. Die Daten für NRW stammen aus LANUV (2019/1). Der Anteil NRWs an der Bruttostromerzeugung der BRD betrug 24% (157,3 TWh von 654,8 TWh, siehe BMWI (2018/2)). Der Anteil an der Nettostromerzeugung betrug 25,6% (140 TWh von 547 TWh), siehe Fraunhofer ISE (2018/2).

[139] Stand 2019 – siehe LANUV (2019/3)

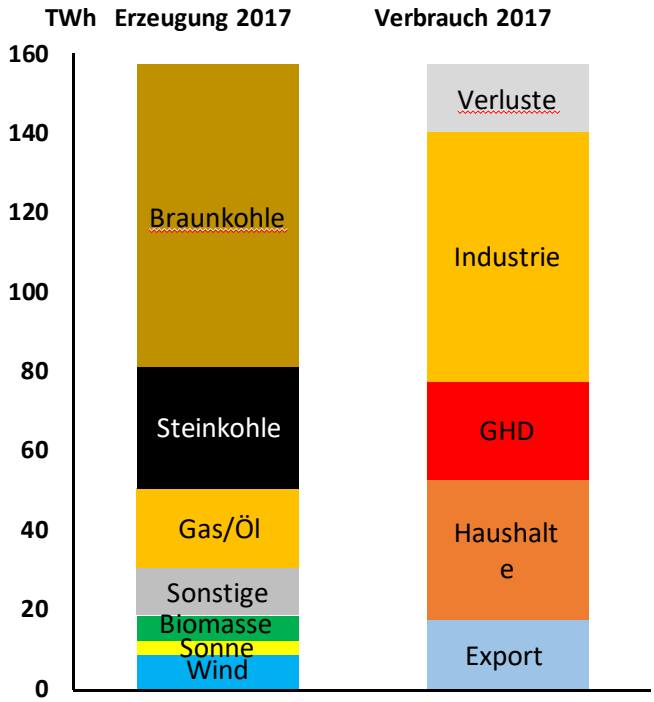
[140] Siehe AGEE-Stat (2020/1)

Handel, Dienstleistungen) als größte Stromverbraucher*innen. Auch der hohe Eigenverbrauch der Kraftwerke ist ein relevanter Faktor.

Ausbaustand der Erneuerbaren

Der Anteil der Erneuerbaren Energien in NRW an der Stromerzeugung ist insbesondere im Vergleich zu den nördlichen und östlichen Bundesländern immer noch niedrig.[141]

Grafik 9: Strom in NRW



Die absolute installierte Leistung im Bereich Windenergie liegt allerdings im Ländervergleich auf Platz 4.[142] Seit dem Jahr 2018 ist der Ausbau der Windenergie jedoch auch in NRW stark eingebrochen.[143] 2019 wurden nur 37 Windräder in NRW gebaut, 2017 waren es noch 323. Der Zubau der PV-Anlagen war zuletzt leicht ansteigend, allerdings deutlich unter dem Niveau der ausbaustärksten Jahre 2010-2012. Die Stromerzeugung durch Biomasse und Wasserkraft sind seit Jahren relativ konstant.

[141] Die Zahlen zur Grafik 9 und zum Stand der Erneuerbaren Energien finden sich in Anlage 9. Unter „Verluste“ ist auch der Eigenverbrauch der Kraftwerke enthalten. „Export“ umfasst sowohl Nettoexporte ins Ausland wie auch die nur noch geringen Exporte in andere Bundesländer. Der Stromverbrauch für den Verkehr ist minimal (1,9 TWh – überwiegend Personenverkehr Bahn) und in „Haushalte“ enthalten.

[142] Siehe EnergieAgentur.NRW (2020/3)

[143] Siehe LEE NRW (2020/1)

Derzeitige energiepolitische Ziele

Folgende Eckpunkte sind derzeitiges Ziel der Landesregierung:

- Energieerzeugung vorrangig durch Wind, Photovoltaik, Gaskraftwerke in Kraft-Wärme-Kopplung, Geothermie und grünen Wasserstoff bis 2050
- Erhöhung des Anteils Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung auf 30 Prozent bis 2025[144]
- Steigerung der installierten Leistung von Windenergie auf 10,5 GW und Photovoltaik auf 11,5 GW bis 2030
- Kohleausstieg gemäß Kohleausstieggesetz bis 2038, wobei bis 2030 zwei Drittel der Braunkohleemissionen reduziert werden sollen.[145]
- Ausbau einer Wasserstoffinfrastruktur als industriepolitisches Ziel

Die Bundesregierung plant zudem mit einer Erhöhung des Anteils Erneuerbarer Energien an der deutschlandweiten Stromerzeugung auf 65 Prozent bis 2030[146]

Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Studie lagen mehrere Gesetzentwürfe vor, die für die Energiewende direkt oder indirekt relevant sind:

- Die geplante Novellierung des Klimaschutzgesetzes passt primär die landespolitischen Ziele den bundespolitischen an. Für das Jahr 2030 legt der Entwurf das Klimaschutzziel einer Minderung der Treibhausgase gegenüber 1990 um 55 Prozent, sowie perspektivisch das Erreichen der Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 fest.[147]
- Einführung eines Klimaanpassungsgesetzes.[148]
- Das Gesetz zur Einführung fester Mindestabstände zwischen Siedlungen und Windenergieanlagen sieht eine 1.000-Meter-Mindestabstandsregelung vor.[149]

---

[144] Siehe EnergieAgentur.NRW (2021/2)

[145] Siehe MWIDE (2020/3)

[146] Siehe BMWi (2021/1)

[147] Siehe Landtag NRW (2020/5)

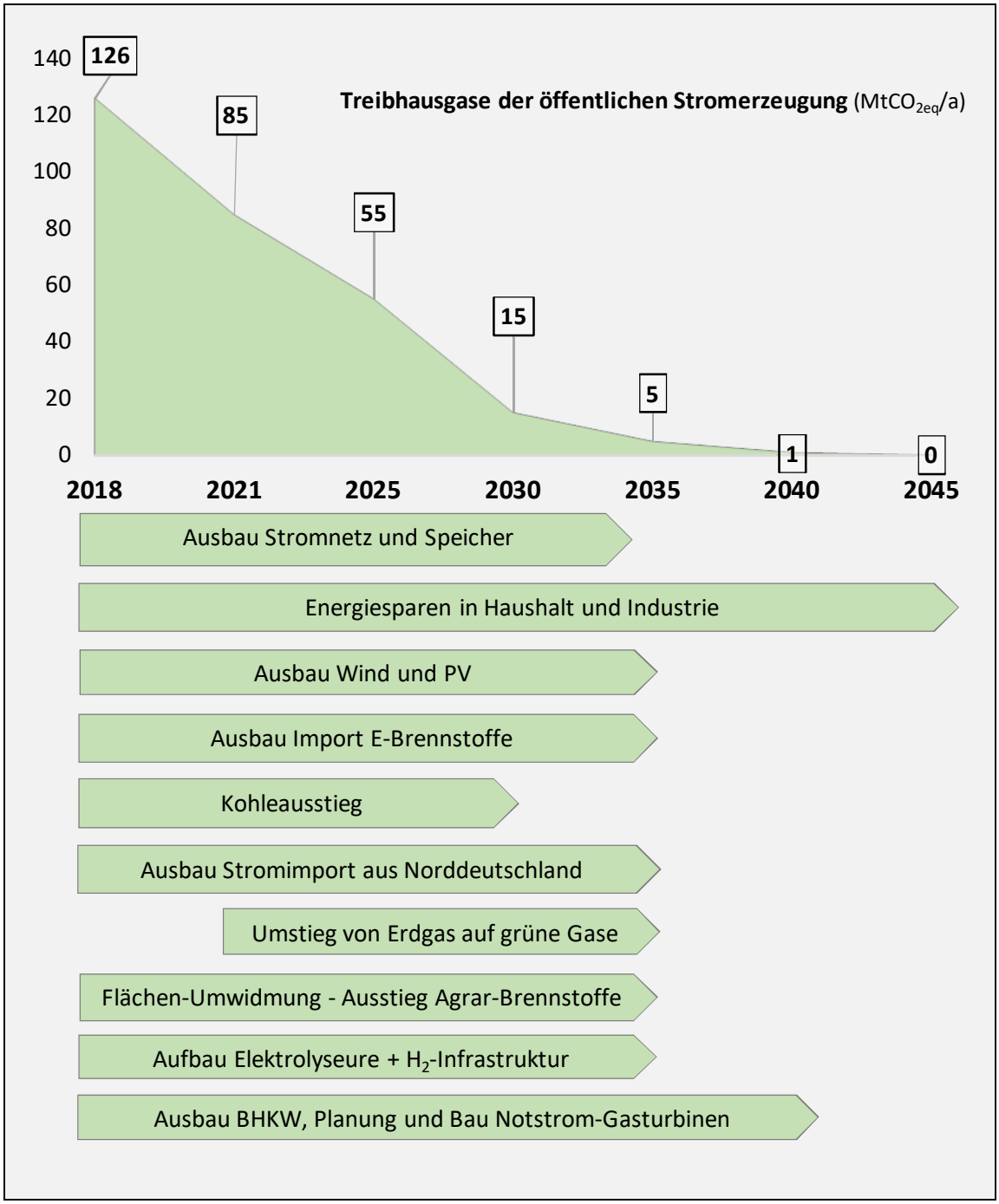
[148] Siehe Landtag NRW (2020/6)

[149] Siehe Landtag NRW (2021/3)

Zielsetzungen für 1,5-Grad und Herausforderungen

Auf Basis der herangezogenen Studien kann die Stromerzeugung in NRW bei entsprechenden politischen Weichenstellungen bis 2035 treibhausgasneutral werden. In Grafik

Grafik 10: Zeitplan und Maßnahmen im Sektor Energie



10 wird der Ablauf dargestellt, wie der Energiesektor klimaneutral werden kann. Der Ausbau der Erneuerbaren Energien sollte in der Klimapolitik höchste Priorität bekommen, denn die Umstellung anderer Sektoren auf Klimaneutralität ist nur möglich und sinnvoll, wenn ausreichend Erneuerbare Energie verfügbar ist.

NRW steht dabei vor großen Herausforderungen. Einerseits müssen die Kohlekraftwerke als größte Treibhausgasquellen bis 2030, und damit deutlich schneller als bislang geplant, abgeschaltet werden. Ohne einen beschleunigten Kohleausstieg werden alle Versuche scheitern, einen engagierten Beitrag zur Klimaschutzpolitik in NRW voranzubringen. Gleichzeitig wird zukünftig der Stromverbrauch stark ansteigen, weil große Teile der Heizungen und des Verkehrs sowie Teile der Industrie elektrifiziert werden. Den mit Abstand größten zusätzlichen Strombedarf wird voraussichtlich die Erzeugung synthetischer Brennstoffe (E-Brennstoffe) und synthetischer Rohstoffe aufweisen.

Aus diesem Ziel ergeben sich folgende Herausforderungen:

- die notwendigen Mengen an grünem Strom bereitzustellen
- die Versorgungssicherheit zu gewährleisten – insbesondere die Integration fluktuierender Stromerzeugung
- die Stromkosten für die Industrie wettbewerbsfähig zu halten

Letzteres ist vor allem eine politische Entscheidung, die vom Bundestag und der Bundesregierung getroffen werden muss.[150] Wenn der Strompreis vorübergehend durch den CO_2-Preis doch ansteigt, dann muss dies ggf. beim Import und Export nivelliert werden.[151]

---

[150] Der Strompreis hängt hauptsächlich von politischen Entscheidungen ab. Die Kosten für die Stromerzeugung machen am Strompreis für Haushalte im Jahr 2020 nur 23,4 Prozent aus, der Rest sind Netzentgelte, Steuern etc. (siehe Fraunhofer ISE (2020/1). Die Stromerzeugungskosten werden in Zukunft niedriger liegen als heute, da schon jetzt die Stromgestehungskosten für Wind- und PV-Strom teilweise günstiger sind, als die herkömmlicher Kraftwerke und weiter sinken werden (siehe Fraunhofer ISE (2018/1). Der Bedarf an Speichern und Netzen wird sich erhöhen. Steuern und Umlagen, wie Mehrwertsteuer und EEG-Umlage können politisch reguliert werden. Verschiedene Autor*innen fordern insbesondere die Abschaffung der Mehrwertsteuer auf Strom, um die Sektorkopplung voranzubringen. Für energieintensive Branchen bzw. Unternehmen bestehen bereits heute oft Ausnahmeregelungen, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit zu gewährleisten.

[151] Siehe dazu in Kapitel 2.6 »Treibhausgaspreise« und in Teil 3 im Kapitel »Industrie«

Im Folgenden werden die Maßnahmen beschrieben, die für die Umstellung zentral sind: Kohleausstieg, Ausbau der Erneuerbaren Energien, Sicherstellung der Versorgungssicherheit und der Importe durch Lastmanagement, Ausbau von Energienetzen und Energiespeichern.

Beschleunigter Kohleausstieg

Die Kohleverstromung ist trotz deutlicher Rückgänge[152] immer noch die größte Treibhausgasquelle sowohl in NRW als auch in Deutschland. Die Notwendigkeit eines schnellen Kohleausstiegs zeigt sich auch auf Bundesebene: Eine neue Studie im Auftrag von Agora Energiewende[153] rechnet damit, dass der vorgezogene Kohleausstieg bis 2030 notwendig ist – sogar, wenn die deutsche Klimaneutralität erst 2050 erreicht werden soll.[154] Mit keiner anderen Maßnahme sind so schnelle Emissionsreduktionen zu erreichen.

Eine Reihe von Studien untersuchen, welche Auswirkungen unterschiedliche Kohle-Ausstiegsszenarien in Bezug auf Wirtschaft, Energie und Klima haben. Allerdings gehen sie in drei wesentlichen Punkten von anderen Grundannahmen aus als diese Studie: 1) es wird kein oder nur ein moderater CO_2-Preis unterstellt; 2) es wird nur von einem moderat steigenden Strombedarf ausgegangen; 3) es wird kein Pfad vorgeschlagen, der sich am Pariser Klimaschutzabkommen orientiert. Diese können die Ergebnisse stark beeinflussen: 1) Insbesondere die Rentabilität von Technologien hängt hochgradig vom CO_2-Preis ab. 2) Bisherige Ergebnisse z.B. zur Stromnetzentwicklung haben bei stark steigendem Strombedarf nur eingeschränkte Gültigkeit. Die im Folgenden zusammengefassten Ergebnisse müssen vor diesem Hintergrund gelesen werden: [155]

---

[152] Der Rückgang betrug -22,3% bei Braunkohle, -32,8% bei Steinkohle in Deutschland allein von 2018 auf 2019, siehe Fraunhofer ISE (2020/1)

[153] Siehe Agora Energiewende (2020/5)

[154] Eine Übersicht siehe MD (2020/2) und Anlage 2b; siehe auch DIW (2020/2), Fraunhofer IEE (2018/1); die Studie NewClimate (2016/1) hält sogar den Kohleausstieg bis 2025 für möglich und notwendig.

[155] Zu den folgenden Zahlen siehe Anlage 10

Soziale Aspekte des Kohleausstiegs

Die Einschätzungen dazu, wie viele Arbeitsplätze vom Kohleausstieg direkt und indirekt betroffen wären, unterscheiden sich. Während die Kohlekommission mit 27.000 Stellen rechnet, nennt die Energie-Gewerkschaft IGBCE in NRW 50.000 Stellen – davon 15.000 in der Kohleförderung und -verstromung und 35.000 bei Dienstleistern und Zulieferern. Zum Vergleich: Durch die Einbrüche in der Windbranche verloren allein zwischen 2016 und 2017 25.000 Beschäftigte deutschlandweit ihren Arbeitsplatz. Die hauptbetroffene Region – das Rheinische Revier – liegt in der Nähe der Ballungszentren Köln und Aachen, in denen sich auch viel verarbeitendes Gewerbe konzentriert. Daher kann der Verlust von Arbeitsplätzen im Prinzip abgefedert werden. Über alle Branchen hinweg gehen Studien sogar von positiven Beschäftigungseffekten durch den Klimaschutz aus. Daraus ergibt sich folgenden Strategie:

- Mehr als zwei Drittel der Kohlearbeiter*innen sind bis 2030 im Rentenalter oder kurz davor. Diese Situation sollte auch durch Frühverrentungsangebote genutzt werden.
- Ein Teil der Arbeitnehmer*innen kann beim Rückbau und der Renaturierung der Tagebaue und der Gestaltung der Folgelandschaft beschäftigt werden. Insgesamt dauert die Renaturierung bis zu 50 Jahre.[156]
- Für die restlichen – insbesondere die jüngeren – Arbeitnehmer*innen müssen Auffanggesellschaften gebildet werden, in denen sie für neue Jobs umgeschult werden. Insbesondere können sie für Arbeitsplätze im wachsenden Bereich der Erneuerbaren Energien und der Wasserstoffwirtschaft ausgebildet werden. Mit den angestoßenen Strukturwandelprozessen im Rheinischen Revier, soll u.a. die Ansiedlung neuer Industriearbeitsplätze parallel zum Kohleausstieg erreicht werden.[157] Dieser Umbau des Rheinischen Reviers sollte konsequent am Ziel des Klimaschutzes und zukunftsfähiger Investitionen und Arbeitsplätze unter Beteiligung von Zivilgesellschaft, KMU und Handwerk ausgerichtet werden.

[156] Siehe Müller (2014/1)

[157] Siehe Wirtschaft.NRW (2019/1)

Finanzielle und politische Aspekte des Kohleausstiegs

Zur politischen Durchsetzung gibt es grundsätzlich zwei Ansätze:

1. Eine vertragliche Regelung zwischen Staat und Unternehmen, wie es beim von der Bundesregierung mit den Kohlekonzernen verhandelten Kohleausstieg bis 2038 der Fall ist. Leider wurde mit dem Vertrag eine Grundlage für hohe Entschädigungszahlungen bei einem früheren Kohleausstieg gelegt.
2. Ein CO_2-Preis in ausreichender Höhe sorgt dafür, dass die Unternehmen aus wirtschaftlichen Gründen die Kohleverstromung beenden. Dieser Trend wird verstärkt durch sinkende Produktionskosten der Erneuerbaren Energien.

Prinzipiell sind beide Instrumente kombinierbar. Für die erste Option spricht vor allem, dass soziale Härten gezielt abgefedert werden können und der Beschluss theoretisch auf Landesebene, zumindest aber auf Bundesebene entschieden werden kann. Ein politisch entschiedener Kohleausstieg, ohne Einführung eines CO_2-Preises und Löschung der Zertifikate im europäischen Emissionshandel (ETS) muss allerdings vermieden werden, da er international sogar negative Auswirkungen auf das Klima haben könnte (siehe nächster Abschnitt).

Für die zweite Option spricht, dass sie deutlich kostengünstiger ist. Das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung[158] schreibt in Bezug auf den „Kohlekompromiss“, dass dieser die Entwicklung von CO_2-Preisen nicht ausreichend berücksichtige und Entschädigungszahlungen an Unternehmen ungerechtfertigt hoch seien, da schon heute viele Kraftwerke unrentabel wirtschafteten. Die Studie rechnet für 2030 mit einem CO_2-Preis im ETS von 53 Euro pro Tonne und einem geringfügig höheren Strombedarf. Ein CO_2-Preis in einer Höhe, wie er in der vorliegenden Studie vorgeschlagen wird (150 € / Tonne in 2030, siehe Kapitel 2.6 »Treibhausgaspreis«) wird sehr wahrscheinlich zu einem Kohleausstieg bis 2030 auf ökonomischem Wege führen und es sollten allenfalls ergänzende vertragliche Regelungen notwendig sein.

Ein CO_2-Preis kann nicht auf Landesebene eingeführt werden, sondern hängt von Bundes- und EU-Gesetzgebungen ab. Die aktuellen Beschlüsse der EU, das Klimaziel 2030 auf 55 Prozent anzuheben, machen es wahrscheinlich, dass der Emissionshandel noch

[158] Siehe DIW (2020/2)

einmal überarbeitet werden muss. Ob dies so großen ökonomischen Druck auslöst, dass der Kohleausstieg marktgetrieben schon auf 2030 vorgezogen werden kann, müsste grundsätzlich analysiert werden. Welche ergänzenden nationalen Instrumente nötig sind, muss zügig geklärt werden. NRW sollte eine neue Leitentscheidung zum Kohleausstieg fällen. Zusätzlich sollte die Landesregierung darauf hinwirken, dass auf Bundesebene günstige Rahmenbedingungen für einen vorgezogenen Kohleausstieg geschaffen werden, da klar ist, dass die eingeforderten Kohlemengen energiepolitisch verzichtbar sind und damit die Grundlage für den Kohlekompromiss entfällt.

Auswirkungen des Kohleausstiegs auf die internationale Stromerzeugung

Nach übereinstimmenden Einschätzungen führt der deutsche Kohleausstieg auch europaweit zu sinkenden Emissionen, wenn die passenden begleitenden Maßnahmen getroffen werden. Eine Studie des DIW kommt zu dem Ergebnis, dass ein beschleunigter Kohleausstieg bis 2030 nicht, wie oft befürchtet, zu einer verstärkten Nutzung von Atomstrom in Frankreich und Braunkohle in Polen führen würde.[159] Stattdessen hätte der Kohleausstieg in Deutschland auch positive Effekte auf die Dekarbonisierung in Europa. Die Studie erwähnt außerdem positive Effekte auf Landschafts- und Naturschutz, vor allem in NRW, sowie positive wirtschaftliche Effekte aufgrund wegfallender Folgekosten.

Eine Studie des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) kommt zu dem Ergebnis, dass der deutsche Kohleausstieg in Europa grundsätzlich zu einem Ansteigen der Emissionen führen kann. Das ist aber nicht der Fall, wenn es einen nationalen, besser noch europaweiten CO_2-Mindestpreis gibt oder wenn die freiwerdenden Zertifikate gelöscht werden. [160]

Auswirkungen des Kohleausstiegs auf die nationale Stromerzeugung

Kohlestrom macht heute ca. 28 Prozent der deutschen Stromerzeugung[161] und 68 Prozent der Stromerzeugung in NRW[162] aus. Diese Mengen müssen mit dem Abschalten der

[159] Siehe Göke (2018/1)

[160] Siehe PIK (2019/2); für die Stilllegung der ETS-Zertifikate spricht auch die Studie Pietroni (2017/1)

[161] Brutto-Stromerzeugung, Stand 2019; siehe Agora Energiewende (2020/6)

[162] Netto-Stromerzeugung, Stand 2017; im Jahr 2020 sicherlich deutlich geringer

Kohlekraftwerke ersetzt werden. Studien beschreiben dies als große, aber zu bewältigende Aufgabe. Allerdings muss dies vor dem Hintergrund neu eingeordnet werden, dass die klimaneutrale Gesellschaft etwa die dreifache Menge an Strom benötigt, wie die heutige Gesellschaft (siehe Kapitel 2.2 »Varianten des Energiesystems«).

Die energiepolitische Herausforderung besteht also nicht nur im Ersatz des Kohlestroms, sondern darin, deutlich mehr Strom durch Erneuerbare Energien zu erzeugen, als heute fossil erzeugt wird. Wie dies gelingen kann, wird unten im Abschnitt »Ausbau Erneuerbarer Energien« behandelt. Dabei wird sich das Verhältnis zwischen Brutto- und Nettostromerzeugung verbessern, da Kohlekraftwerke und Tagebaue sehr viel Strom für ihren Betrieb direkt selbst benötigen und ihr Eigenbedarf im Vergleich zu den Erneuerbarer-Energien-Anlagen sehr hoch ist.

Auswirkungen auf die Stabilität des Stromsystems

Die Schwankungen in der Stromerzeugung sind bei Windenergieanlagen und vor allem bei Photovoltaik-Anlagen deutlich größer als bei Kohle-, Gas- oder Kernkraftwerken. Allerdings können Kohlekraftwerke auch nur in Grenzen flexibel auf die Schwankungen der Nachfrage reagieren. Das Aus- und Einschalten von Braunkohlekraftwerken dauert fünf bis neun Stunden. Die erforderlichen Maßnahmen, die künftig eine Stabilität des Stromsystems gewährleisten, werden im Abschnitt »Lastmanagement und Smart Grid« behandelt.

Auswirkungen auf die Fernwärme-Erzeugung

Die Auswirkungen des Kohleausstiegs auf die Fernwärme-Erzeugung werden im Kapitel »Hauswärme« im Abschnitt »Fern- und Nahwärme« diskutiert.

Die Rolle von Erdgas

Erdgas hat in NRW einen Anteil von 25 Prozent am Primärenergieverbrauch. Davon wird fast die Hälfte von der Industrie benötigt. Diese Zahlen entsprechen dem Bundesdurchschnitt.[163]

[163] Der Anteil von NRW am deutschen Erdgasverbrauch liegt bei 25%, davon 47% in der Industrie. In Deutschland liegt der Anteil der Industrie etwas niedriger bei 41%. Siehe LANUV (2020/4), BMWi (2020/1)

In politischen Programmen wird Erdgas häufig als sogenannte Brückentechnologie beschrieben. Demnach soll Erdgas in der Zeit, in der keine Kohlekraftwerke mehr am Netz sind und der Ausbau der Erneuerbaren Energien noch nicht abgeschlossen ist, dazu dienen eine sichere Energieversorgung zu gewährleisten. Diese Strategie ist nicht mit dem Ziel vereinbar, die Stromerzeugung bis 2035 treibhausgasneutral zu machen. Denn obwohl der Emissionsfaktor von Erdgas besser ist als der von Kohle, handelt es sich um einen fossilen Energieträger, dessen Verbrennung große Mengen an Treibhausgasen verursacht. Berücksichtigt man zudem das bei der Erdgasförderung und beim Transport in die Luft entweichende Methan (Methanschlupf), verringert sich der Vorteil von Erdgas gegenüber der Kohle weiter.[164]

Daher wird Erdgas zukünftig nur noch als Notreserve eine Rolle spielen (siehe im Abschnitt »Stromspeicher«), darf jedoch bereits mittelfristig nicht mehr zur kontinuierlichen Stromgewinnung eingesetzt werden. Neue Gaskraftwerke müssen so konzipiert werden, dass sie auch mit Wasserstoff oder grünen Synthesegasen betrieben werden können.

Maßnahmen für den Ausstieg aus fossilen Brennstoffen

- Kompletter Ausstieg aus der Kohle bis 2030, gewährleistet vor allem durch einen kontinuierlich steigenden CO_2-Preis, kombiniert mit einer Löschung der ETS-Zertifikate sowie eine neue Leitentscheidung zum Kohleausstieg auf Landesebene. Auf Bundes- und EU-Ebene muss auf die entsprechenden Regelungen hingewirkt werden.
- Soziale Ausgleichsmaßnahmen: Frühpensionierung, Übernahme und ggf. Umschulung für die Arbeit bei der Renaturierung der Braunkohletagebaue, Umschulung in einer Auffanggesellschaft – Übernahme in neue Unternehmensteile mit Erneuerbaren Energien.
- Konsequente Ausrichtung der Strukturwandelprozesse an Nachhaltigkeit und Klimaschutz.
- Umstieg von Erdgas auf grünen Strom und grüne Brennstoffe wie grünes Methan oder Wasserstoff bis möglichst 2035, daher sollten kurzfristig alle

[164] Siehe Fell (2019/1)

Investitionen in Erdgasinfrastruktur kritisch geprüft und auf ihre Vereinbarkeit mit einem klimaneutralen Energiesystem untersucht werden.

Ausbau Erneuerbarer Energien

Um den steigenden Strombedarf bei abnehmender fossiler Stromerzeugung zu decken, müssen die Erneuerbaren Energien massiv ausgebaut werden. Es liegen nur wenige und überwiegend ältere Studien vor, die das Potenzial der Erzeugung Erneuerbarer Energien in Nordrhein-Westfalen ermitteln. Leider hat es die Landesregierung bisher versäumt, mit Blick auf aktuelle technische und politische Entwicklungen aktuelle Potenzialstudien zu erarbeiten und vorzulegen. Angesichts der rapiden technischen Entwicklungen der letzten Jahre müssen die Ergebnisse neu eingeordnet werden. Eine Übersicht über die Ergebnisse der vorliegenden Studien findet sich in Anlage 11.

Als Grundlage für die im folgenden dargestellten Potenzialannahmen haben wir die Studien des LANUV gewählt.[165] Dieses hat zwischen 2012 und 2017 das Erzeugungspotenzial der vier relevanten erneuerbaren Stromquellen Wind, Sonne, Biomasse und Wasser umfassend erhoben. Aus dem Abgleich mit aktuelleren Studien auf Bundesebene sowie dem »Handbuch Klimaschutz Deutschland« ergeben sich einige Anpassungen.

Der erforderliche rapide Ausbau der Erneuerbaren Energien erfordert auch eine erhebliche Zunahme der einschlägigen Arbeitskräfte zur Errichtung und zur Wartung der Anlagen. Dazu sollten gemeinsam mit den IHKen, Handwerkskammern und den Hochschulen der erforderliche Bedarf an Fachkräften analysiert und die entsprechenden Maßnahmen zu ihrer Ausbildung und Umschulung ergriffen werden (siehe Kapitel 2.7 »Die Ökonomie der Umstellung«).

Windenergie

Das technische Windenergiepotenzial hängt von der Art der Anlagen, den Windbedingungen sowie der Verfügbarkeit geeigneter Flächen ab.

[165] Geothermie und Solarthermie werden im Abschnitt »Hauswärme« behandelt.

Windbedingungen in NRW

Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit in NRW liegt in 150 Meter Höhe über dem Boden bei 7 m/s – also etwa im Mittel zwischen den Küstenländern auf der einen Seite und den süddeutschen Ländern auf der anderen Seite.[166]

Flächenverfügbarkeit

Die Flächenverfügbarkeit für Windenergieanlagen hängt davon ab, welche Flächen für die Nutzung ausgeschlossen werden, z.B. Waldflächen, Naturschutzgebiete oder Flächen in der Nähe von Siedlungen. Aus rein technischer Sicht gäbe es genügend Flächen, um eine Vollversorgung Deutschlands mit Strom allein durch Windräder an Land sicherzustellen. Wie viele Flächen genutzt werden dürfen, ist daher letztlich eine Frage der politischen und gesellschaftlichen Priorisierung. Eine Untersuchung zu Hemmnissen beim Windenergieausbau ergab, dass in vielen Fällen Klagen den Windausbau blockieren.[167] Im Jahre 2019 betraf dies ca. 20 Prozent der in NRW geplanten Anlagen mit etwa 200 MW Leistung.

Die LANUV-Studie[168] stellt drei Szenarien mit der Bereitstellung 2 Prozent, 3,3 Prozent und 4,1 Prozent der Landesfläche für Windenergie vor. Die größeren Potenziale ergeben sich durch eine zusätzliche Nutzung von Waldflächen. Im Leitszenario rechnet die Studie mit 3,3 Prozent der Fläche (ca. 1.130 km^2).[169] Die unterschiedlichen Angaben hängen stark von den angenommenen Restriktionen ab:

Abstand von Siedlungen[170]

Die Abstandsregelungen zur Wohnbebauung sind der wichtigste Faktor, der die verfügbaren Flächen begrenzt. Der aktuell im parlamentarischen Verfahren befindliche

[166] Siehe Anlage 12

[167] Siehe FA Wind (2019/1)

[168] Siehe LANUV (2012/1). Zu berücksichtigen ist, dass dort weniger leistungsfähige Anlagen angenommen wurden, als heute am Markt üblich sind.

[169] Weitere Potenzialschätzungen ergeben folgende Werte: Das Bundesverkehrsministerium geht für NRW von einer restriktionsfrei nutzbaren Fläche von lediglich 0,2% aus. Hinzu kommen weitere Flächen, die nur weichen Restriktionen unterliegen (siehe BMVI (2015/1). Eine Studie des Öko-Instituts und der Prognos AG berechnet den Flächenanteil von NRW, der für Windenergie zur Verfügung steht auf 2,1%.

[170] Siehe Anlage 13

Entwurf einer Regelung von 1.000 Metern Abstand von jeder Siedlung dürfte eine Ausweisung eines Flächenanteils von zwei Prozent der Landfläche oder gar mehr, wie es noch in der LANUV-Potenzialstudie angenommen wurde, unmöglich machen. Zwar erlaubt die Landesregierung in ihrem Gesetzentwurf den Kommunen durch Bauleitplanung den Mindestabstand zu ignorieren. Wie viele Kommunen dies in der Praxis aber tatsächlich tun würden bleibt unklar. Auch vor dem Hintergrund der Erfahrungen mit einer ähnlichen Regelung in Bayern steht zu befürchten, dass nur wenige Kommunen von der Erlaubnis zu Abweichung von dem grundsätzlich geltenden Mindestabstand Gebrauch machen werden und folglich der 1.000-Meter-Mindestabstand in weiten Teilen von NRW in Zukunft gelten würde.

Naturschutz

Hauptklagegrund gegen den Bau von Windenergieanlagen ist der Naturschutz. In der Regel werden Naturschutzgebiete und insbesondere Vogelschutzgebiete von Windenergieanlagen freigehalten. Es gibt aber auch in anderen Gebieten nicht selten Konflikte mit dem Naturschutz – meist durch Konflikte mit brütenden Vogelarten oder mit Fledermausvorkommen. Die Umweltministerkonferenz hat mittlerweile einen Vorschlag erarbeitet.[171]

Eine große Anzahl von potentiellen Windstandorten können derzeit nicht bebaut werden, weil die Genehmigungen unter Verweis auf Gefährdung der Flugsicherheit nicht erteilt werden. NRW ist davon besonders betroffen (1,3 GW – Stand 2019). Fast die Hälfte der geplanten Windenergieanlagen steht in Konflikt mit Drehfunkfeueranlagen der Flugsicherheit. Hier ist zu prüfen, inwieweit die entsprechenden Regelungen ohne Gefährdung der Luftfahrtsicherheit zu ändern sind. Es ist beispielsweise ein deutscher Sonderweg, um DVOR-Anlagen[172] einen Radius von 15 Kilometern zu ziehen, innerhalb dessen Windräder nicht genehmigt werden. Eine Absenkung auf 10 Kilometer Schutzabstand würde den Bau der Hälfte der betroffenen Anlagen ermöglichen.

[171] Siehe FA Wind (2019/1)

[172] Drehfunkfeueranlagen (Doppler- Very High Frequency Omnidirectional Radio Range)

Einschränkungen durch Militär und Erdbebenmessstationen

Auch von Ausbauhemmnissen aufgrund militärischer Restriktionen des Luftraums ist NRW stark betroffen (0,8 GW). Auch hier gilt es zu prüfen, inwieweit die entsprechenden Regelungen angepasst werden können. Das gleiche gilt für Flächenrestriktionen, die derzeit in der Nähe von Erdbebenmessstationen existieren.

Regionale Unterschiede[173]

Es gibt starke Unterschiede zwischen den Planungsregionen in NRW, sowohl was das grundsätzliche Flächenpotenzial als auch den Planungsstand angeht. Während in der Planungsregion Münster das ursprünglich ermittelte Flächenpotenzial bereits übertroffen wurde, besteht in den Bereichen Arnsberg und Köln Nachholbedarf. Es macht daher durchaus Sinn, das Flächenziel je nach den Gegebenheiten zu modifizieren. So kann eine Differenzierung zwischen waldarmen und waldreichen Gebieten hilfreich sein: Während in waldarmen Gegenden die Wälder eher als Ausschlusszonen gelten sollten, ist in waldreichen Regionen die Bebauung von Waldflächen notwendig zum Erreichen der Klimaziele.

Konsequenzen für die Windenergieplanung[174]

Das Planungsverfahren zur Ausweisung der Flächen für die Windenergie basiert in NRW auf dem Gegenstromprinzip, einem wechselseitigen Abstimmungsverfahren zwischen Land, Regierungsbezirken und Kommunen.[175] Um das Ziel, einen Flächenanteil von mindestens zwei Prozent für Windenergie landesweit auszuweisen, zu erreichen, sollte die Zielsetzung im Landesentwicklungsplan geregelt werden. Als erfolgreich hat sich zum Beispiel die Planung des Kreises Steinfurt erwiesen. Dort wurde eine Windflächenplanung nach dem Ampelprinzip (rot-gelb-grün) mit Bürgerbeteiligung und Verbandsbeteiligung erstellt. Dabei wird ein Flächenziel in Abstimmung mit der Bezirksregierung ausgewiesen, das dann in die Regionalplanung eingeht.

---

[173] Siehe Anlage 15

[174] Siehe Anlage 15

[175] Siehe Anlage 10

Häufigster Klagegrund gegen Windenergieanlagen waren Arten- und Naturschutzanliegen. Mit Abstand folgen Lärmschutz und Flächenzugriff. In 60 Prozent der Fälle waren Umwelt- und Naturschutzverbände die Klagenden. Neben Anpassungen im Planungsrecht (siehe im Kapitel 2.4 »Planungsrecht und Bürgerbeteiligung«) ist daher eine Abstimmung und gemeinsame Strategie mit den einschlägigen Verbänden notwendig, um den Windenergieausbau schnell voran zu bringen.[176] Dabei kann an den bereits 2014 mit den Naturschutzverbänden erzielten Kompromiss zum Klimaschutzgesetz und Klimaschutzplan angeknüpft werden.[177] Das gilt insbesondere für die Nutzung von Waldflächen. Dies erscheint umso wichtiger, als es sich bei Teilen der zum Ausbau benötigten Flächen um Waldflächen handelt, bei deren Bebauung Naturschutzverbände große Bedenken haben. Es ist auch denkbar, einen Kompromiss zu schließen, der die Bebauung von bestimmten Flächen ermöglicht, wenn dafür an anderer Stelle neue Naturschutzgebiete ausgewiesen werden (siehe auch im Abschnitt »Bioenergie«).

Art der Anlagen

Aufgrund der technischen Entwicklung stieg die Leistungsfähigkeit der Windräder kontinuierlich von durchschnittlich 1 MW pro Anlage im Jahr 2000 auf 3 MW je Anlage 2018. Allerdings sind sie auch deutlich höher und haben größere Rotoren als früher. Dies schlägt sich auch in Potenzialschätzungen nieder. Während Studien aus den Jahren 2006 bis 2010 zu dem Ergebnis kamen, dass im Jahr 2050 maximal 43 TWh Strom durch Windenergie in NRW bereitgestellt werden können[178], kommt die LANUV-Studie aus dem Jahr 2012 zu einer Erzeugung von 71 TWh/a. Auch sie rechnet noch mit Kennwerten, die in Hinblick auf die technische Entwicklung nicht mehr plausibel erscheinen.[179] Aktuelle

[176] Siehe Anlage 8

[177] Siehe MWIDE (2020/1), MKULNV (2015/1)

[178] Siehe Wuppertal Institut, 2012/1)

[179] Auf 3,3 % der Fläche 9.780 Referenz-Windanlagen mit einer Leistung von 3 MW (nachts: 2 MW), Nabenhöhe von 135 Metern, Rotordurchmesser von 101 Metern und durchschnittlichen Jahresvolllaststunden von ca. 2.450-2.550 Stunden.

Studien gehen davon aus, dass der Trend zu größeren Anlagen sich fortsetzen wird, sowie dass die Volllaststunden noch einmal moderat steigen können.[180]

[180] Siehe Deutsche Windguard (2020/1): Die Studie rechnet für 2030 Anlagen mit einer Nabenhöhe von ca. 155 Metern und einem Rotordurchmesser von ca. 150 Metern. Siemens und Vestas haben bereits 12-MW-Offshore-Anlagen entwickelt.

Maßnahmen für den Ausbau der Windenergie

Der Ausbau der Windenergie muss als gemeinsame Aufgabe von Land und Kommunen definiert werden.

- Das 2-Prozent-Ziel sollte wieder in den Landesentwicklungsplan aufgenommen werden. Die Regierungsbezirke werden beauftragt, jeweils in Abstimmung mit der Landesregierung ein Flächenziel auszuweise
- Starre Mindestabstandsregelungen können abgeschafft werden. Dann würde wie bei allen Industrieanlagen aufgrund des Immissionsschutzrechtes eine jeweils anlagen- und standortbezogene Prüfung erfolgen.
- Die Planungsprozesse sollten beschleunigt werden, damit der Ausbau bis 2035 abgeschlossen werden kann.
- Neue Flächenausweisungen sollten in einem Kommunikationsprozess mit Bürger*innen, Kommunen und Fachverbänden erfolgen, um durch Kompromisse Klagen zu verhindern. Dazu sollte geprüft werden, ob im Gegenzug die Naturschutzflächen erweitert werden können.
- Weitere Restriktionen in Bezug auf Militärstandorte und Flugverkehr sollten überprüft werden.
- Es sollte untersucht werden, welche Windpotenziale auf großen Industrie- und Gewerbeflächen bestehen, da auf diesen die Akzeptanzprobleme geringer sind und gegebenenfalls eine Nähe zu Stromverbrauchern besteht.

Insgesamt ergeben sich daraus in den Jahren 2022 bis 2040 jährliche notwendige Zubaumengen von 740 MW. Dazu kommt ein jährlicher Neubau in Höhe von 320 MW im Zuge des Repowerings.

Fazit

Wir haben im Folgenden damit gerechnet, dass zwei Prozent der Landesfläche für Windenergie zur Verfügung gestellt wird. Auf diesen Flächen können etwa 20 GW installiert werden, die bei 2.500 Volllaststunden 50 TWh/a Erzeugung erbringen. Wir rechnen mit 5 MW-Referenzanlagen. Dann wären etwa 4.000 Windräder notwendig, also 200 mehr als heute. Diese wären allerdings deutlich größer als bisherige Anlagen. [181]

[181] Siehe Anlage 13 und 14; siehe im Kapitel 2.4 »Planungsrecht und Bürgerbeteiligung«.

Letztlich ist die Frage nach dem Flächenpotenzial eine politische Entscheidung. Der Energiebedarf von NRW beträgt heute fast 30 Prozent des deutschen Energiebedarfs, NRW hat aber nur ca. 10 Prozent der Fläche Deutschlands. Da die Erzeugung von erneuerbarem Strom von der verfügbaren Fläche abhängt, ergibt sich eine massive Bedarfslücke, die mit Importen gedeckt werden muss, wenn nicht überproportional viele Flächen bereitgestellt werden. Würden drei Prozent der Landesfläche für Windenergie zur Verfügung gestellt, wie etwa im Leitszenario der LANUV-Potenzialstudie aus 2012 unterstellt wurde könnte entsprechend anderthalbmal so viel Energie (ca. 75 TWh/a) erzeugt werden. Das würde den Importbedarf entsprechend reduzieren.

Solarstrom

Solarstrom ist mittlerweile identisch mit Photovoltaik (PV). Alle anderen Konzepte haben den Wettbewerb gegen die immer günstiger werdenden PV-Anlagen verloren. Wie bei der Windenergie sind Flächenverfügbarkeit und Art der Anlagen entscheidende Faktoren. Hinzu kommt, dass die stark schwankende Sonnenenergie mit extremen Spitzenwerten tendenziell schwieriger ins Stromsystem zu integrieren ist, als Windstrom und deshalb das Nicht-Vorhandensein von Speichern, Netzen und Lastmanagement-Systemen ein limitierender Faktor sein kann.

Flächenverfügbarkeit

Aus technischer Sicht stehen für die Nutzung von Photovoltaik weit mehr Flächen zur Verfügung, als benötigt werden. Die Quellen unterscheiden sich aber erheblich.[182] Wir beziehen uns daher primär auf das aktuelle Solarkataster des LANUV von 2018, dem zufolge 482 km^2 Photovoltaikmodule allein auf Gebäuden installiert werden können.[183] In diesen Zahlen sind neueste Studienergebnisse zum Potenzial von Photovoltaikanlagen an Hausfassaden noch nicht berücksichtigt. Diese ermitteln insbesondere in Ballungsgebieten, wie z.B. dem Ruhrgebiet, ein theoretisches Flächenpotenzial an Hausfassaden, das größer ist als das der Dächer.[184] Weitere Potenziale ergeben sich durch die

[182] Siehe Anlage 16; das Fraunhofer ISE nennt allein für Agri-PV in Deutschland ein Potenzial von 1700 GW– das wären proportional gerechnet ca. 170 GW in NRW. Siehe Fraunhofer ISE (2020/2)

[183] Siehe LANUV (2018/2)

[184] Siehe Leibniz (2021/1

Überdachung von Parkplätzen mit PV-Anlagen, durch die Nutzung von Gewerbeimmobilien und durch die Nutzung von Deponien und Haldenflächen. Um den Ausbau der Photovoltaik-Anlagen zu beschleunigen, bietet es sich an, dass die Landesregierung für den Bau von Photovoltaikanlagen verbindliche Regeln schafft, wie es Baden-Württemberg und Hamburg bereits begonnen haben.[185]

Bei den Freiflächenanlagen rechnen wir mit den Ergebnissen der Potenzialstudie des LANUV aus 2013, wo insbesondere die Randstreifen von Autobahnen und Schienenwegen, Parkplätze und Halden und Deponien betrachtet wurden.[186] Durch den Bau von Agri-PV-Anlagen können zukünftig landwirtschaftliche Flächen für Landwirtschaft und Photovoltaik gleichzeitig verwendet werden, was je nach Region die Ernteerträge sogar steigern kann.[187] Dies gilt insbesondere im Gartenbau, wo oftmals bereits bauliche Anlagen auf den Flächen vorhanden sind und ein hoher Energiebedarf besteht oder Sonderkulturen eine sinnvolle Doppelnutzung ermöglichen. Diese Potenziale lassen wir jedoch unberücksichtigt, da es hierfür für NRW noch keine Daten gibt. Ebenfalls unberücksichtigt bleibt die Möglichkeit, schwimmende Photovoltaik-Anlagen zu installieren, was in zunehmend heißen Sommern Gewässer vor Verdunstung schützen kann. Gerade Baggerseen und Tagebaurestseen bieten nach deren Stilllegung dafür Potenziale. Auch weitere neue Entwicklungen in der Photovoltaik-Technik, z.B. fahrzeug-integrierte PV, sowie PV in Verkehrswegen[188] sind noch unberücksichtigt. Unter Berücksichtigung der Quellen und der genannten zusätzlichen Optionen sind die hier gewählten Annahmen eher konservativ und sollten gut erreichbar sein.

Anlagentechnik

Wie Windenergieanlagen werden auch PV-Anlagen immer leistungsstärker, allerdings mit dem positiven Unterschied, dass die Anlagen nicht größer, sondern im Gegenteil platz- und zudem ressourcensparender werden.[189] Für einen Vergleich der Annahmen zu Parametern bisheriger Studien siehe Anlage 15.

---

[185] Siehe Grüne Fraktion NRW (2021/1)

[186] Siehe LANUV (2013/1)

[187] Siehe Fraunhofer ISE (2020/3)

[188] Siehe Fraunhofer ISE (2020/2)

[189] Siehe Fraunhofer ISE (2019/1)

Tabelle 4: Eckdaten für die künftige PV-Nutzung

	Dachfläche	Freifläche
Modulfläche	482 km^2	210 km^2
Gesamtleistung NRW	81 GW	38 GW
Potenzial NRW	69 TWh/a	34 TWh/a
Realistischer Ansatz	58 TWh/a	34 TWh/a

Fazit

Im Ergebnis halten wir die Ergebnisse des LANUV aus der Potenzialstudie von 2013 für die Freifläche weiterhin für realistisch, für die Dachflächen-PV die des Solarkatasters aus 2018. Wir gehen davon aus, dass das Freiflächenpotenzial von 38 GW mit einem Stromertrag von 34 TWh/a wie in dem Szenario aus 2013 voll ausgenutzt werden kann. Von den Dachflächen werden 15 Prozent für die Nutzung durch Solarthermie freigehalten, sodass 69 GW mit 58 TWh/a Erzeugung PV-Anlagen installiert werden können. Zusammen rechnen wir daher mit der Installation von circa 107 GW PV-Anlagen, die im Jahr 92 TWh Strom erzeugen. Dies ist aus unserer Sicht eine konservative Schätzung, da weder die Potenziale von Hausfassaden, Agri-PV, Floating-PV oder sonstiger heute noch nicht marktgängiger Anwendungen berücksichtigt sind. Letztlich handelt sich natürlich auch um eine politische Entscheidung, wie viel Energie importiert und wie viel in NRW erzeugt werden soll.

Maßnahmen für den Ausbau der Photovoltaik

- Der Bau von Photovoltaik-Anlagen auf Dächer, Fassaden, Parkplätzen und anderen geeigneten Flächen wird zum Standard gemacht und gesetzlich geregelt. Priorität sollen Neubauten sowie Gewerbedächer und -flächen haben.[190]

[190] Eine aktuelle Studie prüft die rechtliche Möglichkeit zur Einführung der Solarpflicht in NRW für Neubau- und Bestandsgebäude und kommt zu dem Ergebnis, dass diese grundsätzlich sowohl landes- als auch kommunalrechtlich eingeführt werden kann (siehe Grigoleit (2020/1)). Laut Informationen der

- Die Kommunen machen den Hausbesitzer*innen angepasste Finanzierungsangebote und eine passgenaue Beratung. Es muss sichergestellt sein, dass die Anlagen lohnend betrieben werden können.
- Errichtung von Photovoltaik auf allen öffentlichen Flächen, die dafür geeignet sind und keine andere Nutzung zulassen (z.B. Autobahnränder, Lärmschutzwände, Halden und Deponien).
- Planungsrechtliche Regelung für den Bau von Freiflächenanlagen (Freiflächen-PV-Erlass), damit die Möglichkeiten im Landesentwicklungsplan konsequent genutzt werden.
- Rechtliche Erleichterung des Baus von Agri-PV-Anlagen vornehmlich auf bereits baulich geprägten landwirtschaftlichen Flächen wie im Gartenbau

Daraus ergeben sich jährliche durchschnittliche Installationen in den Jahren 2022 bis 2040 von 3,4 GW auf Dächern und 1,9 GW in der Freifläche.

Bioenergie

Die Verwendung von Biomasse (pflanzliche und tierische Stoffe) zur Erzeugung von Wärme und Strom wird als Bioenergie bezeichnet. Die Nutzung von Biomasse als Rohstoff wird im Kapitel »Industrie« behandelt.

Grundsätzlich kann Biomasse nach Art ihrer Herkunft in drei Gruppen eingeteilt werden:

1) Energiepflanzen aus inländischer Produktion, hauptsächlich Mais und Raps, relevant sind auch Holz aus Kurzumtriebsplantagen sowie Zuckerrüben, Sonnenblumen und Getreide.
2) Importierte Biomasse, z.B. Holz-Pellets aus Rumänien oder Palmöl aus Südamerika.
3) Reststoffe unterschiedlicher Herkunft, z.B. landwirtschaftliche Abfallprodukte wie Gülle und Stroh, Restholz aus der Forstwirtschaft, Grünabfälle und Bio-Restmüll, Altholz, Industrie-Abfälle, z.B. aus Schlachtereien sowie Klärschlamm.

Landesregierung wird geplant, die PV-Nutzung auf denkmalgeschützten Gebäuden zu erleichtern (MWIDE (2020/3)).

Die Einschätzungen über das Potenzial von Bioenergie geht weit auseinander. Während einige Studien mit Biomassepotenzialen in Deutschland von bis zu 350 TWh/a rechnen,[191] kommt das Umweltbundesamt zu viel kleineren Werten, da sie von einer Einstellung des Anbaus von Energiepflanzen ausgehen.

Gründe für die Einstellung des Anbaus von Energiepflanzen

Während Anfang des Jahrtausends noch große Hoffnungen in den Anbau von Energiepflanzen gesetzt wurden, hat sich mittlerweile herausgestellt, dass dieser ineffizient ist. Wenn die gleiche Fläche anstelle für Maisanbau für Solarthermie-Anlagen oder Photovoltaik verwendet wird, kann je nach Technik 5 bis 60-mal mehr Energie produziert werden.[192] Aus diesem Grunde ist der Anbau unwirtschaftlich und lohnt sich nur mit hohen staatlichen Zuschüssen.

Es gibt auch triftige ökologische und gesellschaftliche Gründe für diese geänderte Einschätzung. So hat der Anbau von Energiepflanzen, insbesondere von Mais, negative Auswirkungen auf die Qualität von Wasser und Böden, die Biodiversität und den Naturschutz.[193] Zudem steigt künftig der Flächenbedarf der Landwirtschaft, wenn die Anteile des Öko-Landbaus vergrößert werden sollen. Auch ergeben sich Nutzungskonkurrenzen für Biomasse, da in Zukunft Baugewerbe und Industrie verstärkt biogene Rohstoffe verwenden werden, um fossile Rohstoffe zu ersetzen. Weitere Flächen werden künftig benötigt für Neu-Aufforstungen, für die Wiedervernässung von trockengelegten Mooren (siehe im Kapitel »Landwirtschaft, Ernährung, Bodennutzung und Kompensation« im Abschnitt »Bodennutzung«) und für die Ausweisung von zusätzlichen Flächen für den Naturschutz.

Weiterhin muss die Flächennutzung durch Energiepflanzen in Deutschland gemeinsam mit der globalen Flächennutzung betrachtet werden. Auf Grund der steigenden Weltbevölkerung, der wachsenden Nachfrage nach tierischen Produkten, der Notwendigkeit von Aufforstungen und dem Verlust an nutzbarer Fläche durch die Folgen des Klimawandels (Meeresspiegel-Anstieg, Dürren etc.) und anderen Entwicklungen (u.a. Versalzung

[191] Siehe Klepper (2019/1)

[192] Siehe Beuth (2015/1), UBA (2019/9)

[193] Siehe UBA (2013/3)

der Böden) muss davon ausgegangen werden, dass sich global Flächenkonkurrenzen verstärken. Deutschland ist zurzeit durch die Importe von Nahrungs- und Futtermitteln, sowie Energiepflanzen für große Flächeninanspruchnahme im Ausland verantwortlich. Diese sollten aus Gründen der Gerechtigkeit und auch um negative Klimaeffekte zu vermeiden (z.B. Abholzungen von Urwäldern zur Bereitstellung von Ackerfläche) minimiert werden. Es müssen deshalb in Zukunft verstärkt Futter- und Nahrungsmittel in Deutschland angebaut werden, was die verfügbaren Flächen für Energiepflanzen-Anbau weiter reduziert. Gegen den Import von Biomasse, insbesondere von Reststoffen spricht auch, dass beim Transport große Mengen an Treibhausgasen anfallen.

Viele Studien berücksichtigen diese veränderte Einschätzung des Anbaus von Energiepflanzen noch nicht oder zu wenig und rechnen daher damit, dass auch mittel- und langfristig erhebliche Mengen an Energiepflanzen angebaut werden und genutzt werden können. Das Umweltbundesamt rechnet dagegen mit der vollständigen Einstellung des Anbaus von Energiepflanzen bis 2030.[194] Da auch die anderen Bundesländer künftig weniger Biomasse zur Verfügung haben und gleichzeitig diese für das Energiesystem benötigen, nehmen wir an, dass lediglich nachwachsende Rohstoffe für die Industrie aus anderen Bundesländern importiert werden.

Potenzial von Biomasse-Reststoffen

Damit reduziert sich die verfügbare Biomasse auf die Nutzung der Reststoffe. Auch bei der Einschätzung des langfristig nutzbaren Reststoff-Potenzials für Deutschland unterscheiden sich die Studien erheblich und reichen von 60 TWh/a (UBA) bis 340 TWh/a[195].

Dafür spielen folgende Einschränkungen eine Rolle: In dem Maß, in dem die Tierhaltung zurückgeht, reduziert sich auch die anfallende Menge an Gülle und Mist. Die ökologische Landwirtschaft reduziert auch die Strohreste. Wenn weniger Lebensmittel weggeworfen werden, gibt es weniger Siedlungsabfälle. Das Umweltbundesamt empfiehlt auch eine rückläufige Nutzung von Waldrestholz, da der Verbleib des Holzes im Wald die Kohlenstoffsenke verstärkt, sowie andere umwelt- und naturschutzfachliche

[194] Siehe UBA (2019/3)

[195] Siehe Klepper (2019/1)

Vorteile hat (siehe im Teil 3 im Kapitel »Landwirtschaft, Ernährung, Bodennutzung und Kompensation« im Abschnitt »Wald«).[196] Die Schlussfolgerungen für NRW werden unten dargestellt.

Nutzung der Bioenergie

Bioenergie kann in einem Stromsystem mit zunehmend schwankenden Energiequellen eine wichtige stabilisierende Funktion ausüben. Biomasse ist gut lagerbar und Blockheizkraftwerke (BHKW) oder Biogasanlagen können prinzipiell sowohl konstant als auch relativ flexibel Energie erzeugen.

Die Potenzialberechnung dieser Studie[197] geht von folgenden Annahmen aus: Auf die Nutzung von Waldrestholz wird zumindest im Zeitraum dieser Studie nicht vollständig verzichtet, sie wird aber auf die Hälfte reduziert. Es bleibt allerdings weiterhin sinnvoll, die noch nicht ausgeschöpften energetischen Potenziale der Bioabfälle und des Grünschnitts zu nutzen. Es werden weitere ungenutzte Reststoff-Potenziale wie Gülle und Mist aus der Landwirtschaft erschlossen. Dabei gehen wir gleichzeitig von einer Einstellung des Energiepflanzenanbaus und einer Einstellung von Biomasse-Importen zu energetischen Zwecken bis 2035 aus.

Viele Studien sprechen sich dafür aus, das beschränkte Potenzial an Biomasse vorrangig in der Industrie für Hochtemperatur-Wärmeerzeugung einzusetzen und nicht in der Stromerzeugung.[198] Gerade in NRW ergibt sich ein Bedarf an Biomasse für Hochtemperaturprozesse in der Industrie. Falls Biomasse in der Stromerzeugung eingesetzt wird, dann nur in KWK-Anlagen in Verbindung mit Wärmeerzeugung. Biogas-Anlagen sollten daher so flexibilisiert werden, dass sie, statt Grundlast zu produzieren, zur Stabilisierung des Stromsystems beitragen und Schwankungen durch Wind- und PV-Strom ausgleichen.

---

[196] Siehe UBA (2019/3)

[197] Siehe Anlage 17

[198] Siehe z.B. BDI (2018/1)

Insgesamt rechnen wir mit einem Gesamtpotenzial von energetisch genutzter Biomasse von ca. 15 TWh/a [199], die sich wie folgt verteilt: 1 TWh/a dezentral zu Heizzwecken, 4 TWh/a zur Erzeugung von Strom und Wärme in BHKW und 10 TWh/a für die Industrie zur Erzeugung von Hochtemperaturwärme.

Maßnahmen für die Nutzung von Bioenergie

- Nutzung von energetischen Potenzialen von Sekundärrohstoffen sowie Bioabfällen und Grünschnitt.
- Anbau von Energiepflanzen sollte bis 2035 vollständig eingestellt werden.
- Einstellung des Imports von Bio-Brennstoffen aus Energiepflanzenanbau; dies betrifft auch den Import von Brennholz und Pellets ab 2035.
- Die Nutzung von Holz in alten Kohlekraftwerken sollte nicht mehr erlaubt sein. In KWK-Anlagen können biogene Reststoffe, einschließlich Restholz und Holz-Produktionsabfälle eingesetzt und gefördert werden. Die Förderung sollte nicht für Pellets gelten, die nicht nachweislich aus Restholz bestehen.
- Im Rahmen einer zertifizierten Kaskadennutzung von Holz kann am Ende das Altholz und auch Holz mit Schadstoffen in Kraftwerken genutzt werden, wenn diese Anlagen dafür entsprechend immissionsschutzrechtlich zugelassen sind.
- Reststoffe aus der Landwirtschaft (vor allem Gülle und Stroh) sollten vollständig genutzt werden. Dies hat zwei positive Effekte: Erstens können die Biogasanlagen auch ohne Energiepflanzenanbau genutzt werden. Zweitens werden die Treibhausgas-Emissionen reduziert, die sonst durch Gülle anfallen (Siehe im Kapitel »Landwirtschaft, Ernährung, Bodennutzung und Kompensation« im Abschnitt »Landwirtschaft«). Es muss sichergestellt werden, dass keine Anreize für eine nicht-nachhaltige Landwirtschaft geschaffen werden.
- Biogas-Anlagen sollten so umgebaut werden, dass sie seltener laufen, aber in kürzerer Zeit große Mengen Strom produzieren. Dies hilft dabei das Stromsystem zu stabilisieren. Dafür müssten größere Speicher für Biogas-Anlagen gebaut und die Stromerzeugungseinheiten modernisiert werden. Fördermodelle

[199] Dazu kommt noch 5 TWh/a Biomasse, die als Rohstoff für die chemische Industrie eingesetzt wird. Langfristig wird der Rohstoffeinsatz dominieren (siehe im Kapitel »Industrie«).

müssten entsprechend umgestaltet werden, sodass sie eine Flexibilisierung der Anlagen und eine ausschließliche Nutzung von Reststoffen ab 2035 nahelegen.

- Technische Optimierung der Gärprozesse durch Zusatz von Wasserstoff.
- Um die Potenziale aus Bioabfällen besser zu nutzen, sollte ein landesweiter Anschlusszwang an die Biotonne bewirkt werden – sowohl im Landesabfallgesetz als auch im Landeswassergesetz sollte festgelegt werden, dass die energetischen Potenziale des Abfalls und des Klärschlamms sowie der Wärme- und Bewegungsenergie zu nutzen sind.

Wasserkraft

Laut der Studie des LANUVs von 2017[200] ist das Potenzial für Stromerzeugung durch Wasserkraft in NRW auf max. 0,6 TWh/a begrenzt und schon heute größtenteils (über 0,5 TWh/a) erschlossen. Dies stimmt mit Einschätzungen zur Situation in Gesamtdeutschland überein. [201] Bei der Anlagentechnik sind keine bedeutenden Verbesserungen zu erwarten, auch wenn viele alte Anlagen einen Modernisierungsbedarf aufweisen. Je nach Witterung kann die jährliche Produktion um bis zu 15 Prozent schwanken.[202] Der Klimawandel wird das Potenzial bis 2050 vermutlich nicht entscheidend beeinflussen, für spätere Zeiträume sind Einbußen wahrscheinlich, wobei sie den Modellen zu Folgen im Bereich der jährlichen hydrologischen Schwankungen liegen.[203]

Trotz des im Vergleich zu Wind und Sonne geringen Erzeugungspotenzials ist Wasserkraft wichtig, denn sie hat den Vorteil, dass sie stetig (bei Fließgewässern) oder regelbar (bei Talsperren/Stauseen) ist und damit zur Stabilität des Stromsystems beitragen kann. Vor dem Hintergrund, dass in einem Energiesystem mit viel Wind- und Solarstrom die Schwankungen zunehmen, sollte die Wasserkraft wo möglich primär in diesem Sinne eingesetzt werden. Wir rechnen daher damit, dass unerschlossene Potenziale erschlossen und bestehende Anlagen repowert werden.

[200] Siehe LANUV (2017/1), siehe auch Anderer (2018/1)

[201] Siehe BDW (2020/1)

[202] Siehe UBA (2019/3)

[203] Siehe LANUV (2017/1)

Pumpspeicherkraftwerke in NRW und die Nutzung von Wasserspeichern in Norwegen und den Alpen werden gesondert in den Abschnitten »Stromspeicher« und «Ausbau der Stromnetze« behandelt.

Zusammenfassung: Potenzial erneuerbarer Strom

In Tabelle 5 ist das Erzeugungspotenzial für grünen Strom in NRW zusammengefasst. Aufgrund des großen Dachflächen- und Verkehrsflächenpotenzials dominiert in NRW die Photovoltaik mit einem Anteil von 63 Prozent. Damit ist der Photovoltaikanteil im Vergleich zu anderen Bundesländern deutlich überproportional. Wie sich diese Potenziale im Verhältnis zum Energiebedarf darstellen und welcher Importbedarf sich daraus ergibt, wird im nächsten Abschnitt erläutert.

Tabelle 5: Potenzial EE-Strom in NRW

Quelle	Erzeugung
Wind–Onshore	50 TWh/a
Photovoltaik	92 TWh/a
Biomasse	1,6 TWh/a[204]
Wasser	0,6 TWh/a
Gesamt	**ca. 145 TWh/a**

Wenn das Potenzial bis 2040 ausgeschöpft werden soll, ergibt sich der jährliche Zubau von Windenergieanlagen und Photovoltaik in der in Tabelle 6 dargestellten Größenordnung:

Tabelle 6: Entwicklung Windräder und Photovoltaik

Quelle	Installierte Leistung 2021	Anlagenzahl/ -größe 2021	Installierte Leistung 2040	Jährlicher Zubau Leistung 2022 - 2040	Jährlicher Zubau 2022 - 2040
Wind	6 GW	3800[205]	20 GW	740 MW + 320 MW Repowering[206]	210 (Ø 5 MW)[207]

[204] 60% der Energieproduktion der BHKWs fällt auf Wärme, der Rest auf Strom.

[205] Stand 2020 EnergieAgentur.NRW. (2020/3)

[206] Da Windenergieanlagen ungefähr 20 Jahre in Betrieb sind, werden 2040 fast keine Anlagen mehr in Betrieb sein, die heute laufen.

[207] Vermutlich werden in den ersten Jahren noch kleinere Anlagen gebaut. Entsprechend müssten mehr Anlagen gebaut werden, um die 1.060 MW zu erreichen. Angesichts dessen, dass die Industrie

PV	5,6 GW (ca. 0,2 GW Freifläche)	263.740[208]	Dächer: 69 GW Freifl. 38 GW	Dächer: 3,4 GW Freifläche: 1,9 GW	Dächer: 20 km² Freifl. 10,5 km²

Energiebedarf für NRW

Für die Berechnung des Energiebedarfs von NRW orientieren wir uns grob an den Bedarfsrechnungen für das »Handbuch Klimaschutz Deutschland«. Der Bedarf wird dabei nach Verbraucher*innen aufgegliedert anteilsmäßig berechnet. Soweit vorhanden, wurden die Ergebnisse um neue bundesweite Studien ergänzt und mit NRW-spezifischen Studien untermauert bzw. korrigiert. In allen Fällen wurden vorsichtige Schätzungen vorgenommen.

Wir rechnen für das Jahr 2040 mit einem Primärenergiebedarf von knapp 540 TWh. Das macht gemessen am im Handbuch Deutschland ermittelten Bedarf ca. 25 Prozent des deutschen Bedarfs aus und liegt damit deutlich unter dem heutigen Anteil NRWs am bundesdeutschen Energieverbrauch. Der Bedarf ist aber vor allem aufgrund des Energie- und Rohstoffbedarfs der Stahl- und Chemieindustrie immer noch überproportional hoch in Hinblick auf den Bevölkerungsanteil.[209] Für die detailliertere Aufschlüsselung des Verbrauchs und Erläuterungen siehe das »Energieflussdiagramm« im Anhang.

Um die berechneten Energiemengen bereitzustellen sind sowohl ein starker Ausbau der Erneuerbaren Energien als auch ein Import von Energie aus dem Ausland und anderen Bundesländern notwendig. Durch Nutzung der oben dargestellten Potenziale können 32 Prozent des Energiebedarfs von NRW (einschließlich der Energie für die Produktion vom synthetischen Rohstoffen) durch heimische Erzeugung gedeckt werden. Der Rest muss importiert werden, allerdings nicht komplett aus dem Ausland, sondern zu großen Teilen auch aus anderen Bundesländern.

---

vermutlich einige Jahre braucht, um die Kapazitäten auszubauen, wird der Zubau in den ersten Jahren geringer sein und es müssen in den späteren Jahren dann mehr Anlagen gebaut werden.

[208] Stand 2019 – siehe LEE NRW 2020/1

[209] Wir haben hier nur den Bedarf an Kerosin für die Luftfahrt und Schiffsdiesel berücksichtigt, der in NRW anfällt. Ordnet man den Bedarf für die internationalen Verkehre proportional gemäß dem Anteil der Bevölkerung den Bundesländern zu, dann bedeutet dies für NRW einen Mehrbedarf von 13 TWh/a PtL und damit ca. 40 TWh/a Primärstrom bedeuten. Damit läge NRWs Anteil bei 26% des deutschen Energiebedarfs.

Importe aus Deutschland

Die Erzeugung in NRW wird künftig nicht ausreichen, um den Bedarf zu decken. Gleichzeitig stellt es ein Risiko dar, alles aus dem Ausland zu importieren (siehe Kapitel 2.2 »Varianten des Energiesystems: E-Brennstoffe und Importe«). Wir gehen deshalb davon aus, dass große Mengen an Energie aus anderen Bundesländern importiert werden. Eine besondere Rolle spielt dabei der Anschluss an die Offshore-Windenergie in der Nordsee durch HGÜ-Kabel. Die restlichen Importe für NRW werden überwiegend aus den künftigen Stromüberschussländern Niedersachsen und Schleswig-Holstein erfolgen. Natürlich wird es auch erhebliche größere Stromflüsse als heute zwischen NRW und den Nachbarländern – insbesondere den Niederlanden, Belgien, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz – geben, die sich in der Summe aber eher nivellieren werden (siehe im Abschnitt »Ausbau des Stromnetzes«).

Anbindung an Offshore-Wind

Im »Handbuch Klimaschutz Deutschland« rechnen wir mit einem starken Ausbau der Offshore-Windenergie auf 55 GW Leistung, die im Jahr 2035 bereits 250 TWh Strom produzieren.[210] Die entsprechenden Windparks liegen hauptsächlich in der Nordsee. Bislang wird der Offshore-Strom den Bundesländern zugerechnet, in denen die Kabel anlanden. Eigentlich sind die Flächen, auf denen die Windparks stehen, aber Gebiet des Bundes. Da der Offshore-Strom für die gleichmäßige Stromversorgung ganz Deutschlands, nicht nur der nördlichen Bundesländer entscheidend ist, rechnen wir den Offshore-Strom bilanziell den Bundesländern gemäß ihres Einwohneranteils zu. Nordrhein-Westfalen stehen damit 21,6 Prozent und damit ca. 52 TWh/a zu. Durch entsprechende Abstimmung mit den anderen Bundesländern kann gegebenenfalls ein noch größerer Anteil des Offshore-Stroms bezogen werden. Das Land sollte Investoren, Stadtwerke und Kommunen aus NRW dabei unterstützen, eigene Investitionen in Offshore-Projekte zu tätigen, wie das mit dem Borkum-II-Invest von Trianel/NRW-Bank bereits getan wurde.

Die nötigen Flächen müssen vom Bund ausgewiesen werden. Nordrhein-Westfalen sollte darauf hinwirken, dass das passiert. Mit dem EEG 2021 wurden die Ausbauziele für die Offshore-Windenergie auf 40 GW bis 2040 erhöht, dies ist jedoch noch nicht

[210] Siehe BBK 2020

ausreichend. Außerdem müssen die notwendigen HGÜ-Kabel von der Nordsee nach NRW gebaut werden. Die ersten sind bereits in der Planung.

Bereitstellung an Primärenergie für NRW

Folgendermaßen könnte die primäre Energiebereitstellung[211] aussehen (der komplette Energiefluss wird im »Energieflussdiagramm« im Anhang dargestellt):

Primärenergiebedarf und Bereitstellung für NRW 2040

Heimische Erzeugung: 174,5 TWh/a (32%)

- 50 TWh/a Onshore Wind
- 92 TWh/a Photovoltaik – davon 58 TWh/a auf Dächern und 34 TWh/a in der Freifläche
- 15 TWh/a Biomasse – davon 1,6 TWh/a für Stromerzeugung und 13,4 TWh/a für Wärme
- 0,5 TWh/a Wasserkraft
- 15 TWh/a Solarthermie – davon 7 TWh/a auf Dächern, 4 TWh/a in der Freifläche und 4 TWh/a für die Industrie
- 2 TWh tiefe Geothermie

Innerdeutsche Importe: 155 TWh/a (29%)

- 55 TWh/a Offshore-Strom über HGÜ (Niedersachsen)
- 15 TWh/a Strom (SH)
- 44 TWh/a Strom (Niedersachsen)
- 33 TWh/a H_2 → entspricht 41 TWh/a Strom (Niedersachsen und SH)

Importe: 212 TWh/a (39%)

- 52 TWh/a PtL → entspricht 156 TWh/a Strom
- 45 TWh/a H_2 für Industrie → entspricht 56 TWh/a Strom

Gesamt: 541,5 TWh/a (Energie)[212]

[211] Abwärmepotenziale und Müllverbrennung werden hier nicht aufgeführt, da sie keine Primärenergie sind. Im Energieflussdiagramm sind sie dagegen enthalten. Eine evtl. auch 2040 noch mögliche Nutzung von Grubengas (heute 0,5 TWh/a) wurde nicht berücksichtigt.

[212] Die Einschätzungen des Primärenergiebedarfs liegen erheblich auseinander. Nach den Schätzungen von Prof. Deerberg (Fraunhofer UMSICHT) liegt der künftige Energiebedarf im Sektor Industrie um 50

Daraus ergeben sich reine Stromimporte (ohne H_2 und PtL) in Höhe von 114 TWh/a.

Versorgungssicherheit: Netze, Speicher und weitere Anpassungen

Je mehr Strom erneuerbar erzeugt wird, desto größer sind die Schwankungen in der Energieerzeugung. Während Kohle-, Gas- und Kernkraftwerke gleichmäßig Energie erzeugen können und zumindest in Grenzen regulierbar sind, erzeugen Windenergie und besonders Photovoltaik zeitweise sehr viel und zu anderen Zeiten (fast) keine Energie.

Auch auf Verbrauchsseite gibt es wie heute schon erhebliche Schwankungen. Auch in Zukunft wird mehr Strom tagsüber verbraucht als nachts. Die jahreszeitlichen Unterschiede werden sich voraussichtlich verstärken, da die elektrische Heizung der Häuser im Winter Nachfragespitzen produziert. Eine weitere Veränderung wird die dezentralere Erzeugungsstruktur sein. Strom wird in Zukunft verstärkt nicht mehr (nur) an wenigen Standorten erzeugt, sondern verteilt auf viele kleinere Anlagen (Ende 2019: 282.000 Anlagen).

Das Stromsystem muss an diese neuen Anforderungen angepasst werden, um die Versorgungssicherheit in jeder Situation zu gewährleisten. Hierzu sind vor allem vier Maßnahmen entscheidend, die für mehr Flexibilität sorgen und das System so stabilisieren: Lastmanagement, Netzausbau, Energiespeicher und Notreserven.

Die kalte Dunkelflaute

Um sicherzustellen, dass zu jedem Zeitpunkt die Versorgungssicherheit gegeben ist, betrachten wir zunächst den Extremfall. Dies ist die sogenannte kalte Dunkelflaute. Darunter versteht man folgende Situation: Aufgrund einer extremen Wetterlage wird nur wenig Strom produziert, weil wenig Sonne und wenig Wind vorhanden sind. Der Strombedarf ist relativ hoch, weil die Wärmepumpen aufgrund kalter Außentemperaturen auf Hochtouren laufen. Dieser Zustand erstreckt sich über ganz Zentraleuropa über mehrere Wochen. Aus den Wetteraufzeichnungen sind zwei solche extremen Ereignisse bekannt: Der November 1987 und der Januar 2006 (siehe dazu die Abschnitte

TWh höher (siehe im Abschnitt »Industrie«). Dieser müsste dann durch zusätzliche Importe gedeckt werden.

»Langzeitspeicher« und »Reservekraftwerke« sowie die Anlagen 18 und 19). Diese Ereignisse dienen als Referenzfall.

In dieser Situation gibt es zwei Probleme zu lösen:

1. muss der Extremfall der minimalen Stromproduktion betrachtet werden, der meist nur wenige Stunden andauert, da es während einer mehrtägigen Dunkelflaute immer noch erhebliche Schwankungen in der Stromproduktion und Stromnachfrage gibt. In diesem Extremfall wird die Versorgung gesichert durch
    - Die Abschaltung von Verbraucher*innen, die vertraglich für eine vereinbarte Zeit abgeschaltet werden können (Kühlhäuser, Pumpen, Industrieanlagen)
    - Die Senkung des Verbrauchs durch preisgesteuerte Verbraucher*innen in Privathaushalten und Betrieben (siehe im nächsten Abschnitt)
    - Die garantierte Stromproduktion aus KWK, BHKW und Wasserkraftwerken in NRW
    - Die minimale Produktion aus Wind- und Sonnenenergie
    - Vertraglich gesicherte Lieferungen aus Wasserkraftwerken in Skandinavien
    - Reservekraftwerke, die nur für diesen Fall vorgehalten werden. Dabei handelt es sich um Gasturbinen – vorübergehend können auch noch Kohlekraftwerke in Reserve gehalten werden, da bei Ereignissen, die nur alle 10 Jahre auftreten, die Emissionen nicht relevant sind.
    - Um ganz sicher zu gehen, wird für Deutschland eine Leistungsreserve von 10 GW eingeplant.[213]
2. müssen genügend Reserven in den Wasserkraftwerken und den Reservekraftwerken vorgehalten werden. Dies geschieht durch Vorräte an grünem Wasserstoff und grünem Methan in Gaskavernen. Dabei wird eine Sicherheitsreserve von mindestens einem Monat eingeplant.

Im Folgenden werden die Komponenten, die die Versorgungssicherheit gewährleisten, einzeln diskutiert:

[213] Siehe MD (2020/1)

Lastmanagement und Smart Grid

Lastmanagement hat das Ziel, den Stromverbrauch soweit möglich dem momentanen Stromangebot anzupassen. Konkret bedeutet das, dass relevante Stromverbraucher (z.B. Waschmaschinen im Haushalt, die Wasserpumpen in den alten Bergwerken im Ruhrgebiet oder Kühlsysteme im Bereich Industrie), die nicht permanent, sondern nur zeitweise Strom verbrauchen, dann aktiviert werden, wenn gerade ein Überangebot an Strom besteht. In Zeiten eines niedrigen Stromangebots werden sie von Kund*innen abgeschaltet. Dies betrifft sowohl Haushalte als auch Unternehmen.

Das zentrale Instrument des Lastmanagement ist ein variabler Strompreis, der als Signal über das Stromnetz übertragen wird (Smart Grid). Wenn weniger Strom produziert wird oder viel verbraucht wird, steigt der Preis, wenn viel Strom produziert wird oder wenig verbraucht wird, dann sinkt er. Private Kund*innen und Firmenkund*innen können geeignete Geräte so einstellen, dass sie sich automatisch dann zuschalten, wenn der Strom günstig ist. Dadurch können erhebliche Verlagerungseffekte erreicht werden.[214] Um den Effekt zu verstärken, könnten nicht nur der Stromtarif an sich, sondern auch Aufschläge und Steuern variabel gestaltet werden. Die Anreize für Lastmanagement können durch eine starke Preisspreizung deutlich erhöht werden. Damit Verbraucher*innen auf die sich verändernden Preise reagieren können, muss der Preis abrufbar sein. Deshalb wird er über das Stromnetz übertragen und kann mit Geräten abgelesen werden. Mit neuen Stromzählern ist dies schon möglich – man spricht vom »Smart Metering«.

Neue Geräte könnten zudem darauf programmiert werden, niedrige Preise automatisch zu erkennen und sich entsprechend an- und auszuschalten. Insbesondere in Unternehmen hat eine derartige Automatisierung großen Stromverbrauchs Potenzial: Beispielsweise benötigen Kühlhäuser täglich nur für eine Stunde Strom. Dementsprechend könnten sie dann eingeschaltet werden, wenn das Stromangebot hoch ist. Eine weitere relevante Verbrauchergruppe sind die E-Autos. Es wird zukünftig für die

[214] Bei einem Großversuch in Eckernförde über 2 ½ Jahre wurden die Strompreise in neun Stufen von 12 bis 73 Pfennig/kWh gespreizt. Dabei wurde eine Reduzierung der Stromspitzen um 6% erreicht. In Zukunft könnte diese deutlich höher ausfallen, da intelligente Geräte sowie Wärmepumpen und Elektroautos zusätzliche Verlagerungseffekte ermöglichen - siehe Hentschel (2010/1)

Stabilisierung des Stromsystems relevant sein, ob es gelingt, dass das Laden der Autos überwiegend dann stattfindet, wenn viel Strom vorhanden ist.

Allgemeiner bezeichnet der Überbegriff »Smart Grid« eine Optimierung der Abstimmung von Stromerzeugung und Stromverbrauch, was neben Lastmanagement noch weitere Aspekte umfasst wie ein möglichst großer Anteil des Energieverbrauch vor Ort: Je mehr Energie direkt am Erzeugungsort verbraucht wird, desto weniger werden Energienetze beansprucht und müssen entsprechend weniger ausgebaut werden. Eine Studie[215] berechnet für das Jahr 2030 den Anteil von Prosumer-Anlagen[216] (Photovoltaik und kleine BHKW) am Netto-Stromverbrauch der Haushalte auf 25 Prozent. Durch Integration von Elektromobilität, Wärmepumpen, Heizstäbe und Energiespeicher könnte der Anteil allerdings wesentlich gesteigert werden. Die Entwicklungen von »Smart Grid« beruhen zu großen Teilen auf Digitaltechnologie. (Zu den Fragen nach Datenschutz, IT-Sicherheit etc. siehe in Kapitel 2.5 »Zur Rolle der Digitalisierung«).

Folgende Lastmanagement-Potenziale ergeben sich in NRW:[217]

- Ein Lasterhöhungspotenzial von 8,4 GW, davon 5,8 GW in privaten Haushalten
- Ein Lastreduktionspotenzial von 1,3 GW, größtenteils in der energieintensiven Industrie[218]
- Es wird damit gerechnet, dass durch die Digitalisierung der Produktionsprozesse einschließlich der Energieversorgung in Unternehmen erhebliche zusätzlich Potenziale für Lastmanagement erschlossen werden können.[219]

Geeignete Rahmenbedingungen können die Potenziale vermutlich erhöhen.

---

[215] Siehe Aretz (2017/1)

[216] Prosumer sind Haushalte, die ihren eigenen Strom erzeugen und verbrauchen.

[217] Energieagentur.NRW (2016/1)

[218] Die Aluminium-Hütten haben einen Stromverbrauch von ca. 1 GW – siehe Döschner (2014/1).

[219] Siehe Bitkom (2020/1)

Maßnahmen zum Lastmanagement

- Der Strompreis sollte flexibilisiert werden. Das gilt auch für Steuern und Umlagen, die bisher für jede Kilowattstunde gleich hoch sind, egal, ob viel oder wenig Strom vorhanden ist.
- Die Anreize für Unternehmen, vorhandene Lastmanagementpotenziale konsequent zu nutzen, müssen verbessert werden und vorhandene Hemmnisse beseitigt werden.
- Darüber hinaus sollte die intelligente, an der aktuellen Situation im Stromnetz orientierte Steuerung von Geräten wie Waschmaschinen nicht zuletzt für Menschen mit geringem Einkommen gefördert werden, insbesondere bei Ladesäulen für E-Autos sollte die Möglichkeit für einen netzdienlichen Betrieb Voraussetzung für Fördermittel sein.
- Förderung und rechtliche Ermöglichung von Prosumer-Potenzialen, z.B. durch rechtliche Gleichstellung von Mieterstrom und Eigenverbrauch, Vereinfachung von Quartierslösungen und Prosuming für den Bereich GHD, Vereinfachung von Zählertechnik, Schaffung von Rechtssicherheit für PV-Kleinstanlagen, etc.[220]

Ausbau des Stromnetzes

Ein zentraler Baustein für die Energiewende ist der Ausbau des Stromnetzes. Vor allem müssen große Spitzenlasten transportiert werden können und Übertragungsverluste minimiert werden. Zugleich muss die Einspeisung dezentrale Stromerzeuger möglich sein.

Regionale Netze und Ladestationen

In manchen Gegenden müssen die Verteilnetze ausgebaut werden, um ausreichend Leistung für die Ladeinfrastruktur von E-Autos und für Wärmepumpen sicherzustellen. Sie müssen auch in der Lage sein, die Energie aus Dach-Photovoltaikanlagen aufzunehmen, während diese an Sonnentagen Stromspitzen erzeugen. Das betrifft vor allem Niedrigspannungsnetze mit 400 V Drehstrom-Spannung. Diese liefern Strom an die

[220] Für weitere Empfehlungen zum lastmanagementdienlichen Strommarkt siehe Agora Energiewende (2015/1)

Haushalte und Betriebe des GHD-Sektors. In Teilen betrifft es auch Mittelspannungsnetze, welche Stadtteile und größere Unternehmen versorgen. Alle Parkplätze müssen in Zukunft wenigstens Ladestationen mit 22 kW Wechselstrom bereitstellen können. In Haushalten ist dies bereits heute überwiegend möglich. Weiterhin müssen die nötigen Leitungen für Gleichstrom-Schnellladestationen auf allen Autobahnraststätten und an zentralen Orten in Städten bereitgestellt werden.[221]

Das Hochspannungsgleichstromnetz

Damit ein überregionaler Lastausgleich zwischen Regionen mit Starkwind und Flaute bzw. Sonnenschein und Bewölkung stattfinden kann, muss ein europäisches Hochspannungsgleichstrom-Übertragungsnetz (HGÜ-Netz) aufgebaut werden. Dieses kann Strom mit minimalen Verlusten (unter 3 Prozent pro 1.000 km) über tausende von Kilometern transportieren.[222] Dies trägt wesentlich zur Stabilisierung der Stromversorgung bei, denn irgendwo im vom Netz abgedeckten Gebiet wird fast immer erneuerbarer Strom produziert. Hochdruck- und Tiefdruckgebiete haben meist eine Größe von ca. 1.500 km Durchmesser. Wenn sich über Deutschland ein Hochdruckgebiet mit Windflaute befindet, gibt es höchstwahrscheinlich zeitgleich ein Tiefdruckgebiet mit Starkwind in Großbritannien, Spanien oder Skandinavien. Die Zeiträume in denen mehrere Tage lang weder auf Wind- noch auf Sonnenenergie zurückgegriffen werden kann, reduzieren sich so auf ein Zehntel.[223]

Die HGÜ-Leitungen haben noch zwei weitere wichtige Funktionen:

Erstens dienen sie zur Anbindung der Wasserspeicher in Skandinavien und den Alpen (siehe auch im Abschnitt »Stromspeicher«). Mittlerweile sind ca. 10 Leitungen zwischen Skandinavien und Zentraleuropa mit einer Kapazität von über 10 GW im Bau, in Planung oder im Betrieb. Insbesondere Norwegen bereitet sich damit auf die Zeit vor, wenn sein Öl nicht mehr nachgefragt wird und finanziert die Leitungen auf eigene Kosten. Schon heute liefern Windenergieanlagen Stromüberschüsse zu günstigen Preisen nach Norwegen. Norwegen wiederum schickt dann Strom zurück, wenn in Deutschland Flaute

[221] Siehe Anlage 18, Löfken (2010/1)

[222] Zum Vergleich: Die Leitungsverluste liegen bei den Höchstspannungswechselstromleitungen (400kV) bei 3% auf 100 km.

[223] Siehe DWD (2018/1)

herrscht und die Preise an der Strombörse hoch liegen und finanziert mit der Differenz den Leitungsbau.

Zweitens ermöglichen HGÜ-Leitungen den Anschluss von Süddeutschland und Nordrhein-Westfalen an die windreichen nördlichen Bundesländer und insbesondere die Offshore-Windparks.

Der Netzausbau erfolgt bevorzugt entlang bestehender Leitungstrassen. Teilweise werden auch neue Trassen erschlossen werden müssen. Dabei benötigen Gleichstromleitungen nur die Hälfte bis ein Viertel der Fläche von vergleichbaren Wechselstromleitungen. Mittlerweile wurden Freileitungen mit 5 GW Übertragungsleistung an vielen Stellen realisiert – in China über Tausende von Kilometern hinweg. Dort, wo Siedlungsstrukturen dies nicht zulassen, können statt der Freileitungen 2-GW-Erdleitungen verlegt werden.

Die oben dargestellten innerdeutschen Stromimporte nach NRW von ca. 110 TWh/a machen einen massiven Ausbau der HGÜ-Leitungen nach Niedersachsen und Schleswig-Holstein notwendig. Natürlich kommt es auch zu einem Stromaustausch mit den anderen Nachbarländern NRWs. Den Engpass bilden aber die Verbindungen nach Norden. Wir rechnen daher mit einem Bedarf von Leitungen mit Transportkapazitäten von ca. 20 bis 30 GW.[224] Eine Verstärkung der Übertragungsleistung des Wechselstromhöchstspannungsnetzes zwischen Niedersachsen und NRW auf ca. 6 GW und der Bau von zwei HGÜ-Leitungen nach Norden und einer nach Baden-Württemberg sind bereits geplant.

Zusätzlich zu den von NRW benötigten Leitungen werden auch einige der Leitungen, die Norddeutschland und Baden-Württemberg verbinden, durch NRW führen müssen. Die Wasserstoffstudie rechnet mit einem Bedarf von 8 GW in Richtung Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg.

[224] Siehe dazu Anlage 18. Bei einem konstanten Stromfluss würden Netze mit einer Transportkapazität von 13,4 GW benötigt. Da der Strom nicht konstant fließen wird, ist deutlich mehr erforderlich. Die Wasserstoffstudie des Jülich-Instituts rechnet für den Extremfall „maximale Elektrifizierung“ und Wasserstoffelektrolyse an den heutigen Industriestandorten in NRW und Baden-Württemberg mit einem Bedarf an Nord-Süd-HGÜ-Leitungen mit Transportkapazitäten von 90 GW für ganz Deutschland und 29 GW zwischen den Verbrauchsschwerpunkten im Ruhrgebiet und Norddeutschland. Allerdings können die Leitungen auch deutlich geringer ausfallen – dann müssen umso öfter die Reservekraftwerke genutzt werden. Das ist ein Optimierungsproblem.

Leitungen nach Belgien und den Niederlanden

Für den internationalen Ausgleich der Lastschwankungen spielen in NRW auch die Verbindungen zu den Nachbarländern Belgien und den Niederlanden eine wichtige Rolle. Diese befinden sich zurzeit im Ausbau. Zentraler Knoten wird in Zukunft der Netzknoten Osterrath bei Düsseldorf sein, wo sich die geplanten HGÜ-Leitungen zu den Offshore-Windparks in der Nordsee, die HGÜ-Leitung nach Philippsburg (BaWü) sowie die Leitungen nach Niederlanden und Belgien treffen. Hier werden auch die Umspannstationen von Wechselstrom auf Gleichstrom und zurück stehen. Da sowohl Belgien als auch die Niederlande wie NRW dicht besiedelt sind und einen hohen Strombedarf haben, rechnen wir nicht mit Netto-Importen zur Deckung der Stromlücke. Die Verbindungen sind aber wichtig, da der internationale Verbund dazu beitragen kann, die Schwankungen in den Netzen teilweise abzufangen. Wir rechnen mit einem Ausbau der Leitungen auf je mindestens 5 GW bis 2035, damit ein relevanter Beitrag zum Lastausgleich erfolgen kann.

Stromspeicher

Wenn der Strom nicht von flexiblen Verbraucher*innen benutzt oder über das Stromnetz verteilt werden kann, muss er gespeichert werden. Es gibt unterschiedliche Speicherarten, je nachdem wie lange der Strom gespeichert werden soll. Die wichtigsten werden im Folgenden dargestellt:[225]

Kurzzeitspeicher

Für den Ausgleich von stündlichen und täglichen Schwankungen sind Kurzzeitspeicher nötig.[226] Dafür eignen sich am besten Batterie- und Wärmespeicher. In Haushalten dienen sie vor allem dazu, selbst erzeugten Strom zu speichern oder mit den Wärmepumpen zu Zeiten eines hohen Stromangebots warmes Wasser zu erzeugen, das in Wärmespeichern für den Tag vorgehalten werden kann. Gegebenenfalls werden solche Speicher auch auf der Ebene von Stadtteilen oder bei Fernwärme-Kraftwerken

[225] Für eine Darstellung der Berechnungsgrundlage für das Handbuch Klimaschutz siehe MD (2020/2) in der Anlage 23

[226] Netzintegrationsspeicher für den Millisekundenbereich werden hier nicht diskutiert, da sie keine Speicher im eigentlichen Sinne sind, sondern ein notwendiger Bestandteil der Stromnetze.

installiert. Das Jülich-Institut geht davon aus, dass die Batterien von E-Autos einen wichtigen Beitrag als flexible Speicher leisten können. Dies muss gesetzlich geregelt und von vornherein technisch eingeplant werden.[227]

Batterien sind im Vergleich zu anderen Speichern relativ teuer und haben eine geringe Leistung. Die Gesamtkapazität der installierten Batterien in Deutschland wird in etwa so groß sein, wie der Stromverbrauch in Deutschland in einigen Stunden. Gleichzeitig haben sie mit über 90 Prozent den höchsten Wirkungsgrad unter den Speichern. Sie sind täglich im Einsatz und leisten mengenmäßig den größten Beitrag an Speicherstrom.

Eine Studie im Auftrag der Energie Watch Group[228] rechnet damit, dass zukünftig ca. 17 Prozent des verbrauchten Stroms aus Speichern kommt. Davon werden ca. 85 Prozent aus Batterie-Speichern stammen und 15 Prozent überwiegend aus Pumpspeichern in Skandinavien. Da der Stromaustausch mit diesen Stromspeichern von Norddeutschland aus erfolgt, rechnen wir ihn hier nicht mit. In NRW kommen zusätzlich zu den Batterien lediglich die heimischen Pumpspeicher und in kleinem Umfang andere Speichertechnologien zum Einsatz. Wir rechnen daher mit 38 TWh/a, die aus Batteriespeichern[229] kommen und 1 TWh/a aus anderen Stromspeichern.

Tages- und Wochenspeicher

Für Schwankungen des Angebots oder der Nachfrage, die über die Kapazität der Batterien hinausgehen und bis zu mehreren Tagen andauern, reicht die Kapazität der teuren Batterien nicht aus. Schwankungen entstehen z.B. durch mittägliche Stromspitzen in der PV-Stromerzeugung, die variierende Nachfrage im Tages- und Wochenverlauf sowie durch ein- bis mehrtägige Dunkelflauten, also Zeiten fast ohne Wind und Sonne. Diese

[227] Herstellerfirmen müssen verpflichtet werden, 10% der Batterien für den normalen Verbrauch zu blockieren, damit diese gesichert zur Verfügung stehen. Siehe IEK (2019/1)

[228] Siehe LUT (2019/1)

[229] Wir rechnen mit einem Wirkungsgrad von Batteriespeichern von 90%. In Anlehnung an LUT (2019/1) rechnen wir mit einer insgesamt installierten Leistung der Batteriespeicher von 122.000 MW. Derzeit sind in NRW erst 45 MW an Batteriespeichern installiert (siehe Bundesnetzagentur (2021/1). Dabei sind jedoch die Batterien der E-Autos nicht mitgerechnet.

mittleren Schwankungen können regional mit Druckluftspeichern, Wasserspeichern oder anderen neuartigen Speichertechnologien[230] ausgeglichen werden.

In den Bereichen GHD und Industrie dienen die Speicher auch dazu, eine kostengünstige und konstante Energieversorgung für die Produktion zu gewährleisten. So können beispielsweise in Stahlspeichern Stromspitzen aus Wind- und Photovoltaik-Anlagen schnell aufgenommen und gleichmäßig über den Tag Wärme und Strom bereitgestellt werden. Besonders für die Wasserstoffwirtschaft ist dies insofern relevant, als Elektrolyseure eine relativ konstante Versorgung mit Energie benötigen.

In Deutschland gibt es nur wenige Stauseen, die als Wasserspeicher geeignet sind. Das LANUV hat für NRW eine Potenzialstudie zu Pumpspeicherkraftwerken durchgeführt.[231] Theoretisch bestehen an 23 Standorten gute Bedingungen für den Bau neuer Anlagen, sodass die heute bestehende Speicherleistung von 300 MW auf 9,4 GW mit einer speicherbar1en Energiemenge von 55,7 GWh erweitert werden könnte. Allerdings ist auch bei guten Marktbedingungen die Realisierung dieser Potenziale sehr unwahrscheinlich. Hinzu kommt eine erwartete Dauer von der Planung bis zur Inbetriebnahme von 10 Jahren. Auch wenn einige der Potenziale realisiert werden, wird die Strommenge, die in NRW in Pumpspeichern gespeichert und wieder freigesetzt wird, gering bleiben.

In Europa gibt es jedoch riesige Speicherkapazitäten – die Stauseen in den Gebirgen, v.a. in den Alpen und in Skandinavien. Insgesamt haben die Wasserspeicher Europas eine Kapazität von 250 TWh/a, sodass sie zur Not selbst Engpässe in mehreren Staaten über mehrere Wochen überbrücken können. Dies wird allerdings begrenzt sein durch den Ausbau der HGÜ-Leitungen, da es sich nicht lohnt, Leitungen zu bauen, die nur wenige Tage im Jahr benutzt werden.

Im zukünftigen Energiesystem Europas macht es Sinn, die Betriebsweise der Stauseen umzustellen. Heute sind sie vorwiegend auf Dauerbetrieb ausgerichtet: Sie werden im Winter mit Wasser gefüllt und geben den Strom im Jahresverlauf gleichmäßig ab. Künftig

---

[230] Siehe LUT (2019/1), BDI (2018/1) u.a. LUT (2019/1) rechnet mit Druckluftspeichern für ca. 50 TWh in Deutschland. Es gibt auch kleine und mittlere Druckwasserspeicher bis zu einer Kapazität von 400 MWh, die sich als Zwischenspeicher für Stadtwerke und Industriebetriebe eignen. Sie arbeiten wie Wasserspeicherkraftwerke, wobei die Fallhöhe des Wassers mit Druck erzeugt wird. Siehe Maier (2019/1)

[231] Siehe LANUV (2016/1)

können die Stauseen immer dann Strom produzieren, wenn Sonne und Wind schwächeln. Dazu müssen aber mehr Turbinen installiert werden, um kurzfristig höhere Leistungen erbringen zu können. Um die Speicherleistung zu steigern, kann ein Teil der Wasserkraftwerke mit Speicherseen, die in einen Untersee ablaufen, mit Pumpen ausgestattet werden. Dann kann mit überschüssigem Strom Wasser wieder hochgepumpt werden, sodass die Seen unabhängig vom Zulauf wieder aufgefüllt werden können. Auf diese Weise kann die Jahresproduktion der Wasserkraftwerke vervielfacht werden.

Der Vorteil der Wasserspeicher: Sie sind sehr kostengünstig, denn die Stauseen existieren bereits. Die zusätzlich erforderlichen Turbinen und Pumpen sind relativ günstig. Das teuerste sind die Staudämme, die aber in ausreichender Zahl bereits existieren und nicht neu errichtet werden müssen. Der Wirkungsgrad der Wasserspeicher liegt sogar einschließlich des Hochpumpens bei über 80 Prozent.

Maßnahmen zu Stromspeichern

- Für E-Autos muss gesetzlich vorgeschrieben werden, dass zehn Prozent der Batteriekapazität über intelligente Ladeinfrastruktur als Speicher zur Netzstabilisierung genutzt werden kann.
- Der Energiemarkt muss so umgestaltet werden, dass alle notwendigen Speichertechnologien im erforderlichen Umfang wirtschaftlich betrieben werden können, so müssen u.a. Doppelbelastungen mit Abgaben und Umlagen für Energiespeicher abgeschafft werden.
- Stromspeicher und Reservekraftwerke müssen Teil der Netzinfrastruktur werden und entsprechend geplant werden.
- Die Anbindung und Nutzung von Speicherkapazitäten in Skandinavien muss vertraglich geregelt werden. Das betrifft NRW indirekt auch, um die Versorgungsicherheit zu gewährleisten.

Langzeitspeicher

Die dritte Speicherform sind Langzeitspeicher. Hier geht es einerseits um die Lastverteilung zwischen Sommer und Winter für die Wärmepumpen, zum anderen um die Sicherung der Stromversorgung während einer längeren kalten Dunkelflaute (kein Wind und keine Sonne im Winter, aber hoher Strombedarf für Wärmepumpen und

Beleuchtung). Aus den Aufzeichnungen der Wetterdienste weiß man, dass die maximale Dunkelflaute für Deutschland ein Speichervolumen erfordert, das eine Versorgung aus Speichern über zwei Wochen ermöglicht. Dazu müssen die deutschen Speicher möglichst im Herbst mit Gas zur Erzeugung von 50 bis 110 TWh/a Strom gefüllt sein.[232] Für NRW wird etwa Gas zur Erzeugung von 10 bis 22,5 TWh/a Strom benötigt.

Für Langzeitspeicher ist typisch, dass sie sehr groß und kostengünstig sein müssen. Ihr Nachteil: sie haben einen geringen Wirkungsgrad. Deshalb werden sie nur wenige Male im Jahr genutzt. Geeignete Speicher sind die Gaskavernen, in denen erneuerbares Methan, Wasserstoff oder ein Gemisch aus diesen Gasen gespeichert werden kann. Die Gase werden durch Elektrolyse bei Stromüberschuss, vor allem im Sommer und an starken Windtagen, produziert und gespeichert.

Künftig wird im Sommer regelmäßig mehr Strom produziert, als benötigt wird. Dafür werden besonders die Photovoltaikanlagen sorgen. Wird dieses Angebot durch die Kurzzeit- und Wochenspeicher geglättet, können damit kontinuierlich und wirtschaftlich Elektrolyseanlagen betrieben werden, in denen Wasserstoff produziert wird. Dieser kann dann entweder direkt gespeichert werden, oder aus dem Wasserstoff wird erneuerbares Methan produziert.

Diese Gase können in den bestehenden Gaskavernen gespeichert werden, in denen heute die Erdgasvorräte lagern. Es wird davon ausgegangen, dass die meisten davon wasserstofftauglich sind.[233] Weniger als 20 Prozent der heutigen 51 Gaskavernen reichen aus, um die Versorgung während einer maximalen Dunkelflaute zu gewährleisten[234] und um zusätzlich während einer längeren Kälteperiode den Strom für

---

[232] Siehe Huneke (2017/1), Czisch (2005/1), EREC (2009/1), Gerhardt (2017/1). Huneke u.a. identifizierten die maximale Dunkelflaute der letzten Jahre für den 22.1 bis 7.2.2006 und projizierten diese auf die fiktive Stromversorgung im Jahre 2040 mit 100% Erneuerbarer Energie. Die Gesamtkosten für die Langzeitspeicher mit Elektrolyseuren machen 2% der Stromkosten aus. Die Stromkosten liegen unter 6 Cent/kWh, also erheblich niedriger als heute. IEK (2019/1) berechnet den Strombedarf für die maximale Dunkelflaute höher, auf 65 TWh, dazu noch 45 TWh für die Sommer-Winter-Verlagerung. In ähnlichen Dimensionen wie Huneke bewegt sich die Wasserstoffstudie, die eine notwendige Kapazität für H_2-Speicher von 40-60 TWh annimmt.

[233] MWIDE (2020/4)

[234] Siehe Wikipedia (2019/1): Die 51 Erdgasspeicher in Deutschland haben ein Volumen von 24,6 Mrd. m^2. Das entspricht ca. 28% des heutigen Jahresverbrauchs.

die Wärmepumpen sicherzustellen.[235] In Nordrhein-Westfalen befinden sich Speicherkapazitäten in einem Umfang von knapp 39 TWh/a, hauptsächlich Kavernenspeicher im Bereich Gronau/Epe.[236] Dies ist also doppelt so viel, wie an Gasspeichern benötigt wird.

Die Gaskavernen sind die billigste Art von Speichern. Allerdings fallen hohe Kosten für die Erstellung des Gases in Elektrolyseuren und für die Notstromaggregate an, um aus dem Gas wieder Strom zu produzieren.[237]

Reservekraftwerke

Für den Fall der kalten Dunkelflaute und sonstiger Versorgungsengpässe müssen Reservekraftwerke vorgehalten werden. Wir rechnen damit, dass dazu preisgünstige Gasturbinen mit einem Wirkungsgrad von nur 30 Prozent zum Einsatz kommen. Effizientere Gasturbinen oder gar Brennstoffzellen haben zwar einen höheren Wirkungsgrad. Sie sind aber auch erheblich teurer, sodass sich ihr Einsatz nicht lohnt, wenn sie nur wenige Male im Jahr benötigt werden. Einen Sonderfall bilden KWK-Anlagen, die als Ersatzinvestitionen für die Fernwärmeversorgung teilweise notwendig sein werden. Sie können teilweise die Funktion von Reservekraftwerken übernehmen, sofern durch Wärmespeicher ihre Fahrweise vom Wärmebedarf entkoppelt werden kann.

Auf Grundlage der Studien muss damit gerechnet werden, dass die Kapazität der heutigen Gaskraftwerke für Deutschland auf ca. 80 GW mehr als verdoppelt werden muss.[238] Für NRW ergibt sich rechnerisch ein Bedarf von ca. 20 GW.[239] Zurzeit sind 8,4 GW Erdgaskraftwerke installiert[240]. Aufgrund des Vorhandenseins von Salzkavernen und der eventuell durch die Industrie in NRW stattfindende Erzeugung von PtG und PtL

---

[235] Siehe z.B. LUT (2019/1). Das finnische LUT-Institut hat berechnet, dass für Deutschland künftig Gasspeicher in der Größenordnung von ca. 40 TWh ausreichen, aus denen pro Jahr 90 TWh Gas entnommen wird. Im Gegensatz zu den Batteriespeichern, die täglich genutzt werden, haben diese Speicher dann einen Ladezyklus von »zwei« im Jahr.

[236] Siehe MWIDE (2020/4), INES (2019/1)

[237] Siehe Huneke (2017/1)

[238] Siehe Anlage 19

[239] Wenn man NRWs Anteil am Energiebedarf Deutschlands berechnet (ca. 20%) und den Bedarf an Notstromkraftwerken als proportional annimmt.

[240] Siehe Bundesnetzagentur (2021/1)

könnte NRW aber auch als „Backup“ für Norddeutschland und Baden-Württemberg dienen und im Fall der Dunkelflaute Strom nach Norddeutschland und Baden-Württemberg exportieren. Die Stromleitungen dazu müssen sowieso gebaut werden. Dann müsste allerdings ein noch stärkerer Zubau von Reservekraftwerken erfolgen. Natürlich geht es auch umgekehrt, dass NRW im Bedarfsfall zum Teil aus Notstromaggregaten in Norddeutschland oder Baden-Württemberg versorgt wird.

Neue Gaskraftwerke sollten modular in mehreren Blöcken aufgebaut sein, um eine maximale Flexibilität zu gewährleisten. Diese können dann auch Gemische aus synthetischem Methan (oder vorübergehend bis 2035 auch noch Erdgas) und Wasserstoff verstromen.

Der Bau dieser Notstromaggregate ist nicht dringlich. Er kann schrittweise auch noch nach 2040 erfolgen. Solange bleiben alte Gas- oder notfalls auch Kohlekraftwerke in Reserve – bei den seltenen Einsatzfällen von wenigen Stunden spielen die Emissionen in der Übergangszeit kaum eine Rolle.

Gaskavernen als Langzeitspeicher haben den großen Vorteil, dass sie relativ kostengünstig sind und sehr große Mengen speichern können. Allerdings liegt der Wirkungsgrad der Umwandlungskette »Strom → Wasserstoff → Methan → Strom« je nach Wirkungsgrad des Gaskraftwerkes zwischen 20 und 40 Prozent, sodass die Speicher nur dann vorteilhaft sind, wenn sie selten genutzt werden. Die Gas-Notstromaggregate werden also nur dann in Betrieb genommen, wenn die Batteriespeicher und Druckluftspeicher erschöpft sind und die Leistung der Regelkraftwerke plus die Leistung der HGÜ-Leitungen zu den Wasserkraftwerken in Skandinavien oder den Alpen nicht ausreicht, um den Strombedarf zu decken.

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

KWK-Anlagen produzieren sowohl Strom als auch Wärme – überwiegend für die Versorgung der Nah- und Fernwärmenetze (siehe dazu auch im Kapitel »Hauswärme«). Sie werden künftig grundsätzlich modular in vielen parallelen Einheiten (Blockheizkraftwerke – BHKW) gebaut, damit sie dem Bedarf kurzfristig angepasst können. Sie sind daher flexibel und laufen vor allem im Winter – je nach Bedarf. Während die Reservekraftwerke nur sehr selten zum Einsatz kommen, sind BHWK im Winter im ständigen Betrieb.

Grundsätzlich ist es sinnvoll, bei der Produktion von Wärme stets auch Strom zu produzieren, da so ein höherer Wirkungsgrad erreicht wird. BHKW und andere Erzeugungsanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung können sowohl mit Müll, Biomasse, E-Methan wie auch mit Wasserstoff betrieben werden (siehe »Energieflussdiagramm«). Wir rechnen mit einem Gesamtwirkungsgrad von 85 Prozent. Circa 60 Prozent der Energieerzeugung entfällt auf Wärme, 40 Prozent auf Stromerzeugung.

Gasnetze

In NRW wurden 2017 etwa 230 TWh Erdgas für die Energieversorgung in den Erdgasheizungen von Gebäuden und für die Industrie (einschließlich ca. 5 Prozent als Rohstoff) verbraucht.[241] Auf diese Mengen ist das heutige Erdgasnetz ausgerichtet. Nach der kompletten Umstellung der Heizungen auf Wärmepumpen und der teilweisen Umstellung auf Fern- oder Nahwärme wird das Verteilnetz in die Wohnviertel und Haushalte für Erdgas nicht mehr benötigt werden. Einen Gasanschluss brauchen künftig nur noch:

- Blockheizkraftwerke für die Nah- und Fernwärmeversorgung
- Industriebetriebe insbesondere der Eisen-, Stahl und Zementindustrie, in denen auf Kohle basierende Prozesse durch Prozesse mit Wasserstoff oder E-Methan ersetzt werden
- Betriebe der Chemieindustrie, in denen Wasserstoff oder E-Methan als Rohstoff eingesetzt wird
- die Gasspeicher

Allerdings besteht zukünftig ein zunehmender Bedarf an Wasserstoff-Transportnetzen. In NRW besteht schon ein Netz von 200 km Länge. Nun plant die Landesregierung den Bau eines Wasserstoff-Netzes über 1.500 km.[242] Wenn zukünftig Gasnetze für den Erdgastransport nicht mehr benötigt werden, können sie so umgerüstet werden, dass sie auch Wasserstoff transportieren können. Für NRW ist dies möglicherweise sinnvoll

[241] Siehe LANUV (2020/4). Für Deutschland insgesamt wurden ca. 900 TWh gebraucht, davon 41% Industrie (Energie) + 3% als Rohstoffe. Siehe BMWi (2018/1), BMWi (2020/1), UBA (2019/8), BDEW (2019/3). In NRW liegt der Anteil der Industrie bei 47% etwas höher.

[242] Siehe WN (2021/1)

für die Wasserstoffimporte aus Norddeutschland. Zurzeit ist in den Erdgasleitungen eine Beimischung von 10 Prozent Wasserstoff unproblematisch. In den neuen Bundesländern sind teilweise auch 50 Prozent möglich, da das Stadtgas, für das sie früher benutzt wurden, hohe Wasserstoffanteile hatte.[243]

Für eine Übertragung von ca. 130 TWh/a Wasserstoff rechnet die Wasserstoffstudie mit einem Bedarf von 52 GW Wasserstoffleitungen zwischen Norddeutschland und NRW. Da der Transfer von Nord- nach Süddeutschland ebenfalls über NRW verläuft, sind zusätzlich 82 GW an Leitungen von NRW nach Süden nötig. Wir rechnen aber nur mit einem verhältnismäßig kleineren Importbedarf aus Norddeutschland von 30 TWh/a. Entsprechend müssen die Leitungen kleiner und ca. 12 GW sollten ausreichend sein. Hinzu kommt der Importbedarf aus dem Ausland. Je nachdem woher der Wasserstoff bezogen wird, können die Rohre entweder in Richtung der Niederlande führen oder es wird stärker in Richtung Norddeutschland ausgebaut.

Maßnahmen für die Entwicklung des Methan- und Wasserstoffnetzes

- Für die Anwendungen, die reinen Wasserstoff benötigen, ist es notwendig das heute nur lokal vorhandene Netz auszubauen.
- Der künftige Bedarf an Methan und Wasserstoff wird nur noch ein Bruchteil des heutigen Bedarfs an Erdgas ausmachen. Künftig können nicht mehr benötigte Erdgasleitungen für grünes Methan oder Wasserstoff genutzt werden. Für Wasserstoff müssen u.a. die Dichtungen an den Kupplungsstellen ausgetauscht werden. Die Rohrleitungen sind grundsätzlich auch für Wasserstoff geeignet.
- In der Übergangszeit kann dem Erdgas ein zunehmender Anteil an grünem Wasserstoff beigemischt werden.
- Es muss sichergestellt werden, dass Investitionen in neue Netze „Wasserstoff-ready“ sind, also die zukünftige Nutzung mit Wasserstoff ermöglichen.

[243] Siehe Stratmann (2020/1)

Müllverbrennung

Die Verbrennung von nicht-biogenem Müll verursacht in Deutschland etwa 2 Prozent der Emissionen (Stand 2017).[244] Die Müllverbrennung kann erst dann klimaneutral werden, wenn das zu verbrennende Material unter Einsatz von nachwachsenden oder synthetischen Rohstoffen hergestellt wird (siehe im Kapitel »Industrie«). Damit die Verbrennung bis dahin möglichst klimaschonend geschieht, sollte CCU [245] eingesetzt werden. Der Kohlenstoff kann z.B. in der Herstellung von PtL oder PtG oder in anderen Industriezweigen eingesetzt werden. In der Wasserstoff-Roadmap[246] wird darauf hingewiesen, dass die unflexible Stromerzeugung von Müllverbrennungsanlagen gut für den Betrieb von Elektrolyseuren geeignet ist. Der auf diese Weise erzeugte Wasserstoff ist im strengen Sinne nicht „grün". Das Verfahren kann aber den Markthochlauf der Wasserstoffwirtschaft beschleunigen. Auch sollte die entstehende Abwärme optimal genutzt werden, etwa in der Fernwärmeerzeugung.

Wie viel Müll zukünftig zur Energieerzeugung zur Verfügung steht, ist schwer abschätzbar. Wir orientieren uns an den Zahlen des Umweltbundesamtes[247] und gehen davon aus, dass die anfallende Menge von Müll zurückgehen wird, gleichzeitig aber alle Potenziale ausgeschöpft werden. Wir rechnen daher mit 30 TWh/a für Deutschland und 6 TWh/a für NRW.

Maßnahmen für die Vermeidung von Emissionen aus der Müllverbrennung

- Es sollte so viel Müll wie möglich vermieden oder aufbereitet werden (Siehe im Kapitel 2.3 »Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft«).
- Plastikmüll-Exportverbot, auch in andere EU-Länder.
- Es gibt in Deutschland bereits ein Verbot, giftigen Müll zu exportieren. Die Praxis ist allerdings, dass Müll durch geringe Sortierung seine Abfalleigenschaft verliert und als handelbarer Wertstoff definiert wird. Dies muss unterbunden

[244] Für NRW liegen keine eindeutigen Zahlen vor

[245] CCU (Carbon Capture und Utilization) bezeichnet die Technik, wenn bei Verbrennungsvorgängen Kohlenstoff aus den Abgasen herausgefiltert und als Rohstoff weiterverwendet wird. Zwar wird die Verbrennung dadurch nicht klimaneutral, aber immerhin wird der Kohlenstoff doppelt verwendet.

[246] Siehe MWIDE (2020/4)

[247] Siehe UBA (2018/4)

werden, da andere Länder mit geringeren Standards für Umwelt- und Gesundheitsschutz nicht die Müllkippe Deutschlands sein dürfen.

- Der Einsatz von CCU und Elektrolyseuren in der Abfallverbrennung sollte geprüft und bei positiver Bewertung umgesetzt werden.
- Die Nutzung von Abwärme muss optimiert werden.

Sektor 2 Industrie

In diesem Kapitel geht es um die Emissionen der Industrie, die in den Betrieben selbst erzeugt werden. Es geht nicht um kleine und mittlere Betriebe, Geschäfte oder Dienstleistungen und auch nicht um den Teil des Energieverbrauchs, der von der Industrie aus öffentlichen Netzen bezogen wird. Im Zentrum steht die Grundstoffindustrie, auf die 84 Prozent der Emissionen der Industrie anfallen.

Überblick

Hauptverursacherin von Treibhausgas (THG)-Emissionen in der Industrie ist die Energieerzeugung in Industrieanlagen und Industriekraftwerken mit fossilen Energiequellen. Diese kann durch Energie aus erneuerbaren Quellen ersetzt werden. Andere Emissionen entstehen aus den Industrieprozessen selbst und lassen sich nicht durch die Umstellung auf erneuerbaren Strom einsparen.

Die größten Aufgaben im Industriesektor sind der Umbau der Stahlindustrie und der Grundstoffchemie. Hier müssen für das Einsparen von Klimagasen grundlegende Prozesse umgestellt werden, die hohe Investitionen notwendig machen. Dafür müssen der Bund beziehungsweise die EU die nötigen Rahmenbedingungen schaffen.

Ein Sonderfall stellt die Baustoffindustrie dar. Baustoffe wie Zement können nach heutigem Kenntnisstand nicht treibhausgasneutral produziert werden. Sie können nur eingespart, treibhausgassparend produziert, durch Alternativen ersetzt oder kompensiert werden (siehe auch im Kapitel »Landwirtschaft, Ernährung, Bodennutzung und Kompensation« im Abschnitt »Kompensationen«).

Die restlichen Industrien können durch Elektrifizierung oder Umstellung auf andere Produkte bzw. Materialien treibhausgasneutral werden.

Ausgangslage

Nordrhein-Westfalen ist das Kernland der deutschen Industrie. Hier konzentrieren sich insbesondere die Grundstoffindustrien, auf die in NRW 84 Prozent der THG-Emissionen der Industrie entfallen. Damit ist der Industriesektor in NRW mit 25 Prozent der

Emissionen die zweitgrößte Treibhausgasquelle. Davon entfallen ca. neun Prozent der Emissionen auf die Metall-Industrie, ca. sechs Prozent auf die Chemische Industrie, ca. vier Prozent auf die Herstellung von Zement, Glas und anderen Baustoffen und drei Prozent auf die Raffinerien. Die restlichen drei Prozent der Treibhausgase verteilen sich auf ganz unterschiedliche Bereiche wie die Papier-, die Nahrungsmittelindustrie, die Kältemittel für die Kühlhäuser und Kühlschränke, Narkosemittel für die Krankenhäuser und viele andere Produktionszweige.

Tabelle 7: Treibhausgasquellen der Industrie[248]

Anteil an THG-Emissionen (ohne Rohstoffimporte)	**Deutschland**	**NRW**	**Anteil NRW an D**
Metallherstellung (Stahl u. a.) [249]	7 %	9 %	36 %
Chemische Industrie	8 %	6 %	22 %
Baustoffe und Glas	4 %	4 %	34 %
Raffinerien	2 %	3 %	38 %
Sonstige	2 %	3 %	34 %
Industrie gesamt	**24 %**	**25 %**	**31 %**

Etwa zwei Drittel der Emissionen der Industrie sind energiebedingt. Das heißt sie entstehen, wenn fossile Energieträger wie Kohle und Gas verbrannt werden, um Strom oder Wärme – häufig auch Hochtemperaturwärme für Produktionsprozesse – zu erzeugen. Diese Emissionen können auf null reduziert werden, indem die Wärme- und Stromherstellung auf Strom und erneuerbare Brennstoffe umgestellt wird.

Das restliche Drittel der Emissionen sind sogenannte Prozessemissionen. Dabei entstehen Treibhausgase durch chemische Reaktionen während der Produktion. Hier

[248] Siehe Anlage 1

[249] Der Strom für die Aluminiumproduktion stammt aus dem öffentlichen Netz. Deshalb sind die Emissionen (3 % von NRW) nicht hier, sondern im Sektor »Stromversorgung« enthalten.

können teilweise die Produktionsverfahren geändert werden. In einigen Bereichen ist das nicht möglich. Dann kann nur versucht werden, weniger Material zu verbrauchen oder das Produkt durch andere Produkte zu ersetzen.

Zu den Rohstoffen

Die Emissionen der Förderung der Rohstoffe für die Metallindustrie fallen heute fast ausschließlich im Ausland an und werden daher in den deutschen Statistiken nicht ausgewiesen. In Zukunft werden Metalle überwiegend recycelt und damit die daraus entstehenden Rohstoffe in der Statistik von NRW in dieser Studie berücksichtigt. Dies gilt aber nicht für den erheblichen Teil der Produkte, die in den Export gehen.

Die Emissionen bei der Förderung und dem Transport der fossilen Rohstoffe für die Chemieindustrie und Raffinerien fallen ebenfalls fast ausschließlich im Ausland an und werden dort ausgewiesen. Der größte Teil der Emissionen wird jedoch erst freigesetzt, wenn sie in Deutschland entsorgt bzw. verbrannt werden. Nicht enthalten sind darin natürlich die Emissionen, die bei Nutzung oder der Entsorgung von Produkten entstehen, die aus Deutschland exportiert werden. Kunststoffe, die auf einem nicht offiziellen Weg weder über die graue Tonne noch über den gelben Sack oder über eine andere Kunststoffsammlung entsorgt werden – insbesondere diffuse Stofffreisetzungen wie Mikroplastik – tauchen in der Treibhausgasstatistik des Umweltbundesamtes nicht auf. In einer THG-neutralen Chemieproduktion müssen künftig auch die Rohstoffe THG-neutral produziert bzw. entsorgt werden und werden daher in unserer Studie mitberücksichtigt (siehe »Energieflussdiagramm«).

Die quantitativ größte Rohstoffmenge wird von der Baustoff- und Bauindustrie benötigt. Sie stammen fast ausschließlich aus heimischen Quellen in NRW und werden daher berücksichtigt.

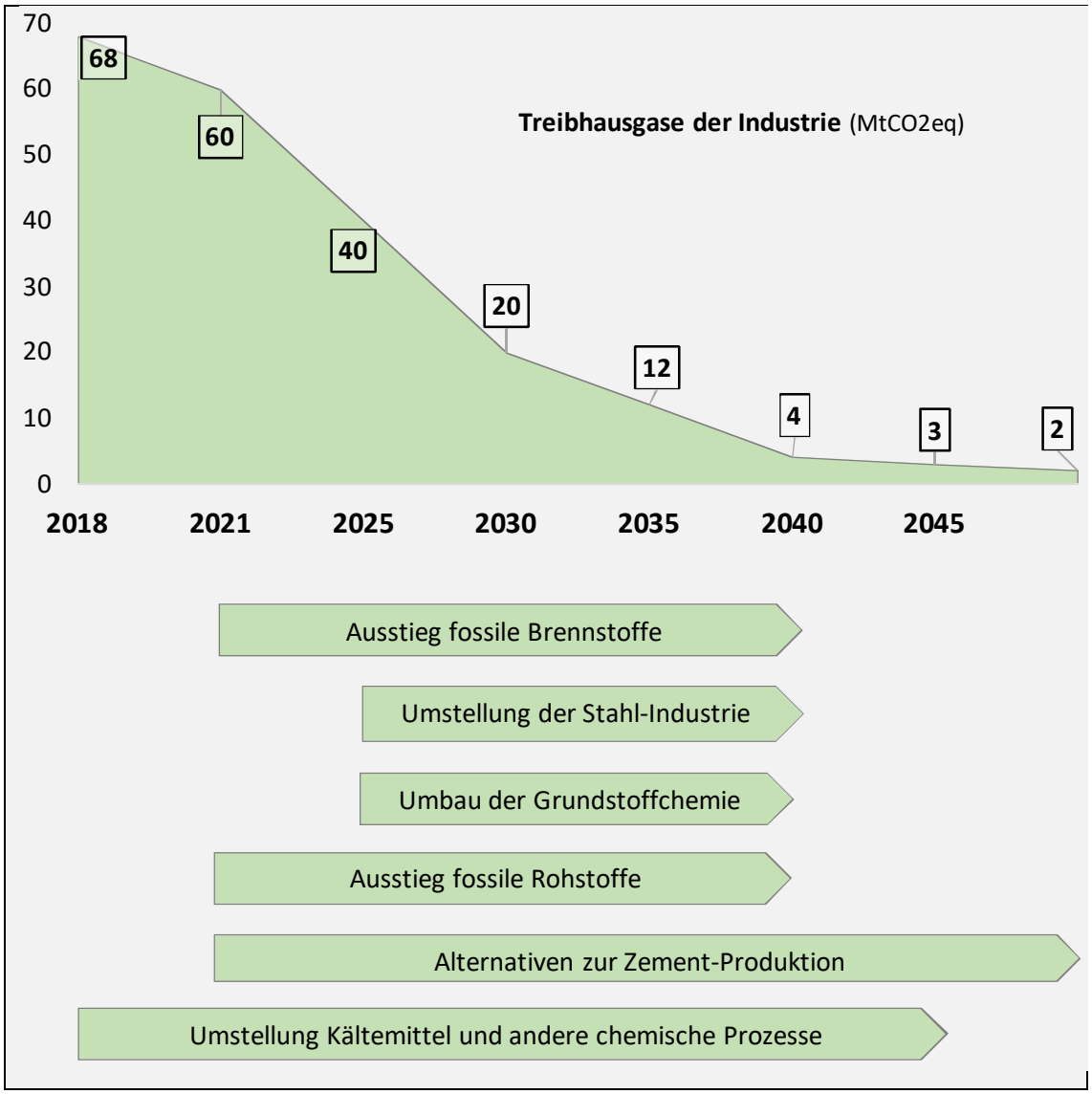
Das Ziel

In Grafik 11 wird dargestellt, wie sich die Treibhausgase auf Basis der Studien entwickeln können.[250] Darunter werden die wichtigsten Maßnahmen genannt, die in diesem Kapitel im Folgenden behandelt werden. Die Reduzierung von Treibhausgasen in der Industrie

[250] Siehe Anlage 3

erfolgt bis 2030 fast ausschließlich durch die Umstellung der industrieeigenen Kraftwerke auf Wind- und Sonnenenergie sowie durch den Ersatz von besonders treibhauswirksamen Gasen wie Lachgas als Narkosemittel und von fluorhaltigen Kühlmitteln durch klimafreundliche Alternativen. Erst danach wirkt sich der Umbau der Grundstoffindustrien in Richtung Kreislaufwirtschaft und dem Ersatz von fossilen Rohstoffen positiv auf die Treibhausgasemissionen aus, der aufgrund der erforderlichen Vorlaufzeiten erst 2025 beginnen kann. Dies betrifft hauptsächlich die Stahlindustrie, die Grundstoffchemie und die Zementherstellung. Eine Herausforderung sind dabei die hohen Kosten der Umstellung. Darauf wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

Grafik 11: Zeitplan und Maßnahmen im Sektor Industrie



Insgesamt rechnen wir nach Auswertung der vorliegenden Studien damit, dass die Emissionen des Industriesektors von 68 $MtCO_{2eq}$ im Jahre 2018 auf etwa vier $MtCO_{2eq}$/a (also sechs Prozent der heutigen Emissionen) im Jahre 2040 reduziert werden können. Die Restemissionen werden nach Umstellung aller Industriezweige hauptsächlich durch die Zementherstellung verursacht.

Energiebedarf der Industrie[251]

Die Industrie benötigt zum einen klassischen Industriestrom, zum anderen große Mengen Wärme – und zwar sowohl Hochtemperaturwärme für die Stahlproduktion, für die Brennöfen in der Baustoffindustrie sowie Wärme in unterschiedlichen Temperaturen in der Chemieindustrie und anderen Industrien. Wo möglich wird die Wärme in Kaskaden genutzt. So kann die Abwärme aus Hochtemperaturanlagen als Mitteltemperaturwärme genutzt werden. Niedertemperaturabwärme kann auch zur Heizung in Fernwärmenetzen eingesetzt werden.

Heute liegt der Endenergiebedarf der Industrie in Deutschland bei 740 TWh/a ohne die Energie, die zur Gewinnung der importierten Rohstoffe erforderlich ist. Den anteiligen Energiebedarf von NRW schätzen wir auf 30 Prozent davon – entsprechend dem Anteil von NRW an den entsprechenden CO_2-Emissionen. Damit ergibt sich ein Endenergiebedarf von ca. 250 TWh/a. Der Bedarf an »klassischem« Industriestrom liegt bundesweit derzeit bei 232 TWh/a.[252] Rechnet man für NRW auch hier einen Anteil von 30 Prozent und eine Einsparung von 20 Prozent, dann ergibt sich künftig ein klassischer Strombedarf von 55 TWh/a.[253]

Für die zukünftige, klimaneutrale Stahlherstellung liegen die Schätzungen der Institute weit auseinander. [254] Das hängt auch von der künftigen Recyclingquote ab. Wir rechnen vorsichtig damit, dass sich der Strombedarf durch die Elektrifizierung der Stahlindustrie auf 100 TWh/a fast verdoppeln wird und dass künftig Wasserstoff mit einem

[251] Siehe Anlage 21

[252] Siehe UBA (2018/1)

[253] Das ist eine Überschlagsrechnung, die wir analog zu den Zahlen im Handbuch erstellt haben, da wir keine Zahlen für NRW gefunden haben.

[254] Siehe BDI (2018/1), IEK (2019/1), UBA (2019/3, MD (2020/2) - dort Anlage 35

Energiegehalt von ca. 70 TWh/a benötigt wird, davon allein die Hälfte für die Direktreduktion von Eisenerz.

Für die Chemieindustrie ergeben sich grundlegende Veränderungen, da die fossilen Rohstoffe wegfallen und durch synthetische Rohstoffe oder Biomasse ersetzt werden müssen. Für die gesamte Industrie in Deutschland liegen die Schätzungen an erforderlicher Primärenergie aus Sonne und Wind, um die fossilen Rohstoffe durch synthetische Rohstoffe zu ersetzen, bei bis zu 400 TWh/a.[255] Wenn es jedoch gelingt, die Recyclingquote für Kunststoffe durch Pyrolyse und Gasifikation von gemischten Kunststoffen (chemisches Recycling) sowie systematische Pfandsysteme (mechanisches Recycling) deutlich zu erhöhen, dann kann der Primärenergiebedarf halbiert werden[256] (siehe unten im Abschnitt »Weg 2: Kunststoffrecycling«).

Insgesamt rechnen wir daher für NRW in der Industrie mit einem Bedarf an Endenergie von 220 TWh/a[257] und einem Primärenergiebedarf von ca. 300 TWh/a, wobei der Strom zur Erzeugung von ca. 30 TWh/a PtL nicht in NRW anfällt, da das PtL importiert wird. Allerdings gehen die Annahmen für den künftigen Energiebedarf erheblich auseinander. Prof. Deerberg vom Fraunhofer UMSICHT in Oberhausen schätzt den Energiebedarf sogar um rund ein Viertel höher ein. Dieser könnte gedeckt werden, indem NRW mehr PtL-Stoffe oder auch Strom importiert.

Digitalisierung

Die Digitalisierung der Industrie, die oft unter dem Begriff „Industrie 4.0“ diskutiert wird, ist wesentlicher Bestandteil der Transformation. Sie hat folgende Effekte (siehe dazu im Kapitel 2.3 »Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft«, im Kapitel 2.5 »Zur Rolle der Digitalisierung« und im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« im Abschnitt »Lastmanagement und Smart Grid« sowie die folgende Darstellung der künftigen Entwicklung in den Grundstoffindustrien):

- eine effizientere Nutzung – also Einsparung – der benötigten Energie;

[255] Siehe BDI (2018/1)

[256] Es entfällt die Primärenergie, die zur Herstellung der Rohstoffe erforderlich ist. Die benötigte Energie im Produktionsverfahren kann sogar anwachsen. Siehe Wuppertal (2020/1)

[257] Siehe Anlage 21

- einen wichtigen Beitrag der Industrie für ein optimiertes Lastmanagement in den öffentlichen Netzen;
- eine effizientere – und damit sparsamere – Nutzung der Rohstoffe;
- ein effizienteres Stoffrecycling.

Das strategische Dilemma der Grundstoffindustrien und weitere Probleme der Umstellung

Die größten deutschen Chemiefirmen BASF, Bayer, Covestro, Lanxess und Wacker, die Stahlerzeuger Salzgitter und Thyssenkrupp und der größte deutsche Baustoffkonzern HeidelbergCement haben erst kürzlich in einer gemeinsamen Erklärung mit der Denkfabrik Agora Energiewende von der Politik zügiges Handeln eingefordert.[258] Sie sprechen von einem strategischen Dilemma der Grundstoffindustrien. Dabei geht es um folgendes Problem:

Der Löwenanteil der Industrieemissionen wird durch die drei Grundstoffindustrien Eisen und Stahl, Grundstoffchemie und Baustoffe verursacht. Diese Industrien haben bereits Pläne erarbeitet, wie sie ihre THG-Emissionen vermeiden bzw. deutlich reduzieren können.[259] Dies erfordert allerdings erhebliche Investitionen, die sich beim gegenwärtigen CO_2-Preis meist noch nicht lohnen (siehe im Kapitel 2.6 »Treibhausgaspreise«). Die Kosten für die erforderlichen Investitionen werden für ganz Deutschland auf bis zu 200 Milliarden Euro geschätzt.[260] Einen Teil davon kann die Industrie alleine tragen und sogar auf die Preise umlegen, insbesondere wenn die Klimapolitik international koordiniert wird.[261] So stellt die Chemieindustrie fest, dass die meisten neuen Verfahren nach 2030, teilweise auch erst 2040, wirtschaftlich marktfähig sein werden. Allerdings konzentrieren sich wesentliche Investitionen auf einige wenige Produktionsverfahren, deren Umbau die Industrie nicht selbst finanzieren kann. Deshalb wird der Umbau der Grundstoffindustrie einer der Bereiche sein, in denen der Staat die

[258] Siehe Theurer (2021/1), Agora Energiewende (2021/1)

[259] Siehe VCI (2019/1), Salcos-Salzgitter-AG (2020/1), VDZ (2020/1)

[260] Siehe MD (2020/2) in Anlage 33, BDI (2018/1) – nach aktuellen Überschlagsrechnung könnte es allerdings deutlich günstiger werden.

[261] Siehe Agora Energiewende (2019/3)

Wirtschaft mit erheblichen Mitteln bei der Umstellung unterstützen muss, um einen schnellstmöglichen Umbau zu einer klimaneutralen Industrie zu verwirklichen.

Carbon Contract for Difference

Die Abschreibungszeit von Produktionsanlagen in der Grundstoffindustrie liegt zwischen 50 bis 70 Jahren.[262] Deshalb sind Investitionen in fossile Technologien nicht mehr zukunftsträchtig, und die Industrien schieben Neuinvestitionen bereits seit mehr als einem Jahrzehnt auf. Mittlerweile ist ein erheblicher Investitionsstau entstanden. Bis 2030 müssen bereits über die Hälfte der Anlagen dringend erneuert werden. Dieser weitgehende Neubau der Grundstoffindustrie rechnet sich erst bei einem CO_2-Preis, der selbst bei den von uns in Kapitel 2.7 vorgeschlagenen Steigerungsschritten erst in den dreißiger Jahre erreicht werden wird. Zugleich werden Kredite mit sehr langen Laufzeiten erforderlich. Hier sollte der Staat unterstützen. Schweden hat bereits beschlossen, die Stahlindustrie bis 2040 auf Basis von fossilfreien Technologien umzubauen.

Daher wartet die Industrie auf Entscheidungen der Bundesregierung und der Europäischen Union. In der oben erwähnten Erklärung der Firmen heißt es: „Bereits bis 2030 stehen viele der Kernbestandteile von CO_2-intensiven Produktionsanlagen zur Erneuerung an, sodass schon 2021/22 die zentralen politischen Rahmenbedingungen für CO_2-arme Produktionsverfahren beschlossen werden müssen.“ Um das Problem zu lösen, wurde das Modell „Carbon Contract for Difference“ (CfD) entwickelt.[263] Danach schließt die Bundesregierung mit einem Konzern einen Vertrag, in dem der Staat Zuschüsse zahlt, solange der Preis für Treibhausgasemissionen zu niedrig ist. Wenn der Preis dann höher ist, zahlt der Konzern zurück. Auf diese Weise könnte sofort mit dem Umbau der Grundstoffwirtschaft begonnen werden. Daher sollte dieses Thema von der Politik zügig angepackt werden.

Carbon-Leakage-Schutz und Level Playing Field

Die verarbeitenden Industrien können in den kommenden 20 Jahren Schritt für Schritt von fossilen auf erneuerbare Energiequellen umgestellt werden. Diese Investitionen rechnen sich in den meisten Fällen bei dem vorgeschlagenen Anstieg der CO_2-Preise. Die

[262] Siehe Anlage 22

[263] Siehe Hanke (2019/1), Agora Energiewende (2019/3)

verarbeitenden Industrien sind in der Regel – anders als die Grundstoffindustrien – flexibel und gewohnt, schnell auf Veränderungen zu reagieren. Oft geht es nur darum, die Energieversorgung auf Erneuerbare Energien umzustellen. Da diese Firmen fast alle auch international tätig sind, sind sie allerdings auf gleiche Rahmenbedingungen mit dem Ausland angewiesen. Daher muss es beim Außenhandel mit Ländern, die noch keine vergleichbaren CO_2-Preise wie in der EU eingeführt haben, ähnlich wie bei der Mehrwertsteuer, einen entsprechenden Kostenausgleich für Importe und Exporte geben (Carbon Leakage Schutz). Sonst kann es zu Produktionsverlagerungen in andere Länder kommen.[264] Dies muss ein wichtiger Bestandteil der europäischen Handelspolitik werden.

Eine weitere Sorge betrifft die mittelständische Wirtschaft. Es gibt in Deutschland, auch in NRW, viele mittelständische Unternehmen, die mit technisch anspruchsvollen Produkten, insbesondere im Maschinenbau, international tätig sind. Während der Umstellung wird für einen Teil dieser Firmen zusätzlicher Forschungs- und Entwicklungsaufwand erforderlich sein, um die nötigen Umstellungen zügig durchführen zu können. Damit sie gegenüber großen Konzernen nicht ins Hintertreffen geraten (man spricht hier vom „Level Playing Field“), wird Unterstützung des Landes bei Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen erforderlich, um nicht in zeitlichen Verzug zu geraten.

Die CCU/CCS-Debatte

Die Konzepte der Grundstoffindustrien setzen durchweg darauf, einen Teil der Emissionen durch den Einsatz von CCU- und CCS-Technologien zu vermeiden. Bei CCS (Carbon Capture and Storage) wird der Einsatz von fossilen Brennstoffen und die CO_2-Erzeugung nicht vermieden. Stattdessen soll das CO_2 am Ende der Produktion aufgefangen und dann unterirdisch gelagert werden. Bei CCU (Carbon Capture and Utilization) soll das aufgefangene CO_2 in chemischen Prozessen, die Kohlenstoff benötigen, wiederverwendet werden.

[264] Da alle Staaten das Pariser Abkommen unterschrieben haben, sollte dies auch Grundlage aller Handelsabkommen sein.

Der Einsatz dieser Technologien wird aber von den meisten Wissenschaftler*innen sehr kritisch bis ablehnend gesehen und ist zudem in absehbarer Zeit unrealistisch. Zwar ist die Abscheidung des CO_2 am Ende der Produktionsprozesse heute möglich. Problematisch ist bei CCS allerdings die Entsorgung des CO_2, für die es bisher keine sicheren Lösungen gibt. CCU ist dagegen extrem teuer. Für die kommenden 20 bis 30 Jahre gibt es eine deutlich kostengünstigere und ökologisch vorteilhaftere Möglichkeit, die Restemissionen zu kompensieren: Die Neuaufforstung von Wäldern. Trotzdem wird die Forschung nach technischen Kompensationsmaßnahmen befürwortet (mehr dazu im Kapitel »Landwirtschaft, Ernährung, Bodennutzung und Kompensation« im Abschnitt »Kompensationen«).

Die Umstellung der Industrie

In den folgenden Abschnitten wird beschrieben, welche Umstellungen in den einzelnen Industriebereichen notwendig sind, um NRW möglichst zügig klimaneutral zu machen. Aufbauend auf konzeptionellen Arbeiten der vorherigen Landesregierung hat das Wirtschaftsministerium mit der Initiative IN4CLIMATE.NRW im Jahr 2019 eine gemeinsame Plattform von Industrie, Wissenschaft und Politik initiiert, um die Transformation hin zu einer klimaneutralen Industrie zu koordinieren.[265]

Industrieeigene Kraftwerke und Wärmeverbrauch

In NRW gibt es 58 industrieeigene Kraftwerke mit einer Leistung von ca. 4.700 MW.[266] Sie stellen nur neun Prozent der gesamten Kraftwerksleistung in NRW bereit. Viele wichtige Industriezweige versorgen sich aus dem öffentliche Netz, so zum Beispiel die Aluminiumherstellung. Eine eigene Energieversorgung hat traditionell die Eisen- und Stahlindustrie mit 9 Kraftwerken und einer Leistung von 2.900 MW sowie die Chemieindustrie mit 31 Kraftwerken und 1.560 MW Leistung. Die restlichen 18 Kraftwerke verteilen sich auf die Industriezweige Papier und Pappe (6), Landwirtschaft und Ernährung (6), Kältetechnik (1), Automobilherstellung (1), Holzverarbeitung (3) und die Druckindustrie (1).

[265] Siehe IN4CLIMATE.NRW (2021/1)

[266] Siehe Bundesnetzagentur (2021/1), Anlage 23

Diese Kraftwerke werden überwiegend mit Erdgas, Grubengas und Abfällen betrieben. Während bei den öffentlichen Kraftwerken noch 55 Prozent mit Kohle befeuert werden, ist der Anteil der Kohlekraftwerke bei den Industriekraftwerken mit 12 Prozent nur noch gering. Soweit die Firmen neben Strom auch Wärme benötigen, kommen kombinierte Fernwärmekonzepte in Frage, wie sie im Kapitel »Hauswärme« beschrieben wurden. Ansonsten werden die industrieeigenen Kraftwerke durch Wind- und Solaranlagen ersetzt. Da bei einer Energieversorgung mit Wind- und Solarenergie eine großräumige Vernetzung sinnvoll ist, werden die Betriebe künftig überwiegend aus dem öffentlichen Netz versorgt werden. Einige Firmen investieren aber auch als Ersatz für ihre firmeneigenen Kraftwerke in Windparks in der Nordsee oder in PV- oder Windenergieanlagen in NRW.

Über die Erzeugung von Industriewärme (Hochtemperaturwärme) haben wir keine aggregierten Statistiken gefunden. Studien gehen davon aus, dass große Teile der Abwärme bisher ungenutzt verpuffen – insbesondere aus der Stahlindustrie und den industrieeigenen Kraftwerken. Diese Restwärme sollte in Zukunft, soweit das räumlich möglich ist, für die Fernwärmeversorgung genutzt werden. Wir rechnen daher für 2040 mit 10 TWh Abwärme der Industrie, die in die Fernwärmenetze eingeleitet wird.[267]

Chemische Industrie

Die chemische Industrie ist in Deutschland die fünftgrößte Arbeitgeberin im verarbeitenden Gewerbe, nach Umsatz sogar auf Platz vier. In NRW steht sie bei den Treibhausgasemissionen an zweiter Stelle nach der Stahlindustrie.[268] Sie hat einen riesigen Energiebedarf von 160 TWh/a in Deutschland (in NRW geschätzt über 50 TWh/a). In NRW ist besonders die Basischemie (Grundstoffchemie) konzentriert, während der Anteil von NRW an der Spezialchemie und der Pharmaindustrie im deutschen Durchschnitt liegt. Nach den Studien wächst die Chemieindustrie auch in Zukunft noch leicht an. Das gilt aber nicht für die in NRW dominierende Grundstoffchemie (inkl. Raffinerien), die für den Großteil der Emissionen verantwortlich ist. Denn zwei Hauptabsatzmärkte – der für Stickstoffdünger und für Raffinerien der für fossile Kraftstoffe – werden künftig drastisch reduziert werden.

---

[267] Siehe das Wärmeflussdiagramm in Anlage 30

[268] Siehe Gensch (2020/1)

Die Chemieindustrie hat sich bereits intensiv auf die Umstellung für eine zukünftige treibhausgasneutrale Produktion eingestellt. In einer Roadmap wurde dargestellt, wie eine weitgehend treibhausgasneutrale Chemieproduktion in Deutschland machbar ist. Dabei spielen die Erzeugung von Wasserstoff aus Erneuerbaren Energien und die Nutzung von CO_2 als Rohstoff eine zentrale Rolle.[269]

Ersatz der fossilen Rohstoffe

Die heutige chemische Industrie bildet ein hochkomplexes Netzwerk von Produktionsprozessen. Die wichtigsten Rohstoffquellen stellen heute die fossilen Rohstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle dar. Bei der Gewinnung von Zwischenprodukten wie Naphtha (Rohbenzin) oder Ammoniak fallen Abfallprodukte an, die wiederum Ausgangspunkt für andere chemische Herstellungsverfahren sind. Ergebnis dieser chemischen Umwandlungsprozesse in der Grundstoffchemie sind eine Vielzahl von Endprodukten (wie Stickstoffdünger) oder Zwischenprodukten, aus denen Kunststoffe mit unterschiedlichsten Eigenschaften entstehen. Diese werden schließlich zur Herstellung der zahlreichen Produkte und Verpackungsmaterialien von Plastikflaschen über Bausteine bis hin zu Surfbrettern und zur Häuserdämmung verwendet.

Um die Chemieindustrie CO_2-frei zu machen, fallen künftig die fossilen Rohstoffe als Ausgangsmaterialien weg. Dadurch wird Wasserstoff ein wichtiger Ausgangsstoff, der aus Wasser mit Wind- oder Solarstrom durch Elektrolyse gewonnen wird. Mit Hilfe von Wasserstoff und nichtfossilem Kohlenstoff können dann eine Vielzahl synthetischer Rohstoffe erstellt werden, die sich aber quantitativ und qualitativ wie auch preislich von den bisherigen Rohstoffen unterscheiden. Allein diese Änderung der Ausgangsstoffe kann bereits das gesamte Netzwerk der Chemieindustrie verändern. Künftig kommen aber als weitere Ausgangsmaterialien die unterschiedlichsten Arten von Biomasse hinzu. Diese haben naturgemäß völlig andere Eigenschaften, die ebenfalls wieder in vielfacher Weise genutzt werden können.

Im Folgenden stellen wir drei Wege der Transformation der chemischen Grundstoffindustrie dar, die in den vorliegenden Studien aufgezeigt werden. Sie sind aber nicht als Alternativen zu sehen, sondern als Konzepte, die sich ergänzen und in den kommenden

[269] Siehe dechema (2019/1)

Jahren parallel verfolgt werden dürften. Da die Chemieindustrie gemeinsam mit den wissenschaftlichen Instituten zurzeit intensiv an Transformationsstrategien arbeitet, kann die folgende Darstellung auch nur ein Zwischenstand sein. Entscheidend für unsere Rechnungen ist jedoch, dass sich durch die Forschungen und Konzepte der letzten Jahre der Bedarf an Primärenergie und Rohstoffen deutlich reduziert hat, sodass wir unsere vorsichtige Modellrechnung für realistisch halten.

Weg 1: Ersatz der fossilen Rohstoffe durch synthetische Rohstoffe

Die heutigen Rohstoffe der organischen Chemieindustrie (Erdöl, Erdgas, Kohle) werden durch synthetische Rohstoffe ersetzt, die aus grünem Wasserstoff und nichtfossilem Kohlenstoff, aus CO_2-Abscheidungen (z.B. Zementindustrie) oder aus Biomasse synthetisiert werden. Hauptzwischenprodukte werden grünes Naphtha, Ammoniak, Methanol, Olefine, Aromaten und andere Verbindungen sein.[270] Dieser Weg erfordert sehr viel Strom als Primärenergie zur Herstellung des Wasserstoffs und zur Synthese der weiteren Produkte. Daher würde alleine die Chemieindustrie einen Energiebedarf von bis zu 700 TWh/a benötigen.[271] Das Wuppertal Institut rechnet bei optimalen Prozessen mit 300 TWh/a Wasserstoff, 100 TWh/a Strom und 20 TWh/a Biomasse – also ca. 500 TWh/a Primärenergie für Deutschland.[272] Der Vorteil dieses Weges besteht darin, dass nur die Herstellung der Ausgangsstoffe verändert wird und viele Produktionsprozesse beibehalten werden können.

Weg 2: Kunststoffrecycling[273]

Der Bedarf an Energie kann durch Kunststoffrecycling drastisch auf bis zu 300 TWh/a reduziert (halbiert) werden. Beim Kunststoffrecycling gibt es drei Stufen:

---

[270] Grünes Naphtha ist ein Rohbenzin, das sich in der Zusammensetzung aber erheblich von den fossil gewonnen Naphtha-Arten unterscheidet. Grünes Methanol und Ammoniak sind bis auf die Herstellung und die Verunreinigungen identisch mit den bisherigen Stoffen. Bei Olefinen, Aromaten und anderen Verbindungen handelt es sich um eine Reihe von Zwischenproduktgruppen mit unterschiedlichen Eigenschaften, die als Ausgangsstoffe für die Herstellung von Kunststoffen und anderen Chemikalien dienen.

[271] Siehe BDI (2018/1), MD (2020/1)

[272] Siehe Wuppertal (2020/1); der Primärenergiebedarf fällt aber überwiegend nicht in Deutschland an, sondern in den Ländern, die die synthetischen Rohstoffe liefern.

[273] Siehe In4Climate (2020/1), UBA (2019/13), Wuppertal (2020/1)

1. Mechanisches (stoffliches) Recycling: Die Kunststoffe werden wieder verwendet. Dies setzt voraus, dass die Rohstoffe sortenrein gesammelt oder zumindest sortiert werden können. Dies gelingt relativ gut bei Verpackungen und Abfällen in der Industrie. Bei den Kunststoffen im Hausmüll, die fast 40 Prozent der Kunststoffabfälle ausmachen, gelingt dies bislang nur zu unter fünf Prozent. Diese Verfahren müssen erheblich verbessert werden. Benötigt wir ein „Circular Design" der Werkstoffe und Produkte, das anschließend eine saubere Trennung der Kunststoffe ermöglicht.
2. Chemisches Recycling: Die Kunststoffabfälle, die nicht mechanisch recycelt werden können, müssen künftig dem chemischen Recycling zugeführt werden. Sie werden dabei mit Hilfe von Pyrolyse oder Gasifikation in kleinere Moleküle zerlegt. Diese können als Rohstoff genutzt werden, um daraus wieder neue Kunststoffe zu produzieren. Diese Verfahren können möglicherweise sogar den Energiebedarf senken und damit die Kosten für die Rohstoffproduktion senken.
3. Thermisches Recycling: Die restlichen Kunststoffabfälle, die zu sehr verunreinigt oder vermengt sind, werden verbrannt und damit energetisch genutzt. Auch diese Variante ist künftig treibhausgasneutral, wenn die Rohstoffe für die Kunststoffherstellung treibhausgasneutral produziert wurden oder wenn der Kohlenstoff der Rauchgase genutzt wird (CCU).

Die Recyclingquote kann weiter gesteigert werden, wenn

- die Produkte so konzipiert werden, dass die Stoffe leicht getrennt werden können. Dazu müssen die Kunststoffe systematisch klassifiziert und die Verwendung geregelt werden. In der EU werden dazu im Rahmen der Öko-Design-Richtlinie bereits erste Schritte geplant.
- neue Kunststoffe entwickelt werden, die leichter und besser recycelbar sind.

Wir rechnen damit, dass die Quote des echten Recyclings (chemisches oder stoffliches Recycling) bis 2040 von heute 16 Prozent auf 50 Prozent angehoben werden kann.[274]

[274] Siehe Heinrich-Böll-Stiftung (2019/2), UBA (2019/13); in der Rescue-Studie des UBA wird sogar eine Recyclingquote von 75% bei Kunststoffen für möglich gehalten, siehe UBA (2019/3). Allerdings wird die reale Ausbeute an Rohstoff nur auf 8% geschätzt. Ob 50% Recycling erreichbar ist, hängt auch davon ab, wieviel Produkte importiert und exportiert werden.

Dann kann der Primärenergiebedarf für die Rohstoffversorgung auf etwa 300 TWh/a gesenkt werden. Dazu kommen dann recycelte Kunststoffe mit einem Energiegehalt von 85 TWh/a.[275] Dabei gehen wir vorsichtigerweise davon aus, dass sowohl der Wasserstoff wie auch Zwischenprodukte (PtL) teilweise in Deutschland produziert werden und teilweise importiert werden (mehr dazu im Kapitel 2.2 »Varianten des Energiesystems: E-Brennstoffe und Importe«). Insgesamt ist dieser Weg nur ökologisch und volkswirtschaftlich sinnvoll, wenn die Chemieindustrie ihr Geschäftsmodell deutlich ändert. Ziel muss es sein, weniger sowie gut trennbare und recycelbare Kunststoffsorten zu produzieren, so dass ein problemloses Sortieren und Recyceln in einer vollständigen Kreislaufwirtschaft möglich wird.

Weg 3: Der Übergang zur Bioökonomie[276]

Weg 1 und Weg 2 gehen beide noch davon aus, dass die Produkte der Chemieindustrie sich nicht grundlegend ändern. Dagegen werden im Rahmen der Bioökonomie einzelne Prozesse und mittelfristig ganze Kreislaufsysteme entwickelt, um Biomasse effizienter nutzen zu können. Um Biomasse für die Chemie- und Energiewirtschaft zu nutzen gibt es drei Möglichkeiten:

1. Die Biomasse wird zerlegt in kurze Verbindungen (Synthesegas) aus denen dann wieder höherwertige Verbindungen zusammengesetzt werden.
2. Die in der Biomasse enthaltenen längeren Ketten und Strukturen werden herausgelöst und können direkt genutzt werden (z.B. Fasern, extrahierte Wertstoffe).
3. In der Biomasse sind neben Kohlenwasserstoffen auch viele weitere komplexe chemische Strukturen mit hoher Funktionalität enthalten – Verbindungen mit Sauerstoff, Stickstoff und vielen weiteren Elementen. Es gilt diese komplexen Strukturen, die die Natur synthetisiert, künftig zu nutzen und ggf. sogar daraus Produkte mit neuen Eigenschaften zu entwickeln.

[275] Siehe Anlage 21: 70 TWh/a Strom, 40 TWh/a Wasserstoff (dafür 50 TWh/a Strom als Primärenergie), 5 TWh/a Biomasse, 85 TWh/a PtL (dafür ca. 175 TWh/a Strom als Primärenergie) + Rohstoffe aus Kunststoff-Recycling mit Energiegehalt 85 TWh/a

[276] Siehe BioSC (2021/1), Jülich Forschungszentrum (2019/1)

Die Produktion und Nutzung von grünem Naphtha und anderen Rohstoffen wird daher aus Sicht der Bioökonomie nur als Übergangsphase gesehen, um die bestehenden Anlagen weiter zu nutzen. Im Ergebnis wird nicht nur die Produktion verändert, sondern es werden auch neue Produkte wie Stoffe, Medikamente, Farben, Kunststoffe usw. entwickelt werden, die die komplexen Verbindungen direkt nutzen.

Wissenschaftler*innen des Forschungsverbund BioSC[277] zufolge könnte sich auch der räumliche Aufbau der Chemieindustrie ändern: Produktionsanlagen könnten dann unter Umständen nicht mehr aus zentralen Großkomplexen bestehen, wo auf Basis der gleichen Rohstoffe zahlreiche Produktpaletten produziert werden. Stattdessen könnten auch kleine spezialisierte Bioraffinerien vor Ort neben den Zuckerfabriken, Biogasanlagen, Lebensmittelfabriken oder auch in der Landwirtschaft usw. angesiedelt sein. Dort produzieren sie je nach der dort verfügbaren Biomasse Zwischenprodukte oder Rohstoffe für spezialisierte Produkte. Damit tritt das Konzept der Kreislaufwirtschaft auf eine neue Stufe. Es geht nicht mehr darum, „tote“ Materialien zu recyceln, sondern es geht darum, den Stoffkreislauf der menschlichen Gesellschaft und ihrer Produkte in den natürlichen Stoffkreislauf einzugliedern.

Fazit zur Zukunft der chemischen Industrie

Professor Schurr vom Bioeconomy Science Center in Jülich geht davon aus, dass sich die neue Chemie in den kommenden 20 Jahren parallel zur klassischen Chemie entwickeln und Produkte auf den Markt bringen wird. Damit ist auch zu erwarten, dass der Energieaufwand für die Bereitstellung der Rohstoffe weiter sinken wird. Wir gehen daher nicht von einem Drei-Phasen-Modell der Chemie-Entwicklung aus, sondern rechnen damit, dass die drei beschriebenen Wege parallel beschritten werden. Im Rahmen dieser Studie haben wir den Emissionsverlauf und den künftigen Energiebedarf auf Basis von Weg 2 kalkuliert, weil wir glauben, dass dies eine vorsichtige realistische Kalkulation ergibt.

Die beschriebene Entwicklung der Chemieindustrie unterstützt auch die Überlegungen, die Verwendung der vorhandenen begrenzten Biomasse langfristig auf den Einsatz als Rohstoff für die chemische Industrie zu konzentrieren. Nach unserem Szenario

[277] BioSC ist ein Forschungsverbund zur Entwicklung der Bioökonomie, an dem die HHU Düsseldorf, die Uni Bonn, die RWTH Aachen und das Forschungszentrum Jülich beteiligt sind.

stehen als Biomasse alle organischen Reststoffe aus Landwirtschaft, Lebensmittelindustrie, Holzwirtschaft, Gaststätten und Haushalten zur Verfügung. Außerdem rechnen wir mit einer Verdoppelung des Anbaus von nachwachsenden Rohstoffen auf vier Prozent der landwirtschaftlich genutzten Flächen. Dagegen soll der Anbau von Pflanzen für die Energiebereitstellung komplett eingestellt werden (siehe dazu im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« im Abschnitt »Bioenergie« und im Kapitel »Landwirtschaft, Ernährung, Bodennutzung und Kompensation« im Abschnitt »Flächennutzung für die Klimapolitik«).

Raffinerien, Wasserstoffwirtschaft und E-Brennstoffe

Heute werden 80 Prozent der Kohlenwasserstoffe als Brennstoffe und Treibstoffe eingesetzt. In NRW befinden sich zwei der 16 deutschen Raffinerien mit einer Kapazität von 29 Mio. Jahrestonnen (28 Prozent der deutschen Produktionskapazitäten an flüssigen Treibstoffen – also ohne Bitumen).[278] Sie produzieren neben Treibstoffen auch ein vielfältiges Spektrum an Rohstoffen für die Chemieindustrie und an Fertigprodukten für den Markt wie Schmierstoffe, Öle, usw.

Mit dem Wegfall der Produktion von Benzin, Diesel und Heizöl fallen jedoch künftig zwei Drittel der Produktionsmenge weg (zur Auswirkung auf die Arbeitsplätze siehe im Kapitel 2.7 »Die Ökonomie der Umstellung« im Abschnitt »Klimapolitik und Arbeitsplätze«). Inwieweit die Produktion von Wasserstoff und synthetischen grünen Treibstoffen und Brennstoffen wie synthetisches Kerosin für den Flugverkehr oder Methanol für den Schiffsverkehr einen Teil davon kompensieren kann, hängt davon ab, in welchem Umfang und aus welchen Regionen die Energieimporte in Zukunft erfolgen (siehe dazu im Kapitel 2.2 »Varianten des Energiesystems«). Wir rechnen künftig mit einem Wasserstoffbedarf von 120 TWh/a, davon 50 TWh/a Importe aus dem Ausland, 30 TWh/a aus dem Inland (von der Küste) und ein Drittel (ca. 40 TWh/a) Produktion in NRW. Weiter rechnen wir mit PtL-Importen von 27 TWh/a und einer Methanproduktion von 20 TWh/a in NRW (synthetisches Gas, Grubengas, Biogas).[279]

---

[278] Die BP Gelsenkirchen mit 12,7 Mio. Jahrestonnen Kapazität und die Rheinland Raffinerie in Köln mit 16,3 Mio. Jahrestonnen; siehe Wikipedia (2021/2)

[279] Siehe Anlage 5

Weitere Bereiche der Chemischen Industrien

Es gibt eine Reihe von weiteren Zweigen der Chemischen Industrie, die von der Transformation betroffen sind. Im Folgenden beschränken wir uns auf einige wichtige Aspekte. Eine vollständige Detaildiskussion der vielfältigen Produktionspalette ist im Rahmen dieser Studie nicht möglich.

Aromaten[280]

Eine sehr vielfältige Produktgruppe von chemischen Stoffen sind die Aromaten (chemische Verbindungen mit ringförmigen Molekülteilen). Ein Beispiel für die künftige Entwicklung der Chemie sind neue Forschungsergebnisse des Fraunhofer-Instituts für Chemische Technologie (ICT). Bisher werden Aromaten durch Extraktion aus Erdölfraktionen gewonnen. Das ICT hat ein neues Verfahren entwickelt, das flüssige Salze zur Gewinnung von aromatischen Verbindungen aus Materialien wie Holz oder Altkunststoffen einsetzt. Diese Forschungsergebnisse sollen geeignet sein, eine Wende für eine gesamte Substanzklasse einzuleiten und vor allem die chemische Nutzung nachwachsender Rohstoffe vorantreiben.

Ammoniak

Ammoniak ist eine der am häufigsten produzierten Chemikalien. Heute dient es hauptsächlich als Rohstoff für die Herstellung von Düngemitteln. Aber auch als Kältemittel für Kühlschränke und Kühlhäuser, als Treibstoff und in vielen anderen Bereichen kommt Ammoniak zum Einsatz. NRW hat an der Düngemittelproduktion in Deutschland nur einen Anteil von sechs Prozent mit zwei Produktionsstätten in Köln und Krefeld.

Der für die Herstellung von Ammoniak erforderliche Wasserstoff wird heute noch überwiegend aus fossilem Methan gewonnen. Mittlerweile gibt es vielversprechende Forschungsergebnisse, die erwarten lassen, dass künftig der Stickstoff aus der Luft, anstelle mit fossilem Methan, direkt mit grünem Wasserstoff, also treibhausgasneutral, zur Ammoniakherstellung eingesetzt werden kann.[281] Diese Umstellung könnte die

[280] Siehe Hüser (2015/1)

[281] Siehe Vierjahn (2020/1)

Produktionskosten um ein Viertel verringern – allerdings benötigt der großtechnische Einsatz noch eine gewisse Vorlaufzeit und zunächst große Investitionen.

Welche Rolle Ammoniak künftig spielt, ist noch nicht abzusehen. Mit dem Rückgang der Düngung wird auch weniger Ammoniak benötigt. Es gibt aber Überlegungen, Ammoniak künftig im Ausland zu produzieren und dann anstelle von Wasserstoff zu importieren, da er viel leichter transportierbar ist. Bei Bedarf kann flüssiges Ammoniak mithilfe eines Crackers wieder in seine Bestandteile Wasserstoff und Stickstoff zerlegt werden.

Ammoniak eignet sich auch gut als kohlenstofffreier Treibstoff für Brennstoffzellen. Solche ammoniakversorgten Brennstoffzellensysteme können künftig sowohl Schiffsmotoren ersetzen wie auch die klimaschädlichen Dieselmotoren, die in Entwicklungs- und Schwellenländern ohne zuverlässiges Stromnetz als Generatoren eingesetzt werden. Der Vorteil gegenüber einer direkten Nutzung von Wasserstoff: Ammoniak hat eine hohe Energiedichte, ist einfach zu transportieren und unkompliziert zu speichern. Das scheint nach neueren Quellen den Nachteil aufzuwiegen, dass dafür mehr Primärenergie benötigt wird.[282]

Flüchtige organische Verbindungen

Neben dem Treibhausgas Methan gibt es noch weitere flüchtige organische Verbindungen, die meist als Lösungsmittel – zum Beispiel in Farben und Klebstoffen – verwendet werden. Sie wurden schon deutlich vermindert. Künftig kann ihre Nutzung z. B. durch gesetzliche Beschränkung ihres Einsatz noch um mindestens weitere 20 Prozent reduziert werden.[283]

Anästhesie-Mittel

Alle bei der Anästhesie in Krankhäusern und Arztpraxen verwendeten Gase sind Treibhausgase. Allerdings ist die Wirkung sehr unterschiedlich. So können zum Beispiel durch

[282] Siehe Wuppertal (2020/2)

[283] Siehe UBA (2019/2) – sie werden als NMVOC bezeichnet (Non Methan Volatile Organic Compounds). Sie sind nicht selbst Treibhausgase, werden aber in der Atmosphäre zum Teil durch chemische Reaktionen dazu.

den Ersatz von Lachgas durch Sevofluran die Emissionen auf ein Hundertstel gesenkt werden. Daher sollte der Einsatz der Mittel gesetzlich so geregelt werden, dass die hochwirksamen Treibhausgase nur noch in begründeten Ausnahmefällen zum Einsatz kommen.[284]

Fluorverbindungen

Fluorverbindungen werden überwiegend als Kältemittel eingesetzt. Nach dem Verbot der Fluorkohlenwasserstoffe, die die Ozonschicht schädigen, werden nun eine Reihe andere Fluorverbindungen genutzt, obwohl sie eine sehr starke Treibhausgaswirkung haben. Die Emissionen entstehen nicht in der Produktion, sondern durch fast unvermeidliche Leckagen in der Anwendung.

Es gibt seit langem gute Alternativen wie Ammoniak oder Kohlendioxid, die aber meist aus Kostengründen noch nicht genügend genutzt werden. Das Umweltbundesamt empfiehlt daher eine gesetzliche Regelung.[285]

Metallindustrie

Die Metallindustrie ist mit 24 $MtCO_{2eq}$/a (35 Prozent) und über 60 TWh/a der Industriezweig mit den meisten Treibhausgasemissionen und mit dem höchsten Energieverbrauch in NRW. Der Löwenanteil davon entfällt auf die Eisen- und Stahlindustrie mit 22 $MtCO_{2eq}$/a.

Recycling von Metallen

Bei Metallen kann das Recycling einen wesentlichen Beitrag zur Einsparung der Energie und zur Reduzierung der THG-Emissionen leisten. Gelingt es, hohe Recycling-Quoten zu erreichen, so werden sowohl Treibhausgase als auch Energie und Kosten eingespart. In vielen Fällen entsteht so eine Win-Win-Situation. Die folgende Übersicht stellt dar, welche Recyclingquoten auf Basis der derzeitigen Studienlage bis 2040 erreichbar sind. Dabei muss man berücksichtigen, dass die Metalle teilweise über Jahrzehnte in Gebrauch sind, so zum Beispiel bei Baustahl, Bleirohren oder Kupferleitungen. Auch

[284] Siehe Health Care Without Harm (2018/1)

[285] Siehe UBA (2014/2)

werden viele Metalle in Form von Produkten exportiert und können daher in Deutschland nicht recycelt werden[286]:

- Eisen und Stahl: Der Anteil des recycelten Materials (Schrott) an der Stahlproduktion kann bis 2040 von heute ca. 38 auf 70 Prozent[287] gesteigert werden. Beim Recycling werden gegenüber der Produktion aus Eisenerz 60 bis 75 Prozent der Energie eingespart.
- Aluminium: Die Recyclingquote kann von heute 66 auf 90 Prozent steigen. Die Energieeinsparung liegt bei 95 Prozent.
- Kupfer: Die Recyclingquote kann von heute 40 auf 70 Prozent steigen. Die Energieeinsparung beträgt 80 Prozent.
- Blei: Die Recyclingquote kann von heute 69 auf 90 Prozent gesteigert werden. Die Energieeinsparung beträgt 80 Prozent.

Diese Ziele setzen vor allem ein verbindliches Pfandsystem und dafür ein entsprechendes Produktdesign voraus, dann sind sie nach Einschätzung der Autor*innen realistisch. Schon heute befindet sich 75 Prozent des jemals geförderten Aluminiums und 80 Prozent des jemals geförderten Kupfers noch im Umlauf.

Eisen und Stahl[288]

Der Industriezweig mit den meisten Emissionen in Deutschland ist die Eisen- und Stahlindustrie, davon fallen 40 Prozent in NRW an. Dort verursachen diese ein Drittel der gesamten Emissionen der Industrie, obwohl die Eisen- und Stahlproduktion seit Jahren abnimmt. Hauptstandort mit über 90 Prozent der Stahlindustrie ist Duisburg mit den riesigen Anlagen von Thyssenkrupp mit 27.000 Mitarbeitenden, den Hüttenwerken Krupp-Mannesmann und dem Werk von ArcelorMittal. Kleinere Werke gibt es noch in Dortmund, Witten und Siegen.[289] Bei der heutigen Stahlerzeugung gibt es zwei Verfahren:[290]

---

[286] VDM (2021/1)

[287] Siehe VDM (2021/1), UBA (2020/4)

[288] Siehe Anlage 24

[289] Siehe Stahl (2020/1)

[290] Siehe Wikipedia (2021/1)

- Primäre Stahlproduktion aus Eisenerz: Dabei wird in Hochöfen das Erz mit Hilfe von Kohle zu Roheisen reduziert. Die hohen CO_2-Emissionen sind daher nicht nur durch die Verbrennung, sondern vor allem durch die chemische Umwandlung bedingt. Auch dabei wird 20 Prozent Recycling-Eisen (Schrott) eingesetzt. Hochöfen gibt es in NRW nur in drei Betrieben in Duisburg.
- Stahlrecycling: Im Elektrostahlwerk wird aus Schrott wieder Stahl erzeugt. Das Recycling von Stahl benötigt 60 bis 75 Prozent weniger Energie als die Primärerzeugung. Probleme beim Recycling stellen einzelne Fremdstoffe wie z. B. Kupfer dar, das aus Elektrogeräten stammt.

In der Praxis wird Stahl primär aus Erz hergestellt und dann oft mehrfach recycelt. Stahl ist mit 500 Mio. Tonnen pro Jahr der weltweit meistrecycelte Industriewerkstoff. Häufig enthält der Schrott auch noch weitere Metalle wie Kupfer, Chrom, Nickel, Zinn und Zink, die ebenfalls zurückgewonnen werden können.

Die Weiterverarbeitung von Stahl in den Walzwerken und dann zu Röhren, Drähten und Bauteilen usw. erfolgt auch heute schon in der Regel elektrisch. Dafür kommt künftig nur noch regenerativer Strom zum Einsatz.

Zukünftig wird es keine Hochöfen mehr geben, in denen aus Eisenerz durch Kohle Eisen produziert wird. Die Stahlindustrie kann treibhausgasneutral werden, indem die Produktion von Eisenschwamm aus Erz durch Direktreduktion mit grünem Wasserstoff (DRI – Direct Reduced Iron) und anschließend die Weiterverarbeitung zu Rohstahl im Elektrolichtbogenofen erfolgt. Diskutiert wird auch der temporäre Einsatz von Methan oder blauem Wasserstoff[291]. Damit würden die Treibhausgase zumindest verringert, allerdings nicht vermieden. Sowieso wird damit gerechnet, dass spätestens 2030 der Preis des grünen Wasserstoffs unter dem des blauen Wasserstoffes liegt.[292]

Die Technologie für die zukünftige Stahlproduktion ist weitgehend geklärt. Schweden plant bereits den Umbau der gesamten Stahlindustrie bis 2040. Modellvorhaben sind

[291] „Blauer“ Wasserstoff wird mit dem heute gängigen Verfahren der Dampfreformierung aus Erdgas (Methan) erzeugt, das entstehende CO_2 soll jedoch aufgefangen und gespeichert werden.

[292] Siehe Recharge (2020/1)

auch in Hamburg, Salzgitter und Österreich in Planung.[293] Im Herbst 2020 hat nun auch Thyssenkrupp seine Strategie vorgestellt.[294] Bereits 2025 sollen 400.000 Tonnen Eisen CO_2-frei produziert werden – bis 2030 sollen neue Produktionsanlagen jährlich drei Mio. Tonnen Stahl erzeugen und damit der Standort Duisburg 30 Prozent der Emissionen einsparen. Die Bundesregierung wird die erste Stufe der Umstellung mit 75 Mio. Euro fördern. Wie alle Industrieplanungen geht auch Thyssenkrupp noch davon aus, bis 2050 treibhausgasfrei zu produzieren. Es gibt aber aus Sicht der Fachwissenschaftler*innen keine Gründe, warum dies nicht schon früher geschehen könnte.[295]

Insgesamt ist eine Reduzierung der Emissionen um bis zu 95 Prozent möglich.[296] Bei einigen Prozessen bleiben geringe Restemissionen, die zu kompensieren wären. Wir rechnen für NRW nach der Umstellung 2040 mit einem Bedarf von 35 TWh/a Wasserstoff und 50 TWh/a Strom.

Aluminium[297]

In Deutschland werden jährlich ca. drei Mio. Tonnen Aluminium verbraucht. Davon wird nur ein Drittel in Deutschland produziert. Etwa die Hälfte davon wird aus Bauxit gewonnen (Primärproduktion), davon 80 Prozent in den drei Hütten in NRW (Essen, Neuss und Voerde). Die andere Hälfte wird aus dem Müll recycelt (Sekundärproduktion). Bei der Primärproduktion ist der Stromverbrauch riesig.[298] Die THG-Emissionen für ein Kilogramm Aluminium sind heute je nach Strommix etwa zehnmal so hoch wie die für ein Kilogramm Eisen – in NRW wegen des hohen Kohleanteils im Strommix sogar noch höher.[299] Die drei Hütten in NRW verbrauchen sechs TWh/a – also fünf Prozent der

[293] Siehe Ehlerding (2019/1), WKO (2019/1), Chemiereport (2017/1), Burckhardt (2019/1)

[294] Siehe TKH2Steel (2020/1), Wirtschaftswoche (2020/1)

[295] Siehe Wuppertal (2020/1) – allerdings außerte Prof. Deerberg (Fraunhofer UMSICHT) mündlich Zweifel, ob das Verfahren der Direktreduktion mit Methan, das bereits erprobt ist, sich auf Wasserstoff-Reduktion übertragen lässt.

[296] Prof. Deerberg von Fraunhofer UMSICHT hält dieses theoretischen Wert nicht für realisierbar.

[297] Siehe Anlage 25

[298] Siehe Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (2018/1)

[299] Siehe Wikipedia (2021/1)

gesamten Stromproduktion in NRW und verursachen damit ca. drei Prozent der Treibhausgasemissionen.

In Zukunft sollte die Recyclingquote auf 90 Prozent angehoben werden. Zurzeit liegt sie in der EU bei 70 Prozent, aber weltweit nur bei 40 Prozent. Beim Hauptverbraucher, der Automobilindustrie, wird beim Verschrotten der Autos schon 95 Prozent recycelt. Allerdings gilt das nur für die Autos, die in Deutschland entsorgt werden. Ein erheblicher Teil der deutschen Produktion geht aber ins Ausland.

Das Hauptproblem ist allerdings das mangelnde Recycling der Alufolie in den Haushalten und Alu-Verbundverpackungen, die nicht sauber abgetrennt werden können. Um dies zu ändern, wird vorgeschlagen, den Einsatz von Aluminium – insbesondere bei Verpackungen und Folien – gesetzlich zu regeln und mit einem Pfand zu versehen.

Wenn Aluminium zu über 90 Prozent recycelt wird und die restliche Energie erneuerbar erzeugt wird, kann die Alu-Produktion weitgehend treibhausneutral werden. Anlagen für das Alu-Recycling eigenen sich auch für das Lastmanagement, da der Stromverbrauch um 25 Prozent variiert werden kann.[300]

Andere Metalle

Die Emissionen bei der Herstellung und Verarbeitung der zahlreichen anderen Metalle werden fast ausschließlich durch den Energieverbrauch verursacht. Der dafür benötigte Strom stammt überwiegend aus dem öffentlichen Netz und wird daher bei der Energiewirtschaft ausgewiesen (siehe im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung«). Der Energieverbrauch bei der Herstellung von Metallen kann künftig gesenkt werden, wenn systematisch zur Kreislaufwirtschaft übergegangen wird (siehe oben und in Kapitel 2.3 »Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft«).

Nichtmetallische Mineralindustrie

Den dritten Industriezweig mit großen Treibhausgasemissionen bilden die nichtmetallischen Mineralindustrien. Dabei werden vier Industriezweige unterschieden: Die Zementindustrie, die Kalkindustrie, die Glasindustrie und die Keramikherstellung.

[300] Siehe Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (2014/1)

Zementindustrie

Als größtes Problem bei der Umstellung der Industrie erweist sich der Zement. Er ist mit großem Abstand der am meisten produzierte Stoff aller Industriegesellschaften. Er wird als Baustoff, hauptsächlich für die Betonherstellung, benötigt. Von den 54 Zementwerken in Deutschland befinden sich 16 in NRW, die insgesamt ca. sechs $MtCO_{2eq}$/a emittieren.[301] Davon werden zwei Drittel durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen verursacht, die die nötige Energie bereitstellen. Sie wird zum einen für die Klinkerproduktion bei 1.450°C eingesetzt, zum anderen wird sie für das Mahlen der Rohstoffe und der Klinker benötigt.[302] Dieser Teil der Emissionen kann durch die Elektrifizierung und den Einsatz von erneuerbarem Strom vollständig vermieden werden.

Das restliche Drittel ist prozessbedingt. Dieser Teil der Emissionen entsteht durch die chemische Reaktion und kann nicht vermieden werden.[303] Während es also für alle andern Industrien Möglichkeiten gibt, die Emissionen spätestens bis 2050 auf fast Null zu bringen, bleiben in der Mineralindustrie in NRW Freisetzungen von Kohlendioxid im Umfang von 2 $MtCO_{2eq}$/a übrig, für die es bislang noch keine Lösungsvorschläge außer der Kompensation durch Aufforstung oder die umstrittenen CCS- oder CCU-Technologien gibt[304] (siehe dazu im Kapitel »Landwirtschaft, Ernährung, Bodennutzung und Kompensation« im Abschnitt »Kompensationen«).

Alternativen zum Zement

Durch den Einsatz von Holz und anderen Naturstoffen im Bausektor (zum Beispiel Lehmbau) kann in erheblichem Maße Zement eingespart werden. Mittlerweile sind in mehreren Städten wie London, Wien und Chicago Holzhochhäuser mit bis zu 80

[301] Siehe Anlage 26

[302] Siehe SCI4CLIMATE (2020/1)

[303] Der Rohstoff von Zement ist Calciumcarbonat. Für die Zementherstellung wird das Calcium abgetrennt und verwendet. Übrig bleibt der Kohlenstoff (=Carbonat). Dieses verbindet sich mit Sauerstoff aus der Luft und wird CO_2.

[304] Siehe Carstensen (2018/1), Holcim (2018/1), Holcim (2018/2)

Stockwerken und einer Höhe von 300 Metern in der Planung bzw. im Bau.[305] Allerdings stößt die Holzproduktion schon heute an Grenzen, so dass es unsicher ist, ob eine wesentliche Ausweitung der Nutzung möglich sein wird.

Eine Alternative bildet auch der Ersatz der Eisenbewehrung im Beton durch Kohlefasern. Da die Betondecken dadurch leichter werden, können so Baustoffe und auch weniger Zement eingesetzt werden. Weiterhin kann der Anteil des Klinker im Zement je nach Anwendung um bis zu 65 Prozent reduziert werden.[306] Im Schnitt läuft das auf eine Reduzierung um ein Drittel hinaus, was auch die Einsparung von einem Drittel der Restemissionen bedeutet.

Mittlerweile wird auch nach Alternativen für das Bindemittel Zement geforscht.[307] Ein Ansatz ist „Wollastonit" – eine Stoff der durch die Carbonatisierung von Calcium-Silicat(hydraten) entsteht. Er eignet sich aber nur für Fertigbetonbauteile, da er nicht bei Außentemperaturen angemischt werden kann. Dabei kann der CO_2-Ausstoß um 60 Prozent reduziert werden. Einen gleichwertigen Ersatz für normalen Zement gibt es allerdings noch nicht.[308]

Die Rescue-Studie des Umweltbundesamt geht davon aus, dass bis 2050 die Hälfte des Zements ersetzt werden kann.[309] Auch die Rückkehr zum Bau von langlebigen Gebäuden kann die Emissionen im Neubau künftig senken. Dann könnten die Restemissionen in NRW unter 1 $MtCO_{2eq}$/a sinken. Wir haben in dieser Studie vorsichtig mit 2 $MtCO_{2eq}$/a gerechnet.

---

[305] Siehe Buck (2017/1)

[306] Siehe VDZ (2020/1)

[307] So erprobt die RTWH Aachen und das IASS Potsdam die Bindung von Kohlenstoff an die Mineralien Olivin und Basalt und ihr Einsatz als Zementbeigabe, siehe HeidelbergCement (2019/2)

[308] Siehe BZE (2017/1), Funk (2016/1), HeidelbergCement (2019/1)

[309] Siehe UBA (2019/3)

Kalkindustrie

Die Emissionen der Kalkindustrie in NRW liegen bei ca. 2,3 $MtCO_{2eq}$/a.[310] Die wesentlichen Produkte der Kalkindustrie sind Branntkalk und Kalkhydrat. Bei der Herstellung wird CO_2 zum einen durch die eingesetzte fossile Energie und zum anderen bei der chemischen Umwandlung freigesetzt. Der Verbrauch von Branntkalk in NRW ist höher als im Bundesschnitt, da es nicht nur im Bausektor, sondern auch in den Hochöfen der Stahlindustrie und in Kohlekraftwerken eingesetzt wird.

Die Emissionen können durch die Umstellung der Stahlindustrie, die Stilllegung der Kohlekraftwerke, durch Alternativen im Bau und den Einsatz von Erneuerbarer Energie in NRW auf etwa ein Viertel reduziert werden.[311]

Weitere Mineralien

Relevant sind weiterhin die Emissionen der Glasindustrie. Bei der Glasherstellung können die Emissionen von heute ca. 0,6 $MtCO_{2eq}$/a durch den Anstieg des Anteils der Pfandflaschen und durch die Erhöhung des Anteils an Scherben-Recycling von heute 40 auf 70 Prozent und durch die Umstellung auf erneuerbaren Strom als Energiequelle auf ein Zehntel reduziert werden.[312]

Baustoffrecycling[313]

Ein weiterer Ansatz zur Reduzierung der Emissionen ist das Recycling von Baustoffen. Hierbei geht es zum einen um die Reduzierung der Emissionen bei der Baustoffproduktion – insbesondere der Zementherstellung. Zum anderen werden in vielen Regionen Kies und Sand langsam knapp. Deswegen gewinnt die Wiederverwertung von Bauschutt – insbesondere auch Beton – zunehmend an Bedeutung. Im ersten Schritt sollte in den kommenden Jahren die Recycling-Quote erhöht werden und bis zu zehn Prozent der mineralischen Rohstoffe wie Kies und Sand ersetzt werden. Ein positiver Nebeneffekt

[310] In Deutschland liegen die Emissionen bei 7 $MtCO_{2eq}$/a. Wir rechnen für NRW einen überproportionalen Anteil von 30 Prozent.

[311] Eigene Rechnung auf Basis der Angaben in UBA (2019/3).

[312] Siehe UBA (2019/3)

[313] Siehe VDZ (2019/1)

besteht darin, dass zerriebener Beton wieder mehr als ein Viertel des bei der Erzeugung freigesetzten Kohlendioxid aus der Luft binden kann.

Diese Entwicklung kann durch Regelungen zur Normung von Baustoffen, durch eine verstärkte Qualitätskontrolle sowie einer Versicherungs-/Haftungslösung für potenziell später auftretende Verunreinigungen beschleunigt werden, um die derzeitige Zurückhaltung bei der Wiederverwendung von recyceltem Material zu überwinden.

Mehrere Fraunhofer-Institute arbeiten auch daran, aus recycelten Baustoff neue Bausteine für den Hochbau zu produzieren.[314] Weiterhin können bei der Herstellung von Beton künftig auch Kohlefasernetze anstatt der Eisenbewehrung eingesetzt werden. Dann können sowohl der Beton wie auch die Kohlefasern fast vollständig recycelt werden.

Sonstige Industrien[315]

Die meisten verarbeitenden Industrien werden klimaneutral, indem die Produktionsprozesse komplett elektrifiziert werden. Dazu sollen alle Verbrennungsmotoren auf Elektromotoren umgestellt werden. Der Strom wird dann aus erneuerbaren Stromquellen bezogen. In der Regel geschieht dies, indem der Strom künftig aus dem öffentlichen Netz bezogen wird, soweit das noch nicht der Fall ist.

Weiterhin geht es um die Elektrifizierung der Industrie-Heizsysteme für Dampf und Wärme. Für die Erzeugung von Niedertemperaturwärme können dafür Wärmepumpen eingesetzt werden. Besonders herausfordernd ist die Erzeugung von Hochtemperaturwärme oberhalb von 500°C oder sogar 1000°C. In der Regel kann und sollte die Restwärme dann für andere Prozesse oder zum Heizen von Gebäuden eingesetzt werden. Dies wird bislang nur in geringem Umfang genutzt.

[314] Siehe ingenieur.de (2018/1)

[315] Siehe Wuppertal (2020/1)

***Papier-Herstellung*[316]**

Die Papierindustrie emittiert in NRW knapp drei Prozent der Treibhausgase der Industrie und hat einen Anteil von 30 Prozent an den Emissionen der deutschen Papierindustrie. Die Papierherstellung ist ein komplexes Verfahren mit zahlreichen Prozessstufen und verschiedenen Produkten. Die energiebedingten Emissionen können in den jeweiligen Stufen vermieden werden, sodass die Emissionen auf null gesenkt werden.[317] Da ein Großteil der in der Papierindustrie eingesetzten Energie für die Herstellungsprozesse gebraucht wird, wie z.B. zur Verdampfung großer Wassermengen, liegt ein erhebliches Potenzial darin, den produktspezifischen Energieaufwand in der Herstellung stark zu reduzieren. Hier noch mehr Energie einzusparen ist eine sinnvolle Ergänzung zur Umstellung der genutzten Energie auf Erneuerbare Energien.

Als Rohstoffe werden in der Regel nachwachsende Rohstoffe wie Holz oder Gräser eingesetzt. Die Recyclingquote liegt bei 78 Prozent. Eine Erhöhung der Recyclingquote um 10 Prozent würde bewirken, dass der im Papier gebundene Kohlenstoff doppelt so lange gebunden bleibt. [318] Gut die Hälfte der Produktion sind Verpackungsmaterialien. Ob eine Reduzierung der Papier- und Pappverpackungen möglich und sinnvoll ist, wird unterschiedlich gesehen. Zusätzlich kann der bei der Papierproduktion anfallende Bio-Reststoff Lignin einen erheblichen Beitrag in Höhe von 15 TWh zur Energieversorgung liefern. Da Lignin auch ein sehr interessanter Rohstoff für die Material- und Chemienutzung ist, wird eine rein energetische Nutzung mittelfristig jedoch vermutlich unwirtschaftlich sein.

***Ernährungsindustrie*[319]**

Ein Drittel der deutschen Ernährungsindustrie befindet sich in NRW. Sie emittiert in NRW 1,3 $MtCO_{2eq}/a$ – das sind zwei Prozent der Emissionen der Industrie. 60 Prozent der Energie wird durch Erdgas bereitgestellt.

---

[316] Siehe VDP (2021/1)

[317] Siehe Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (2020/1)

[318] Siehe Unfolded (2019/1)

[319] Siehe EnergieAgentur (2027/1)

Die Produktionsprozesse sind in vielen Sektoren der Ernährungsindustrie wie Fleisch, Milch, Obst und Gemüse, Öle, Backwaren, usw. sehr unterschiedlich. Entscheidend sind jedoch jeweils die Reduzierung des Energieeinsatzes in der Kälte- und Wärmebereitstellung und der Lüftung sowie die Elektrifizierung der Prozesse. Hier können noch bis zu 80 Prozent der Energie eingespart werden. Durch die Strombereitstellung mit Erneuerbaren Energien kann die Ernährungsindustrie dann weitgehend treibhausneutral werden.

Forschung, Entwicklung und Projektbegleitung

Für die Emissionen der meisten Industrieprozesse mit Ausnahme der Mineralindustrie gibt es wie dargestellt bereits Alternativen und Lösungen. Bei der Vielzahl und Komplexität der Industrieprodukte in Deutschland gibt es naturgemäß trotzdem viele Bereiche, die noch nicht geklärt sind. Deshalb sollte die Energiewende durch Programme für Förderung von Forschung und Entwicklung zur Lösung solcher Probleme begleitet werden.

Für alle Industrieunternehmen und Wirtschaftsbetriebe ergibt sich die Notwendigkeit, die Maßnahmen durch zusätzliche Projektorganisation zu begleiten. Hierbei sollte besonderer Wert darauf gelegt werden, die Langlebigkeit der Produkte zu erhöhen. Denn dadurch werden mehr Energie und Ressourcen gespart und damit auch mehr Emissionen vermieden als durch hochgradiges Recycling oder weitgehend treibhausgasneutrale Produktion.

Aufbauend auf den konzeptionellen Arbeiten der vorherigen Landesregierung, hat die Landesregierung 2020 eine Plattform unter dem Namen SCI4CLIMATE aufgebaut, die die Herausforderungen der Industrie durch den Klimawandel wissenschaftlich begleiten soll.[320] Eine Bewertung der F&E-Förderung in NRW in Hinblick auf die Klimaneutralität war im Rahmen dieser Studie nicht möglich.

Allerdings scheint es uns von großer Bedeutung, dass bei der F&E-Förderung und Projektbegleitung ein besonderes Augenmerk auf die Herausforderungen von kleinen und mittelständischen Betrieben gelegt wird. Während die großen Industriekonzerne langfristig die Transformation planen, besteht die Gefahr, dass viele KMU die Dynamik der

[320] Federführung hat das Wuppertal Institut, beteiligt sind Fraunhofer-UMSICHT, IW, RWTH Aachen, VDEh und VDZ, siehe SCI4CLIMATE (2021/2)

Transformation falsch einschätzen und von der Entwicklung überrollt werden. Hier sind neben den Hochschulen die IHKs, die Handwerkskammern und andere Einrichtungen gefordert.[321] Die Landesregierung sollte gewährleisten, dass entsprechende Angebote entwickelt werden und die Berater*innen aktiv auf die KMU zugehen.

Maßnahmen für die Industrie

- Entscheidend sind klare Signale, nach denen sich die Finanzmärkte richten. Dann fließen die Investitionen sehr schnell in den Umbau der Industrie.[322]
- Einführung eines Treibhausgaspreis mit fest kalkulierbarem Wachstumskorridor. Dieser sollte auch für importierte Endprodukte gelten (siehe Kapitel 2.6 »Treibhausgaspreise«).
- Die Ausweisung der Treibhausgasemissionen in Unternehmensberichten sollte vorgeschrieben und standardisiert werden. Dies umfasst sowohl die Vorprodukte, die Produktion, wie auch die Endprodukte und ihre Entsorgung. Eine Orientierung könnte eine auf Klimaschutz und Nachhaltigkeit orientierte EU-Taxonomie sein.
- Konzentration der europäischen regionalen Wirtschaftsprogramme für Nordrhein-Westfalen in den nächsten 15 bis 20 Jahren ausschließlich auf die Bereiche Klimaschutz und nachhaltige Entwicklung
- Es sollte geprüft werden, ob und wie Klimaschutz im Aktienrecht verankert werden kann.
- Bereitstellung von ausreichenden Mengen von treibhausgasfreiem elektrischen Strom.
- Bereitstellung differenzierter Fördermaßnahmen für die erforderlichen Investitionen – insbesondere für die Stahl-, Zement- und Chemieindustrie (siehe dazu den Vorschlag „Carbon Contract for Difference“ (CfD)).[323]
- Es muss effektiven Carbon-Leakage-Schutz für im internationalen Wettbewerb stehende Industriezweige, insbesondere in der verarbeitenden Industrie, geben, der möglichst EU-weit einheitlich ausgestaltet werden sollte.

[321] Siehe Anlage 7

[322] Siehe SCI4CLIMATE.NRW (2020/3)

[323] Siehe Agora Energiewende (2019/3), Knitterscheidt (2019/1)

- Für Industriekraftwerke gelten die gleichen Anforderungen an die Dekarbonisierung wie für die Kraftwerke für die allgemeine Versorgung (siehe Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung«).
- Schneller Aufbau der notwendigen Infrastrukturen u.a. für die Wasserstoffnutzung, den Import grüner Rohstoffe und erneuerbarem Strom.
- Einführung einer anwachsenden Quote für grünen Wasserstoff und andere E-Brennstoffe (siehe im Kapitel 2.2 »Varianten des Energiesystems: E-Brennstoffe und Importe«); dies gilt auch für klimaneutrale Rohstoffe. Ab 2035 sollen keine fossilen Brennstoffe, ab 2040 keine fossilen Rohstoffe mehr verwendet werden.
- Vorgaben im Baurecht und für die Kommunen sollen so gestaltet werden, dass Bauen ohne Zement oder mit alternativen Bindemitteln ohne Treibhausgasimmissionen (Holz, Lehm und andere Naturstoffe) nicht mehr benachteiligt werden, sodass sie mehr Verbreitung finden. Dies sollte auch für Industrie- und Sonderbauten gelten, die nicht durch die Landesbauordnung geregelt sind.
- Das Baustoffrecycling sollte durch Regelungen zur Normierung, Qualitätssicherung und ggf. durch Verwendungsquoten erleichtert und befördert werden.
- Die Einleitung von ungenutzter Wärme in Luft oder Gewässer soll eingeschränkt und die Nutzung von Abwärme soll zur Verminderung der Treibhausgase gesetzlich geregelt werden.
- Zulassungsverpflichtung von allen Kunststoffen, die nicht natürlich abbaubar sind.
- Treibhausgasfreie Kühlmittel und Betäubungsmittel sollten vorrangig genutzt werden, eventuell ist eine gesetzliche Regelung notwendig.
- Zügiger Einstieg in die Kreislaufwirtschaft. Dazu gehört auch, das langlebige Produkte gefördert werden – insbesondere durch Garantieverpflichtungen. langlebigere s (siehe Kapitel 2.3 »Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft«)
- Sicherstellung der erforderlichen Importe (siehe Kapitel 2.2 »Varianten des Energiesystems: E-Brennstoffe und Importe«)
- Zusätzliche Mittel für die Forschung von Alternativen für die Mineralindustrie, die keine oder weniger Treibhausgase freisetzen – insbesondere für alternative Bindemittel, die Zement ersetzen.

- Das Land NRW sollte ein umfangreiches Instrumentarium für die F&E-Förderung und die Projektförderung für die KMU bereitstellen.

Sektor 3 Hauswärme (Heizung und Warmwasser)

Dieses Kapitel behandelt die Emissionen, den Energieverbrauch und die Umstellung auf Treibhausgasneutralität im Bereich der Hauswärme – also Heizungen und Warmwasserversorgung. Behandelt werden alle Wohngebäude sowie die Gebäude für Gewerbe, Handel und Dienstleistungen einschließlich der Verwaltungen, Schulen, Sportstätten usw. Nicht enthalten ist der Wärmebedarf der Industrie (siehe dazu im Kapitel »Industrie«).

Überblick und Vorbemerkung

Bisher werden die Häuser in NRW vor allem mit Erdgas und Öl sowie Fernwärme aus fossilen Kraftwerken beheizt. Um Heizwärme und Warmwasser in Zukunft klimaneutral zu erzeugen, müssen die Heizungsanlagen vor Ort und die Fernwärmesysteme auf neue Heizsysteme umgerüstet werden. Hauptsächlich sind dies Wärmepumpen, die aus erneuerbarem Strom hocheffizient Wärme erzeugen. Ergänzt werden diese um Solarthermie-Anlagen, Blockheizkraftwerke, in denen grüner Wasserstoff, grünes Methan und Bio-Reststoffe verbrannt werden, tiefe Geothermieanlagen und eine verstärkte Nutzung industrieller Abwärme.

Da der Strombedarf im Wärmesektor durch Einsatz der Wärmepumpen und synthetischer Brennstoffe stark wächst, sollten möglichst bis 2045 neunzig Prozent aller Wohngebäude auf Niedrigenergiestandard gebracht werden – dies kann den Energiebedarf mehr als halbieren. Dieses Vorhaben gehört zu den teuersten und schwierigsten Aufgaben der bevorstehenden Umstellung auf Klimaneutralität. Ein weiteres großes Projekt im Bereich Hauswärme ist ein starker Ausbau der Fernwärmenetze, sowie die Absenkung der dabei verwendeten Vorlauftemperaturen und der Ersatz der heutigen zum Großteile fossilen Wärmequellen.

Der wichtigste Akteur bei der Wärmewende sind die Kommunen. Die komplexe Aufgabe, Stadt für Stadt, Ort für Ort, Siedlung für Siedlung und Stadtteil für Stadtteil nahezu alle Häuser wärmetechnisch zu sanieren und die Heizungssysteme auszutauschen ist ein gigantisches Vorhaben, das nur vor Ort von den Kommunen gemeinsam mit den Bürger*innen bewältigt werden kann.

Bei unseren Berechnungen konnten wir nur auf eine lückenhafte Datenlage für NRW zurückgreifen. Dies betrifft Daten wie Anzahl und Sanierungstiefe der in den letzten Jahren sanierten Häuser, die Erzeugung von Fernwärme aufgeschlüsselt nach Energieträger der letzten Jahre, die Lage von Fernwärmenetzen, sowie deren Betriebstemperaturen, die Anzahl an Gebäuden im Nichtwohnbereich, sowie deren Sanierungsquote, Wärmebedarf, Temperaturbedarf und Potenzial zur energetischen Sanierung. Gleichzeitig deuten die vorhandenen Daten darauf hin, dass sich die Situation nicht grundsätzlich von der in Deutschland insgesamt unterscheidet. Daher haben wir uns dort, wo spezifische Daten aus NRW fehlen, an den Überlegungen des »Handbuch Klimaschutz« orientiert und diese wo möglich und notwendig mit Daten aus NRW ergänzt oder korrigiert.

Viele Einflussfaktoren und Variablen beeinflussen die Ergebnisse im Wärmebereich, etwa zum künftigen Wärmebedarf. Geringe Veränderungen etwa in der Sanierungsrate können zu großen Veränderungen führen. Wir stellen im Folgenden ein plausibles Szenario vor, wohlwissend, dass alle Stellschrauben auch anders gedreht werden könnten.

Die Ausgangslage

In NRW gibt es 3,9 Millionen Wohngebäude[324] und ca. 580.000 Gebäude[325] aus dem Bereich GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen). Die Versorgung der Gebäude mit Heizwärme und Warmwasser bedarf in NRW derzeit ca. 219 TWh Endenergie im Jahr[326] und verursacht circa elf Prozent der Treibhausgase.[327] Besonders viel tragen die 1,1 Millionen Öl-Heizungen zum Treibhausgas-Ausstoß bei.

[324] Siehe IT.NRW (2020/2)

[325] Die Datenlage zu Gebäuden aus dem Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektor ist schlecht. Auch die EnergieAgentur.NRW verweist auf deutschlandweite Zahlen (siehe EnergieAgentur.NRW (2021/1)). Insofern haben wir die ca. 2,7 Mio. Gebäude in GHD aus Deutschland anteilig auf die Einwohnerzahl NRWs berechnet.

[326] Der Wärmebedarf (Heizenergie und Warmwasser) aller Gebäude aus GHD und Wohnen liegt bei 218,6 TWh/a, dieser teilt sich auf in 136,1 TWh/a für Wohngebäude und 82,5 TWh/a für GHD. Siehe LANUV (2020/3)

[327] LANUV (2020/1).

Technische Entwicklungen der letzten Jahre, etwa gesteigerte Wirkungsgrade von Wärmepumpen, bieten an sich gute Voraussetzungen, um den Gebäudebestand klimaneutral zu machen. Nach wie vor sind die meisten Gebäude aber schlecht gedämmt, die Sanierungsquote ist zu niedrig, energetische Sanierungen weisen nicht die erforderliche Sanierungstiefe auf und effiziente Wärmepumpen sind erst in gut zwei Prozent der Wohngebäude verbaut[328]. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen, z.B. Vorschriften zu Energiestandards im Neubau, wirken nicht genug darauf hin, dass der Gebäudesektor seinen Beitrag zum Klimaschutz im Sinne des Pariser Abkommens leistet. Beispielsweise sind 2019 in knapp 50 Prozent der Neubauten von NRW nach wie vor fossile Hauptheizungsanlagen installiert worden.[329] Negativ auf den Energieverbrauch wirkt sich auch aus, dass die durchschnittliche Wohnfläche pro Person in NRW seit 2000 um 21 Prozent gestiegen ist[330], insbesondere weil immer mehr Menschen in Single-Haushalten und größeren Wohnungen leben – aber auch weil Senior*innen in ihren Wohnungen bleiben nachdem die Kinder ausgezogen sind, weil sie sich einen Umzug in eine kleinere Wohnung wegen der stark gestiegenen Mieten häufig nicht leisten können.

Das Ziel

Aufgrund der vorliegenden Daten ist es technisch möglich, dass der Gebäudesektor bis 2040 klimaneutral sein kann, auch wenn die Sanierung aller Gebäude vermutlich erst 2045 abgeschlossen sein wird.[331] Gleichzeitig ist es eine ebenso dringliche Aufgabe, ausreichend und zugleich bezahlbaren Wohnraum innerhalb kürzester Zeit zu schaffen. Ob beide Aufgaben gleichzeitig gelingen können, hängt von auskömmlichen Finanzmitteln und entsprechendem Personaleinsatz ab. Es ist wichtig zu identifizieren, wo zukünftig individuell und wo gemeinschaftlich für die Wärmeversorgung gesorgt werden sollte. Dafür ist kommunale Wärmeplanung die Voraussetzung, um die effizientere Nah- und

[328] Die Zahl scheint aber schnell zuzunehmen und könnte sich schon verdoppelt haben. Siehe BDEW (2019/1); EnergieAgentur (2020/4); BWP (2021/1)

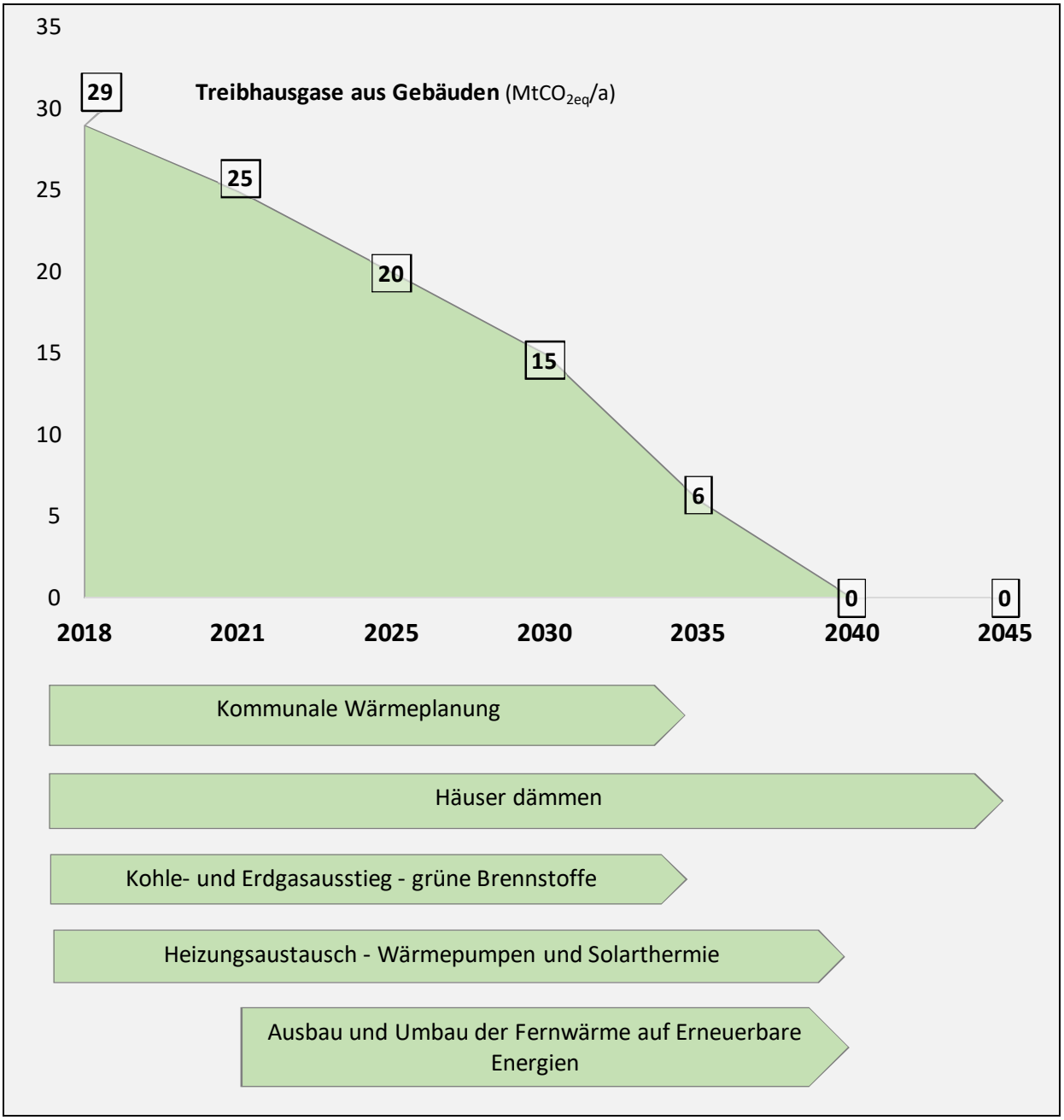
[329] Siehe Landtag NRW (2020/1)

[330] von 37,8 m² (2020) auf 45,8 m² im Jahr (2019), siehe IT.NRW (2001/1); IT.NRW (2020/2)

[331] Klimaneutralität ist hier wie folgt definiert: Die Beheizung, Kühlung und Warmwassererzeugung des gesamten Gebäudebestands verursacht in der Summe weder direkt (im Gebäude), noch indirekt (z.B. durch den Bezug von Strom aus nicht erneuerbaren Kraftwerken) Treibhausgase. Die Verbrennung von E-Brennstoffen setzt natürlich Treibhausgase frei, diese wurden vorher aber aus der Luft gebunden.

Fernwärme, immer dort wo es sinnvoll ist, umsetzen zu können. Dies ist insbesondere in verdichteten Räumen der Fall. Um Zeitverzögerungen und Fehlinvestitionen zu minimieren, sollte die kommunale Wärmeplanung mit Priorität vorangetrieben und unterstützt werden. Insbesondere die Sanierung der Häuser wird sehr teuer und macht vermutlich ein Drittel aller Kosten aus, die für die Umstellung der Gesellschaft auf Klimaneutralität notwendig sind. Um soziale Härten abzufangen werden großangelegte

Grafik 12: Zeitplan und Maßnahmen im Sektor Hauswärme



Förderprogramme in Kombination mit einer Vielzahl weiterer Maßnahmen notwendig sein. Bei der Transformation im Wärmesektor geht es um drei große Vorhaben:

- Austausch der Heizsysteme: Öl- und Gasheizungen müssen komplett ausgetauscht werden. Neue Heizungssysteme sind zum größten Teil Wärmepumpen und Solarthermie, in seltenen Fällen auch mit Wasserstoff oder synthetischem Gas betriebene Heizungsanlagen. Bioenergie wird aufgrund der beschränkten

Biomassepotenziale eine untergeordnete Rolle spielen (siehe im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« im Abschnitt »Bioenergie«).

- Energetische Sanierung der Häuser: Flächendeckende effiziente Dämmung der Gebäude ist sowohl für Energieeinsparungen als auch für den großflächigen Einsatz von Wärmepumpen und die Temperaturabsenkung der Wärmenetze entscheidend. Dabei gilt es, die Sanierungen gestaffelt nach den Emissionen bzw. dem Energiebedarf der Gebäude umzusetzen, also die ineffizientesten Gebäuden zuerst zu sanieren.
- Nah- und Fernwärme: Sie wird dekarbonisiert, gleichzeitig werden die Netze erweitert, insbesondere in urbanen Ballungsräumen, in denen der Einsatz von dezentralen Wärmepumpen nicht oder schwer möglich ist. Die Vorlauftemperaturen der Netze müssen gesenkt werden, um Energie einzusparen und damit Erneuerbare Energien und Techniken wie Solarthermie, Wasserwärmespeicher und Großwärmepumpen effizienter in die Fernwärme integriert werden können.

Die obige Grafik 12 stellt den groben Ablauf dar, wie der Wärmesektor klimaneutral werden kann. In den nächsten Abschnitten wird beschrieben, welche Schritte notwendig sind, um diese Vorhaben zu erreichen.

Rolle der Kommunen in der Wärmewende

Die Planung der Versorgung der Gebäude mit klimaneutraler Raumwärme und Warmwasser sollte als kommunale Daseinsvorsorge etabliert werden. Bisher liegt die Umstellung von fossiler Wärmeversorgung auf Klimaneutralität in den Händen und der Verantwortung der Gebäudebesitzer*innen. Diese können dabei jedoch hauptsächlich ihre eigenen Gebäude betrachten. Lösungen, die über das eigene Grundstück hinaus gehen, sind von einzelnen Bürger*innen schwer zu initiieren und umzusetzen. Daher bedarf es kurzfristig und flächendeckend einer kommunalen Wärmeplanung, insbesondere, um lokale Potenziale Erneuerbarer Energien zu identifizieren und zu erschließen, Vorranggebiete für Wärmenetze sowie Ausbau von Wärmenetzen festzulegen und die Sicherung von Flächen für Freiflächen-Solarthermieanlagen, Heizzentralen und Wärmespeichern zu ermöglichen. Deswegen sollte jede Kommune einen kommunalen

Wärmeplan erarbeiten und fortschreiben.[332] Diese Pläne sollten öffentlich gemacht werden, um Industrie, Wärmenetzbetreibern und privaten Gebäudeeigentümer*innen maximale Transparenz und Planungssicherheit zu geben.[333]

Bei der Wärmeplanung sollten die Gebiete Vorrang haben, in denen heute Fernwärme durch Kraftwärmekopplung aus Kohlekraftwerken geliefert wird. Diese müssen durch einen Mix aus BHKW (Biorestmasse oder künftig E-Brennstoffen), Großwärmepumpen, Großsolaranlagen unter Einbeziehung von industrieller Abwärme und Müllverbrennung ersetzt werden. Dazu sollte das Temperaturniveau der Netze abgesenkt werden. Dies erfordert Konzepte, die jeweils auf die örtlichen Bedingungen und Ressourcen abgestimmt werden.[334]

Das Hamburg Institut und die Prognos AG schlagen in ihrer Studie zur Perspektive der Fernwärme vor, dass zukünftig nur solche Maßnahmen gefördert werden, die mit dem erstellten kommunalen Wärmeplan vereinbar sind.[335] Weiterhin sollte dieser Prozess einem konstanten Monitoring des Landes unterliegen, damit festgestellt werden kann, in welchen Bereichen die Kommunen vermehrt Unterstützung benötigen und ebenfalls sichergestellt werden kann, dass die kommunalen Wärmepläne im Einklang mit landesweiten, nationalen und europäischen Klimaneutralitäts-Potenzialen stehen. Bei der kommunalen Wärmeplanung sollte aus der Erfahrung in Dänemark gelernt werden, das in diesem Vorhaben weit voraus ist. Aus diesen Erfahrungen zeigt sich beispielsweise, dass die Planung der klimaneutralen Wärmeversorgung unbedingt in den Kommunen, und nicht auf Landesebene stattfinden soll, damit die lokalen Bedingungen optimalen Einfluss finden und die notwendige Einbindung lokaler Akteur*innen gelingt.[336]

---

[332] Mindestens 41 Kommunen haben bereits einen kommunalen Wärmeplan. Siehe Landtag NRW (2020/7).

[333] Vergleiche Hamburg Institut (2020/1); KEA-BW (2021/1)

[334] ifeu (2019/2)

[335] Siehe Hamburg Institut (2020/1)

[336] Siehe Viegand Maagøe (2019/1)

Monitoring

Zurzeit verfügt die Landesregierung kaum über Kenntnisse zum Stand von Gebäudesanierungen, Aus- und Umbau der Wärmenetze, Temperaturniveaus der Wärmenetze und den Ausschöpfungsgrad lokaler Erneuerbarer-Potenziale. Damit sichergestellt werden kann, dass die eingeführten Unterstützungs- und Förderangebote bekannt sind, genutzt werden und zielführend sind, muss ein engmaschiges Monitoring des Fortschritts in der Gebäudewärme auf kommunaler Ebene eingeführt werden, dies sollte eng mit der Erstellung von kommunalen Wärmeplänen verknüpft werden. Erst dadurch ist es möglich, eingeführte Maßnahmen hinsichtlich ihrer Nutzbarkeit und Zieldienlichkeit zu evaluieren und entsprechend anzupassen. Dies gilt sowohl für kommunale Liegenschaften wie auch Wohngebäude, GHD und Industrie.

Anpassung an den Klimawandel

Auch wenn das 1,5-Grad-Ziel erreicht wird, wird das Wetter sich in Zukunft ändern. Die Trends der vergangenen Jahre werden sich fortsetzen und es wird häufiger zu Stürmen, Starkregen, Hitzeperioden und anderem Extremwetter kommen. Da im Gebäudesektor sehr viel Geld und Material investiert werden wird, ist es wichtig, von vornherein so zu bauen, dass die Gebäude an die klimatischen Bedingungen der Zukunft angepasst sind. Beispiele sind: Hochwasserschutz an Flüssen; Fassaden- und Dachbegrünung in Städten gegen Überhitzung im Sommer; Solaranlagen müssen so gebaut werden, dass sie auch starken Hagelkörnern und Stürmen standhalten. Die Klimafolgenanpassung und geeignete Maßnahmen für die Eigentümer sollen bei der Beratung zur energietechnischen Sanierung berücksichtigt werden.

Maßnahmen für kommunale Wärmeplanung und Monitoring

- Die kommunale Wärmeplanung und die Umsetzung der Energiewende im Wärmesektor wird zur Pflichtaufgabe für die Kommunen.[337] Dies erfordert gemäß Konnexitätsausgleich eine entsprechende Finanzausstattung. Dazu gehört auch das Monitoring und die Planung von Klimaanpassungsmaßnahmen.

[337] In Baden-Württemberg ist die kommunale Wärmeplanung für große Kommunen bereits verpflichtend und wird für kleinere Kommune vom Land gefördert.

- Zur Wärmeplanung gehört die Bestimmung des Wärmebedarfs, die Identifizierung des Sanierungspotenzials, die Nutzung lokal vorhandener Wärmepotenziale einschließlich der industriellen Abwärme.
- Im Rahmen der Erstellung der kommunalen Wärmeplanung entscheiden die Kommunen darüber, in welchen Teilgebieten Wärmenetze eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Option darstellen. Sie sichern Flächen für Heizzentralen, für saisonale Warmwasserspeicher und Freiflächensolarthermie für Fernwärme.
- Entscheidender Hebel ist die aufsuchende Beratung der Bürger*innen. Dafür ist die Schaffung von Beratungsstellen in allen Kommunen erforderlich. Diese übernehmen die Planung von Quartierskonzepten, die Erstellung von individuellen Sanierungsfahrplänen und Energieausweisen sowie Beratungsangebote für Eigenheimbesitzer*innen und Mieter*innen.[338] Die Landesregierung sollte die positiven Erfahrungen aus dem Innovation City-Prozess nutzen und den Aufbau dieser Beratungsangebote stärker unterstützen.
- Die aufsuchende Beratung erfolgt im Rahmen einer Priorisierungsliste. Dabei sollen Gebäude mit hohem wärmetechnischen Sanierungsbedarf, insbesondere mit Ölheizungen, Vorrang haben.
- Die Kommunen binden öffentliche Einrichtungen und auch private Gesellschaften (Stadtwerke, Sparkassen usw.) ein, um diese Aufgaben zu erledigen.
- Die Kommunen führen ein Monitoring durch und berichten dem Land. Das Land stellt den Kommunen ggf. Software-Lösungen zur Verfügung.
- Die Förderprogramme sollen mit der kommunalen Wärmeplanung koordiniert werden. Die Förderung von Maßnahmen soll daran gebunden sein, dass sie mit der kommunalen Wärmeplanung im Einklang steht.
- Die Wärmeplanung insgesamt und Maßnahmen für die jeweiligen Quartiere sollen von einer Bürgerbeteiligung der betroffenen Bürger*innen begleitet werden, um die Transparenz und Akzeptanz zu erhöhen. Dies betrifft auch die

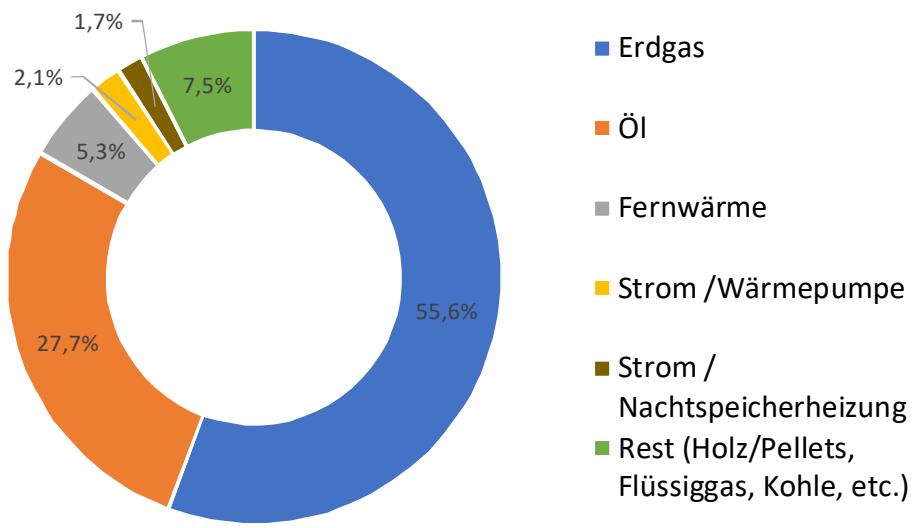
[338] Siehe NABU 2011/1

Planungen von Fernwärme, Heizzentralen, Wärmespeichern und Freiflächensolaranlagen.

Austausch der Heizungen

In Grafik 13 ist dargestellt, welche Energieträger derzeit in NRW zum Heizen verwendet werden. Dominierend sind Gasheizungen. Die höchsten CO_2-Emissionen erfolgen aber durch Ölheizungen.[339] Die anderen Heizungstypen haben bei der Sanierung keinen Vorrang. Das gilt auch für Nachtspeicherheizungen. Bis vor wenigen Jahren wurde gefordert, diese gegen Gasheizungen auszutauschen, da die Nachtspeicherheizungen im alten Strommix mit hohen CO_2-Emissionen verbunden waren. Diese Sichtweise gilt aber nun nicht mehr. Je grüner der Strom wird, desto mehr gilt, dass die Nachtspeicherheizungen weniger Emissionen verursachen als Gasheizungen. Daher sollten sie nicht mehr

Grafik 13: Energieträger zum Heizen in NRW



gegen Gasheizungen ausgetauscht werden. Sie werden erst dann, wenn das Haus wärmesaniert wird, gegen Wärmepumpen ausgetauscht. Das hat aber keinen Vorrang.

[339] Heizöl: 0,081 t CO_2/GJ, Flüssiggas: 0,066 t CO_2/GJ, Erdgas: 0,056 t CO_2/GJ (Quelle BMU) – ein Austausch einer Ölheizung gegen eine Flüssiggastherme bringt also eine Reduktion von knapp 20%.

Zukünftig wird die Mehrzahl aller Wohngebäude dezentral durch elektrische Wärmepumpen [340] beheizt und deren Warmwasser aufbereitet. Wir rechnen mit einer dezentralen Wärmeversorgung von 68 Prozent.[341] 32 Prozent der Wärme wird durch Fernwärme bereitgestellt (s. Abschnitt »Fern- und Nahwärme«). Bei der dezentralen Wärmeversorgung werden mit 77 Prozent dezentrale Wärmepumpen dominieren, daneben wird 10 Prozent der Wärme durch dezentrale Solarthermie-Anlagen bereitgestellt. Nur in Ausnahmefällen, z.B. in denkmalgeschützten Gebäuden, die eine andere Beheizung nicht zulassen, sollten noch Gasthermen mit synthetischen Brennstoffen eingesetzt werden. Gleiches gilt für Holzheizungen. Diese ermöglichen im Einzelfall eine klimaneutrale Beheizung mit einem gut lagerbaren und transportierbaren Energieträger – allerdings wird die Menge an nutzbarer Biomasse in Zukunft deutlich zurückgehen (vgl. im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« im Abschnitt »Bioenergie«). Daher wird Holz keinen wesentlichen Beitrag als Brennstoff leisten.[342] Dezentrale Heizsysteme, die mit Wasserstoff betrieben werden, werden eher eine untergeordnete Rolle spielen (siehe im Kapitel 2.2 »Varianten des Energiesystems: E-Brennstoffe und Importe«).

Dämmung und Elektrifizierung aller Heizsysteme könnten theoretisch den Energiebedarf im Gebäudebereich um etwa 80 Prozent senken.[343] Die notwendige Sanierungstiefe im Bestand ist in der Kürze der Zeit aber vermutlich nicht zu schaffen. Zudem sind Wärmepumpen nicht überall sinnvoll einsetzbar. Unsere Modellrechnung läuft daher auf eine Reduzierung des Energiebedarfs bis 2040 um 55 Prozent hinaus. Da Heizungsanlagen in der Regel alle 20 bis 30 Jahre erneuert werden, sollten in Zukunft nur noch

[340] Anstelle von elektrischen Wärmepumpen kommen auch Gaswärmepumpen, die mit erneuerbarem Wasserstoff oder Methan betrieben werden, in Frage. Ein gewisser Anteil an Gaswärmepumpen, ebenso wie BHKWs reduziert die extremen Stromnachfrage an kalten Wintertagen. Siehe dazu Abschnitt »Elektrizität, Speicher und Netze«.

[341] Zu den Modellrechnungen siehe das Wärmeflussdiagramm und die Erläuterungen in Anlage 30. Es handelt sich nicht um Prognosen, sondern um eine Modellrechnung, um die Plausibilität der Rechnungen darzustellen. Der tatsächliche Verlauf hängt von der Politik ab. Siehe zum Vergleich Agora Energiewende (2020/5) und Agora Energiewende (2020/7)

[342] Die Förderprogramme sollten entsprechend so angepasst werden, dass Holzheizungen nur dann gefördert werden, wenn das Gebäude keine andere klimaneutrale Heizung zulässt und nachgewiesen ist, dass es sich bei dem verwendeten Holz um einen Reststoff handelt.

[343] Siehe Quaschning (2016/1)

zukunftsfähige Heizungen installiert werden, um ein unnötig langes Festhalten an fossiler Technik zu vermeiden.

Damit Wärmepumpen optimal funktionieren, sollte beim Einbau das entsprechende Haus bereits gut gedämmt sein. Deshalb sollten die Maßnahmen – Dämmung und Einbau neuer Heizungssysteme – möglichst gleichzeitig stattfinden. Auch die Umstellung der Heizungen auf Niedertemperatur-Systeme (z.B. Wand-, Decken- oder Fußbodenheizungen) steigern den Wirkungsgrad der Heizungsanlagen erheblich. Dieses Ziel kann durch eine stärkere Erhöhung der Zuschussquoten bei gleichzeitiger energetischer Sanierung und Heizungsaustausch gefördert werden.

Wenn jedes Jahr 120.000 Wärmepumpen in Wohngebäuden in NRW eingebaut werden, könnte der Austausch der Heizsysteme bis 2040 abgeschlossen sein. Dies bedeutet, dass in etwa 3,1 Prozent der Wohngebäude jährlich eine Wärmepumpe installiert würde.[344] Da jedes Jahr sowieso ca. drei Prozent aller Heizungsanlagen erneuert werden, ist dies durchaus realistisch.[345] Des Weiteren sind in NRW ca. 32 Prozent der Heizungsanlagen in Wohnungen von Ein- und Zweifamilienhäusern und 36 Prozent der Heizungsanlagen in Wohnungen von Mehrfamilienhäusern älter als 20 Jahre, diese müssen sowieso in nächster Zeit ausgetauscht werden.[346]

Dabei sollten folgende Regeln zeitnah gelten, die maßgeblich durch die Bundesregierung gesetzt werden müssten: Es werden grundsätzlich keine Ölheizungen mehr installiert. Bei Öl-Zentralheizungsanlagen liegt das Durchschnittsalter in NRW bereits bei 19 Jahren. Diese sollten vorrangig ausgewechselt werden, da sie auf die Heizenergie bezogen den größten Treibhausgasausstoß verursachen.

In Neubauten, sanierten Häusern und Häusern mit bereits unterdurchschnittlichem Energiebedarf[347] sollen keine Gasthermen mehr installiert werden. Bei Häusern mit

---

[344] Siehe Anlage 30

[345] Siehe Unnerstall (2018/1)

[346] Im Vergleich dazu die Situation in Deutschland: Hier sind ca. 38% der Heizungsanlagen in Ein- und Zweifamilienhäuser und 42% der Heizungsanlagen in Wohnungen von Mehrfamilienhäusern älter als 20 Jahre. Siehe BDEW (2019/1)

[347] Das sind die Häuser ab Baujahr 1990 mit weniger als 130 kW/m^2*a Heizwärme.

mehr Energieverbrauch sind Erdgas-Thermen noch zulässig – diese Häuser sollten aber vorrangig saniert werden.[348] Parallel zum Einbau von Wärmepumpen sollten im gleichen Tempo auch 700.000 m² Solarthermie-Anlagen auf Wohngebäuden und GHD installiert werden.[349] Zum besseren Verständnis: Bei einem Dorf mit 100 Häusern müssten jedes Jahr auf 2 Dächer je 8 m² Solarthermie verlegt werden.[350]

Mit steigendem Treibhausgaspreis rechnen sich die Dämmung und Umstellung der Heizungen zunehmend auch ökonomisch, da der Wert des Hauses steigt und Energiekosten eingespart werden können. Dies gilt besonders dann, wenn sowieso Renovierungsarbeiten notwendig sind. Massive staatliche Unterstützung ist trotzdem notwendig, um die benötigte Umsetzungsgeschwindigkeit zu erreichen.

Dämmung der Häuser

Im derzeitigen Zustand der Gebäude wäre die Menge an erneuerbarem Strom, der benötigt würde, um sie klimaneutral zu heizen, zu groß – und zwar unabhängig von der eingesetzten Heiztechnologie.[351] Daher müssen zusätzlich zum Heizungsaustausch alle Häuser so gedämmt werden, dass sie möglichst wenig Energie verbrauchen. In NRW wurden 65 Prozent der Wohngebäude vor 1979, der ersten Wärmeschutzverordnung, gebaut und befinden sich energetisch meist in einem schlechten Zustand.[352]

---

[348] Wenn im Winter die Heizung ausfällt, kann man nicht warten, bis das Haus saniert ist.

[349] Zur Kombination von Solarthermie und Wärmepumpen siehe bauen.de (2021/1)

[350] 2013 erzeugten ca. 1.522.941 m² Solarthermie etwa 609 GWh Wärme (LANUV 2013/1). Wir rechnen mit einer Wärme-Erzeugung bei 14,83 Mio. m² dezentraler Solarthermie auf Wohngebäuden und GHD-Gebäuden in Höhe von 7 TWh in 2040. Siehe Anlage 30

[351] In schlecht gedämmten Häusern ist der Wirkungsgrad von Wärmepumpen herabgesetzt, da die Vorlauftemperatur der Heizung höher sein muss, sodass sie deutlich mehr Strom verbraucht. Wenn statt Wärmepumpen Öl- und Gasheizungen weitergenutzt und mit E-Brennstoffen betrieben werden sollten – was ebenfalls klimaneutral wäre – würde noch einmal mehr Strom zur Erzeugung der E-Brennstoffe benötigt. Dies liegt zum einen daran, dass Wärmepumpen effizienter sind, weil sie zusätzlich zur Energie für den Betrieb Umweltwärme nutzen (z.B. Faktor drei) und keine Verbrennungsverluste erleiden. Zum anderen entstehen bei der Erzeugung von erneuerbarem Gas und Öl auf der Basis von grünem Strom Umwandlungsverluste.

[352] Zum Vergleich: In Deutschland sind dies ca. 63% der Wohngebäude (siehe Anlage 28).

Die mögliche Entwicklung des Energiebedarfs von Raumwärme und Warmwasser ist in Tabelle 8 dargestellt. Um die Reduzierung der Emissionen bis 2030 zu erreichen, kommt es darauf an, die Häuser mit dem höchsten Energieverbrauch und den größten

Tabelle 8: Mögliche Entwicklung im Wärmesektor
(Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und GHD)[1]

Jahr	2019	2030	2040	2050
Treibhausgasausstoß in $MtCO_{2eq}$	27[1]	15[1]	0	0
Energiebedarf in TWh	219[1]	151	97	67
Sanierte Häuser oder Niedrig-energie-Neubauten	7,5%	44%	76%	91%
Anzahl an Wärmepumpen[1]	158.000[1]	1,5 Mio.	2,8 Mio.	2,9 Mio.

Emissionen zuerst zu sanieren. Eine ausführlichere Darstellung befindet sich in den Anlagen 29 und 30.

Je nach Gebäudeart, gibt es unterschiedliche Ziele:

- Bei zukünftigen Neubauten sind hohe Dämmstandards leicht über das Ordnungsrecht zu verankern. Es entstehen vergleichsweise geringe Mehrkosten für die Bauherr*innen. Es sollten deshalb in Zukunft nur noch hocheffiziente Häuser („Passivhäuser“) gebaut werden.[353] Dabei soll zusätzlich darauf geachtet werden, dass überwiegend ökologische Dämm- und Baumaterialien und Holzbauweise verwendet werden und die Flächenversiegelung minimiert wird.
- Nach der Sanierung von Bestandsgebäuden sollten nur noch zukunftsfähige Heizungsanlagen (siehe oben) oder ein Anschluss an ein Wärmenetz installiert werden.
- Circa 10 Prozent der Häuser können aus Denkmalschutz- oder anderweitigen Gründen nicht umfassend saniert werden und nicht den Niedrigenergiestandard

[353] Wir definieren Passivhaus hier als ein Gebäude, das weniger als 5 kWh/m²*Jahr an Endenergie zu Heizzwecken verbraucht. Als Mindeststandard setzen wir für Neubauten zwischen 2020-2025 KfW55 an, ab 2025 Passivhaus. Details siehe Anlage 29 bis 30

erreichen.[354] Trotzdem sollten geeignete Maßnahmen wie Austausch der Fenster oder Dachdämmung ergriffen werden. Gegebenenfalls können Denkmalschutzvorschriften zu Gunsten energetischer (Teil-)Sanierungen erleichtert werden.[355]

- Einige Häuser sind bereits gut saniert oder neu gebaut (ca. 7,5 Prozent). Wir rechnen damit, dass die Neubauten ab 2014 und die Häuser, die seit 2016 saniert wurden bis zum Jahr 2045 nicht mehr umfassend saniert werden.
- Reallabore wie Innovation City Bottrop zeigen, das seine Sanierungsquote über drei Prozent mit einem guten Konzept der aufsuchenden Beratung, ansprechenden Informationsmaterialien und Sanierungsfahrplänen realisierbar ist.[356] Dies gilt umso mehr, wenn sie mit finanzieller Förderung verbunden wird und ein wachsender CO_2-Preis die Rentabilität erhöht. Deswegen rechnen wir bei allen anderen Häusern (83 Prozent) mit einer jährlichen Sanierungsquote von drei Prozent. Insgesamt ist damit die energetische Sanierung bis 2045 abgeschlossen.[357] Der größte Handlungsbedarf besteht im Bereich der Ein- und Zweifamilienhäuser. Hier sind die Wohnflächen pro Person am größten und der Energieverbrauch am höchsten.[358]

Dadurch kann 2040 ein durchschnittlicher Energiebedarf für Raumwärme von 50 Kilowattstunden pro Quadratmeter im Jahr erreicht werden (gegenüber ca. 141 kWh/m²a heute[359]). Mehrfamilienhäuser können tendenziell bessere Werte erreichen, Einzelhäuser je nach Bausubstanz etwas schlechtere. Um diese Werte zu erreichen, ist in der Regel eine Komplettsanierung notwendig.[360] Es gibt sehr unterschiedliche Schätzungen der

[354] Vergleiche UBA (2014/1)

[355] Die Landesregierung hat dazu bereits einen Gesetzentwurf vorgelegt. Siehe Landtag NRW (2020/8)

[356] Siehe evolution2green (2018/1)

[357] Siehe Anlage 27 für die Berechnung der Sanierungsquote. Die derzeitige Quote energetischer Vollsanierungs-Äquivalente in NRW ist nicht bekannt, siehe Landtag NRW (2021/1)

[358] Siehe DENA (2016/1)

[359] Ohne Warmwasserversorgung - siehe DIW (2020/1)

[360] Isolierung von Dach, Heizungsrohren in Kellern, Außenwänden und der Kellerdecke, sowie Fenster mit Wärmschutzverglasung. Welche Dämmmaßnahmen im Einzelnen sinnvoll sind, ist von Haus zu Haus unterschiedlich.

Kosten der Gebäudedämmung.[361] Mit Sicherheit macht diese Aufgabe einen der größten Kostenfaktoren der Energiewende aus. Rechnet man die Schätzungen der Prognos AG auf NRW um, dann wären das 100 bis 140 Mrd. Euro zusätzliche Kosten. Bei einer staatlichen Förderquote von 20 bis 30 Prozent wären das jährlich ca. 1,5 Mrd. Euro über 25 Jahre.

Serielle Sanierungen

Ein wichtiges Instrument, um die Kosten der Gebäudesanierungen zu senken und die Sanierungsquote von drei Prozent zu erreichen, können serielle Sanierungen sein. Bei der seriellen Sanierung werden durch digitale Erfassung und standardisierte Prozesse die benötigten Bauteile für die Sanierung industriell gefertigt und innerhalb von vier bis sieben Tagen angebracht.[362] Dieses Vorgehen eignet sich aufgrund der Anbringungsweise vor allem für maximal dreistöckige Mehrfamilienhäuser mit einfachem Fassadenstil. Insbesondere ist die serielle Sanierung vorteilhaft für baugleiche Gebäude, da die industriellen Fertigungen der Bauteile dann fast identisch und nochmal günstiger werden.[363]

Neben den möglichen finanziellen Vorteilen dieser industriellen Herangehensweise an energetische Sanierungen, ergeben sich weitere beachtliche nicht-ökonomische Vorteile:[364]

- Extrem verkürzte Bauzeit, was zu einer geringeren Baubelastung bei Bewohner*innen und geringen Mietminderungen führt.
- Es wird kein Standgerüst benötigt, was zu weniger Verkehrsbehinderung führt und die Angst vor Einbrüchen vermeidet.
- Die zeitliche und arbeitstechnische Koordinierung verschiedener Handwerksbetriebe entfällt, was oft zu zeitlichem Verzug des Sanierungsvorhabens führt.

---

[361] Für eine Auflistung der unterschiedlichen Studien und deren Prognosen deutschlandweit, siehe MD (2020/2) in Anlage 26.

[362] Siehe Agora Energiewende (2020/6), Agora Energiewende (2020/7), DENA (2020/1), Matzig (2020/1)

[363] Siehe Matzig (2020/1)

[364] Siehe Matzig (2020/1), Agora Energiewende (2020/7)

- Es werden weniger Fachkräfte benötigt, was dem Engpass des Fachkräftemangels entgegenkommt.

Sanierungsstau

Es ist seit Jahren bekannt, dass die Sanierungsquote stark gesteigert werden muss. Allerdings gibt es Gründe, warum dies bisher nicht funktioniert hat:[365]

- Hausbesitzer*innen sind deutschlandweit im Schnitt 58 Jahre alt.[366] Ältere Menschen wollen und können oft nicht langfristig investieren.
- Bei schwankenden Energiepreisen lässt sich schwer einschätzen, nach wie vielen Jahren sich Investitionen lohnen.
- In Eigentümergemeinschaften scheitern Modernisierungen oft an widersprüchlichen Interessen. Hierbei ist die Neuerung im Gebäudeenergiegesetz, die die erforderlichen Mehrheiten für Sanierungen in Wohnungseigentümergemeinschaften betrifft, bereits von Vorteil.[367]
- Förderprogramme sind oft unübersichtlich und kompliziert.[368]
- Sanierungen sind sehr teuer.
- Es gibt zu wenige Facharbeiter*innen und diese kennen sich mit energetischen Sanierungen häufig zu wenig aus. Gleiches gilt für Energieberater*innen, deren Empfehlungen nicht immer die technischen Entwicklungen und wissenschaftlichen Ergebnisse der letzten Jahre berücksichtigen.
- Die bestehenden Vorgaben werden teilweise nicht umgesetzt, weil selten Kontrollen stattfinden.
- Im Falle solventer Hausbesitzer*innen sind nicht finanzielle Gründe entscheidend, sondern andere Motive wie z.B.: Wunsch nach Ruhe, keine fremden Handwerker im Haus haben zu wollen, oder Unlust, Zeit und Arbeit in die Organisation der Sanierung zu investieren.

---

[365] Siehe UBA (2014/1)

[366] Siehe BDH (2016/1)

[367] Siehe GEG (2020/1)

[368] Es gibt ca. 3.350 Förderprogramme, siehe Henger (2017/1)

- Das Dilemma zwischen Mieter*innen und Vermieter*innen und der Kostenaufteilung energetischer Sanierungen.

Soziale Herausforderungen: Ländliche Räume und Mietshäuser

In ländlichen abgelegenen Regionen mit abnehmender Bevölkerung gibt es besondere Hemmnisse. Hier leben viele ältere Menschen in großen, billigen und oft schlecht gedämmten Wohnungen. Es gibt selten Gas- oder Fernwärmenetze. Eine schlechte Dämmung erschwert den Einsatz von Wärmepumpen. Des Weiteren geben Banken schwerer Kredite in Regionen, in denen die Bevölkerungszahl zurückgeht.

Mieter-Vermieter-Dilemma

In Mietshäusern existiert eine andere Schwierigkeit. Dies ist in NRW besonders relevant, da lediglich 43,7 Prozent der Wohnungen von Eigentümer*innen bewohnt werden, im Vergleich zu 46,5 Prozent in Deutschland.[369] Denn in Mietshäusern ergibt sich das Problem, dass zunächst Vermieter*innen die Sanierungen zahlen, aber die Mieter*innen von der Sanierung profitieren. Dies geschieht, da die Nebenkosten durch sinkende Heizkosten geringer werden. Allerdings können Vermieter*innen viele energetische Modernisierungen zu acht Prozent auf die jährliche Kaltmiete aufgeschlagen. Dies nennt sich Modernisierungsumlage. In vielen Fällen ist die Erhöhung der Kaltmiete größer als die Heizkostenersparnis, sodass durch die Sanierungen die Miete doch steigt (die Sanierungen sind nicht warmmietneutral).

Ein interessanter Lösungsvorschlag für dieses Problem ist das sogenannte „Drittel-Modell“ (Staat, Mieter*innen, Vermieter*innen) von BUND und ifeu: Das Modell soll gewährleisten, dass sowohl Mieter*innen (durch eine neutrale oder sogar geringere Warmmiete) als auch Vermieter*innen (durch einen öffentlichen Zuschuss) von der energetischen Sanierung profitieren.[370]

Einen anderen Vorschlag wird unter dem Namen Warmmiet- oder Referenz-Temperatur-Modell diskutiert.[371] Dieser Vorschlag behandelt neben den Sanierungen das

[369] Siehe Statistisches Bundesamt (2020/1)

[370] Siehe ifeu (2019/1)

[371] Siehe Agora Energiewende (2020/1); Agora Energiewende (2020/2)

Problem, dass zurzeit der CO_2-Preis für Erdgas und Heizöl meist zu 100 Prozent von den Mieter*innen getragen wird. Dies wirkt sich zum einen negativ auf die ohnehin schon starke Mietbelastungsquote aus (28 Prozent im Jahr 2018 in NRW[372]), zum anderen wird dadurch die Lenkungswirkung der CO_2-Steuer auf die Vermieter*innen mit fossilen Heizungsanlagen verfehlt. In der Bundesregierung wird zurzeit diskutiert, die CO_2-Bepreisung zu gleichen Teilen auf Mieter*in und Vermieter*in zu verteilen.

Agora-Energiewende schlägt das Warmmietmodell mit Temperaturfeedback als Lösung vor. Dabei einigen sich Vermieter*innen und Mieter*innen auf eine Referenztemperatur, die in der Heizperiode gewährleistet sein muss. Die vermietende Partei übernimmt die Kosten, um die Räume auf diese Temperatur zu heizen. Heizen die Mieter*innen über diese Temperatur, tragen sie die zusätzlichen Kosten, heizen sie weniger, bekommen sie eine Rückzahlung. Führen Vermieter*innen energetische Sanierungen durch, sinken die Kosten, um die Referenztemperatur einzuhalten, womit sich die Investitionen lohnen. Für die Mieter*innen ändert sich nichts, womit die Sanierungen wärmeneutral bleiben. Damit belasten steigende CO_2-Preise die Vermieter*innen und entfalten somit eine Lenkungswirkung.[373]

Ein anderes Problem besteht darin, dass das Mietrecht und die Wärmelieferverordnung oft geradezu verhindern, dass Vermieter*innen eine bisher selbstbetriebene Heizungsanlage gegen eine von Dritten betriebene Anlage austauschen – also auf Fernwärme oder Contracting-Modelle umstellen. So werden die möglichen Anschlussquoten von Wärmenetzen nicht ausgenutzt und die Mieter*innen müssen die ständig anwachsenden Gas-Preise und die künftige CO_2-Bepreisung bezahlen.[374] Um diese vielfältigen Hindernisse für Sanierungen zu beheben, braucht es eine ausgewogene Mischung von Maßnahmen.

---

[372] Siehe Destatis (2019/3)

[373] Laut eines Gutachtens (Becker (2020/1)), schließt das Referenztemperaturmodell die Vereinbarkeit mit der Energieeffizienzrichtlinie der EU nicht aus, dafür müssen jedoch Möglichkeiten zur wohnungsscharfen Verbrauchserfassung geschaffen werden.

[374] Siehe z.B. Hamburg Institut (2020/1)

Maßnahmen für Wärmedämmung und Heizung

Beratung

- Hausverwalter*innen, Mieter*innen, Vermieter*innen und Eigenheimbesitzer*innen müssen gut informiert werden. Sie müssen individuelle Maßnahmen- und Finanzierungsangebote bekommen (siehe oben unter »kommunale Wärmeplanung«).
- Die positiven Erfahrungen von Innovation City sollen standardisiert als Förderangebot allen Kommunen angeboten werden. Das bisherige Rollout muss besser ausgestattet werden.

Ordnungsrecht

- Es bedarf klarer Vorschriften für Energiestandards und für die Wartung und Prüfung der Heizanlagen und der Wärmedämmung.
- Für Neubauten muss das Passivhaus zum Mindeststandard werden.
- Es gibt verbindliche Vorschriften für die Sanierung aller Mietobjekte, die Zustand und Alter berücksichtigen.
- Das Denkmalschutz-Recht des Landes sollte so angepasst werden, dass im vertretbaren Rahmen Dämmungen auch für denkmalgeschützte Gebäude möglich sind.
- Für jedes Haus muss ein Sanierungsfahrplan erstellt werden. Die Qualität der Fahrpläne muss per Verordnung geregelt werden und sollte finanziell gefördert werden.
- In Neubauten dürfen nur noch Wärmepumpen, Solarthermie und Fernwärme installiert werden. Das gleiche gilt für Häuser, die saniert worden sind oder die bereits einen niedrigen Energieverbrauch unter 100 kWh/m^2*a haben.
- Wärmepumpen haben ein großes Potenzial, um die Lastverteilung im Tagesrhythmus dem Angebot anzupassen. Dies muss genutzt und befördert werden (siehe dazu im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« im Abschnitt »Lastmanagement und Smart Grid«).

- Ölheizungen dürfen nicht mehr verbaut werden und müssen je nach Alter bis zu einem festen Datum – spätestens 2030 – ausgetauscht werden.[375]

Finanzielle Förderung

- Die Förderung der energetischen Sanierung durch die KfW und die NRW.Bank sollte so ausgebaut werden, dass in Verbindung mit der aufsuchenden Beratung und maßgeschneiderten Angeboten der Sparkassen die Sanierungsziele erreicht werden können. Benötigt wird ein Mix aus Steuer-, Zuschuss- und Kreditförderung mit attraktiven Konditionen und unbürokratischen Verfahren.
- Darüber hinaus sollte die steuerliche Absetzbarkeit von Sanierungen weiter verbessert werden, u.a. in Bezug auf die Höhe absetzbarer Aufwendungen.
- Um die serielle Sanierung voranzubringen, sollte diese in den nächsten Jahren so stark gefördert werden, dass dadurch der Aufbau der industriellen Fertigung von maßgeschneiderten Wärmedämmbauteilen (Außenfassade und Dach oder PV-Dach) angestoßen wird. Ziel ist eine schnelle Anfangsentwicklung dieses Industriezweiges, damit das serielle Sanieren wirtschaftlich rentabel zu Warmmietpreisen umgesetzt werden kann.[376]
- Es werden Kreditprogramme bereitgestellt, sodass die monatlichen Kosten für Zinsen und Tilgung plus laufender Heizkosten für die Eigenheimbesitzer*innen geringer sind als die heutigen Heizkosten. Damit die monatlichen Kosten gering sind, braucht es lange Laufzeiten und Tilgungszuschüsse. Entsprechende Programme für Mietshäuser gewährleisten, dass sowohl die Mieter*innen wie auch die Vermieter*innen von der Sanierung wirtschaftliche Vorteile haben. Ein Vorschlag von BUND und IFEU ist das sogenannte „Drittel-Modell“[377]: Das Modell soll gewährleisten, dass Kosten und Nutzen der Sanierung zu fairen Teilen

[375] Um dies umzusetzen, wird eine finanzielle Teilentschädigung erforderlich sein. Alternativ ist es auch denkbar, dass bis zur Sanierung des Hauses geeignete grüne Brennstoffe eingesetzt werden, wenn diese angeboten werden.

[376] Siehe Agora Energiewende (2020/7), DENA (2020/1)

[377] Siehe ifeu (2019/1)

auf Mieter*in, Vermieter*in und Staat aufgeteilt werden. Ebenfalls gilt es das Referenztemperatur-Modell der Agora Energiewende zu betrachten.[378]

- Entsprechende Regelungen bezüglich der CO_2-Bepreisung und Mietshäusern müssen gewährleisten, dass die Lenkungswirkung funktioniert es aber dennoch nicht zu sozialen Härten kommt.
- Der Einbau von Wärmepumpen, Solarthermieanlagen und der Anschluss an ein Wärmenetz müssen sich finanziell lohnen. Die Förderung des Einsatzes von Pelletkesseln und anderen Holzheizungen sollte hingegen auslaufen.

Sonstiges

- Ausbildung, Umschulung und Weiterbildung für einschlägige Handwerker*innen fördern. Dabei sollten Kooperationen mit wichtigen Akteur*innen, beispielsweise der Handwerkskammer, gezielt ausgebaut werden.
- In jeder größeren Stadt sollten in Kooperation mit den Handwerkskammern Modellhäuser für alle Techniken der Haussanierung gefördert werden.
- Der Beruf der Energieberater*in und deren regelmäßige Weiterbildung muss gesetzlich geregelt werden.
- Für den ländlichen Raum sollten spezielle Förderprogramme entwickelt werden.
- Für den Sektor GHD gelten grundsätzlich ähnliche Anforderungen wie für Wohngebäude. Allerdings sind die Gebäude (z.B. Werkshallen und Krankenhäuser) so unterschiedlich, dass jeweils spezielle Programme und Sanierungsfahrpläne entwickelt werden müssen.
- Öffentliche Gebäude haben eine Vorbildfunktion und sollten deshalb schnellstmöglich saniert werden, hierbei sollten Landes- und Bundesregierung die Kommunen adäquat unterstützen.

[378] Siehe Agora Energiewende (2020/1)

Fern- und Nahwärme

In NRW nimmt Fernwärme als Heiztechnologie im Vergleich zum Bundesschnitt einen geringfügig größeren Anteil ein. Etwa neun Prozent der Wohnungen in NRW werden so geheizt.[379] Circa ein Drittel der Energie stammt aus Wärmeauskopplungen in Kohlekraftwerken, in 40 Prozent der Fälle wird Gas eingesetzt, nur elf Prozent der Wärme wird erneuerbar erzeugt.[380] 2017 wurden in NRW 26,4 TWh Fernwärme verbraucht. Ein Großteil der Wärme (15 TWh) ging dabei an die Industrie, weitere 2,6 TWh gingen an den GHD-Sektor und 8,7 TWh an private Haushalte.[381]

Neben großen, städtischen Wärmenetzen gibt es immer mehr kleine Nahwärmenetze. Diese werden in der Regel durch kleine Blockheizkraftwerke (BHKW) oder durch die Wärme von Biogasanlagen versorgt. Bei den restlichen Anlagen dienen meist Biomasse (Holzhackschnitzel oder Pellets) oder Müll als Brennstoff. Die derzeitige Datenlage zur leitungsgebundenen Wärmeversorgung ist insbesondere auf kommunaler Tiefe kaum vorhanden. Dies erschwert die Planung und Koordinierung des Ausbaus, der Temperaturabsenkung und der Dekarbonisierung der Fernwärme erheblich und macht die Dringlichkeit flächendeckender kommunaler Wärmeplanungen als Grundlage für die Transformation zu einer klimaneutralen Nah- und Fernwärmeversorgung deutlich.

Die Zukunft der Fernwärme

Damit Fernwärme klimaneutral ist, muss die Erzeugung auf Erneuerbare Energien umgestellt werden. Dies betrifft zunächst den Ersatz der Wärmeerzeugung aus Kohlekraftwerken, die bis 2030 komplett abgeschaltet werden sollten (vgl. im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« im Abschnitt »Beschleunigter Kohleausstieg«). Die Gasheizkraftwerke müssen in der nächsten Dekade auf Wasserstoff bzw. E-Methan umgestellt werden.[382] Großwärmepumpen und Solarthermieanlagen werden weitere Anteile der Wärmeerzeugung in der Fernwärme übernehmen.

---

[379] Siehe BDEW (2019/1)

[380] Siehe LANUV (2020/4), Blatt 18

[381] Siehe LANUV (2020/4), Blatt 19

[382] Gasturbinen, die nur Strom produzieren, werden für die Notversorgung bei kalten Dunkelflauten in Reserve gestellt, siehe Kapitel „Stromversorgung“.

Insbesondere für bestehende Fernwärmenetze ist die Transformation von zum Großteil fossilen, großen Wärmequellen hin zu dezentraleren, klimaneutralen Wärmequellen eine große Herausforderung, die mit Hochdruck geplant und umgesetzt werden sollte. Grundsätzlich kommen für eine klimaneutrale Fernwärmeerzeugung in Frage:

- Groß-Solarthermie: Vorteile: Technik ist vorhanden, kein Energiebedarf; Nachteile: Erzeugungsspitzen im Sommer, Flächen müssen in der Nähe zum Verbraucher zur Verfügung stehen, kann nicht in Hochtemperaturnetze einspeisen
- Groß-Wärmepumpen:[383] Vorteile: gute Energieeffizienz; Nachteile: erhöhen insbesondere im Winter den Strombedarf. Die Effizienz von Großwärmepumpen kann noch einmal gesteigert werden, wenn sie die Wärme aus warmem Grubenwasser in ehemaligen Bergwerken und Sümpfungswasser aus Braunkohletagebauten oder warmes Wasser aus Kläranlagen zieht. Potenziale dafür sind in NRW vorhanden.
- Geothermie, die entweder auf so warme Wasseradern zugreift, dass diese direkt eingespeist werden kann oder in Kombination mit Wärmepumpen genutzt wird.[384] Vorteile: Umweltwärme, die ganzjährlich genutzt werden kann; Nachteile: sehr teuer zu erschließen, Potenzial nicht überall vorhanden.
- Industrielle Abwärme: Vorteile: kein zusätzlicher Energiebedarf; Nachteile: Bisher oft nicht rentabel, hoher Bürokratischer Aufwand, Risiko besteht, dass die Wärme durch Veränderung im Unternehmen schwindet oder das Aufkommen durch effizientere Produktionsverfahren sinkt. Durch steigende Treibhausgaspreise wird sich die Rentabilität vermutlich verbessern. Abwärmequellen sind z.B. die Stahlindustrie und andere große Industrien sowie die Elektrolyseure der entstehenden Wasserstoffwirtschaft.
- BHKW die grünen Wasserstoff, Müll, Biogas und E-Methan als Brennstoffe nutzen: Vorteile: Können relativ flexibel eingesetzt werden, insbesondere im Winter sind

[383] In Wien versorgt eine Großwärmepumpe in Verbindung mit Abwärme 25.000 Haushalte. Siehe Wien Energie (2019/12)

[384] Siehe EnergieAgentur.NRW (2021/3)

sie stabile Wärme- und Stromlieferanten; Nachteile: Im Vergleich zu Wärmepumpen geringe Energieeffizienz.

- Tauchsieder, die mit grünem Strom betrieben werden:[385] Vorteile: Sie können Stromspitzen schnell und kostengünstig nutzen, indem sie Wasser erhitzen, das dann in Wärmespeichern gespeichert wird; Nachteile: Im Vergleich zu Wärmepumpen geringe Energieeffizienz.
- Holzhackschnitzelanlagen oder Pelletkessel: Vorteile: Sie können im Winter als Ergänzung eingesetzt werden, gut lagerbarer Brennstoff; Nachteile: Holzschnitzelanlagen sind träge und daher nicht flexibel, Holz ist sehr begrenzt, daher dürfen nur Reststoffe wie lokal verfügbarer Grünabfall wie kommunaler Baumschnitt oder Sägemühlenspäne verwendet werden.

Diese Technologien können in Zukunft folgendermaßen kombiniert werden:

Im Sommer werden Groß-Solarthermie und Großwärmepumpen die Wärmenetze füllen. Die Wärme wird im Sommer hauptsächlich für die Warmwasser-Bereitung benötigt. Ein Teil der Wärme kann auch gespeichert werden (siehe Abschnitt »Wärmespeicher«).

Das ganze Jahr über kann Wärme aus Geothermie und warmen Grubenwasser gewonnen werden. Je nach der Wassertemperatur in der Erde kann das Heizungswasser über Wärmetauscher direkt erwärmt werden, oder die Erdwärme wird in Kombination mit Großwärmepumpen eingesetzt. Das Potenzial für tiefe Geothermie ist in Nordrhein-Westfalen beschränkt – wir rechnen mit 2 TWh im Jahr. Im Bereich des warmen Grubenwassers beschreibt die Potenzialstudie des LANUV unter Einsatz von ca. 266 GWh Strom im Jahr für Großwärmepumpen und Spitzenlastergänzung eine nutzbare Wärme von 1120 GWh im Jahr 2050.[386] Eine Alternative zur Erdwärme kann auch die Nutzung der Flüsse und Seen als Gegenpol von Wärmepumpen sein. Noch besser eignen sich dafür die Kanalisation sowie das Abwasser aus Kläranlagen, da die Temperaturen insbesondere auch im Winter höher sind.[387]

---

[385] Siehe Stadtwerke Kiel (2021/1) unter »Elektrodenkessel«

[386] Siehe LANUV 2018/1

[387] Siehe Hamburg Institut 2020/1

Ebenfalls ganzjährig können die Müllverbrennung und die Abwärme aus der Industrie genutzt werden. Hier gibt es noch große ungenutzte Potenziale.[388] Bei der industriellen Abwärme ist jedoch vorrangig die Abwärme *innerhalb* des Industriebetriebs zu nutzen, sodass Prozesse, die geringere Temperaturen benötigen, die Abwärme innerbetrieblich aus höhertemperaturigen Prozessen nutzen (Kaskadennutzung). Des Weiteren kann mit Hilfe von Wärmepumpen die Temperatur der Abwärme wieder gehoben werden. Aus Gründen der Leitungsverluste und des vertragsrechtlichen Aufwands sollte Abwärme erst in Fernwärmenetze geleitet werden, wenn alle Möglichkeiten der internen Weiternutzung der Wärme ausgeschöpft sind. Die Potenzial-Studie vom LANUV gibt ein technisch verwendbares Abwärmepotenzial von 44 TWh bis 48 TWh im Jahr an.[389] Allerding dürfte davon der größere Teil innerbetrieblich im Rahmen der Kaskadennutzung eingesetzt werden. Deswegen rechnen wir in dieser Studie vorsichtig mit einem Abwärmepotenzial von 10 TWh im Jahr 2040.

Im Winter steigt der Wärmebedarf und die Erzeugung durch Solarthermie nimmt ab. Deswegen werden dann (Block-)Heizkraftwerke eingeschaltet, die mit grünem Wasserstoff, E-Methan oder Bio-Reststoffen[390] betrieben werden.

Neue Blockheizkraftwerke sollten möglichst flexibel gebaut sein, sodass sie Gasgemische mit unterschiedlichem Wasserstoffanteil nutzen können, damit sie auch dann noch einsetzbar sind, wenn in Zukunft mehr Wasserstoff genutzt werden wird. Gaskraftwerke werden künftig aus mehreren Heizkraftwerkblöcken bestehen, anstatt aus einem großen Reaktor. Das ermöglicht flexible Einspeisungen ins Wärmenetz mit gutem Wirkungsgrad.[391]

Als Alternative zur Stromerzeugung durch Motoren kommen für die Blockheizkraftwerke in Zukunft auch Brennstoffzellenanlagen in Frage (siehe im Kapitel »Verkehr« im Abschnitt »Brennstoffzelle«).

---

[388] Siehe LANUV 2019/1

[389] Siehe LANUV (2019/2)

[390] Die Verwendung von Holz und anderer Biomasse sollte insgesamt jedoch zurückgehen. Siehe Abschnitt »Bio-Energie«

[391] Siehe Energiedepesche (2019/1)

Alle KWK-Anlagen werden künftig vor allem dann in Betrieb genommen, wenn sowohl die Wärme als auch der Strom genutzt werden können. Das gilt auch für Biogasanlagen. Die Nutzung kann entweder durch eine direkte Verwendung von Strom und Wärme geschehen, oder die Energie wird in einem Stromspeicher und/oder Wärmespeicher gespeichert (siehe Abschnitt »Wärmespeicher«).

Ausbau der Wärmenetze

Eine Reihe von Studien geht davon aus, dass in Zukunft bis zu doppelt so viele Häuser mit Fernwärme geheizt werden, sodass künftig die benötigte Wärmemenge für Gebäude zu über 30 Prozent aus Wärmenetzen stammt.[392] Fernwärme hat gegenüber der Wärmeerzeugung in jedem einzelnen Haus Vorteile, allerdings ist es teuer und aufwändig, die Netze zu verlegen. Ein wichtiges Argument für den Ausbau der Fernwärme ist, dass in Großstädten aus Platzgründen der Einsatz von dezentralen Wärmepumpen und Solarthermie nicht immer möglich ist. Dies betrifft vor allem die dichtbebaute Rhein-Ruhr-Metropole mit ca. zehn Mio. Einwohner*innen. Im Ruhrgebiet besteht auch eine Nähe zu großen Abwärmequellen und ein guter Anschluss an das zukünftige Wasserstoffnetz.

Weitere Argumente für Fernwärme sind

- die bessere Effizienz von großen Anlagen (Solarthermie, Wärmepumpen)
- die Einspeisemöglichkeit von tiefer Geothermie und industrieller Abwärme
- die Möglichkeit, verschiedene klimaneutrale Erzeugungsanlagen saisonal und ökonomisch optimal zu kombinieren, was in dieser Vielzahl in dezentralen Anlagen nicht möglich ist.

Neben den großen städtischen Fernwärmenetzen kommt es zukünftig vermutlich vermehrt zu kleinen Wärmenetzen in kleineren Siedlungen oder Ortschaften. Dort ist es oft einfacher, Netze zu bauen, da der Tiefbau, welcher einen entscheidenden Anteil der Investitionskosten eines Wärmenetzes ausmacht, unter dörflichen Straßen günstiger ist. Außerdem bieten kommunale Nahwärmenetze eventuell für kleine Orte eine bezahlbare und attraktive Alternative zum Heizen mit Einzelheizungen in jedem Haus.

[392] Siehe Fraunhofer IWES (2015/1), FVEE (2014/1), Hamburg Institut (2020/1)

Gegen einen Ausbau von Fernwärme sprechen: Die hohen Investitionskosten und die Wärmeverluste. In welchem Umfang sich solche Investitionen schließlich lohnen, hängt auch davon ab, wie gut die angeschlossenen Häuser gedämmt sind. Je besser die Häuser gedämmt sind, desto weniger Wärme wird pro Haus abgenommen. Allerdings kann dieser Effekt von einer steigenden Anschlussquote überlagert und übertroffen werden.[393]

In unserem Modell rechnen wir damit, dass der Anteil der Fern- und Nahwärmenetze ca. 30 Prozent der Wohngebäude und Gebäude im GHD-Sektor versorgt und halten uns damit z.B. an die Prognosen des Hamburg Instituts.[394] Letztlich müssen Kommunen entscheiden – am besten einhergehend mit der Erstellung eines kommunalen Wärmeplans – in welchen Teilgebieten Wärmenetze eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Option darstellen.

Fernwärmeschiene Rhein-Ruhr

Mit der Fernwärmeschiene Rhein-Ruhr[395] befindet sich ein Großprojekt in Planung, mit dem große Teile des Ruhrgebiets und der Rheinschiene in ein ergänzendes Fernwärmenetz eingebunden werden sollen. Dieses Projekt dient insbesondere der Nutzung von Abwärme aus industrieller Produktion (insbesondere Stahlindustrie und verschiedenen Anlagen der Grundstoffchemie) und von Müllverbrennungsanlagen. Unter der Maßgabe, die Klimaneutralität bis 2040 in NRW zu erreichen, muss das dem Projekt zugrundeliegende Gutachten aus dem Jahre 2013 im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit und die Nutzung regenerativer Wärmequellen überarbeitet und aktualisiert werden. Die notwendigen Investitionen in Netzverbindungen und regenerative Wärmequellen sollten bis 2035 planerisch und baulich abgeschlossen sein.

Kalte Nahwärmenetze

Des Weiteren können insbesondere in Neubaugebieten kalte Nahwärmenetze[396] genutzt werden, die leitungsgebunden ca. 10°C bis 20°C warmes Wasser zu den einzelnen Gebäuden bringen. Dort nutzen dezentrale Wärmepumpen dieses über die Jahreszeiten

[393] Siehe KEA-BW (2021/1)

[394] Siehe Hamburg Institut (2020/1)

[395] Siehe Anlage 31

[396] Siehe Naturstrom (2021/1)

relativ konstant warme Wasser als Umgebungswärme. Kalte Nahwärmenetzte in Neubaugebieten haben den Vorteil, dass die Verlegung der Rohre deutlich günstiger ist, wenn zeitgleich alle anderen Tiefbauarbeiten erfolgen und eignet sich insbesondere, wenn eine verfügbare Wärmequelle in der Umgebung vorhanden ist (z.B. Abwasser, Kläranlage, niedrig-Temperatur Abwärme). Kalte Nahwärmenetze haben jedoch den Nachteil, dass sowohl das Wärmenetz installiert und betrieben werden muss als auch zusätzlich individuelle Wärmepumpen.

Netztemperatur - Umstellung der Heizsysteme

Eine weitere Herausforderung für Wärmenetzbetreiber, ist die Senkung der Betriebstemperatur.[397] Alte Wärmenetze nutzen nicht selten noch Vorlauftemperaturen bis 110°C. Diese Netze sind mit hohen Verlusten verbunden. Auch können diese Temperaturen mit Solarthermie und Wärmepumpen nur schwer erreicht werden. Deshalb müssen die Netze im Zuge der Abschaltung von fossilen Großkraftwerken und dem Ersatz durch klimaneutrale Wärmequellen auf niedrigere Temperaturen umgestellt werden. Dies ist auch eine Erfahrung, die aus der dänischen Entwicklung abgeleitet werden kann.[398]

In den Gebäuden, in denen die Heizkörper nicht überdimensioniert wurden, müssten am besten großflächige Heizkörper eingebaut werden, damit der Raum auch bei niedrigeren Vorlauftemperaturen ausreichend erwärmt wird. Dazu eignen sich am besten Fußboden-, Wand- oder Deckenheizkörper. Dies verdeutlicht, warum die energetische Sanierung der Gebäudehülle (Dämmung) in etwa zeitgleich mit dem Austausch der Heizungsanlagen einhergehen sollte.

Bei Vorlauftemperaturen unter 60°C müssen weitere Techniken eingesetzt werden, da das Warmwasser aus Gründen der Hygiene mindestens eine Temperatur von 60°C Grad haben muss. Dies kann beispielsweise dadurch erreicht werden, dass das Wasser direkt, bevor es in die Armatur gelangt, durch einen kleinen Tauchsieder auf 60°C erhitzt wird, bevor es dann in der Armatur wieder mit kalten Wasser gemischt wird, damit nicht 60°C-warmes – also für Menschen zu heißes – Wasser aus dem Hahn fließt. Eine Alternative besteht in der völligen Trennung von Heizung und Warmwasser. Warmwasser kann

[397] Siehe Energiedepesche (2019/2)

[398] Viegand Maagøe (2019/1)

dann ganzjährig durch Solarthermie oder Wärmepumpen vor Ort produziert werden, während die Niedertemperatur für das Heizen über Fernwärme bezogen wird.

Wärmespeicher

Das größte Problem der zukünftigen Wärmeversorgung sind die Schwankungen im Energiesystem, die durch die Nutzung von Erneuerbaren Energien zunehmen werden. Solarthermie-Anlagen erzeugen Wärme nur dann, wenn die Sonne scheint. Und Wärmepumpen sollten vor allem dann laufen, wenn der Strompreis günstig ist (siehe im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« im Abschnitt »Lastmanagement und Smart Grid«). Im Abschnitt »Strom, Speicher und Netze« wurde schon dargestellt, wie der erhöhte Strombedarf für die Wärmepumpen im Winter sichergestellt werden kann. Zusätzlich werden Wärmespeicher benötigt, die die Wärme speichern können, bis sie verbraucht wird.

Diese Wärmespeicher haben mehrere Funktionen. Sie können Wärme speichern, die mit Solarthermie erzeugt wird und später genutzt werden soll. Sie können auch dafür sorgen, dass Wärme zu günstigen Zeitpunkten produziert wird (z.B. mit Wärmepumpen, wenn viel Strom vorhanden ist) und dann genutzt werden kann, wenn Bedarf ist. Außerdem kann auch Strom teilweise in Form von Wärme gespeichert werden.[399] Die Hauptaufgabe der Speicher besteht jedoch darin, die Lastspitzen für die Wärmepumpen im Winter zu reduzieren. Der künftig aus Wärmespeichern beigetragene Anteil der Wärme wird von den Studien auf etwa 20 Prozent geschätzt.[400]

Viele Haushalte werden deshalb kleine Wärmespeicher bekommen. Diese bestehen aus gut isolierten Wassertanks. Des Weiteren werden große saisonale Warmwasserspeicher gebraucht, die durch ihr großes Fassungsvolumen die Wärme länger halten können. Es gibt bereits zwei Dutzend Großprojekte im Betrieb. Neue Speichertypen mit Metallen und Mineralien sind in der Entwicklung.[401]

---

[399] Eine neue Technologie sind z.B. Stahlspeicher (siehe Enkhardt (2018/1)). Diese machen vor allem Sinn, wenn Strom und Wärme abgerufen werden sollen, da Stahlspeicher als reine Stromspeicher keinen guten Wirkungsgrad haben.

[400] Siehe LUT (2019/1)

[401] Siehe Solites (2019/1)

Eine weitere vielversprechende Alternative sind Eisspeicher, die schon praktisch im Einsatz sind. Sie werden stets zusammen mit Wärmepumpen eingesetzt. Diese entziehen dem Wasser die sogenannte Kristallisationswärme, wodurch dieses von oben vereist – aber unten stets über null Grad bleibt.[402] Die Kristallisationswärme in einem Liter Wasser entspricht der Wärme, die man benötigt, um ihn auf 80°C zu erwärmen. Diese Speicher sorgen dafür, dass die Wärmepumpen immer im optimalen Bereich laufen können und der Wirkungsgrad bei Minustemperaturen nicht schlechter wird. Sie haben weiterhin gegenüber unterirdischen Wärmespeichern den Vorteil, dass sie nicht gedämmt werden müssen und daher keine Verluste erleiden. Im Gegenteil: Wenn das Eis taut, ist das ein Energiegewinn.

Maßnahmen für die Fern- und Nahwärmeversorgung

- Die Ausweisung der Fernwärmegebiete ist Bestandteil der kommunalen Wärmeplanung, die mit Hochdruck und flächendeckend voran getrieben werden muss. Dort, wo es Fernwärme- oder Nahwärmeangebote gibt, muss die Anschlussquote erhöht werden, damit die Netze optimal genutzt werden. Dabei sollen die Wärmepreise attraktiv gestaltet werden.
- Die Kommunen sollen von der bestehenden Möglichkeit Gebrauch machen, den Anschluss an Nah- und Fernwärmenetze festzuschreiben und auf der Grundlage von Wärmeplanung durchzusetzen. Ergänzend sollen in Fernwärmegebieten dezentrale Heizungsanlagen nur gefördert werden, wenn sie in Übereinstimmung mit dem Fernwärmekonzept stehen (ergänzende Solarthermie oder ergänzende Wärmepumpen bei Niedertemperaturnetzen).[403]
- Weiterhin sollte für jedes Wärmenetz jeweils geprüft werden, ob die Vorlauftemperatur gesenkt kann. In Gebieten, bei denen die Vorlauftemperatur abgesenkt wird, muss die energetische Sanierung der Gebäude damit abgestimmt und gefördert werden, damit die Haustechnik auf die Temperaturabsenkung eingestellt wird.

[402] Siehe Viessmann (2019/1)

[403] Siehe Hamburg Institut (2020/1)

- Es sollten kurzfristig rechtliche und finanzielle Rahmenbedingungen geschaffen werden, damit die Fernwärmenetze und Nahwärmenetze mit Erneuerbaren Energien versorgt werden können, um hohen Anteile von Wärme aus fossilen Großkraftwerken ersetzen zu können. Das wichtigste Instrument sind dafür die Treibhausgaspreise. Des Weiteren braucht es eine Reform der Strompreissystematik oder der Förderung von Großwärmepumpen, damit deren Potenziale und dadurch nutzbare Umweltwärme (Wasser in Klärwerken, Grubenwasser, Flüsse, Seen, mitteltiefe Geothermie etc.) ausgeschöpft werden können.[404]
- Die Rahmenbedingungen sollten so gestaltet werden, dass bei Verbrennungsprozessen stets Wärme und Strom zugleich produziert werden und dass die kombinierten Wärmekraftwerke nur dann laufen, wenn Wärme benötigt wird. Dies gilt auch für Biogas-Anlagen.
- Finanzielle Anreize für den Bau von Wärmespeichern, verbunden mit Nah- oder Fernwärme sollten geschaffen werden.
- Es sollten Rahmenbedingungen geschaffen werden, dass die Heizkosten von Fernwärme nicht höher liegen als bei einer Eigenversorgung.

[404] Die derzeitige betriebliche Förderung von (Gas)-KWK Anlagen im KWKG ist so hoch, dass Großwärmepumpen ökonomisch kaum konkurrieren können. Zusätzlich fallen für Großwärmepumpen in den meisten Fällen die üblichen Umlagen (EEG) an, was deren Wirtschaftlichkeit erschwert. In Dänemark gibt es aus diesen Gründen Sonderregelungen für die Strompreise für Großwärmepumpen. Anzudenken wäre eine Förderung des Betriebs von Großwärmepumpen pro erzeugte kWh einzuführen, bzw. zu erweitern und gleichzeitig die betriebliche Förderung von (Gas)-KWK Anlagen zu reduzieren, damit ein Anreiz besteht, KWK-Anlagen zu errichten, die auf geringe (ergänzende) Betriebsstunden ausgelegt sind. Siehe z. B. Hamburg Institut (2020/1). Mit der 2019 eingeführten *Bundesförderung Effiziente Wärmenetze* wurde ein erster Schritt in diese Richtung gegangen.

Sektor 4 Verkehr

In diesem Kapitel werden der Personen- und der Güterverkehr diskutiert. Das schließt alle Verkehrsmittel des Straßenverkehrs vom Schwerlastwagenverkehr bis zu Fahrrädern und E-Scootern, weiterhin Schiffs-, Flug- und Bahnverkehr sowie Fußgänger*innen mit ein. Auch Spezialfahrzeuge wie Baufahrzeuge und Traktoren sind hierin enthalten.

Kernpunkte

Mobil zu sein ist ein Grundbedürfnis der Menschen. Deshalb soll Mobilität so sicher, schnell und komfortabel wie möglich und dabei klimaneutral sein. Damit Wege kürzer und Verkehr reduziert wird, müssen die räumlichen Strukturen verändert und Lebensbereiche näher zusammengebracht werden. Für die Vermeidung von Treibhausgasen durch viele kleine Stellschrauben gibt es einige zentrale Aufgaben:

- So viel Verkehr wie möglich sollte überflüssig gemacht oder auf klimafreundliche Verkehrsmittel verlagert werden. Dies kann teilweise durch die Preise beeinflusst werden. Die entscheidenden Hebel zur Veränderung des Verkehrsverhaltens sind aber:
    - die Umgestaltung der Städte, um die Bereiche Wohnen, Arbeiten, Bildung, Handel, Freizeit wieder näher zusammen zu bringen und beispielsweise eine Verlagerung auf den Radverkehr zu erleichtern, sowie
    - der Ausbau der Bahn für den Güter- und Personenverkehr, des öffentlichen Nahverkehrs und die Stärkung der Nahmobilität
- Mobilität kann klimaneutral werden. Dafür ist es notwendig, dass die Verkehrsmittel nicht mehr wie heute fossile Brennstoffe benutzen, sondern anders angetrieben werden. Konkret bedeutet dies:
    - Der PKW-Verkehr wird weitgehend auf E-Autos umgestellt, dazu muss die erforderliche Ladeinfrastruktur geschaffen werden
    - LKW fahren entweder elektrisch – im Fernverkehr auf einem Teil der Autobahnen mit elektrischen Oberleitungen – oder sie werden mit E-Brennstoffen (Wasserstoff oder PtX-Brennstoffen) betrieben.
    - Die Bahnstrecken werden weitgehend elektrifiziert

  - Schiffe und Flugzeuge werden künftig vorrangig mit flüssigen synthetischen E-Brennstoffen betrieben.
- Die benötigten E-Brennstoffe können teilweise in Deutschland, auch in NRW hergestellt werden, oder sie werden importiert. Dafür müssen gesetzliche und technische Voraussetzungen geschaffen werden.

Ausgangslage

Bundesweit ist der Verkehrssektor für 21 Prozent der Treibhausgasemissionen verantwortlich.[405] Seit 1990 haben die Emissionen im Verkehrssektor nur geringfügig abgenommen. Zwischen 2012 und 2017 sind sie sogar deutlich gestiegen.[406] Erst 2018 erfolgte ein Rückgang um 5,6 $MtCO_{2eq}$. Den Grund hierfür vermutet das Umweltbundesamt in gestiegenen Kraftstoffpreisen.[407] Alle anderen Einsparungen durch verbesserte

Tabelle 9: Treibhausgasemissionen des Verkehrs[408]

(Anteil des Verkehrs an den Treibhausgasen)

	Deutschland	NRW	Anteil NRW an D
Flugverkehr (davon Inlandsflüge 0,2%)	3,5%	2,6%	21%
Schiffsverkehr mit Seefahrt	0,6%	0,8%	37%
davon Binnenschifffahrt	0,2%	0,5%	76%
Bahn	1%	0,7%	20%
PKW	11%	8%	21%
Leichte und schwere LKW sowie Busse	6%	3%	14%
Gesamt	**21%**	**15%**	**20%**

[405] Siehe MD (2020/1)

[406] Siehe SRU (2017/1); Öko-Institut (2016/1); UBA (2019/4)

[407] Im Vergleich zum Vorjahr (Benzin: +7 Prozent, Diesel: +11 Prozent). Diese führten zu einer Vermeidung von Fahrten bzw. dem Verlagern des LKW-Betankens ins Ausland. Siehe UBA (2019/5)

[408] Siehe Anlage 1

Techniken wurden durch ein Mehr an Verkehr und größere Fahrzeuge (insbesondere SUVs) wieder aufgehoben. Die größten Quellen im Verkehrssektor sind der PKW-Verkehr, der Güterverkehr mit LKW und der Flugverkehr.

In NRW verursacht der Verkehr nur 15 Prozent der Emissionen, da die Emissionen im Energie- und Industriesektor im Vergleich der Bundesländer überproportional hoch sind. Dazu trägt aber auch bei, dass der Anteil des LKW-Verkehrs geringer ist als in anderen Bundesländern. Ein Grund dafür sind vermutlich die kürzeren Entfernungen zwischen den Städten. Hinzu kommt, dass in NRW mehr Güter mit dem Schiff transportiert werden. Der Anteil der Binnenschifffahrt am Gütertransport ist in NRW dreimal so hoch wie in Deutschland insgesamt.

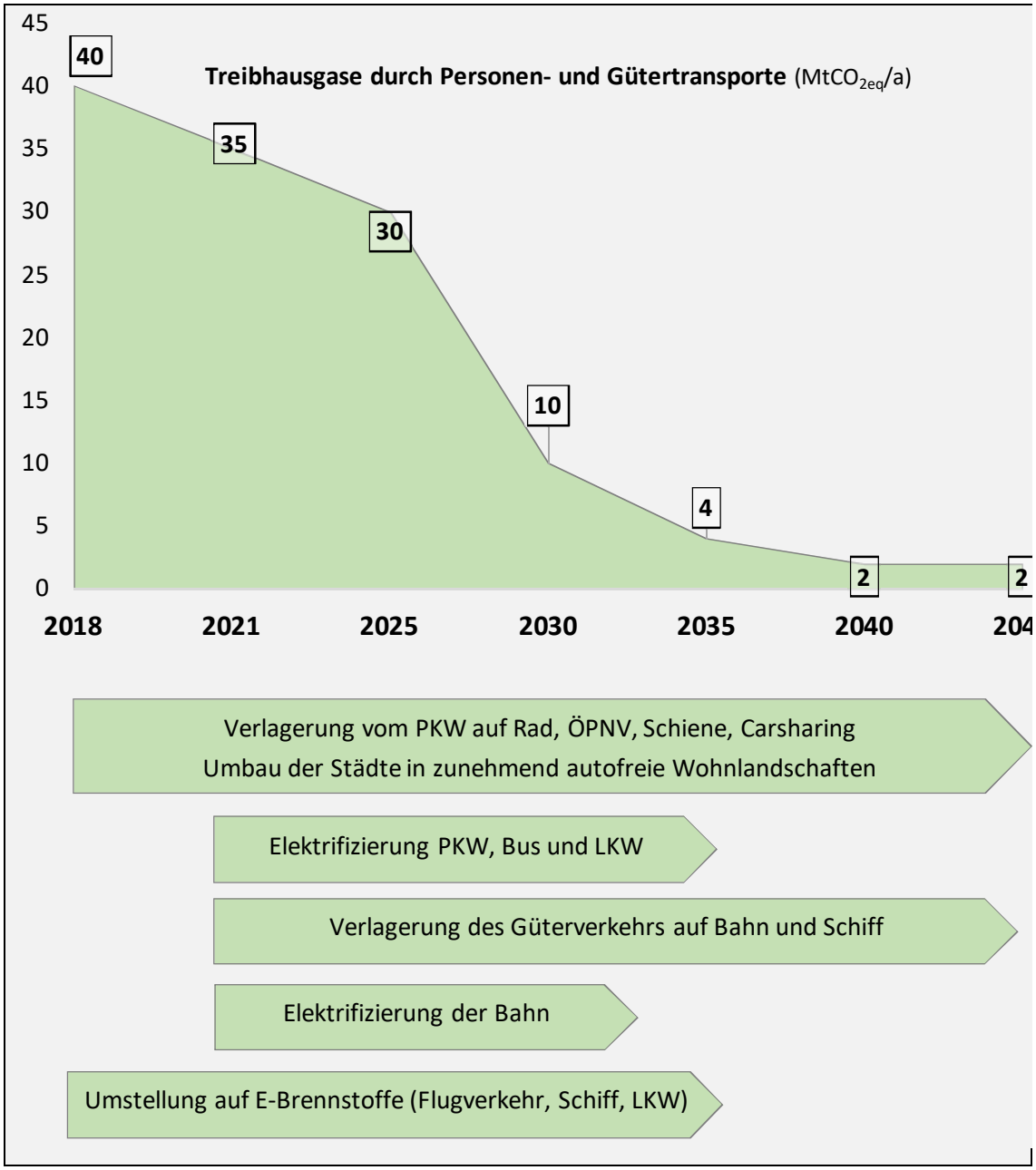
Dagegen liegen die Emissionen der PKW pro Kopf ziemlich genau im Bundesdurchschnitt. Die Emissionen des Luftverkehrs haben wir NRW anteilmäßig entsprechend der Bevölkerungsgröße zugerechnet, da eine gesonderte Berechnung für NRW nicht sinnvoll ist. Ebenso sind wir mit dem internationalen Schiffsverkehr verfahren.

Das Ziel

Die größten Veränderungen sind im Straßen- und Flugverkehr notwendig. Um Wege zu verkürzen oder überflüssig zu machen, müssen Wohnen und Arbeiten wieder stärker zusammen gedacht und -gelegt werden. Die Erfahrungen mit der Corona-Pandemie zeigen, dass in vielen Bereichen Homeoffice die Regel werden könnte. Dadurch könnte eine Menge Verkehrsleistung eingespart werden. Auch der Ersatz von Dienstreisen und Meetings durch Videokonferenzen – vor allem international – würde viel Verkehr vermeiden. Wege, die nicht vermieden werden können, sollen auf energie- und klimafreundliche Verkehrsmittel verlagert werden, zum Beispiel vom Auto auf die Bahn oder in der Stadt auf das Fahrrad und den ÖPNV. Der übrige Verkehr muss klimaneutral werden, indem die Technik umgestellt wird. Dabei geht es vor allem um Elektrifizierung.

In Grafik 14 ist dargestellt, wie die Emissionen sich entwickeln können und was die wichtigsten Maßnahmen im Verkehr sind. Aufgrund der analysierten Studien erscheint es technisch möglich, dass der Verkehr bis auf den Flugverkehr bereits 2035 nahezu treibhausgasfrei werden kann. Ob dies gelingt, hängt unter anderem auch davon ab, wie viel Verkehr es in Zukunft geben wird und ob rechtzeitig und in ausreichendem Umfang synthetische Treibstoffe zur Verfügung stehen. Da die Verfahren zur Herstellung

Grafik 14: Zeitplan und Maßnahmen im Sektor Verkehr



von grünem Kerosin noch in der Entwicklung sind[409], kann sich die Umstellung im Luftverkehr verzögern. Die Vorhersagen der Studien gehen bei den Verkehrsentwicklungen weit auseinander (siehe Abschnitt »Verkehrsentwicklung«).[410] Es bleiben dann nur noch ein Zehntel Restemissionen.[411]Die Restemissionen werden vor allem durch Flugzeuge verursacht, selbst wenn diese mit erneuerbaren Treibstoffen betankt werden (siehe Abschnitt »Flugverkehr«).

Verkehrsentwicklung

Entwicklungen im Personenverkehr

Die Studien für Deutschland schätzen die Entwicklung im Personenverkehr sehr unterschiedlich ein. Vor der Corona-Pandemie ging die Mehrzahl davon aus, dass die Menschen im Jahr 2050 etwa genauso viel unterwegs sind, wie heute. Mit der Veränderungen der Arbeitswelt durch Homeoffice und Digitalisierung könnte sich auch der Verkehr reduzieren. Trotzdem müssen Maßnahmen ergriffen werden, um den Verkehr zu vermindern oder gar einen weiteren Anstieg zu verhindern. [412]

Im Nahverkehr hat der Wandel in einigen Städten bereits begonnen. Dort wird investiert, um das Wohnen und Leben in der Stadt attraktiver machen. Dazu trägt bei, die Wege zur Arbeit, zum Einkaufen und in der Freizeit zu reduzieren oder auf das Fahrrad und den öffentlichen Verkehr zu verlagern.

Auch im Regional- und Fernverkehr wird ein Teil der Reisenden vom Auto auf die Bahn umsteigen. Dazu muss diese regelmäßig fahren, bequem sein und attraktive Preise anbieten.

Anders sieht es beim Flugverkehr aus. Zwar wird auf kurzen Strecken unter 800 Kilometern von vielen Studien eine Verlagerung vom Flugzeug auf die Schiene für möglich und sinnvoll erachtet – vor allem wenn die Bahn auch wieder Nachtzüge anbietet.

---

[409] Die großtechnische Herstellung von Kerosin zu akzeptablen Preisen wird ilen Studien für realistisch gehalten, aber sie ist noch nicht realisiert.

[410] Siehe Öko-Institut (2016/1), Wuppertal (2017/1), UBA (2017/1), SRU (2017/1)

[411] Siehe in MD (2020/2) die Anlage 7

[412] Siehe in MD (2020/2) die Anlagen 5 und 23

Problematisch bleibt jedoch der internationale Flugverkehr, der nach den Prognosen weiter zunehmen wird.

Insgesamt wird die Entwicklung jedoch sehr unterschiedlich gesehen. Nach einer Studie des Wuppertal Instituts geht der Anteil des PKW bereits bis 2035 auf 52 Prozent

Abschätzungen des Energieverbrauchs des Verkehrs in NRW für 2035

Wir gehen davon aus, dass der Verkehrssektor bis auf den Flugverkehr bis 2035 treibhausgasneutral werden kann. Die Prognosen liegen weit auseinander. Die folgenden Annahmen dienen zur Rechnung des Energieverbrauchs und sind zur Sicherheit großzügig kalkuliert (zur Begründung der untenstehenden Annahmen siehe Anlagen 32, 33 und im folgenden Text).

Personenverkehr: Verkehrsleistung bleibt konstant

Güterverkehr: Die Verkehrsleistung steigt um 30%

Flugverkehr: Es wird vermutlich zu weiteren Steigerungen der Verkehrsleistung kommen.

Schiffsverkehr: International leichte Steigerung, Binnenverkehr Verdoppelung

- **PKW:** Rückgang der Zahl der PKWs um 15% bis zum Jahr 2035 auf 8,7 Mio. PKW.
  - E-Autos: 80% = 6,9 Mio. E-Autos, Strombedarf 17 TWh/a
  - PtL (grünes Benzin, Diesel o.a.): 20% = 1,8 Mio. PKW, Energiebedarf 10 TWh/a
  - Wasserstoff/Brennstoffzelle: Unbedeutend
- **LKW:** 60% elektrisch – Fernverkehr mit Oberleitung, Strombedarf 10 TWh/a
  - 20% PtL => 8 TWh/a, 20% Brennstoffzelle mit Wasserstoff => 6 TWh/a
- **Bahn:** Verdoppelung bis Verdreifachung des Bahnverkehrs: Energiebedarf insgesamt 5 TWh/a
- **Flugverkehr:** Einschließlich internationaler Verkehr – pro Einwohner*in gerechnet
  - PtL (voraussichtlich grünes Kerosin): 15 TWh/a
  - Strom/Wasserstoff: Unbedeutend
- **Schiffsverkehr:** Zuordnung des internationalen Verkehr zu NRW pro Kopf
  - PtL (voraussichtlich Ammoniak oder Methanol): 8 TWh/a international + 6 TWh/a Binnenschifffahrt
  - Strom/Wasserstoff: Unbedeutend

zurück, während Bahn und Bus ihren Anteil an der Transportleistung mehr als verdoppeln und das Fahrrad seinen Anteil auf acht Prozent verdreifacht. Andere Quellen bewerten die Umsteigeeffekte viel geringer – so rechnet der BDI nur mit einer

Verlagerung vom PKW auf die Bahn von sieben Prozent.[413] Aber selbst, wenn die Prognose des Wuppertal Instituts eintritt, bleibt die Durchsetzung von treibhausgasneutralen PKW-Verkehr die zentrale Aufgabe der Verkehrspolitik (siehe Abschnitt »PKW«).

Entwicklungen im Güterverkehr

Der Güterverkehr wird nach Einschätzung fast aller Studien bundesweit bis 2035 etwa um ein Drittel steigen.[414] Das mengenmäßig wichtigste Verkehrsmittel für Gütertransporte sind Schiffe, die 62 Prozent aller deutschen Transporte bewältigen.[415] Das gilt nicht nur für Transporte von und zu anderen Kontinenten. Auch 40 Prozent des Güterverkehrs innerhalb der EU erfolgt über das Meer. Binnenschiffe spielen generell nur eine geringe Rolle. Da bildet NRW mit einem Anteil von 16 Prozent eine Ausnahme.[416] Obwohl Schiffe die größte Transportleistung bewältigen, stoßen sie vergleichsweise wenig Treibhausgase aus.[417] Dennoch müssen sie auf E-Brennstoffe umgestellt werden (siehe Abschnitt »Schiffsverkehr«).

Das derzeit zweitwichtigste Verkehrsmittel in Europa für Güter sind LKW.[418] Diese setzen in Deutschland zehnmal mehr Treibhausgase frei als Schiffe – in NRW trotz der starken Binnenschifffahrt das 2,5-fache.[419] Ein Teil des LKW-Verkehrs kann verlagert werden. Hauptsächlich bietet sich hierfür die Bahn an[420]. In NRW kommt als Alternative

---

[413] Siehe BDI (2018/1)

[414] Siehe SRU (2012/1), Öko-Institut (2018/1), DLR (2016/1). Das Wuppertal Institut nimmt nur 12% Wachstum bis 2035 an, was aber mittlerweile bereits erreicht ist (siehe Wuppertal 2017/1)). Die LUT-Studien rechnet für Europa sogar mit einer Verdoppelung des Verkehrs – siehe LUT (2019/1).

[415] Siehe BMVI (2018/1); Deutschland werden von allen Transporten von und zu deutschen Häfen jeweils die Hälfte der Transporte bzw. der Emissionen zugerechnet – die andere Hälfte wird dem Land des Ziel- oder Herkunftshafens zugeordnet.

[416] Siehe Anlage 38

[417] Allerdings ist das Schiffsdieselöl immer noch extrem unrein, sodass erhebliche andere Schadstoffe emittiert werden. E-Brennstoffe sind auch in dieser Hinsicht erheblich umweltfreundlicher.

[418] Siehe Anlage 34

[419] Der NRW zuzurechnende Anteil der Seeschifffahrt und der der Binnenschifffahrt in NRW.

[420] Siehe Wuppertal (2017/1), Busche (2019/1); Heinrich Böll Stiftung (2019/1)

auch die Binnenschifffahrt in Frage. Wegen des doppelten Umladens der Güter im kombinierten Verkehr rentiert sich die Bahn finanziell unter derzeitigen Bedingungen erst für Strecken über 300 Kilometer. Für geeignete Verbindungen halten die Studien auch eine weitere Verlagerung von LKW-Langstreckenverkehren auf die Seeschifffahrt wegen der guten Hafenanbindung großer Teile Europas für möglich

Strukturwandel, Urbanität und Nahverkehr

Heute haben PKW einen Anteil von fast 80 Prozent an den Transportleistungen im Personenverkehr. Der Klimaschutzplan NRW von 2015 hält eine Reduzierung dieses Anteils auf unter 40 Prozent für möglich.[421] Ein ganz wesentlicher Faktor dafür ist der Umbau der Städte. Mehr Busse und Schienennahverkehr[422], mehr Fahrradwege, Fahrradstraßen und Spielzonen machen das Wohnen und Leben in der Stadt attraktiver. Carsharing ersetzt einen Teil der eigenen PKW und spart Parkraum. Elektrofahrräder sind eine Alternative zum Auto auf dem Weg zur Arbeit, zum Einkaufen und in der Freizeit. In Städten wie Düsseldorf und Münster werden schon heute nur noch ein Drittel oder weniger aller Wege und auch weniger als die Hälfte aller zurückgelegten Strecken mit dem privaten PKW zurückgelegt.[423]

Die Rolle des ÖPNV

Der Ausbau des ÖPNV ist ein wichtiger Teil der Verkehrswende. Heute macht der Schienennahverkehr (einschließlich S-Bahn und Nahverkehr in der Regionalbahn) ca. 80 Prozent des ÖPNV aus, der Bus-Verkehr nur 20 Prozent.[424] Zurzeit liegt der Anteil des gesamten ÖPNV in NRW nur bei 8,5 Prozent. Vergleiche zeigen, dass in den Städten der Anteil des ÖPNV auf über 25 Prozent steigen kann, der Anteil an den Personenkilometern sogar auf 40 Prozent.

---

[421] Siehe MKULNV (2015/1) und Anlage 33

[422] Wir verstehen unter Schienennahverkehr sowohl Straßenbahn, Stadtbahn, U-Bahn, Hochbahn, S-Bahn und Nahverkehr in der Regionalbahn.

[423] Siehe Anlage 33

[424] Siehe die Grafik 33 in Anlage 37 und Dörrbecker (2021/1)

Auch auf dem Lande können ÖPNV-Anteile von über 20 Prozent erreicht werden. Vorgeschlagen wird zum Beispiel eine Mobilitätsgarantie. Insbesondere durch flexible Angebote des „Linienbedarfsverkehrs“ (Sammeltaxis, Rufbusse) anstelle fester Buslinien können auch Orte erreicht werden, wo ein Linienbetrieb sich nicht lohnt. Dies erfordert auch einen neuen rechtlichen Rahmen.[425] Ein wirklicher Durchbruch ist auf dem Lande aber erst mit autonom fahrenden Angeboten zu erwarten (siehe im Abschnitt »Selbstfahrende Autos = Autonomes Fahren«).

Der Stadtbahn- und Straßenbahnverkehr

In den Großstädten kann der Anteil von Stadt- und Straßenbahnen nach Wegen auf 20 bis 30 Prozent und nach Personenkilometern auf 30 bis 50 Prozent steigen.[426] In Städten wie Köln und Düsseldorf kann dieses Ziel schon in wenigen Jahren erreicht werden. Dazu ist ein massiver Ausbau des Schienen-ÖPNVs erforderlich, der Busverkehr spielt dabei nur eine begrenzte Rolle. Die Streckenlänge in NRW müsste dazu fast verdoppelt werden.[427]

Tabelle 10: Modal Split im Personenverkehr[428]

	Wege		**Personenkilometer**	
	heute	Zielszenario	heute	Zielszenario
Zu Fuß	25%	35%	3%	6%
Fahrrad	10%	25%	3%	10%

[425] Eine Änderung des Personenbeförderungsgesetzes wird gerade im Bundestag diskutiert (siehe Spiegel (2021/1)).

[426] Siehe Anlage 33

[427] Die heutige Streckenlänge des SPNV in NRW beträgt ca. 900 km (ohne S-Bahn und Regionalbahn). Allein zur Erhaltung dieses Netzes beträgt der Investitionsbedarf bis 2031 aufgrund des gewachsenen Investitionsstaus über 3 Mrd. Euro. Dazu kommt 1 Mrd. Euro für die Erhaltung der U-Bahn-Tunnel (siehe Landtag NRW (2019/1)). Zum Vergleich: München hat einen ÖPNV-Anteil von 20% mit 180 km U-Bahn und Straßenbahn-Strecken und einem weit ins Umland reichenden S-Bahn-System. Geplant ist ein Ausbau um 40 km, um einen ÖPNV-Anteil von 30% zu erreichen. Auf NRW umgerechnet bedeutet das eine Verdoppelung der SPNV-Strecken.

[428] Siehe Anlage v2

MIV	55%	25%	76%	39%
ÖPV	10%	15%	14%	35%
Flugzeug	<0,1%	0,1%	4,5%	9%

Die Anzahl der Wege für heute ist geschätzt. Das Zielszenario stammt aus dem Klimaschutzplan für NRW von 2016.

Bislang wird dem Bau von teuren U-Bahnen häufig der Vorrang gegeben, während die Straßen überproportional Flächen in Anspruch nehmen. Eine unterirdische U-Bahn verursacht beim Bau aber das zehnfache an Emissionen wie eine oberirdische Stadtbahn. Sie kostet zudem mehr und braucht beim heutigen Energiemix und der Zementproduktion über 100 Jahre, bis sich die CO_2-Emissionen amortisiert haben.[429] Ein Ausbau macht also nur Sinn, wenn durch Beseitigung von Engstellen ein Vielfaches an Verlagerungseffekten durch die Netzwirkung ausgelöst wird.

Insbesondere im Ruhrgebiet ist noch viel zu tun, auch vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Spurweiten. Durch die Vielzahl benachbarter Städte überschreiten viele Verkehrsbewegungen die Stadtgrenzen. Dafür wird fast überwiegend der PKW genutzt. Von 2012 bis 2019 ist der Anteil des ÖPNV von 16 Prozent auf 10 Prozent zurückgegangen.[430]

Ergänzende Maßnahmen sind attraktive Ticket-Systeme. Dazu wird diskutiert bzw. erprobt: Das solidarische Bürger-Ticket (siehe Wuppertaler Model), das Ein-Euro-Ticket, der kostenfreie ÖPNV, Job-Tickets, Semesterticket und vieles andere mehr.[431]

Mittlerweile bewegt sich etwas: Die Bundesmittel für Investitionen des ÖPNV (im Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz – GVFG) betrugen seit Jahren ca. 330 Mio. Euro. Ab 2020 wurden sie auf 665 Mio. Euro verdoppelt, ab 2021 auf 1 Mrd. Euro/a angehoben. Ab 2025 sollen sie nochmal auf 2 Mrd. Euro verdoppelt werden (Klimaschutzprogramm).[432] Die gesamten Bundesmittel für die Förderung des ÖPNV betragen zurzeit

[429] Siehe Dittmer (2020/1), Anlage 37

[430] Siehe Ruhr-Guide (2020/1)

[431] Siehe Landtag (2020/1),

[432] Siehe BMVI (2019/3)

neun Mrd. Euro jährlich. Die Erreichung der angestrebten Veränderung des Modal Split wird jedoch erhebliche zusätzliche Mittel erfordern.

Grundsätzlich ist das Verlagerungspotenzial in NRW größer als in anderen Flächenländern, da die große Bevölkerungsdichte die Verlagerung auf ÖPNV und Fahrrad erleichtern. Mit der erfolgreichen Volksinitiative „Aufbruch Fahrrad“ und dem daraus abgeleiteten NRW-Fahrradgesetz wird ein Anteil an den durch das Fahrrad zurückgelegten Wegen von 25 Prozent angestrebt. Wie groß das Verlagerungspotenzial sein kann, zeigen die heute schon existierenden enormen Unterschiede. So liegt der Anteil des PKW-Verkehrs an den zurückgelegten Wegen in Essen bei 58 Prozent, dagegen in Münster nur noch bei 29 Prozent. Umso erfreulicher ist es, dass ausgerechnet Essen eine Reduktion des Autoverkehrs um fast 60 Prozent bis 2035 plant.[433]

Umbau der Städte

Entscheidend für eine solche Entwicklung ist nicht nur die Qualität der alternativen Verkehrsmittel. Genauso wichtig wird der Umbau der Stadtteile in attraktive Wohn- und Lebenslandschaften sein, in denen wieder Fahrräder und Fußgänger*innen dominieren.[434] Orientierung sollte hier das Konzept der „15-Minuten-Stadt“ sein. Dies sieht vor, dass von den Quartieren aus alle wichtigen Einrichtungen innerhalb kurzer Zeit erreichbar sein müssen. Einkaufsmöglichkeiten, Ärzt*innen, Kindergärten, Schulen und Behörden sollten im Umkreis von 15 Minuten zu Fuß oder per Fahrrad liegen. Eine familienfreundliche Stadtgestaltung macht die Stadt attraktiver und reduziert damit auch den Pendlerverkehr. Ein Indiz für diese Entwicklung ist auch die rückläufige Zahl von Führerscheinprüfungen von Jugendlichen in Großstädten.[435] Damit einher geht auch ein Rückgang der Zahl der PKWs und des Flächenbedarfs für Straßen und Parkplätze. In Münster liegt die Zahl der PKW mit 374 pro 1000 Einwohner*innen bereits um 20 Prozent unter dem Bundesschnitt.[436]

---

[433] Siehe Anlage 33

[434] Siehe City of Copenhagen (2016/1)

[435] Siehe Anlage 35

[436] Siehe Anger (2012/1)

Fahrradverkehr

Einen erstaunlichen Wandel hat ausgehend von den Beispielen einiger Kommunen in den Niederlanden und in Dänemark, insbesondere von Kopenhagen, die Fahrradpolitik erfahren. In den letzten Jahren gab es in 43 deutschen Städten Bürgerbegehren und Bürgerentscheide für eine fahrradgerechte Stadt. Davon fanden allein zwölf Begehren und ein Volksentscheid in NRW statt. Die Stadt Marl zum Beispiel hat daraufhin beschlossen, acht Millionen Euro in den Ausbau der Fahrradinfrastruktur zu stecken.[437]

Entscheidend für die Steigerung des Modal-Split sind der Ausbau der Fahrradwege, insbesondere von Fahrradstraßen, von Fahrradständern und Mobilstationen an den ÖPNV-Knoten. Der überregionale Fahrradverkehr spielt quantitativ eine geringe Rolle. Diese Investitionen sind hoch rentabel, da Fahrradfahrende weniger Fläche und kaum Parkraum benötigen und häufiger Angebote des ÖPNV, der Bahn und des Carsharing nutzen. Insbesondere hat sich bewährt, Stadtteile und Quartiere zwar für PKW erreichbar zu halten, aber die Querverbindungen nur über ÖPNV und Fahrrad bzw. Fußwege zu ermöglichen. Groningen hat auf diese Weise bereits einen Verkehrsanteil für Fahrradverkehr in der Innenstadt von 60 Prozent und im gesamten Umland von 30 Prozent erreicht. [438]

Ein zusätzlicher Impuls für diese Entwicklung wird durch die rapide anwachsende Nutzung von Pedelecs ausgelöst, besonders bei der Fahrt zur Arbeit. Die zurückgelegte Wegstrecke pro Fahrt des Fahrrades liegt üblicherweise bei bis zu 7,5 Kilometer – die des Pedelec bei bis zu 15 Kilometer – also doppelt so weit. Erste Schätzungen gehen davon aus, dass 2030 bereits ein Viertel der Wege und 40 Prozent der mit Fahrrädern zurückgelegten Strecken auf Pedelecs entfallen wird.[439]Laut Forderung der Volksinitiative „Aufbruch Fahrrad“ soll der Anteil der Wege am Modal Split im Fahrradverkehr kurzfristig auf 25 Prozent ansteigen. Im Rahmen der Anstrengungen zur Klimaneutralität könnte der Radverkehr einen Modal Split-Anteil von 35 Prozent und eine Gesamtverkehrsleistung von ca. 10 Prozent übernehmen.

---

[437] Siehe Anlage 33, Radio Vest (2020/1)

[438] Groningen ist eine Universitätsstadt mit 200.000 Einwohner*innen. Allein zur Universität fahren täglich 20.000 Fahrradfahrer*innen. Siehe Zukunft Mobilität (2013/1)

[439] Siehe MKULNV (2015/1)

Maßnahmen zur Reduzierung und Verlagerung des städtischen PKW-Verkehrs

Um das Verlagerungspotenzial in den Städten auszuschöpfen, werden in den Studien folgende Maßnahmen empfohlen:

- Einrichtung von Fußgängerzonen, Beruhigung der Viertel durch Ausschluss des Durchgangsverkehrs, spürbare Gebühren für Parkplätze, auch für Anwohnerparkplätze.
- Es sollten ca. 400 Mobilitätspunkte an zentralen Punkten in den Städten in NRW eingerichtet werden. Sie sind Schnittstellen für den Wechsel der Verkehrsmittel (ÖPNV, Fahrrad-Station mit Verleih, Car-Sharing).
- Einrichtung von Fahrradstraßen, -streifen und -ständern sowie von Fahrradstationen an Bahnhöfen und Mobilitätspunkten. Mindestens 30 Euro pro Einwohner*in und Jahr investieren erfolgreiche Fahrradstädte in Dänemark und den Niederlanden seit vielen Jahren in die Radverkehrsinfrastruktur.[440] Dies ist eine Orientierungsgröße auch für NRW und die Kommunen. Im Vergleich zum Ausbau von Bahn und Bus ist die Kosten-Nutzen-Relation günstig und die Maßnahmen können schnell umgesetzt werden.
- Einführung Tempo 30 als Regelgeschwindigkeit innerorts; Ausweisung von Fahrradzonen und -straßen sowie Spielstraßen in Wohnvierteln.
- Die Straßenverkehrsordnung und das Parkmanagement in den Städten sollen dem angepasst werden.[441]

Maßnahmen für ein integriertes Mobilitätsmanagement

- Die Städte sollen Carsharing, Ridesharing und Pendlernetze aktiv voran treiben durch Initiativ-Förderung, Parkplätze und Privilegien wie die Benutzung von Busspuren.

[440] Siehe ADFC (2019/1)

[441] Siehe UBA (2010/1) und UBA (2017/1)

- Beim Ride-Sharing und Linienbedarfsverkehr durch private Anbieter werden gesetzliche Regelungen erforderlich, um einen Missbrauch und Sozialdumping zu verhindern und Sicherheit zu gewährleisten.
- Das Land fördert aktiv Mobilitätsmanagement bei seinen eigenen Einrichtungen sowie in den Verkehrsverbünden und unterstützt die Kommunen durch das „Zukunftsnetzwerk Mobilität“[442]. Ziel ist, den Personenverkehr so zu organisieren, dass das am besten geeignete Verkehrsmittel gewählt wird. Dazu gehört die Einrichtung von Mobilitätspunkten als Schnittstellen zwischen ÖPNV, Carsharing, Leihfahrrädern und E-Scootern in den Stadtteilen – vor allem auch in den Einzelhandelszentren.
- Es wird eine verkehrsmittelübergreifende Neuordnung der Tarifsysteme erforderlich. Diskutiert wird eine Mobilitätskarte für Bahn, ÖPNV, Carsharing, Fahrrad, Liefer-Service usw. – verbunden mit Job-Tickets, Semester-Tickets, Schüler-Tickets, Flatrate-Systeme (zum Beispiel „Ein-Euro-pro-Tag“), Drittnutzerfinanzierung oder solidarische Umlagesysteme.[443]
- Firmen ab hundert Beschäftigten sollten ein Mobilitätsmanagement für ihre Beschäftigten einrichten, damit nicht jeder individuell anfährt.
- Die Arbeitswelt wird zunehmend sauberer, leiser und digitaler. Dies ermöglicht es, die bisher übliche Trennung von Arbeit und Wohnen wieder schrittweise zurück zu nehmen. Dies soll bei gesetzlichen Vorgaben, finanziellen Anreizen und der Stadtplanung berücksichtigt werden.
- Die Erfahrungen mit der Corona-Pandemie lassen es als wahrscheinlich erscheinen, dass es zu einer starken Ausweitung des Homeoffice kommt und damit Fahrten erheblich abnehmen.

[442] Das vom Land NRW eingerichtete und geförderte „Zukunftsnetz Mobilität NRW“ unterstützt Städte, Kreise und Gemeinden bei der Förderung einer nachhaltigen Mobilitätsentwicklung bzw. der kommunalen Mobilitätswende – siehe Zukunftsnetz Mobilität NRW (2018/1).

[443] Siehe auch Landtag NRW (2020/1) und Landtag NRW (2020/2)

Maßnahmen zum Ausbau des ÖPNV

- Die Investitionsmittel für Stadtbahn, Straßenbahn, U-Bahn und S-Bahn müssen erheblich angehoben werden. Für den Ausbau des Schienen-ÖPNV sind in NRW für die kommenden 20 Jahre jährlich fünf Milliarden Euro erforderlich. In diese Richtung sind mit der Novellierung des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz und seiner Ausstattung erste wichtige Schritte erfolgt.[444]
- Der öffentliche Nahverkehr soll generell Vorrang auf den Straßen haben. Busse, Straßen- und Stadtbahnen brauchen auf viel befahrenen Straßen eigene Wege.
- Die Anbindung des Umlands der Städte durch Busse, Bahnen und Radschnellwege soll verbessert werden. Ein attraktives Liniennetz, auf dem öffentliche Verkehrsmittel dicht getaktet verkehren, ist die entscheidende Voraussetzung, um Autofahrer*innen zum Umsteigen zu bewegen. [445]
- Für Städte über 200.000 Einwohner*innen sollen mit dem Umland integrierte Stadt- oder Straßenbahnkonzepte erarbeitet und realisiert werden, die die umliegenden Orte anbinden, um dem Pendler-, Einkaufs- und Freizeitverkehr eine Alternative zu bieten.
- Für die Verkehrsregion Ruhr ist ein Generalverkehrsplan für die gesamte Region mit einem Investitionsplan für einen integrierten ÖPNV erforderlich. Es braucht eine stadtgrenzenübergreifende Vernetzung und Ausbau von Regionalbahn, S-Bahn, U-Bahnen und Stadtbahnen. Der Rhein-Ruhr-Express RRX ist ein Fortschritt, reicht aber nicht aus.
- Im ländlichen Raum, wo ein flächendeckender Takt im ÖPNV nicht realisiert werden kann, sollte ein einheitliches System von Anruf-Sammeltaxen und Rufbussen installiert werden. Dazu soll der „Linienbedarfsverkehr“ in das Personenbeförderungsgesetz aufgenommen werden. Dabei ist sicherzustellen,

[444] Die Bundesmittel für den Ausbau des ÖPNV (GVFG – Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz) wurden ab 2020 von 332 Mio. € auf 665 Mio. € und ab 2021 auf 1 Milliarde € angehoben. Sie sollten im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 ab 2025 auf 2 Milliarden € erhöht werden. Diese Erhöhung muss vorgezogen werden, um den notwendigen Ausbau des ÖPNV bis 2030 sicherzustellen. Es ist zu prüfen, ob diese Mittel ausreichen oder nochmal angehoben werden müssen. Siehe BMVI (2019/3)

[445] Siehe Civity (2019/1)

dass es sich um öffentlich regulierte Verkehre handelt, damit keine Kannibalisierung des ÖPNV und der Taxi-Angebote durch ungeregelte Angebote erfolgt.

- Elektrifizierung des Busverkehrs: Es sollte ein Programm zur Elektrifizierung des Busverkehrs und zur Bestimmung der Technik aufgesetzt werden (siehe im Abschnitt »Busverkehr«).
- Wo keine Bahnlinien existieren, sollten die ländlichen Zentralorte durch ein Schnellbussystem verbunden werden.

Selbstfahrende Autos = Autonomes Fahren[446]

Es gibt eine Vielzahl von Studien, die übereinstimmend zu dem Ergebnis kommen, dass die Technik der selbstfahrenden Autos (Autonomes Fahren) im kommenden Jahrzehnt praxisreif wird. In Monheim werden bereits autonome Busse im Linienverkehr getestet.[447] Dies kann großen Einfluss auf die Verkehrsentwicklung haben. Da die Prognosen sich zurzeit noch stark unterscheiden, haben wir sie bei unseren Rechnungen noch nicht berücksichtigt.

Zunächst wird damit gerechnet, dass Carsharing-Fahrzeuge autonom nur “leer“ mit z.B. maximal 25 km/h zu den Kund*innen fahren, die dann selbst das Steuer übernehmen. Später, wenn Technik und Recht fortentwickelt wurden, werden die Autos die gesamte Strecke vollautonom fahren. Autonome Fahrzeuge ermöglichen eine niedrigschwellige und attraktive Nutzung solcher Angebote. Das erleichtert den Verzicht auf einen eigenen PKW und es könnten beispielsweise beeinträchtigte Menschen künftig ohne Begleitung fahren. Bis 2035 könnte jede vierte bis dritte Fahrt bereits in einer Art von autonomen Taxis (Robo-Taxi) oder autonomen Bussen und Bahnen erfolgen. In Folge davon sinken die Kosten für Fahrdienstleistungen radikal. Der Nahverkehr wird sich dadurch grundlegend verändern. Die Grenzen zwischen ÖPNV, Taxis und Carsharing können verschwimmen.

[446] Dieser Abschnitt basiert auf folgenden Studien: KE-CONSULT (2018/1), Prognos AG (2018/4), Deloitte (2019/1), ISV (2018/1), Fraunhofer IAO (2019/1)

[447] Monheim (2019/1)

Auch die Automobilindustrie wird ein neues Geschäftsmodell finden müssen. Wenn immer weniger Menschen eigene Autos kaufen, kann die Zahl der PKW um bis zu drei Viertel abnehmen. Das spart auch Platz in den Städten. Selbstparkende PKW und automatisierte Parkhäuser schaffen weiteren Freiraum. Ehemalige Parkflächen könnten zu Grünflächen umgewandelt werden, um das städtische Klima und den Beitrag zum globalen Klimaschutz zu verbessern.

Möglich ist aber auch, dass die Fahrleistungen sogar zunehmen. Auch die damit verbundene Wertschöpfung kann sogar ansteigen. Dann ist denkbar, dass die Automobilkonzerne dieses Geschäft selbst übernehmen, um die großen Umsatzeinbußen beim Verkauf zu kompensieren.

Die Auswirkungen auf den Verkehr werden sehr unterschiedlich eingeschätzt.[448] Während einige Studien eine erhebliche Zunahme des Autoverkehrs prognostizieren, kommen andere zum gegenteiligen Ergebnis, weil im Ridesharing Bahn, Stadtbahn, autonome Busse, Robo-Taxis (Mischung zwischen Taxi und Carsharing), E-Scooter, Pedelec und Fahrrad sich ergänzen. Autonomes Fahren fungiert dann als Bestandteil „Symbiotischer Mobilität“. [449] Während einige davon ausgehen, dass die Robo-Taxis den öffentlichen Verkehr völlig verdrängen, vermuten andere, dass der öffentliche Verkehr vom autonomen Fahren profitiert.

Für den Güterverkehr ist durch das autonome Fahren mit großen Kosteneinsparungen zu rechnen. Es wird nicht nur weniger Personal benötigt, sondern auch weniger Treibstoff. Die Zahl der Fahrzeuge wird beim Güterverkehr eher zunehmen.

Auch die Auswirkungen auf Umwelt, Treibhausgasemissionen und den Energieverbrauch sind noch nicht klar abzusehen. Da weniger Autos gebaut werden, werden Energie und Rohstoffe eingespart. Parkende Autos an den Straßenrändern werden weitgehend verschwinden und die Städte dadurch lebenswerter. Aber auch das Leben auf dem Land kann wieder attraktiver werden, da die Verkehrsanbindung besser wird.

---

[448] Wir verzichten hier auf die Wiedergabe von Zahlen, da die Studien sich so stark unterscheiden, und beschränken uns daher auf qualitative Beschreibungen.

[449] Der Begriff „symbiotische Mobilität“ stammt aus Fraunhofer IAO (2019/1)

Durch den gleichmäßigeren Verkehr können erheblich mehr Autos auf einer Straße fahren, ohne dass es zum Stau kommt. Dies kann aber auch dazu führen, dass der Verkehr noch mehr zunimmt.[450] Umso wichtiger ist eine Umstellung aller Fahrzeuge auf treibhausgasfreie Antriebe.

Welche dieser Alternativen Realität wird, hängt weniger von der technischen Realisierung, sondern vielmehr von der Regulierung ab. Das Verhältnis von motorisiertem Individualverkehr zu ÖPNV entscheidet sich weniger im Zusammenhang mit der Digitalisierung, sondern ist eine grundlegende Frage der Verkehrs- und der Stadtentwicklungspolitik. Für die gesetzlichen Rahmenbedingungen und die Finanzierung wird die Bundespolitik – zum Teil auch die der EU – entscheidend sein. Insgesamt spricht aber vieles dafür, dass die Entscheidungen über die Stadt der Zukunft entscheidend vor Ort von der Kommunalpolitik gefällt werden. Hier kommt auf die Städte, Kommunen und Landkreise eine große Aufgabe zu. Daher muss bei der Regulierung des Autonomen Fahrens die Rolle der Kommunen gestärkt werden.

Maßnahmen im Bereich Autonomes Fahren

Die Überlegungen werden in dieser Studie im Rahmen der CO_2-Reduktion noch nicht berücksichtigt, da die vorliegenden Studien in ihren Berechnungen noch weit auseinanderliegen:

- Alle Automatisierungen im Verkehrsbereich bedürfen einer bundesgesetzlichen Regulierung, um die Sicherheit aller Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmer zu gewährleisten.
- Die Einführung des Autonomen Fahrens sollte auch aus Sicherheitsgründen mit der Reduzierung der Regelgeschwindigkeit innerhalb von Ortschaften auf 30 km/h, in Wohngebieten auf 20 km/h verbunden werden.
- Die Städte und Kommunen sind gefordert, bei Ihren Konzepten für den künftigen Personen- und Güterverkehr die Chancen und Gefahren des Autonomen Fahrens frühzeitig zu berücksichtigen. NRW sollte sich dafür einsetzen, dass die

[450] Man spricht dann vom Rebound-Effekt.

Zuständigkeit der Kommunen für diese Aufgabe im Personenbeförderungsgesetz geregelt wird.

- In den Kernstädten kann die Automatisierung damit verbunden werden, ein flexibles autonomes Bus- und Bahnsystem – ergänzt durch autonome Sammeltaxis – einzurichten. Dann sollten in den Kernstädten nur noch öffentlich lizensierte Fahrangebote für Personen zugelassen werden.
- Die Einrichtung von automatisierten Parkhäusern und -systemen kann die in den kommenden Jahren bevorstehende Umnutzung von Flächen in den Städten ergänzen, beispielsweise für Grünflächen.

Ausbau der Schieneninfrastruktur

Eine weitere zentrale Rolle bei der Verlagerung von Verkehr (sowohl bei Personen als auch bei Gütern) spielt neben dem Ausbau des ÖPNV auch der Ausbau der Bahn. Eine Verdoppelung oder gar Verdreifachung des Bahnverkehrs wäre mit entsprechenden Ausbaumaßnahmen bis 2035 möglich.[451] Die Schweiz und Japan beweisen, dass dies nicht nur in Ballungszentren, sondern auch in den ländlichen Regionen nicht unrealistisch ist. Allerdings werden in der Schweiz 400 Euro pro Bürger*in pro Jahr in die Bahn investiert, in Deutschland sind es nur 80 Euro.[452]

Dazu bedarf es aber eines Paradigmenwechsels bei der Bahn. Heute hat der Personenfernverkehr bei den Planungen Vorrang. Der Grund: Obwohl der Fernverkehr nur ein Viertel der Transportleistungen des Personenverkehrs und ein Sechstel der Züge ausmacht, werden für ihn die meisten Gewinne ausgewiesen.[453] Klimapolitisch müssten die Prioritäten aber anders gesetzt werden: Denn nur 1 Prozent der Fahrgäste sind Fernreisende. Der durchschnittliche Bahnreisende fährt nur 34 km – ohne U-Bahnen und Straßenbahnen mitzurechnen.[454] Noch kürzer sind die Fahrten der PKW-Fahrer, also der potentiellen Umsteiger: 90 Prozent der Fahrleistungen erfolgen auf Strecken unter 250

[451] Siehe Busche (2019/1)

[452] Zahlen von 2019 – siehe Allianz pro Schiene (2020/1)

[453] Siehe DB (2020/1). Das könnte auch anders bewertet werden, wenn der Fernverkehr höhere Trassengebühren für die großen Slots, die er benötigt, zahlen müsste.

[454] Siehe Destatis (2017/1)

Kilometer.[455] Deshalb muss in erster Linie der Regionalverkehr und der S-Bahn-Verkehr ausgebaut werden. Die S-Bahnen sollen grundsätzlich mindestens im 15-Minuten-Takt verkehren. Die Anzahl der Haltestellen soll bis 2030 verdoppelt werden.

Für eine Verdreifachung der Verkehrsleistung müssten die Züge künftig auf den Hauptstrecken im Fünf- bis Zehn-Minuten-Takt fahren. In NRW ist deshalb wegen der bereits bestehende hohen Taktdichte auch eine weitere Trennung des Personen- und Güterverkehrs erforderlich. Wenn die Güterzüge schneller werden, können ohne zusätzliches Personal und zusätzliche Züge auch viel mehr Güter transportiert und Kosten gespart werden. Allerdings können die ICEs dann nur noch auf eigenen Gleisen hohe Geschwindigkeiten fahren. Für die meisten Fahrgäste sind ein dichter Takt und funktionierende Anschlüsse beim Umsteigen wichtiger als die reine Reisezeit.

Um eine solchen Taktverdichtung zu erreichen, sollten die Investitionen künftig vorrangig auf den teilweise erforderlichen Ausbau der Bahnhöfe, auf den Bau von Verladebahnhöfen für den kombinierten Güterverkehr und auf die Beseitigung von Engstellen konzentriert werden. Nach einer Studie der TU Berlin werden für den Güterverkehr 50 Güterverladestationen in Deutschland benötigt.[456] Davon sollten zehn in NRW liegen. Da 75 Prozent der LKW-Transportleistung über mehr als 150 km Entfernung erfolgt, können durchaus mehr als 50 Prozent des Straßengüterfernverkehrs auf die Schiene verlagert werden, wenn die Güterzüge des kombinierten Verkehrs im Taktverkehr fahren. Die Deutsche Bahn AG plant bereits, die Transporte auf der gesamten Logistikkette LKW-Bahn-LKW usw. zu übernehmen und zu organisieren.[457]

Allerdings reicht in NRW aufgrund der hohen Auslastung der Schienentrassen die Taktverdichtung alleine nicht aus. Insbesondere für die überlasteten Strecken im Rheintal und vom Ruhrgebiet über Hannover nach Berlin müssen Strecken ausgebaut werden.[458] Mittelfristig ist auf den Hauptrouten auch eine Verlängerung der Güterzüge auf bis zu

[455] Siehe BMVI (2019/1)

[456] Siehe NEE (2020/1)

[457] Siehe Wenzel (2020/1)

[458] Siehe Busche (2020/1)

1,6 Kilometer möglich, was aber einen erheblichen Umbau der Signalanlagen und der Überholgleise erfordert. Damit rechnen wir bis 2035 noch nicht.

Im Ergebnis kommt eine Studie des BDI jedoch zu einem eindeutigen Ergebnis: Obwohl der Ausbau der Bahn hohe Investitionen erfordert, ist er volkswirtschaftlich lohnend.[459] Verkehrsverlagerung und Verkehrsvermeidung erweisen sich grundsätzlich als kostengünstiger als die Umstellung auf alternative Antriebe und Kraftstoffe. Man kann das auch so formulieren: Es lohnt sich auf jeden Fall erheblich mehr in die Städte und in Bahn zu investieren.

Maßnahmen zur Steigerung des Bahnverkehrs

- Zur Erreichung der anvisierten Ziele sollten die Investitionen pro Kopf für das Bahnsystem in Anlehnung an das Niveau der Schweiz auf 200 Euro pro Jahr gesteigert werden.[460]
- Für die Verlagerungen von Flügen und zur Attraktivierung der Bahn auch für längere Strecken sollen wieder Nachtzüge eingesetzt werden.
- Für Güterzüge sollte ein Just-in-time-Betrieb realisiert werden. Die Hauptlinien sollten dazu wo möglich stündlich, mindestens 4-mal am Tag bedient werden.
- Die „Trassengebühren“ (das ist die Maut für Züge) für Regionalzüge und Güterzüge können bei dichterem Takt deutlich gesenkt werden. Die Umstellung auf Anlastung der Grenzkosten kann eine relevante Erleichterung bringen, da die Trassengebühren oft der Hauptkostenfaktor sind.

[459] Siehe BDI (2018/1)

[460] 2019 investierte die Schweiz pro Kopf 404 Euro, Deutschland 76 Euro. Siehe Allianz pro Schiene (2020/1)

- In NRW sollten zehn Güterverladebahnhöfe für den kombinierten Verkehr eingerichtet werden.[461]
- Bei Investitionen haben Vorrang: Beseitigung von Engpässen, Ausbau der überlasteten Bahnhöfe und Neubau von S-Bahnhöfen, Bau von Verladeeinrichtungen für den kombinierten Güterverkehr.
- Für NRW sollten zur Beseitigung der Engpässe folgende Strecken ausgebaut werden:[462]
  - Zügige Fertigstellung des deutschen Teils der Betuwe-Linie (Emmerich-Oberhausen) als Teil der europäischen TEN-Linie Amsterdam-Genua.
  - Ausbau der Strecke Hagen-Siegen-Gießen-Hanau und als Querverbindung Ausbau der Strecke Köln-Siegen zur Entlastung der Rheintrasse von den Güterferntransporten von den Nordseehäfen nach Bayern, Österreich und Italien.
  - Neubau der rechtsrheinischen Strecke Bischofsheim (Mainz)-Troisdorf (Bonn) für Güterzüge und zur Entlastung des SPNV im Rheintal.
  - sechs-gleisiger Ausbau der Strecke Ruhrgebiet-Hannover zur Trennung von Güterverkehr, Personennahverkehr und Personenfernverkehr.
- Der Elektrifizierungsgrad sollte auf 80 Prozent angehoben werden, damit werden 99 Prozent des Bahnverkehrs elektrisch. Der Rest erfolgt mit Wasserstoff oder Batterien.
- Insbesondere durch Lückenschlüsse sollen eingleisige Streckenabschnitte mindestens zweigleisig ausgebaut sowie ehemalige Schienenstrecken reaktiviert werden.
- Zum Regionalbahnsystem und RRX: siehe oben im Abschnitt »Maßnahmen zum Ausbau des ÖPNV«.

[461] Siehe Anlage 37

[462] Siehe BVU (2015/1)

Weitere Maßnahmen zur Verlagerung des Güterverkehrs

- Die EU will den Güterverkehr über längere Strecken vom LKW auf die Bahn und das Schiff verlagern. Bis 2030 sollen 30 Prozent aller Transporte über 300 km mit diesen beiden Verkehrsmitteln erfolgen. Bis 2050 sollen es 50 Prozent sein.[463] Dies kann durch Vorziehen der Investitionen schneller erreicht werden. Ergänzend schlägt der BUND dazu vor, dass die LKW-Mautgebühr pro Kilometer umso höher wird, je weiter der LKW fährt.[464]
- Künftig werden Speditionen verkehrsmittelübergreifend die jeweils optimalen Transportwege anbieten – egal ob mit LKW, Bahn, Binnenschiff oder Seeschiff.
- Auch wenn der Internethandel im Vergleich zum privaten Einkaufen Wege erspart, so sollte das Rücksenden vom Empfänger bezahlt werden, um unnötige Transportwege (und das Wegwerfen der Waren) einzusparen. Das Vernichten von Waren sollte verboten werden (siehe im Kapitel 2.3 »Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft«).

Auswirkungen der Verkehrsverlagerung auf den Straßenbau

Die Maßnahmen zur Verlagerung des PKW-Verkehrs auf Fahrrad und vor allem ÖPNV können nach den vorliegenden Quellen und den Planungen des Landes den Anteil des PKW-Verkehrs am Modal Split von ca. 75 Prozent auf ca. 40 Prozent zwischen 2040 und 2050 reduzieren.[465]

Die Maßnahmen zur Verlagerung des Güterverkehrs vom LKW auf die Bahn und teilweise auch auf das Schiff können nach den vorliegenden Quellen den Anteil des LKW-Verkehrs im Fernverkehr am Modal Split langfristig von ca. 70 auf ca. 35 Prozent halbieren.[466] Die Zahl der LKW im Fernverkehr wird bereits mittelfristig um ein Drittel

[463] Siehe Europäische Kommission (2011/1)

[464] Siehe BUND (2019/1)

[465] Siehe Anlage 33

[466] Siehe Anlage 34

zurückgehen, während die Zahl der Auslieferungsfahrzeuge im Nahverkehr noch um 30 Prozent zunehmen wird.

Für den Ausbau der Fernstraßen in NRW sind 13 Mrd. Euro im Bundesverkehrswegeplan von 2016 vorgesehen. Damit wird ein Neubau und Ausbau von ca. 900 km Bundesfernstraßen geplant.[467] Im Landesstraßenplanungsprogramm sind derzeit 96 Projekte aufgeführt, die häufig vor Ort hochumstritten und verkehrlich nicht notwendig sind. Im Landeshaushalt NRW wurden für die Planung und Umsetzung zuletzt 62 Mio. Euro eingestellt.

Diese Ausbauplanungen machen angesichts der in den Studien vorgeschlagenen Verkehrsverlagerungen in den kommenden 20 Jahren keinen Sinn mehr. Sie berücksichtigen noch nicht das Pariser Abkommen, die sich daraus ergebenen nationalen Ziele und die Ziele der EU zur Reduzierung der Treibhausgase im Sektor Verkehr, da die zugrundeliegenden Planungen bereits vor der Unterzeichnung des Pariser Abkommens durchgeführt wurden. Aus diesen Gründen sollte unverzüglich eine Überprüfung von nicht planfestgestellten Straßenneubauprojekten im Bundesstraßenbau und im Landesstraßenbau vorgenommen werden, um diese Projekte einem Klima- und Umweltcheck zu unterziehen. Es müssen neue Planungen für die Entwicklung der Verkehrsmittel und den künftigen Modal Split vorgenommen werden, die mit den vereinbarten Klimazielen, die in Paris vereinbart wurden, kompatibel sind. Auf dieser Grundlage sollte dann ein neuer Bundesverkehrswegeplan erarbeitet werden.

Maßnahmen zum Straßenbau

- Es sollte unverzüglich eine Überprüfung von nicht planfestgestellten Straßenneubauprojekten im Bundesstraßenbau und Landesstraßenbau vorgenommen werden, um diese Projekte einem Klima- und Umweltcheck zu unterziehen.
- Es sollte eine neue Planung der Verkehrsentwicklung vorgenommen werden, die mit den im Pariser Abkommen vereinbarten Zielen und den sich daraus ergebenen THG-Reduktionen kompatibel ist.

[467] Siehe BMVI (2016/1)

- Auf dieser Grundlage sollte dann ein integrierter Mobilitätsinfrastrukturplan für Land und Bund erstellt werden.

Technische Umstellung: Welcher Motor ist der beste fürs Klima?

Der Verkehr, der nicht vermieden oder verlagert werden kann, muss klimaneutral werden, indem die Verkehrsmittel zukünftig klimaneutrale Antriebe haben. Welcher Motor sich in Zukunft durchsetzen wird, wird lebhaft diskutiert. Es gibt grundsätzlich drei Möglichkeiten.

Verbrennungsmotor

Das Fahrzeug fährt wie bisher mit Treibstoffen (Benzin, Diesel, Kerosin – in Zukunft auch mit Methanol oder Ammoniak). Diese Treibstoffe müssen aber erneuerbar sein, also synthetisch aus grünem Wasserstoff raffiniert werden. Man spricht dann auch von PtL-Treibstoffen (Power to Liquid).[468] Der große Vorteil dieses Konzepts besteht darin, dass alle Fahrzeuge weiterbetrieben werden können. Man braucht keine neue Technik. Die Nachteile sind aber immens: Es wird dann sehr viel Strom benötigt, um die Treibstoffe erneuerbar zu erzeugen. Beispielsweise werden für eine Kilowattstunde Kerosin drei Kilowattstunden Strom benötigt.[469] Zwei Drittel der Energie gehen bei der Umwandlung und dem Transport verloren. Auch haben Verbrennungsmotoren einen viel geringeren Wirkungsgrad. Je nach Größe gehen bei der Verbrennung des Treibstoffes und durch das Bremsen noch einmal die Hälfte (beim Schiff) bis drei Viertel (beim PKW) der Energie verloren.

Allein um die Treibstoffe für Flugzeuge und Schiffe erneuerbar zu produzieren, wird in Zukunft etwa ein Viertel des gesamten Stroms benötigt.[470] Diese können aus technischen Gründen nicht auf Elektro-Antrieb umgestellt werden. Eine Umstellung würde auch bei Flugzeugen zu lange dauern, da diese eine Lebensdauer von 30 Jahren haben.

---

[468] Siehe Anlage 4

[469] Es gibt auch Quellen, die einen Wirkungsgrad bei der Herstellung von Benzin von 50% für möglich halten. Da bleibt die Entwicklung von großtechnischen Anlagen abzuwarten. Siehe UBA (2016/1)

[470] Siehe MD (2020/1)

Alle Fahrzeuge, bei denen eine Elektrifizierung möglich ist – also auf jeden Fall alle PKW – , sollten deshalb künftig elektrisch betrieben werden, da sonst noch mehr Energie benötigt wird.

Der Preis pro Liter für E-Benzin bzw. E-Diesel wird in der großindustriellen Herstellung wahrscheinlich auf unter einen Euro pro Liter ohne Steuern fallen.[471] Möglich ist auch der Einsatz von grünem Wasserstoff. Oft wird als Alternative auch E-Methan vorgeschlagen. Nach neueren Quellen ist aber beim Einsatz von Methan in Motoren nicht zu vermeiden, dass das Treibhausgas Methan über den Auspuff entweicht. Dann wird der Antrieb selbst mit grünem Methan nicht treibhausgasneutral sein.

[471] Siehe VDA (2017,1), Prognos AG (2018/3), Agora Energiewende (2018/2)

Maßnahmen zur Umstellung auf E-Kraftstoffe für LKW, Schiffe und Flugzeuge

- Als effizientestes System zur Umstellung auf erneuerbare Kraftstoffe wird von den Studien das Quotensystem gesehen.[472] Dabei wird gesetzlich ein wachsender Anteil (Quote) von synthetisch erzeugten E-Kraftstoffen in allen Treibstoffen vorgeschrieben. Diese Quote sollte beginnend mit 2022 jährlich schrittweise angehoben werden.[473]
- So wird auf effiziente Weise der Markt für die Erzeugung der E-Treibstoffe geschaffen. Wenn die Nachfrage gesichert ist, wird es sehr schnell zu großen Investitionen in Afrika, Nahost oder Russland kommen, um mit erneuerbarem Strom aus Wind- oder PV-Anlagen E-Kraftstoffe günstig zu produzieren (siehe dazu im Kapitel 2.2 »Varianten des Energiesystems: E-Brennstoffe und Importe«).
- Dieser Prozess sollte international abgestimmt werden. So können negative Ausweicheffekte (Tanken im Ausland, Ausweichen auf andere Häfen) vermieden werden. Dafür reicht bereits eine Vereinbarung für die EU.
- Eine Quote für in Deutschland produzierte E-Treibstoffe könnte dafür sorgen, dass die Potenziale an der Küste für die Wasserstofferzeugung durch die Leistungsspitzen der Wind- und Solaranlagen genutzt werden, auch wenn der Preis etwas höher liegt.

Elektromotor

Ein Elektromotor wird direkt mit Strom betrieben. Dieser ist im einfachsten Fall in einer Batterie gespeichert. Alternativ kann der Strom auch an Bord erzeugt werden oder er wird über eine Oberleitung[474] oder eine Stromspule geliefert. Die meisten Studien gehen davon aus, dass der Elektromotor der Motor der Zukunft ist. Der Grund ist sehr einfach:

[472] Siehe Wuppertal (2020/1)

[473] Es wird auch ein Bonus-Malus-System diskutiert.

[474] Gleichstrom-S-Bahnen fahren zum Teil auch mit einer Stromleitung an der Seite.

Der Elektromotor ist sehr effizient, selbst wenn man den Aufwand zur Herstellung der Batterien mitberücksichtigt.[475] Da der Motor direkt mit Strom betrieben wird, werden Umwandlungsverluste vermieden. Hinzu kommt die Fähigkeit, die Bremsenergie fast vollständig zurückzugewinnen.[476] Der Elektromotor braucht deshalb für die gleiche Strecke ungefähr ein Fünftel der Energie eines gleich leistungsfähigen Verbrennungsmotors (zur Diskussion über die Batterie-Rohstoffe siehe im Kapitel 2.3 »Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft«).

Brennstoffzelle

Brennstoffzellen-Fahrzeuge haben ebenfalls einen Elektromotor. Sie nutzen aber Wasserstoff, aus dem erst im Fahrzeug Strom für den Elektromotor erzeugt wird. Dieser Wasserstoff muss künftig ebenfalls mit Strom erzeugt werden. Dabei gibt es aber sehr viel weniger Umwandlungsverluste als bei der Produktion von synthetischen Flüssigbrennstoffen. Eine Kilowattstunde Wasserstoff benötigt nur 1,3 Kilowattstunden Strom. Der Wasserstoff lässt sich relativ leicht lagern und per Leitung transportieren, auch wenn dafür die Gasspeicher und Gasleitungen umgerüstet werden müssen. Das Auto braucht im Vergleich zum reinen Batterie- Elektroauto eine viel kleinere Batterie und hat eine größere Reichweite. Auch der Lärm des Verbrennungsmotors fällt weg. Der Nachteil besteht darin, dass der Brennstoffzellenantrieb derzeit sehr viel teurer ist und im Betrieb insgesamt dreimal mehr Energie benötigt wird als für reine Elektro-Antriebe.[477]

Die meisten Studien befürworten aus Gründen der Technologie-Offenheit den Aufbau eines Netzes von Wasserstofftankstellen. Nach der neuen Studie des UBA macht das aber keinen Sinn mehr.[478] Trotzdem rechnen wir vorsichtig für 2035 mit einem Anteil von 20 Prozent LKW mit Brennstoffzellenantrieb.

---

[475] Siehe Volkswagen (2020/1)

[476] Siehe FIS (2017/1)

[477] Siehe Quaschning (2016/1)

[478] Siehe UBA (2019/6) und Anlage 34. Die Studie des UBA kommt zum Ergebnis, dass der Einsatz von Brennstoffzellen bei PKW und LKW wegen der hohen Kosten des gesamten Systems (Fahrzeuge und Tankstellen) nicht wirtschaftlich darstellbar ist, da Verbrennungsmotoren mit E-Treibstoffen und erst recht reine Elektroautos erheblich günstiger sein werden.

Die Umstellung der Verkehrsmittel

PKW

Bei PKW wird sich der reine Elektromotor mit Batteriespeicher wahrscheinlich schnell durchsetzen, nicht nur weil er mit Abstand am wenigsten Energie verbraucht, sondern auch weil die Einführungshindernisse gering sind. PKW werden durchschnittlich 10 Jahre bis 15 Jahre genutzt. Wir rechnen damit, dass der Tipping-Point für E-Autos ca. 2025 erreicht wird. Ab dann werden fast nur noch Elektro-Autos verkauft. Dann können 2035 bereits 80 Prozent der PKW elektrisch fahren.[479] Der Rest wird dann noch übergangsweise mit grünem Benzin oder Diesel betrieben.

Mit der Umstellung auf Elektro-Autos sind noch weitere Umstellungen verbunden: Es müssen schnell genug Ladestationen gebaut werden.[480] In NRW gibt es aktuell über 5.000 öffentliche Ladepunkte.[481] Die Eigenheimbesitzer*innen werden überwiegend eigene Ladeanschlüsse in den Carports und Garagen einbauen. Für die andere Hälfte der Bevölkerung müssen in NRW ca. 200.000 Ladeanschlüsse installiert werden.[482] Dazu kommen für NRW ca. 200 Schnelladestationen für den Fernverkehr – überwiegend auf Autobahnraststätten und an zentralen Orten der Städte.

Die Versorgung der Hersteller mit nachhaltig produzierten Rohstoffen für die restlichen Verbrennerfahrzeuge muss gesichert sein und es muss das Recycling der Fahrzeuge und der Batterien gesetzlich geregelt werden (siehe im Kapitel 2.3 »Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft«).

---

[479] Siehe SYSTEMIQ (2020/1)

[480] Wir bezeichnen als Ladestation einen Parkplatz mit eine Anzahl von Ladepunkten zum Beispiel auf Autobahnraststätten. Als Ladepunkt bezeichnen wir den Anschluss für ein Auto (siehe Anlage v4x).

[481] Siehe AEE (2020/2)

[482] Siehe Anlage 36

Maßnahmen zur Elektrifizierung des PKW-Verkehrs

- Bonus-Malus-Regelung beim Kauf einführen: Fahrzeuge mit über 95 Gramm Kohlenstoffdioxidemission pro Kilometer sollten beim Kauf mit 50 Euro pro Gramm belastet werden, wer weniger ausstößt, wird entsprechend entlastet.[483]
- Die Planungen sollen darauf abgestellt werden, dass E-Mobile ab 2025 preisgünstiger als fossile PKW sind und damit der Kipp-Punkt erreicht wird.
- Ab 2030 sollen nur noch emissionsfreie Fahrzeuge neu zugelassen werden, zum Beispiel durch eine ansteigende nationale Quote für emissionsfreie Autos.
- Es werden 200.000 Ladepunkte auf öffentlichen Straßen installiert – in den Wohnvierteln mit Mehrfamilienhäusern ohne Garagen jeweils fünf Anschlusspunkte auf 100 Parkplätze (Kosten für die Kommunen in NRW ca. 400 Mio. Euro).
- Es wird ein einheitliches Bezahlsystem für Ladestationen gesetzlich geregelt. Die öffentlichen Ladekosten werden in zeitabhängige Parkplatzgebühren integriert (Oslo hat dies bereits für 1.300 öffentliche Parkplätze getan).
- Mieter*innen müssen einen Anspruch darauf haben, dass Ladestationen in hauseigenen Tiefgaragen oder Abstellplätzen installiert werden.
- Alle privaten Parkplätze müssen künftig die Möglichkeit haben, zumindest Ladestation mit 22 Kilowatt Wechselstrom bereitzustellen.
- Weiter müssen die nötigen Leitungen gebaut werden für die Gleichstrom-Schnellladestationen auf allen Autobahnraststätten (voraussichtlich 300 kW für PKW, ggf. auch 1,5 MW für LKW) und an zentralen Orten der größeren Städte. Damit sollen PKW und LKW künftig in 20 Minuten ausreichend beladen werden können, um 500 Kilometer weit zu fahren.
- Damit der PKW-Verkehr treibhausgasfrei wird, ist es notwendig, dass auch die Energieversorgung und die Zulieferindustrie der Automobilindustrie treibhausgasfrei werden (siehe auch in den Kapiteln 2.3 »Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft« und 2.2 »Varianten des Energiesystems: E-Brennstoffe und Importe«).

Weitere Maßnahmen zur Umstellung des PKW-Verkehrs

- Als kostengünstige Sofortmaßnahme wird eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf Autobahnen auf 120 km/h vorgeschlagen.[484] Das erspart in NRW jährlich Emissionen von ca. 0,5 $MtCO_{2eq}$ und hat weitere positive Effekte, etwa für die Verkehrssicherheit. Vorgeschlagen wird auch ein Tempolimit für Landstraßen von 80 km/h und für Ortschaften von 30 km/h.
- Durch den Wegfall der Mineralölsteuer wegen der Antriebswende muss die Straßenunterhaltung eine neue Finanzierungsbasis erhalten. Dies sollte im Rahmen einer neuen Steuerpolitik unter Klimagesichtspunkten erfolgen und die Nutzung von Straßen und Parkplätzen einbeziehen.
- Die Kfz-Steuern sollen nach Energieverbrauch und Gewicht progressiv gestaffelt werden, um den Trend zu immer größeren PKW, z.B. SUV, zu stoppen.

LKW

Auch im LKW-Verkehr wird sich der elektrische Antrieb durchsetzen. Allerdings sind die gefahrenen Entfernungen in der Regel viel größer als im Personenverkehr. Deshalb empfehlen nahezu alle Studien mindestens ein Drittel (4.000 km) der Autobahnen mit Oberleitungen zu versehen, um die Reichweite der LKW zu erhöhen.[485] Für NRW sind das 700 Kilometer Autobahnstrecke, auf denen in beiden Richtungen die rechte Fahrspur mit einer Oberleitung versehen wird. Dann können die LKW während der Fahrt ihre Batterien wieder aufladen.

Als Alternative zur Oberleitung kommt auch das dynamische Laden durch Stromspulen in der Fahrbahn in Frage. Das wird aber wohl eher für Taxis und Busse an Bedeutung erlangen. Bei einer sehr schnellen Entwicklung von leichteren Batterien ist es auch möglich, dass die Elektrifizierung der Autobahnen nicht erforderlich wird. Insgesamt rechnen die meisten Studien damit, dass 60 bis 80 Prozent der LKW künftig elektrisch fahren. Für den Rest werden synthetische E-Kraftstoffe eingesetzt.

---

[483] Siehe Agora Energiewende (2019/1)

[484] Siehe UBA (2020/2)

[485] Siehe Öko-Institut (2018/1), SRU (2012/1)

Maßnahmen zur Elektrifizierung des LKW-Verkehrs

- Bis 2030 sollen in NRW mindestens die mehr als 4-spurigen Autobahnstrecken (ca. 700 km in NRW) elektrifiziert sein. Das sind die A1, A2, A3 (Duisburg-Bonn-Frankfurt), die A4 und Teile der A40 und A46.[486] Das kostet rund 2 Mrd. Euro und erfordert eine Anhebung der LKW-Maut um 12 Prozent.[487] Die Stromkosten sollen in die Mautgebühr integriert werden.
- Das Ausmaß der Elektrifizierung hängt davon ab, wieviel Verkehr auf die Bahn verlagert werden kann.
- Zuschüsse für die Anschaffung von LKW werden nur noch für E-LKW gewährt.

Busverkehr

Auch der Busverkehr wird elektrifiziert, da dies die mit Abstand effizienteste Technologie darstellt. Dafür gibt es drei Alternativen: Die einfachste Lösung ist ein reiner Batteriebetrieb mit Aufladen an den Endhaltestellen. Alternativ können die Busse während der Fahrt mit Oberleitung versorgt oder ggf. kombiniert mit Batterien auf Teilstrecken aufgeladen werden. Dazu können Busse ggfs. auch die Oberleitungen von Stadtbahnen mitbenutzen. Als dritte Technologie zum Aufladen kommen Induktionsschleifen in der Fahrbahn in Frage. Dies kommt vor allem für Linienbusse im ÖPNV in Frage. Weiterhin ist für den Fern- und Reisebusverkehr auch der Einsatz von Hybridbussen denkbar.

Um die Technologiefrage zu klären, macht es daher Sinn, schnell die Erfahrungen mit den Teststrecken auszuwerten und evtl. ergänzende Forschungsarbeiten in Auftrag zu geben, um möglichst rasch zu einer Entscheidung über die einzusetzende Technologie zu kommen.

[486] Siehe VM-NRW (2019/1), Anlage 35

[487] Siehe Öko-Institut (2018/1); die Studie BDI (2018/1) empfiehlt sogar 8000 km Oberleitung.

Bahn

Die Bahn fährt heute schon zu über 90 Prozent elektrisch.[488] Derzeit sind 61 Prozent der Bahnstrecken elektrifiziert. In NRW sind es nur 59 Prozent.[489] Die DB-AG plant bereits, den Anteil der Strecken mit Oberleitung auf 80 Prozent zu steigern. Dies ist vorrangig für die Strecken mit Güterverkehr erforderlich. Das würde ausreichen, um 99 Prozent der Verkehre mit Oberleitung durchzuführen.[490] Die übrigen Verkehre können mit batterieelektrischem Antrieb oder Brennstoffzellen betrieben werden. Damit wäre mit relativ geringen Investitionen ganz NRW vollelektrisch bzw. teilelektrisch zu befahren. Bei der Bahn kommt für längere Strecken ohne Oberleitung auch die Brennstoffzelle als Antrieb in Frage, da die Kosten für die Wasserstoffinfrastruktur sich eher rechnen als für den Straßenverkehr.[491]

Flugverkehr

Die Treibhausgasemissionen des Flugverkehrs haben wir NRW aufgrund des Bevölkerungsanteils zugeordnet. Ein anderes Verfahren macht keinen Sinn, da viele Fluggäste aus NRW für Auslandsflüge neben Flughäfen in NRW auch die großen Hubs wie Frankfurt und München nutzen. Damit bilden wir die von der Bevölkerung in NRW verursachten Emissionen ab.

Beim Energiebedarf für die Luftfahrt haben wir dagegen nur die Flüge gerechnet, die von NRW aus gestartet sind. Damit bilden wir den Treibstoffbedarf von NRW ab, der heute oder zukünftig versorgt werden muss.[492]

Die Preise für den Flugverkehr werden aufgrund der höheren Kosten für E-Kerosin steigen. Dies gilt umso mehr, wenn sie endlich angemessen besteuert werden. Dazu gehört auch die Streichung sämtlicher Subventionen. Trotz der Verlagerung der Kurzflüge auf die Bahn und trotz höherer Preise für E-Brennstoffe wird der Flugverkehr voraussichtlich

---

[488] Siehe DB (2020/3), Bundesnetzagentur (2019/1): Personenfernverkehr zu über 99% Prozent, im Personennahverkehr zu 79% und im Güterverkehr zu 87% elektrisch

[489] Siehe Allianz pro Schiene (2020/1)

[490] Siehe VDV (2018/1), VDV (2020/1)

[491] Siehe Alstom (2019/1)

[492] Siehe Anlage 33

weiter zunehmen. Es ist denkbar, dass es durch die Corona-Pandemie und einer heute schon absehbaren langen Erholungsphase nur einen moderaten Anstieg des Luftverkehrs gibt.

Langstreckenflugzeuge können vermutlich nicht auf Elektroantrieb umgestellt werden.[493] Sie werden in absehbarer Zeit mit synthetischem E-Kerosin (Flugbenzin) aus erneuerbaren Quellen oder einem anderen Brennstoff fliegen. Allein um das E-Kerosin dafür zu erzeugen, werden für Deutschland künftig 300 TWh Strom pro Jahr erforderlich sein. Alternativ zu grünem Kerosin wird an Brennstoffzellen-Flugzeugen mit grünem Wasserstoff zumindest als Antrieb für Kurzstreckenflüge geforscht – Airbus hat dazu bereits eine Forschungsabteilung in Hamburg.[494] Allerdings kann aufgrund der erforderlichen Entwicklungszeiten und aufgrund der langen Nutzungszeiten von über 25 Jahren bis 2035 nicht mit relevanten Einsatzzahlen gerechnet werden. Flüge über relativ kurze Strecken können auf die Bahn verlagert werden. Das gilt auch für einige geeignete längere Strecken bis zu 2000 Kilometer mittels schneller Nachtzüge.

Wieweit sich die Forschung und Entwicklung sogenannter „Flugtaxis“ auf den Luftverkehr insbesondere bei Kurz- und Mittelstrecken auswirken wird, kann heute noch nicht abgesehen werden.

Es sollte angestrebt werden, den Luftverkehr mithilfe einer steigenden Quotenregelung für erneuerbare Brennstoffe bis 2035 komplett auf grünes Kerosin umzustellen. Auch dann wird er nicht gänzlich klimaneutral sein. Aufgrund der großen Flughöhe entstehen Effekte wie zum Beispiel die Kondensstreifen aus Wasserdampf, die einen zusätzlichen Klimaeffekt bewirken. Diese Effekte können dadurch reduziert werden, dass die Reinheit des Kerosins verbessert und die Flughöhe um 2 Kilometer abgesenkt wird. Trotzdem bleibt der Luftverkehr die einzige relevante Quelle von Treibhausgasen im Verkehrssektor.[495]

---

[493] In Kanada und den USA entwickeln Firmen bereits Hybrid-Flugzeuge (siehe Simonds (2019/1)).

[494] Siehe Horch (2020/1)

[495] Siehe UBA (2012/1), UBA (2018/2)

Die Flughäfen in NRW[496]

Zurzeit sind alle sechs Flughäfen in NRW defizitär. Dies kann nur geändert werden, wenn die Flughafengebühren deutlich angehoben werden. Das ist aber nur möglich, wenn die Flughäfen gemeinsam betrieben werden und die Kapazitäten der beiden großen Flughäfen Köln und Düsseldorf so eingeschränkt werden, dass die Fluggesellschaften Flüge auf die kleinen Flughäfen verlagern.

Durch eine solche Kooperation können auch striktere Lärmschutzmaßnahmen durchgesetzt werden. Nachtflüge zwischen 0 und 5 Uhr sollten verboten werden. Nachtflüge von 22 bis 24 Uhr und von 5 bis 6 Uhr sollten so teuer gemacht werden, dass nur noch in Notfällen die Flughäfen nachts angeflogen werden.

Flughäfen sollen grundsätzlich nicht mehr subventioniert werden. Die EU hat ab 2024 ein Verbot der Subventionen beschlossen. Für die zukünftige Kalkulation muss berücksichtigt werden, dass der Flugverkehr mit synthetischem Kerosin erfolgen wird und voll versteuert wird. Wenn sich nach Durchsetzung dieser Maßnahmen in einem Flughafen keine Rentabilität herstellt, sollte der Flughafen geschlossen werden. Es ist mit hoher Wahrscheinlichkeit absehbar, dass dann neben den Flughäfen in Düsseldorf und Köln nur noch der Flughafen Dortmund erhalten bleibt. Deshalb sollte möglichst zeitnah über die künftigen Rahmenbedingungen entschieden werden.

Luftfracht spielt heute mengenmäßig keine relevante Rolle. Dies wird nach übereinstimmender Auffassung aller Studien auch künftig so bleiben, da nur wenige Güter so klein und leicht sind, dass sich Luftfracht rentiert. Trotzdem ist die Luftfracht eine wichtige Einnahmequelle für den Flughafen Köln/Bonn.

Maßnahmen zur Umstellung des Luftverkehrs

- Zur Einführung von E-Kerosin sollte eine Quote eingeführt werden, die bis 2035 auf hundert Prozent anwächst (siehe oben im Abschnitt »Maßnahmen zur Umstellung auf E-Kraftstoffe für LKW, Schiffe und Flugzeuge«). Wenn E-Kerosin bis

[496] Siehe Landtag NRW (2020/4), Landtag NRW (2020/3), Wyputta (2020/1), Thießen (2016/1)

dahin ausreichend verfügbar ist, sollte spätestens ab 2035 kein fossiles Kerosin mehr zum Verkauf angeboten werden.

- Dieser Prozess wird international abgestimmt. So können negative Ausweicheffekte (Tanken im Ausland, Ausweichen auf andere Flughäfen) vermieden werden. Dafür reicht bereits eine Abstimmung in Europa.
- Zur Reduzierung der Kondensstreifen sollte die Flughöhe bei internationalen Flügen um 2 km abgesenkt werden.
- Die Mehrzahl der Studien schlägt eine Verlagerung des Flugverkehrs auf Inlandsstrecken oder kurzen Flügen ins Ausland auf die Bahn vor, zum Beispiel durch Einstellung aller Flüge, wenn es eine Bahnverbindung unter 4 Stunden gibt. Die Inlandsflüge machen allerdings nur 0,2 Prozent der deutschen Treibhausgas-Emissionen aus.
- Die Subventionen für den Flugverkehr sollten eingestellt werden. Dazu gehört auch, dass im Flugverkehr Mehrwertsteuer erhoben wird.
- Angesichts der prekären Lage der Flughäfen muss ein Luftverkehrskonzept für NRW erstellt werden. Dieses muss darlegen, wie die Flughäfen treibhausgasfrei betrieben werden und welche Flughäfen ohne Subventionen und unter erhöhten Lärmschutzmaßnahmen noch wirtschaftlich betrieben werden können.[497]

Schiffsverkehr

Obwohl die Schifffahrt das wichtigste Transportmittel ist (62 Prozent der Deutschland zugeordneten Transportleistungen), sind die Treibhausgasemissionen schon heute gering und liegen bezogen auf die Transportleistung sogar deutlich unter denen der Bahn.[498] Die Emissionen des deutschen Seeschiffsverkehr haben wir NRW entsprechend des Bevölkerungsanteils zugeordnet.[499] Damit bilden wir die Emissionen pro Kopf

[497] Siehe Landtag NRW (2020/3) und Landtag NRW (2020/4)

[498] Siehe Anlage 34

[499] Diese Methode ist sicher ungenau, da der gesamte Verkehr, der in Rotterdam für deutsche Kunden abgewickelt wird, dabei den Niederlanden zugeordnet wird. Umgekehrt wird der Osteuropaverkehr, der über Hamburg läuft, Deutschland zugerechnet. Das ist nicht die optimale Methode, aber sie wird international verwendet.

einigermaßen korrekt ab. Beim Energiebedarf haben wir NRW aber nur den Binnenschiffsverkehr angerechnet, da die Seeschiffe nicht in NRW betankt werden.

Der Seeschiffsverkehr wird vermutlich nach den verschiedenen Studien selbst bei höheren Kosten durch die Umstellung auf synthetische grüne Treibstoffe auf dem heutigen Niveau bleiben. Es ist durchaus realistisch, dass bei veränderten Rahmenbedingungen auch Fernverkehre innerhalb von Europa auf die Seeschifffahrt verlagert werden, da große Teile Europas über Häfen gut erreichbar sind.

Die Binnenschifffahrt spielt in Deutschland nur eine untergeordnete Rolle. In NRW sieht das anders aus. Hier liegt der Anteil der Binnenschiffer an der Transportleistung bei 16 Prozent, das sind fast die Hälfte aller Binnenschiffstransporte in Deutschland.[500] Hauptwasserstraße ist der Rhein und hier sind es überwiegend die Transporte von und nach Rotterdam. Haupthafen ist Duisburg mit einem Anteil von 40 Prozent.[501]

Obwohl die Binnenschifffahrt für NRW eine gegenüber dem Bundesdurchschnitt überproportionale Bedeutung genießt, hat die zuständige Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes die Instandhaltung und Verbesserung insbesondere der Schleusen, Kanäle und Brückenbauwerke vernachlässigt, so dass ein erheblicher Sanierungsstau entstanden ist.

Die Binnenschifffahrt wird bis 2040 ein Drittel der Fracht verlieren, weil Kohle- und Öltransporte weitgehend wegfallen. Trotzdem rechnet die Boston Consulting Group mit einer Verdoppelung der Transportleistung in den kommenden Jahrzehnten, weil sie davon ausgehen, dass die Binnenschifffahrt massiv in das Containertransportgeschäft einsteigen wird. Dieser wird bis 2050 bis zu 70 Prozent des Verkehrsvorlumen der Binnenschifffahrt ausmachen. Der Anteil der Binnenschifffahrt an den Transporten in NRW wird daher bereits bis 2035 auf 20 Prozent steigen.[502]

Der Ausbau der Kanäle, der Häfen, Brücken und sonstigen Anlagen (Schleusen, Verladebrücken) für die Binnenschifffahrt sollte mit Hinblick auf diese Prognose

[500] Siehe Anlage 34

[501] Siehe Anlage 38

[502] Siehe BDI (2018/1), Anlage 34 und Anlage 38

entsprechend verstärkt gefördert werden. Genannt werden dabei Investitionen am Rhein, am Weser-Datteln-Kanal, dem Rhein-Herne-Kanal, dem Dortmund-Ems-Kanal und dem Datteln-Hamm-Kanal.[503]

Die Schiffe werden auch künftig überwiegend mit flüssigen Brennstoffen fahren. Dabei wird der fossile Schiffsdiesel durch E-Diesel oder eventuell auch andere flüssige E-Kraftstoffe wie Ammoniak oder Methanol ersetzt.[504] Der Ersatz von Schweröl reduziert auch den klimaschädigenden Effekt von Rußablagerungen auf den globalen Eisflächen.[505] Die Nutzung dieser Treibstoffe erfordert zwar eine Umrüstung, lässt aber dafür einen höheren Wirkungsgrad erwarten.[506] Dagegen erwiesen sich die Bestrebungen der Internationalen Meeresorganisation (IMO), von Schweröl oder Diesel zu flüssigem Erdgas zu wechseln, bislang als kontraproduktiv.[507] Die Methanemissionen der Motoren machen den Vorteil durch die CO_2-Reduzierung mehr als zunichte. Es bleibt abzuklären, für welche Verkehre in Europa und insbesondere im Binnenschiffsverkehr Elektromotoren mit Brennstoffzellen oder mit Batteriestrom in Frage kommen.[508]

Maßnahmen für den Schiffsverkehr

- Der Einstieg der Binnenschifffahrt in den Containertransport und die dafür erforderliche Infrastruktur muss gefördert werden.
- Steigerung des Personal- und Mitteleinsatzes für Sanierung und zusätzliche Investitionen.
- Der Schiffsverkehr wird bis 2035 überwiegend auf E-Treibstoffe umgestellt:

[503] Siehe Landtag NRW (2019/2)

[504] Norwegen testet den Einsatz von Ammoniak als Treibstoff für Schiffe. Es wird bereits bei einem Druck von 10 bar flüssig. Siehe Wolff (2020/1); Zu Methanol siehe Stena Line (2020/1)

[505] Siehe Diesener (2017/1)

[506] Siehe Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (2020/1); SimplyScience (2020/1); Institut für nachhaltige Wirtschaft und Logistik (2018/1); Maritimes Cluster Norddeutschland (2019/1)

[507] Die IMO hat 2018 als Strategie den Wechsel zu flüssigem Erdgas (LNG) vorgeschlagen. Eine Reihe von Reedereien haben schon LNG-Schiffe gebaut. Allerdings tritt bei den Motoren in größerem Maße Methan-Schlupf auf. Dies Problem würde auch durch einen Wechsel zu grünem Methan nicht beseitigt. Siehe ICCT (2020/1)

[508] Die TU Berlin testet bereits den kombinierten Einsatz von Elektromotoren, Batterien und Brennstoffzellen für Binnenschiffe – siehe TU Berlin (2019/1).

- Durch die Besteuerung von fossilem Schiffsdiesel (siehe im Kapitel 2.6 »Treibhausgaspreis«) oder durch ein Quotensystem soll E-Schiffsdiesel schrittweise durch synthetische Kraftstoffe abgelöst werden. Ab spätestens 2035 sollte kein fossiler Schiffsdiesel mehr zum Verkauf zugelassen werden.
- Dieser Prozess wird international abgestimmt. So können negative Ausweicheffekte (Tanken im Ausland, Ausweichen auf andere Häfen) vermieden werden. Dafür reicht bereits eine Abstimmung in Europa.

- Fährverkehr und Kurzstreckenschiffsverkehr werden elektrifiziert. Dies wird erreicht, indem die Kosten für E-Kraftstoffe so hochgehalten werden, dass die Umstellung sich lohnt. Dafür reicht vermutlich der CO_2-Preis.
- In allen Häfen wird die Nutzung von Landstrom Pflicht.
- Es werden Mittel für die Forschung und Erprobung von alternativen Antrieben für See- und Binnenschifffahrt bereitgestellt.

Sektoren 5 und 6 Landwirtschaft, Ernährung, Bodennutzung und Kompensation

In der internationalen Statistik der Treibhausgasemissionen wird zwischen der Landwirtschaft und der Bodennutzung unterschieden. Ein Sektor Ernährung kommt dort nicht vor – ebenso wenig wie die Kompensationsmaßnahmen. Wir behandeln diese Bereiche hier zusammen. Unter Landwirtschaft werden alle Emissionen erfasst, die direkt mit der landwirtschaftlichen Produktion von Nahrung, Energiepflanzen und Rohstoffen verbunden sind. Dazu gehört auch die Fischerei. Unter Bodennutzung[509] werden die Emissionen behandelt, die aus dem Boden ausströmen (dann spricht man von Quellen) und die der Boden aufnimmt (Senken). Die Hauptsenke – die Waldwirtschaft – fällt ebenfalls unter Bodennutzung. Unter Kompensationen verstehen wir neben dem Wald auch alle anderen Methoden, Treibhausgase wieder aus der Atmosphäre rauszuholen. Hier behandeln wir auch technische Verfahren.

Überblick

Die Landwirtschaft im engeren Sinne verursacht heute in NRW nur knapp drei Prozent der Emissionen – weniger als halb so viel wie im Bundesdurchschnitt. Davon werden zwei Drittel durch die Viehhaltung verursacht. Die wichtigsten Maßnahmen sind daher die Reduzierung des Konsums von tierischen Produkten und die deutliche Vermeidung von Emissionen durch die Düngung der Äcker und der Ausdünstungen von Gülle und Mist. Selbst dann werden die Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft und der Bodennutzung im Jahre 2040 immerhin 30 Prozent aller restlichen Emissionen in NRW ausmachen. Rechnet man jedoch alle Emissionen des Ernährungssektors zusammen, dann kommt man schon heute auf über ein Viertel aller Treibhausgase (siehe im Abschnitt »Ernährung«).

[509] Wir übersetzen das englische „land use“ mit „Bodennutzung“, um eine Verwechslung mit der „Landwirtschaft“ (englisch: „agriculture“) zu vermeiden. Das Kapitel in der internationalen Statistik heißt LULUCF (land use and land use chance and forestry). Wenn wir hier von Bodennutzung reden, dann ist das gesamte Kapitel gemeint.

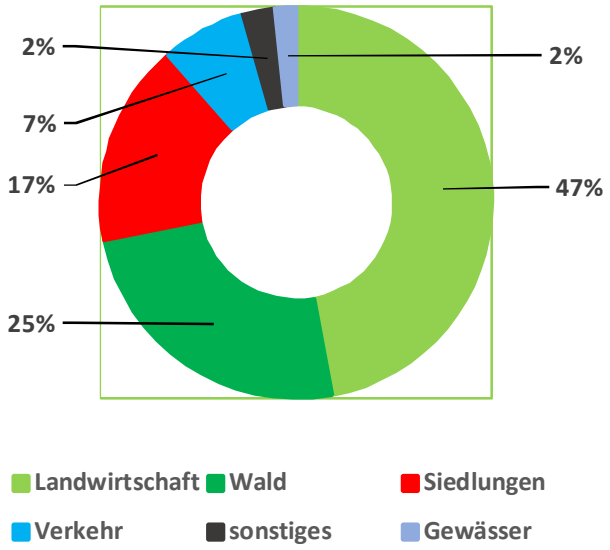
Bei der Bodennutzung überwiegen in NRW die Senken: Dies sind die Wälder und das Grünland. Durch die von vielen Studien vorgeschlagene Einstellung des Anbaus von Energiepflanzen ergibt sich sogar die Möglichkeit, dass neue Wälder künftig noch mehr zur Reduktion der Treibhausgase beitragen können. Spätestens ab 2045 können die Wälder und Wiesen die restlichen Emissionen aus Landwirtschaft, Industrie und dem Flugverkehr kompensieren, sodass NRW treibhausgasneutral sein wird. Da die Kompensationsleistung der Wälder aber Ende des Jahrhunderts zurückgehen wird, müssen langfristig weitere Maßnahmen zur Kompensation der nicht vermeidbaren Treibhausgase gefunden werden. Sie werden im Abschnitt »Kompensationen« diskutiert.

Insgesamt sind die Herausforderungen für die Landwirtschaft bzw. den Ernährungssektor gewaltig. Die konkurrierenden Anforderungen durch die Sicherung der Ernährung, die Erhaltung der Natur und dem Schutz des Klimas bilden ein Trilemma, das einen historischen Kompromiss erforderlich macht (siehe im Abschnitt »Trilemma«).

Ausgangslage in Nordrhein-Westfalen[510]

Obwohl NRW das am dichtesten besiedelte deutsche Flächenland ist, wird fast die Hälfte seiner Fläche landwirtschaftlich genutzt, nur etwas weniger als in Deutschland insgesamt (51 Prozent). Fast 70 Prozent dieser landwirtschaftlichen Flächen sind Äcker. Ein Viertel der Fläche des Landes wird von Wäldern bedeckt. Durch Erweiterung von Siedlungs- oder Gewerbegebieten und Straßenbau und Rohstoffabbau, aber auch Kompensa-

Grafik 15: Flächenanteile in NRW



[510] Eine Zusammenstellung der Zahlen findet sich in Anlage 1 und IT.NRW (2020/6)

tionsmaßnahmen nach dem Naturschutzrecht verlieren Landwirt*innen in NRW täglich ca. 17 Hektar Acker- und Weidefläche.[511] Waldflächen können kaum noch reduziert werden, da sie durch Bundes- und Landesrecht geschützt sind und Rodungen fast immer (ggf. an anderer Stelle) ersetzt werden müssen.[512]

Die Emissionen aus Landwirtschaft und Bodennutzung müssen zusammen betrachtet werden. So werden viele ehemalige Moore heute landwirtschaftlich genutzt. Gleichzeitig werden die Flächen, die neu bewaldet werden können, hauptsächlich bisherige landwirtschaftliche Flächen sein. Maßnahmen, die diese Flächen betreffen, betreffen also stets auch die Landwirtschaft. Flächeninanspruchnahme ist damit von besonderer Relevanz für die Zukunft der regionalen Lebensmittelproduktion.

Emissionen der Landwirtschaft

Der Anteil der Emissionen pro Kopf der nordrhein-westfälischen Landwirtschaft ist mit drei Prozent der Gesamtemissionen verhältnismäßig geringer als in anderen Bundesländern. Hauptgrund dafür sind die geringere Fläche pro Einwohner*in und die hohen Gesamtemissionen durch den hohen Anteil an Kohleverfeuerung im Vergleich zum Bundesdurchschnitt. Aber neben diesen rechnerischen Faktoren wirkt sich auch die geringere Zahl an Rindern pro Einwohner*in aus. Die Emissionen beliefen sich im Jahr 2018 auf 7,6 $MtCO_{2eq}$.[513] Im Vergleich dazu verursachte die Landwirtschaft in Deutschland mit 64 $MtCO_{2eq}$ insgesamt sieben Prozent aller Treibhausgasemissionen.[514] Hinzu kommen in NRW noch 1,6 $MtCO_{2eq}$/a durch den Energieverbrauch von Fahrzeugen, Maschinen und Gebäuden.[515]

Die Emissionen aus der Bodennutzung spielen in NRW nur eine geringe Rolle. Dabei handelt es sich vor allem um CO_2-Emissionen aus trockengelegten Mooren. Sie betragen in NRW nur 0,5 Prozent der gesamten Emissionen des Landes, während sie in

[511] Siehe LANUV (2018/3), MULNV (2021/2)

[512] Siehe LANUV (2008/1)

[513] Siehe LANUV (2020/1)

[514] Im Handbuch werden 8% ausgewiesen, da dort die landwirtschaftlichen Geräte, Fahrzeuge, Ställe und anderen Gebäude der Landwirtschaft zugerechnet werden. Siehe MD (2020/1).

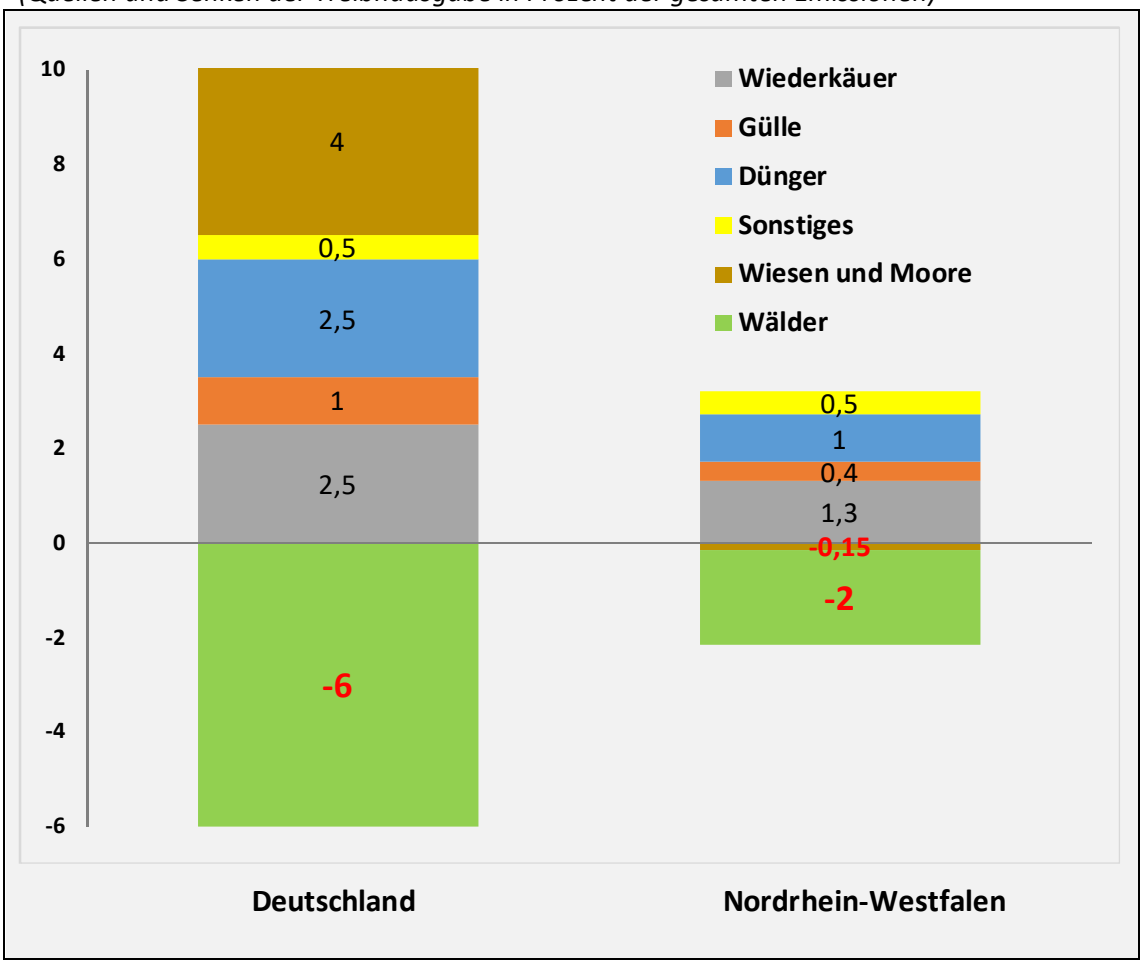
[515] Siehe Schlacke (2021/1)

Deutschland insgesamt 4,6 Prozent und in Norddeutschland mit über 10 Prozent der Emissionen einen erheblichen Teil der Treibhausgasausstöße verursachen.

Dagegen dominieren in NRW hauptsächlich Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) aus der Tierhaltung und aus der Stickstoffdüngung der Äcker. Zwei Drittel der Emissionen (2018 waren es 4,8 $MtCO_{2eq}/a$) stammen aus der Tierhaltung. Den größten Anteil davon haben die Methanemissionen der Wiederkäuer, insbesondere der Milchkühe und der Rinder für die Fleischproduktion (trotz der vergleichsweise geringeren Zahl in NRW). Dazu kommen die Emissionen aus Gülle und Mist, wobei hier die Schweinehaltung den größten Anteil hat. Die Emissionen aus der Düngung der Äcker machen mit einem Drittel etwas weniger aus als in anderen Bundesländern.

Grafik 15: Anteil der Emissionen von Landwirtschaft und Bodennutzung

(Quellen und Senken der Treibhausgabe in Prozent der gesamten Emissionen)



Quellen und Senken der Bodennutzung

Die Auswirkungen von Landnutzung und der Landnutzungsänderungen auf die Treibhausgasemissionen werden in fünf Kategorien zusammengefasst: Wald (Laub-, Nadel- und Mischwaldflächen), Ackerland (Ackerlandkulturen, Hopfen-, Wein- sowie Obstanbauflächen), Grünlandnutzung (Wiesen, Weiden und Nassgrünland, kleine Gehölze), Feuchtgebiete (terrestrische Feuchtgebiete, Gewässer und Emissionen durch Torfabbau) sowie Siedlungen (Wohn-, Produktions- und Verkehrszwecke sowie innerstädtische Grünflächen). Wald ist dabei die bedeutendste Senke. Rund 5,5 $MtCO_{2eq}$ konnten 2018 in NRW durch den Zuwachs der Wälder an Biomasse – auch durch Neuaufforstung – gebunden werden. Auch die Humusbildung trägt dazu bei.

Moore und Grünland

Die in Norddeutschland dominierenden Emissionen aus ehemaligen Mooren und Feuchtwiesen spielen in NRW kaum eine Rolle. Im Gegenteil: Grünland funktioniert in NRW – anders als in anderen Bundesländern – sogar als Senke. Allerdings hat NRW in den letzten 50 Jahren 400.000 ha Grünland verloren. Während gleichzeitig das Ackerland relativ konstant bei 1 Mio. ha blieb. Das heißt, der Entzug von Fläche für Siedlungen, Straßen etc. ging komplett zu Lasten des Grünlands. Zurzeit nehmen die Wiesen und Feuchtgebiete immer noch rund 0,4 $MtCO_{2eq}$ aus der Atmosphäre auf.

Die höchsten Emissionen im Sektor Landnutzung und Landnutzungsänderungen entstammen in NRW 2018 mit etwa 0,9 $MtCO_{2eq}$ der Kategorie Ackerland (in „Sonstiges“ enthalten). Dies wird durch Nutzung des Ackerlandes sowie die Umwandlung von Feuchtgebieten und insbesondere Grünland in Ackerland oder Siedlungen verursacht. Durch die Umwandlung von Landwirtschafts- und Waldflächen in Siedlungen entstehen 2018 Emissionen in Höhe 0,5 $MtCO_{2eq}$.

Die Entwicklung der Emissionen

Während die Gesamtemissionen in NRW von 1990 bis 2019 um knapp 40 Prozent gesunken sind, sanken die Emissionen der Landwirtschaft nur um 1,41 $MtCO_{2eq}$, also ca. 20 Prozent.[516] Diese Minderung fand überwiegend bis 2000 statt und ist vor allem auf den

[516] Siehe Wirtschaft.NRW (2020/1)

Rückgang der Tierbestände an Rindern und Schweinen, die verbesserte Lagerung von Tierexkrementen sowie verringerten Dünger-, Mist- und Gülleeinsatz zurückzuführen.[517]

Die Ernährungsfrage, die Sektorkopplung und der Außenhandel mit Nahrungsmitteln

Wir behandeln in diesem Kapitel vor allem die Reduzierung der Emissionsquellen in Landwirtschaft und Bodennutzung und die Stärkung der Senken Wald und Feuchtgebiete in Deutschland. Damit folgen wir der Gliederung der international vereinbarten Statistik mit den Sektoren Landwirtschaft und Bodennutzung.

Es gibt aber noch eine andere mögliche Betrachtungsweise: Der wissenschaftliche Beirat für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz der Bundesregierung (WBAE) hat in einem Gutachten[518] vom Juni 2020 darauf hingewiesen, dass eine ganzheitliche Betrachtung der Emissionen, die in Deutschland durch die Ernährung der Bevölkerung verursacht werden, zu dem Ergebnis kommt, dass bis zu 25 bis 30 Prozent der Treibhausgas-Emissionen in Deutschland der Ernährung zugeordnet werden können.

Neben den engeren Emissionen der Landwirtschaft mit sieben Prozent kommen hinzu: Die Fahrzeuge, Ställe und andere Gebäude (ein Prozent), die Bodennutzung – vor allem trockengelegte Wiesen und Moore mit fünf Prozent, die Ernährungsindustrie, die Futtermittel- und Nahrungsimporte, die Düngerindustrie, der Transportsektor, der Lebensmittelhandel und schließlich auch die Emissionen der Essens- und Getränkezubereitung, die einen erheblichen Anteil des Energieverbrauchs in den Haushalten verursachen.

Auch wenn wir im Folgenden der offiziellen Systematik folgen und jeweils die Treibhausgas-Reduktionen im engeren Sektor der Landwirtschaft bzw. der Bodennutzung betrachten und rechnen, so haben wir doch versucht, bei allen angesprochenen Fragen die erweiterte Betrachtungsweise zu berücksichtigen. So haben wir die in dem WBAE-Gutachten angesprochenen Handlungsfelder im Folgenden durchweg einbezogen und berücksichtigt.

---

[517] Siehe MKULNV (2015/1)

[518] Siehe WBAE (2020/1)

Und umgekehrt gilt natürlich auch: Wenn es gelingt, die Treibhausgas-Emissionen der Stromerzeugung, der Gebäude, des Verkehrs, der Lebensmittelindustrie usw. zu vermeiden, dann reduzieren sich damit auch die durch die Ernährung verursachten Emissionen. Sowieso können die in dieser Studie dargestellten sieben Sektoren nicht getrennt betrachtet werden. Zwischen den Sektoren gibt es jeweils eine enge Sektorkopplung. Es existieren große Überschneidungen zwischen Stromversorgung, Hauswärme, Industrie und Verkehr. Vielen Klimaforscher*innen ist nur nicht bewusst, dass es eben auch zwischen der Landwirtschaft (inklusive Ernährung und Landnutzung) und den Sektoren Stromversorgung, Verkehr, Wärme, Industrie und Abfall eine enge Sektorkopplung mit einer Schnittmenge von ca. 15 Prozent der gesamten Emissionen gibt, die die Emissionen des engeren Sektors Landwirtschaft um das Doppelte übertrifft.

Ein weiterer Gesichtspunkt sind die mit unserer Ernährung und der Landwirtschaft verbundenen Importe und Exporte. Ein erheblicher Anteil der Futtermittel für unsere Tierzucht wird importiert und umgekehrt werden von Deutschland auch in erheblichem Umfang Nahrungsmittel, insbesondere Fleisch und lebende Tiere, exportiert (siehe dazu mehr im Abschnitt »Einstellung der Exporte und Futtermittelimporte«). Insgesamt wird für die Produktion der in Deutschland konsumierten Nahrungsmittel rechnerisch eine Fläche von 19,4 Mio. ha benötigt, davon zwei Drittel für die Tierzucht. Es wird aber nur eine Fläche von 14,2 Mio. ha für den Anbau von Nahrungsmitteln genutzt.[519] Auf der übrigen Fläche werden Energiepflanzen und Rohstoffe für die Industrie angebaut. Diese Zahlen lassen sich zwar nicht direkt auf die Treibhausgasbilanz übertragen, aber es ist durchaus realistisch, dass die Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung der Importe und Exporte in Deutschland noch ein Viertel höher liegen als ausgewiesen.

Das Ziel

Der Klimaschutzplan 2015 des Landes beschreibt die folgenden Handlungsfelder im Bereich von Landwirtschaft, Forst und Boden: Düngung und Bodenbewirtschaftung, Tierhaltung, Kohlenstoffspeicherung in Böden, Wald und Holzprodukten, Energieeinsatz in Land- und Forstwirtschaft und Gartenbau, nachwachsende Rohstoffe.[520] Darüber

[519] Siehe Schlacke (2021/1); zur THG-Bilanz des Außenhandels hatten wir keine Zahlen.

[520] Siehe Landwirtschaftskammer (2015/1)

herrscht in Politik und Wissenschaft Konsens. Wenn es aber dann um konkrete Maßnahmen und Treibhausgas-Reduktionspfade geht, gehen die Auffassungen schnell auseinander.

Aufgrund der vorliegenden wissenschaftlichen Studien können die Treibhausgas-Emissionen in NRW bis 2040 von heute 7,6 $MtCO_{2eq}$/a auf etwa 2 $MtCO_{2eq}$/a reduziert werden.[521] Damit kann die Landwirtschaft einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz in NRW leisten. Bei der konkreten Umsetzung dieser Ziele in Maßnahmen ergeben sich aber gravierende Konflikte, die gelöst werden müssen.

Das Trilemma

Das zentrale Thema dieses Kapitels ist die Nutzung der Flächen. Selbst in dem hochindustrialisierten NRW machen Landwirtschaft, Naturschutz und Wälder über drei Viertel der Fläche des Landes aus. Bei der Nutzung der Flächen stoßen drei Zielsetzungen aufeinander: Die Ernährung der Menschen, die Biodiversität oder auch das Stoppen des Artensterbens und schließlich der Klimaschutz. Der wissenschaftliche Beirat für Globale Umweltveränderungen der Bundesregierung hat dazu im vorigen Jahr ein Gutachten erstellt, in dem er angesichts der drei sich scheinbar widersprechenden Herausforderungen von einem *»Trilemma«* spricht.[522]

Es ist daher kein Wunder, dass die bevorstehenden Veränderungen durch den Klimaschutz keinen Berufsstand so stark betreffen wie den der Landwirt*innen: Der Ausstieg aus dem Anbau der Energiepflanzen verbunden mit der Aufforstung von Ackerflächen, die Wiedervernässung von ehemaligen Mooren und Feuchtgebieten, die erhebliche Reduzierung der Viehzucht und schließlich der flächendeckende Durchbruch der ökologischen Landwirtschaft bedeuten gewaltige Herausforderungen, die einzelne Landwirt*innen nicht alleine bewältigen können. Es sieht fast so aus, als müsste ein gordischer Knoten durchschlagen werden – nur dass dies nicht mit dem Schwert gelingen kann. Denn alle drei Anforderungen sind essentiell: Wir brauchen die Artenvielfalt zum Überleben, wir müssen den Klimawandel stoppen und wir müssen Mitte dieses Jahrhunderts 10 Milliarden Menschen ernähren.

---

[521] Siehe Anlage 39

[522] Siehe WBGU (2020/1)

Der historische Kompromiss

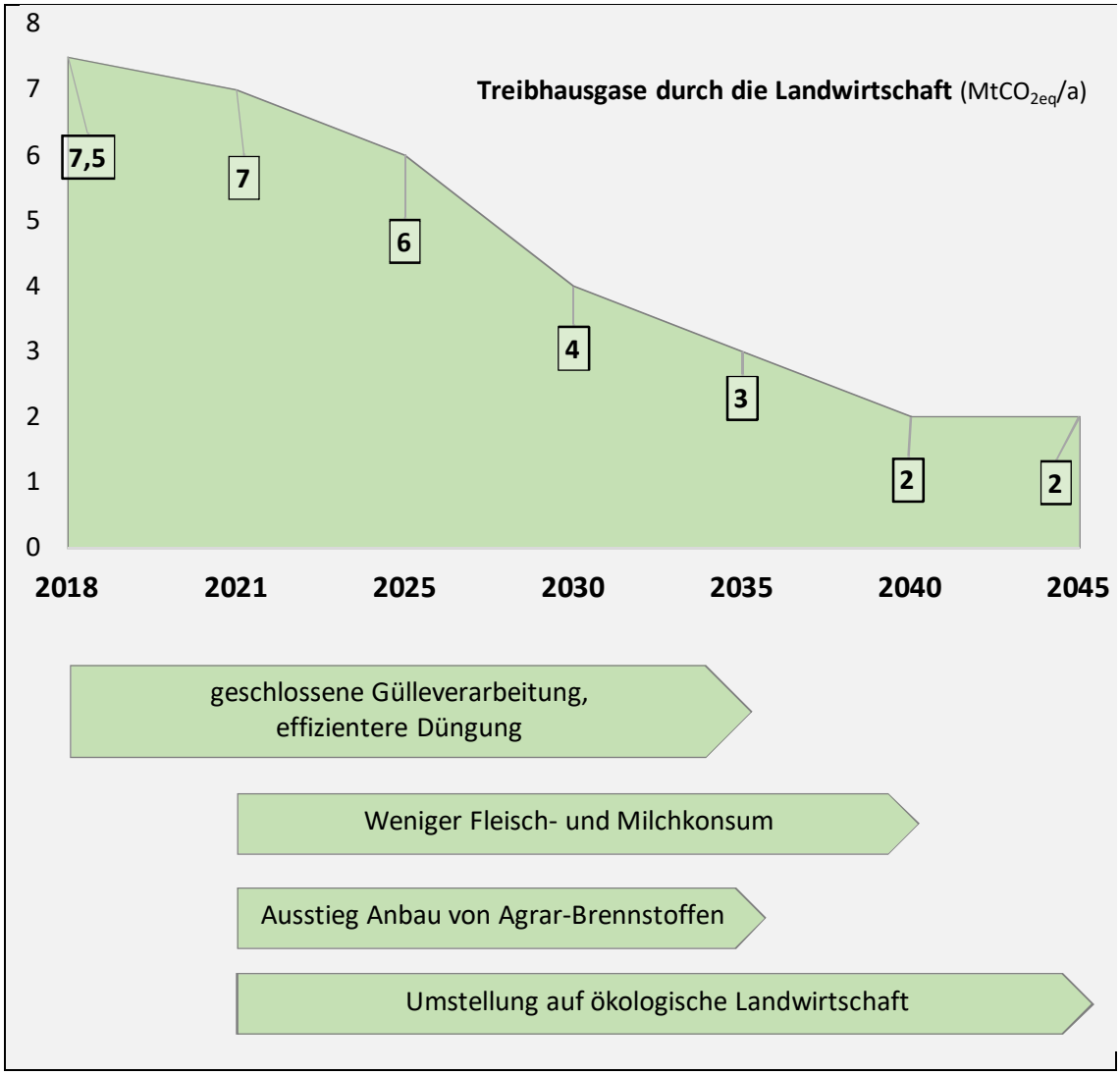
Wir brauchen daher einen *„historischen Kompromiss“.* Und der kann nicht im Gegeneinander, sondern nur im Miteinander bestehen. An dieser Stelle sollen nur einige Stichpunkte aus dem Gutachten des WBGU genannt werden:

- Die Politik muss die Akteur*innen an einen Tisch bringen, um Lösungen zu finden, die von allen akzeptiert werden können.
- Die Landwirt*innen müssen ein neues Geschäftsmodell bekommen. Die Landwirt*innen der Zukunft sind Bauer*innen, Umweltschützer*innen und Klimaschützer*innen in einer Person und bekommen dafür ihr Einkommen.
- Die Flächen müssen möglichst multifunktional genutzt werden: Ökolandbau kann Biodiversität mit Landwirtschaft verbinden, Wälder und Wiesen können unter Naturschutz stehen, Pflanzenanbau und Viehzucht sollen wieder verknüpft werden. Wiesen, Äcker und Wälder sollen wieder CO_2-Speicher werden. Agri-PV kann Freiflächenphotovoltaik mit Naturschutz und Landwirtschaft verbinden.
- Die Landwirtschaft produziert Nahrung – daher muss die Nachfrage der Kunden auf ökologische Produkte und Klimaschutz – also Reduzierung der tierischen Produkte – abgestellt werden. Der WBGU spricht von PHD (Planetary Health Diet).
- Die Landwirtschaft und die Wälder produzieren auch Rohstoffe. Holz kann teilweise den klimaproblematischen Zement ersetzen und Biorohstoffe ersetzen einen Teil der fossilen Rohstoffe der Chemieindustrie. Der Anbau von Pflanzen als Brennstoff sollte aber eingestellt werden, da er ineffizient ist.

Landwirtschaft

In der Grafik 16 wird dargestellt, wie sich die Emissionen in der Landwirtschaft auf Basis der vorliegenden Studien entwickeln können und welche Maßnahmen dazu notwendig sind. Im Folgenden werden die einzelnen Maßnahmen, ihre Auswirkungen und die dadurch erreichbaren Emissionsminderungen im Einzelnen beschrieben.

Grafik 16: Zeitplan und Maßnahmen im Sektor Landwirtschaft



Ernährung und Konsum

Eine grundlegende Änderung der Landwirtschaft setzt eine Änderung der Nachfrage – also eine Änderung unserer Ernährung voraus. Aufgrund der Empfehlung der Deutschen Gesellschaft für Ernährung schlägt das Öko-Institut auch aus Gesundheitsgründen vor, den Fleischkonsum mindestens um die Hälfte und den Konsum von Milchprodukten mindestens um ein Viertel zu reduzieren.[523] In dem oben schon erwähnten Gutachten

[523] Siehe Öko-Institut (2019/2)

des Wissenschaftlichen Beirates für Agrarpolitik und Ernährung wird ein umfangreiches Maßnahmenpaket vorgeschlagen, wie eine gesunde Ernährung, die mit weniger Treibhausgasemissionen verbunden ist, erreicht werden kann.[524] Dabei geht es um die Reduzierung des Konsums von Tierprodukten wie Fleisch- und Milchprodukte (siehe im Abschnitt »Reduzierung der Tierbestände«), die Ausweitung des Anteils an ökologischen Lebensmitteln, die Versorgung mit lokalen Produkten oder auch allgemein um die Durchsetzung von Standards zur Minimierung der Treibhausgasemissionen. Die Empfehlungen beinhalten:

- Bildung für nachhaltige Ernährung ausweiten
- Kostenloses gesundes Essen in Kitas und Schulen
- Gesunde Standards für die Küchen in den Hochschulen, Verwaltungen, Pflegeheimen und Krankenhäusern
- Finanzielle Anreize: Dazu hat der WBAE ein Paket im Gesamtvolumen von bis zu 10 Mrd. Euro jährlich vorgelegt, das sich teilweise selbst finanziert. Die Vorschläge reichen von der vollen Mehrwertsteuer für Tierprodukte, einer Zuckersteuer, einer Nachhaltigkeitssteuer für Lebensmittel entsprechend der mit der Herstellung verbundenen Treibhausgasemissionen, der Subventionierung von Gemüse und Obst bis hin zu einem sozialen Ernährungsgeld für einkommensschwache Haushalte.

Eine zentrale Rolle spielt natürlich auch der Lebensmittelhandel, der erheblich beeinflussen kann, welche Trends gesetzt werden. Dabei geht es um folgende Themen:

- Stärkung der Verhandlungsmacht der Landwirt*innen und ihrer Genossenschaften gegenüber den wirtschaftlich übermächtigen Lebensmittelkonzernen
- Regulierung der Werbung
- Kennzeichnungspflicht von Lebensmitteln nach Gesundheit, Tierwohl (wie es bei Eiern schon stattfindet), Klimaverträglichkeit und Sozialstandards bei der Produktion
- Stärkung des Verkaufs von Lebensmitteln aus lokaler Produktion

[524] Siehe WBAE (2020/1)

Anmerkung zur Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (GAP)

Der zentrale Schlüssel für eine auf Klimaneutralität ausgerichtete Landwirtschaftspolitik ist die Gemeinsame Agrarpolitik der EU (GAP). Denn fast die Hälfte der Einkommen der Landwirt*innen hängt von den EU-Geldern ab.525 Allerdings werden Klima-, Umwelt- und auch Artenschutz bei den aktuell geltenden Regelungen zur Verteilung der Gelder nur unzureichend berücksichtigt. Momentan laufen noch die Verhandlungen zur zukünftigen Ausgestaltung der GAP für den Zeitraum 2021 – 2027. Die dazu vorliegenden Vorschläge entsprechen allerdings nicht den Zielen des Europäischen Grünen Deals, der Biodiversitätsstrategie oder der Farm-to-Fork-Strategie der EU. Somit sind die anvisierten Regelungen bei weitem nicht ausreichend, um die gemeinsamen Klimaziele zu erreichen. Auch der am 26. März 2021 von den deutschen Agrarminister*innen erzielte Kompromiss zur nationalen Ausgestaltung der GAP wird diesen Ansprüchen nur unzureichend gerecht.[526]

Dabei bestünde gerade jetzt eine große Chance für Veränderungen. Wenn die GAP endlich dahingehend ausgerichtet würde, die Landwirt*innen nicht pauschal nach bewirtschafteter Fläche, sondern für konkrete ökologische Leistungen für die Gesellschaft (Einsparen von Treibhausgasen, Biodiversität und Umweltschutz, Tierwohl usw.) zu bezahlen, dann könnte das volle Potenzial der GAP bei der Agrarwende ausgeschöpft werden. Um einen möglichst effektiven Einsatz der Mittel zu gewährleisten, müssen förderfähige Maßnahmen einen substantiellen Beitrag zu klar definierten Umwelt- und Klimazielen leisten.[527] Gleichzeitig sollten diese so ausgestaltet sein, dass den Landwirt*innen über eine reine Kostendeckung hinaus finanzielle Anreize geboten werden, entsprechende Maßnahmen umzusetzen. Zudem bedarf es klarer und ambitionierter Vorgaben, um die Ökologisierung in der Fläche voranzutreiben.

---

[525] Die sogenannte 1. Säule beinhaltet die Direktzahlungen an die Landwirte nach Fläche, die 2. Säule beinhaltet die Bezahlung für umweltfreundliche Verfahren. Bislang überwiegt immer noch bei weitem die 1. Säule.

[526] Siehe FAZ (2021/1)

[527] Siehe ARC2020 (2021/1), Lakner (2021/1)

Im Rahmen der nationalen Strategiepläne bestehen für NRW Möglichkeiten, sich für eine umwelt- und klimafreundliche Ausgestaltung der GAP auf Landesebene einzusetzen.

Tierhaltung in Nordrhein-Westfalen

Nordrhein-Westfalen gehört zu den Bundesländern mit den meisten landwirtschaftlichen Nutztieren. Im Bundesländervergleich weist nur Niedersachsen einen noch höheren Schweine- und Geflügelbestand auf. Bei der Rinderhaltung belegt Nordrhein-Westfalen nach Bayern und Niedersachsen Platz drei. Damit wird mehr als jedes vierte in Deutschland gehaltene Schwein, aber nur etwa jedes achte Rind in Nordrhein-Westfalen gehalten.[528]

Bei der Tierhaltung entstehen überwiegend Methan, Lachgas und Ammoniak während der Verdauung sowie beim Abbau von Exkrementen im Stall und bei der Lagerung. 2018 wurden in Nordrhein-Westfalen aus der Tierhaltung 4,5 $MtCO_{2eq}$ Methan und 0,3 $MtCO_{2eq}$ Lachgas freigesetzt. Dabei werden 76 Prozent (3,6 $MtCO_{2eq}$) durch Rinderhaltung und 22 Prozent (1,1 $MtCO_{2eq}$) durch die Schweinehaltung verursacht. Der Anteil der Emissionen durch Schafe, Pferde und Geflügel mit zusammen 2 Prozent ist in der Gesamtbilanz vernachlässigbar.[529]

Etwa drei Viertel der rund 34.000 landwirtschaftlichen Betriebe in Nordrhein-Westfalen halten Vieh – mehr als die Hälfte davon lebt sogar überwiegend von der Viehhaltung. Die Tierhaltung konzentriert sich besonders im Münsterland, am Niederrhein und in Ostwestfalen.[530] Der umsatzstärkste Produktionszweig ist dabei die Schweinehaltung. Der regionale Schwerpunkt liegt im Münsterland, wo fast die Hälfte aller Betriebe Schweine halten. 2019 waren das in NRW knapp 7 Millionen Schweine. Unter den Futterbaubetrieben haben die Milcherzeuger die größte Bedeutung. 2019 gibt es in Nordrhein-Westfalen etwa 1,34 Millionen Rinder. Schwerpunkte der Haltung von Milchkühen sind

[528] Siehe IT-NRW (2020/5)

[529] Siehe LANUV (2020/1)

[530] Siehe IT-NRW (2020/5)

der Niederrhein und die Mittelgebirgslagen. Im relevanten Umfang werden auch Legehennen und Mastgeflügel gehalten.[531]

Methan-Emissionen von Tieren

Rinder sind Wiederkäuer, bei deren Verdauung große Mengen Methan entsteht. Dabei fallen etwa 60 Prozent auf die Milchkühe und 40 Prozent auf die Fleischrinder. Auch andere Wiederkäuer wie Schafe und Ziegen verursachen Emissionen. Allerdings gibt es von diesen Tieren so wenige, dass der Einfluss nur klein ist. Deshalb konzentrieren wir uns auf die Rinder.

Die Möglichkeiten der Emissionsreduktion in der konventionellen Rinderhaltung sind begrenzt. So ist das Potenzial der Reduzierung der Emissionen durch eine andere Ernährung der Tiere sehr gering.[532] Manche Haltungsformen können sowohl bei Milchkühen als auch bei Rindern einen Einfluss haben und die Emissionen im besten Fall um ein Viertel senken.[533]

Eine Alternative stellt die extensive Beweidung dar. Extensiv bedeutet, dass bewusst weniger Tiere gehalten werden und auf den Einsatz von Düngemitteln verzichtet wird. Die Treibhausgasbilanz bei der extensiven Beweidung kann insgesamt sogar positiv sein.[534] Die Kühe stoßen zwar immer noch Methan aus, aber die Weiden speichern CO_2. Grünland sollte deshalb erhalten werden. Schließlich ist Tierhaltung die einzige Möglichkeit, das für die Artenvielfalt wichtige Dauergrünland zu erhalten und für die Erzeugung von Lebensmitteln zu nutzen.

Reduzierung der Tierbestände

Alle diese Maßnahmen reichen aber nicht aus. Die einzige relevante Möglichkeit, die die Fachleute sehen, um in großem Umfang die Methan-Emissionen zu reduzieren, ist die Reduzierung der Tierbestände. Und da es nichts bringt, wenn in Deutschland die Anzahl der Tiere zurückgeht, dafür aber mehr Fleisch- und Milchprodukte importiert werden,

---

[531] Siehe MULNV (2020/2)

[532] Siehe Brade (2016/1)

[533] Siehe MD (2020/2) in Anlage 8

[534] Siehe Kreis Schleswig-Flensburg (2020/1)

muss vor allem der Fleisch-, Milch- und Käsekonsum zurückgehen (siehe oben im Abschnitt »Ernährung«).

Weiterhin muss bei der Reduktion der Tierbestände berücksichtigt werden, dass den Landwirten ausreichend Zeit für die Umstellung gewährt wird. Die Agrarpolitik muss also den betroffenen Bauern neue Geschäftsmodelle anbieten. Dies muss Teil des historischen Kompromisses sein, der oben bei der Zielsetzung dargestellt wurde.

Zusammen ergeben die beschriebenen Maßnahmen eine Verminderung der Methan-Emissionen um fast die Hälfte.[535]

Lagerung und Verwendung von Gülle und Mist

In der Landwirtschaft werden bundesweit mehr als 70 Prozent der Gülle unbehandelt gelagert und auf landwirtschaftliche Flächen ausgebracht.[536] Bei der Zersetzung von Mist und Gülle entstehen in großem Umfang Lachgas und Methan.[537] Eine Tonne Lachgas hat eine 290-mal so schädliche Wirkung auf das Klima wie eine Tonne Kohlendioxid.

Die Emissionen, die bei der Lagerung von Gülle und Mist entstehen, können fast vollständig vermieden werden, wenn diese Stoffe gasdicht gelagert und vermehrt in Biogasanlagen genutzt werden. Heute wird nur 17 Prozent der in Deutschland anfallenden ca. 160 Mio. Tonnen Gülle energetisch genutzt. Damit macht der Wirtschaftsdünger nur 35 Prozent der Beschickung der Biogasanlagen aus. Die übrige Menge verursacht bei der Lagerung und Ausbringung Emissionen. In einem vom UBA beauftragten Forschungsprojekt wird davon ausgegangen, dass bereits bis 2030 eine Verdopplung der Güllenutzung auf fast 70 Prozent der benötigten Brennstoffe möglich ist. Bundesweit wird bei einer Verdoppelung des Gülleeinsatzes in Biogasanlagen eine Treibhausgaseinsparung von bis zu 5,8 $MtCO_{2eq}$ im Jahr 2030 prognostiziert.[538]

---

[535] Siehe Öko-Institut (2019/2) – die Deutsche Gesellschaft für Ernährung empfiehlt eine Reduzierung des Fleischkonsums von heute 60 kg pro Person im Jahr auf 16 kg (-74%) bis 31 kg (-48%).

[536] Siehe UBA (2019/12)

[537] Lachgas entsteht beim Abbau von stickstoffhaltigen Düngemitteln durch bestimmte Mikroorganismen.

[538] Siehe UBA (2019/2)

Die Nutzung der Gülle macht allerdings keinen Sinn, wenn die Transportwege zu lang werden. Zwischen 2013 und 2016 hat der LKW-Transport von Gülle bereits deutlich zugenommen. [539] Mehr als 70 bis 80 Prozent der Gülle dürfte daher nicht nutzbar sein. Wir haben allerdings keine Quellen, ob das auch für das dichtbesiedelte NRW gilt. Wenn Gülle und Mist in Zukunft zu einem größeren Anteil in Biogas-Anlagen genutzt werden[540], hat das außerdem den Vorteil, dass der Anbau von Energiepflanzen eingestellt werden kann (siehe im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« im Abschnitt »Bioenergie«). Um den Einsatz von Gülle in Biogasanlagen zu erhöhen, müssen das Erneuerbare-Energien-Gesetz und die Düngeverordnung angepasst werden. Im Ergebnis können die Emissionen weitgehend vermieden werden.

Ammoniakentstehung in der Schweinemast

Ammoniak (NH_3) entsteht in der Tierhaltung durch den Abbau des Harnstoffs im Urin durch das im Kot enthaltene Enzym Urease. Ammoniak ist selbst kein Treibhausgas, oxidiert aber in der Luft zu Lachgas. Neben der Güllekapselung wird auch zur direkten Reduzierung des Ammoniakanfalls geforscht. So hat eine Arbeitsgruppe von Prof. Wolfgang Büscher der Universität Bonn den Einfluss von Strukturspaltenböden in der Schweinehaltung auf die Bildung von Ammoniak untersucht. [541] Er kam zu dem interessanten Ergebnis, dass die Ammoniak-Emissionen durch sogenannte Strukturspaltenböden in den Ställen (Kunststoffböden mit einer modifizierten Oberfläche und einem verminderten Schlitzanteil) im Vergleich zu einem konventionellen Spaltenboden aus Beton um 50 Prozent vermindert werden können. Dies liegt an der verbesserten Drainagefunktion der Oberfläche, durch die Kot und Urin schneller getrennt werden. Dieses Beispiel zeigt, dass an vielen kleinen Stellschrauben gedreht werden kann. Dazu ist weitere Forschung notwendig.

---

[539] Landwirtschaftskammer (2018/1)

[540] Mittelfristig sollte es zu einer anderen Struktur der Biogasanlagen kommen mit kleineren Anlagen und mit möglichst kurzen Zufahrtswegen für Mist und Gülle. Auch muss berücksichtigt werden, dass eine Ausweitung der ökologischen Landwirtschaft und der Weidehaltung die anfallende Güllemenge reduziert.

[541] Siehe Austermann (2012/1)

Stickstoffemissionen aus der Düngung

Lachgas und andere Stickstoffverbindungen entstehen auf Feldflächen durch die Anwendung von stickstoffhaltigen Düngemitteln wie Mineraldünger, Wirtschaftsdünger und Gärresten.[542] Die Lachgas-Emissionen aus der Düngung liegen in NRW bei 2,4 $MtCO_{2eq}/a$, das sind neun Prozent der deutschen Emissionen, was knapp dem Flächenanteil entspricht.[543] Um die Emissionen zu senken, müssen die Stickstoff-Überschüsse, die von den Pflanzen nicht aufgenommen werden, reduziert werden. Neben der effektiveren und dadurch sparsameren Düngung kann die Wirkung auch durch eine verbesserte Düngetechnik verbessert werden. Hierzu zählt zum Beispiel die schnellere Einarbeitung von Wirtschaftsdüngern.

Ein großes Potenzial zur Reduzierung der Düngermenge und damit der Treibhausgase liegt auch in neuen Methoden zur Bodenbearbeitung. Dabei wird der Stickstoffdünger nicht mehr auf der ganzen Fläche verteilt, sondern ganz gezielt nur zur Pflanze oder dem Samen ausgebracht.[544] Nordrhein-Westfalen gewährt Zuschüsse für Investitionen bei der Lagerung oder Ausbringung von flüssigen Wirtschaftsdüngern, mit denen Ammoniakemissionen reduziert werden. Gefördert werden Schleppschuhverteiler sowie Schlitz- und Injektionstechniken ebenso wie die Abdeckung von Güllebehältern. Schätzungen zufolge führt die Einsparung von einem Kilogramm nicht ausgenutztem Stickstoff zur Minderung von 17,5 Kilogramm CO_2-Äquivalenten.[545]

Andere Formen der Bodenbearbeitung reduzieren nicht nur den Düngerbedarf, sondern können auch die Humusbildung des Ackers verbessern. Diese Effekte müssen bei der Optimierung der Bewirtschaftung der Äcker berücksichtigt werden.

---

[542] Bei den Stickstoff-Emissionen aus der Bodenbearbeitung geht es vor allem um Lachgas, aber auch um andere Stickstoffverbindungen wie Ammoniak und Nitrat (siehe UBA (2019/10)). Zu berücksichtigen ist auch, dass die Herstellung von Mineraldünger erhebliche zusätzliche Emissionen verursacht, die aber nicht bei der Landwirtschaft, sondern bei der chemischen Industrie ausgewiesen werden (siehe im Kapitel »Industrie« im Abschnitt »Chemische Industrie«).

[543] Siehe Anlage 1

[544] Man spricht auch von digitaler Landwirtschaft. Siehe Thünen (2013/1), Osterburg (2009/1) und im Kapitel 2.5 »Zur Rolle der Digitalisierung«.

[545] Siehe Landwirtschaftskammer (2015/1)

Notwendig sind weitere Forschungsprojekte zur Düngemittelreduktion. An der FH Bielefeld werden beispielsweise smarte Düngemittel entwickelt. Aus einem organischen Düngegranulat sollen die Nährstoffe auf die Bedürfnisse der Kulturpflanze zugeschnitten und gezielt abgegeben werden. Dabei dienen Roh- und Reststoffe aus der Agrarindustrie als Grundlage. Damit wird der Einsatz von Düngemitteln reduziert und die Produktion nachhaltiger.[546]

Eine weitere Reduzierung erfolgt durch den Anbau von Leguminosen auf fünfzehn Prozent der konventionellen Ackerfläche. Dies hängt jedoch stark von den Standorten ab. Leguminosen sind Pflanzen, die Stickstoff im Boden anreichern und dadurch eine Art natürlicher Dünger sind. Insgesamt kommen die vorliegenden Studien zum Ergebnis, dass die Emissionen aus der Bodenbearbeitung etwa um die Hälfte reduziert werden können.[547]

Ökolandbau

Ende 2019 betrug der Anteil der Öko-Landwirtschaft in Nordrhein-Westfalen mit 89.000 Hektar circa sechs Prozent der landwirtschaftlich genutzten Fläche.[548] Es gibt in Nordrhein-Westfalen also weniger Öko-Landbau als im Bundesdurchschnitt, wo der Schnitt bei knapp zehn Prozent liegt. Gut zwei Drittel der von ihnen bewirtschafteten Flächen ist Grünland, ein Drittel ist Ackerbaufläche.[549] Das Land plant, den Anteil bis 2030 auf 20 Prozent zu steigern.[550] Die EU-Kommission hat aber jetzt 25 Prozent als Ziel für 2030 vorgegeben. Daher rechnen wir selbst bei einem etwas geringeren Tempo mit einer Ausweitung der Ökolandbaufläche auf 35 Prozent der Fläche der Landwirtschaft bis 2040.

Der ökologische Landbau verursacht pro Flächeneinheit etwas geringere Treibhausgasemissionen. Emissionseinsparungen entstehen durch den Verzicht auf Mineraldünger (weniger Lachgas), durch verstärkten Humusaufbau (Bindung von

[546] FH Bielefeld (2019/1)

[547] Siehe MD (2020/1)

[548] Siehe MULNV (2020/3)

[549] Siehe MKULNV (2015/3), Ökolandbau.de (2021/1)

[550] Siehe proplanta (2020/2)

Kohlenstoff)[551] und durch weniger Emissionen in der Mineraldüngerproduktion. Pro Produkteinheit konnte jedoch bislang kein systematischer Vor- oder Nachteil des ökologischen Landbaus für das Klima nachgewiesen werden, da die Erträge entsprechend geringer sind. Hier kommt es auf die konkreten Standorte und Tierhaltungsbedingungen an. Allerdings führt eine gute ökologische Landwirtschaft zur stärkeren Humusbildung und damit zu zusätzlichen „negativen" Emissionen.

Maschinen, Gebäude, Geräte

In der Landwirtschaft spielen die CO_2-Emissionen durch Fahrzeuge, Maschinen sowie Wohngebäude und Ställe nur eine untergeordnete Rolle. Sie können durch den Einsatz von grünen Treibstoffen und Elektrifizierung auf null reduziert werden. Dies gilt auch für den Maschinenpark der Forstwirtschaft. In der Statistik werden diese Emissionen nicht der Landwirtschaft zugeordnet, sondern anderen Bereichen wie Verkehr (Fahrzeuge) und Wärme (Gebäude).

Einstellung der Exporte und Futtermittelimporte

Eine Studie der Boston Consulting Group empfiehlt, dass die Agrar-Exporte sofort beendet werden sollen.[552] Sie stellt fest, dass die gesamten Exporte der Landwirtschaft nur durch hohe Subventionen zustande kommen. Ein Euro Einnahme aus dem Export erfordert bis zu sechs Euro Subventionen. Der am stärksten subventionierte Bereich ist die Rinderhaltung. Würden die Exporte komplett eingestellt, dann würde die Fleischproduktion halbiert. Dadurch würden 80 Prozent der direkten und indirekten Subventionen eingespart. Durch die Reduzierung der Rinderhaltung und den flächendeckenden Übergang zu ökologischen Produktionsweisen können auch die Treibhausgasemissionen weiter erheblich reduziert werden.

Heute basiert die Viehzucht in Deutschland zu einem erheblichen Anteil auf Futtermittelimporten.[553] Diese verschärfen die Flächenkonkurrenz in vielen Ländern und führen

[551] In der Treibhausgas-Bilanzierung wird Humus allerdings nicht bilanziert, das Thünen Institut rät sogar davon ab, denn die mögliche C-Bindung in Böden durch Humusaufbau ist mengenmäßig und zeitlich limitiert und reversibel. Wir rechnen wie die meisten Studien in begrenztem Umfang mit der Humus-Bildung als Beitrag zur THG-Reduzierung.

[552] Siehe BCG (2019/1)

[553] Der Eiweißbedarf wird zu einem Drittel durch Importe gedeckt (siehe Schlacke (2021/1).

auch nicht selten dazu, dass Wälder vernichtet werden. Wenn der Fleischkonsum reduziert wird, könnte weitgehend auf die Importe verzichtet werden. Das betrifft natürlich nicht nur die Haltung von Rindern und Milchkühen, sondern auch die Schweine- und Hühnerhaltung.

Maßnahmen Ernährung

Es geht um gesunde und klimafreundliche Ernährung. Dabei richten sich die Maßnahmen an den Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung aus, was u.a. eine Halbierung des Konsums von Fleisch und eine Reduzierung des Konsums von Milchprodukten um ein Viertel bedeuten würde. Die wichtigsten Maßnahmen dazu sind:

- Bildung für nachhaltige Ernährung
- Kostenloses gesundes Essen in Kitas und Schule
- Gesunde Standards für die Küchen in den Hochschulen, Verwaltungen, Pflegeheimen und Krankenhäusern
- Finanzielle Anreize entsprechend den Vorschlägen des WBAE
- Regulierung der Werbung
- Kennzeichnungspflicht von Lebensmitteln nach Gesundheit, Tierwohl (wie es bei Eiern schon stattfindet), Klimaverträglichkeit und Sozialstandards bei der Produktion

Maßnahmen Landwirtschaft

- Treibhausgaspreise auch in der Landwirtschaft erheben
- In diesem Zusammenhang sollte eine Einstellung der Futtermittelimporte bewirkt werden.
- Stärkung der Verhandlungsmacht der Landwirt*innen und ihrer Genossenschaften gegenüber den wirtschaftlich übermächtigen Lebensmittelkonzernen
- Stärkung des Verkaufs von Lebensmitteln aus lokaler Produktion
- Die wesentlichen Umstellungen in der Landwirtschaft erfolgen durch Umstellung der Regeln für die EU-Förderung und der darauf basierenden Programme des Bundes und des Landes:

  - Reduzierung der Stickstoffemissionen vorschreiben – dabei Beratung und Unterstützung bei Entwicklung von neuen Anbaumethoden
  - Die Humusbildung in Äckern, Wiesen und Wäldern wird standortangepasst so gesteigert, dass eine maximale Treibhausgasreduktion erreicht wird.
  - Dazu Ausweitung des Ökolandbaus auf 35 Prozent bis 2040.
  - Die Emissionen aus Gülle und Mist werden weitgehend vermieden durch Regeln für eine gasdichte Lagerung und Verarbeitung.
  - Die Verwertung von Gülle und Mist in Biogasanlagen wird auf 60 Prozent verdoppelt.
  - Die Förderung von landwirtschaftlicher Produktion für den Export durch die EU soll auslaufen – die Subventionen für Exporte werden gestrichen.
- Der Anbau von Energiepflanzen wird bis 2035 beendet (siehe dazu im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« im Abschnitt »Bioenergie« und in den folgenden Abschnitten »Bodennutzung« und »Flächennutzung für die Klimapolitik«).
- Elektrifizierung oder Umstellung auf E-Brennstoffe der Geräte, Fahrzeuge, Ställe und sonstigen Gebäude der Landwirtschaft.
- Biogasanlagen werden auf Reststoffe und Wirtschaftsdünger umgestellt. Die Förderung wird so geregelt, dass sie nicht mehr im Dauerbetrieb laufen, sondern dann, wenn Sonne und Wind zu wenig Strom abgeben und ggf. Wärme benötigt wird.

Vermeidung von Lebensmittelabfällen[554]

In Deutschland werden nach Studien des WWF und des Thünen-Instituts jährlich zwischen zwölf bis zwanzig Millionen Tonnen Lebensmittel weggeworfen. Der größte Teil davon wird in den privaten Haushalten entsorgt, danach folgen in der Reihenfolge ihrer Anteile die Lebensmittelindustrie, die Gaststätten und Kantinen, die Landwirtschaft sowie der Groß- und Einzelhandel. Ein gutes Viertel der Abfälle könnte vermieden werden. Zu einem ähnlichen Ergebnis kam eine Haushaltsstudie im Auftrag des

[554] Siehe Öko-Institut (2019/2), BMEL (2019/1), Thünen (2019/1), WWF (2015/1)

Umweltministeriums von NRW[555], in der 14 Tage lang der Abfall von Lebensmitteln untersucht wurde. Es wurde pro Person und Tag 145g weggeworfen. 45 Prozent davon war nach Angabe der Befragten vermeidbar. Davon können etwa 60 Prozent vermieden werden. Dann müssen weniger Lebensmittel produziert werden, sodass wir für NRW mit zusätzlichen Einsparungen von 0,6 $MtCO_{2eq}$/a rechnen.

Hauptgrund für das Wegwerfen war das abgelaufene Haltbarkeitsdatum. Mittlerweile hat sich das Land verpflichtet, bis 2030 die Lebensmittelverluste zu reduzieren. Dabei setzt das Verbraucherministerium auf Ursachenanalyse, Austausch, Bildungsmaßnahmen und Best-Practice-Projekte. [556]

Maßnahmen zur Vermeidung von Lebensmittelabfällen

- Verbraucherinformation – Aufklärungsmaßnahmen über den bewussten Umgang mit Lebensmitteln finanzieren
- Optimierung der Produktionsprozesse und der Logistik von Lebensmitteln
- Gesetzliche Verpflichtung, dass Lebensmittel vor dem Verfallsdatum kostenlos an Verteilstellen weitergegeben werden müssen und nicht mehr entsorgt werden dürfen.
- Lebensmittel, die in Form und Gestalt nicht den genormten Standards entsprechen, sollen nicht mehr entsorgt werden, sondern kostengünstig in den Handel oder an Verteilstellen weitergegeben werden.
- Nutzung der Rest-Abfälle für die Schweinemast, die Verwertung zu Biogas und als Rohstoffe

[555] Siehe MULNV (2018/1)

[556] Siehe MULNV (2021/1)

Bodennutzung[557]

Anders als in den anderen Sektoren enthält die Bodennutzung sowohl Treibhausgasquellen als auch -senken. Die wichtigste natürliche Senke sind die Wälder. Moore, Wiesen und Äcker können sowohl Treibhausgase aufnehmen als auch abgeben, wobei das letztere heute meist überwiegt. Auch die bebauten Flächen stoßen in geringen Mengen Treibhausgase aus.

Humuserhalt und Humusaufbau

Äcker und Wiesen können durch die Humusbildung dauerhaft CO_2 im Boden binden. Da diese Prozesse sehr langsam ablaufen, ist die jährliche Wirkung jedoch gering und wird auf nur zwei $MtCO_{2eq}$ pro Jahr für ganz Deutschland geschätzt. Da diese Speicherung bei Wiesen größer ist als bei Äckern, kann die Umwandlung von Äckern in Grünland diese Menge mehr als verdoppeln. Umgekehrt ist es wichtig, dass Dauergrünland nicht in Äcker oder Siedlungsflächen umgewandelt wird. Auch das Tauschen von Acker- und Grünlandflächen sollte nur in Ausnahmen genehmigt werden, da es zu Humusverlust führt. Der Prozess der Humusbildung kann beschleunigt werden, wenn Wiesen nicht mehr so stark entwässert werden.

Auch die Art der Bodenbewirtschaftung hat Einfluss auf die Humusbildung – siehe dazu auch in den Abschnitten »Ökolandbau« und »Stickstoffemissionen aus der Düngung«.

Wiedervernässung der Moorböden und Schutz der Moore

In Nordrhein-Westfalen gibt es etwa 26.000 Hektar Moorflächen. Etwa 3.000 Hektar entfallen dabei auf Hochmoore und etwa 23.000 Hektar auf Übergangs- und Niedermoorflächen, die vor allem landwirtschaftlich genutzt werden.[558] Moore stellen wichtige Kohlenstoffspeicher dar. Ihr Erhalt und ein sachgerechtes Management sind ein Beitrag zum Klimaschutz. Besonders im Tiefland Nordrhein-Westfalens sind die Moorvorkommen im zwanzigsten Jahrhundert erheblich zurückgegangen. Dies liegt vor allem am

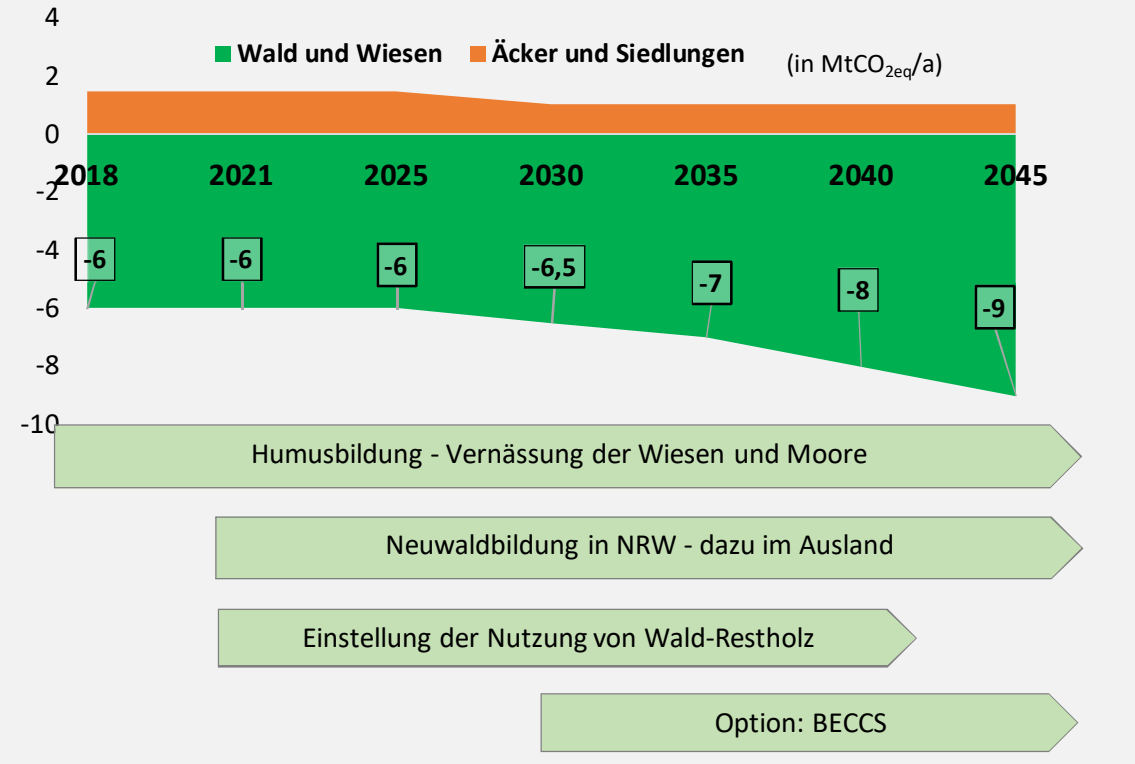
[557] Siehe Anlage 40

[558] Siehe Landtag (2021/2)

Torfabbau und der Umwandlung in Grünland bzw. Acker mit der einhergehenden Entwässerung.[559]

Lediglich 12 Prozent der ursprünglichen Moorflächen haben heute noch ihre ursprüngliche Funktion und können Treibhausgase auf natürliche Weise aufnehmen.[560] Alle anderen Moorstandorte wurden mehr oder weniger trockengelegt und sind damit

Grafik 17: Zeitplan und Maßnahmen im Sektor Bodennutzung



Verursacher von Treibhausgasemissionen. Für die ackerbauliche Nutzung der ehemaligen Moore ist ein hoher Entwässerungsgrad notwendig. Der größere Teil der organischen Böden wird als Grünland bewirtschaftet. Grünland kann auch bei höheren Grundwasserständen genutzt werden. Dies verringert die Ernte ein wenig, reduziert aber im Vergleich zur ackerbaulichen Nutzung bei Moorböden die Treibhausgas-Emissionen deutlich.

[559] Siehe LANUV (2017/2)

[560] Das sind torfbildende naturnahe Hochmoore, Übergangsmoore, Röhrichte, Moorwälder usw.

Das Land hat in Naturschutzgebieten Anstrengungen unternommen, den Zustand der Moore und ihre Flächenausdehnung zu verbessern. Dies betrifft zurzeit maßnahmenbedingt nur relativ kleine Flächen. Trotzdem sind die Wiesen und Moore in NRW heute schon insgesamt eine Senke, da sie ein wenig mehr CO_2 aufnehmen als abgeben (0,4 $MtCO_{2eq}$/a). Weitere Wiedervernässungen sind geplant.[561] Mittelfristig sind etwa 11.500 ha Nieder- und Übergangsmoore durch Vernässung wiederherstellbar. Dies betrifft sowohl Grünland auf nassen Flächen (0-40 cm Grundwasserstand) bzw. in Überschwemmungsgebieten als auch Laub-, Laubmisch- und Nadelwälder auf nicht intakten Moorböden.[562] Für diese Flächen müssen geeignete Programme entwickelt werden, um sie einer extensiven Nutzung zuzuführen oder gar als Naturschutzflächen ganz oder teilweise aus der Nutzung zu nehmen.

Durch eine Wiederherstellung der natürlichen Wasserstände, Renaturierung oder eine veränderte extensive Nutzung ist eine vollständige Reduzierung der Emissionen erreichbar.[563] Nach einer Übergangszeit, in der die Moore sich „erholen“, dienen sie sogar als Kohlenstoff-Senke, das heißt, sie binden CO_2. Es sind auch Kompromisse möglich, damit die Moore auch in Zukunft landwirtschaftlich genutzt werden können. Im Rahmen von Vertragsnaturschutz wäre mit hohen Grundwasserständen im Winter und Wasserständen von circa 30 Zentimetern unter Flur während der Vegetationsperiode auch die Fortführung einer moderaten Milchviehwirtschaft in Niederungsregionen möglich. Verglichen mit Klimaschutzmaßnahmen in anderen Sektoren sind Moorschutzmaßnahmen preisgünstige Maßnahmen, um CO_2 zu vermeiden.[564]

Als Sofortmaßnahme sollte die Torfgewinnung gestoppt werden. Dies dient dazu, die Moore künftig als natürliche Treibhausgassenken zu erhalten und weitere Freisetzungen zu vermeiden.

---

[561] Siehe Landtag (2021/2)

[562] Siehe LANUV (2017/2)

[563] Wir gehen dabei von unterschiedlichen Graden der Vernässung und Nutzung aus. Die Herstellung eines klimaneutralen Zustandes kann zum Teil länger als bis 2050 dauern.

[564] Siehe Albrecht (2017/1)

Wald

In Deutschland bedecken die Wälder 32 Prozent der Landfläche. Damit liegt Deutschland trotz der dichten Besiedlung im europäischen Durchschnitt. In Nordrhein-Westfalen sind es immerhin 25 Prozent.[565] Der Wald besteht zu 58 Prozent aus Laubbäumen, meist Buchen und Eichen. Auf 42 Prozent der Waldfläche wachsen Nadelbäume, vor allem Fichten.[566] Die Wälder in Nordrhein-Westfalen haben laut der aktuellen Bundeswaldinventur den höchsten Anteil an einschichtigen Waldbeständen (> 60 Prozent) in ganz Deutschland. Diese Wälder bestehen nur aus einer Altersgruppe von Bäumen und sind anfälliger für Schadereignisse (man spricht von Resistenz) und erholen sich auch nicht so gut von Schäden (Resilienz).[567].

Der Wald ist zurzeit der einzige große Bereich, der keine Treibhausgase ausstößt, sondern sogar in erheblichen Maße Kohlendioxid aus der Luft aufnimmt und als Holz und Humus im Boden speichert. Die „negativen Emissionen“ kompensieren ungefähr 5,5 $MtCO_{2eq}$ pro Jahr in Nordrhein-Westfalen.[568] Diese wichtige Rolle des Waldes muss erhalten und kann sogar erheblich ausgebaut werden. Zwar gibt es Prognosen, dass die Fähigkeit der deutschen Wälder, Treibhausgase aufzunehmen, bis 2050 abnimmt. Grund dafür ist, dass der Wiedernachwuchs der Wälder nach der weitgehenden Zerstörung im zweiten Weltkrieg mittlerweile abgeschlossen ist.[569] Diese Einschätzung lässt sich jedoch nicht auf NRW übertragen.

Es gibt drei Gründe, warum wir sogar mit einer Steigerung der Speicherwirkung der Bestandswälder in NRW rechnen. Zum einen sollte der Anteil an standortangepassten Laubwäldern Schritt für Schritt erhöht werden. Zum zweiten sollten die einschichtigen Holzplantagen zu mehrschichtigen Mehrgenerationenwäldern weiterentwickelt werden. Und zum dritten gab es in den vergangenen Jahrzehnten große Holzverluste durch

---

[565] Siehe IT.NRW (2020/1)

[566] Siehe MUNLV (2020/1)

[567] Siehe NABU NRW (2016/1)

[568] Siehe LANUV (2020/1)

[569] Wesentlich optimistischer ist eine Studie des Öko-Instituts, wonach die Wälder in Deutschland noch über das Jahr 2100 hinaus fast 60 $MtCO_{2eq}$/a an Kohlendioxid aus der Luft entnehmen können (siehe Öko-Institut (2019/2)).

Stürme, die zurzeit wieder heranwachsen und dabei ihre Speicheraufnahme noch steigern. Insgesamt rechnen wir daher für die Wälder in NRW durch nachhaltige Bewirtschaftung und standortgerechte Baumauswahl damit, dass die Speicherwirkung in den nächsten Jahrzehnten sogar um 0,5 $MtCO_{2eq}$/a gesteigert werden kann.

Erhöhung der stofflichen Nutzung

Wenn Holz dem Wald entnommen und langfristig verwendet wird (zum Beispiel in Form von Bauholz), verbessert dies die Bilanz.[570] Es ist aber wichtig zu berücksichtigen, dass dies das Problem nur hinauszögert und nicht dauerhaft löst. Denn wenn das Holz verbrannt wird oder vermodert, setzt es die Emissionen wieder frei.

Doch insbesondere durch eine Ausweitung der Nutzung von Holz für langlebige Produkte und als Baustoff erhöht sich die positive Speicherwirkung. Zugleich werden andere Baustoffe und Materialien (insbesondere Zement) durch Holz ersetzt, was zusätzliche CO_2-Einsparungen mit sich bringt (siehe dazu im Kapitel »Industrie« im Abschnitt »Nichtmetallische Mineralindustrie«). Bislang ist die nordrheinwestfälische Holzbauquote mit ca. 8 Prozent im Ein-/Zweifamilien-Wohnbau noch deutlich geringer als im Bundesdurchschnitt (ca. 15 Prozent) und kann daher deutlich gesteigert werden.[571]

Insgesamt rechnen wir mit einer Erhöhung der Speicherleistung durch die Erhöhung der Holznutzung von ca. 1 $MtCO_{2eq}$/a.[572]

Neuaufforstung

Wenn neue Wälder angepflanzt werden, zum Beispiel auf Flächen, die bisher Äcker waren, werden große Mengen Kohlenstoff über lange Zeiträume im Holz eingelagert. Bislang wird nur mit geringen Aufforstungsflächen gerechnet. Wir gehen jedoch davon aus, dass sechs Prozent der heutigen landwirtschaftlichen Flächen bis 2040 in NRW neu aufgeforstet werden können (siehe im Abschnitt »Flächennutzung für die Klimapolitik«). Das wäre eine Vergrößerung der Waldfläche in Nordrhein-Westfalen um zwölf Prozent.

---

[570] Zu den folgenden Darstellungen zum Wald siehe Thünen (2013/1)

[571] Siehe Frühwald (2013/1)

[572] Siehe Anlage 40

Auf diese Weise würden nach 20 Jahren zusätzliche negative Emissionen von bis zu 1,6 $MtCO2_{eq}$/a pro Jahr erreicht werden.[573] Diese Effekte sind jedoch zeitlich auf etwa hundert Jahre begrenzt. Wenn der Wald ein bestimmtes Alter erreicht hat und kein Holz entnommen wird, dann wird auch wieder CO_2 durch absterbende Bäume freigesetzt und es bleibt nur eine geringere Humuseinlagerung als positiver Effekt.[574] In der Wissenschaft wird noch diskutiert, ob Naturwald oder nachhaltig genutzter Wald eine bessere Bilanz hat, wenn man bei der Nutzung die langfristige Zwischenspeicherung berücksichtigt.[575] Unstrittig ist jedoch ein Mehrgenerationenwald auf Naturwaldflächen und eine nachhaltige Nutzung auf den Nutzflächen.

In der Summe ergibt sich damit folgende Bilanz: Während wir in Deutschland insgesamt einen Rückgang der CO_2-Aufnahme der Wälder annehmen, rechnen wir in NRW sogar mit einer Steigerung der CO_2-Aufnahme der Bestandswälder von 5,5 $MtCO_{2eq}$/a auf etwa 6 $MtCO_{2eq}$/a. Insgesamt würde also die Leistung der Wälder auf 8,6 $MtCO_{2eq}$/a ansteigen – also um über 30 Prozent.

Finanzierung der Waldpolitik

Das Problem bei der Neuwaldbildung liegt darin, dass eine Rendite erst nach Jahrzehnten zu erwarten ist. Die teuerste Variante wäre die, dass das Land (finanziert zumindest teilweise mit EU-Mitteln oder Bundesmitteln) die Flächen kauft und bewaldet. Das würde für drei Prozent der Landesfläche (zwölf Prozent mehr Wald) eine Größenordnung von drei bis vier Milliarden Euro bedeuten. Deutlich günstiger kann es werden, wenn private engagierte Investoren solche langfristigen Investitionen tätigen und dafür Zuschüsse bekommen.

Ähnliches gilt für die ökologische Aufwertung der Bestandswälder. Fast zwei Drittel der Wälder in NRW sind in Privatbesitz. Wenn diese Wälder in resiliente mehrschichtige Laubwälder mit hohem CO_2-Speicherpotenzial umgewandelt werden oder gar unter Naturschutz gestellt werden, dann werden Entschädigungszahlungen erforderlich sein.

---

[573] Eigene Rechnung – zu der Wirkung der Aufforstung siehe (Thünen (2013/1)).

[574] Siehe BMEL (2016/1)

[575] Siehe Jacob (2020/1)

Ein Finanzierungsbeitrag ist künftig auch durch eine neue Flächenpolitik möglich. Wenn in Zukunft bei der Umwandlung oder Nutzung von Flächen Abgaben erhoben werden, sollten diese für den Aufkauf von Flächen oder für Aufforstungsmaßnahmen eingesetzt werden können.

Flächennutzung für die Klimapolitik

Die Landflächen sind weltweit zu einer begrenzten Ressource geworden. Dies gilt umso mehr in einem dichtbesiedelten Land wie NRW. Deswegen sollte die Flächenpolitik nach einem neuen Paradigma organisiert werden. Die für den Klimaschutz relevanten Flächen (Wiesen, Naturschutzgebiete, Moore, Feuchtgebiete, Wälder, Äcker usw.) werden landesplanerisch gesichert. Umwandlungen sind nur noch unter Wahrung der Klimaschutzneutralität möglich.

Klimawaldfonds und Zertifikate

Da die Umnutzung von Flächen in der Landwirtschaft oder auch für Wälder zu Entschädigungen führt, sollte ein Klimawaldfonds[576] gegründet werden, in den Ausgleichszahlungen für Bauprojekte, also eine Abgabe bei der Umwandlung von Flächen für Verkehr, Energie oder Wirtschaft und Teile der CO_2-Preise bzw. Kosten für den Erwerb von CO_2-Zertifikaten eingezahlt werden.

Um den fortschreitenden Flächenverbrauch aufzuhalten, wird auch ein System von Flächenzertifikaten diskutiert.[577] Danach soll nur noch eine linear sinkende zusätzliche Fläche für Bebauung oder Verkehr genutzt werden dürfen. Wer sie nutzen will, muss dafür Zertifikate kaufen. Die Zahl der neuen Zertifikate könnte zum Beispiel bis 2030 gegen Null gehen. Wer dann Flächen neu in Anspruch nehmen möchte, muss dafür Zertifikate erwerben, die zum Beispiel durch Renaturierung von Gewerbeflächen oder durch eine langfristige Erhöhung der CO_2-Speicherleistung von Wäldern geschaffen werden können.

[576] Siehe Grüne NRW (2019/1)

[577] Siehe Schüller (2021/1)

Einstellung des Anbaus von Energiepflanzen

(siehe hierzu auch im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« den Abschnitt »Bioenergie«)

Der von der Mehrheit der Studien vorgeschlagene Ausstieg aus dem Anbau von Energiepflanzen bedeutet eine erhebliche Korrektur bei der Klimapolitik. Wurde der Anbau von Energiepflanzen vor 20 Jahren noch als wichtiger Beitrag zur Klimapolitik gesehen und energieautarke Dörfer als Pionierleistung gefeiert, so hat sich diese Sichtweise aus mehreren Gründen deutlich verändert. Damit eröffnen sich aber auch neue Chancen für die Klimapolitik.

In den letzten Jahren wurden auf durchschnittlich zehn Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche in NRW Energiepflanzen angebaut. Dabei handelte es sich überwiegend um Mais für Biogas-Anlagen und um Raps für Biodiesel. Hinzu kommen kleine Flächenanteile für den Anbau von Getreide, Sonnenblumen, Grassilage und andere Energiepflanzen.[578]

Heute müssen wir feststellen, dass die Nutzung von Energiepflanzen sich als ineffizient erwiesen hat. Wenn auf der gleichen Fläche anstelle des Anbaus von Energiepflanzen eine Photovoltaikanlage errichtet wird, dann liefert diese mehr als den zehnfachen Ertrag an Strom. Selbst wenn man mit Hilfe des Stroms E-Diesel erzeugt, so kommt pro Hektar immer noch mehr als die dreifache Menge Diesel heraus als beim Rapsanbau. Auch kostenmäßig ist der Anbau von Energiepflanzen nicht konkurrenzfähig. Während die Kosten für die Stromerzeugung durch Sonne und Wind kontinuierlich zurückgegangen sind, konnten die Kosten von Energiepflanzen dieser Entwicklung nicht folgen, sodass deren Preis pro Kilowattstunde mittlerweile doppelt so hoch liegt.[579]

Außerdem hat der Energiepflanzen-Anbau teilweise negative Folgen für die Böden und für die Artenvielfalt.[580] Daher gehen wir davon aus, dass der Anbau von Energiepflanzen bis 2035 schrittweise eingestellt wird. Die Biogasanlagen müssen dann nur noch durch Reststoffe, Mist und Gülle betrieben werden. Dafür reichen die Potenziale aus.

---

[578] Es geht hier nur um die Flächen für Energiepflanzen, nicht für die Nutzung als Lebensmittel, Rohstoffe und für andere Zwecke.

[579] Siehe Fraunhofer ISE (2018/3)

[580] Siehe UBA (2013/3)

Nutzung der Flächen

Neben den freiwerdenden Flächen durch die Einstellung des Energiepflanzenanbaus gibt es etwa weitere Flächen in der Größenordnung von zwei Prozent der Landesfläche, die für eine Umnutzung zur Stärkung des Klimaschutzes in Frage kommen. Dazu gehören ehemalige Truppenübungsplätze, Industrieflächen, Halden aus dem Bergbau usw. Insgesamt kann damit eine Nutzungsänderung auf sechs Prozent der Landesfläche (das entspricht zwölf Prozent der Agrarfläche) vorgenommen werden, wenn die erforderlich finanziellen Mittel bereitgestellt werden. Diese Flächen können folgendermaßen genutzt werden:

- Freiflächen-PV-Anlagen: Für die Erzeugung von erneuerbarem Strom durch Photovoltaik werden neben den Hausdächern und anderen Flächen, insbesondere die 110-Meter-Randstreifen an Autobahnen und Schienenwegen, wie in der Potenzialstudie des LANUV von 2013 angenommen, benötigt. Vielversprechend sind neuere Konzepte zur Verbindung von Energieerzeugung und landwirtschaftlicher Produktion, die Nutzungskonflikte entschärfen könnten und die notwendige Flächeninanspruchnahme reduzieren könnte (Agri-PV).[581] Dies gilt insbesondere im Gartenbau, wo oftmals bereits bauliche Anlagen auf den Flächen vorhanden sind und ein hoher Energiebedarf besteht oder Sonderkulturen eine sinnvolle Doppelnutzung ermöglichen.
  Nach den bisherigen Studien können eine Reihe von Pflanzen wie Kartoffeln oder Zuckerrüben sowie Getreide wie Roggen, Hafer, Gerste und Weizen angebaut werden. Die Einbußen liegen nach den bisherigen Forschungsergebnissen zwischen fünf bis 20 Prozent – in besonderen Fällen wurden sogar Mehrerträge erwirtschaftet. Möglich ist auch die Nutzung als Weide für Schafe und Rinder, wenn die Stabilität der Anlage darauf ausgelegt ist. Für den Gartenbau in NRW könnte die verstärkte Nutzung von Agri-PV zudem die Wettbewerbsnachteile gegenüber anderen EU-Staaten durch die steigende CO_2-Bepreisung fossiler Energieträger in Deutschland reduzieren, da diese im Gartenbau zur Beheizung der Gewächshäuser noch weit verbreitet sind (Carbon-Leakage-Schutz).

[581] Siehe Goetzberger (1981/1), Mayr (2018/1), Energieagentur NRW (2018/1). Der Anbau von Pflanzen unter Photovoltaik-Anlagen wird zurzeit erprobt – mit durchaus vielversprechenden ersten Ergebnissen.

- Vernässung: Für die Vernässung von ehemaligen Mooren und Feuchtwiesen sollen in NRW 0,6 Prozent der Agrarflächen aus der Bewirtschaftung genommen werden. Dazu müssen freiwerdende Flächen ggf. mit zu vernässenden Flächen getauscht werden (siehe oben im Abschnitt » Wiedervernässung der Moorböden und Schutz der Moore«).
- Aufforstung: Etwa die Hälfte der verfügbaren freien Flächen (also drei Prozent der Landesfläche) kann zur Neuwaldbildung genutzt werden (siehe Abschnitt »Wald«). Damit kann die Waldfläche in NRW um zwölf Prozent vergrößert werden.
- Rohstoffe: Weitere zwei Prozent der landwirtschaftlichen Fläche (ein Prozent der Landesfläche) sollen zusätzlich für die Produktion von nachwachsenden Rohstoffen für die Industrie benutzt werden (siehe nächster Abschnitt).
- Naturschutz: Ein Teil der Flächen sollte gegen entsprechende Entschädigung unter Naturschutz gestellt werden. Dabei bietet es sich an, insbesondere die neuen Wälder und die wiedervernässten Gebiete dafür zu nutzen. Darüber hinaus kann ein weiteres Prozent der Landesfläche dafür genutzt werden. Die Finanzierung kann auch durch Dritte erfolgen, wenn diese Flächen als Ausgleichsflächen für die Wirtschaftsentwicklung, für den Bau von Windenergieanlagen, Leitungstrassen, Bahntrassen usw. dienen.

Nachwachsende Rohstoffe für die Industrie

Im Jahre 2018 wurden in Deutschland auf knapp zwei Prozent der Ackerflächen pflanzliche Rohstoffe für die Industrie angebaut.[582] Da heute die Rohstoffe der organischen Chemie fast ausschließlich aus fossilen Quellen stammen, wird weltweit an Alternativen geforscht. Neben der Erzeugung von synthetischen Rohstoffen wird künftig auch der Anbau und die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen eine zunehmend wichtige Rolle spielen. Dabei geht es zunächst um die Verwendung der Stärke des Zuckers, biogene Öle und Fette, Fasern, Lignocellulose bzw. Holz und Proteine (siehe dazu im Kapitel »Industrie«).

[582] Siehe FNR (2018/1); wir haben keine Zahlen dazu für NRW

Wir rechnen damit, dass die Fläche für den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen in NRW auf vier Prozent der Ackerflächen verdoppelt wird, wenn der Anbau von Energiepflanzen eingestellt wird.

Maßnahmen zur Bodennutzung und Flächennutzung

- Die für den Klimaschutz relevanten Flächen – Wiesen, Naturschutzgebiete, Moore, Feuchtgebiete, Wälder, Äcker usw. – sollten landesplanerisch gesichert werden. Umwandlungen wären nur noch unter Wahrung der Klimaschutzneutralität möglich.
- Hierzu sollte ein Flächenzertifikatssystem geprüft werden.
- Für alle Flächen, für die keine oder nur noch eine eingeschränkte landwirtschaftliche Nutzung möglich ist, müssen den Landwirt*innen entsprechende finanzielle Kompensationen gewährt werden.
- Ehemalige Moore sollten so weit möglich wieder vernässt und bestehende Moore geschützt und nicht mehr abgebaut werden.
- Soweit möglich sollte der Wasserstand von Wiesen wieder auf das natürliche Niveau angehoben werden.
- Die Qualität der Wälder wird systematisch weiterentwickelt, damit die Wälder optimal als Kohlenstoffsenke dienen können.
- Dazu gehört auch, dass weniger Restholz aus dem Wald geholt wird. Als Restholz sollte nur Altholz und die Reste der Holzverarbeitung (Sägemühlen) verwandt werden.
- Freiflächen-Photovoltaikanlagen sollten, wie in der LANUV-Potenzialstudie von 2013 und dem aktuellen Landesentwicklungsplan NRW vorgesehen, vornehmlich entlang von Infrastrukturtrassen und wo sinnvoll möglich, zunehmend in Verbindung mit landwirtschaftlicher Nutzung errichtet werden.
- Der Anbau von Energiepflanzen – insbesondere Mais und Raps – sollte bis 2035 eingestellt werden. Damit die Flächen aus der Nutzung genommen werden können, sollte ein Klimawaldfonds gegründet werden, in den Ausgleichszahlungen bei jeder Flächenbeanspruchung durch Industrie oder Dritte geleistet werden.
- Die freiwerdenden Flächen werden anders genutzt:
  - Der Waldanteil sollte um zwölf Prozent gesteigert werden.

- Der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen für die Industrie sollte auf vier Prozent der Agrarflächen verdoppelt werden.
- Ausweitung der Naturschutzgebiete: Ein Teil der Flächen dient als Ausgleichsflächen für Windenergie, Stromtrassen, Bahntrassen und andere Flächenbeanspruchung – aber auch als Tauschflächen für Vernässungsprojekte.

Kompensationen: Weitere Methoden, um Kohlendioxid wieder aus der Luft zu holen

Wenn alle genannten Potenziale für negative Emissionen genutzt werden, würden damit ab 2045 etwa neun $MtCO_{2eq}$/a aus der Luft wieder dauerhaft entnommen. Spätestens dann würden damit die Restemissionen aus der Landwirtschaft, dem Flugverkehr und der Zementproduktion kompensiert werden. NRW ist dann klimaneutral.

Allerdings sind nicht alle Einsparungen dauerhaft. Es ist deshalb nicht sicher, ob die Kompensation durch Wald und Moore auf Dauer ausreicht. Und selbst wenn die Aktivitäten der Menschen keine Treibhausgase mehr freisetzen, werden im Laufe dieses Jahrhunderts nach den Rechnungen des Weltklimarates noch auf andere Weise Treibhausgase emittiert.[583] Ursachen sind insbesondere das Schmelzen der Dauerfrostböden in Sibirien und das Schmelzen des Eis in der Arktis, die beide nicht mehr gänzlich aufzuhalten sind, da der Kipppunkt bereits erreicht wurde. Es ist auch nicht sicher, ob nicht darüber hinaus Kohlendioxid aus der Luft wieder rausgeholt werden muss, um das Abschmelzen des Eises auf Grönland und der Antarktis zu stoppen.

Um die erforderlichen Kompensationen zu bewerkstelligen, bleiben folgende Möglichkeiten:

- Aufforstung im Ausland: Dazu müssen in Gegenden, wo das möglich ist, auf großen Flächen Aufforstungsprojekte gestartet werden. China hat bereits damit begonnen, einen Teil der Wüste Gobi wieder zu bewalden. Auch in Sibirien und Kanada gibt es große Flächen, die bewaldet werden können – insbesondere, wenn die

[583] Der IPCC schätzt die zusätzlichen Freisetzungen auf 100.000 $MtCO_{2eq}$. Auf Deutschland würden davon entsprechend unserem Bevölkerungsanteil 1.000 $MtCO_{2eq}$ entfallen. Siehe IPCC (2018/1)

Dauerfrostböden tauen. Deutschland könnte sich als Kompensationsmaßnahme daran beteiligen.

- Speicherung von Bio-Kohle: Hier geht es um Verfahren, bei denen organische Substanzen wie Holz oder Kohlefaser, die aus angebauten Pflanzen gewonnen werden, möglichst luftdicht in der Erde vergraben werden. Im Laufe der Zeit verwandeln diese sich zu Kohlenstoff. Man kann sogar aus organischen Stoffen Kohlefasern herstellen – was aber vermutlich sehr teuer sein wird. Man versucht also praktisch die alten Kohlengruben wieder mit Kohlenstoff aufzufüllen.
- CCS (Carbon Capture and Storage): Hierbei geht es um die Speicherung von Kohlendioxid in der Erde. Im Bericht des Weltklimarates wird auch diskutiert, Kohlendioxid aufzufangen, das bei der Verbrennung von Bio-Brennstoffen ausgestoßen wird, und es in der Erde zu verpressen.[584] Damit würde im Ergebnis ebenfalls CO_2 wieder aus der Luft entnommen. Alternativ kann man auch das CO_2 durch technische Verfahren aus der Atmosphäre holen, anstatt dies den Pflanzen zu überlassen.[585]

  Bei diesen CCS-Verfahren wird bislang versucht, Kohlendoxid in alten Erdgaslagern zu verpressen. Diese Verfahren werden jedoch von fast allen Wissenschaftler*innen kritisch gesehen. Es werden Schäden für das Grundwasser befürchtet. Auch kann praktisch nicht sichergestellt werden, dass das Kohlendioxid-Gas auf Dauer in der Erde bleibt. In Island wird an der Verpressung von Kohlendioxid als kohlensaures Wasser in den Untergrund geforscht, wo es sich zu neuem Gestein mineralisieren soll. Allerdings kam es durch das Verpressen des Wassers zu mehreren kleinen Erdbeben.[586]

Kosten und Bewertung

Die Kosten der Kompensation – also Vermeidung pro Tonne CO_2 – werden sehr unterschiedlich eingeschätzt. So werden die Kosten für CCS in der Zementindustrie zwischen 45 € und 110 € geschätzt, die Kosten für CCS in der Stahlindustrie auf 60 € bis 110 € pro Tonne CO_2 angegeben. Die Kosten für CCU liegen dagegen mit 200 € bis 400 € sogar

[584] Man nennt diese Verfahren üblicherweise BECCS (Bio Energy with Carbon Capture and Storage).

[585] In diesem Fall spricht man von DAC (Direct Air Capture).

[586] Siehe Wikipedia (2020/1)

viermal so hoch.[587] Vergleicht man dagegen die Kosten für die in dieser Studie gerechnete Neuaufforstung von knapp 100.000 ha für 4 Mrd. €, dann ergeben sich bei einer jährlichen Kompensationsleistung von 1,6 $MtCO_{2eq}$/a und einer Amortisationszeit von 50 Jahren Kosten von 50 € pro Tonne CO_2. Der Unterschied ist allerdings, dass die CO_2-Vermeidung von Wäldern seit Millionen Jahren erprobt ist, während es bis heute kein funktionierendes und evaluiertes CCS-Projekt gibt.

Es gibt noch eine Vielzahl weiterer Ansätze, um CO_2 aktiv aus der Atmosphäre zu entnehmen und dauerhaft zu speichern. Im Ergebnis kommen aber die Studien in Bezug auf die bisher bekannten Verfahren zu einem ernüchternden Ergebnis.[588] Es ist nicht erkennbar, dass es in absehbarer Zeit außer der großräumigen Aufforstung und der Verstärkung der natürlichen Humusbildung technische Verfahren geben wird, um Kohlendioxid in größerem Umfang ohne Risiko aus der Luft zu holen. Auch ökonomisch gibt dies in absehbarer Zeit noch keinen Sinn, da Aufforstungsmaßnahmen mit gleicher Wirkung erheblich billiger sind.[589] Deswegen sollten alle Maßnahmen der Aufforstung in den kommenden Jahren Vorrang haben. Langfristig werden jedoch Methoden der Kohlenstoffspeicherung benötigt.

Maßnahmen zur Kompensation

- Vorrang bei der Kompensation haben Aufforstungsprogramme.
- Ein Teil der CO_2-Preiszahlungen sollte in einen Klimawaldfonds fließen. Das ist auch für die Firmen günstiger als der Einstieg in die CCS-Technologie.
- Deutschland sollte sich an internationalen Aufforstungsprogrammen beteiligen. Dies soll in einem Umfang geschehen, sodass dauerhaft mehr CO_2 wieder aus der Atmosphäre genommen als emittiert wird und so die Treibhausgaskonzentration wieder reduziert wird.
- Trotz – oder gerade wegen der Bedenken – sollten mögliche technische Maßnahmen, um Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu entziehen, umfassend

[587] Siehe VDZ (2020/1), BDI (2018/1)

[588] Siehe die gute Zusammenstellung von Fuss (2018/1)

[589] Siehe Wikipedia (2019/3)

erforscht werden. Hierfür sollen entsprechende Gelder zur Verfügung gestellt werden.

Sektor 7 Abfälle und Abwässer

Die Treibhausgasemissionen der Abfallwirtschaft resultieren aus den Bereichen Müllverbrennung, Mülldeponien, der Abwasserreinigung sowie der biologischen Entsorgung der Abfälle aus den Biotonnen und der Sammlung von anderen organischen Abfällen.[590] Insgesamt sind das drei Prozent der Emissionen in Deutschland.[591] Zwei Drittel der Emissionen fallen dabei auf die Abfallverbrennung. Die restliche Abfallwirtschaft emittiert 9,7 $MtCO_{2eq}$ – also ca. ein Prozent.

Die Ausgangslage in NRW

Die Abfallwirtschaft In NRW dürfte insgesamt einen Anteil an den Treibhausgas-Emissionen des Landes von zwei Prozent haben.[592] Der größte Teil fällt auf die Müllverbrennung. Deren Emissionen werden im Sektor Energieversorgung erfasst – wir haben sie daher im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« schon mit berechnet. Die Emissionen der anderen Bereiche (Deponien, Abwasser, Biomüllentsorgung) betragen lediglich 0,5 $MtCO_{2eq}$, das entspricht nur 0,2 Prozent der Treibhausgasemissionen des Landes.[593] 42 Prozent dieser Restemissionen entstehen durch die Abwasserreinigung, etwa ein Drittel wird aus den Abfalldeponien emittiert.

2013 wurden etwa 46,7 Millionen Tonnen Abfall an Abfallentsorgungsanlagen in Nordrhein-Westfalen geliefert. Davon stammen 11,2 Millionen Tonnen aus Abfall- und Abwasserbehandlungsanlagen, 10,7 Millionen Tonnen aus Bau- und Abbruchabfällen, 8,7 Millionen Tonnen Siedlungsabfälle, 8,5 Millionen Tonnen aus Industrie- und

---

[590] Siehe UBA (2013/4)

[591] Für Deutschland sind dies 18 $MtCO_{2eq}$ Müllverbrennung, 8 $MtCO_{2eq}$ Altdeponien, 1 $MtCO_{2eq}$ Kompost, 1 $MtCO_{2eq}$ Abwässer. 2050 bleiben davon nur noch 1 $MtCO_{2eq}$, hauptsächlich aus Kompost und Abwässern (siehe MD (2020/1)).

[592] Dazu finden sich im Emissionsbericht des Landes keine Zahlen.

[593] Siehe LANUV (2020/1)

Gewerbebetrieben sowie 7,6 Millionen Tonnen Abfälle aus thermischen Prozessen beziehungsweise Kraftwerken und anderen Verbrennungsanlagen.

Gut die Hälfte der Abfälle aus den privaten Haushalten wurden 2013 getrennt gesammelt und verwertet. Steigerungspotenzial wird insbesondere bei der getrennten Erfassung von Bio- und Grünabfällen gesehen.[594] Gerade in vielen nordrhein-westfälischen Großstädten wird derzeit der Biomüll nur teilweise getrennt erfasst und einer Kompostierung zugeführt. Anstatt diesen Biomüll energieaufwendig zu entsorgen, sollte er nach einer Kompostierung wieder auf landwirtschaftliche Flächen aufgebracht werden und so mineralische Düngemittel – und damit wiederum Energie – ersetzen und zur Humusbildung und Bodenfruchtbarkeit beitragen.

Die Deponien

Die Emissionen der Deponien sind bereits stark rückläufig. Bei den Deponien sind ausschließlich die Methanemissionen relevant. Zwischen 1990 und 2015 sind die Treibhausgasemissionen in NRW durch die Schließung von Deponien für unbehandelte Siedlungsabfälle von 38 $MtCO_{2eq}$ um zwei Drittel auf 12 $MtCO_{2eq}$ gesunken.[595] Früher war die Deponierung besonders von Hausmüll in NRW die wichtigste Art der Abfallentsorgung. Bis zu dem Verbot im Jahr 2005 wurden Abfälle ohne Vorbehandlung gelagert. Dies führte zu Ausgasungen und Schadstoffausträgen mit dem Sickerwasser.

Bereits in den 1990er Jahren wurden die Anforderungen an Abdichtungssysteme verschärft. Durch die zunehmende Kreislaufwirtschaft, die Vorbehandlung des Abfalls und verbesserte Verwertung ist die Menge an Abfällen zur Deponierung in erheblichem Maß zurückgegangen. Dabei handelt es sich heute vor allem um Bau- und Abbruchabfälle sowie Aschen und Schlacken aus thermischen Prozessen.[596]

Rolle der Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft spielt eine wichtige Rolle. Künftig sollen die Recyclingquoten erheblich gesteigert werden (siehe im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« und

[594] Siehe MKULNV (2016/1)

[595] Siehe Klimaschutz durch Kreislaufwirtschaft (2020/1)

[596] Siehe MULNV (2021)

im Kapitel 2.3 »Rohstoffe und Kreislaufwirtschaft«). Künftig sollten Abfälle in Nordrhein-Westfalen verstärkt als Rohstoff- und Energiequelle genutzt werden. Beispielsweise entstehen im Lippewerk in Lünen aus industriellen Abfällen und Haushaltsabfällen Vorprodukte für die Industrie. Zudem werden Abfälle und Reststoffe in Kraftstoffe umgewandelt. Die Biomasse wird aufbereitet und als Energieträger für Biomassekraftwerke genutzt. Ein weiteres Beispiel für innovative Technologien ist die 2015 gebaute Wertstoffaufbereitungsanlage in Iserlohn. Dort werden pro Jahr 72.000 Tonnen Leichtverpackungen aus Privathaushalten sortiert. Rund die Hälfte davon (32.600 t) kann die Kreislaufwirtschaft recyceln, der Rest (39.300 t) geht als Brennstoff in Müllverbrennungsanlagen oder Ersatzbrennstoffkraftwerken in die Wärmeproduktion. Durch Recycling und Abfallbehandlung wurden in NRW bereits 2011 rund 2,6 $MtCO_{2eq}$ Treibhausgase eingespart.[597] Aber das sind nur Anfänge auf dem bevorstehenden Weg.

Sonstiges

Durch eine Reihe von Maßnahmen wurden die Treibhausgasemissionen in der Abfallwirtschaft weiter gesenkt. Dazu gehört die Steigerung der Energieeffizienz, die Substitution von Primärenergieträgern, die Auskopplung von Strom-, Fern- und Prozesswärme in den thermischen Abfallbehandlungsanlagen und die Nutzung von Sonne und Wind auf abfallwirtschaftlich geprägten Flächen.[598]

Durch die folgenden Maßnahmen können die Emissionen aus der Abfallwirtschaft bis 2050 weitgehend reduziert werden:

Maßnahmen zu Abfällen und Abwässern

- Die Emissionen der Müllverbrennung können durch besseres Recycling und das Verbot von kritischen Rohstoffen abnehmen. Mit der Umstellung der Chemieindustrie auf erneuerbare Rohstoffe kann die Müllverbrennung fast treibhausgasneutral werden.
- Die Emissionen aus den Altdeponien werden bis 2050 von alleine stark zurückgehen. Denn seit 2005 darf unbehandelter Müll nicht mehr gelagert werden.[599]

[597] Siehe Klimaschutz durch Kreislaufwirtschaft (2020/1)

[598] Siehe Klimaschutz durch Kreislaufwirtschaft (2020/1)

[599] Siehe MELUND 2019/2

- Eine wichtige Maßnahme bei der Abwasserbehandlung ist der Anschluss der restlichen abflusslosen Gruben im ländlichen Raum an die Kanalisation. Diese kann die Emissionen um die Hälfte reduzieren. Auch eine Änderung der Ernährung kann zu weniger Stickstoff in den Abfällen und damit zu dreißig Prozent weniger Emissionen führen.
- Die Emissionen der Abfälle aus der Biotonne und von anderen organischen Abfällen entstehen durch die Kompostierung und durch die Vergärung in Biogasanlagen. Sie können durch technische und organisatorische Maßnahmen etwa auf die Hälfte gesenkt werden. Hier sind insbesondere die Landkreise und Städte gefordert.

Anhänge

Übersicht der Anhänge

Tabellenverzeichnis 286

Verzeichnis der Grafiken 289

Zur Methodik dieser Studie und dem Zeitproblem 291

Energieflussdiagramm 294

Verzeichnis der Anlagen 305

Anlagen 307

Quellen 416

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von. Elektrifizierungs- und E-Fuel-Szenarien 41

Tabelle 2: Varianten des zukünftigen Energiesystems 42

Tabelle 3: Vor- und Nachteile von Energieautarkie und Importfokus 45

Tabelle 4: Eckdaten für die zukünftige PV-Nutzung 112

Tabelle 5: Potenzial EE-Strom in NRW 119

Tabelle 6 Entwicklung Windräder und Photovoltaik 119

Tabelle 7: Treibhausgasquellen der Industrie 142

Tabelle 8: Mögliche Entwicklung im Wärmesektor 187

Tabelle 9: Treibhausgasemissionen des Verkehrs 207

Tabelle 10: Modal Split im Personenverkehr 214

Tabelle 11: Treibhausgasemissionen nach Sektoren 307

Tabelle 12: Minderungspfad für NRW nach Sektoren 318

Tabelle 13: Reduktion von THG in Deutschland und NRW im Vergleich 320

Tabelle 14: Eckdaten für den Bedarf von E-Brennstoffen in NRW 322

Tabelle 15: Endenergiebedarf der Sektoren 326

Tabelle 16: Brutto-Stromerzeugung in NRW 333

Tabelle 17: Stromverbrauch in NRW 333

Tabelle 18: Erneuerbarer Strom in NRW 334

Tabelle 19: Ausbaupotenziale der Erneuerbaren Energien in NRW 337

Tabelle 20: Flächenverfügbarkeit für Windräder in Abhängigkeit von Abständen zu Siedlungsflächen 340

Tabelle 21: Vergleich der Parameter für Photovoltaik-Anlagen 345

Tabelle 22: Kennzahlen der PV-Anlagen 346

Tabelle 23: Bioenergie-Potenziale in NRW 347

Tabelle 24: Eckdaten zur Berechnung der Stromtrassenkapazitäten 349

Tabelle 25: Energiebedarf in Deutschland 355

Tabelle 26: Eckdaten für die Grundstoffindustrie 359

Tabelle 27: Kraftwerke in NRW 360

Tabelle 28: Industriekraftwerke in NRW 360

Tabelle 29: Liste der größten Stahlproduzenten in Deutschland 361

Tabelle 30: Alu-Hütten in Deutschland 362

Tabelle 31: Wohngebäudebestand in Deutschland und NRW und Energiebedarf 365

Tabelle 32: Entwicklung der Wohngebäude nach Alter und Zustand 366

Tabelle 33: Jahresendenergiebedarf für Raumwärme 369

Tabelle 34: Endenergie für Wärme in Wohnungen und GHD 370

Tabelle 35: Endenergiebedarf Deutschland 376

Tabelle 36: Wegstrecken im Personenverkehr in Deutschland 377

Tabelle 37: Fahrrad-Entscheide 380

Tabelle 38: Flughäfen in NRW 381

Tabelle 39: Warum gehen/fahren die Menschen 381

Tabelle 40: Modal Split Personenverkehr Deutschland 382

Tabelle 41: Zielszenario für den Modal Split NRW 382

Tabelle 42: Modal Split – Zielsetzungen in Städten in NRW im Vergleich zu Kopenhagen 383

Tabelle 43: Wegstrecken im Güterverkehr in Deutschland 387

Tabelle 44: Emissionen im Güterverkehr nach Verkehrsträgern 389

Tabelle 45: Modal Split im Güterverkehr in NRW 390

Tabelle 46: Prognose des Modal Split im Güterverkehr in Deutschland 390

Tabelle 47: Straßen in NRW 391

Tabelle 48: Straßenfahrzeuge in NRW 391

Tabelle 49: LKW-Transporte 391

Tabelle 50: Anteil der jungen Menschen mit Führerschein 394

Tabelle 51: Bahn Güterverkehr 397

Tabelle 52: Öffentlicher Linienverkehr 397

Tabelle 53: Emissionen beim Bau von U-Bahn und Straßenbahn 398

Tabelle 54: Binnenhäfen in NRW 402

Tabelle 55: Transportgüter 403

Tabelle 56: Binnenschifffahrt 403

Tabelle 57: Reduktionspotenziale in der Landwirtschaft und Ernährung 405

Tabelle 58: Emissionen der Tierhaltung in Deutschland 407

Tabelle 59: Emissionen der Tierhaltung in NRW 408

Tabelle 60: Berechnung der CH_4-Reduktionen der enterischen Fermentation 409

Tabelle 61: Reduktions- und Kompensationspotenziale in Bodennutzung und Wald in NRW 412

Verzeichnis der Grafiken

Grafik 1: Treibhausgasquellen in Nordrhein-Westfalen 6

Grafik 2: Treibhausgase in NRW 17

Grafik 3: „Fußabdruck“ von ausgewählten Staaten und Bundesländern 2015 22

Grafik 4: Die wichtigsten Treibhausgasquellen 25

Grafik 5: Verschiedene Minderungspfade für Deutschland und NRW 27

Grafik 6: Das alte Energiesystem 30

Grafik 7: Das neue Energiesystem 31

Grafik 8: Ein möglicher Weg zur Klimaneutralität 33

Grafik 9: Strom in NRW 93

Grafik 10: Zeitplan und Maßnahmen im Sektor Energie 95

Grafik 11: Zeitplan und Maßnahmen im Sektor Industrie 144

Grafik 12: Zeitplan und Maßnahmen im Sektor Hauswärme 178

Grafik 13: Energieträger zum Heizen in NRW 183

Grafik 14: Zeitplan und Maßnahmen im Sektor Verkehr 209

Grafik 15: Anteil der Emissionen von Landwirtschaft und Bodennutzung 246

Grafik 16: Zeitplan und Maßnahmen im Sektor Landwirtschaft 254

Grafik 17: Zeitplan und Maßnahmen im Sektor Bodennutzung 268

Grafik 18: Energieflussdiagramm NRW 2040 295

Grafik 19: Maximaler HGÜ-Netzausbau 325

Grafik 20: Windenergiebedingungen in NRW 338

Grafik 21: Existierende und geplante Höchstspannungsstromtrassen 350

Grafik 22: Standorte der Zementindustrie 363

Grafik 23: Wärmeflussdiagramm für ein treibhausgasneutrales NRW 2040 371

Grafik 24: Modal Split NRW – Unterschiede zwischen Stadt und Land 384

Grafik 25: Modal Split – Spannbreiten der Verkehrsmittel 385

Grafik 26: Mobilitätsverhalten nach Einkommen 3385

Grafik 27: Straßennetz NRW 392

Grafik 28: PKW-Neuzulassungen 393

Grafik 29: Führerscheine junger Menschen 394

Grafik 30: Carsharing 394

Grafik 31: ÖPNV in NRW 398

Grafik 32: Regionalverkehrsstrecken in NRW 399

Grafik 33: Schienennahverkehr Deutschland 400

Grafik 34: Regionalverkehrslinien in NRW 401

Grafik 35: Wasserstraßen und Häfen in NRW 404

Zur Methodik dieser Studie und dem Zeitproblem

Der in dieser Studie skizzierte Weg zur Klimaneutralität in NRW basiert auf dem Handbuch Klimaschutz[600], das wiederum Ergebnis einer Auswertung von über 300 Studien der letzten 10 Jahre ist. Darüber hinaus haben wir fast 500 weitere Quellen – Studien, Statistiken, Artikel in Zeitschriften, Tageszeitungen und im Internet ausgewertet. Oft waren sich die Autor*innen der Quellen einig oder lagen eng beieinander. Wo das nicht der Fall war, haben wir dies so dargestellt. Dann haben wir für die Rechnungen einen vorsichtigen Mittelweg kalkuliert. In einigen Fällen haben wir auf Basis der Quellen eigene Rechnungen vorgenommen, weil wir keine entsprechenden Quellen gefunden haben. Dann haben wir dies in den Anlagen dokumentiert.

Das Zeitproblem

Diese vorliegende Arbeit ist eine Metastudie. Wir haben also die Ergebnisse anderer Studien zusammengetragen – aber keine eigenen Modellrechnungen erstellt. Aus den zusammengetragenen Zahlen ergab sich dann die grobe Abschätzung der Zeitpläne für die Reduktion der einzelnen Sektoren. Dabei ergab sich ein grundsätzliches Problem: Die meisten Studien berechnen, wie der jährliche Treibhausgas-Ausstoß bis 2050 um 80 bis 95 Prozent reduziert werden kann. Dieses Ziel entspricht den Klimazielen der Bundesregierung. Es entspricht aber nicht dem 1,5-Grad-Ziel. Das liegt meist nicht daran, dass die Autor*innen einen schnelleren Weg nicht für möglich halten.[601] Nur sehr wenige Studien peilen das Zieljahr 2040 oder früher und eine vollständige Klimaneutralität an.

Wir haben daher die Studien mit Zieljahr 2040 oder 2035 mit denen mit Zieljahr 2050 verglichen. Dabei haben wir bei den Letzteren abgeschätzt, inwieweit sie auch bei einem beschleunigten Übergang realistisch sein können. Wo das nicht realistisch erschien, haben wir das berücksichtigt. Dies war z. B. bei der Sanierung und Dämmung der Häuser oder bei der Umstellung der Landwirtschaft – teilweise auch bei der Industrie – der Fall. Dabei haben wir im Zweifelsfall lieber vorsichtig kalkuliert. Deshalb glauben wir sagen

[600] Siehe MD (2020/1) und MD (2020/2)

[601] Auf die Frage in persönlichen Gesprächen mit Autor*innen, warum ihre Studie berechnet, wie Deutschland 2050 klimaneutral werden kann, bekamen wir in der Regel die Antwort, das dies dem Auftrag entspricht. Wir bekamen nie die Antwort, dass es nicht schneller geht. Trotzdem gibt es natürlich Pfade, die nicht beliebig beschleunigt werden können.

zu können, dass der vorgelegte Weg auf Basis der vorliegenden wissenschaftlichen Studien realistisch ist.

Zugleich haben wir versucht abzuschätzen, was die schnellere Umsetzung für die einzelnen Sektoren bedeutet. Dabei kamen uns eine Reihe von neueren Studien und Entwicklungen zu Hilfe – so zum Beispiel:

- Die Preise von Photovoltaik-Anlagen sind rapide gesunken. Sie benötigen nur noch ein Viertel des Siliziums und produzieren ein Drittel mehr Strom mit der gleichen Fläche als vor 10 Jahren.
- Die Preise für elektrische Batterien sind gesunken und ihr Wirkungsgrad gestiegen.
- Es gibt neue Technologien für Erdkabel, um Gleichstrom zu transportieren.
- Neue Windenergieanlagen produzieren viel mehr Strom, weil sie bereits bei schwachem Wind die volle Leistung bringen können (Schwachwindanlagen).
- Auch der Wirkungsgrad der Wärmepumpen ist gestiegen.
- Die Kosten für E-Autos sind deutlich gefallen.
- In Österreich, Schweden und Deutschland werden bereits die ersten kohlefreien Stahl- und Walzwerke geplant oder gebaut.
- Die Chemieindustrie hat selbst konkrete Planungen vorgelegt, wie sie ihre Produktion künftig treibhausgasfrei machen kann.[602]
- Es gibt neue Anbau- und Düngemethoden für die Landwirtschaft, um Stickstoffdünger einzusparen.
- Und vieles andere …

Die im Auftrag von Fridays for Future erstellte Studie des Wuppertal Instituts „CO_2-neutral bis 2035“[603], die erst nach Fertigstellung des Handbuchs veröffentlicht wurde, hält es sogar für möglich, Deutschland bereits 2035 klimaneutral zu machen, allerdings unter anderen Annahmen als im Handbuch.

[602] Siehe Dechema (2019/1)

[603] Siehe Wuppertal (2020/1); ein Vergleich der Ergebnisse und Annahmen dieser Studie mit dem Handbuch Klimaschutz findet sich auf unserer Homepage in der Anlage 38 – siehe MD(2020/2).

Doch nicht nur die Technik, sondern auch die Finanzierung des Übergangs zu einer treibhausfreien Gesellschaft wurde untersucht. Danach erweist sich dieses Vorhaben als eine rentable Investition (siehe im Kapitel 2.7 »Ökonomie der Umstellung«). Wir haben deshalb auf Grund der vorliegenden Studien die Überzeugung gewonnen, dass die dargestellten Wege und Alternativen gangbar und empfehlenswert sind.

Eine subjektive Anmerkung zur politischen Umsetzung – der Kipppunkt

Die technische Machbarkeit der dargestellten Pfade bedeutet natürlich nicht, dass sie ohne Probleme auch politisch umsetzbar sind. Denn das 1,5-Grad-Ziel stellt eine ungeheure politische Herausforderung dar. Es gibt aber einen guten Grund, warum wir trotzdem glauben, dass dieses Ziel noch erreicht werden kann: Historische Umbrüche erfolgten oft mit langer zeitlicher Verzögerung, selbst wenn die Zeit bereits reif war. Aber wenn es schließlich losgeht, überschlägt sich die Entwicklung.

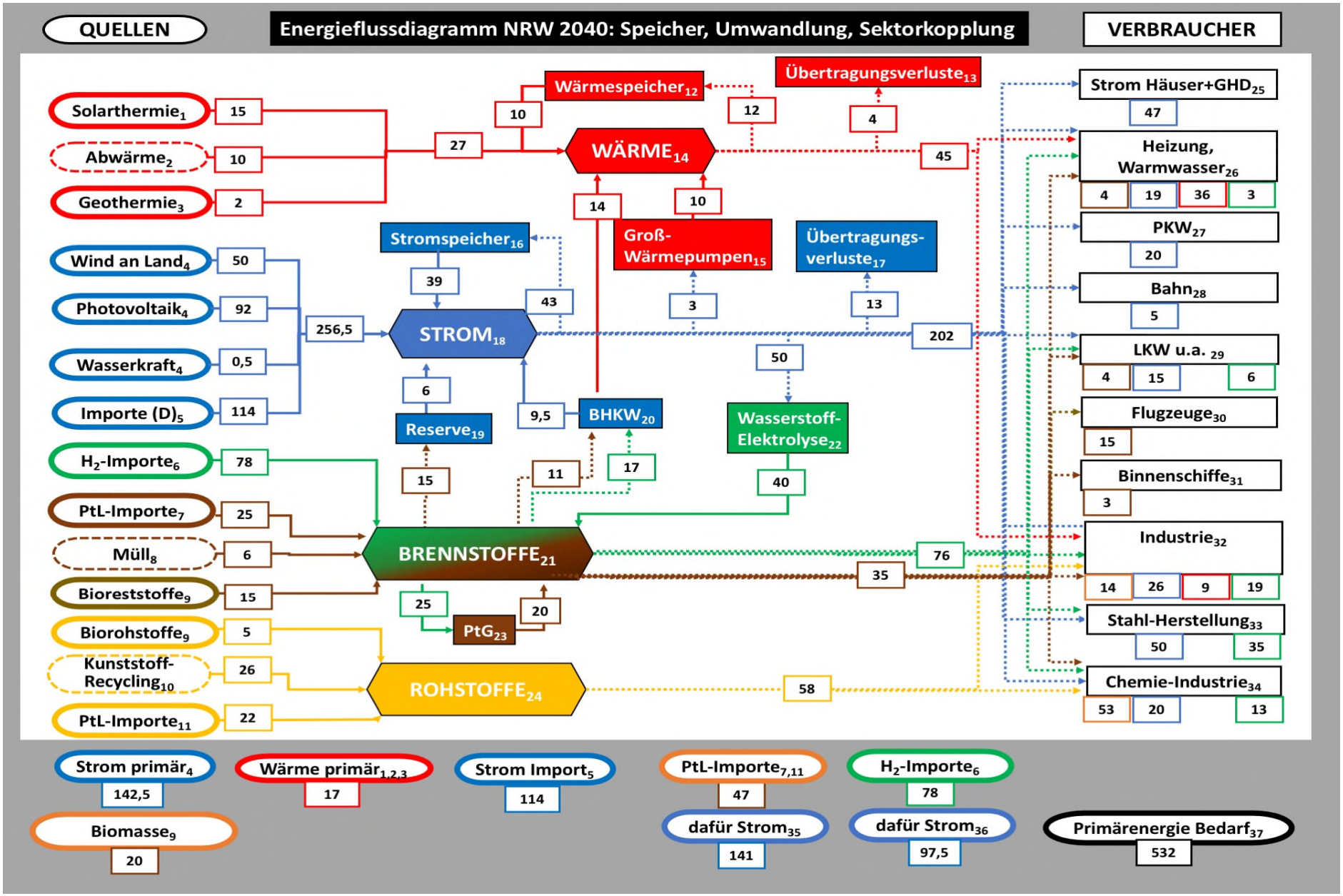
Man spricht dann von einem Kipppunkt oder einem Zeitenwechsel, wie er zum Beispiel 1990 beim Fall der Berliner Mauer geschah.[604] Seit der ersten Veröffentlichung des Club of Rome[605], der feststellte, dass die Grenzen der bisherigen Wirtschaftsweise im Verlauf des 21. Jahrhunderts erreicht werden, sind bereits 49 Jahre vergangen. Nun scheint der Zeitpunkt gekommen zu sein, dass die Mehrheit der Bevölkerung von der Politik Handeln einfordert. Wenn ein solcher Kipppunkt erreicht wird, können sich die Entwicklungen überschlagen. Was vorher Jahre dauerte, wird plötzlich in Tagen möglich. Es kommt jetzt darauf an, dafür die Weichen zu stellen.

Diese Einschätzung ist aber zugegebenermaßen subjektiv.

---

[604] Dieser Effekt wurde meines Wissens zuerst von Hegel beschrieben. Eine aktuelle Analyse mit Blick auf den Klimawandel findet sich bei Otto (2019/1)

[605] Siehe Meadows (1972/1)


QUELLEN
Energieflussdiagramm NRW 2040: Speicher, Umwandlung, Sektorkopplung
VERBRAUCHER
Solarthermie1
15
Abwärme2
10
Geothermie3
2
Wind an Land4
50
Photovoltaik4
92
Wasserkraft4
0,5
Importe (D)5
114
H2-Importe6
78
PtL-Importe7
25
Müll8
6
Bioreststoffe9
15
Biorohstoffe9
5
Kunststoff-Recycling10
26
PtL-Importe11
22
Wärmespeicher12
10
27
WÄRME14
12
Übertragungsverluste13
4
45
14
10
Groß-Wärmepumpen15
Übertragungs-verluste17
3
13
Stromspeicher16
39
43
256,5
STROM18
202
50
6
Reserve19
9,5
BHKW20
Wasserstoff-Elektrolyse22
15
11
17
40
BRENNSTOFFE21
76
35
25
20
PtG23
ROHSTOFFE24
58
Strom Häuser+GHD25
47
Heizung, Warmwasser26
4
19
36
3
PKW27
20
Bahn28
5
LKW u.a. 29
4
15
6
Flugzeuge30
15
Binnenschiffe31
3
Industrie32
14
26
9
19
Stahl-Herstellung33
50
35
Chemie-Industrie34
53
20
13
Strom primär4
142,5
Wärme primär1,2,3
17
Strom Import5
114
PtL-Importe7,11
47
H2-Importe6
78
Biomasse9
20
dafür Strom35
141
dafür Strom36
97,5
Primärenergie Bedarf37
532

Anmerkungen zum Energieflussdiagramm (Grafik 18)

Das Flussdiagramm stellt den möglichen Energiefluss in einer treibhausgasneutralen Gesellschaft in NRW im Jahre 2040 dar. Es handelt sich nicht um eine Prognose, sondern um eine Modellrechnung auf Basis der vorliegenden Studien, die erlaubt, die Plausibilität der getroffenen Annahmen zu überprüfen. Alle Angaben erfolgen in Terawattstunden pro Jahr (TWh/a). Eine detaillierte Darstellung des Wärmesektors befindet sich im Wärmeflussdiagramm in Anlage 30.

In den Erläuterungen werden nur Hinweise zum Verständnis des Diagramms gegeben. Die Details werden im Teil 3 in der Beschreibung der Sektoren behandelt.

Verwendung der Farben im Diagramm:

- **Rot** Wärme
- **Blau** Strom
- **Grün** Wasserstoff
- **Braun** flüssige und gasförmige Brennstoffe (PtX und Bio-Reststoffe)
- **Gelb** synthetische Rohstoffe, die als Ersatz für fossile Rohstoffe eingesetzt werden (PtX, Kunststoff-Recycling und Bio-Rohstoffe)
- **Orange** Stoffe, sowohl als Rohstoffe wie als Brennstoffe

Zahlen zum Energieflussdiagramm

Wärme

(ohne dezentrale Wärmepumpen, ohne dezentrale Verbrenner, ohne Kaskadennutzung von Abwärme in der Industrie, ohne Hochtemperaturwärme)

Erzeugung	TWh/a	Verbrauch	TWh/a
Solarthermie	**15**	Industrie	**9**
Abwärme	**10**	Hauswärme	**36**
Geothermie	**2**	Verluste Übertragung	**4**
BHKW und andere Verbrennungsanlagen	**14**	Verluste Speicherung	**2**
Groß-Wärmepumpen	**10**		
Gesamt	**51**	**Gesamt**	**51**

Strom

Erzeugung	TWh/a	Verbrauch	TWh/a
Onshore-Wind	**50**	Chemie	**20**
Photovoltaik	**92**	Stahl	**50**
Wasser	**0,5**	Industrie	**26**
Importe	**114**	LKW	**15**
Gas-Reserve-Kraftwerke	**6**	Bahn	**5**
BHKW und andere Verbrennungsanlagen	**9,5**	PKW und LNF	**20**
		Hauswärme	**19**
		Klassische Verbraucher	**47**
		Verluste Übertragung	**13**
		Verluste Speicherung	**4**
		Groß-Wärmepumpen	**3**
		Elektrolyse	**50**
Gesamt	**272**	**Gesamt**	**272**

Brennstoffe und Rohstoffe

Flüssigbrenn- und Rohstoffe PtL

Herkunft	TWh/a	Verbrauch	TWh/a
Importe PtL	**47**	Flugzeuge	**15**
Kunststoffrecycling	**26**	Binnenschiffe	**3**
		LKW/Nutzfahrzeuge	**4**
		Hauswärme	**3**
		Industrie	**5**
		Chemie-Industrie (Rohstoffe)	**43**
Gesamt	**73**	**Gesamt**	**73**

Wasserstoff

Herkunft	TWh/a	Verbrauch	TWh/a
Importe	**78**	Hauswärme	**3**
Elektrolyse	**40**	LKW	**6**
		Stahl	**35**
		Chemie	**13**
		Sonstige Industrie	**19**
		BHKW	**17**
		PtG	**25**
Gesamt	**118**	**Gesamt**	**118**

Biomasse und Müll

Herkunft	TWh/a	Verbrauch	TWh/a
Müll	**6**	Hauswärme	**1**
Bio-Reststoffe-Brennstoff	**15**	Industrie	**5**
Bio-Rohstoffe	**5**	Chemie	**10**
		BHKW und andere	**10**
Gesamt	**26**	**Gesamt**	**26**

Methan (PtG)

Herkunft	TWh/a	Verbrauch	TWh/a
PtG	**20**	Reserve-Kraftwerke	**15**
		Industrie	**4**
		BHKW und andere	**1**
Gesamt	**20**	**Gesamt**	**20**

Erläuterungen

1. Solarthermie

Mit Solarthermie wird Wasser direkt durch Sonnenlicht für die Warmwasserversorgung und für die Heizungen aufgeheizt. Auch in der Industrie wird Solarthermie dort genutzt werden, wo nur niedrige Temperaturen benötigt werden.

2. Abwärme

Abwärme kann aus Industriebetrieben, Rechenzentren und anderen Betrieben bezogen werden. Sie ist also keine Primärenergiequelle, sondern eine Wiederverwertung von bereits produzierter Energie.

3. Geothermie

Hier wird nur die direkte Wärmegewinnung aus unterirdischen Warmwasservorkommen oder Gesteinsschichten berücksichtigt. Die Umgebungswärme und Erdwärme, die von Wärmepumpen genutzt wird, wird hier nicht berücksichtigt. Zum Teil wird sie als Output in den Großwärmepumpen (Punkt 15) ausgewiesen. Soweit sie direkt vor Ort in den Haushalten oder in der Industrie genutzt werden, wird nur der dafür eingesetzte Strom berücksichtigt.

4. Erneuerbare Stromquellen

Hier geht es um Windenergie, Photovoltaik und Laufwasserkraftwerke – also Anlagen, die direkt Strom als Primärenergie erzeugen. Pumpkraftwerke sind hier nicht als Energiequelle aufgeführt. Sie werden als Stromspeicher unter Punkt 16 berücksichtigt.

5. Stromimporte

Wir rechnen nur mit Stromimporten aus Deutschland, nicht aus dem Ausland. Der Strom wird überwiegend aus Niedersachsen und per HGÜ-Leitung direkt aus den Offshore-Windparks und ggf. aus Schleswig-Holstein kommen. Stromaustausch mit anderen Bundesländern und mit dem Ausland (Belgien, Niederlande, Norwegen) im Rahmen des Lastausgleichs wird nicht berücksichtigt, da wir davon ausgehen, dass die hin und her fließenden Strommengen sich ausgleichen.

6. Wasserstoffimporte

Wir rechnen mit Importen von grünem Wasserstoff überwiegend per Pipeline aus Skandinavien und Russland. Ob der Transport per Schiff konkurrenzfähig wird, ist noch nicht abzusehen.

7. PtL-Importe (Brennstoffe)

Bei PtL-Brennstoffen (Power-to-Liquid) handelt es sich um grüne synthetische Brennstoffe – vorrangig für Flugzeuge, Schiffe und die Industrie – zum geringeren Teil auch für LKWs. Der Import von synthetischen Rohstoffen für die chemische Industrie wird unter Punkt 11 ausgewiesen.

8. Müll

In einer treibhausgasneutralen Gesellschaft ist auch der Müll treibhausgasneutral. Hier geht es nur um den Müll, der energetisch genutzt wird. Die Menge wird umso mehr abnehmen, je höher der Grad des Recyclings sein wird. Die recycelten Stoffe sind unter Punkt 10 ausgewiesen. Der Müll ist keine Primärenergiequelle, sondern Recycling von bereits produzierter Energie.

9. Biomasse

Biomasse wird sowohl als Brennstoff - überwiegend für die Industrie – als auch als Rohstoff – vorrangig für die chemische Industrie – eingesetzt. Bei den Brennstoffen aus Biomasse handelt es sich ausschließlich um Reststoffe. Anbau von Biomasse gibt es nur noch für die Rohstoffproduktion.

10. Kunststoff-Recycling

Das Recycling wird in Zukunft immer größere Bedeutung gewinnen. Hier werden lediglich die recycelten Kunststoffe für die chemische Industrie ausgewiesen, da sie fossile Brennstoffe ersetzen. Sie sind keine Primärenergiequelle, ersetzen aber Rohstoffe, für die sonst Primärenergie aufgewandt werden müsste.

11. PtL-Importe (Rohstoffe)

Bei PtL-Rohstoffen (Power-to-Liquid) handelt es sich um grüne synthetische Rohstoffe für die chemische Industrie, die fossile Rohstoffe oder aus fossilen Rohstoffen raffinierte Zwischenprodukte ersetzen. Der Import von PtL-Brennstoffen wird unter Punkt 7 ausgewiesen.

12. Wärmespeicher

Da die Wärme häufig zeitversetzt zur Wärmeerzeugung benötigt wird, wird ein erheblicher Teil der Wärme zwischengespeichert. Hier wird nur die Wärmespeicherung für die Fernwärme dargestellt, mit der 2 TWh Verluste verbunden sind. Zur lokalen Wärmespeicherung in den Haushalten siehe im »Wärmeflussdiagramm« in Anlage 30, auch hier rechnen wir mit Verlusten in Höhe von 2 TWh.

13. Übertragungsverluste (Wärme)

Bei der Lagerung und dem Transport von Wärme in Nah- und Fernwärmenetzen rechnen wir mit einem Verlust von gut 10 Prozent oder 4 TWh.

14. Wärme

Hier wird die Wärme ausgewiesen, die direkt vor Ort durch Sonnenkollektoren gewonnen wird und die Fern- und Nahwärme aus Erdwärme, Abwärme, Großwärmepumpen, BHKW und anderen Quellen. Die Wärme, die vor Ort durch Strom und Brennstoffe erzeugt wird, wird hier nicht ausgewiesen (siehe dazu Punkt 26, 32, 33, 34).

15. Großwärmepumpen

Wärmepumpen werden künftig zwei Drittel der Wärmeenergie liefern. Hier werden nur die Großwärmepumpen für Fern- und Nahwärmenetze ausgewiesen. Für die vor Ort installierten Wärmepumpen wird in den Haushalten und in der Industrie nur der verbrauchte Strom ausgewiesen (siehe dazu Punkt 14).

16. Stromspeicher

Hier werden die Batteriespeicher, Wasserspeicher in NRW und andere lokale Speicher mitgezählt. Autobatterien zählen mit, wenn sie als Speicher für das öffentliche Netz oder die häusliche Zwischenspeicherung zur Verfügung stehen. Speicher in anderen Bundesländern und im Ausland (Wasserspeicher in Norwegen) werden hier nicht berücksichtigt. Auch die Speicher für Wasserstoff, Methan, synthetische Brennstoffe und Rohstoffe sowie Biomasse werden nicht aufgeführt, da sie praktisch ohne Verluste arbeiten.

17. Übertragungsverluste (Strom)

Wir gehen davon aus, dass Übertragungsverluste im Stromnetz etwas zurückgehen werden und rechnen mit ca. 5 Prozent.[606]

18. Strom

Hierunter fällt die gesamte Stromproduktion in NRW einschließlich der Lieferung aus Stromspeichern (Punkt 16), Reservegaskraftwerken (Punkt 19) und BHKW (Punkt 20). Dazu kommen die Nettostromimporte aus anderen Bundesländern. Der Stromaustausch mit dem Ausland wird nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass Importe und Exporte sich ausgleichen.

19. Reservekraftwerke

Für den Fall einer längeren kalten Dunkelflaute (kaum Sonne und Wind im Winter), die nicht über die anderen Stromspeicher oder das europäische Gleichstromnetz ausgeglichen werden kann, wird Gas in Gaskavernen vorgehalten. Damit wird in Reservekraftwerken (Gasturbinen als Notstromaggregate) bei Bedarf die Stromlücke geschlossen.

20. BHKW

Blockheizkraftwerke produzieren sowohl Strom wie auch Wärme für Fern- und Nahwärmenetze. Sie verbrennen synthetische Gase oder Biomasse. Hier kommen auch Brennstoffzellen zum Einsatz. BHKW werden künftig nicht mehr im Dauerbetrieb eingesetzt, sondern hochgefahren, wenn Strom und/oder Wärme benötigt wird.

21. Brennstoffe

Hierunter sind alle Bio- und synthetischen E-Brennstoffe in flüssiger, fester und gasförmiger Form zusammengefasst: also Biomasse einschließlich Holz und Biogas, synthetisches Methan, Methanol, Ammoniak, Kerosin, Diesel und grüner Wasserstoff. Deren Herstellung, Lagerung und Transport sind sehr unterschiedlich. Vereinfachend haben wir angenommen, dass keine Leitungs- und Speicherverluste auftreten.

---

[606] Siehe Wikipedia (2019/2)

22. Wasserstoff-Elektrolyse

Bei der Elektrolyse wird unter Einsatz von Strom und Wasser Wasserstoff erzeugt. Wir rechnen mit einem Wirkungsgrad von 80 Prozent.[607]

23. PtG (Methanisierung)

Wasserstoff wird zu E-Methan synthetisiert. Wir rechnen mit einem Wirkungsgrad von 80 Prozent. Wenn Elektrolyse und Methanisierung gemeinsam durchgeführt werden, kann sogar ein Gesamtwirkungsgrad von 75 Prozent (statt wie in diesem Schaubild 64 Prozent) erreicht werden.[608] Wir gehen davon aus, dass synthetisches Methan nicht importiert wird, sondern komplett in NRW erzeugt wird.

24. Rohstoffe

Hier werden nur Rohstoffe und Zwischenprodukte für die Industrie – insbesondere die Grundstoffchemie – gerechnet (Naphtha, Methanol, Olefine, Aromaten, Ammoniak u.a.). Es werden entweder aus Biomasse, aus Kunststoffrecycling oder durch Synthese mit grünem Wasserstoff und CO_2 oder anderen Kohlenstoffquellen hergestellt. Sie ersetzen die heute verwendeten fossilen Rohstoffe und die daraus produzierten Zwischenprodukte.

25. Haushalte und GHD (Strom)

Hier geht es um den Strombedarf der klassischen Verbraucher in Wohnungen, Geschäften, Büros und Kleinbetrieben. Wir rechnen mit einer Reduzierung durch mehr Effizienz um 20 Prozent.

26. Heizung, Warmwasser

Die lokale Heizung und Warmwasserversorgung der Häuser erfolgen künftig zu 68 Prozent mit lokalen Heizungen, davon 78 Prozent Wärmepumpen, die aus den dargestellten 19 TWh Strom 57 TWh Wärme erzeugen. Der Rest wird überwiegend mit Fernwärme abgedeckt. Gerechnet wird mit einem Restbestand mit Heizungen mit Biomasse (vor allem Holz-Pellets) und synthetischem Gas und mit Wasserstoff-Heizungen. Ein Teil der Wärme wird

[607] Siehe DENA (2018/1)

[608] Siehe IWR (2020/1)

in lokalen Speichern zwischengespeichert, die im Diagramm nicht dargestellt sind (mehr dazu im Wärmeflussdiagramm in Anlage 30)

27. PKW

Mehrere neue Studien rechnen damit, dass ca. 2025 der Tipping-Point für das Elektroauto erreicht wird. Bei einer normalen Nutzungsdauer eines PKW von 15 Jahren sollten daher bis 2040 fast alle PKW E-Mobile sein.

28. Bahn

Die Bahn wird fast ausschließlich elektrisch fahren – entweder mit Oberleitung oder mit Batterien. In Nischen wird es auch den Brennstoffzellenantrieb geben, der aber quantitativ ignoriert werden kann. Wir rechnen bis 2040 maximal mit einer Verdreifachung des Bahnverkehrs.

29. LKW u.a.

Hier geht es überwiegend um LKW, auch um Busse und sonstige Fahrzeuge. Es wird mit 60 Prozent elektrischen Fahrzeugen – im Fernverkehr mit Oberleitung – und mit je 20 Prozent Antrieb durch Brennstoffzelle (mit Wasserstoff) und Verbrennungsmotor (mit PtL als Treibstoff) gerechnet.

30. Flugzeuge

Die Studien gehen davon aus, dass bis 2040 alternative Antriebe (z. B. Brennstoffzelle) quantitativ noch keine Rolle spielen. Daher rechnen wir mit grünem Kerosin oder anderen PtL-Treibstoffen.

31. Binnenschiffe

Auch hier rechnen wir noch nicht mit alternativen Antrieben – daher wird mit PtL-Treibstoffen gerechnet.

32. Industrie

Bei der Vielzahl der unterschiedlichen Industrien in NRW rechnen wir mit einem Energie-Mix aus Strom, Wasserstoff, PtL-Treibstoffen, Bio-Rohstoffen und Direktwärme.

33. Stahl-Herstellung

Hier wird vor allem Wasserstoff für die Direktreduktion von Eisenerz zu Schwammeisen und Strom für die Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen aus Eisenrecycling oder Schwammeisen gerechnet.

34. Chemie-Industrie

Die Chemie-Industrie benötigt Strom, Rohstoffe aus Biomasse und PtL-Importen und Wasserstoff, der überwiegend ebenfalls als Rohstoff und für die Herstellung von Hoch- und Mitteltemperaturwärme eingesetzt wird.

35. Strom für PTL-Importe

Hier wird angegeben, wieviel Strom in den Exportländern für die Herstellung der synthetischen PtL-Rohstoffe und PtL-Brennstoffe benötigt wird. Es wird mit einem Faktor 3 gerechnet.

36. Strom für H_2-Importe

Hier wird angegeben, wieviel Strom in den Exportländern für die Herstellung von grünem Wasserstoff benötigt wird. Es wird mit einem Faktor 1,25 gerechnet.

37. Primärer Energiebedarf

Dies ist der gesamte von NRW benötigte Primärenergiebedarf einschließlich der Energieimporte aus anderen Bundesländern und von den Offshore-Windparks und zusätzlich des Primärenergiebedarfs, der in den Lieferländern zur Herstellung von PtL und Wasserstoff benötigt wird.

Anlagen

Verzeichnis der Anlagen

Anlage 1: Treibhausgasemissionen in NRW 300

Anlage 2: Einordnung des Treibhausgasbudgets für NRW 307

Anlage 3: Der Minderungspfad für NRW 311

Anlage 4: E-Brennstoffe, grüne Brennstoffe, Bio-Brennstoffe 314

Anlage 5: Wasserstoffwirtschaft in NRW 315

Anlage 6: Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen 317

Anlage 7: Für die Klimapolitik relevante Institutionen 322

Anlage 8: Sozialwissenschaftlicher Exkurs – Akzeptanz und Bürgerbeteiligung 324

Anlage 9: Stromerzeugung und Verbrauch 326

Anlage 10: Kohleausstieg und Arbeitsplätze 328

Anlage 11: Potenziale der Erneuerbaren Energien 330

Anlage 12: Windbedingungen 331

Anlage 13: Flächen für Windenergieanlagen 332

Anlage 14: Windenergieplanung 335

Anlage 15: Effizienz und Nutzungsdauer von PV-Anlagen 338

Anlage 16: Flächenverfügbarkeit für PV-Anlagen 339

Anlage 17: Bioenergiepotenzial 340

Anlage 18: Stromtrassen 342

Anlage 19: Reservekraftwerke 346

Anlage 20: Energieverbrauch der Industrie 2040 347

Anlage 21: Energieverbrauch der Industrie in NRW 2040 351

Anlage 22: Eckdaten für die Umstellung der Grundstoffindustrie 352

Anlage 23: Industriekraftwerke in NRW 353

Anlage 24: Stahlindustrie 354

Anlage 25: Aluminiumindustrie 355

Anlage 26: Zementindustrie 356

Anlage 27: Berechnung der Sanierungsquote der Häuser 357

Anlage 28: Wohngebäude nach Baujahr 358

Anlage 29: Entwicklung des Wohngebäude-Bestandes 359

Anlage 30: Energiebedarf für Heizungswärme und Warmwasser mit Wärmefluss-diagramm 363

Anlage 31: Fernwärmeschiene Rhein-Ruhr 367

Anlage 32: Verkehr – Energieverbrauch 369

Anlage 33: Personenverkehr 370

Anlage 34: Güterverkehr 380

Anlage 35: Straßenverkehr 384

Anlage 36: Ladeinfrastruktur für Elektroautos 388

Anlage 37: Bahnverkehr 390

Anlage 38: Binnenschifffahrt 395

Anlage 39: Emissionen und Reduktionspotenziale in Landwirtschaft und Ernährung 398

Anlage 40: Emissionen und Reduktionspotenziale in Bodennutzung und Wald 405

Anlage 1: Treibhausgasemissionen in NRW

Sofern nicht anders angegeben, entstammen die Zahlen für Nordrhein-Westfalen dem Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen[609] und die Zahlen für Deutschland den offiziellen Meldungen des Umweltbundesamtes an die EU.[610] Alle Angaben erfolgen in $MtCO_2$-Äquivalente. Das Bezugsjahr ist jeweils 2018.

Da sich leider die Systematik des UBA und des LANUV erheblich unterscheiden, haben wir dies jeweils umgerechnet. Außerdem wurden einige Quellen den Sektoren von uns anders zugeordnet – siehe dazu die Anmerkungen – weil wir sie im Teil 3 dieser Studie in einem anderen Sektor behandeln.

Tabelle 11: Treibhausgasemissionen nach Sektoren

	Treibhausgas			NRW	Anteil von NRW	Deutschland	Anteil von D	Anteil NRW/D
	CO_2	CH_4	N_2O	CO_{2eq}		CO_{2eq}		
Energiewirtschaft				**125,9**	**46,3%**	**276,4**	**29,5%**	**45,6%**
Öffentliche Strom und Wärmevers.	116		0,8	117,3		262		
Kohleanteil				*104*				
Kohlebergbau [a]				1,8		3,2		
Kohleherstellung				5,6		9,7		
Kokereien [b]				*(2,9)*				

[609] Siehe LANUV (2020/1)

[610] Siehe Eionet (2020/1)

	Treibhausgas			NRW	Anteil von NRW	Deutsch-land	Anteil von D	Anteil NRW/D
	CO_2	CH_4	N_2O	CO_{2eq}		CO_{2eq}		
Anteil Kohle gesamt				*(111,4)*	*41%*	*206*	*22%*	*54,1*
Erdgasnetz [c]				1,5		1,5		
Verkehr				**39,1**	**14,4%**	**197,3**	**21,1%**	**19,8%**
Bahnverkehr[d]				0,1		0,8		
Schiffsverkehr				2,2		6		
Binnensch.				*(1,3)*		*(1,7)*		
Seeschiffe [e]				*(0,9)*		*(4,3)*		
Flugverkehr				6,9	2,6%	32,3	3,5%	
Inland				*(0,4)*		*(2,0)*		
Internat. [e]				*(6,5)*		*(30,3)*		
Straßenver-kehr				29,4	10,8%	156	16,7	
PKW				*(20,7)*	*7,6%*	*(96,9)*	*10,4*	
LNF				*(1,6)*	*3,1%*	*(11,2)*	*6,2%*	
Busse				*(0,9)*		*(46,3)*		
LKW				*(5,8)*				
Krafträder				*(0,2)*		*(1,4)*		
Flüchtige E. - Anteil				0,5		2,1		
Häuser				**28,8**	**10,6%**	**124,2**	**13,3%**	**23,2%**

	Treibhausgas			NRW	Anteil von NRW	Deutsch-land	Anteil von D	Anteil NRW/D
	CO_2	CH_4	N_2O	CO_{2eq}		CO_{2eq}		
Hauswärme				28,3		122,1		
Wohnungen						*(83,8)*		
GHD						*(32)*		
Landwirtsch.						*(6,3)*		
Flüchtige E. - Anteil				0,5		2,1		
Industrie [f]				**68**	**25,1%**	**221,6**	**23,7%**	**30,8%**
Eisen und Stahl	22	0,03	0,04	22,1	8,8%	60		
Nichteisen-Metalle	1,78			1,8		7		
Chemische In-dustrie	15,5			15,6	5,7%	70,6		
Zellstoff, Pa-pier, Druck	1,7			1,8		6		
Nahrungsmit-telindustrie	1,3			1,3		4		
Nichtmetalli-sche Minerale	10,9			10,9	4%	34		
Kältemittel, Narkosemittel und sonstiges	1,4			5,2		15		
Raffinerien [g]	7,2			7,2	2,7%	19		

	Treibhausgas			NRW	Anteil von NRW	Deutsch-land	Anteil von D	Anteil NRW/D
	CO_2	CH_4	N_2O	CO_{2eq}		CO_{2eq}		
Flüchtige Emissionen [h]				2,1		6		
Landwirt-schaft				**7,6**	**2,8%**	**63,6**	**6,8%**	**11,9%**
Tierhaltung (mit Güllebe-handlung) [i]		4,5	0,3	4,8		34,3		
Kühe		*3,4*	*0,2*	*(3,6)*		*(25,1)*		
Schweine		*1*	*0,1*	*(1,1)*		*(9,3)*		
Andere				*(0,1)*				
Düngung	0,3	0,1	2,4	2,8		27,5		
Abfallwirt-schaft		0,4	0,1	**0,5**	**0,2%**	**9,7**	**1%**	**5,2%**
Gesamt ohne LULUFC und internation. Verkehre [k]				**262,5**		**858,3**		**30,6%**
Bodennut-zung (LULUCF) [l]				**-4,4**	**-1,6**	**-26,9**	**-2,9**	**16,6**
Negative Emissionen				-5,9	-2,2%	-70,2	-7,5%	8,4%
Emissionen				1,5	0,6%	43,2	4,6%	3,5%

	Treibhausgas			NRW	Anteil von NRW	Deutsch-land	Anteil von D	Anteil NRW/D
	CO_2	CH_4	N_2O	CO_{2eq}		CO_{2eq}		
Wald und Holzent-nahme				*(-5,5)*		*(-70,2)*		
Wiesen und Moore [m]				*(-0,4)*		*(20,3)*		
Ackerland [m]				*(0,9)*		*(16,5)*		
Siedlungs-flächen				*(0,5)*		*(6,2)*		
Sonstige				*(0,1)*		*(0,1)*		
Gesamtemis-sionen [n]				**271,4**	**100%**	**936,1**	**100%**	**29%**
Kompensatio-nen [o]				**-5,9**	**-2,2%**	**-70,2**	**-7,5%**	
Gesamt netto mit LULUCF und int. Ver-kehr [p]				**265,5**		**866**		30,7

[a] Im Bericht des Landesamtes wird der Punkt »Flüchtige Emissionen aus Brennstoffen« als eigener Punkt behandelt. Wir haben ihn aufgeteilt. Die Emissionen aus dem Kohle-Bergbau haben wir der Energie, die Emissionen aus Öl- und Gaswirtschaft der Industrie und die restlichen Emissionen aus Öl und Gas zu gleichen Teilen aufgeteilt auf Hauswärme, Verkehr und Industrie.

[b] Quelle: Emissionsbericht der Deutsche Emissionshandelsstelle[611]

[611] Siehe DEHSt (2018/1)

[c] Im Bericht des Landesamtes werden die Emissionen des Erdgasnetzes unter “Sonstiger Verkehr“ geführt. Wir behandeln sie unter Energiewirtschaft.

[d] Diese Zahlen für die Emissionen der Bahn aus der UBA-Statistik enthalten nur den Diesellokverkehr, nicht aber die der Stromerzeugung. Im Kapitel »Verkehr« haben wir die Zahlen korrigiert.

[e] Die Emissionen des internationalen Flug- und Schiffverkehrs werden nicht in den Bilanzen der Länder geführt. Wir haben NRW daher jeweils einen Anteil an den deutschen Emissionen entsprechend des Anteils Nordrhein-Westfalens an der Gesamtbevölkerung Deutschlands (21,6%) zugerechnet. Damit bilden wir die von der Bevölkerung von NRW verursachten Emissionen ab. Bei der Deckung des Energiebedarfs wird allerdings nur die in NRW benötigte Energie berücksichtigt.

[f] Die UBA-Statistik enthält keine Angaben, wie die industrieeigenen Kraftwerke auf die Sparten verteilt sind. Deswegen mussten wir die Zuteilung in der Spalte „Deutschland“ auf Basis der Zahlen des LANUV für NRW schätzen.

[g] Raffinerien werden im Bericht des Landesamtes unter Energiewirtschaft geführt. Die Anlagen verarbeiten überwiegend Rohöl zu Treibstoffen für den Verkehr und als Rohstoffe für die Kunststoff-Herstellung. Wir werden die Emissionen daher im Sektor Industrie hehandeln und haben sie daher hier zugeordnet.

[h] Hier haben wir unterschiedliche Emissionsquellen aus verschiedenen Teilen der Emissionsstatistik (Öl- und Gaswirtschaft, Pipelines u.a.) zusammengefasst.

[i] Die UBA-Statistik unterscheidet zwischen den Methan-Emissionen der Wiederkäuer und denen der Güllewirtschaft, das LANUV dagegen nach Tierarten. Deswegen haben wir die Zahlen für Deutschland umgerechnet.

[k] Dies sind die in der offiziellen Treibhausgasbilanz ausgewiesenen Emissionen für NRW bzw. für Deutschland. Sie unterscheiden sich von den Gesamtemissionen, da der internationale Verkehr und LULUCF noch nicht mitgerechnet werden.

[l] LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry) beinhaltet alle Bodenemissionen, die nicht der Landwirtschaft zugeordnet werden können.

[m] Die Emissionen entstehen überwiegend auf ehemaligen trockengelegten Mooren und Sümpfen, vor allem in Norddeutschland.

[n] Dies sind die Bruttoemissionen ohne Gegenrechnung der negativen Emissionen durch Wald und Wiesen. Diese Zahlen dienen als Basis für die Berechnung der Anteile der Sektoren (siehe Grafik 1).

[O] Die Kompensationen stammen zurzeit ausschließlich aus den negativen Emissionen von Wäldern und Wiesen.

[p] Diese Gesamtemissionsbilanz ist die Grundlage für den in Kapitel 1.6 dargestellten Reduktionspfad. Die Zahlen dazu finden sich in Anlage 3.

Anlage 2: Einordnung des Treibhausgasbudgets für NRW

Das Treibhausgasbudget für die Welt gibt an, wie viele Treibhausgase noch weltweit emittiert werden dürfen, um zum Beispiel unterhalb einer Erderwärmung von 1,5 Grad zu bleiben.

Diese Studie soll nicht die Frage beantworten, wie NRW ein bestimmtes Treibhausgasbudget einhalten könnte. Vielmehr haben wir aufgrund der vorliegenden wissenschaftlichen Studien zusammengestellt, was möglich ist – also wie schnell es möglich und sinnvoll ist, NRW treibhausgasneutral zu machen. Ergebnis dieser Vergleiche ist der in Anlage 3 dargestellte und in Grafik 8 dargestellte Minderungspfad. Aus diesem Pfad ergibt sich, dass NRW ab 2021 bis zur Klimaneutralität noch etwa 1.515 $MtCO_{2eq}$ ausstoßen wird. Soviel Treibhausgase werden also in NRW noch emittiert, wenn dieser Weg verfolgt wird.

Das globale Budget

Alle Prognosen im Bericht des Weltklimarates beinhalten eine gewisse Unsicherheit. Denn die Schwankungen der Sonnenstrahlung, das Tauen der Dauerfrostböden, das Schmelzen des Nordpolareises und andere Entwicklungen können nie ganz exakt vorhergesehen werden. Deshalb nennt der Weltklimarat zwei Varianten[612].

- Die Variante 50: Das 1,5-Grad-Ziel soll mit 50 Prozent Wahrscheinlichkeit erreicht werden. Bei dieser Variante muss die Erde in 27 Jahren klimaneutral sein – also im Jahre 2047.
- Die Variante 67: Das 1,5-Grad-Ziel soll mit zwei Dritteln Wahrscheinlichkeit (das sind 67 Prozent) erreicht werden. Bei dieser Variante muss die Erde in 19 Jahren klimaneutral sein – also im Jahre 2039.

Wollten wir das Ziel mit 80 Prozent Wahrscheinlichkeit erreichen, dann würde das Budget nicht mal bis 2035 reichen. Im Folgenden gehen wir von der Variante 67 aus – wie auch fast alle vorliegenden wissenschaftlichen Studien und auch der Sachverständigenrat für Umweltfragen der Bundesregierung (SRU).[613]

---

[612] Siehe IPPC (2018/1)

[613] Fridays for Future hat in der von ihnen beauftragten Studie die Erreichung einer maximalen Erwärmung mit 50%-Wahrscheinlichkeit vorgegeben – aber dafür soll jede*r Deutsche nur das durchschnittliche Budget eines Weltbürgers bzw. einer Weltbürgerin bekommen.

Das Budget für Deutschland

Der Weltklimarat geht davon aus, dass jedes Land ein Budget einhalten sollte, das seinem Anteil an der Weltbevölkerung entspricht. Deutschland hat zurzeit 1,1 Prozent der Weltbevölkerung, ist aber für mehr als 2 Prozent der CO_2-Emissionen verantwortlich. 2050 wird Deutschland aber nur noch 0,9 Prozent der Weltbevölkerung haben. Daher rechnen wir mit dem Mittelwert von 1 Prozent. Nach diesem einfachen Pro-Kopf-Modell entfiel Anfang 2018 auf Deutschland noch ein Restbudget von 5.800 $MtCO_{2eq}$ für Variante 50 oder 4.200 $MtCO_{2eq}$ für Variante 67.[614]

Deutschland setzte 2017 ungefähr 900 $MtCO_{2eq}$ frei – das sind pro Kopf doppelt so viel wie der Durchschnitt der Welt. Um innerhalb des Budgets zu bleiben, müsste Deutschland bereits 2028 klimaneutral sein. Dies wird von keiner Studie als realistisch betrachtet. Auf Basis der Studien halten wir es für darstellbar, dass Deutschland einen Pfad verfolgt, mit dem es bis 2035 seine Treibhausgasemissionen um 90 Prozent von 2017 reduziert und dann bis 2040 klimaneutral wird. Damit ergeben sich Restemissionen von etwa 6.600 $MtCO_{2eq}$ ab 2020. Dafür benötigt allerdings jede*r Deutsche ein Restbudget, das knapp 1,9-mal so groß ist wie das, was einem Menschen global betrachtet durchschnittlich eigentlich noch zur Verfügung steht.[615]

Dies entspricht zwar nicht den Erwartungen der Mehrzahl der UN-Mitglieder, die den Industriestaaten das gleiche Budget pro Einwohner*in zubilligen wollen, wie den Menschen in allen anderen Ländern der Erde. Trotzdem könnte dieser deutsche Beitrag (und ein entsprechender Beitrag der anderen Industriestaaten) ausreichen, dass die Welt das 1,5-Grad-Ziel erreicht. Denn viele Länder des globalen Südens haben auf Grund ihrer geringen Emissionen noch viel mehr Zeit. So würde das Budget von Ägypten bei einer linearen Reduzierung der Emissionen noch bis 2064 reichen, das von Indien bis 2075, das Budget

---

[614] Wir arbeiten in dieser Studie der Einfachheit halber stets mit CO_2-Äquivalenten (gemessen in Megatonnen = $MtCO_{2eq}$). Dazu werden die Emissionen anderer Treibhausgase wie Methan, Lachgas usw. in CO_2 umgerechnet. Wissenschaftlich korrekt wäre es, bei den Budgets nur CO_2- Emissionen – also keine Äquivalente für andere Treibhausgase – anzugeben, da diese Gase sich schneller abbauen als CO_2 und nicht einfach addiert werden können. Wir ignorieren hier diese Feinheiten, da die Unsicherheit bei den Budgetangaben größer ist als diese Unterschiede.

[615] Der Sachverständigenrat für Umweltfragen der Bundesregierung (SRU) hat im September 2019 in einer Erklärung fast das gleiche Budget gefordert. Er hat dies aber anders begründet. Bei 67 Prozent Wahrscheinlichkeit und einfachem Pro-Kopf-Restbudget entspräche das dem Ziel einer maximalen Erwärmung der Erde um 1,75 Grad. Siehe SRU (2019/1)

von Nigeria bis 2114 und das von Ghana sogar bis 2170. Wenn diese Länder also schon früher treibhausgasneutral werden, dann würden sie ihr Budget nicht ausschöpfen. Daraus ergibt sich eine mögliche Lösung: Wenn Deutschland zum Beispiel Ägypten technisch und finanziell hilft, bis 2040 treibhausgasneutral zu werden (was vermutlich einfacher ist, als die Transformation in Deutschland), dann würde das gemeinsame Budget für beide Staaten ausreichen. Allerdings braucht Deutschland dann auch noch einige Kompensationsmaßnahmen, die wir im Teil 1 unter negative Emissionen und im Teil 3 Sektor 6 unter »Kompensationen« dargestellt haben.

Das Budget für NRW

Für NRW sind wir so vorgegangen: Wir haben aufgrund der heutigen Emissionen in NRW für die sieben Sektoren und unter Berücksichtigung der Reduktionspotenziale, die wir im Handbuch Klimaschutz und aufgrund der spezifischen Situation in NRW ermittelt haben, die Reduktionspfade in NRW jeweils für die einzelnen Sektoren berechnet (siehe dazu Anlage 3).

Aus diesen Zahlen ergeben sich ab 2021 Restemissionen von 1.515 $MtCO_{2eq.}$ Ab 2020 wären das etwa 1.740 $MtCO_{2eq}$, also 26 Prozent des deutschen Budget. Damit liegt das für NRW erforderliche Budget zwar höher als der Anteil der Bevölkerung (21,6 Prozent), aber geringer als der heutige Anteil der Emissionen (30,7 Prozent), gemessen an den Gesamtemissionen Deutschlands. NRW könnte also seine Emissionen schneller reduzieren als Deutschland insgesamt. Bezogen auf das weltweite Budget pro Kopf bedeutet dies, dass jede Bürger*in von NRW das 2,3-fache an den Restemissionen durchschnittlicher Weltbürger*innen benötigt. Dies kann ein wichtiger Beitrag zur Erreichung des 1,5-Grad-Ziels sein, wenn die Mehremissionen von NRW durch andere Bundesländer und die Mehremissionen von Deutschland durch andere Staaten wie oben beschrieben kompensiert werden.

Ein alternativer Weg wäre gewesen, ein Rest-Budget von Nordrhein-Westfalen zu berechnen und dieses danach auf die Sektoren aufzuteilen. Dazu gäbe es zwei Methoden: Erstens könnte NRW aufgrund seines Anteils an der Weltbevölkerung (ca. 0,0023 Prozent) einen Anteil am Welt-Restbudget beanspruchen (für ein Budget zur Erreichung von 1,5-Grad mit 67 Prozent Wahrscheinlichkeit wären das nur noch 782 $MtCO_{2eq}$, dann müsste NRW bereits 2027 klimaneutral sein). Zweitens könnte gemäß dem heutigen Anteil der Nordrhein-Westfälischen Gesamtemissionen an den Gesamtemissionen Deutschlands (ca. 30,7 Prozent) berechnet werden, wie groß der Anteil des nordrhein-westfälischen Restbudgets am

deutschen ist (ca. 1880 $MtCO_{2eq}$ ab 2020, wenn das Budget des Handbuch Klimaschutz zu Grunde gelegt wird). Beide Wege haben aber den Nachteil, dass nicht berücksichtigt wird, dass es zwischen den Sektoren Unterschiede gibt in Bezug auf Kosten, Dauer und Möglichkeit der Umstellung auf Treibhausgasneutralität und die Sektoren in unterschiedlichen Regionen unterschiedlich stark ins Gewicht fallen. Bestimmte Bereiche wie die Zementindustrie oder die Düngung in der Landwirtschaft können z.B. nur sehr langsam oder überhaupt nicht vollständig umgestellt werden. Nordrhein-Westfalen hat einen vergleichsweise kleinen Landwirtschafts- und Bodennutzungs-Sektor, aber einen großen Industriesektor. Bei der Berechnung eines allgemeinen Restbudgets, das nicht nach Sektoren differenziert, würden diese regionalen Besonderheiten vernachlässigt.

Anlage 3: Der Minderungspfad für Nordrhein-Westfalen

Diese Anlage enthält die Daten für den in Teilen 1.4 und 1.6 beschriebenen Minderungspfad, insbesondere für die Grafiken 5 und 8 sowie für die Zielgrafiken in der Beschreibung der einzelnen Sektoren. Für die weiteren in Grafik 5 dargestellten Minderungspfade siehe Anlage 2 des Handbuch Klimaschutz[616]

Die in der Tabelle 12 dargestellten Minderungspfade für die Sektoren basieren maßgeblich auf den Analysen im Handbuch Klimaschutz.[617] Sie wurden mit den vertiefenden Analysen für NRW im Teil 2 und für die einzelnen Sektoren in Teil 3 verifiziert. Dabei konnten wir feststellen, dass die Minderungen in den einzelnen Sektoren in NRW sehr ähnlich

Tabelle 12: Minderungspfad für NRW nach Sektoren

	Energie	Industrie	Hauswärme	Verkehr	Landwirtschaft[1]	Abfälle	Wald + Wiesen	Bodennutzung (Quellen)	Gesamt
2018	126	68	29	39	7,5	0,5	- 6	1,5	266
2021	85	60	25	35	7	0,5	- 6	1,5	208
2025	55	40	20	30	6	0	- 6	1,5	145
2030	15	20	15	10	4	0	- 6,5	1	58
2035	5	12	6	4	3	0	- 7	1	24
2040	1	4	0	2	2	0	- 8	1	2
2045	0	3	0	2	2	0	- 9	1	-1
2050	0	2	0	2	2	0	- 9	1	-2

Erläuterungen: Alle Emissionen werden in $MtCO_{2eq}$ angegeben
Alle Prognose-Zahlen sind gerundet.

[616] Siehe MD (2020/2) – dort Anlage 2

[617] Siehe MD (2020/1)

verlaufen können wie auf Bundesebene.[618] Nur für den Energiesektor haben wir eine deutlich stärkere Reduktion im Jahre 2021 und im Jahre 2025 angenommen, da die Emissionen von 2018 auf 2019 durch die Stilllegung von unrentablen Steinkohlekraftwerken um mehr als 20 Prozent gesunken sind.[619] Ansonsten decken sich die Zahlen mit dem ermittelten Minderungspfad für Deutschland.[620] Ausgangspunkt dafür sind die Emissionen der Sektoren im Jahre 2018 (siehe Anlage 1). Die Zahlen für Deutschland haben wir entsprechend der Unterschiede in der Statistik angepasst. Auch die Emissionen für NRW wurden zum Teil anders als beispielsweise in der LANUV-Statistik den Sektoren zugeordnet, weil wir die entsprechenden Emissionen in einem anderen Sektor in Teil 3 dieser Studie behandeln (mehr dazu in Anlage 1).

Da diese Studie für Nordrhein-Westfalen erst 2021 veröffentlicht wird, startet die Grafik 8 beim Jahr 2021, während im Handbuch Klimaschutz Deutschland bei 2020 gestartet wird. Nach heutigem Wissensstand (Januar 2021) wird aufgrund der Corona-Krise der Ausstoß Deutschlands im Jahr 2020 gegenüber 2019 deutlich gesunken sein und vermutlich ca. 700 bis 750 $MtCO_{2eq}$ betragen.[621] Damit liegt der tatsächliche Ausstoß unter dem vom Handbuch Deutschland kalkulierten Pfad. Da die Emissionen pandemiebedingt gesunken sind und es möglich wäre, dass nach der Corona-Krise umso mehr produziert wird, haben wir diese Reduktion nur als Einmaleffekt berücksichtigt und nicht in den Folgejahren fortgeschrieben.

Tabelle 13 stellt auf Basis dieses Minderungspfades dar, wie schnell die Treibhausgasemissionen in NRW im Vergleich zu denen von Deutschland verringert werden können. Die Emissionen pro Kopf sinken bis 2035 deutlich schneller als in Deutschland insgesamt. Danach sinken sie relativ nicht weiter, da wir davon ausgehen, dass NRW auch in Zukunft Zentrum der Grundstoffindustrie bleiben wird.

Der Emissionspfad in NRW verläuft also etwas schneller als der von Deutschland. Grund dafür ist das um 41 Prozent höhere Ausgangsniveau pro Kopf. Dieses wird maßgeblich

[618] Ein alternativer Weg wäre gewesen, das Rest-Budget von Nordrhein-Westfalen zu berechnen und dieses danach auf die Sektoren aufzuteilen. Dabei würden aber die Besonderheiten von NRW (großer Kohleanteil im Energiesektor, großer Anteil an Grundstoffindustrien, relativ kleiner Agrarsektor) nicht berücksichtigt.

[619] Siehe MWIDE (2020/3)

[620] Siehe Anlage 9 in MD (2020/2)

[621] Siehe MCC (2020/1), Agora Energiewende (2020/3)

durch einen auf 2030 vorgezogenen Kohleausstieg ausgeglichen. Wegen der wachsenden Kompensation der Restemissionen durch die Wälder (anders als in vielen anderen Bundesländern) kann NRW 2040 treibhausneutral werden und danach sogar einen kleinen Kompensationsbeitrag leisten. Allerdings gelingt dies nur, wenn NRW in erheblichen Umfang künftig Strom aus Norddeutschland und synthetische Brennstoffe importiert.

Die Tabelle 13: Reduktion von Treibhausgasemissionen in Deutschland und NRW im Vergleich in Prozent *($MtCO_{2eq}$)*

	Deutschland		NRW		NRW/Kopf im Vergleich zu D.
	Emissionen	in %	Emissionen	in %	
2018	866	100%	266	100%	141%
2021	750	87%	208	78%	128%
2025	530	61%	145	55%	126%
2030	225	26%	58	22%	120%
2035	85	10%	24	9%	131%
2040	8	1%	2	1%	
2045	1	0%	-1	0%	

Im Ergebnis betragen die gesamten Restemissionen pro Kopf in NRW bis zur Herstellung der Klimaneutralität etwa das 2,3-fache des Budgets, das nach dem Weltklimarat für jede*n Weltbürger*in zulässig wäre. Auf welche Weise diese sehr viel höheren Emissionen mit der Erreichung des 1,5-Grad-Ziel kompatibel sind, wird in Anlage 2 diskutiert.

Anlage 4: E-Brennstoffe, grüne Brennstoffe, Bio-Brennstoffe

Die unterschiedlichen Bezeichnungen führen manchmal zu Verwirrung. Wir unterscheiden:

- **E-Brennstoffe**: Erneuerbare Brennstoffe (oder Treibstoffe) sind entweder Bio-Brennstoffe (siehe unten) oder elektrisch erzeugte Brennstoffe wie E-Methan, E-Kerosin oder E-Diesel, die aus Wasserstoff und Kohlenstoff erzeugt werden. Da der Wasserstoff und die Raffinierung mit elektrischem Strom erfolgen, spricht man auch von PtL-Treibstoffen (power to liquid). Sie werden auch als Grüne Brennstoffe bezeichnet. Wasserstoff kann aus Wasser mittels Elektrolyse gewonnen werden. Allerdings braucht es dafür Strom. Wenn dieser erneuerbar erzeugt wurde (z.B. mit Windrädern), ist auch der Wasserstoff klimaneutral. Man spricht dann auch von „grünem Wasserstoff“. Der grüne Wasserstoff kann dann weiterverarbeitet werden zu E-Brennstoffen. Dazu braucht es noch Kohlenstoff. Dieser kann theoretisch aus der Luft gewonnen werden. Das ist aber sehr teuer. Man kann den Kohlenstoff auch aus den Abgasen von Verbrennungsprozessen gewinnen. Das nennt man CCU (Carbon Capture and Utilization). E-Brennstoffe sind klimaneutral, da der Kohlenstoff, der bei der Verbrennung entsteht, vorher aus der Luft geholt wurde. Allerdings braucht die Herstellung eben sehr viel Strom.
- **Grüne Brennstoffe**: Dies ist ein Oberbegriff und umfasst grünen Wasserstoff, der aus erneuerbar erzeugtem Strom durch Elektrolyse erzeugt wurde, sowie alle E-Brennstoffe.
- **Agri-Brennstoffe**: Dies sind Brennstoffe, die aus Energie-Pflanzen (vor allem Mais und Raps) gewonnen werden. „E10“, das zurzeit in Deutschland dem Benzin beigemischt ist, ist beispielsweise ein Agri-Brennstoff. Agri-Brennstoffe sind treibhausgasneutral. Trotzdem wird ihre Nutzung von den meisten Studien abgelehnt, denn der Anbau von Energiepflanzen hat viele Nachteile (siehe im Kapitel »Landwirtschaft, Ernährung, Bodennutzung und Kompensation« im Abschnitt »Flächennutzung für die Klimapolitik«).
- **Bio-Brennstoffe:** Dies sind Brennstoffe, die aus der Vergärung von organischen Reststoffen gewonnen werden, beispielsweise Gülle oder Speiseresten. Sie müssen – soweit sie sich nicht als Rohstoffe für die Industrie eignen – unbedingt energetisch genutzt werden, da die organischen Reststoffe sonst Quelle von anderen Treibhausgasen werden.

Anlage 5: Wasserstoffwirtschaft in NRW

In der Tabelle 14 werden die Eckdaten dieser Studie mit denen der „Wasserstoff Roadmap NRW“[622] und der „Wasserstoffstudie NRW“ verglichen. Die Wasserstoffstudie enthält ein Stromszenario (EL) und ein H_2-Szenario, aber keinen Mittelweg. Alle Varianten zielen auf eine weitgehend treibhausgasneutrale Wirtschaft in NRW. Deshalb ist es unerheblich, dass

Tabelle 14: Eckdaten für den Bedarf und Importe von E-Brennstoffen in NRW

	Unsere Annahme (2040) in TWh/a	Roadmap NRW (2050) in TWh/a	Wasserstoffstudie NRW (2050) EL-Szenario in TWh/a	Wasserstoffstudie NRW (2050) H2 Szenario in TWh/a
Wasserstoffbedarf NRW	**118**	**104**	**72**	**157**
davon Industrie	67	41,8	54	79
davon Verkehr	6	32,4	10	41
davon Hauswärme	3	3,6	8	37
davon Rückverstromung	17	26	k.A.	
davon H_2-Bedarf für PtX Erzeugung NRW	25		[623]	
Wasserstofferzeugung in NRW	40	18	k.A	
H_2-Import aus Ausland	48	86		
H_2-Import aus Deutschl.	30			
PtX-Bedarf NRW	**67**	**139**		
davon PtX Erzeugung in NRW	20	10	[624]	

[622] Siehe MWIDE (2020/4), Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (2019/1), zur Wasserstoffstudie NRW siehe auch Anlage 6

[623] In der Studie wird die Möglichkeit diskutiert, zukünftig in den Raffinerien in NRW den Bedarf für die internationalen Verkehre in Deutschland an PtL herzustellen. Dies könnte die wegfallende Produktion durch die Elektrifizierung des Straßenverkehrs kompensieren. Für die Erzeugung von PtL werden allerdings enorme Mengen an Energie benötigt.

[624] Siehe vorherige Fußnote

davon PtX Import	47	129	

die Roadmap und die Wasserstoffstudie das Bezugsjahr 2050 haben, während unsere Studie 2040 für möglich erachtet. Die aktuellen Studien des Wuppertal Instituts stellen nämlich dar, dass die Umstellung technisch auch schneller (sogar bis 2035) erfolgen kann, wenn die Bundesregierung die notwendigen Rahmenbedingungen schafft.

Unsere Kalkulation für NRW schlägt in etwa einen Mittelweg zwischen den Annahmen für das H_2-Szenario und das Stromszenario der Wasserstoffstudie vor.[625] Unsere angenommenen Bedarfsmengen für den Verkehr sind gering, da wir davon ausgehen, dass die Elektromobilität sich weitgehend durchsetzt und dadurch der Bedarf an Primärenergie geringer gehalten werden kann. Das gleiche gilt für die Hauswärme. Hier wird sich wegen der großen Effizienz die Wärmepumpe verbunden mit lokalen Speichern durchsetzen. Auch bei der Fernwärme werden Wärmepumpen eine wesentliche Rolle spielen.

Stattdessen sehen wir höhere Zahlen für Wasserstoff-Elektrolyse und die Raffinerie von PtX-Produkten in NRW vor, um die in NRW stark vertretene Grundstoffchemie und ihren Abnehmer für Wasserstoff, die Stahlindustrie, zu stärken. Alternativ kann natürlich mehr Wasserstoff in Norddeutschland in der Nähe der Offshore-Windparks produziert und von dort nach NRW geliefert werden. Umgekehrt wäre es auch denkbar, dass in NRW noch mehr Wasserstoff hergestellt werden. Das würde allerdings zusätzliche Stromimporte und in der Folge zusätzlichen Leitungsbau notwendig machen. Ebenfalls wäre es möglich, verstärkt Wasserstoff zu importieren und in den Raffinerien vor Ort zu PtG und PtL weiterzuverarbeiten. Welche Lösungen am kostengünstigsten und sinnvollsten sind, lässt sich auf Grund der Vielzahl von Einflussfaktoren nicht sicher vorhersagen.[626]

[625] Siehe Anlage 5

[626] Siehe Wuppertal (2020/2)

Anlage 6: Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen

Herausgeber: Ludwig-Bölkow-Systemtechnik; Autoren: Michalski, Jan; Altmann, Matthias; Bünger, Ulrich, Weindorf, Werner; Auftraggeber: Wirtschaftsminister NRW; veröffentlicht: Mai 2019[627]

Zusammenfassung: Die Studie untersucht, ob bei der Energiewende die fossilen Brennstoffe vorrangig durch Wasserstoff oder vorrangig durch Strom ersetzt werden sollen. Dabei kommt sie zu dem Ergebnis, dass ein Vorrang für Wasserstoff kostengünstiger sei.

> ***Anmerkung:*** *Allerdings fehlt in der Studie ein Mittelweg. Sie ist deswegen schwer mit anderen Studien vergleichbar, da alle anderen verfügbaren Studien solche Mittelwege enthalten und jeweils für jeden Sektor und jede Anwendung untersuchen, welcher Mix optimal ist. Auch enthält diese Studie einige Annahmen, die die Stromvariante erheblich teurer machen und die wir nicht für plausibel halten.*

Die Studie enthält **drei Szenarien**: 55% Reduzierung bis 2030 sowie 80% und 95% Reduzierung bis 2050. Im Folgenden wird nur das 95%-Szenario für 2050 betrachtet (Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen S. 30/31). Die Studie vergleicht jeweils eine Wasserstoffvariante „H_2“ (80% Wasserstoff, 20% Strom) und eine Stromvariante „EL“ (80% Strom, 20% Wasserstoff).

Der **Basisstrom** für Haushalte und GHD sinkt von 253 auf 178 TWh. Wärme für Haushalte und GHD sinkt von 875 auf 365 TWh. Der Wirkungsfaktor für Stromwärmepumpen wird mit Faktor 3,7 gerechnet. Für Wärme aus Wasserstoff wird ein Mix angenommen: 70% Heizkessel und 30% Brennstoffzellen (diese erzeugen 53% Wärme, 42% Strom) (S. 45/46).

EE-Potenziale: Gerechnet wird mit 40% onshore, 25% offshore, 35% PV (S. 52/53).

Leitungskosten: Kosten Wechselstrom-Leitung 2*380kV: 1 Mio. €/km, HGÜ-Leitung 2 GW-Erdkabel: 4 Mio. €/km. Kosten für Wasserstoffleitungen wg. Nutzung des Erdgasnetzes werden als minimal angesetzt (S. 57).

> ***Anmerkung:*** *Die Annahme, dass grundsätzlich Erdkabel gebaut werden, verteuert das System mindestens um das 4-fache. Beim Vergleich von Freileitungen ist eine Wechselstrom-Höchstspannungstrasse 5-mal so teuer wie eine HGÜ-Trasse, hat ca.*

[627] Siehe Ludwig-Bölkow-Systemtechnik 2019

10-mal so viel Verluste und benötigt etwa 25-mal so viel Fläche (380-kV-Wechselstrom entspricht ca. 220 kV Gleichstrom).

Verluste: Strom pauschal 6,5%, Wasserstoff 1% (S. 58).

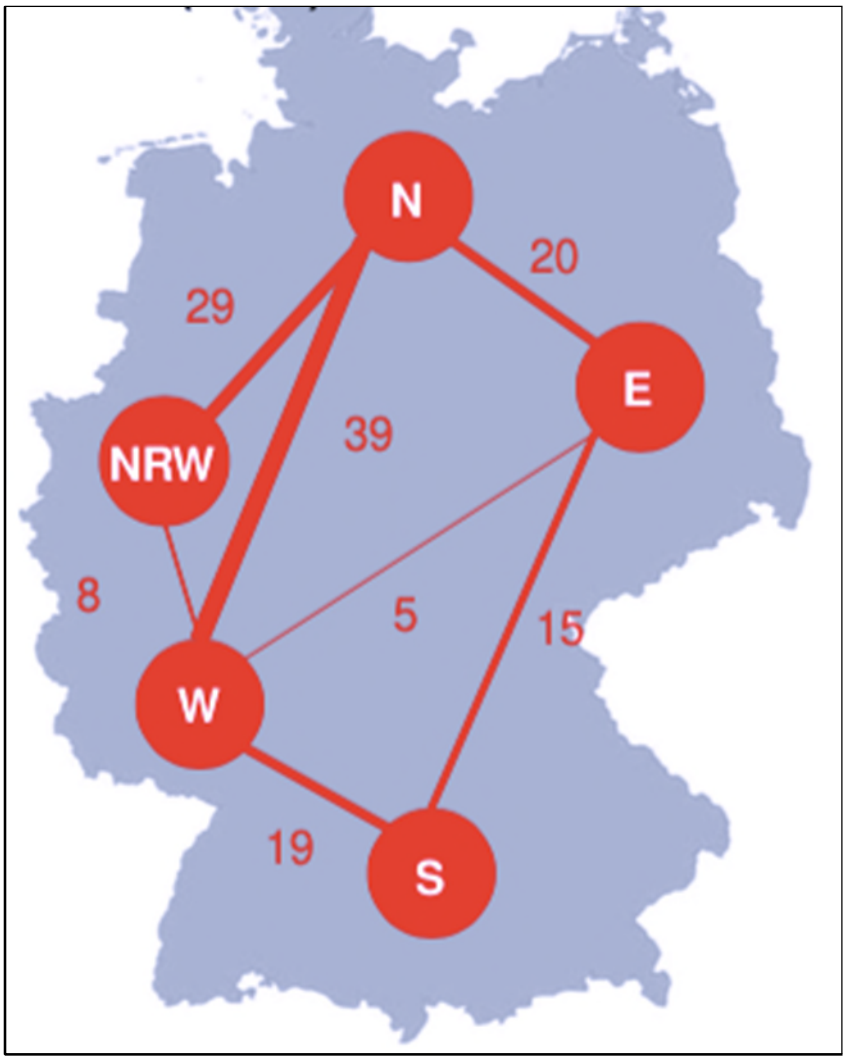
Endenergiebedarf: heute 2400 TWh, 2050 bleiben 1200 TWh (S. 60ff).

Wasserstoffbedarf: EE-Szenario = 220 TWh/a (143 Industrie, 36 Gebäude, 55 Verkehr), H_2-Szenario = 650 TWh/a (225 Industrie, 169 Gebäude, 219 Verkehr), (S. 66).

Strombedarf (ohne Schiff und Flug): EE-Szenario = 1103 TWh/a (754 direkt, 348 Elektrolyse), H_2-Szenario = 1415 (454 direkt, 961 Elektrolyse), (S. 75).

Schiff und Flug: Für die Versorgung mit E-Diesel bzw. E-Kerosin erhöht sich der Strombedarf um 400 TWh (S. 130/131).

Grafik 19: Maximaler HGÜ-Netzausbau bei der EL-Variante, wenn die Elektrolyse nicht bei Windparks, sondern vor allem an den alten Industriestandorten stattfindet.



Rohstoffe: Der Ersatz der fossilen Rohstoffe in der Chemie wird nicht behandelt.

H_2-Speicherbedarf: EL-Variante = 40 TWh, H_2-Variante = 70 TWh (S. 83/84).

Auslastung Elektrolyse: 3900–5300 Jahresstunden (S. 85).

Leistung Strom: EL-Variante = max. 136 GW, davon max. Residuallast 118 TWh; H_2-Variante = max. 74 GW, davon Residuallast 64 TWh.

> ***Anmerkung:*** *Hier wird die Nutzung der Wasserspeicher Skandinaviens über HGÜ-Leitungen nicht thematisiert (S. 90).*

Netzbau: In der EL-Variante wird der Norden durch ca. 90 GW HGÜ-Leitungen angeschlossen, vorrangig nach NRW und Süddeutschland. In der H_2-Variante werden nur 10 GW HGÜ gerechnet. Stattdessen werden erhebliche Wasserstoffleitungen erforderlich, die aber nur pauschal und gering berechnet werden, da alte Erdgasleitungen genutzt werden (S. 98–100).

Gesamtkosten des Systems: EL-Variante = 103 Mrd. €/a, H_2-Szenario = 90 Mrd. €/a.

> ***Anmerkung:*** *Die wichtigsten Faktoren für die höheren Kosten der EL-Variante sind 24 Mrd. €/a für die Röhrenspeicher für Wasserstoff beim EL-System, da dort die Speicherung dezentral angenommen wird, während beim H_2-System die Speicherung in den Kavernen erfolgt (warum diese Annahme gewählt wird, wird nicht begründet), 13 Mrd. €/a für Batterien (340 GWh) und zusätzlich 5 Mrd. €/a für Stromtransporte. Beim H_2-Szenario fallen nur 5 Mrd./a für die Speicherung und 3 Mrd. €/a für den Energietransport, aber 7 Mrd. €/a mehr für die Elektrolyse an. Außerdem muss für 11 Mrd. €/a mehr Strom produziert werden (S. 101–106).*

Tabelle 15: Endenergiebedarf der Sektoren (S. 174/175 in der Wasserstoffstudie NRW) ***(Alle Angaben in TWh/a)***

Sektor	Verbraucher	EL-Variante		H_2-Variante	
			Gesamt		Gesamt
Verkehr			228		276
	Personen Strom	95		31	
	Güter Strom	76		25	
	Personen H_2	31		123	
	Güter H_2	24		97	
Gebäude			544		545
	Umgebung	89		22	

	Sonstige	197		197	
	Wasserstoff	36		169	
	Wärmepumpe	51		6	
	Basisstrom	171		151	
Industrie			458		469
	Strom	315		214	
	Wasserstoff	143		255	
H_2-Bedarf nach Industriesektor			147		259
	Brennstoff	38		150	
	Methanol	7		7	
	Raffinerie	7		7	
	Ammoniak	15		15	
	Stahl	80		80	

Diskussion der Studie

Die Studie berechnet die Systemkosten für die Stromvariante höher als für die Wasserstoffvariante. Sie vergleicht diese leider nicht mit einem Mittelweg oder einem optimierten Szenario, in dem jeweils für jeden Sektor der optimale Mix gewählt wird. Es fällt auf, dass in Teil 6 „Interpretation der Ergebnisse“ zentrale Aussagen der Studie von den Autor*innen selbst infrage gestellt werden. Dies lässt vermuten, dass die Ergebnisse der Studie durch den Auftraggeber beeinflusst wurden.

Insbesondere werden einige Annahmen getroffen, die nicht einleuchten:

- Es fehlt eine Einbeziehung der skandinavischen Seen als Speichermedium. Norwegen baut systematisch HGÜ-Leitungen im Rahmen der Post-Oil-Strategie. Es kann also damit gerechnet werden, dass bis 2035 bis zu 20 GW Leitungen nach Skandinavien zur Verfügung stehen. Damit würde eine große Speicherkapazität mit hohem Wirkungsgrad (im Vergleich zu Wasserstoffspeichern) und geringen Kosten zur Verfügung stehen. Dies hätte zwei gravierende Auswirkungen:
    - Die Residuallast würde erheblich reduziert werden.

  - Es würden weniger Batterien für den Ausgleich von kurzfristigen Schwankungen beim Angebot und der Nachfrage von Strom benötigt.

- Es wird nicht diskutiert, wo die Erneuerbare Energie zur Produktion von Flugbenzin und Schiffsdiesel produziert werden soll. Da insbesondere bei der Wasserstoffstrategie die Potenziale in Deutschland nicht ausreichen, müssen diese wahrscheinlich importiert werden. In diesem Zusammenhang fällt auf, dass die Folgen der PtL-Produktion nur für 2030 betrachtet werden.
- Als wesentlicher Vorteil der Wasserstoffstrategie wird genannt, dass die Elektrolyseanlagen flexibel die Last am Stromnetz anpassen können. Dies ist aber auch in einem gemischten Szenario möglich.
- Die Importpreise für Wasserstoff sind vermutlich zu hoch angesetzt, da nicht berücksichtigt wird, dass die Erzeugung von erneuerbarem Strom in sonnen- und windreichen Regionen erheblich billiger sein kann als in Deutschland. In Teil 6 wird auf diesen Punkt von den Autor*innen selbst hingewiesen und gesagt, dass eine gemischte Strategie sich als die günstigste Alternative erweisen könnte (S. 164).
- Die Studie nimmt an, dass in der H_2-Variante der Wasserstoff vorrangig in Gaskavernen gespeichert wird, in der EL-Variante jedoch in Röhrenspeichern, die um eine Zehnerpotenz teurer sind. Diese Annahme wird nicht begründet. Im Teil 6 wird von den Autor*innen selbst darauf hingewiesen, dass eine Benutzung der Gaskavernen im EL-Szenario zu Kosteneinsparungen führen kann (S. 163).
- Im Verkehrssektor werden die Ergebnisse anderer Studien nicht berücksichtigt, nach denen die Kosten für eine Wasserstoffinfrastruktur und für Brennstoffzellenfahrzeuge erheblich höher liegen als die für Elektromobilität.

Anlage 7: Für die Klimapolitik relevante Institutionen in NRW

Das Folgende ist eine Auswahl von im öffentlichen Auftrag tätigen Institutionen in NRW, die in die Klimapolitik eingebunden werden sollten. Sie kann sicher noch erheblich verlängert werden:

- Dezernate 34 bei den Bezirksregierungen Arnsberg, Detmold, Düsseldorf, Köln und Münster: Ihre Aufgabe ist jeweils die EU-Förderung über den Europäischen Sozialfonds, den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung, die regionale Wirtschaftsförderung und das INTERREG-Programm
- VWE NRW– Verband der Wirtschaftsförderungs- und Entwicklungsgesellschaften in NRW
- 86 Sparkassen und deren 2 Dachverbände für Rheinland und Westfalen-Lippe
- NRW.Bank – Investitions- und Förderbank des Landes NRW
- IHK Beratungs- und Projektgesellschaft (IBP)mbH – Gegenstand der Gesellschaft ist die Durchführung von Projekten und Maßnahmen, die dem Ziel dienen, den Wirtschaftsförderungsauftrag der 16 IHK in NRW zu unterstützen
- Industrie und Handelskammer (IHK) NRW – die Landesarbeitsgemeinschaft der 16 Industrie- und Handelskammern in Nordrhein-Westfalen, die die IHKs im Dialog mit den landespolitischen Entscheidern vertritt.
- Clearingstelle Mittelstand – ein öffentliches Büro, dass in der IHK NRW angesiedelt ist, um die Interessen der mittelständischen Wirtschaft zu vertreten
- TBS NRW – Technologieberatungsstelle: Die TBS wird von den Gewerkschaften in NRW sowie dem Ministerium für Arbeit, Gesundheit und Soziales getragen und handelt im Rahmen eines Landesauftrages – Ziel ist die Gestaltung und Förderung eines arbeitsorientierten und sozialverträglichen Strukturwandels in NRW
- Der Westdeutsche Handwerkskammertag (WHKT) mit Sitz in Düsseldorf ist der Dachverband der sieben Handwerkskammern in Nordrhein-Westfalen
- Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen
- Straßen.NRW – Landesbetrieb – Straßenbauverwaltung
- Die Nahverkehrsverbände Verkehrsverbund Rhein-Ruhr, Verkehrsverbund Rhein-Sieg, Zweckverband Nahverkehr Westfalen-Lippe, Aachener Verkehrsverbund

- Energieagentur.NRW
- Effizienz-Agentur NRW
- Verbraucherzentrale NRW
- Zentrum für Innovation und Technik in Nordrhein-Westfalen (ZENIT)
- Geologischer Dienst NRW
- Stadtwerke
- andere Energieversorger
- Energiegenossenschaften (z.B. Bürgerwindparks. Wärmenetze in Bürgergenossenschaften)
- Volkshochschulen für den Bildungsauftrag und Partizipation
- Wohnungsbaugesellschaften

Anlage 8: Sozialwissenschaftlicher Exkurs – Akzeptanz und Bürgerbeteiligung

Viele der in dieser Studie beschriebenen Entwicklungen, insbesondere aber die Suffizienz-Maßnahmen, betreffen Menschen unmittelbar in ihrem Alltag und stellen sie vor große Veränderungen. Sie bedürfen deshalb eines klaren Auftrages durch die Gesellschaft.[628] Für ein Gelingen der Transformation ist es entscheidend, genug Akzeptanz und Rückhalt in der Bevölkerung zu haben. Mangelnde Beteiligung von Bürger*innen und mangelnde Berücksichtigung ihrer Bedenken, Werte und Wünsche für die konkrete Umsetzung gefährdet die wahrgenommene Legitimität von tiefgreifenden Transformationsentscheidungen[629] und erhöht das Risiko, dass sich als Gegenkraft populistische Bewegungen bilden.[630]

Sozialwissenschaftliche Studien geben Hinweise darauf, dass ein möglicher Weg, die Akzeptanz von kontroversen politischen Entscheidungen wie Klimaschutzmaßnahmen zu erhöhen, im Einsatz von Bürgerbeteiligung und direkt-demokratische Verfahren besteht.[631] Entscheidungen zum Klimaschutz betreffen eine Vielzahl von Akteur*innen, sollten wissenschaftliche Evidenz berücksichtigen und sind durch wechselseitige Abhängigkeiten sehr komplex. Vor diesem Hintergrund werden ergänzend zu parlamentarischen Entscheidungsprozessen Formen der Bürgerbeteiligung mit deliberativem Schwerpunkt, wie z.B. Bürgerräte[632] als Baustein bei der Herstellung eines klaren sozialen Mandats ausdrücklich empfohlen.[633] Derartige Formen der Bürgerbeteiligung haben sich in der Vergangenheit bereits als geeignet erwiesen um auch über den Kreis der direkt Beteiligten hinaus eine differenziertere Auseinandersetzung mit den behandelten Themen anzuregen.[634] So

[628] Siehe Howarth (2020/1)

[629] Siehe Kythreotis (2019/1)

[630] Siehe Sommer (2021/1), De Blasio (2018/1)

[631] Siehe Johnson (2019/1)

[632] In den Bürgerräten arbeiten zufällig ausgewählte, bevölkerungsrepräsentative Stichproben von Bürger*innen in einem wissenschaftlich informierten und neutral moderierten Prozess Handlungsempfehlungen für politische Organe und Entscheidungsträger aus. Dies kann sowohl auf Bundes-, als auch Landesebene oder auf kommunaler Ebene geschehen.

[633] Siehe Howarth (2020/1); Kythreotis (2019/1); Dietz (2008/1); Dryzek (2019/1)

[634] Siehe Warren (2015/1)

können Entscheidungen getroffen werden, die als vertrauenswürdig empfunden werden.[635] Es bietet sich also an eine konsequente Klimapolitik von Anfang an mit Verfahren wie Bürgerräten oder anderen Beteiligungsformaten zu begleiten.

Dabei ist es insbesondere wichtig, wirtschaftliche Sorgen und Bedenken von Bürger*innen zu adressieren. Obwohl das Zustimmungsniveau zu Maßnahmen wie z.B. der höheren Besteuerung von Flugtickets auch vor dem Hintergrund der Covid-19-Pandemie in Deutschland allgemein hoch bleibt, gilt es vor diesem Hintergrund besonders auf allgemeine Sorgen von Bürger*innen hinsichtlich der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, der persönlichen wirtschaftlichen Situation und der sozialen Gerechtigkeit einzugehen.[636] Gerade die Wahrnehmung von Gerechtigkeit spielt eine große Rolle für die Akzeptanz von politischen Maßnahmen.[637] Dies dürfte etwa in Verbindung mit CO_2-Preisen, Ausgleichsmaßnahmen und mit den durch notwendigen Preiserhöhungen verbundenen Einschränkungen eine wesentliche Rolle spielen. Auch in Bezug auf den kontrovers diskutierten Bau von Windenergieanlagen zeigt sich, dass diese eher akzeptiert werden, wenn Anwohner*innen finanziell und an den entsprechenden Entscheidungsprozessen beteiligt werden.[638]

[635] Siehe Warren (2015/1); Farrell (2019/1)

[636] Siehe Engler (2021/1)

[637] Siehe Dreyer (2013/1); Liebe (2017/1)

[638] Siehe Liebe (2017/1); Lienhoop (2018/1)

Anlage 9: Stromerzeugung und Verbrauch in NRW

Dies sind die Zahlen für die Grafik 9. Die Daten in Tabelle 16 und 17 stammen aus dem EnergieAtlas des LANUV und beziehen sich auf 2017.[639]

Tabelle 16: Brutto-Stromerzeugung[640]

Energieträger	Erzeugung (in TWh)
Braunkohle	75,9
Steinkohle	30,8
Öl	1,3
Gase	18,5
EE	19,8
Wind	9
PV	3,5
Biomasse	6,2
Sonstige EE	0,6
Wasserkraft	0,5
Sonstige	11
Gesamt	**157,3**

Tabelle 17: Stromverbrauch

Verbraucher	Verbrauch (in TWh)
Industrie	62,7
Verkehr	1,9
Haushalte	33,5
GHD	24,7
Gesamt	**122,8**
Netto-Export (Ausland) [641]	13,4
Eigenverbrauch Kraftwerke, Verluste, Sonstige	17

[639] Siehe LANUV (2020/4)

[640] Die Netto-Stromerzeugung betrug 140,0 TWh.

[641] Zum Stromaustausch mit anderen Bundesländern lagen keine Daten vor. Für die Grafik 9 im Text haben wir die Differenz zwischen Erzeugung und Verbrauch von 4,1 TWh angenommen.

Tabelle 18: Erneuerbarer Strom in NRW

Quelle	Installierte Leistung[642]	Anlagenzahl[643]
Wind	6 GW	3.800
PV	5,6 GW	263.740
Bio-masse[644]	0,9 GW	1.300
Wasser	0,5 GW, inkl. 0,3 GW Pumpspeicher	435

[642] Bundesnetzagentur (2021/1)

[643] Wind: Stand 2020 - siehe EnergieAgentur.NRW (2020/3); PV – Stand 2019, Biomasse, Wasser - Stand 2019 – alles siehe LEE NRW (2020/1)

[644] Enthält nicht die Müllverbrennung von biogenen Abfällen.

Anlage 10: Kohleausstieg und Arbeitsplätze

Die Einschätzungen dazu, wie viele Arbeitsplätze von einem Kohleausstieg direkt und indirekt betroffen wären, unterscheiden sich. Die Gewerkschaft IGBCE rechnet NRW-weit mit ungefähr 50.000 Stellen – davon 15.000 in der Kohleförderung und -verstromung und 35.000 bei Dienstleistern und Zulieferern.[645] Die Kohlekommission rechnet für direkt und indirekt Beschäftigte der Braunkohlebranche im Rheinischen Revier mit 27.000 Stellen.[646] Zum Vergleich: Durch die Einbrüche in der Windbranche verloren allein zwischen 2016 und 2017 25.000 Beschäftigte ihren Arbeitsplatz.[647] Es gibt aber regionale und branchenspezifische Unterschiede. Die fossile Energieerzeugung gehört zu den Verliererbranchen und das Rheinland zu den betroffenen Regionen. Hierzu schreiben die Autor*innen der einschlägigen FES-Studie[648]:

> *„Während der […] Braunkohlesektor an der Gesamtwirtschaft von NRW nur einen geringfügigen Anteil ausmacht, ist er regional im Rheinischen Revier stark konzentriert: […] Wenn die indirekt Beschäftigten und die „induzierte Beschäftigung" (durch Vorleistungsgüter, entsprechende industrienahe Dienstleistungen sowie den Konsum der Beschäftigten) einbezogen werden, beträgt der Anteil an den sozialversicherungspflichtig Beschäftigten 1,8 Prozent. […] Somit ist zu erwarten, dass der Beschluss zum Ausstieg weitergehende Auswirkungen im Bundesland haben wird. Allerdings liegt das Rheinische Revier in räumlicher Nähe zu den Ballungszentren Köln, Düsseldorf und Aachen, in denen sich auch viel verarbeitendes Gewerbe konzentriert, sodass der Verlust im Prinzip abgefedert werden kann."*

Auch ohne einen politisch forcierten Kohleausstieg würde es vermutlich durch wirtschaftliche und demographische Entwicklungen zu einem Rückgang der Arbeitsplätze im Bereich fossiler Energieerzeugung kommen. Das UBA berechnet einen Beschäftigungsrückgang um 30 Prozent in der Braunkohleindustrie bis 2030, ohne zusätzliche Klimaschutzanstrengungen, also auch ohne den Kohleausstieg. Zudem wird ein nennenswerter Teil der

[645] Siehe Welt (2018/1)

[646] Siehe BMWi (2019/1)

[647] Siehe UBA (2020/3)

[648] Siehe FES (2019/1)

Beschäftigten bis 2030 im Rentenalter bzw. kurz davor sein. 2015 waren bereits 50 Prozent der Beschäftigten über 50 Jahre alt und bis zum Jahr 2030 werden zwei Drittel der im Braunkohlebergbau Beschäftigten in Rente gehen.[649]

Über alle Branchen hinweg gehen Studien von positiven Beschäftigungseffekten durch den Klimaschutz aus.[650] Im Jahr 2018 waren 46.000 Beschäftigte in NRW im Bereich Erneuerbare Energien tätig.[651] Insbesondere langfristig werden durch den Ausbau von Erneuerbaren Energien und Wasserstoffwirtschaft die Beschäftigungsverluste in der Kohle weit überkompensiert.[652] Andere prognostizieren die Entstehung von 19.000 bis 54.000 Stellen bis 2030 und 87.000 bis 130.000 Stellen bis 2050, wobei durch den ambitionierten Ausbau in unserer Studie die Zahlen höher liegen dürften. Das Wuppertal Institut rechnet deutschlandweit mit der Schaffung von bis zu 800.000 Arbeitsplätzen durch den Aufbau der Wasserstoffwirtschaft.[653]

[649] Siehe UBA (2018/4)

[650] Siehe Prognos AG (2019/1); FES (2019/1)

[651] Siehe EnergieAgentur.NRW (2020/2)

[652] Siehe Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (2019/1)

[653] Siehe Wuppertal (2020/2)

Anlage 11: Potenziale der Erneuerbaren Energien

Die folgende Tabelle 19 stellt die Ergebnisse aus NRW-spezifischen Studien zum Ausbau von Erneuerbaren Energie zusammen:

Tabelle 19: Ausbaupotenziale der Erneuerbaren Energien in NRW

Studie	Betrifft	Ermitteltes Potenzial
Potenzialstudie Windenergie[654]	Wind	34 GW, 83 TWh[1]
Potenzialstudie Solarenergie[655]	PV	84,4 GW, 72 TWh
Potenzialstudie Biomasse-Energie[656]	Biomasse - Strom	8,4 TWh
Potenzialstudie Wasserkraft[657]	Wasser	213 MW, 0,6 TWh
LANUV-Studien Strom gesamt (maximal)	EE Strom	164 TWh
Solarkataster NRW[658]	PV	68 TWh auf Dächern
Öko-Institut/Prognos AG[659]	Wind + Freiflächen PV	4,8% der Landesfläche
Potenzialatlas Bioenergie[660]	Biomasse	33,5 TWh (Strom und Wärme)
Potenzialstudie Biomasse-Energie[661]	Biomasse - Wärme	23,5 TWh

[654] Siehe LANUV (2012/1)

[655] Siehe LANUV (2013/1)

[656] Siehe LANUV (2014/1)

[657] Siehe LANUV (2017/1)

[658] Siehe LANUV (2018/1)

[659] Siehe Öko-Institut (2019/1)

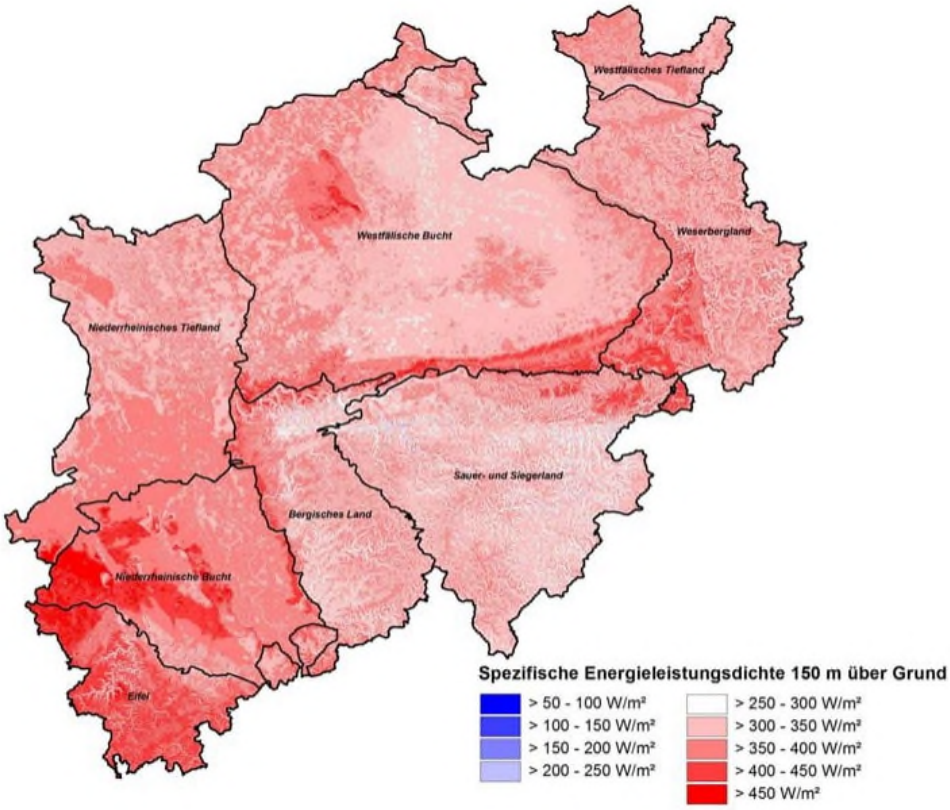
[660] Siehe AEE (2013/1)

[661] Siehe LANUV (2014/1)

Anlage 12: Windbedingungen

Die Auswertung der Studien ergibt folgende Ergebnisse für die Windbedingungen in NRW:

1) Je höher die Anlagen, desto besser sind die Windbedingungen[662]
2) Im deutschlandweiten Vergleich sind die Windbedingungen in NRW (in 150 m Höhe 7 m/s) schlechter als in den nördlichen Bundesländern (Schleswig-Holstein und Niedersachsen haben in 150 m z.B. durchschnittliche Windgeschwindigkeiten von 7,9 m/s), aber besser als in Süddeutschland (Bayern und Baden-Württemberg: 6 m/s).[663]
3) Es gibt regionale Unterschiede (Vgl. Abb. 21 aus der LANUV-Studie), wobei die Orte mit den besten Windbedingungen nicht immer erschließbar sind.



Grafik 20: Windenergiebedingungen in NRW

[662] Siehe LANUV (2012/1)

[663] Siehe NEWA (2020/1)

Anlage 13: Flächen für Windenergieanlagen

Flächenverfügbarkeit

Die Flächenverfügbarkeit, die in Studien ermittelt wird, hängt davon ab, welche Flächen für die Nutzung ausgeschlossen werden, z.B. Waldflächen, Naturschutzgebiete oder Flächen in der Nähe von Siedlungen. Je nach Studie kommen so sehr unterschiedliche Ergebnisse (zwischen 0,2 Prozent und 10,2 Prozent der Landesfläche) zu Stande. Aus rein technischer Sicht sind die vorhandenen Flächen ausreichend, um eine Vollversorgung Deutschlands mit Strom allein durch Windräder an Land sicherzustellen.[664] Wie viel Fläche genutzt werden kann ist letztlich eine Frage der politischen und gesellschaftlichen Priorisierung.

Die Potenzial-Studie des LANUV[665] stellt drei Szenarien mit der Bereitstellung von 2 Prozent, 3,3 Prozent und 4,1 Prozent der Landesfläche für Windenergie vor. Die größeren Potenziale ergeben sich durch eine zusätzliche Nutzung von Waldflächen. Im Leitszenario rechnet die Studie mit 3,3 Prozent der Fläche (ca. 1130 km^2).

Andere Studien kommen zu folgenden Potenzialschätzungen: Das Bundesverkehrsministerium geht für Nordrhein-Westfalen von einer restriktionsfrei nutzbaren Fläche von lediglich 0,2 Prozent aus. Hinzu kommt ein nicht quantifizierter Anteil an Flächen, die nur weichen Restriktionen unterliegen.[666] Eine Studie vom Öko-Institut und der Prognos-AG berechnet den Flächenanteil Nordrhein-Westfalens, der für Energieerzeugung (Wind und Freiflächen-Photovoltaik) zur Verfügung steht auf 4,8 Prozent, wobei 2,1 Prozent für Windenergie in Anspruch genommen werden.[667]

Auswirkung der Mindestabstandsregelungen für die Windenergieanlagen zu Siedlungen

Der wesentliche einschränkende Faktor ist der vorgeschriebene Mindestabstand zu Siedlungsflächen. Während nach Berechnungen des Umweltbundesamtes bei 600 Metern Mindestabstand im Durchschnitt in Deutschland noch 13,4 Prozent der Landesfläche zur

[664] Siehe UBA (2013/2)

[665] Siehe LANUV (2012/1)

[666] Siehe BMVI (2015/1)

[667] Siehe Öko-Institut (2019/1)

Verfügung stehen (ohne Beachtung der anderen Restriktionen), sind es bei 1.000 Metern nur noch 5,6 Prozent und bei 2.000 Metern 0,4 Prozent der Fläche (siehe Tabelle 20). Dies unterstreicht die Wichtigkeit der Abstandsregeln für das Nutzen der Windenergie.

Tabelle 20: Flächenverfügbarkeit für Windräder in Abhängigkeit von Abständen zu Siedlungsflächen[668]

Abstand zu Wohnbaufläche	600m	800m	1000m	1200m	2000m
Flächenpotenzial (Anteil der Landesfläche)	13,8%	9,1%	5,6%	3,4%	0,4%
Anteil am errechneten Flächenpotenzial	100%	66,3%	40,9%	24,8%	2,8%

Anmerkung: Diese Zahlen reduzieren sich in der Praxis durch weitere Restriktionen wie die der Flugsicherung, des Naturschutzes u.a. auf ein Drittel.

In Nordrhein-Westfalen galt bisher eine Empfehlung von 1.500 Metern Abstand. In Reaktion auf die neue Bundesgesetzgebung wird der Mindestabstand auf maximal 1.000 Meter reduziert, aber strenger ausgelegt, was zu einer weiteren Reduzierung führen kann.[669] Studien dazu, was dies für das Flächenpotenzial bedeutet, sind in Arbeit, erscheinen jedoch erst nach Fertigstellung dieser Studie.

Neben der reinen Meteranzahl, hat auch die genaue Definition, was als Siedlungsfläche gilt, zu der Abstand gehalten werden muss, großen Einfluss auf das Potenzial[670]. Navigant und Fraunhofer IEE haben die Auswirkungen unterschiedlicher 1.000-Meter-Regelungen auf Bundesebene untersucht. Dabei werden zwei Dinge deutlich:

- Je nachdem, wie 1.000-Meter-Regelungen im Detail formuliert sind, unterscheiden sich die Potenziale erheblich. Im Vergleich zu „1.000 m Abstand zu Wohnbauflächen im Innenbereich“ verringert die Regel „1.000 m Abstand zu Wohnbauflächen und Flächen gemischter Nutzung im Innenbereich sowie zu Wohngebäuden im Außenbereich“ das Potenzial um 30%.

[668] Siehe UBA (2013/2)

[669] Siehe Proplanta 2020

[670] Siehe Navigant (2019/1)

- Bundesweit stehen unter Annahme der momentanen Ausweisflächen mit einer 1.000-Meter-Abstandsregelung etwa 0,9 Prozent der Landesfläche zur Verfügung. Auf diesen sind im Idealfall 81 GW Windenergie installierbar. Dieses Potenzial liegt weit unter dem in Treibhausgasneutralitätsszenarien zu Grunde gelegten Zahlen.

Grundsätzlich könnte auf die Abstandsregelungen verzichtet werden, da Windenergieanlagen wie alle anderen Bauten sowieso dem Bundesemissionsschutzgesetz unterliegen.

Fazit: Um das vom LANUV angestrebte Ziel, in NRW wenigstens auf etwa 2 Prozent der Fläche, möglichst aber auf 3,3 Prozent der Fläche Windenergieanlagen, zu erreichen, sollten entweder die Abstandsregelungen abgeschafft, oder zumindest deutlich abgemildert werden. Die in Schleswig-Holstein praktizierte und bereits landesplanerisch umgesetzte Regelung (1.000 Meter Abstand zu geschlossenen Ortschaften, 500 Meter Abstand von Siedlungen außerhalb der geschlossenen Ortschaften) wäre dafür ein möglicher Kompromiss.

Anlage 14: Windenergieplanung

Quelle: Mündliche Aussagen von Umweltminister a.D. Johannes Remmel, MdL

Gesetze, Planungsverfahren und Zuständigkeiten

Die Windenergieplanung in NRW erfolgt im Rahmen und mit Hilfe folgender Gesetze, Regelungen und Planungsinstrumente:

- Baugesetzbuch (BauGB): Liefert mit der Privilegierung der Windenergie im Außenbereich die Grundlage für den Ausbau der Windenergie.
- Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG): Das BImSchG enthält die Lärmschutzregeln – auch für Windenergieanlagen.
- Landesplanungsgesetz (LPG): Das LPG ist die gesetzliche Grundlage für die Windenergieplanung.
- Landesentwicklungsplan (LEP): Der LEP hatte unter Rot-Grün das 2%-Ziel für die Windvorrangflächen in NRW gesetzt, das mit konkreten Hektar-Zielen je Regierungsbezirk konkretisiert wurde. Unter Schwarz-Gelb sind die konkreten Ziele gestrichen worden.
- Windenergieerlass (WEE): Der WEE gibt Hinweise und konkretisiert die Vorgaben für die Windenergieplanung der Kommunen und für die Genehmigungsbehörden.
- LANUV: Das LANUV unterstützt Gebietskörperschaften, Planer*innen und Unternehmen mit Potenzialstudien und Planungswerkzeugen wie dem Energieatlas.NRW.
- Regionalplan: Die Regierungsbezirke haben teilweise in ihren Regionalplänen Vorranggebiete für Windenergie ausgewiesen. Diese haben anders als in anderen Bundesländern keine ausschließende Wirkung.
- Flächennutzungsplan (FNP): Erst mit den über die kommunale Flächennutzungsplanung ausgewiesenen Konzentrationszonen können Kommunen die Windenergienutzung abschließend steuern und im Rest des Gemeindegebietes ausschließen. Dabei muss der Windenergie substanziell Raum gegeben werden, um der im BauGB definierten Privilegierung der Windenergie zu genügen. Eine reine Verhinderungsplanung, die keinen Windenergiezubau ermöglicht, ist nicht zulässig und wurde in der Vergangenheit mehrfach erfolgreich beklagt.
- Kreise und kreisfreie Städte sind die Genehmigungsbehörde. Die Genehmigung erfolgt maßgeblich nach Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG). Im Zuge der

BImSchG-Genehmigung werden auch andere Schutzgüter, wie der Natur- und Artenschutz geprüft. Es gibt keine pauschalen Mindestabstandsregelungen, sondern die notwendigen Abstände ergeben sich individuell je Projekt nach den Anforderungen des BImSchG.

Die Situation in den Regierungsbezirken

Regierungsbezirk Münster

Der Regierungsbezirk hat einen Regionalplan, der bereits mehr als zwei Prozent als Windvorrangflächen ausweist.

Regierungsbezirk Detmold

Im Regierungsbezirk Detmold liegen die windreichsten Gebiete von NRW. Die Kreise Paderborn und Höxter haben bereits überproportional Flächen ausgewiesen. Für die restlichen Gebiete gibt es noch keine ausreichende Flächenplanung für Windenergie. Ein neuer Regionalplan befindet sich in Aufstellung.

Regierungsbezirk Arnsberg

Der Regierungsbezirk Arnsberg ist sehr waldreich – mit teilweise bis zu 70 Prozent Waldanteil. Die anfänglichen Widerstände der Waldbesitzer*innen haben abgenommen. Es gibt aber große Widerstände in der Kommunalpolitik, die weniger dem Naturschutz oder dem Immissionsschutz geschuldet sind. Es gibt noch keine Regionalplanung.

Regierungsbezirk Köln

Der Bezirk umfasst die Eiffel mit hohem Anteil an Waldflächen und die dicht besiedelte Rheinebene. Das Ziel von 2 Prozent Windvorrangflächen ist noch nicht erreicht.

Regierungsbezirk Düsseldorf

Auch hier ist noch keine ausreichende Planung vorhanden. Schwierigkeit sind die zahlreichen Streusiedlungen.

Regelung im Kreis Steinfurt

Als vorbildlich gilt die Planung im Kreis Steinfurt. Dort wurde eine Windflächenplanung nach dem Ampelprinzip (rot-gelb-grün) mit Bürgerbeteiligung und Verbandsbeteiligung erstellt. Eine solche Planung könnte nach dem Gegenstromprinzip erstellt werden, indem ein

Flächenziel in Abstimmung mit der Regierung des Regierungsbezirks vereinbart wird, das dann vor Ort umgesetzt wird und anschließend wieder in die Regionalplanung eingeht.

Anlage 15: Effizienz und Nutzungsdauer von PV-Anlagen

In Tabelle 21 ist dargestellt, welche Annahmen unterschiedliche Studien für die Effizienz und mögliche jährliche Nutzungsdauer der PV-Anlagen in NRW sehen.

Tabelle 21: Vergleich der Parameter für Photovoltaik-Anlagen

Studie	Wirkungsgrad (Nennleistung pro m² PV)	Flächenverbrauch (Leistung pro m²)	Volllaststunden
Potenzialstudie NRW[671]	18% (180 W/m²)	72 W/m² (senkrechte Gebäudefläche) – 180 W/m² (optimale Südhänge)	850 h
Solarkataster NRW[672]	16,9% (169 W/m²)	?	?
Öko-Institut[673]	?	167 W/m² (Dach) 59 W/m² (Freifläche)	(für Deutschland): 880 h (Gebäude), 1000-1050 h (Freifläche)
BMVI[674]	?	142 W/m² (Dach)	?
Fraunhofer ISE[675]	17,5% (175 W/m² – Durchschnitt 2020) bis 22% (220 W/m² – Durchschnitt 2035 bei anhaltender Entwicklung)	71,4 W/m² (Freifläche)	(für Deutschland): 910 h (Dach), 980 h (Freifläche)

[671] Siehe LANUV (2013/1)

[672] Siehe LANUV (2018/2)

[673] Siehe Öko-Institut (2019/1)

[674] Siehe BMVI (2015/1)

[675] Siehe Fraunhofer ISE (2020/2)

Anlage 16: Flächenverfügbarkeit für PV-Anlagen

Hier sind Kennzahlen für die PV-Anlagen aus verschiedenen Studien zusammengestellt:

Tabelle 22: Kennzahlen der PV-Anlagen

Studie	Anmerkung	Leistung	Jahresproduktion
Fraunhofer[676]	Agri-PV – Deutschland	1700 GW	
LANUV 2013[677]	Dach – NRW – 259 km² Freifläche – NRW – 210 km²	46,7 GW 37,7 GW	38,7 TWh 33,5 TWh
Solarkataster[678]	Dachflächen – NRW – 482 km²	81,4 GW	68 TWh
Leibniz[679]	Fassaden – Deutschland – 12.000 km² doppelt soviel wie Dachflächen		
BMVI[680]	Dachfläche – 212 km²		
Öko-Institut & Prognos AG[681]	Dachflächen – ? Freiflächen – 614 km²	44 GW ?	

Nicht berücksichtigt sind:

- Doppelnutzung durch Agri-PV
- Doppelnutzung Wind und PV
- Schwimmende PV-Anlagen – zum Beispiel in alten Braunkohlegruben (470 km²) und Baggerseen[682]
- Fahrzeugintegrierte PV, sowie PV in Verkehrswegen[683]

[676] Siehe Fraunhofer ISE (2020/2)

[677] Siehe LANUV (2013/1)

[678] Siehe LANUV (2018/2)

[679] Siehe Leibniz (2021/1)

[680] Siehe BMVI (2015/1)

[681] Siehe Öko-Institut (2019/1)

[682] Siehe Energiezukunft (2020/1), Crom (2020/1)

[683] Siehe Fraunhofer ISE /2020/2)

Anlage 17: Bioenergiepotenzial

Die folgende Tabelle 23 enthält die Ergebnisse der Studien des LANUV und der Agentur für Erneuerbare Energien sowie die in dieser Studie gewählten Ansätze. Das BMVI berechnet das Potenzial von Bio-Reststoffen für NRW auf 22,3 TWh.[684] Drei ältere Studien kommen zu einem Potenzial von 7,5 TWh, 10 TWh und 12,5 TWh[685] für die Stromerzeugung durch

Tabelle 23: Bioenergie-Potenziale in NRW

Herkunft der Biomasse	**Potenzial nach Agentur EE[686]** in TWh/a	**Potenzial nach LANUV[687]** in TWh/a	**Unser Potenzial-Ansatz** in TWh/a
Landwirtschaft	19,2	13,96 – 25,21	5
Stroh	2,7		2,7
Tierische Exkremente	4,2		2,1
Energiepflanzen	12,3		0
Forstwirtschaft	7,9	3,41 – 5,75	50% = 4 TWh/a
Abfallwirtschaft	5 TWh/a	9,2 – 10,81	5
Industrierestholz	0,08		
Altholz	4,9		
Bio- und Grünabfall	1,4		1
Gesamt (Strom + Wärme)	**33,5**	**26,57 – 41,77**	**15**

Biomasse. Die Begründung für unseren Ansatz, insbesondere für die komplette Einstellung des Anbaus von Energiepflanzen, findet sich im Teil 3 im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« im Abschnitt »Bioenergie«. Nicht enthalten in Tabelle 23 ist der Einsatz von

[684] Siehe BMVI (2015/1)

[685] Siehe Wuppertal (2012/1)

[686] Siehe AEE (2013/1)

[687] Siehe LANUV (2014/1)

Biomasse als Rohstoff für die Industrie. Wir rechnen mit einem Ausbau der Bio-Rohstoffe als Ersatz für fossile Rohstoffe und daraus produzierten Zwischenprodukten mit einem Energieäquivalent von 5 TWh/a (siehe dazu in Teil 3 im Kapitel »Industrie« sowie im »Energieflussdiagramm«).

Anlage 18: Stromtrassen[688]

Die folgenden Berechnungen wurden von den Autor*innen dieser Studie selbst erstellt. Es lagen keine Quellen vor, die eine detaillierte Berechnung für den Leitungsbedarf vorgenommen haben. Der Leitungsbedarf für NRW sieht folgendermaßen aus (siehe dazu die Energiebedarfsrechnung im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« und im »Energieflussdiagramm«):

Tabelle 24: Eckdaten zur Berechnung der Stromtrassenkapazität

Jährlicher Gesamtstrombedarf NRW	272 TWh
davon Eigenstromerzeugung in NRW (ohne Reservekraftwerke)	152 TWh
Differenz (muss theoretisch importiert werden aus Niedersachsen, Schleswig-Holstein und den Offshore-Anlagen in der Nordsee)	120 TWh
durchschnittlich benötigte Leistung (272 TWh/8760 h)	31 GW
durchschnittlicher Import (120 TWh/8760 h)	13,6 GW
Schwankungen der benötigten Leistung (geschätzt)[689]	20 - 42 GW
minimale sichere Leistung (geschätzt)[690]	10 GW
maximaler Importbedarf (42 GW – 10 GW – 4 GW)[691]	28 GW

Aufgrund dieser Kalkulation ergibt sich eine benötigte Importkapazität von 28 GW.[692] Im Regelfall wird dieser Import aus Niedersachsen erfolgen – zum Teil durchgeleitet von den

[688] Siehe VDE (2021/1)

[689] Erfahrungsgemäß liegt das Maximum etwa beim Doppelten des Minimums. Durch Lastmanagement kann diese Schwankungsbreite in Zukunft reduziert werden, sodass eine Rechnung mit einem Maximum von 42 GW auf der sicheren Seite liegen dürfte.

[690] Ca. 5 GW maximale Leistung der Wasserkraftwerke und der BHKWs. Dazu kommt ein Ausgleich über das internationale HGÜ-Netz (2 GW) und 10% minimale Eigenleistung (Wind und Sonne – 3 GW).

[691] Wir rechnen, dass 10% (2 GW) verlagert werden durch Smart-Metering und 2 GW vertraglich abgeschaltet werden können.

[692] Siehe auch zum Vergleich die Wasserstoffstudie – Anlage 6

Grafik 21: Existierende und geplante Höchstspannungsstromtrassen

Die HGÜ-Trassen wurden zum Teil von uns in der Karte ergänzt.[693]

Offshore-Windparks in der Nordsee und aus Schleswig-Holstein. Mit dieser Leitungskapazität kann der Strombedarf von NRW stets sicher gestellt werden außer im Fall einer kalten Dunkelflaute, wenn weder Niedersachsen noch Schleswig-Holstein noch die Offshore-Windparks Strom ausreichend Strom liefern können. In diesem Fall wird der deutsche Strombedarf gedeckt, indem die Reservekraftwerke (80 GW in Deutschland, davon 18 GW in NRW) hochgefahren werden und weitere 20 bis 30 GW über HGÜ-Leitungen aus Skandinavien geliefert werden.

Berechnung der benötigten Stromtrassen

Zurzeit existieren ca. 5 bis 6 parallele Wechselstrom-Höchstspannungstrassen (380 KV) mit jeweils 1,4 GW Leistung für den Nord-Süd-Stromtransfer – also insgesamt gut 8 GW. Davon führen drei von Niedersachsen nach NRW. Weitere 5 Nord-Süd-Trassen sind in Planung, davon weitere 3 Leitungen nach NRW, sodass man 2030 insgesamt mit einer Kapazität von 14 GW Wechselstrom rechnen kann. Davon führen 8 GW nach NRW. Außerdem sind vier Nord-Südverbindungen mit HGÜ-Trassen (Hochspannungsgleichstromübertragung) mit je 2 GW Leitung in Planung, sodass man 2030 mit zusätzlichen 8 GW rechnen kann. Davon führen 4 GW nach NRW. Insgesamt wären das ca. 22 GW, davon 12 GW von Norden nach NRW.

Um einen Nord-Südtransfer nach NRW von 28 GW bereitstellen zu können, müssten dann noch weitere 16 GW HGÜ-Trassen gebaut werden. Das entspräche gut 3 Leitungen á 5 GW oder 8 Leitungen á 2 GW. Wenn zusätzlich Strom über die geplante HGÜ-Leitung nach Baden-Württemberg geleitet werden soll, dann müsste diese Kapazität sogar noch erhöht werden. Außerdem ist ein Stromaustausch mit Belgien und den Niederlanden möglich. Dies ersetzt aber keine Leitungskapazität nach Niedersachsen, da im Falle einer Dunkelflaute in NRW nicht sicher ist, dass Belgien oder die Niederlande dann Strom liefern können.

Zum Vergleich: Die aktuellen Netzplanungen rechnen mit entsprechenden Größenordnungen – allerdings noch für eine geringere Stromproduktion, nämlich dem Bau und Ausbau von mehr als 7.500 Kilometer im Übertragungsnetz und mit zusätzlichen Leitungen für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) sowie mit dem Bau und Ausbau

[693] Siehe FNN (2020/1), Grass (2015/1) – die Höchstspannungstrassen liegen teilweise noch nicht fest.

von mehr als 130.000 Kilometer im Verteilnetz insbesondere für Elektromobilität und PV-Einspeisung in den Wohngebieten, aber auch für die zunehmende Stromversorgung der Industrie aus den erneuerbaren Kraftwerken im öffentlichen Netz.[694]

Optimierungsmöglichkeiten

Die maximale erforderliche Leitungskapazität von NRW nach Norden von 28 TWh wird aber nicht unbedingt benötigt. Es ist auch möglich, die Kapazität deutlich geringer anzusetzen. Dann müssen die Reserve-Kraftwerke umso häufiger angefahren werden. Zusätzliche Kapazitäten der Reservekraftwerke sind dafür nicht erforderlich, wohl aber ggf. zusätzliche Speicher. Letztlich ist dies ein Optimierungsproblem:

Je geringer die Leitungskapazität ausgebaut wird, desto häufiger müssen die Reservekraftwerke gestartet werden. Dann muss mehr grüner Wasserstoff oder grünes Methan in den Gaskavernen vorgehalten werden. Dafür sind dann mehr Gaskavernen als Gasspeicher erforderlich. Das bedeutet natürlich auch, dass mehr Kapazitäten für die Elektrolyse erforderlich sind und/oder mehr Wasserstoffimporte. Es ist auch möglich, die Leitungskapazität nach Norwegen zu erhöhen. Das reduziert den Bedarf an Gasspeichern in NRW, aber nicht die Leitungskapazität nach NRW, da dann der Strom ebenfalls von Norden kommt. Im Moment sollten Erneuerbare-Energien-Anlagen, Speicher und Netze ausgebaut werden. Bis etwa 2030 sind das No-Regret-Maßnahmen.

[694] Siehe DENA (2017/1), BMWi (2020/1)

Anlage 19: Reservekraftwerke

Die Reservekraftwerke sind die Notstromaggregate der zukünftigen Stromversorgung. Sie werden je nach Szenario und Ausbau des HGÜ-Netzes nur wenige Tage im Jahr benötigt. Daher sollten sie günstig sein, aber es kommt nicht auf ihre Effizienz an.

Die erforderliche Leistung der Turbinen hängt von mehreren Faktoren ab: Von der minimal bereitgestellten Leistung durch Wind und Sonne im Winter, der Leistung der Fernwärmekraftwerke und Biomassekraftwerke und schließlich der Leistung, die über das Gleichstromnetz aus den Wasserkraftwerken und anderen europäischen Ländern bereitgestellt werden kann.

Die Prognos AG berechnet einen Bedarf von ca. 70 GW.[695] Mit diesen sollen ca. 48 TWh Strom pro Jahr erzeugt werden. Allerdings berücksichtigt diese Studie nicht die Möglichkeit, Strom in den Stauseen in Norwegen zu speichern. Im Handbuch Klimaschutz wurden dafür 30 TWh/a angesetzt.[696] Diese wurden deshalb von den ca. 50 TWh/a abgezogen, die als erforderliche Speicherkapazität angesetzt wurden. Es verbleibt dann eine Menge von 20 TWh Strom pro Jahr, die durch die Gaskraftwerke in Zeiten einer Dunkelflaute produziert werden müssen.[697]

Abweichend davon rechnet das Forschungszentrum Jülich nur mit einer erforderlichen Notstromleistung von 46 GW.[698] Rechnet man aber, anders als in der Studie, mit einem Strombedarf von 1.000 TWh/a insgesamt, dann dürfte die erforderliche Reserveleistung eher bei 90 GW liegen. Allerdings sind dabei die Wasserkraftwerke aus Norwegen nicht berücksichtigt. Daher würden 75–80 GW aus den Gaskraftwerken reichen. Die Wasserstoffstudie rechnet mit einem Bedarf an H_2-Rückverstromungskapazitäten von bis zu 90 GW.

Unter Berücksichtigung dieser Studien rechnen wir großzügig mit einer erforderlichen Maximalleistung für die Notstromaggregate (Reservekraftwerke) von 80 GW.

---

[695] Siehe BDI (2018/1)

[696] Siehe MD (2020/1)

[697] Vergleiche auch Huneke (2017/1)

[698] Siehe IEK (2019/1)

Anlage 20: Energieverbrauch der Industrie 2040

Die folgende Tabelle 25 basiert auf folgenden Studien:

a. *„CO_2-neutral bis 2035“ (Wuppertal (2020/1) im Auftrag von Fridays for Future (FFF); die Spalte „Mittel Wuppertal/FFF“ enthält Mittelwerte über die Werte des Studienvergleichs, die in dieser Studie vorgenommen wird.)*
b. *„Klimaneutrale Industrie“ (Agora Energiewende (2020/4))*
c. *„Klimaneutrales Deutschland“ (Agora Energiewende (2020/5)) – erstellt von Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal Institut*
d. *„Der Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland“ (UBA (2019/7))*
e. *„Wege für die Energiewende“ (IEK (2019/1) – Jülich)*
f. *„Klimapfade für Deutschland“ (BDI (2018/1))*
g. *„Roadmap Chemie“ (Dechema (2019/1))*
h. *„Wasserstoffstudie NRW“ (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (2019/1))*
i. *„Handbuch Klimaschutz“ (MD (2020/1))*

Die hier vorgenommene Schätzung des Primärenergiebedarfs für Deutschland im Jahre 2040 von insgesamt 2.000 TWh liegt deutlich niedriger als der im „Handbuch Klimaschutz“ angenommene Bedarf von 2.200 TWh für 2038. Die Differenz ist noch größer, wenn man berücksichtigt, dass die hier vorgenommenen Schätzungen auch die Produktion von Rohstoffen für die chemische Industrie beinhalten. Im „Handbuch Klimaschutz“ hatten wir noch angenommen, dass die Chemieindustrie zunächst 1:1 durch den Ersatz der fossilen Brennstoffe durch synthetische Brennstoffe umgebaut wird und erst nach 2040 schrittweise ein Ersatz der fossilen Rohstoffe durch synthetische Rohstoffe erfolgt. Die Schätzungen der Wissenschaftler liegen jedoch weiterhin erheblich auseinander.[699]

[699] Siehe dazu im Teil 3 im Kapitel »Industrie«

Entscheidend für die in dieser Studie veränderten Zahlen sind die drei neuen Studien a) bis c), die erst nach der Fertigstellung des „Handbuch Klimaschutz“ veröffentlicht wurden. Diese Studien gehen davon aus, dass erstens beim Umbau der Chemieindustrie bereits neue Produktionsverfahren auf Basis synthetischer Rohstoffe eingesetzt werden, die in erheblichen Umfang Energie einsparen können. Zweitens wird eine Erhöhung der Recyclingquote von Kunststoff von heute 16 Prozent auf 50 Prozent angenommen, sodass insgesamt 85 TWh/a PtL durch recycelte Kunststoffe ersetzt werden können.

Tabelle 25: Energiebedarf in Deutschland
(Alle Angaben in TWh/a)

	Wupper-tal/(2020/1)/FFF	*Mittel Wupper-tal/FFF*	*Agora (2020/5)*	*UBA (2019/7) Green Ee*	*IEK (2019/1)*	*BDI (2018/1)*	*MD (2020/1)*	*Dechema (2019/1)*	*Bölkow (2019/1) EL*	*Benutzte Werte für Industrie*
Primär mit Ausland		1.800	2.000				2.200			2.000
davon Strom							1.900			
Primär Inland			1.826		1.600	1.870	1.400			1.400
davon Rohstoffe		teilweise	fehlt		?	fehlt	fehlt			
davon +Schiff		teilweise	fehlt		fehlt		140		fehlt	140
Strom nur Inland			1.474		1.000		1.200			1.200
Strom für Ptx-Import		70%	286		650		800			600
Endenergie		1.300		1.608					1.140	1.370
ohne Rohstoffe				1.320			1790		?	
Strom		550		669			980		708	570
Wärme				279			210		197	190

PtG/Bio		200		169			340			360
PtL/Bio		470		202						
H_2		100		288			160		233 NRW: 72	250
Industrie gesamt	700			754	720					750
ohne Rohstoffe				466		580	750		458	
Strom	250		304	281	350	197	430		315	300
Wärme				16		41	70			50
PtG/Bio/ Recycling	100			169		313	140			160
PtL/Bio/fossil					260					
H_2	350		70	288	260		110		143	200
Abfall					30	35				30
Stahl	125						200			170
H_2	74						50		80	70
Strom	27					150	150			100
Biomasse/fossil	20									
Chemie	350		283				150	840		200 + (85)*
H_2	200		42				60			40
Strom	100		68				90	685		70
Bio/PtL/foss. Rest	50		88					112		90

Recycling-Kunst.										(85)*
Restliche Industrie										340
H_2										90
Strom										130
Bio/Ptx/Bio										70
Wärme										50

** Rohstoffe aus Kunststoff-Recycling – ihr Energiewert wird in der Energiebilanz nicht mitgezählt, da die Energie schon bei der Primärproduktion eingerechnet wurde.*

Anlage 21: Energiebedarf der Industrie in NRW 2040

Der Anteil des Energiebedarfs der Industrien in NRW von Deutschland[700] wird geschätzt auf: Stahl: 50% (der Anteil der Stahlproduktion insgesamt liegt nur bei 40%, aber der Anteil der Primärproduktion aus Eisenerz liegt in NRW deutlich höher), Chemie: 30%, restliche Industrien: 20%

Berechnung:

- Stahl: 70 TWh H_2 + 100 TWh Strom
  => für NRW (50%) sind das: 35 TWh H_2 und 50 TWh Strom
- Chemie: 40 TWh H_2 + 70 TWh Strom + 90 TWh PtL/ Bio + 85 TWh Kunststoffrecycling
  => für NRW (30%) sind das: 13 TWh H_2 + 20 TWh Strom + 27 TWh PtL/Bio + 26 TWh Kunststoffrecycling
- Rest: 90 TWh H_2 + 130 TWh Strom + 70 TWh PtL/PtG/Bio + 50 TWh Wärme
  => für NRW (20%) sind das: 19 TWh H_2 + 26 TWh Strom + 14 TWh sonstige Brennstoffe + 9 TWh Wärme

Damit ergibt sich insgesamt für NRW:

- ca. 70 TWh Wasserstoff
- ca. 100 TWh Strom
- ca. 40 TWh PtL/Bio
- ca. 9 TWh Wärme direkt

zusammen: ca. 220 TWh Endenergie

dazu kommt Kunststoffrecycling in NRW mit dem Energiegehalt von 26 TWh/a.

[700] Siehe Anlage 20

Anlage 22: Eckdaten für die Umstellung der Grundstoffindustrie

Quellen für THG: LANUV (2020/1), für Energie und Struktur: Agora Energiewende (2020/4), für NRW: RWTH Aachen: Klimaneutrale Grundstoffindustrie NRW[701], Zahlen in Klammern sind errechnet. Die Angaben wurden aufgrund der Differenzen zwischen den Quellen gerundet.

Tabelle 26: Eckdaten für die Grundstoffindustrie

	Eisen + Stahl	Metall sonstige	Chemieindustrie	Davon Grundstoffchemie	Nichtmetallische Mineralien	davon Zement	Grundstoffe sonstige	Industrie sonstige	Gesamt
Treibhausgase ($MtCO_{2eq}$/a)	60	7	70	40	34	20	25	25	220
davon NRW	22	2	16	13	11	7	9	*9*	70
Anteil NRW	39%	26%	22%	30%	32%	30%	36%	36%	31%
Energie (TWh/a)	160	36		150	60	30	94		740
Reinvestitionsbedarf bis 2030	53%			59%		30%			
Anlagennutzungsdauer (Jahre)	50			60		60			

[701] Siehe RWTH Aachen (2020/1)

Anlage 23: Industriekraftwerke in NRW

Quelle: Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur – eigene Berechnung[702]

Tabelle 27: Kraftwerke in NRW

	Leistung	Anteil
Braunkohle	13,4 GW	24 %
Steinkohle	17 GW	31 %
Erdgas	8 GW	15 %
Abfall	0,5 GW	1 %
Biomasse	0,9 GW	2 %
Wind	5 GW	9 %
PV	5,7 GW	10 %
Sonstige	4,5 GW	8 %
Gesamt	**55 GW**	**100 %**

Tabelle 28: Industriekraftwerke in NRW

	Anzahl	Leistung	Anteil
Chemie	31	1,56 GW	33%
Eisen und Stahl	9	2,894 GW	61 %
Landwirtschaft/Ernährung	6	0,99 GW	2 %
Papier/Pappe	6	0,89 GW	2 %
Holz/Möbel/Fenster u.a.	3	0,44 GW	1 %
Sonstiges (Druck/Auto/Kältetechnik)	3	0,57 GW	1 %
Gesamt	**58**	**4,743 GW**	**100%**

[702] Siehe Bundesnetzagentur (2021/1)

Anlage 24: Stahlindustrie

In Deutschland arbeiten ca. 85.000 Menschen in Stahlunternehmen.[703] Zu den größten Unternehmen und wichtigsten Standorten gehören:

Tabelle 29: Liste der größten Stahlproduzenten in Deutschland 2016[704]

Unternehmen	Hauptstandorte	Stahlproduktion in Mio. t
ThyssenKrupp mit Hüttenwerke Krupp Mannesmann	Duisburg, Dortmund	12,1
ArcelorMittal	Hamburg, Bremen, Duisburg, Eisenhüttenstadt	7,8
Salzgitter	Salzgitter, Peine	7,0
Saarstahl	Völklingen	2,5
Badische Stahlwerke	Kehl	2,4
Dillinger Hütte	Dillingen	2,2
Riva	Brandenburg, Henningsdorf	1,8
Georgsmarienhütte	Georgsmarienhütte, Bous, Grödlitz	1,3
Lech-Stahlwerke	Augsburg	1,2
ESF Stahlwerke Feralpi	Riesa	1,0
Deutsche Edelstahlwerke	Witten, Siegen	0,8
Stahlwerke Thüringen	Unterwellental	0,8
Benteler	Lingen	0,6
BGH Freital	Freital, Siegen	0,1

[703] Siehe Stahl (2020/1)

[704] Siehe Wikipedia (2020/3)

Anlage 25: Aluminiumindustrie

Die Zahlen stammen aus unterschiedlichen Quellen[705] und unterschiedlichen Jahren und sind daher nicht alle vergleichbar. Seit 2014 hat sich Produktion verdoppelt.

Tabelle 30: Alu-Hütten in Deutschland 2007[706]

Ort	Firma	Kapazität (Mt/a)
Hamburg	TRIMET	0,130
Essen	TRIMET	0,161
Neuss/Norf	Rheinwerk (Norsk Hydro)	0,226
Voerde	TRIMET	0,092
Gesamt		0,609

Verbrauch 2018:[707] 3,07 Mt, davon Verkehr 1,483 Mt, Bauwesen 0,455 Mt, Verpackung 0,307 Mt, Elektrotechnik 0,218 Mt, Maschinenbau 0,207 Mt, Eisen- + Stahlindustrie 0,169 Mt, Haushaltswaren 0,114 Mt, Sonstiges 0,114 Mt

Nettoimport: 2,14 Mt, davon 2,6 Mt Import, 0,46 Mt Export

Produktion 2019: 1,0 Mt, davon 0,51 Mt primär (aus Bauxit)
0,49 Mt sekundär (aus recyceltem Aluminium)

Stromverbrauch: 15 MW pro Tonne für Primärproduktion
0,75 MW pro Tonne für Sekundärproduktion (Recycling)

Stromverbrauch in Deutschland: 7,6 TWh/a

Davon in NRW: 6 TWh/a

Anteil NRW: 79% der Primärproduktion

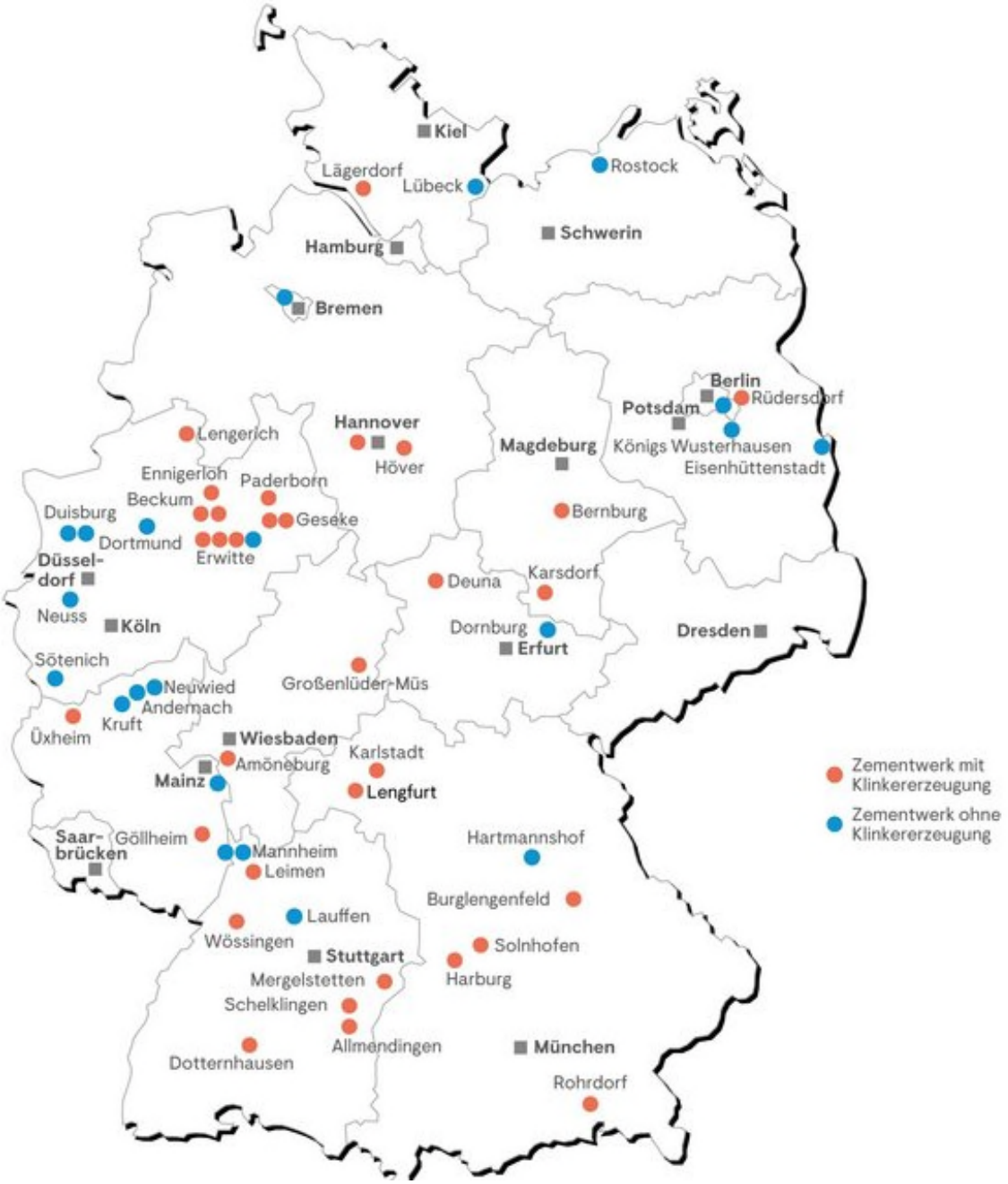
[705] Siehe u.a. GDA (2021/1), Döschner (2014/1), Bürger für Technik (2009/1)

[706] Siehe Wikipedia (2020/2)

[707] Siehe Statista (2021/1)

Anlage 26: Zementindustrie

In Deutschland gibt es 54 Zementwerke, davon 33 mit Klinkerproduktion. Von diesen liegen 16 in NRW, davon 10 mit Klinkerproduktion. Die THG-Emissionen lagen 2019 bei 20 $MtCO_{2eq}$, die in NRW dürften dann anteilig bei 6 $MtCO_{2eq}$ gelegen haben.



Grafik 22: Standorte der Zementindustrie

Anlage 27: Berechnung der Sanierungsquote der Häuser

Wir gehen davon aus, dass ca. 10% der derzeitigen Häuser auf Grund von Denkmalschutz und anderen Faktoren nur begrenzt saniert werden können, aufgrund des Neubaus sind dies bis 2045 ca. 9%.[708] Wenn ca. 17.000 Wohngebäude pro Jahr gebaut werden,[709] machen diese Neubauten bis 2045 ca. 10,3% der Gebäude aus. Weitere 6,8% der Gebäude im Jahr 2045 sind bereits heute auf einem guten Sanierungsstand. Weiterhin gehen wir davon aus, dass wie bisher ca. 2.000 Wohngebäude im Jahr abgerissen oder anderweitig genutzt werden.[710] Damit bleiben 73,5% Gebäude, die auf Niedrigenergiestandard saniert werden müssen.

In der Literatur werden je nach Zieljahr und Reduzierungsziel der THG-Emissionen Sanierungsquoten zwischen ca. 1,5% bis 4% diskutiert, wobei die meisten Studien unter 3% bleiben.[711] Wir rechnen daher mit einer Sanierungsquote von 3%, die wir für realistisch halten. 2040 können etwa 75% saniert sein. Dann könnte die Sanierung bis 2045 mit ca. 91% abgeschlossen werden.

---

[708] Wir orientieren uns dabei an den Zahlen von UBA (2014/1). Ergänzend muss gesagt werden, dass mittlerweile auch in denkmalgeschützter Bausubstanz relevante energetische Sanierungen vorgenommen werden können (siehe Umweltamt Wiesbaden (2015/1); Grunewald (2010/1)). Wir rechnen damit, dass diese Gebäude bis 2050 im Schnitt auf 150 kwh/m^2*a Endenergie für Raumwärme saniert werden, d.h. nicht alle dieser Gebäude werden saniert, aber diejenigen, die saniert werden erreichen einen besseren Standard.

[709] Siehe IT.NRW (2020/3)

[710] Durchschnitt der Jahre 2015 – 2019: 1988 (IT.NRW (2016/1), IT.NRW (2017/1), IT.NRW (2018/1), IT.NRW (2019/2), IT.NRW (2020/3)

[711] Siehe Öko-Institut (2016/2). Die Studie im Auftrag von Fridays For Future sieht 4% vor, was technisch möglich, aber auf Grund der mangelnden Arbeitskräfte wahrscheinlich nicht zu erreichen ist (Wuppertal (2020/1)).

Anlage 28: Wohngebäude nach Baujahr[712]

In der Tabelle 31 wird dargestellt, wie hoch der durchschnittliche Energiebedarf für die Häuser der jeweiligen Bauperioden ist. Die schlechteste Wärmedämmung haben die Häuser nach dem 2. Weltkrieg, als so schnell und billig wie möglich Wohnraum geschaffen werden musste. Die Häuser ab dem Jahr 2000 müssen nicht gedämmt werden. Die Häuser ab 1990 können in der Regel ohne vorherige Wärmesanierung mit neuen Heizsystemen ausgestattet werden.

Tabelle 31: Wohngebäudebestand in Deutschland und NRW und Energiebedarf

	vor 1919	1919 - 1949	1950 - 1978	1979 - 1989	1990 - 2000	2001 - 2008	2009 - 2019	Gesamt
Anzahl NRW	410.000	406.000	1.651.000	496.000	458.000	269.000	161.000	3,9 Mio
Anteil NRW	11%	11%	43%	13%	12%	7%	4%	100%
Anteil BRD	13%	12%	38%	10%	13%	10%	4%	100%
Endenergiebedarf kWh/m²*a	169	187	208	170	115	71	50	

[712] Eigene Berechnungen anhand der Wohnungsgebäude-Fortschreibungen und des Mikrozensus 2011 (Siehe Zensus (2014/1); IT.NRW (2012/1) bis IT.NRW (2018/1); (IT.NRW 2019/2); IT.NRW (2020/3)). Weiterhin: MD (2020/2) sowie Henger (2017/1) und BMWi (2014/1) für den Energiebedarf

Anlage 29: Entwicklung des Wohngebäude-Bestandes

Tabelle 32: Entwicklung der Wohngebäude nach Alter und Zustand

	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Wohngebäude	3,92 Mio.	3,99 Mio.	4,07 Mio.	4,14 Mio.	4,22 Mio.	4,29 Mio.	4,37 Mio.
Wohnfläche Mio. m²	825,1	840,9	856,7	872,6	888,4	904,2	920,0
Neubau 2014 - 2019, Endenergiebedarf 45 kWh/m²*a (inkl. Warmwasser von 15 kWh/m²a)	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Neubau 2020-2025 (Mindeststand. KFW 55)	17.000	102.000	102.000	102.000	102.000	102.000	102.000
Neubauten ab 2025 (Mindeststt. Passivhaus)	0	0	85.000	170.000	255.000	340.000	425.000
Denkmalgeschützte und kaum sanierb. Gebäude	390.120	390.120	390.120	390.120	390.120	390.120	390.120
2016 - 2020 sanierte Gebäude, Wärme 75 kWh/m²a (inkl. 15 kWh/m²a Warmwasser)	195.000	195.000	195.000	195.000	195.000	195.000	185.000
2020 - 2030 sanierte Gebäude bei 3,1 % Quote	119.573	717.441	1,3 Mio.	1,3 Mio.	1,3 Mio.	1,3 Mio.	1,3 Mio.
nach 2030 sanierte Gebäude bei 3,1 % Quote	0	0	0	0,6 Mio.	1,2 Mio.	1,85 Mio.	1,85 Mio.
sonstige unsanierte Gebäude	3,1 Mio.	2,5 Mio.	1,9 Mio.	1,3 Mio.	0,6 Mio.	0	0
Durchschnittlicher **Endenergiebedarf Raumwärme** (kWh/m²)	136	115	95	74	53	33	32
Endenergiebedarf Raumwärme (TWh/a)	**112,6**	**96,8**	**81,0**	**64,4**	**47,0**	**29,4**	**29,1**
Endenergiebedarf Raumwärme und Warmwasser (TWh/a)	**124,9**	**109,4**	**93,9**	**77,5**	**60,4**	**43,0**	**42,9**

Anmerkung: Das Modell ist eine grobe Schätzung und basiert auf zahlreichen vereinfachenden Annahmen. Das Modell dient nicht der genauen Prognose, sondern dazu, die grundsätzliche Plausibilität dieses Weges darzustellen.

Nach unserer Modellrechnung macht die Fernwärme im Bereich von Wohngebäuden und GHD 32% aus (siehe Anlage 30). 68 Prozent er Wärme wird dezentral vor Ort erzeugt bzw. gewonnen. Von der en Versorgung sind 77Prozent Wärmepumpen, 15rozent Solarthermie und 8 Prozent sind Verbrennungsheizungen, die über Holz, Pellets oder synthetische Gase betrieben werden (vermutlich hauptsächlich über synthetisches Methan) Annahmen für das Modell:

- Anzahl der Wohngebäude (ca. 3,9 Mio. im Jahr 2019) steigt auf 4,36 Mio. in 2050. Die Wohnfläche (ca. 822 Mio. m^2 im Jahr 2019)[713] steigt proportional zur Anzahl der Gebäude. Der Trend nach mehr Wohnfläche pro Person setzt sich damit fort – aber die Zunahme der Wohngebäude nimmt weiter ab. Für die kommenden 30 Jahre rechnen wir nur noch mit dem halben Wachstum wie in den Jahren von 1990 bis 2020. Dies entspricht dem Trend der Jahre 2015 – 2019: ca. 17.000 Neubauten pro Jahr.[714]
- ca. 2.000 alte Gebäude, die pro Jahr abgerissen oder nicht mehr benutzt werden, (Durchschnitt der Jahre 2015 – 2019: 1988).[715] Vereinfachend haben wir angenommen, dass der Abriss stets aus den unsanierten Gebäuden erfolgt. Wenn es keine unsanierten Gebäude mehr gibt, werden die vor 2020 sanierten Gebäude abgerissen.
- Seit 2014 gibt es ca. 100.000 Neubauten[716]. Aufgrund der EnEv 2013 rechnen wir mit einem Primärenergiebedarf von 51 kWh/m² im Jahr und einem Endenergiebedarf von 45 kWh/m²*a, wovon 15kWh/m²*a für Warmwasser sind. Das Modell geht davon aus, dass diese Gebäude nicht mehr saniert werden, aber die eingebauten

[713] Siehe IT.NRW (2020/2); DENA (2016/1)

[714] Siehe IT.NRW (2020/3)

[715] Siehe IT.NRW (2016/1), IT.NRW (2017/1), IT.NRW (2018/1), IT.NRW (2019/2), IT.NRW (2020/3)

[716] Siehe IT.NRW (2020/3), IT.NRW (2015/1)

Gasheizungen perspektivisch durch Wärmepumpen ersetzt werden (derzeit 40%[717], perspektivisch 90% + Fernwärme)

- Neubaustandard 2020 – 2025: orientiert sich an KfW 55 Haus, siehe Gebäude-Energie-Gesetz 2020[718]
- Ab 2030 Neubaustandard: Passivhausstandard muss Pflicht werden (5 kWh/m² a Raumwärme plus 15 kWh/m²a Warmwasser).
- Wir rechnen konservativ damit, dass 10% der Gebäude auf Grund von Denkmalschutzbestimmungen oder aus anderen Gründen nicht oder nur teilweise sanierbar sind.[719]
- Zwischen 2016 und 2020 wurden bei einer Sanierungsquote von 1% ca. 195.000 Gebäude saniert. Wir rechnen mit einen Sanierungsniveau zu einem Endenergiebedarf von 65 kWh/m²a für Wärme inklusive 15 kWh/m²a für Warmwasser.
- Sanierungsquote pro Jahr: ca. 3,065% pro Jahr. Bis 2030 rechnen wir mit einem durchschnittlichen Sanierungsstandard auf KfW70 Haus, ab 2030 mit dem Standard eines KfW55 Hauses.
- Der Einfachheit halber haben wir angenommen, dass sich die Wohnfläche gleichmäßig auf die obenstehenden Gebäudegruppen verteilt. Dies ist in der Realität nicht zutreffend.
- Für Wärmepumpen rechnen wir mit einem Wirkungsgrad von 300%.
- Es wurde angenommen, dass der Verbrauch an Warmwasser konstant bleibt. Ein zunehmender Anteil des Warmwassers wird von Wärmepumpen bereitgestellt.

---

[717] Siehe BWP (2020/1)

[718] Siehe GEG (2020/1)

[719] Wir orientieren uns dabei an den Zahlen von UBA (2014/1). Ergänzend muss gesagt werden, dass mittlerweile auch in denkmalgeschützter Bausubstanz relevante energetische Sanierungen vorgenommen werden können (Umweltamt Wiesbaden (2015/1); Grunewald (2010/1). Wir rechnen damit, dass diese Gebäude bis 2050 im Schnitt auf 150 kWh/m²a Endenergie für Raumwärme saniert werden, d.h. nicht all dieser Gebäude werden saniert, aber diejenigen, die saniert werden erreichen einen besseren Standard.

Gebäudetypen:

In der folgenden Tabelle 33 ist dargestellt, mit welchen Zahlen wir für den Endenergiebedarf kWh/m²a für Raumwärme bei den einzelnen Gebäudetypen gerechnet haben. Die Endenergie für Warmwasser ist nicht einberechnet, da diese am Ende mit 15 kWh/m²a addiert wird,[720] unabhängig vom Gebäude.

Tabelle 33: Jahresendenergiebedarf für Raumwärme

Gebäudetyp, Baujahr, Zustand	kWh/m²a
Neubauten 2014 - 2019, mit Endenergiebedarf 45kWh /m² a (inkl. Warmwasser von 15 kWh/m² a)	30
Neubauten 2020 -2025 (Mindeststandard KfW55, Heizwärmebedarf < 35 kWh/m² a)	20
Neubauten ab 2025 (Mindeststandard Passivhaus, Heizwärmebedarf < 15 kWh/m² a)	15
Denkmalgeschütze und anderweitig kaum sanierbare Gebäude	190 [721]
zwischen 2016 und 2020 sanierte Gebäude	60
zwischen 2020 und 2030 sanierte Gebäude (Mindeststandard KfW70, Heizwärmebedarf < 55 kWh /m² a)	21
nach 2030 sanierte Gebäude (Mindeststandard KfW55, Heizwärmebedarf < 35 kWh/m² a)	16
andere unsanierte Gebäude	143

[720] LANUV (2020/3)

[721] Bezüglich denkmalgeschützten und anderweitig kaum sanierbaren Gebäuden rechnen wir mit einer stückweisen Sanierung, die jedoch deutlich unter der Sanierungstiefe anderer Gebäude liegt. Im Laufe der Jahre sinkt sie von 2020 mit 190 kWh/m²a Endenergiebedarf auf 165kWh/m²a im Jahr 2040 bis zu 150 kWh/m²a im Jahr 2050.

Anlage 30: Energiebedarf für Heizungswärme und Warmwasser mit Wärmeflussdiagramm

Der Gebäudebestand in den Bereichen GHD und Industrie ist schlecht erfasst und sehr heterogen. Es wurde unterstellt, dass an den Gebäuden, die mit Wohnunggebäuden vergleichbar sind (z.B. Büros, Geschäften oder Schulen) in ähnlichem Umfang Dämm-Maßnahmen und Heizungsaustausch vorgenommen werden wie bei Wohngebäuden. Bei ca. 580.000 Gebäuden in NRW aus dem Bereich GHD kämen bei einer Sanierungsquote von 3% noch einmal 17.400 Gebäude pro Jahr zu den rund 125.000 Wohnhäusern hinzu, die saniert werden müssten.

Der Endenergiebedarf für den Gebäudebereich hängt von zahlreichen Faktoren ab. Entscheidende Parameter sind vor allem der Dämmzustand der Häuser, der Anteil der Fernwärme, die Speicherkapazitäten und der Heizungsmix. Die folgende Tabelle 34 stellt die mögliche Entwicklung des Endenergiebedarfs für Wärme dar:

Tabelle 34: Endenergie für Wärme in Wohnungen und GHD

	Wohnungen	GHD	Gesamt
2019[722]	136,1 TWh	82,5 TWh	218,6 TWh
2030	93,9 TWh	56,9 TWh	150,8 TWh
2040	60,4 TWh	36,6 TWh	97,0 TWh

Der Endenergiebedarf für Heizung und Warmwasser in Wohnungen und GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) beträgt nach der obigen Tabelle 97 TWh im Jahr 2040. Eine Übersicht über die Wärmequellen und -senken bietet das Wärmeflussdiagramm (Grafik 23) für das Jahr 2040. Wir gehen wie die meisten Studien davon aus, dass der Anteil der Wärmenetze für die Versorgung der Wohngebäude und GHD ansteigen wird. Wir rechnen mit 29 TWh/a – also einem Fernwärmeanteil von etwas über 30%[723]. Der Großteil (77 %) des vor Ort in den Häusern erzeugten Wärmebedarfs wird jedoch vor Ort durch Wärmepumpen

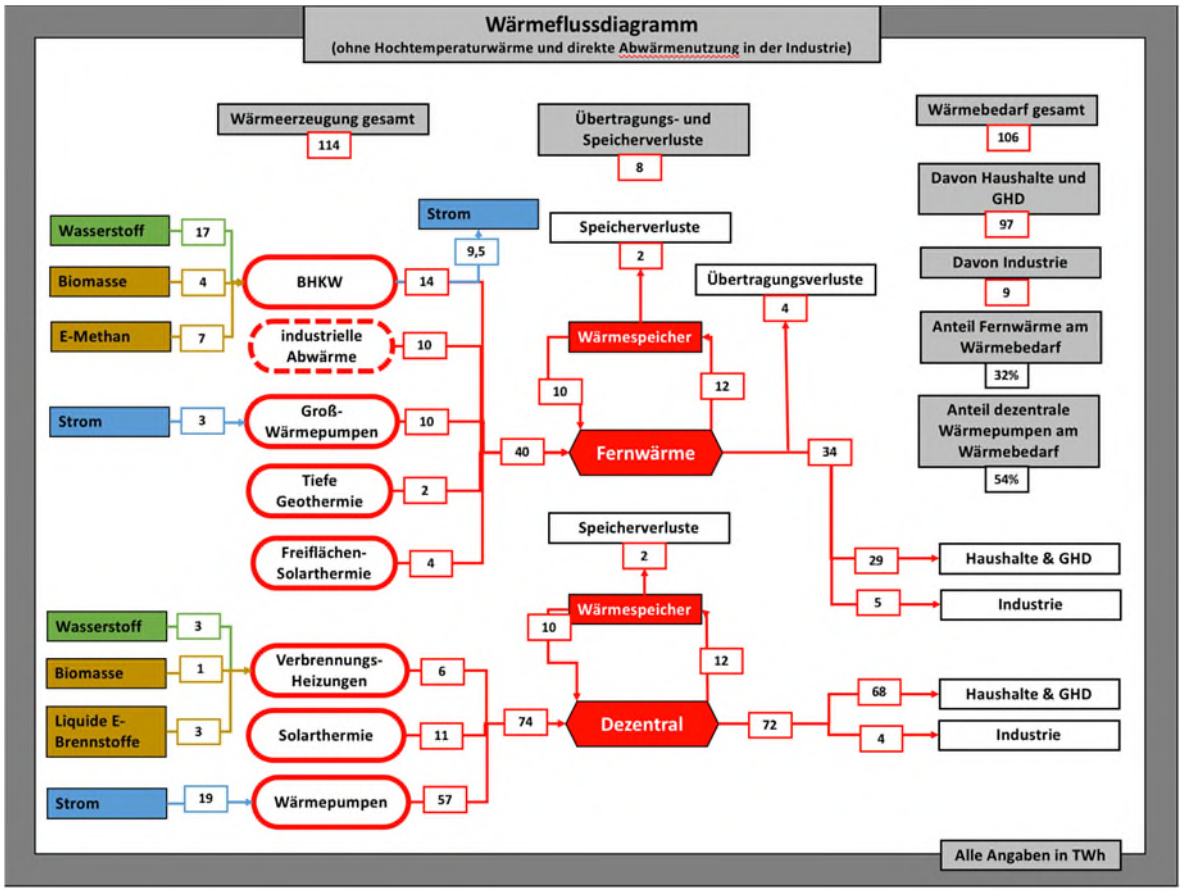
[722] Siehe LANUV (2020/3)

[723] Siehe Hamburg Institut (2020/1)

gedeckt werden, die künftig die flexible Grundversorgung bereitstellen. Sie benötigen 19 TWh/a Strom bei einem konservativ angesetzten Wirkungsgrad von 300%. Ergänzt wird diese dezentrale Wärmeversorgung durch 7 TWh/a Solarthermie auf den Hausdächern.[724] Es bleibt dann noch eine Restmenge von 6 TWh/a, die durch herkömmliche Gas-, Öl- und Wasserstoff-Heizungssysteme gedeckt wird, die aber künftig mit grünen Brennstoffen be-

Grafik 23: Wärmeflussdiagramm für ein treibhausgasneutrales NRW 2040

Anmerkung: Übersicht über Wärmequellen und Wärmesenken im Jahr 2040. Dabei sind die Hochtemperaturwärme, sowie die eigene Abwärmenutzung in Kaskaden der Industrie nicht berücksichtigt.



[724] Siehe (LANUV 2013/1); die Studie rechnet mit einem maximal nutzbaren Potenzial für Solarthermie auf Hausdächern von 4,2 TWh/a in NRW. Allerdings folgt dies aus der Annahme, dass Solarthermie lediglich für Warmwasser verwendet werden kann. Bereits jetzt spielen Solarthermieanlagen eine Rolle zur Heizungsunterstützung, und diese wird bei Niedertemperaturheizungen, die in Neubauten oder gut energetisch sanierten Gebäuden größer werden (siehe Giovanetti (2017/1)). Deswegen rechnen wir vorsichtig mit 7 TWh/a Solarthermiepotenzial auf Hausdächern von Wohngebäuden und GHD-Gebäuden und 4 TWh/a dezentral in der Industrie.

trieben werden. Dafür werden 1 TWh/a Bio-Brennstoffe angesetzt, sowie 3 TWh/a für flüssige E-Brennstoffe und 3 TWh/a für grünen Wasserstoff.

Bei der dezentralen Solarthermie auf Hausdächern rechnen wir mit einem zukünftigen Ertrag von 480kWh/m² im Jahr.[725] Im Bestand in NRW sind bisher etwas ältere Anlagen, sodass die Installierten Anlagen auf 1.522.941m² Dachfläche einen Ertrag von 609 GWh im Jahr bringen (ca. 400 kWh/m² im Jahr).[726] Gerechnet mit dem höheren Ertrag von 480 kWh/m² der zukünftigen Anlagen, führt insgesamt eine Fläche von 14,83 Mio. m² Dachflächen zu einem Ertrag von ca. 7 TWh/a.

Heizenergie der Industrie

Der Heizungsbedarf für die Industrie lässt sich schwer ermitteln, da die Industrie vor allem Prozesswärme benötigt und die Heizung der Gebäude überwiegend aus Abwärme erfolgt. Ein kleiner Teil – etwa 10 TWh/a - dieser Abwärme wird nach unserer Modellrechnung in die Fernwärmenetze geleitet. Umgekehrt bezieht die Industrie auch 5 TWh/a aus den öffentlichen Fernwärmenetzen. 4 TWh/a werden von der Industrie durch eigene Solarthermie-anlagen gewonnen. Der angegebene Heizbedarf der Industrie von 9 TWh/a ist daher nur grob geschätzt und nur ein kleiner Teil des gesamten Wärmebedarfs der Industrie. Den Großteil der benötigten Wärme – sowohl Heizungswärme wie Prozesswärme – produziert die Industrie selbst mit Hilfe von elektrischem Strom und Brennstoffen, indem Kaskadenweise die Wärme innerhalb der eigenen Anlagen recycelt wird.

Fernwärme

Für das Flussdiagramm haben wir einen Umfang der Fernwärmelieferung von 34 TWh/a angenommen, davon 29 TWh/a für die Wohnungen und GHD und 5 TWh/a für die Industrie. Zur Deckung dieses Bedarfs haben wir folgenden Mix zugrunde gelegt: 4 TWh Groß-Solarthermie, 2 TWh/a tiefe Geothermie, 10 TWh/a Abwärme und 14 TWh/a aus Blockheizkraftwerken. Das sind nur grobe Schätzungen, da die Angaben in den Quellen sehr unterschiedlich sind. Weitere 10 TWh/a Wärme werden aus Großwärmepumpen geliefert, inklusive der Großwärmepumpen, die warmes Grubenwasser auf 50°C heben, um damit Niedertemperaturwärmenetze zu versorgen. Für diese Wärmepumpen im warmen

[725] Siehe MD (2020/2), Anlage 15

[726] Siehe LANUV (2020/3)

Grubenwasser rechnen wir entsprechend der Studie mit einer Jahresarbeitszahl von 4,2, sodass mit ca. 266 GWh/a Strom 1120 GWh/a Wärme erzeugt wird[727]. Für die restlichen Großwärmepumpen rechnen wir konservativ mit einer Jahresarbeitszahl von drei, sodass zusätzlich 2,96 TWh/a Strom erforderlich sind.

Insgesamt ergibt sich ein Wärme-Input für Fernwärme von 40 TWh/a. Da die Fernwärme regelmäßig zwischengespeichert werden muss, rechnen wir mit einem Input in die Speicher von 12 TWh/a und einem Output aus den Speichern von 10 TWh/a – also einem Verlust von 2 TWh/a. Dazu kommt ein Verlust von 13 Prozent (ungefähr 5 TWh) in den Fernwärmeleitungen, sodass insgesamt 34 TWh/a Fernwärme geliefert werden können.[728]

Wärmespeicher

Bei der Kalkulation des Wärmespeicherbedarfs haben wir uns an einer Studie von Fraunhofer ISE orientiert.[729] In der Studie rechnet das Institut bei einem Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser von 400 TWh/a mit einem Anteil der aus Speichern stammenden Wärme von 20 Prozent und Wärmespeichern mit einer Kapazität von 665 GWh bei einem Wirkungsgrad von 80 Prozent.

Die Energy Watch Group[730], die EU weite Berechnungen vorstellt, rechnet mit einem besseren Wirkungsgrad. Sie rechnet mit installierten Niedertemperaturwärmespeichern mit einer Größe von 967 GWh, die einen Output von 329 TWh/a haben. Das Verhältnis von installierter Kapazität und Output ist also deutlich besser – was vermutlich daran liegt, dass die Studie aktueller ist. Wir rechnen mit einem Anteil der Wärme, die aus Wärmespeichern bereitgestellt wird, von insgesamt ca. 20% (20 TWh/a) und einem Wirkungsgrad der Speicher von 83%. Die dafür notwendige installierte Kapazität an Wärmespeichern liegt zwischen 59 GWh (dem Verhältnis der Energy Watch Group folgend) und 166 GWh (der Studie des Fraunhofer ISE folgend). Die Liefermenge der Wärmespeicher ordnen wir zu gleichen Anteilen der dezentralen Versorgung, sowie den Fernwärmenetzen zu (10 TWh/a und 10 TWh/a).

---

[727] Siehe LANUV (2018/1)

[728] Der BDH rechnet mit 13% Leitungsverlust – siehe (BDH 2016/1)

[729] Siehe Fraunhofer ISE (2013/1)

[730] Siehe LUT (2019/1)

Anlage 31: Fernwärmeschiene Rhein-Ruhr

Mit dem Großprojekt Fernwärmeschiene Rhein-Ruhr soll industrielle Abwärme z.B. aus der Stahlindustrie in Duisburg und aus Chemiewerken in Oberhausen sowie die Abwärme aus den Müllverbrennungsanlagen in die bestehenden Fernwärmenetze eingeleitet und diese ausgebaut werden. Beabsichtigt ist ein einheitliches Fernwärmenetz für das gesamte Ruhrgebiet vom Rhein bis nach Herne unter Anbindung von Duisburg, Essen, Oberhausen, Bottrop, Gelsenkirchen, Herne und weiterer Städte. Dazu soll eine Fernwärmeverbindungsleitung zwischen der Fernwärmeschiene Ruhr der Steag und dem Fernwärmeverbund Niederrhein verlegt werden und damit auch das E.ON-Fernwärmenetz angeschlossen werden. Die Verbindungspunkte sollen dabei bei Bottrop-Welheim und Duisburg-Walsum entstehen.

Grundsätzlich macht das Vorhaben Sinn. Allerdings stammt das Gutachten für das Vorhaben inklusive Modellrechnungen, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und möglichen CO_2-Reduktionen aus dem Juni 2013.[731] Die Festlegung von Parametern für Berechnungen, sowie die Ausrichtung an den klimapolitischen Zielen der Landesregierung wurde im Jahr 2011 vorgenommen. Damals ging man davon aus, dass die THG-Emissionen bis 2050 um 80 Prozent reduziert werden sollen. Es wurde nur mit einem Anteil von 12 Prozent Erneuerbarer Energie geplant. Für den Umbau der Stahl- und der Chemieindustrie gab es noch keine konkreten Planungen.

Nach Information der Fernwärmeschiene Rhein-Ruhr GmbH findet zurzeit eine aktualisierte Wirtschaftlichkeitsberechnung statt, da sich Bedingungen in der Energie- und Bauwirtschaft, sowie der Politik seit 2013 verändert haben.[732] Zu diesen neuen Berechnungen liegen uns weder Daten noch Ergebnisse vor, sodass wir bezüglich der Fernwärmeschiene Rhein-Ruhr zu keiner abschließenden Beurteilung kommen können.

Bei der Neubewertung des Vorhabens halten wir es für erforderlich, die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

1. Die Vernetzung einer so großen Region ist nur dann sinnvoll, wenn die bestehenden und die neu einzubindenden Wärmequellen sonst nicht optimal genutzt werden können.

[731] Siehe BET (3013/1)

[732] FWSRR (2019/1)

2. Da die Chemieindustrie und die Stahlindustrie in den kommenden 20 Jahren komplett erneuert werden müssen, um CO2-neutral zu werden, muss die Berechnung der Abwärmeeinspeisung durch die Industrie auf Basis der zukünftigen Anlagen erfolgen.
3. Die bisherigen Planungen basieren noch überwiegend auf Müllverbrennung und fossilen Energien. Nur 12 Prozent Erneuerbare Energie (800 GWh/a) ist vorgesehen. Die künftige Planung sollte stattdessen so geplant werden, dass das Netz spätestens 2040 klimaneutral versorgt wird.
4. Dazu sollte berücksichtigt werden, in welchem Umfang im Rahmen einer künftigen klimaneutralen Gesellschaft Energie aus Müllverbrennung zur Verfügung stehen wird.
5. Neben der Wärme aus Müllverbrennung und Industrie sollten sowohl Kraftwärmekopplung aus Biogasanlagen, Großwärmepumpen, Solaranlagen und Speicher eingeplant werden.
6. Bei Großwärmepumpen sollte Wärmenutzung aus Erdwärme, Gewässern, Gruben, Eisspeichern und anderen geeigneten Quellen eingeplant werden, um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen.
7. Die bisherigen Primärnetze der Steag und des Fernwärmeverbund Niederrheins werden bei 180°C Vorlauftemperatur betrieben. Daher wurde geplant, die Verbundleitung ebenfalls mit 180°C zu betreiben. Neue Wärmenetze werden heute als Niedertemperaturnetze geplant, da dann die Verluste geringer sind und günstige Erneuerbare Quellen wie Großwärmepumpen und Solarthermieanlagen effizienter genutzt werden können. Daher sollte eine Temperaturabsenkung in den Sekundärnetzen und wenn möglich auch im Primärnetz eingeplant werden.

Anlage 32: Verkehr – Energieverbrauch

Beim Energieverbrauch des Verkehrssektors dominiert der Straßenverkehr – und zwar vor allem der PKW-Verkehr. Zur detaillierten Berechnung des zukünftigen Energieverbrauchs siehe in den Anlagen 33 und 34.

Tabelle 35: Energieverbrauch Deutschland[733]

(ohne die Energie, die für die Herstellung der Rohstoffe benötigt wird – Angaben für 2016 in TWh)

Industrie	717
Haushalte, Gewerbe	1.076
Verkehr	749
Luftverkehr	108
Binnenschifffahrt	3,3
Seeschifffahrt	26
Schienenverkehr	14,7
Straßenverkehr	623
davon Personenverkehr	431
davon Güterverkehr	191
Gesamt Endenergie	2.542
Zum Vergleich: Primärenergie	*3.729*

[733] siehe VM-NRW (2019/1), zur Seeschifffahrt siehe BDI (2018/1)

Anlage 33: Personenverkehr

Prognose der Entwicklung der Wegstrecken und des Energiebedarfs im Personenverkehr

Die Mehrzahl der Studien rechnet beim Personenverkehr mit einem leichten Rückgang. Allerdings gibt es auch stark abweichende Schätzungen. Die LUT-Studie im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt rechnet für Europa bis 2050 mit einer Verdoppelung des Personenverkehrs und einer Vervierfachung des Luftverkehrs. Rifkin rechnet dagegen mit einer Reduzierung der Zahl der PKW um bis zu 70 Prozent bereits für 2035, wenn das Carsharing und Autonome Fahren sich durchsetzen. Dies hätte auch enorme Verlagerungseffekte zur Folge.[734]

Tabelle 36: Wegstrecken im Personenverkehr Deutschland

	Ist 2017[735] (in Klammern[736])	**2035 Wuppertal[737]**	**2050 verschiedene[738]**
MIV	950	460 (320 Fahrende, 140 Mitfahrende)	900
ÖPNV + ÖPFV	80 + 100 (110 + 65)	330	
Fahrrad	35	70	
zu Fuß	35	35	35
Luftverkehr	70	(keine Angabe 100 ?)	130 ?
Gesamt	**1300**	**894 (+ 100 ?)**	**950 bis 1115 (+ 130 ?)**

Anmerkung: Alle Angaben in Mrd. Personenkilometern

[734] Siehe (LUT 2019/1), Rifkin (2019/1)

[735] Siehe Intraplan (2019/1)

[736] Siehe BMVI (2018/2)

[737] Siehe Wuppertal (2017/1)

[738] Siehe in MD (2020/2) – Anlage 7

Die folgenden Abschätzungen des künftigen Energieverbrauchs beziehen sich auf 2035, da wir davon ausgehen, dass der Verkehrssektor bis auf den Flugverkehr bis 2035 treibhausgasneutral werden kann.

PKW, leichte Nutzfahrzeuge und Zweiräder

Die Zahlen zur Entwicklung des PKW-Verkehrs liegen weit auseinander. Wir gehen von einem leichten Rückgang des Individualverkehrs und damit der Fahrzeugkilometer und einem Rückgang der Zahl der PKWs um 15 Prozent bis zum Jahr 2035 aus. Diese Annahme ist ambitionierter als Szenarien des BDI[739], in etwa auf einem Niveau mit dem Rescue-Pfad des Umweltbundesamtes[740], aber deutlich konservativer als die neue Studie des Wuppertal Instituts[741]. Einige Studien zum autonomen Fahren (siehe im Kapitel »Verkehr« im Abschnitt »Selbstfahrende Autos = autonomes Fahren«) halten eine Reduzierung der Zahl der PKW um weit über die Hälfte für denkbar.

Wir gehen von einer Elektrifizierung des PKW-Verkehrs von 80 Prozent im Jahre 2035 aus (Rest vermutlich PtL, da sich die Brennstoffzelle mit Wasserstoff nicht rechnet), da ab 2025 die E-Mobile weniger kosten werden als Benziner und dann fossile Autos nur noch ein Nischenprodukt sein werden. Dazu trägt auch bei, dass die Treibstoffe durch die Quoten der synthetischen Treibstoffanteile teurer werden.

Derzeit sind in NRW 10,2 Mio. PKW zugelassen.[742] Die Zahl sinkt im Szenario auf 8,7 Mio., davon sind 6,9 Mio. E-Autos. Die Studie des BDI beziffert den Strombedarf von 31 Mio. E-Autos mit 63 TWh/a. Bei gleichen Verhältnissen ergäbe sich für 6,9 Mio. E-Autos ein Strombedarf von 14 TWh/a. Das Umweltbundesamt gibt als Verbrauch der derzeit 100.000 E-Autos 0,23 TWh/a an. [743] Für 6,9 Mio. PKW ergäbe sich bei gleichem Verhältnis ein Bedarf von 15,9 TWh/a. Hinzu kommen die leichten Nutzfahrzeuge und elektrifizierte Zweiräder. Wir rechnen daher mit 17 TWh/a direktem Strombedarf für NRW.

---

[739] Siehe BDI (2018/1)

[740] Siehe UBA (2019/3)

[741] Siehe Wuppertal (2020/1)

[742] Siehe Kraftfahrtbundesamt (2020/1)

[743] Siehe UBA (2019/2)

Hinzu kommt der Energiebedarf für die Herstellung von Wasserstoff und PtL. Dabei haben wir folgendes gerechnet: 1,8 Mio. PKW mit Verbrennungsmotor – jährliche Fahrleistung 10.000 Kilometer. Die Verbrenner verbrauchen durchschnittlich 6 Liter Treibstoff auf 100 km, der Treibstoff hat eine durchschnittliche Energiedichte von 9 kWh/Liter. Damit ergeben sich rund 10 TWh Energiebedarf pro Jahr in Form von PtL.

Bahn

Der Strombedarf des Verkehrs (Bahnstrom und E-Autos) lag 2017 in NRW bei insgesamt 1,9 TWh und bewegte sich seit 2005 im Bereich zwischen 1,6 und 2,2 TWh/a.[744] Die Zahl der Elektrofahrzeuge (inkl. Hybrid) lag 2017 NRW-weit bei 55.000. Zum genauen Strombedarf liegen uns keine Daten vor, er bewegt sich aber vermutlich in einer Größenordnung <0,1 TWh/a. Der größte Teil des Strombedarfs entfällt daher auf die Bahn. Wir rechnen damit, dass der Bahnverkehr um das Doppelte bis Dreifache anwächst, dieselbetriebene Fahrzeuge durch strombetriebene Fahrzeuge ersetzt werden und Triebwagen auch weiterhin an Effizienz gewinnen. Wir rechnen daher mit einem Strombedarf von 5 TWh/a. Auch bei deutlicher Verletzung dieser Annahmen bewegt sich der Strombedarf des Bahnverkehrs in Dimensionen, die verglichen mit den anderen Verkehrsträgern eher gering sind.

Flugzeuge

In der Emissionsstatistik haben wir die Flüge entsprechend dem Bevölkerungsanteil von NRW ausgewiesen. Zur Bestimmung des Energiebedarfs in NRW sind wir anders vorgegangen, da hier ja nur die Flüge relevant sind, die von Flughäfen in NRW aus gestartet sind.[745] Das bewirkt, dass Flüge innerhalb von NRW voll mitgerechnet werden. Bei Flügen, die in andere Bundesländer oder andere Staaten stattfinden, wird nur der Hinflug gemessen. Der Rückflug wird dem Land zugeordnet, wo der Rückflug gestartet ist. Gemessen wird jeweils die Menge an Treibstoff, die das Flugzeug getankt hat.

Langstreckenflugzeuge werden wahrscheinlich noch auf längere Zeit mit E-Kerosin betrieben. Für kürzere Strecken kommt voraussichtlich auch der Einsatz von Brennstoffzellen mit Wasserstoff als Treibstoff in Frage. Der Einsatz von direktelektrischen Antrieben ist für

[744] Siehe LANUV (2020/3)

[745] Siehe EEFA (2015/1)

größere Flugzeuge zurzeit nicht absehbar. Wir orientieren uns daher an den Zahlen des BDI, der einen Bedarf an Brennstoffen von 105 TWh/a nennt.[746]

Für NRW rechnen wir entsprechend der von NRW aus gestarteten Passagiere mit einem Anteil von 14,6%. Daraus ergibt sich für NRW ein Energiebedarf von 15 TWh/a. Damit ist der Anteil am Energiebedarf deutlich geringer als der NRW zugerechnete Anteil der Emissionen (21%). Denn viele Fluggäste fliegen nach Frankfurt oder München, wo sie den Flug ins Ausland fortsetzen. Der Treibstoff, der in Frankfurt, München oder anderen Flughäfen getankt wird, wird dann natürlich Hessen, Bayern oder anderen Ländern zugerechnet.

Weitere Tabellen und Grafiken zum Personenverkehr

Tabelle 37: Fahrrad-Entscheide[747]

	NRW	Deutschland
Bürgerbegehren	12	43
Volksinitiativen	1	4

Anmerkung: Der fahrradgerechte Umbau der Städte gewinnt zunehmend an Fahrt. Fahrrad-Entscheide in NRW gab es oder sind in Vorbereitung in Aachen, Bielefeld, Bochum, Bonn, Detmold, Essen, Marl, Mönchengladbach, Paderborn, Rheinbach, Recklinghausen, Welver.

[746] Siehe BDI (2018/1)

[747] Quelle: Eigene Internet-Recherche nach Rad-Entscheiden am 1.12.2020

Tabelle 38: Flughäfen in NRW[748] *– 2018 – 1000 Aus-/Zusteiger*

Düsseldorf	24.274
Köln/Bonn	12.945
Dortmund	2.284
Weeze	1.669
Münster/Osnabrück	1.017
Paderborn/Lippstadt	734
Gesamt	41.423

Anmerkung: Nur die Flughäfen in Düsseldorf und Köln/Bonn haben eine Größenordnung, um rentabel zu wirtschaften.

Tabelle 39: Warum gehen/fahren die Menschen?[749] *– Deutschland 2017*

	Anteil Wege	Anteil Personenkilometer
Begleitung	8%	5%
Freizeit	28%	34%
Erledigung	14%	12%
Einkauf	16%	7%
Ausbildung	7%	4%
Dienstlich/geschäftlich	11%	17%
Arbeitsweg	16%	21%

Anmerkung: Es dominiert der Freizeitbereich – von Wochenendausflügen bis hin zu Urlaubsflügen. Hier werden auch die größten Strecken zurückgelegt.

[748] siehe VM-NRW (2019/1)

[749] siehe BMVI (2019/1)

Tabelle 40: Modal Split Personenverkehr Deutschland[750] – *Ohne Flugverkehr – 2017*

	Anteile Wege	Anteile Personenkilometer
Zu Fuß	25%	3%
Fahrrad	10%	3%
MIV	55%	76%
ÖV	10%	14%
Flugzeug	<0,1	4,5%

Tabelle 41: Zielszenario für den Modal Split in NRW

	Anzahl Wege	(Spannbreite)	Personenkilometer
Zu Fuß	35%	(20 – 40%)	6%
Fahrrad	20%	(15 – 40%)	6%
Pedelec	5%	(3 – 10%)	4%
ÖPNV	14%	(5 – 35%)	26%
MIV	25%	(20 – 35%)	39%
ÖPFV	1%		9%
Flugzeug	0,1%		9%

Anmerkung: Die Anzahl der Wege wurde dem Klimaschutzplan NRW[751] entnommen – die Länge der Wege wurde berechnet nach den Angaben in Mobilität in Deutschland [752].

Als Zielszenario haben wir die Zahlen aus dem Klimaschutzplan NRW von 2016 entnommen. Dieses Szenario ist anspruchsvoll, erscheint uns aber durchaus realisierbar. Demnach soll der Anteil des MIV nach Länge der Wege von über 70% auf 39% reduziert werden. Der Anteil des Flugverkehrs wird aufgrund der großen Entfernungen trotz der geringen Zahl der Fahrten (Wege) immer noch 9% ausmachen. Der Anteil des Umweltverbundes (ÖV, Fahrrad und Fußwege) wächst von knapp 25% auf über 50%. Der Anteil des Fahrradverkehrs entspricht auch der Forderung im Radverkehrsentscheid in NRW. In den Städten ist natürlich noch deutlich mehr möglich, wie die Erfahrungen aus den Niederlanden zeigen.

[750] siehe BMVI (2019/1)

[751] siehe MKULNV (2015/1)

[752] siehe BMVI (2019/1)

Die Spannbreite zwischen Stadt und Land wird aber auch künftig erheblich sein. In den Städten wird das Auto deutlich zurückgedrängt. Aber auf dem Lande bleibt auch künftig der PKW das Verkehrsmittel Nummer 1.

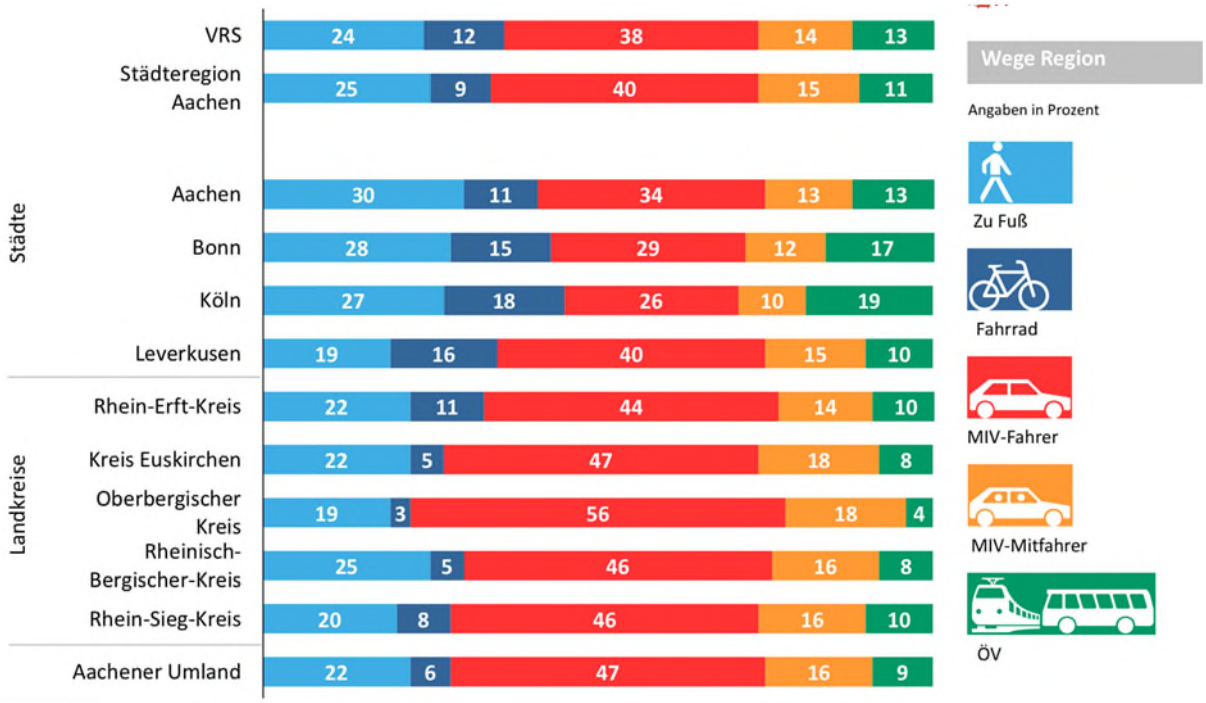
Tabelle 42: Modal Split Zielsetzungen in Städten in NRW im Vergleich zu Kopenhagen[753]

	Zu Fuß	Fahrrad	ÖPNV	MIV
Essen 2017	19%	7%	16%	58%
Essen 2035 (Plan)	25%	25%	25%	25%
Köln 2013	23%	15%	22%	40%
Köln 2025/30 (Plan)	25%	17%	25%	33%
Düsseldorf 2014	31%	13%	22%	34%
Münster 1982	25%	29%	7%	39%
Münster 2013	22%	39%	10%	29%
Kopenhagen 2016	19%	29%	18%	34%
Kopenhagen 2025 (Plan)	19%	38%	18%	25%

Anmerkung: Die Unterschiede in den Städten sind erheblich. Beim Fahrradverkehr dominiert Münster, allerdings mit einem schwachen ÖPNV und einem hohen MIV-Anteil. Dagegen liegt der MIV in Düsseldorf nur bei 34% der Wege – ähnlich wie beim Vorbild Kopenhagen. Die ehrgeizigsten Pläne hat interessanterweise das Schlusslicht Essen. Dort soll der MIV-Anteil von 58% radikal auf 25% gesenkt werden.

[753] siehe Deutscher Bundestag (2017/1), Stadt Essen (2019/1), Stadt Köln (2015/1), Stadt Münster (2015/1), City of Copenhagen (2016/1)

Grafik 24: Modal Split NRW – Unterschiede zwischen Stadt und Land[754] ***– 2017 – Anzahl Wege***

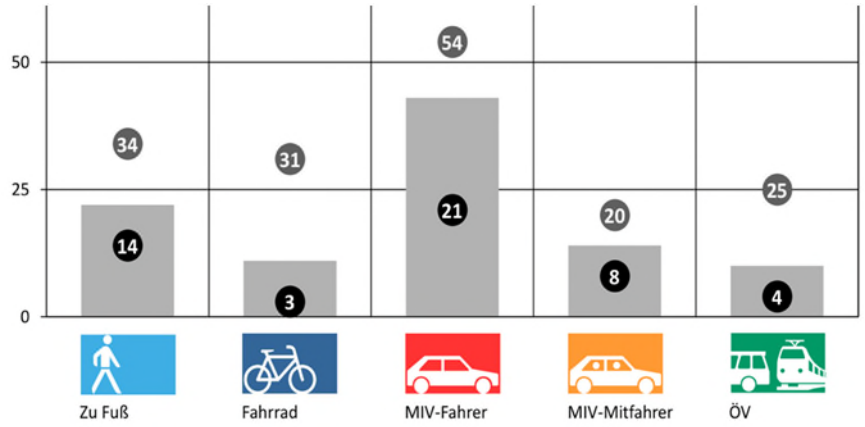


Anmerkung: Im ländlichen Bereich dominiert der PKW als Transportmittel. In Städten wie Köln und Bonn werden bereits ein Drittel der Wege vom Umweltverbund (Fahrrad und ÖPNV) bewältigt. Rechnet man das allerdings in Entfernungskilometer um, dominiert auch dort noch der PKW.

[754] siehe Zukunftsnetz Mobilität NRW (2018/1)

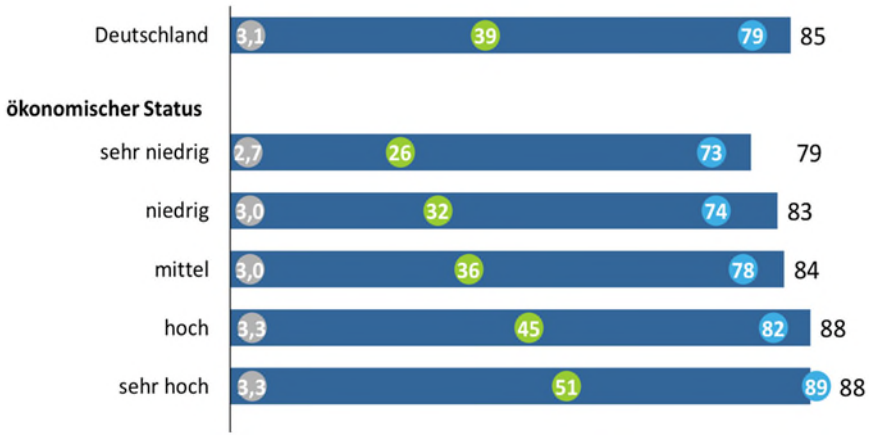
Grafik 25: Modal Split – Spannbreiten der Verkehrsmittel[755] *– 2017 – Anzahl Wege*

Balken: **Durchschnitt Deutschland** **oberer Punkt:** **Maximum der Städte**
Unterer Punkt: **Minimum der Städte**



Anmerkung: Die Unterschiede sind erheblich: Beim Fahrradverkehr 1:10, beim Öffentlichen Verkehr 1:6.

Grafik 26: Mobilitätsverhalten nach Einkommen[756] **– Deutschland – 2017**



Balken **Anzahl mobiler Personen in %** **blau** **mittlere Unterwegszeit am Tag (min)**
grün **mittlere Strecke am Tag (km)** **grau** **Anzahl Wege am Tag**

Anmerkung: Die tägliche Zeit, in der Menschen sich bewegen, wächst ein wenig mit steigendem Einkommen, aber die Unterschiede sind gering. Alle Menschen sind zwischen eineinviertel und anderthalb Stunden am Tag unterwegs. Menschen mit höheren

[755] siehe BMVI (2019/1)

[756] siehe BMVI (2019/1)

Einkommen sind aber öfter unterwegs. Und sie legen dabei erheblich längere Strecken am Tag zurück.

Anlage 34: Güterverkehr

Im Gegensatz zum Personenverkehr gehen beim Güterverkehr die Mehrzahl der Prognosen davon aus, dass es zu einer Steigerung kommen wird. Aber auch beim Güterverkehr ist die Spannweite der Schätzungen erheblich. Für 2050 liegt sie zwischen minus 20 Prozent und

Tabelle 43: Wegstrecken im Güterverkehr in Deutschland *– in Mrd. tkm*

	Ist 2017[757]	2035*	2050*	2050**
LKW	490	420	350	580
Schiene	130	300	500	320
Binnenschiff	55	80	100	50-100
Rohrleitungen	20	10 ?	5 ?	
Luft	1,6	2 ?	2,5 ?	
Gesamt	700	810	950	570 - 970
Seeschifffahrt	1000[758]			
Gesamt	**1700**	**?**	**?**	

** Die Zahlen basieren im Wesentlichen auf Wuppertal 2017*

*** Die Zahlen basieren auf verschiedenen Quellen – siehe MD (2020/2) - Anlage 7*

plus 40 Prozent. Wir rechnen vorsichtig mit den Zahlen des Wuppertal Instituts: Plus 16 Prozent bis 2035 und plus 35 Prozent bis 2050. Dabei nimmt der LKW-Verkehr durch die Verkehrsverlagerung ab, während Bahn und Binnenschiffe zulegen. Für die Rohrleitungen, den Luftverkehr und die Seeschifffahrt lagen uns keine Prognosen vor. Die Rohrleitungen dürften mit dem Ausstieg aus dem Erdöl und Erdgas an Bedeutung verlieren. Sie werden Teil 3 im Kapitel »Energiebedarf und Stromversorgung« behandelt. Der Luftverkehr wird vermutlich zunehmen. Wie die Seeschifffahrt sich weiterentwickeln wird, hängt auch von den Kosten ab. Durch den Übergang zu E-Kraftstoffen wird die Seeschifffahrt deutlich teurer.

[757] siehe Intraplan (2019/1), BMVI (2018/1), Wuppertal (2017/1)

[758] Zahlen von 2013; siehe BMVI (2018/1)

LKWs und andere Nutzfahrzeuge

Wir gehen davon aus, dass ein Drittel der Autobahnen in Deutschland (4.000 km) bis 2030 mit Oberleitungen ausgestattet werden und dass spätestens 2035 60 Prozent der Fahrzeuge elektrisch fahren (vorsichtige Annahme). Wenn die Oberleitungen 2030 fertig sind, kann sogar mit 80 Prozent Elektrifizierung gerechnet werden, da die Laufzeit von LKWs unter 10 Jahren liegt. Welche Antriebstechnologie die restlichen LKWs haben werden, ist umstritten (Brennstoffzelle mit Wasserstoff, Methanol, E-Diesel, aber wohl nicht Methan, da bei Fahrzeugmotoren kaum vermeidbar ist, dass Methanreste mit den Abgasen emittiert werden). Wir haben die verbleibenden 40 Prozent daher zu gleichen Teilen auf PtL und Wasserstoff aufgeteilt.

Der Anteil des LKW-Güterverkehrs von NRW am deutschen LKW-Güterverkehr liegt bei etwa 19 Prozent. Ausgehend von den Annahmen im Handbuch Klimaschutz Deutschland ergeben sich dadurch Anteile von rund 10 TWh/a Strom. Zur Deckung der restlichen 40% berechnen wir einen Bedarf von ca. 8 TWh/a PtL und 6 TWh/a Wasserstoff.

Schiffe

Die Zuordnung »Anteile der internationalen Schifffahrt« zu Deutschland erfolgt wie bei den Flugzeugen anteilig pro Kopf. Eine Umstellung auf elektrische Antriebe wird von allen vorliegenden Studien nur für kleinere Schiffe, insbesondere in der Binnenschifffahrt und bei den Fähren gesehen. Der Großteil des Schiffverkehrs muss künftig mit E-Brennstoffen versorgt werden, wobei grundsätzlich Methanol, grüner Wasserstoff, Ammoniak und E-Diesel infrage kommen (auch bei Schiffen ist der Einsatz von Methan voraussichtlich nicht treibhausgasfrei). Welche Brennstoffe sich im Endeffekt als am sinnvollsten erweisen werden, können wir nicht einschätzen. Wir orientieren uns an der Schätzung der BDI-Studie, die einen heutigen Energiebedarf von 26 TWh/a für den Schiffsverkehr nennt.[759] Bis 2030 wird dieser auf 34 TWh/a und bis 2050 auf 38 TWh/a steigen. Dies ergibt anteilig für NRW 8 TWh/a.

[759] Siehe BDI (2018/1)

Der Energiebedarf der Binnenschifffahrt in Deutschland beträgt 3,3 TWh/a.[760] Das bedeutet, dass der Anteil von NRW bei 1,6 liegt (knapp 50%). Wenn, wie der BDI annimmt, die Binnenschifffahrt in den Containertransport einsteigt, dann könnte sich der Verkehr trotz des Ausfalls der Kohle- und Öltransporte fast verdoppeln. Wir rechnen daher mit 3 TWh bis 2035. Langfristig werden auch Schiffe zumindest im regionalen Verkehr (Fähren, Feederverkehr)[761] elektrisch mit Batterien fahren.

Weitere Tabellen und Grafiken zum Güterverkehr

Tabelle 44: Emissionen im Güterverkehr nach Verkehrsträgern[762] ***– in gCO_{2eq}/tkm***

LKW	65
Bahn	21
Seeschiff (Container)	13

Anmerkung: Der LKW-Verkehr emittiert etwa dreimal so viel wie die Bahn und fünfmal so viel wie das Schiff.

Anteil des Güterverkehrs in NRW am deutschen Güterverkehr[763]

Der Anteil der LKW-Transporte (in tkm (Tonnenkilometer)) der in NRW zugelassenen LKW an denen der in Deutschland zugelassenen LKW beträgt nur 19 Prozent. Der Anteil des Straßengüterverkehrs ist also in NRW etwas geringer ist als im Bundesdurchschnitt. Rechnet man das um auf den gesamten Güterverkehr, so erhält man einen Anteil des Güterverkehrs von NRW am gesamten Güterverkehr in Deutschland von 22 Prozent, also etwas überproportional. Der Grund für die Unterschiede liegt vor allem beim deutlich höheren Anteil der Transporte mit Binnenschiffen.

[760] Siehe VM-NRW (2019/1)

[761] Feederverkehre sind die Schiffstransporte mit kleineren Schiffen von den großen Umschlaghäfen wie Hamburg zu den Häfen mit geringerer Tiefe – z.B. die Ostseehäfen mit maximal 12 Meter Tiefe.

[762] Siehe EnergieAgentur.NRW (2020/1)

[763] berechnet aufgrund von Zahlen aus VM-NRW (2019/1), MKULNV (2015/1) und BMVI (2019/1)

Tabelle 45: Modal Split im Güterverkehr in NRW– ***Anteile in Mrd. tkm***

Neuere Zahlen als 2010 stehen leider nicht zur Verfügung[764]*. Die Prognosen für 2035 und 2050 sind grobe Schätzungen auf Basis der Studie ‚Verkehrswende in Deutschland'*[765]*.*

	2010	2035	2050
Binnenschiff	16%	20%	20%
Bahn	12%	30%	50%
LKW	62%	45%	30%

Tabelle 46: Prognose des Modal Split im Güterverkehr in Deutschland (*Anteile in Mrd. tkm)*

Die Zahlen für 2018 stammen aus: Verkehr in Zahlen 2019/2020[766]*. Die Prognosen für 2035 und 2050 wurden auf Basis der Zahlen aus Verkehrswende in Deutschland* [767] *selbst berechnet. Die Prozentzahlen beziehen sich auf den deutschen Güterverkehr ohne Seeschifffahrt. Die mit „?" versehenen Zahlen sind eigene Schätzungen.*

	2018	2035	2050
Binnenschiff	7%	10%	10%
Bahn	19%	37%	53%
LKW	72%	52%	37%
Rohrleitungen	2,5%	? 1%	? 0,5%
Flugzeug	0,2%	? 0,25%	? 0,3%
Zum Vergleich: Seeschifffahrt	*143%*	*?*	*?*

[764] Siehe Klimaschutzplan NRW – siehe MKULNV (2015/1)

[765] Siehe Wuppertal (2017/1)

[766] siehe BMVI (2019/2)

[767] siehe Wuppertal (2017/1)

Anlage 35: Straßenverkehr

Die Daten und Grafiken in dieser Anlage stammen aus „Mobilität in Nordrhein-Westfalen – Daten und Fakten 2018/2019.[768]

Tabelle 47: Straßen in NRW – Stand 2018 – in km

Autobahn	2.224
davon mehr als 3-streifig[769]	735
Bundesstraßen	4.448
Landesstraßen	13.089
Kreisstraßen	9.770
Gemeindestr.	94.549
Gesamt	124.080

Tabelle 48: Straßenfahrzeuge in NRW – Stand 2019 – 1000 Fahrzeuge

PKW	10.084
Krad	843
LKW	647
Zugmaschinen	257
Bus	17
Sonst	50
Gesamt	11.897

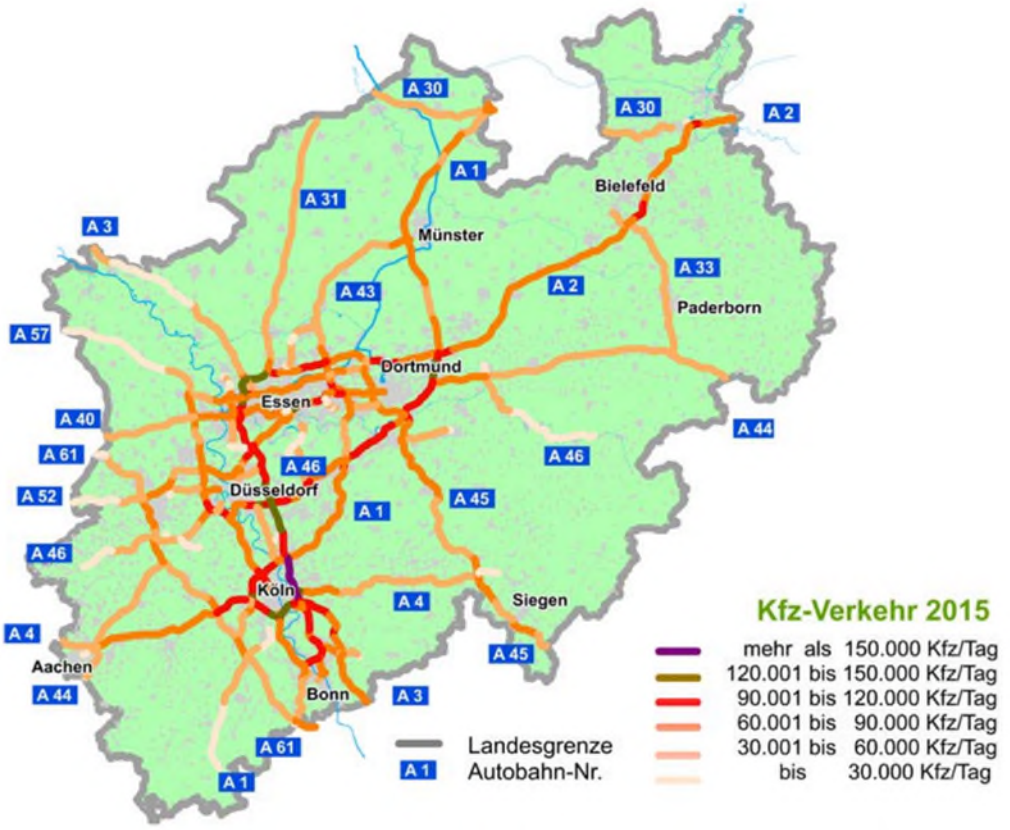
Tabelle 49: LKW-Transporte – 2016 – Mio. tkm

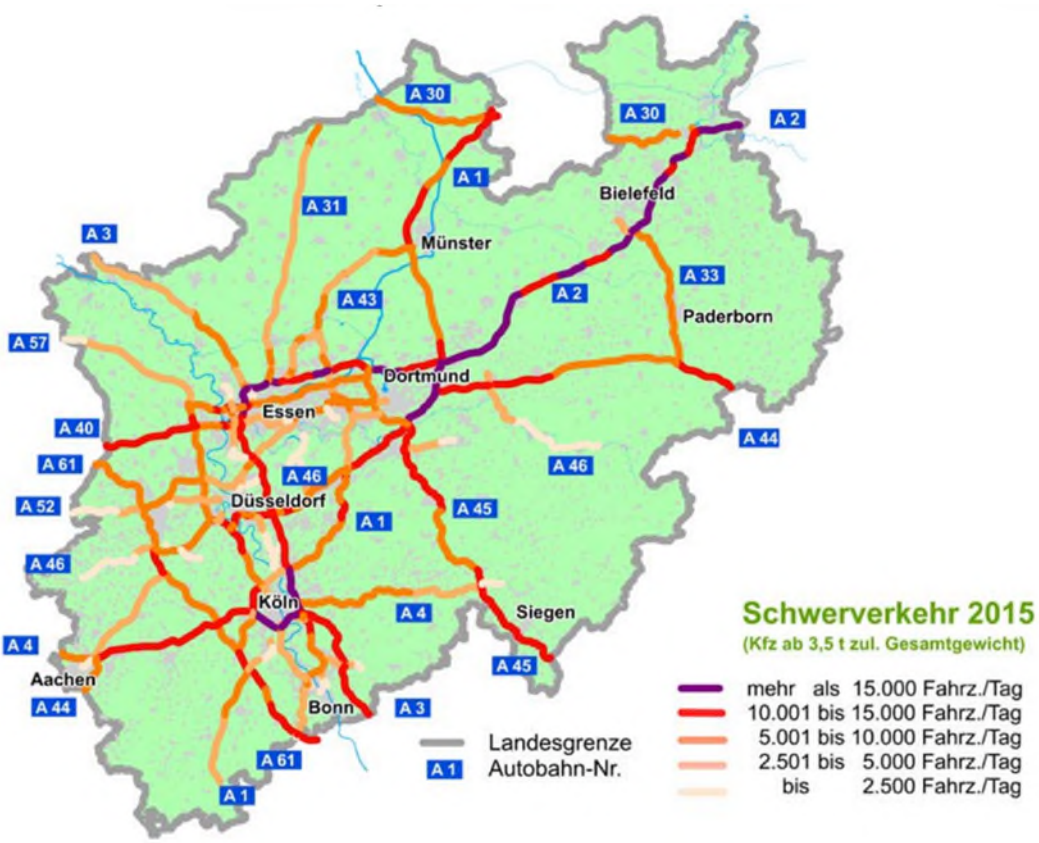
Zulassung in	**NRW**	**D**
Versand	57.881	293.995
Empfang	52.521	288.335

[768] Siehe VM-NRW (2019/1)

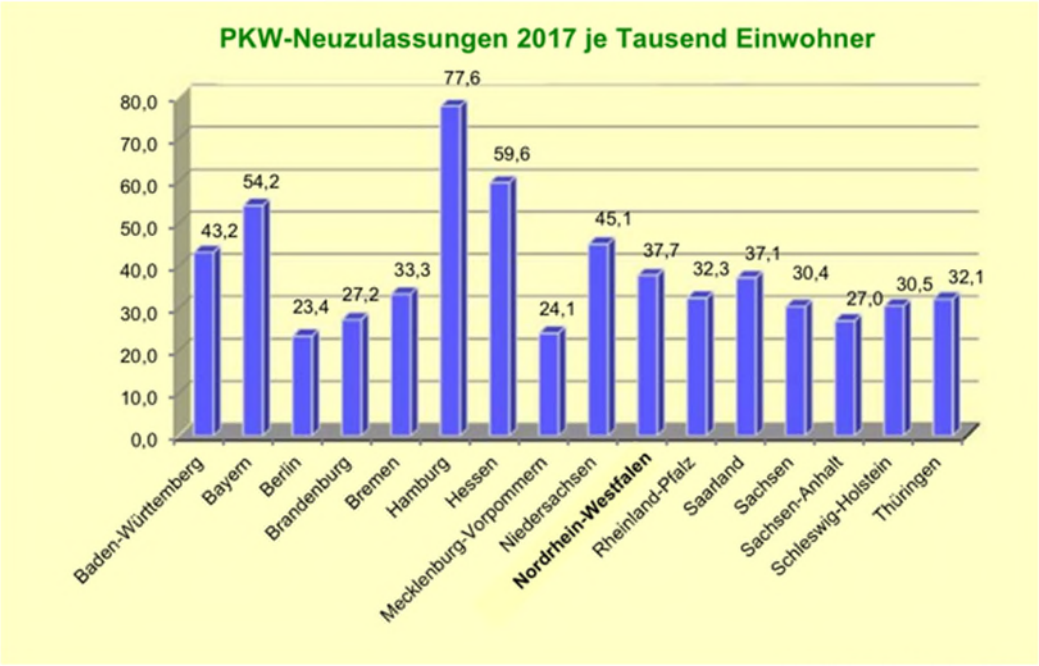
[769] Einseitige Strecken mit mehr als 2 Streifen wurden halb gerechnet

Grafik 27: Straßennetz NRW





Grafik 28: PKW-Neuzulassungen



Quelle: Kraftfahrt-Bundesamt

Grafik 29: Führerscheine junger Menschen[770]

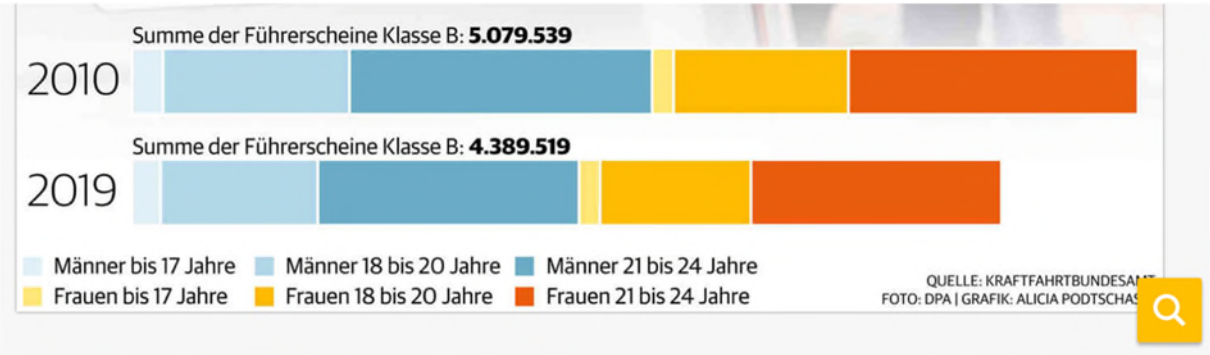
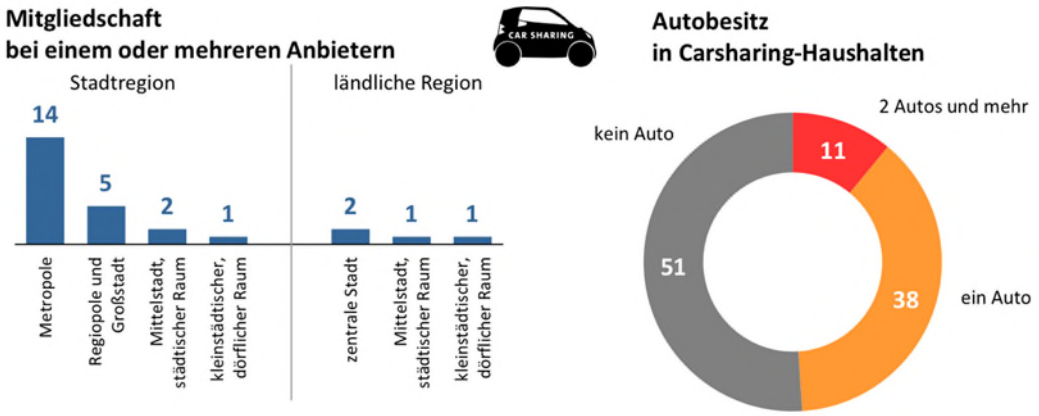


Tabelle 50: Anteil der jungen Menschen mit Führerschein – Altersgruppe 18 bis 24	
2010	85,8%
2016	81,9%
2018	79,2%

Anmerkung: Der Rückgang findet ausschließlich in den großen Städten statt. Auf dem Land machen weiterhin zwei Drittel der Jugendlichen schon mit 17 ihren Führerschein, in den Städten nimmt die Zahl ab oder die Jugendlichen machen ihren Führerschein erst mit 23 oder 24.

Grafik 30: Carsharing[771] – Deutschland 2017



[770] Siehe Rinke (2019/1)

[771] Siehe BMVI (2019/1)

Anlage 36: Ladestationen für Elektroautos

Zur Begrifflichkeit: Wir bezeichnen den einzelnen Anschluss als Ladepunkt. Einen Ladeplatz mit mehreren Anschlüssen nennen wir Ladestation.

Wir rechnen mit 35 Mio. PKW mit 400 km Reichweite (NRW 7 Mio.). Sie fahren im Schnitt täglich 30 km und werden daher dreimal im Monat mit 60 kWh geladen. Kosten pro Anschluss für private Ladepunkte: 1.000 Euro, für öffentliche Ladepunkte (an Ladestationen = Ladeplätzen): 2.000 Euro pro Anschluss, Schnellladestation mit Batteriespeicher und Infrastruktur: 10.000 Euro pro Ladepunkt. Es ist denkbar, dass die Kosten deutlich sinken – wir haben hier vorsichtig kalkuliert.

Es gibt folgenden Bedarf:

- 17,5 Mio. (für 50% PKW) private Ladepunkte für Häuser mit eigenen Parkplätzen, Garagen oder Carports, in der Regel 22 kW Leistung. Kosten ca. 17,5 Mrd. Euro – privat finanziert.
- 100.000 private Ladepunkte in Hotels, Einkaufszentren, Freizeiteinrichtungen usw. – Ladestation in der Regel mit 22 kW. Kosten ca. 100 Mio. Euro – privat finanziert.
- Öffentliche Ladestationen für Wohnungen ohne eigenen Parkplatz mit Ladeanschluss: Geht man davon aus, dass in Wohnvierteln fast alle Parkplätze von Anwohner*innen oder Besuchern genutzt werden und dass die PKW in der Regel zu Hause aufgeladen werden, dann braucht man für 100 Parkplätze jeweils einen Ladepunkt mit 5 Anschlüssen mit je 22 kW. Ich rechne mit 2 Ladevorgängen pro Anschluss am Tag. Das Laden dauert im Schnitt 3 Stunden. Das Laden könnte z. B. über die Parkgebühren erfolgen (z.B. 2 Euro pro Stunde, nachts ab 22 Uhr 1 Euro pro Stunde). Das stellt sicher, dass die Plätze nicht vollgeparkt werden. Vollladen kostet dann 6 bis 8 Euro. Benötigt werden ca. 1 Mio. öffentliche Ladepunkte (in NRW: 200.000). Kosten ca. 2 Mrd. Euro.
- Für Fahrten über 300 km: Laden erfolgt an den 430 Autobahnraststätten und an zentralen Orten in Großstädten oder ländlichen Regionen – insgesamt ca. 1.000 Ladestationen (in NRW ca. 200). Benötigt werden pro Station 5 bis 100 Ladepunkte. Jeder Ladeanschluss mit 150 bis 350 kW, damit in 10 bis 25 Minuten vollgeladen werden kann. Um die Spitzenlast zu verringern, werden die Ladestationen mit Batteriespeichern gepuffert. Damit ergibt sich eine Last von 1 bis 20 MW. Dazu müssen die

Ladeplätze an das Mittelspannungsnetz angeschlossen werden. Kosten für 1.000 Stationen mit 50.000 Ladepunkten: 500 Mio. Euro – privat finanziert.

- LKW laden über die Oberleitung und über Ladestationen beim Lieferanten oder Kunden. Daher werden nur wenige (je 10) Ladestationen an den Raststätten und zentralen Ladeorten benötigt. Kosten für 4.000 km Oberleitung: 12 Mrd. Euro – finanziert über Mautgebühren. Kosten für 10.000 Ladestationen: 100 Mio. Euro – privat finanziert.

Insgesamt ergibt das folgende Kosten: 18 Mrd. € privat, 12 Mrd. € Maut, 2 Mrd. € Kommunen.

Anlage 37: Bahnverkehr

Tabelle 51: Bahn – Güterverkehr[772] – Stand 2016 – in 1000 Tonnen

	NRW	D
Versand		
NRW/D -> Inland	50.480	234.059
seit 2000	-31,0%	+21,3%
NRW/D -> Ausland	13.963	49.226
seit 2000	+64,3%	+16,3%
Empfang		
Inland -> NRW/D	45.345	234.059
Seit 2000	-31,5%	+21,3%
Ausland -> NRW/D	16.157	57.889

Vorgeschlagene KV-Güterterminals in NRW[773]

Die Studie der TU Berlin im Auftrag des NEE schlägt vor, künftig nicht mehr Container, sondern die Sattelauflieger der Lastzüge auf speziellen Wagen zu verladen. Benötigt werden künftig 50 KV-Terminals in Deutschland, davon 10 in NRW: Münster, Bielefeld, Paderborn, Duisburg, Dortmund, Wuppertal, Mönchengladbach, Aachen (Drehscheibe für den Frankreichverkehr), Köln, Siegen. Damit können 50 Prozent des Güterfernverkehrs auf die Schiene verlagert werden.

Tabelle 52: Öffentlicher Linienverkehr

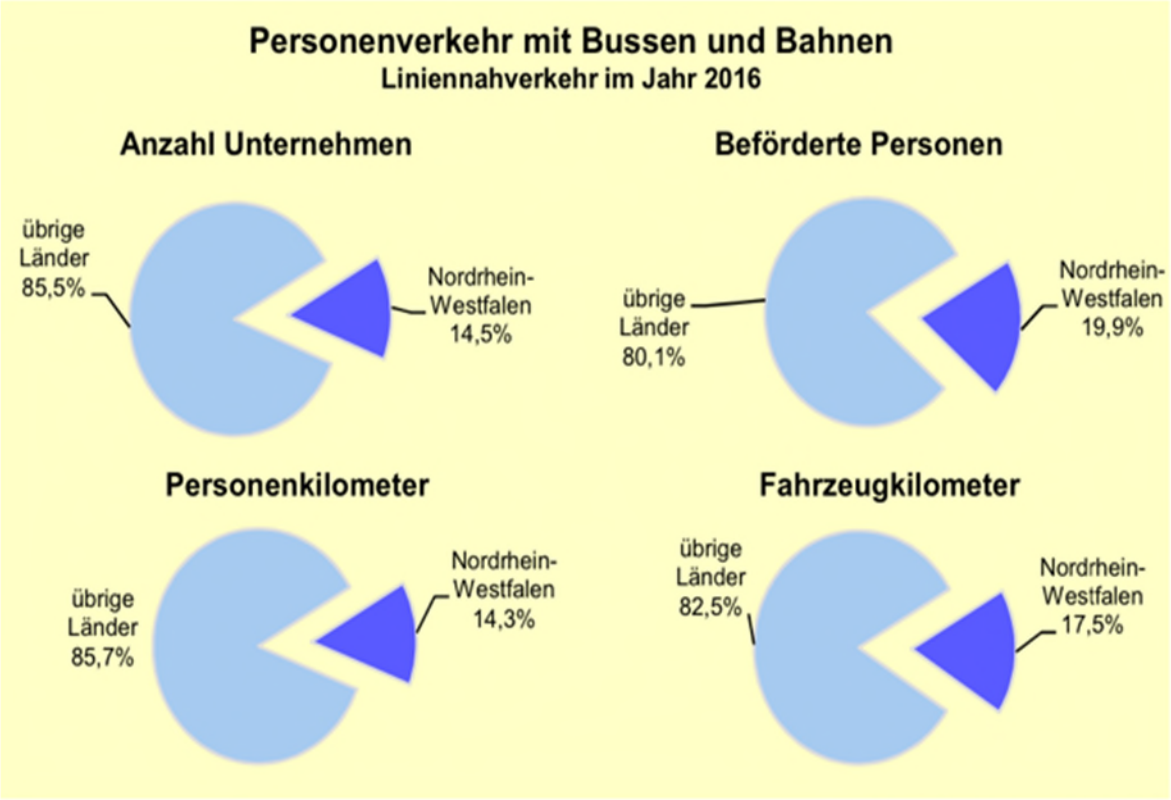
(Stand 2014 – Mio. Pkm)

Bahn	9.828
Straßenbahn	3.539
Bus	9.561
Gesamt	22.929

[772] Siehe VM-NRW (2019/1)

[773] Siehe NEE (2020/1)

Grafik 31: ÖPNV in NRW



Quelle: Statistisches Bundesamt

Tabelle 53: Emissionen beim Bau von U-Bahn und Straßenbahn[774]

Es handelt sich nur um grobe Schätzungen, da die Emissionen stark von der Bauweise und den örtlichen Bedingungen abhängen. Die Amortisationszeit hängt auch davon ab, wie viele Fahrgäste die Bahn nutzen und wie viele vom Auto auf die Bahn umsteigen.

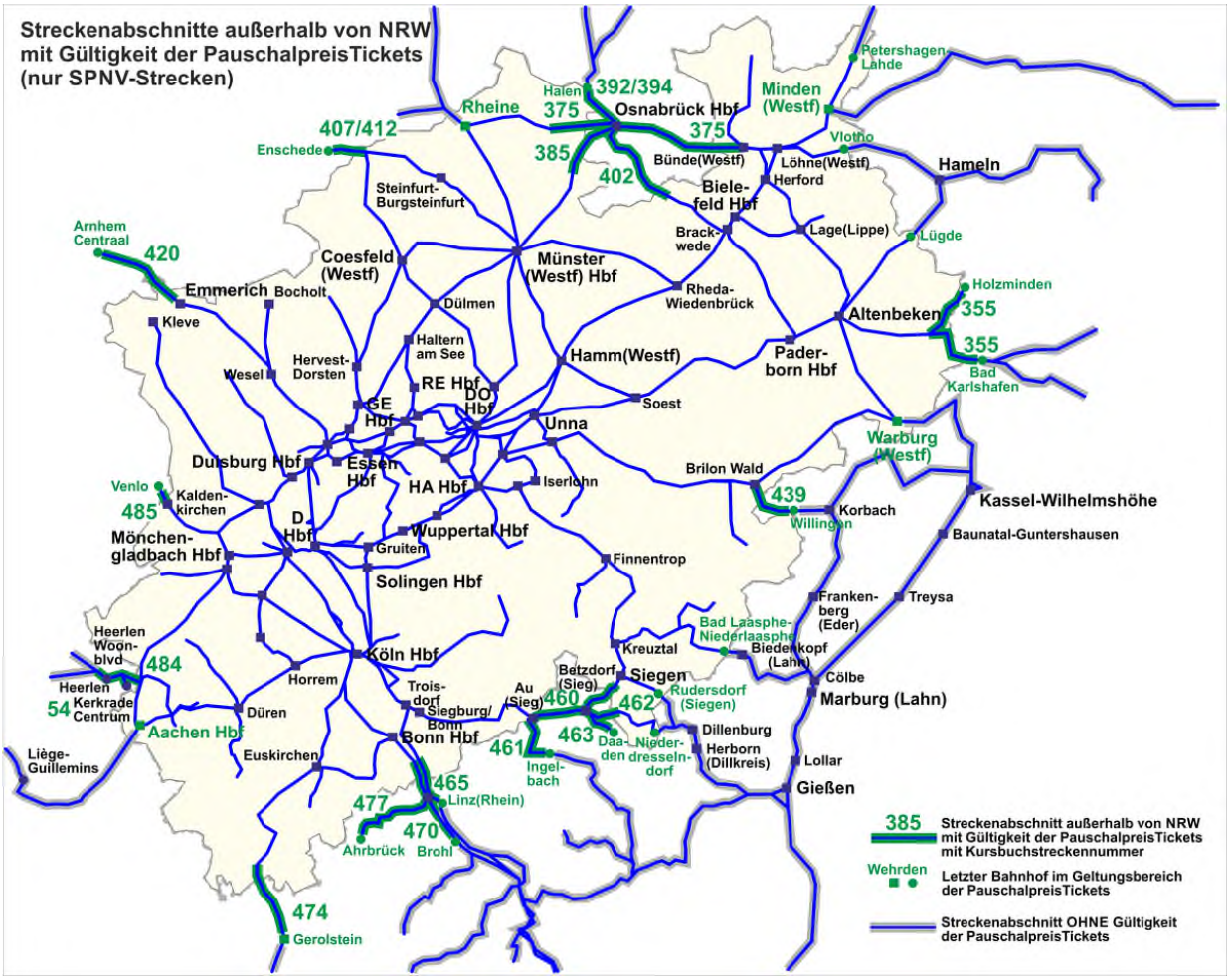
	Emissionen pro km	Amortisationszeit
U-Bahn – unterirdisch	100 tCO_2	100 Jahre
U-Bahn – oberirdisch	17 tCO_2	
Straßenbahn – Betonbett	12 tCO_2	10 Jahre
Straßenbahn – Schotter oder Rasenbett	7 tCO_2	8 Jahre

Beim U-Bahnbau entstehen die Emissionen zu etwa 70% aus dem Einsatz von Stahlbeton, davon sind 30% durch den Beton verursacht, 35% durch den Stahl und 5% sonstiges, die restlichen 30% entstehen durch Ausschachtung, Bahnhofausstattung, Fahrleitung u.v.a.m. Natürlich kann künftig der Stahl und die anderen Baumaterialien und die Maschinen

[774] Siehe Dittmer (2020/1)

weitgehend CO_2-frei hergestellt werden. Dann bleibt nur 10% Restemissionen bei der Zementherstellung, die nicht vermieden werden können – es sei denn, man kann den Beton durch andere Baustoffe ersetzen. Aber diesen Stand der Technik werden wir erst in 15 bis 20 Jahren erreicht haben.

Grafik 32: Regionalverkehrsstrecken in NRW[775]

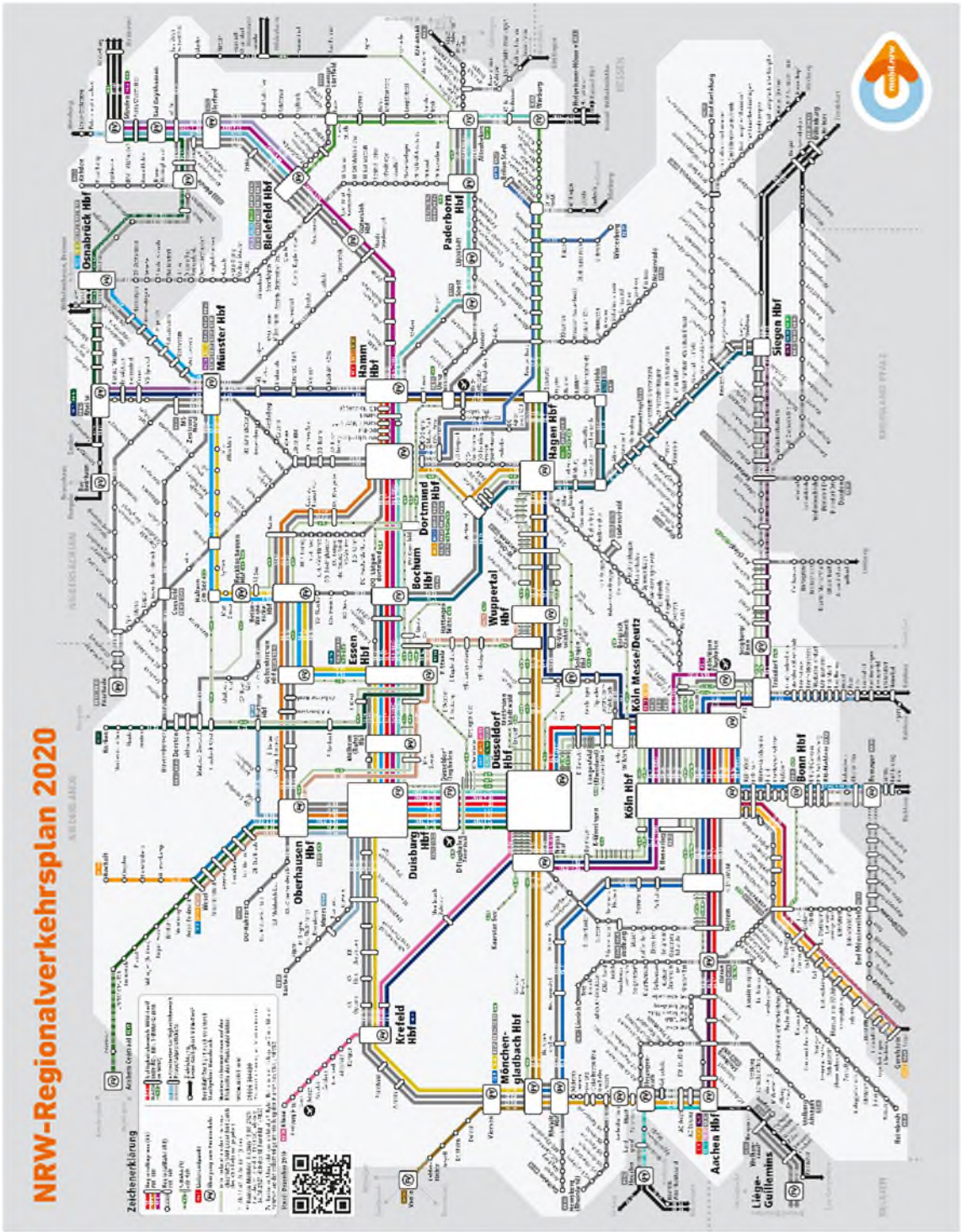


[775] Siehe MVB (2020/1)

Grafik 33: Schienennahverkehr[776]

[776] Siehe Dörrbecker (2021/1)

Grafik 34: Regionalverkehrslinien in NRW[777]



[777] Siehe DB (2020/1)

Anlage 38: Binnenschifffahrt

Soweit nicht anders angegeben stammen die Zahlen aus: Mobilität in Nordrhein-Westfalen – Daten und Fakten 2018/2019 [778]

Fast die Hälfte der deutschen Binnenschifftransporte finden in NRW statt. Deshalb hat die Binnenschifffahrt in NRW mit 16% einen mehr als doppelt so großen Anteil am Güterverkehr wie in Deutschland (8%)[779]. Der größte Teil der Binnenschifffahrt fährt auf dem Rhein, einer der meistbefahrenen Wasserstraßen der Welt. Davon wiederum ist die Strecke von Duisburg nach Rotterdam die am meisten genutzte.

Tabelle 54: Binnenhäfen in NRW – *2017 – Umschlag in 1000 t*

Duisburg	51.893
Köln	12.102
Neuss	8.217
Gelsenkirchen	4.770
Hamm	3.813
Krefeld	3,360
Wesseling	2.830
Rheinberg	1.898
Düsseldorf	1.669
Dortmund	1.574
Essen	1.558
Sonst	34.240
Gesamt	127.924

63% aller Güter werden zwischen Düsseldorf und Hamm umgeschlagen, davon allein 41% in Duisburg, dem größten Binnenhafen der Welt.

[778] Siehe VM-NRW (2019/1)

[779] Siehe BDI (2018/1)

Tabelle 55: Transportgüter– 2017 – in 1000 t

Erze + Steine	36.597
Kohle, Kokerei, Öl	42.900
Metalle	6.665
Chemie	14.808
Abfall + Sekundärrohstoffe	5.621
Landwirtschaft	4.861
Nahrung	4.830
Sonst	4.000
Gesamt	127.924

Die wichtigsten Transportgüter sind immer noch fossile Rohstoffe und Treibstoffe. Da diese zurzeit schrittweise wegfallen, nehmen die Transporte per Binnenschiff ab. Allerdings prognostiziert die BDI-Studie [780] einen stark wachsenden Verkehrsanteil, da die Binnenschifffahrt künftig massiv in das Container-Transport-Geschäft einsteigen wird.

Tabelle 56: Binnenschifffahrt – 2016 – in 1000 t

Versand	
NRW -> Inland	14.808
NRW -> Ausland	28.036
Empfang	
Inland -> NRW	15.136
Ausland -> NRW	69.073

[780] Siehe BDI (2018/1)

Grafik 35: Wasserstraßen und Häfen in NRW

Anlage 39: Emissionen und Reduktionspotenziale in Landwirtschaft und Ernährung

Aufgrund der Zahlen der Tabelle 57 rechnen wir bis 2040 mit einer Reduktion der Emissionen in der Landwirtschaft von 7,6 $MtCO_{2eq}$/a auf ca. 2 $MtCO_{2eq}$/a.

Tabelle 57: Reduktionspotenziale in der Landwirtschaft und Ernährung

Emissionsquelle	THG	Menge $MtCO_{2eq}$/Jahr	Maßnahmen	Einsparung pro Jahr
Tierhaltung (mit Güllebehandlung)	CH_4 N_20	**4,8**		
Enterische Fermentation	CH_4	3,3 [e]	Reduktion des Tierbestandes: Fleischkonsum -25 % bzw. -48 %	0,4-0,9 [a]
			Milchkonsum -23 %	0,5 [a]
			N-optimierte Fütterung – Potenzial ist abhängig von der Tierart 4-18%	0,1-0,6 [d]
			Einsparpotenzial	~ 1 - 2
Wirtschaftsdüngermanagement (Gülle und Mist)	CH_4 N_2O	1,5 [e]	Optimierung der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdünger	0,1 [b]
			Optimierung Klimaschutzwirkung bei der Stromerzeugung aus Biogas: [c] * Abdeckung Gärrestlager * Vermehrte Wärmenutzung * Verdoppelung des Einsatzes von Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen	 0,7 [b] 0,2 [b] 0,8 [b]
			Einsparpotenzial	~ 1,4[781]

[781] Die Maßnahmen im Wirtschaftsdüngermanagement können nicht einfach addiert werden. So führt eine Halbierung durch die Abdeckung der Lager und eine Halbierung durch mehr Vergärung rechnerisch nur zu eine Gesamtreduktion um drei Viertel.

Bodenbearbeitung (Dünger)	N_2O	2,8	Verbesserung der N-Produktivität der Düngung und Reduzierung von N-Überschüssen um 30 kg N pro ha landwirtschaftlich genutzter Fläche bis 2030[782]	0,8 [b]
			Ersatz von Mineraldünger durch Leguminosenanbau auf 15 % der konventionellen Fläche	0,05-0,2 [a]
			Einsparpotenzial	~ 1
			40% Ökolandbau bis 2040[783] sukzessiver Humusaufbau: • 40% bis 2040[784]	0,2-0,5 [b] 0,4 [e]
			Einsparpotenzial	~ 0,6 – 0,9
Lebensmittelabfälle bei Produktion, Transport, Verarbeitung und Lagerung			Verringerung der vermeidbaren Abfälle um 60 %[785]	1,9 [a,e]
			Einsparpotenzial	~ 0,6[786]
Landwirtschaft gesamt		**7.6**	**THG-Vermeidungspotenzial**	**~ 5 - 6,3**

Folgende Quellen, die als Grundlage der Berechnungen dienen, werden mit Buchstaben ausgezeichnet:

a Öko-Institut (2019/2): Quantifizierung von Maßnahmenvorschlägen der deutschen Zivilgesellschaft zu THG - Minderungspotenzialen in der Landwirtschaft bis 2030

b Osterburg (2009/1), Thünen (2013/1)

c UBA (2019/12)

d NABU (2010/1): Klimaschutz in der Landwirtschaft

e eigene Berechnung

[782] NRW hat das Ziel, den N-Überschuss auf 60 kgN/ha zu senken, eine Reduktion um 30kg N/ha.

[783] Der aktuelle EU-Zielwert für den Anteil an Ökolandbau bis 2030 liegt bei 25%. Daher halten wir für 2040 einen Anteil von 40% für realistisch erreichbar.

[784] Die Umstellung konventioneller Betriebe auf ökologischen Landbau führt durch Humusaufbau in einem Planungszeitraum von 10 - 20 Jahren zu einer zusätzlichen CO_2-Bindung von 7 bis 17 t/ ha.

[785] Durch die Reduktion der Lebensmittelabfälle reduziert sich die Anbaufläche. Wir gehen davon aus, dass die zusätzliche Fläche im Ökolandbau gebraucht wird.

[786] Die Reduktion der Lebensmittelabfälle kann nicht zu den THG-Emissionsreduktionen addiert werden, sondern reduziert diese nur anteilig. Wir rechnen daher nur mit einem Viertel.

Soweit nicht anders angezeigt, stammen die Zahlen von 2018.

Berechnung der Emissionen aus der Tierhaltung

Die Emissionen der Tierhaltung inklusive Güllebehandlung betrugen 2018 in NRW 4,8 $MtCO_{2eq}/a$ (siehe Anlage 1). Zur Berechnung der Anteile der Emissionen durch die enterische Fermentation[787] und den Wirtschaftsdünger aus der Tierhaltung in NRW wurden die

Tabelle 58: Emissionen der Tierhaltung in Deutschland

Emissionsquelle	$MtCO_{2eq}/a$	THG	Anzahl Tiere
Landwirtschaft gesamt	**66,3**		
Enterische Fermentation	25,5	CH_4	
Rinder	24,4		12,3 Mio
Schweine	0,7		27,6 Mio
Schafe, Geflügel, u.a.	0,5		Schafe 1,6 Mio Geflügel 173,6 Mio
Wirtschaftsdüngermanagement	9,5	$CH_4 + N_2O$	
Rinder	5,3		12,3 Mio
Schweine	2,9		27,6 Mio
Schafe, Geflügel, u.a.	0,3		Schafe 1,6 Mio Geflügel 173,6 Mio
Indirekte N_2O-Emissionen	1,1	N_2O	

Zahlen aus dem Handbuch Klimaschutz Deutschland aus dem Jahr 2017 zugrunde gelegt. Die Zahlen der Tierbestände der Rinder und Schweine sowie Schafe stammen aus der Bundeslandwirtschaftsstatistik vom November 2017. Die Geflügelzahl ist von 2016, da die Geflügelzahlen nur alle 2/3 Jahre erhoben werden. [788]

[787] Der Begriff „Enterische Fermention“ bezeichnet einen Teil des Verdauungsprozesses von Wiederkäuern wie Rindern, Ziegen und Schafe. Dabei wird in erheblichen Mengen Methan freigesetzt.

[788] Siehe BMEL (2020/1)

Die Umrechnung der Zahlen auf Basis der Tierbestände in NRW[789] ergab für die Emissionen aus der Viehwirtschaft rechnerisch nur 4,3 $MtCO_{2eq}$ anstelle der in der NRW-Statistik angegebenen 4,8 $MtCO_{2eq}$/a. Diese Abweichung ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass Anzahl der Tiere in Weidetierhaltung und der Anteil der Milchkühe an den Rinderbeständen sich in NRW vom Durchschnitt in Deutschland unterscheidet. Wir haben die fehlenden Emissionen von 0,5 $MtCO_{2eq}$/a in der Mehrzahl (0,3 $MtCO_{2eq}$/a) der enterischen Fermentation und den Rest (0,2 $MtCO_{2eq}$ /a) den Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger (Gülle und Mist) zugeordnet.

Tabelle 59: Emissionen der Tierhaltung in NRW

*(die rot formatierten Zahlen wurden von den Autor*innen berechnet)*

Emissionsquelle	$MtCO_{2eq}$/a	THG	Anzahl Tiere
Tierhaltung inklusive Güllebehandlung	4,8		
Enterische Fermentation	3,0 +0,3 = 3,3	CH_4	
Rind	2,8		1,4 Mio Milchkühe 0,4 Mio
Schweine	0,2		7,0 Mio
Schafe, Geflügel, u.a.	0,02		Schafe 0,1 Mio Legehennen 5,8 Mio
Wirtschaftsdüngermanagement	1,3 +0,2 = 1,5	CH_4 + N_2O	
Rind	0,6		1,4 Mio
Schweine	0,7		7,0 Mio
Schafe, Geflügel, u.a.	0,01		Schafe 0,1 Mio Legehennen 5,8 Mio

[789] Siehe IT.NRW (2017/2)

Tabelle 60: Berechnung der CH_4-Reduktionen der enterischen Fermentation

	$MtCO_{2eq}/a$		Reduktion
Deutschland	25,5	Reduktion des Tierbestandes: Fleischkonsum -25 % bzw. -48 %	3,1-7,3 [a]
		Milchkonsum -23 %	4 [a]
NRW	3,3	Reduktion des Tierbestandes: Fleischkonsum -25 % bzw. -48 %	0,4 – 0,9
		Milchkonsum -23 %	0,5

Biogasanlagen

Wir rechnen mit einer Einstellung des Anbaus von Energiepflanzen, dafür aber mit einem verstärkten Einsatz von Wirtschaftsdünger. Leider gibt es hinsichtlich des bisherigen Wirtschaftsdüngereinsatzes in Biogasanlagen keine zuverlässigen statistischen Informationen. Das DBFZ (Deutsche Biomasseforschungszentrum Leipzig) weist auf Grundlage einer Betreiberbefragung einen durchschnittlichen Wirtschaftsdüngeranteil von 43 % aus. Allerdings ist dieser Wert nicht mit der durchschnittlichen Anlagengröße gewichtet. Im gewichteten Mittel ergibt sich lediglich ein Anteil von 35 %. Wird bei einer insgesamt installierten Anlagenkapazität in Deutschland von 2.904 MW von einem durchschnittlichen Gülleanteil von 35 % ausgegangen, liegt der Güllebedarf dafür bei etwa 28 Mio. m³. Dies entspricht einem Anteil am Gülleaufkommen von nur 15 %.

Wenn künftig der Gülleanteil in den bestehenden deutschen Biogasanlagen auf durchschnittlich 50 Prozent erhöht wird, werden insgesamt 49 Mio. m³ Gülle benötigt (26 % des Gesamtaufkommens). Soll er hingegen auf 70 Prozent erhöht werden, sind insgesamt 110 Mio. m³ Gülle erforderlich (58 % des Aufkommens). Bei einem Anstieg des Gülleanteils von 35 auf 70 Prozent Gülle erhöht sich der Bedarf um 0,225 kg CO_{2eq}/kWh. Daraus ergibt sich insgesamt ein THG-Einsparpotenzial von 5,2 $MtCO_{2eq}/a$ für Deutschland. Für NRW werden daher 0,8 $MtCO_{2eq}/a$ benötigt. Auch das UBA rechnet mit einer Erhöhung auf zwei Drittel.[790]

Reduzierung des Mineraldüngereinsatzes

NRW strebt eine Reduzierung der -Überschüsse von Stickstoff (N) um 30 kg N/ha landwirtschaftlich genutzter Fläche bis 2030 an. Dies ergibt bei einer landwirtschaftlich genutzten

[790] Siehe UBA (2019/12), Thünen (2013/1)

Fläche in NRW von 1,6 Mio. ha eine Einsparung von 48 Mio. kg N. Die Einsparung von 1 kg N bewirkt eine THG-Minderung von 17,5 kg CO_{2eq} pro Jahr. Daraus ergibt sich:

48.000 t N * 17,5 kg CO_{2eq} => Einsparung von 0,8 $MtCO_{2eq}$/a

Reduktionen durch Erhöhung Anteil Ökolandbau

Nach dem Thünen Report 11 führt eine Verdoppelung der Fläche des Ökolandbau im Bezugsjahr 2010 zu einer THG-Reduktion um 0,4 bis 0,9 $MtCO_{2eq}$/a.[791] Die THG-Emissionen der Landwirtschaft betrugen in diesem Jahr für Deutschland 67,5 $MtCO_{2eq}$/a. 2010 war die Fläche des Ökolandbau 990.702 ha (5,9 % der Agrarfläche).[792] Das bedeutet: 990.000 ha Ökolandbau sparen 0,4 bis 0,9 $MtCO_{2eq}$/a.

Die Fläche des Ökolandbau in NRW im Jahr 2019 war 89.000 ha (6 %). Die EU hat für 2030 einen Anteil von 25% Ökolandbau als Ziel vorgegeben. Wenn wir vorsichtig annehmen, dass der jährliche Zuwachs danach etwas geringer sein wird, kommen wir für 2040 auf einen Anteil von 40%. Damit ergibt sich für 2040 eine Fläche von 594.000 ha und eine THG-Reduktion um 0,2 - 0,5 $MtCO_{2eq}$/a.

Zusätzliche Reduktion durch Humusaufbau im Ökolandbau

Die Umstellung konventioneller Betriebe auf ökologischen Landbau würde, konservativ abgeschätzt, mit 50 % der CO_2-Bindung durch Humusaufbau in einem Planungszeitraum von 10 - 20 Jahren zu einer zusätzlichen CO_2-Bindung von 7 bis 17 t/ha führen.[793] Damit ergibt sich ab 2040 eine zusätzliche Reduktion von 594.000 * 0,7 t/ha im Jahr = 0,4 $MtCO_{2eq}$/a.

Lebensmittelverschwendung

Nach Berechnungen des Öko-Instituts entstehen durch die vermeidbare Vernichtung von Lebensmitteln bei Produktion, Transporten, Verarbeitung und Lagerung zusätzliche Treibhausgasemissionen in Höhe von ca. 21 $MtCO_{2eq}$/a, davon 14,4 Mt CO_{2eq}/a aus der landwirtschaftlichen Produktion. Besonders groß ist dabei der Anteil der Treibhausgase weggeschmissener Lebensmittel aus der tierischen Erzeugung. Eine Reduzierung der vermeidbaren Abfälle um 60% wird für möglich gehalten, das sind für Deutschland eine Einsparung von 8,6 $MtCO_{2eq}$/a. Für NRW ergäben sich dann entsprechend der Bevölkerungszahl 1,85 $MtCO_{2eq}$/a.

---

[791] Siehe Thünen (2013/1)

[792] Siehe Oekolandbau.de (2020/1)

[793] Siehe Rachmann (2008/1)

Allerdings wurden diese Einsparungen ausgehend von dem heutigen Emissionsniveau berechnet. Wenn es gelingt, wie oben dargestellt, die Emissionen in der Landwirtschaft um 2/3 zu verringern, dann reduzieren sich die zusätzlichen Einsparungen durch die Reduzierung des vermeidbaren Wegwerfens von Lebensmittel entsprechend auf 0,6 $MtCO_{2eq}$/a.

Anlage 40: Emissionen und Reduktionspotenziale in Bodennutzung und Forstwirtschaft

Aufgrund der Zahlen der Tabelle 61 rechnen wir bis 2045 mit einem Anstieg der Kompensationsleistungen des Waldes um 3,1 $MtCO_{2eq}$/a und der Wiesen um 0,3 $MtCO_{2eq}$/a, sodass die gesamte Kompensationsleistung von 5,9 $MtCO_{2eq}$/a auf 9,3 $MtCO_{2eq}$/a ansteigt. Die Emissionen aus Ackerland und Siedlungsflächen reduzieren sich auf 1,2 $MtCO_{2eq}$/a.

Tabelle 61: Reduktions- und Kompensationspotenziale in Bodennutzung und Wald für NRW

Emissionsquelle	THG	Menge $MtCO_{2eq}$/Jahr	Maßnahmen	Einsparung pro Jahr
Wald und Holznutzung	CO_2	-5,3	Wiederaufforstung und Neuaufforstung (ca. 96.000 ha)[794]	1,6 [a]
			Qualitätsverbesserung des Waldes[795]	0,5
		-0,2 [e]	Erhöhung der Holznutzung (Kohlenstoffspeicher, stoffliche Substitution)	1 [b]
			Einsparpotenzial Wälder	~ 3,1
Grünland und Moore	CO_2 N_2O	-0,4	11.500 ha ehemalige Moore wieder vernässen	0,3-0,4 [b]
Kompensationen gesamt		**-5,9**		**~ 3,4 -3,5**
Ackerland	CO_2 N_2O	0,9	Umwandlung in Grünland auf 1 % der bisher für Energiepflanzenanbau genutzten landwirtschaftlichen Fläche > 16.000 ha	0,2

[794] Dieser Wert wird voraussichtlich erst 2045 erreicht.

[795] Aufgrund der Zusammensetzung des Waldes in NRW und der Sturmschäden gehen wir davon aus, dass in NRW ein Waldumbau zu einem Mehrgenerationenmischwald erfolgen wird. Für diese Qualitätsverbesserung haben wir 10% der bisherigen THG-Senkung angenommen. Wir gehen aufgrund der Waldstruktur in NRW davon aus, dass der Rückgang der Aufnahme von CO_2, wie er bei älteren Wäldern stattfindet, bis 2050 zu vernachlässigen ist.

Siedlungsflächen	CO_2	0,5	Keine Einsparung	0
Bodennutzung ohne Wiesen und Wälder gesamt		**1,4**	**THG-Vermeidungspotenzial**	**~ 0,2**

Folgende Quellen, die als Grundlage der Berechnungen dienen, werden mit Buchstaben ausgezeichnet:

a eigene Berechnung

b Osterburg (2009/1), Thünen (2013/1)

Soweit nicht anders angezeigt, stammen die Zahlen von 2018.

Berechnung der Kompensationen des Waldes

Die geförderten Erstaufforstungen erreichten in Deutschland lediglich Anfang der 1990er Jahre über 5.000 ha/a und sind seitdem, insbesondere seit der Jahrtausendwende, auf unter 2.000 ha/a zurückgegangen. Bei unseren Berechnungen gehen wir davon aus, dass der Energiepflanzenanbau auf 10% der Landwirtschaftsfläche (160.000 ha) eingestellt wird und davon mehr als die Hälfte (6%) aufgeforstet wird. Damit ergibt sich ein Zuwachs der Waldfläche um 12% (96.000 ha) bis 2040.

Der durchschnittliche Zuwachs an Biomasse auf den Erstaufforstungsflächen kann näherungsweise mit etwa 16,5 tCO_2/ha*a veranschlagt werden. Dies ergibt für 96.000 ha eine jährliche zusätzliche Senkenleistung von 1,6 $MtCO_{2eq}$/a.[796]

Kompensationen aus der Holznutzung

Die Holznutzung insbesondere im Bausektor führt zur langfristigen Speicherung von Kohlenstoff um Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte und zur Vermeidung von Emissionen der Baustoffindustrie – insbesondere bei der Zementproduktion (siehe im Kapitel »Industrie«). Sie hilft uns daher erheblich, die Klimaneutralität bis 2040 zu erreichen. Langfristig muss natürlich dafür Ersatz gefunden werden, da das Holz irgendwann doch verrottet oder gar als Restholz verbrannt wird. Da wir keine Daten für NRW haben, berechnen wir die Wirkung aufgrund der Waldfläche:

Bisherige Kompensation:

- Waldfläche Deutschland: 11.4 Mio. ha – Kompensation durch Holznutzung = 3,0 $MtCO_{2eq}$/a

[796] Eine Studie des Thünen-Institut rechnet für 40.000 ha mit einer Senke von 0,7 $MtCO_{2eq}$/a – siehe Krug (2011/1)

- Waldfläche NRW: 0,9 Mio. ha > berechnete Kompensation = 0,24 $MtCO_{2eq}$/a

Verstärkung der Holznutzung:

- Deutschland => Eine Studie des Thünen-Institut[797] gibt dafür eine Kompensation von Emissionen in Höhe von 17 $MtCO_{2eq}$/a an. Diese besteht aus 4,7 $MtCO_{2eq}$/a durch Kohlenstoffspeicherung, aus 8,4 $MtCO_{2eq}$/a durch stoffliche Substitution und aus 3,9 $MtCO_{2eq}$/a aus energetischer Substitution. Die stoffliche Substitution (durch Holzbauweise) erspart in erheblichem Umfang den Einsatz von Zement und anderen Baustoffen. Davon berücksichtigen wir aber nur ein Drittel, da wir davon ausgehen, dass die Energie für die Brennöfen der Zementindustrie bis 2040 durch Erneuerbare Energie produziert wird. Das restliche Drittel entsteht durch die chemische Umwandlung des Kalziumkarbonats zu Zement und kann nicht vermieden werden. Die energetische Substitution rechnen wir nicht mit, da wir davon ausgehen, dass 2040 sowieso die komplette Energieversorgung durch Erneuerbare Energie erfolgt. Damit bleibt eine Kompensation von 7,5 $MtCO_{2eq}$/a, die wir berücksichtigen.
- NRW => umgerechnet auf NRW nach Waldfläche (8%) ergibt sich damit eine Kompensationsleistung durch die Holznutzung von 0,6 $MtCO_{2eq}$/a. Geht man aber bei der Bautätigkeit von der Bevölkerungszahl (21%) aus, dann ist die stoffliche Kompensation mehr als doppelt so groß, sodass wir insgesamt mit einer Kompensation von 1 $MtCO_{2eq}$/a rechnen.

Moore

Die ehemaligen trockengelegten Moore in NRW emittieren Treibhausgase im Umfang von 0,4 $MtCO_{2eq}$/a. Davon kann und soll ein Drittel (11.500 ha) wiedervernässt werden. Das THG-Minderungspotenzial beträgt 30 - 35 tCO_{2eq}/ha*a, je nach Tiefe der Drainage. Je tiefer die Wasserstände wieder gelegt werden, desto größer ist die Klimaschutzwirkung. Insgesamt reduzieren sich die Emissionen dadurch um 0,3 - 0,4 $MtCO_{2eq}$/a.

Ackerland

Wenn wie in dieser Studie vorgesehen der Energiepflanzenanbau eingestellt wird, werden neben der Bewaldung und anderen Nutzungen 1 % (16.000 ha) der bisherigen Ackerflächen in NRW künftig für Naturschutz (Dauergrünland, offene Landschaften) als

[797] Siehe Thünen (2013/1)

Ausgleichsflächen genutzt. Damit ergibt sich ein THG-Reduktionspotenzial für Etablierung von Dauergrünland in NRW von 10 t CO_{2eq} /ha*a => 0,2 $MtCO_{2eq}$.

Siedlungsflächen

Auch die Siedlungsflächen, die auf früheren trockengelegten Mooren oder Feuchtwiesen eingerichtet wurden, emittieren in erheblichem Umfang CO_2. Allerdings kommt hier eine Wiedervernässung in der Regel nicht in Frage, sodass die Reduktionspotenziale gering sind.

Quellen

ADFC (2019/1): Klimaschutz durch Radverkehr in Schleswig-Holstein. Abgerufen unter: https://www.adfc-sh.de/attachments/article/389/191109-LV-Beschluss-KlimaschutzdurchRadverkehr.pdf am 31.3.2021

AEE (2013/1), Agentur für Erneuerbare Energien: Potenzialatlas Bioenergie in den Bundesländern: Nordrhein-Westfalen. Abgerufen unter: https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/245.AEE_Potenzialatlas_Bioenergie_Nordrhein-Westfalen_jan13.pdf am 26.1.2021

AEE (2020/1), Agentur für Erneuerbare Energien: Bundesländer-Übersicht zu Erneuerbaren Energien - Treibhausgasemissionen (ohne internationalen Luftverkehr) pro Kopf (2015, in t). Abgerufen unter: https://www.foederal-erneuerbar.de/uebersicht/bundeslaender/BW%7CBY%7CB%7CBB%7CHB%7CHH%7CHE%7CMV%7CNI%7CNRW%7CRLP%7CSL%7CSN%7CST%7CSH%7CTH%7CD/kategorie/klimaschutz/auswahl/788-treibhausgasemission/#goto_788 am 14.11.2020

AEE (2020/2), Agentur für Erneuerbare Energien: Landesinfo Schleswig-Holstein. Abgerufen unter: https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/SH/kategorie/mobilitaet/auswahl/1067-elektromobilitaet_-_/sicht/diagramm/#goto_1067 am 31.3.2021

AGEE-Stat (2020/1), BMWi, Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik: Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Abgerufen unter: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2019-excel.xlsx;jsessionid=8E70664902419E00B6D50044F17A7D39?__blob=publicationFile&v=23 am 26.1.2021

Agora Energiewende (2015/1): Aktionsplan Loadmanagement. Abgerufen unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2014/aktionsplan-lastmanagement/Agora_Aktionsplan_Lastmanagement_web.pdf am 31.3.2021

Agora Energiewende (2018/1): Die Kosten von unterlassenem Klimaschutz für den Bundeshaushalt. Die Klimaschutzverpflichtungen Deutschlands bei Verkehr, Gebäuden und Landwirtschaft nach der EU-Effort-Sharing-Entscheidung und der EU-Climate-Action-Verordnung. Abgerufen unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Non-ETS/142_Nicht-ETS-Papier_WEB.pdf am 31.3.2021

Agora Energiewende (2018/2), Agora Verkehrswende: Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Abgerufen unter: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Die_Kosten_synthetischer_Brenn-_und_Kraftstoffe_bis_2050/Agora_Syn-Cost-Studie_WEB.pdf am 31.3.2021

Agora Energiewende (2019/1), Agora Verkehrswende: 15 Eckpunkte für das Klimaschutzgesetz. Abgerufen untern: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/15_Eckpunkte_fuer_das_Klimaschutzgesetz/Agora_15_Eckpunkte_Klimaschutzgesetz_WEB.pdf am 31.3.2021

Agora Energiewende (2019/2), Agora Verkehrswende: Klimaschutz auf Kurs bringen. Wie eine CO_2-Bepreisung sozial ausgewogen wirkt. Abgerufen unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Abgaben_Umlagen/CO2-Rueckverteilungsstudie/Agora-Verkehrswende_Agora-Energiewende_CO2-Bepreisung_WEB.pdf am 31.3.2021

Agora Energiewende (2019/3), Wuppertal Institut: Investitionsdilemma der energieintensiven Industrie lösen und industriellen Klimaschutz ermöglichen. Abgerufen unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/166_A-EW_Klimaneutrale_Industrie_Ausfuehrliche-Darstellung_WEB.pdf am 31.3.2021

Agora Energiewende (2020/1): Wie passen Mieterschutz und Klimaschutz unter einen Hut? Abgerufen unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020_07_Warmmieten/A-EW_190_Mieterschutz_Klimaschutz_WEB.pdf am 9.11.2020

Agora Energiewende (2020/2): Pressemitteilung: Warmmiete macht CO_2-Preis auf Öl und Gas mieterfreundlich. Abgerufen unter: https://www.agora-energiewende.de/presse/neuigkeiten-archiv/?tx_news_pi1%5Bnews%5D=1683&cHash=e82f1a81684c377b4bb667fd8d3fed48 am 9.11.2020

Agora Energiewende (2020/3): Auswirkungen der Corona-Krise auf die Klimabilanz Deutschlands - Eine Abschätzung der Emissionen 2020. Abgerufen unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/_ohne_Projekt/2020-03_Corona_Krise/178_A-EW_Corona-Drop_WEB.pdf am 14.11.2020

Agora Energiewende (2020/4), Wuppertal Institut: Klimaneutrale Industrie - Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Abgerufen unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf am 15.1.2021

Agora Energiewende (2020/5), Agora Verkehrswende - erstellt durch Wuppertal Institut & Prognos AG, Öko-Institut: Klimaneutrales Deutschland. Abgerufen unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_192_KNDE_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf am 15.1.2021

Agora Energiewende (2020/6): Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019. Abgerufen unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Jahresauswertung_2019/171_A-EW_Jahresauswertung_2019_WEB.pdf am 26.1.2021

Agora Energiewende (2020/7); Agora Verkehrswende: Der doppelte Booster. Vorschlag für ein zielgerichtetes 100-Milliarden-Wachstums- und Investitionsprogramm. Abgerufen unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020-05_Doppelter-Booster/179_A-EW_A-VW_Doppelter-Booster_WEB.pdf am 11.2.2021

Agora Energiewende (2021/1): Klimaneutralität 2050 - Was die Industrie jetzt von der Politik braucht. Abgerufen unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020-09_DE-Call_for_Action_Industry/A-EW_204_Klimaneutralitaet-2050_Was-Industrie-von-Politik-braucht_WEB.pdf am 3.3.2021

Albrecht (2017/1), Ernst; Reinsch, Thorsten; Poyda, Arne; Taube, Friedhelm; Henning, Christian: Berichte über die Landwirtschaft, Klimaschutz durch Wiedervernässung von Niedermoorböden: Wohlfahrtseffekte am Beispiel der Eider-Treene-Region in Schleswig-Holstein. Abgerufen unter: https://buel.bmel.de/index.php/buel/article/view/178/pdf am 13.3.2021

Allianz pro Schiene (2020/1): Daten & Fakten zur Schieneninfrastruktur. Abgerufen unter: https://www.allianz-pro-schiene.de/themen/infrastruktur/daten-fakten/ am 17.1.2021

ALSTOM (2018/1): H_2-Schienenverkehr Mitteldeutschland Machbarkeitsstudie. Abgerufen unter: https://www.hypos-eastgermany.de/fileadmin/content/downloads/pdf/2018-03-01_H2-Schienenverkehr_in_Mitteldeutschland-oeffentliche_Version.pdf am 21.11.2020

Anderer (2018/1), P., Heimerl, S., Raffalski, N., & Wolf-Schumann, U.: Potenzialstudie Wasserkraft in Nordrhein-Westfalen. Abgerufen unter: https://doi.org/10.1007/s35147-018-0064-5 am 7.2.2021

Anger (2012/1), Dirk; Westfälische Nachrichten: Bundesweit liegt der Schnitt bei 472 Wagen - 374 Autos pro 1000 Münsteraner. Abgerufen unter: https://www.wn.de/Muenster/2012/09/Bundesweit-liegt-der-Schnitt-bei-472-Wagen-374-Autos-pro-1000-Muensteraner-Pkw-Quote-in-Muensterland-Kreisen-hoeher am 10.2.2021

ARC2020 (2021/1): Post-2022 GAP in den Trilog-Verhandlungen: Überlegungen und Ausblick für die GAP-Strategiepläne. Abgerufen unter: https://www.martin-haeusling.eu/images/ARC_Post-2022_CAP_in_Trilogue_Negotiations_DE-v4_2_compressed.pdf am 27.4.2021

Aretz (2017/1), A.; Knoefel, J. & Gährs, S.: Prosumer-Potenziale in NRW 2030. Abgerufen unter: https://www.verbraucherzentrale.nrw/sites/default/files/migration_files/media248763A.pdf am 7.2.2021

Auditorium Friedrichstraße (2019/1): Expertise bündeln, Politik gestalten – Energiewende jetzt! Essenz der drei Grundsatzstudien zur Machbarkeit der Energiewende bis 2050 in Deutschland. Abgerufen unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Themen_und_Projekte/Energiesysteme/dena-Leitstudie/Expertise_buendeln_Studienvergleich.pdf am 22.11.2020

Austermann (2012/1), Felix: BLE-Tagungsband 2012, Verbesserung der Tiergerechtigkeit und Reduzierung der Ammoniak-Emissionen durch funktionsoptimierte Spaltenböden für Mastschweine, abgerufen unter: https://www.ble.de/DE/Projektfoerderung/Foerderungen-Auftraege/Innovationen/Innovationstage/innovationstage_node.html am 22.2.2021

BAFA (2021/1), Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (Wärmenetzsysteme 4.0). Abgerufen unter: https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Waermenetze/waermenetze_node.html am 16.2.2021

Bauchmüller (2020/1): Grüne und Nabu schließen Vogelfrieden. Abgerufen unter: https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/windraeder-vogelschutz-1.5138036 am 23.2.2021

bauen.de (2021/1): Wärmepumpe und Solarthermie kombinieren - Heizkosten sparen. Abgerufen unter: https://www.bauen.de/a/waermepumpe-und-solarthermie-kombinieren.html am 26.2.2021

BCG (2019/1), Boston Consulting Group: Die Zukunft der deutschen Landwirtschaft nachhaltig sichern. Abgerufen unter: http://image-src.bcg.com/Images/Die_Zukunft_der_deutschen_Landwirtschaft_sichern_tcm108-234154.pdf am 3.12.2019

BDEW (2019/1): Wie heizt Nordrhein-Westfalen? - Regionalbericht. Abgerufen unter: https://www.bdew.de/media/documents/BDEW_Heizungsmarkt_Regionalbericht_Nordrhein-Westfalen.pdf am 16.11.2020

BDEW (2019/2), BWE, VDMA, VKU, WWF, Greenpeace, Germanwatch, DUH: 10 Punkte für den Ausbau der Windenergie. Abgerufen unter: https://www.bdew.de/media/documents/Stn_20190903_10-Punktefuer-Ausbau-Windenergie-Verbaende.pdf am 31.3.2021

BDEW (2019/3) Energiemarkt Deutschland 2019. Abgerufen unter: https://www.bdew.de/service/publikationen/bdew-energiemarkt-deutschland-2019/ am 31.3.2021

BDH (2016/1), Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie; Winiewska, P.; Mailach, O.: Bundesverband Der Deutschen Heizungsindustrie: Dezentrale vs. zentrale Wärmeversorgung im deutschen Wärmemarkt. Abgerufen unter: https://www.freie-waerme.de/fileadmin/Freie-Waerme-DE/Downloads-Presse/Dezentrale-vs-zentrale-Waermeversorgung/Studie-Dezentrale-vs-zentrale-Waermeversorgung.pdf am 31.3.2021

BDI (2018/1), (Auftraggeber): BCG (Boston Consulting Group) / Prognos: Klimapfade für Deutschland. Abgerufen unter: https://web-assets.bcg.com/e3/06/1c25c60944a09983526ff173c969/klimapfade-fuer-deutschland.pdf am 16.1.2021

BDW (2020/1): Wasserkraft in Zahlen. Abgerufen unter: https://www.wasserkraft-deutschland.de/wasserkraft/wasserkraft-in-zahlen.html am 7.2.2021

Becker (2020/1), Büttner, Held: Vereinbarkeit des "Referenztemperatur-Modells" mit den Vorgaben der Energieeffizienzrichtlinie (EED) - Analyse im Auftrag von Agora Energiewende. Abgerufen unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020_07_Warmmieten/A-EW_191_Mieterschutz_Klimaschutz_WEB.pdf am 9.11.2020

BET (2013/1): Büro für Energiewirtschaft und technische Planung. Abschlussbericht Perspektive der Fernwärme im Ruhrgebiet bis 2050. Abgerufen unter: https://www.bet-energie.de/fileadmin/redaktion/PDF/Studien_und_Gutachten/Entwicklung_von_Fernwaermeperspektiven_im_Ruhrgebiet_bis_2050_final.pdf

Beuth (2015/1), Hochschule für Technik Berlin, IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg: Ableitung eines Korridors für den Aufbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich. Kurztitel: Anlagenpotential. Abgerufen unter: https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/BeuthHS_ifeu_Anlagenpotenzial_Endbericht_2017.pdf am 22.02.2020

BioSC (2021/1): Nachhaltige Bioökonomie. Abgerufen unter: https://www.biosc.de/nachhaltige_biooekonomie am 18.3.2021

Bitkom (2020/1): Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken. Abgerufen unter: https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/2020-05_bitkom_klimastudie_digitalisierung.pdf am 30.3.2021

Bitkom (2020/2): Mehr als 10 Millionen arbeiten ausschließlich im Homeoffice. Abgerufen unter: https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Mehr-als-10-Millionen-arbeiten-ausschliesslich-im-Homeoffice am 26.4.2021

BMEL (2016/1): Klimaschutz in Land- und Forstwirtschaft, Gutachten wissenschaftlicher Beirat. Abgerufen unter: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/agrarpolitik/Klimaschutzgutachten_2016.pdf?__blob=publicationFile&v=3 am 31.3.2021

BMEL (2019/1): Nationale Strategie zur Verringerung der Lebensmittelverschwendung. Abgerufen unter: in: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ernaehrung/Lebensmittelverschwendung/Nationale_Strategie_Lebensmittelverschwendung_2019.pdf?__blob=publicationFile&v=3 am 31.3.2021

BMEL (2020/1): Statistik und Berichte des BMEL - Tierbestand. Abgerufen unter: https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/tierhaltung/ am 7.3.2021

BMU (2018/1): Klimaschutz in Zahlen - Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik Ausgabe 2018. Abgerufen unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/klimaschutz_in_zahlen_2018_bf.pdf am 16.1.2021

BMU (2019/1): Umwelt in die Algorithmen! Eckpunkte für eine umweltpolitische Digitalagenda des BMU. Abgerufen unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nachhaltige_Entwicklung/eckpunktepapier_digitalisierung_bf.pdf am 31.3.2021

BMVI (2015/1): Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland, (08). Abgerufen unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmvi/bmvi-

online/2015/DL_BMVI_Online_08_15.pdf;jsessionid=F5487ACB7B04788249146C71ABBD974C.live21303?__blob=publicationFile&v=2 am 3.2.2021

BMVI (2016/1), Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Bundesverkehrswegeplan. Abgerufen unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/bundesverkehrswegeplan-2030-gesamtplan.pdf?__blob=publicationFile am 20.11.2020

BMVI (2018/1): Verkehr in Zahlen 2018/2019. Abgerufen unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen_2018-pdf.pdf?__blob=publicationFile am 31.3.2021

BMVI (2019/1), Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Mobilität in Deutschland - MiD - Ergebnisbericht. Abgerufen unter: http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf am 28.11.2020

BMVI (2019/2): Verkehr in Zahlen 2019/2020. Abgerufen unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2019-pdf.pdf?__blob=publicationFile am 4.12.2020

BMVI (2019/3): Mehr Geld für Investitionen in den Öffentlichen Personennahverkehr. Abgerufen unter: https://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/OEPNV/Oeffentlicher-Personenverkehr-Kompakt/oeffentlicher-personenverkehr-kompakt.html am 17.1.2021

BMWi (2014/1): Sanierungsbedarf im Gebäudebestand, Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Abgerufen unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/sanierungsbedarf-im-gebaeudebestand.pdf?__blob=publicationFile&v=3 am 02.01.2021

BMWi (2018/1): Energiedaten: Gesamtausgabe - Stand: August 2018. Abgerufen unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?__blob=publicationFile&v=38 am 31.3.2021

BMWI (2018/2): Bruttostromerzeugung in Deutschland. Abgerufen unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/I/Infografiken/bruttostromerzeugung-in-deutschland.pdf?__blob=publicationFile&v=19 am 26.01.2021

BMWi (2019/1): Energiedaten - Gesamtausgabe. Abgerufen unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?__blob=publicationFile&v=40 am 26.1.2021

BMWi. (2019/2). Kommission "Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung": Abschlussbericht, *1*(1), 1–275. Abgerufen unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abschlussbericht-kommission-wachstum-strukturwandel-und-beschaeftigung.pdf?__blob=publicationFile&v=4 am 26.01.2021

BMWi (2020/1): Zahlen und Fakten – Energiedaten. Abgerufen unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt-xls.xlsx?__blob=publicationFile&v=131 am 23.2.2021

BMWi (2020/2): Ein Stromnetz für die Energiewende. Abgerufen unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/netze-und-netzausbau.html am 3.3.2021

BMWi (2020/3): Bundeskabinett beschließt höheren CO_2-Preis, Entlastungen bei Strompreisen und für Pendler. Abgerufen unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/20200520-bundeskabinett-beschliesst-hoeheren-co2-preis.html am 13.3.2021

BMWi (2021/1): Erneuerbare Energien. Abgerufen unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html am 2.2.2021

BP Deutschland (2020/1): Wo wir sind. Abgerufen unter: https://www.bp.com/de_de/germany/home/wo-wir-sind.html am 5.11.2020

Brade (2016/1): Berichte über Landwirtschaft, Methan-Minderungspotenziale bei Wiederkäuern. Abgerufen unter: https://buel.bmel.de/index.php/buel/article/view/104/Brade_Methanmin.pdf am 22.2.2020

Brot für die Welt (2019/1): Damit Unternehmen die Menschenrechte achten. Abgerufen unter: https://www.brot-fuer-die-welt.de/themen/dossier-wirtschaft-und-menschenrechte/un-treaty-prozess/ am 31.3.2021

Buck (2017/1), Christian: Mit Holz hoch hinaus - das höchste Holz-Hochhaus. Abgerufen unter: https://www.heise.de/newsticker/meldung/Mit-Holz-hoch-hinaus-das-hoechste-Holz-Hochhaus-3918560.html am 31.3.2021

Bürger für Technik (2009/1): Alu-Werke in Deutschland. Abgerufen unter: http://www.buerger-fuer-technik.de/body_alu-werke_in_deutschland.html am 19.3.2021

Büscher (2014/1), Wolfgang: Strukturspalten Schwein – Verbesserung der Tiergerechtheit und Reduzierung der Ammoniak-Emissionen durch funktionsoptimierte Spaltenböden für Mastschweine. Abgerufen unter: https://www.nrw-agrar.de/projekt/strukturspalten-schwein-verbesserung-der-tiergerechtheit-und-reduzierung-der-ammoniak-emissionen-durch-funktionsoptimierte-spaltenboeden-fuer-mastschweine/ am 27.2.2021

BUND (2015/1): Ressourcenschutz ist mehr als Rohstoffeffizienz. Abgerufen unter: https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/ressourcen_und_technik/ressourcen_ressourcenschutz_hintergrund.pdf am 15.2.2021

BUND (2019/1): BUND-Konzept zur Einhaltung der Klimaziele 2030 im Verkehr. Abgerufen unter: https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/mobilitaet/mobilitaet_konzept_klimaziele_verkehr_2030.pdf am 31.3.2021

Bundesanzeiger (2020/1): Gesetz zur Beschleunigung von Investitionen. Abgerufen unter: https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s2694.pdf%27%5D__1619386693797 am 25.4.2021

Bundesnetzagentur (2019/1): Marktuntersuchung Eisenbahnen 2019. Abgerufen unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Eisenbahn/Unternehmen_Institutionen/Veroeffentlichungen/Marktuntersuchungen/MarktuntersuchungEisenbahnen/MarktuntersuchungEisenbahn2019.pdf?__blob=publicationFile&v=2 am 10.2.21

Bundesnetzagentur (2021/1): Kraftwerkliste. Abgerufen unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/Kraftwerksliste_CSV.html;jsessionid=D6A7F6ECEEF508C3B9DF9661A2701BC2?nn=266908 am 26.01.2021

Burckhardt (2019/1), Ines: Wie ein Stahlwerk auf Klimaschutz setzt. Abgerufen unter: https://www.ndr.de/nachrichten/hamburg/Wie-ein-Stahlwerk-auf-Klimaschutz-setzt-Arcor-Mittal,stahlwerk138.html am 26.10.2019

Busche (2019/1), Holger: Klimaschutz vor der Weiche: +300%-Bahn oder eHighway. In Tagungsband der 37. Horber Schienentage 2019; Abgerufen unter: http://www.schienenfaehre.de/HST-Vorlage-TagungsbandHolgerBusche2019.pdf am 31.3.2021

Busche (2020/1), Holger: Verkehrsstromanalysen: Welche Projekte bringen wieviel wovon?. In Tagungsband der 38. Horber Schienentage 2020; Abgerufen unter: http://www.schienenfaehre.de/HST-Vorlage-TagungsbandHolgerBusche2020.pdf am 31.3.2021

BVU (2014/1), ITP, IVV, Planco: Verkehrsverflechtungsprognose 2030 - Schlussbericht. Abgerufen unter: http://daten.clearingstelle-verkehr.de/276/1/verkehrsverflechtungsprognose-2030-schlussbericht-los-3.pdf am 4.12.2020

BVU (2015/1), Wirtschaft und Verkehr GmbH; Intraplan Consult GmbH; SMA und Partner AG: Entwicklung einer verkehrlichen Konzeption für den Eisenbahnkorridor Mittelrheinachse – Rhein/Main – Rhein/Neckar – Karlsruhe. Abschlussbericht 02.12.2015. Abgerufen unter: https://www.rhein-main-rhein-neckar.de/downloads.html?file=files/page/06_Service/Downloads/Mittelrheinstudie.pdf. am 31.3.2021

BWP (2018/1), Bundesverband Wärmepumpe: Wärmepumpen in Deutschland, Bestand 2018. Abgerufen unter: https://www.waermepumpe.de/typo3temp/yag/11/51/Waermepumpen_in_Deutschland_Stand_2018_115144_5ecbdd839.png am 20.01.2021

BWP (2020/1): Wärmepumpen-Marktanteil 2019 im Neubau: Spitzenposition verteidigt. Abgerufen unter: https://www.solarserver.de/2020/05/26/waermepumpen-marktanteil-2019-im-neubau-spitzenposition-verteidigt am 16.1.2021

BWP (2021/1): Positives Signal für den Klimasschutz - 40 Prozent Wachstum bei Wärmepumpen. Abgerufen unter: https://www.waermepumpe.de/presse/news/details/positives-signal-fuer-den-klimaschutz-40-prozent-wachstum-bei-waermepumpen/#content am 22.2.2021

BZE (2017/1): Beyond Zero Emissions: Rethinking Cement summary. Abgerufen unter: https://bze.org.au/wp-content/uploads/rethinking-cement-bze-report-summary-2017.pdf am 31.3.2021

Carstensen (2018/1), Werner: Verbesserung der Energieeffizienz bei der Zementherstellung im Holcim-Werk in Lägerdorf. Abgerufen unter: https://www.ifu.com/fileadmin/user_upload/ifu/Events/Ressourceneffizienz-Treff/2018/Energieeffizienz_Zementherstellung_Holcim_Deutschland.pdf am 31.3.2021

Cavazzini (2020/1), Anna: Nachhaltiger Binnenmarkt und Kreislaufwirtschaft. Abgerufen unter: https://www.annacavazzini.eu/nachhaltiger-binnenmarkt-und-kreislaufwirtschaft/ am 5.12.2020

Chemiereport (2017/1) in Austrian Life Science: Voestalpine will CO_2-frei Stahl erzeugen. Abgerufen unter: https://www.chemiereport.at/voestalpine-will-co2-frei-stahl-erzeugen am 31.3.2021

City of Copenhagen (2016/1): Copenhagen City of Cyclists - Bycycle Account 2016. Abgerufen unter: https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/cycling-guidance/copenhagen_bicycle-account-2016.pdf am 9.12.2020

Civity (2019/1) Management Consultants: Das beste Angebot ist nicht der Preis – Der „Wiener Weg“: weit mehr als die 365-Euro-Jahreskarte. Abgerufen unter: https://civity.de/de/matters/das-beste-angebot-ist-nicht-der-preis/ am 29.12.2020

Convention Citoyenne pour le Climat (2019/1): Socle d'ìnformation initial à destination des membres de la convention. Abgerufen unter: https://www.conventioncitoyennepourleclimat.fr/wp-content/uploads/2019/10/03102019-convcit-socledoc-web.pdf am 31.3.2021

Crom (2020/1), Kira: Braunkohle-Tagebauseen bieten Flächen für die Energiewende. Abgerufen unter: https://www.energieagentur.nrw/blogs/erneuerbare/beitraege/braunkohle-tagebauseen-bieten-flaechen-fuer-die-energiewende/ am 6.2.2021

Czisch, G. (2005/1). Szenarien zur zukünftigen Stromversorgung. Abgerufen unter: https://kobra.uni-kassel.de/handle/123456789/200604119596 am 7.2.2021

DB (2020/1): NRW-Regionalverkehrsplan 2020. Abgerufen unter: https://www.bahn.de/p/view/mdb/bahnintern/fahrplan_und_buchung/streckenplaene/mdb_304840_regionalverkehrsplan-nrw_2020.pdf am 10.12.2020

DB (2020/2): Deutsche Bahn - Daten & Fakten 2019. Abgerufen unter: https://www.deutschebahn.com/resource/blob/5058456/05c0e4b2c061ff2bf196ca5644a1ac3e/20190325_bpk_2020_daten_fakten-data.pdf am 31.12.2020

DB (2020/3): Wettbewerbszahlen 2019/2020. Abgerufen unter: https://www.deutschebahn.com/de/konzern/Wettbewerb/verkehr_politik-3844352 am 17.1.2021

De Blasio (2018/1), E. & Sorice, M.: Populism between direct democracy and the technological myth. Palgrave Communications, 4(1). Abgerufen unter: am 23.2.2021

Dechema (2019/1): FutureCamp Climate GmbH: Roadmap Chemie 2050. Abgerufen unter: https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2019_Studie_Roadmap_Chemie_2050-p-20005590.PDF am 31.3.2021

De Graf (2018/1), Daniel: Umweltfreundliche Klimatisierung im Rechenzentrum. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/2018-08-29_eco_upgrade_de_graaf_klimatisierung.pdf am 31.3.2021

DEHSt (2018/1), Deutsche Emissionshandelsstelle: Treibhausgasemissionen 2018 – Emissionshandelspflichtige stationäre Anlage und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2018). Abgerufen unter: https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=5 am 5.11.2020

DEHSt (2020/1), Deutsche Emissionshandelsstelle: Treibhausgasemissionen 2019 Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2019). Abgerufen unter: https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2019.pdf;jsessionid=4A904FD9AA215C9E897F726D58598143.2_cid321?__blob=publicationFile&v=4 am 2.3.2021

Deloitte (2019/1): Urbane Mobilität und autonomes Fahren im Jahr 2035. Abgerufen unter: https://www2.deloitte.com/de/de/pages/trends/urbane-mobilitaet-autonomes-fahren-2035.html am 21.2.2020

DENA (2016/1): DENA-Gebäudereport – Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Abgerufen unter: https://www.dena.de/fileadmin/user_upload/8162_dena-Gebaeudereport.pdf am 21.11.2020

DENA (2017/1): Innovations- und Handlungsbedarfe für eine sichere und zuverlässige Stromversorgung. Abgerufen unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Veranstaltungen/SDL_Abschluss_VA/Praesentationen/01_Mischinger_dena.pdf am 3.3.2021

DENA (2018/1), Power to X: Technologien. Abgerufen unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/607/9264_Power_to_X_Technologien.pdf am 26.01.2021

DENA (2018/2), Kruse, J.: DENA-Leitstudie Integrierte Energiewende-Teil B. Köln: ewi Energy Research & Scenarios gGmbH. Abgerufen unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9262_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_Ergebnisbericht.pdf am 31.3.2021

DENA (2019/1): DENA-Gebäudereport kompakt 2019. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Abgerufen unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-GEBAEUDEREPORT_KOMPAKT_2019.pdf am 21.11.2020

DENA (2020/1): NetZero-Standard in wenigen Wochen. Das Energiesprong-Prinzip. Abgerufen unter: https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/dena-factsheet-das-energiesprong-prinzip/ am 11.02.2021

Der Tagesspiegel (2020/1): Für Klima und Umwelt - Mehr als 80 Prozent der Deutschen bereit zu neuem Lebensstil. Abgerufen unter: https://www.tagesspiegel.de/politik/fuer-klima-und-umwelt-mehr-als-80-prozent-der-deutschen-bereit-zu-neuem-lebensstil/26746072.html am 26.1.2021

Destatis (2017/1): Jahr 2016: Fahrgastrekorde im Nah- und Fernverkehr mit Bussen und Bahnen. Abgerufen unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2017/04/PD17_124_461.html am 30.12.2020

Destatis (2019/1): Umweltökonomische Gesamtrechnungen: Direkte und indirekte CO_2-Emissionen in Deutschland 2010-2015. Abgerufen unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/energiefluesse-emissionen/Publikationen/Downloads/co2-emissionen-pdf-5851305.pdf?__blob=publicationFile am 31.3.2021

Destatis (2019/2): Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Flächenbelegung von Ernährungsgütern 2010-2017. Abgerufen unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/landwirtschaft-wald/Publikationen/Downloads/flaechenbelegung-pdf-5851309.pdf?__blob=publicationFile am 31.3.2021

Destatis (2019/3): Miete und Mietbelastungsquoten von Hauptmieterhaushalten. Abgerufen unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Tabellen/mietbelastungsquote.html;jsessionid=5815B9ED82D19C5AC685C32E0EE76A88.internet722 am 01.02.2021

Deutscher Bundestag (2017/1): Modal Split in ausgewählten deutschen Großstädten. Abgerufen unter: https://www.bundestag.de/resource/blob/535044/f9877fd834da2c1bf7c7bb02299da09e/wd-5-084-17-pdf-data.pdf am 5.12.2020

Deutsches Institut für Urbanistik (2018/1): Klimaschutz in Kommunen. Praxisleitfaden 3. Aktualisiert und erweiterte Auflage. Abgerufen unter: https://leitfaden.kommunaler-klimaschutz.de/ am 21.11.2020

Deutsche Windguard (2020/1): Volllaststunden von Windenergieanlagen an Land - Entwicklung, Einflüsse, Auswirkungen. Abgerufen unter: https://www.lee-nrw.de/data/documents/2020/11/23/532-5fbb61e5e6bb2.pdf am 12.1.2021

Die Binnenschifferin (2018/1): Niedrigwasser am Rhein 2018. Abgerufen unter: https://diebinnenschifferin.de/blog/beitrag_4/beitrag_4.html am 26.1.2021

Diesener (2017/1), Sönke: Emissionen aus der Schifffahrt - Gefahr für Klima und Gesundheit. Abgerufen unter: https://www.wissenschaftsjahr.de/2016-17/aktuelles/das-sagen-die-experten/emissionen-aus-der-schifffahrt-gefahr-fuer-klima-und-gesundheit.html am 10.2.2021

Dietz (2008/1), T. & Stern, P. C. (Hrsg.): Public participation in environmental assessment and decision making. Panel on Public Participation in Environmental Assessment and Decision Making. Washington, DC: National Academies Press 2008.

Dittmer (2020/1), Matthias; Geraets, Frank; Schwipps, Axel: Die Klimabilanz - Berliner U-Bahn- und Straßenbahnplanungen. Abgerufen unter: https://static1.squarespace.com/static/5f64c7e10c87ea03c1b6bef2/t/5fc772510623334b0c60f643/1606906460674/klimabilanz-ubahn-tram.pdf am 18.12.2020

DIW (2020/1): Wärmemonitor 2019: Klimaziele bei Wohngebäuden trotz sinkender CO_2-Emissionen derzeit außer Reichweite. Abgerufen unter: https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.799881.de/20-40.pdf am 16.11.2020

DIW (2020/2) Berlin, TU Berlin, & CoalExit: Klimaschutz statt Kohleschmutz: Woran es beim Kohleausstieg hakt und was zu tun ist. Abgerufen unter: https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.725608.de/diwkompakt_2020-148.pdf am 26.01.2021

DLR (2016/1), BMVI (Auftraggeber): Verkehrsverlagerungspotenzial auf den Schienengüterverkehr in Deutschland. Abgerufen unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/studie-verkehrsverlagerungspotenzial-schienengueterverkehr.pdf?__blob=publicationFile am 29.12.2020

Dörrbecker (2021/1), Maximilian (Chumwa): Deutschland - Streckengebundene Nahverkehrssysteme. CC BY-SA 2.5, Abgerufen unter: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1475015 am 13.2.2021

Döschner (2014/1), Jürgen: Aluminium-Produktion in Deutschland - Schmutzig, teuer, überflüssig. Abgerufen unter: https://www.tagesschau.de/wirtschaft/aluminium102.html am 23.2.2021

Dreyer (2013/1), S. J. & Walker, I.: Acceptance and Support of the Australian Carbon Policy. Social Justice Research, 26(3), 343–362. https://doi.org/10.1007/s11211-013-0191-1

Dryzek (2019/1), J. S.; Bächtiger, A.; Chambers, S.; Cohen, J.; Druckman, J. N.; Felicetti, A.; … Warren, M. E.: The crisis of democracy and the science of deliberation. *Science*, *363*(6432), 1144–1146. Abgerufen unter: https://doi.org/10.1126/science.aaw2694 am 31.3.2021

DUH (2021/1): Jede Sekunde werden 571 kg Lebensmittel entsorgt. Abgerufen unter: https://www.duh.de/projekte/lebensmittelverschwendung/ am 4.3.2021

DVGW (2013/1), Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.: Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. Abgerufen unter: https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g1_07_10.pdf am 28.1.2021

DWD (2018/1): Wetterbedingte Risiken der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien reduzieren. Abgerufen unter: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/180306/ertragsausfaelle_ee_pk_2018.html am 9.2.2020

Eco (2020/1): Rechenzentren in Europa – Chancen für eine nachhaltige Digitalisierung. Abgerufen unter: https://digitale-infrastrukturen.net/studie-nachhaltige-digitalisierung-in-europa/ am 26.4.2021

Edenhofer (2019/1), O.; Flachsland, C.; Kalkuhl, M.; Knopf, B.; Pahle, M.: Optionen für eine CO_2-Preisreform. Abgerufen unter: https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/Arbeitspapiere/Arbeitspapier_04_2019.pdf am 31.3.2021

EEFA (2015/1), BMWi (Auftraggeber): Endbericht Entwicklung einer Methodik zur Ermittlung von Mineralöldaten für die Bundesländer. Abgerufen unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Downloads/entwicklung-methodik-ermittlung-mineraloeldaten-bundeslaender.pdf?__blob=publicationFile&v=3 am 22.1.2021

Ehlerding (2019/1), Susanne: Fossilfreie Stahlindustrie - Schweden setzt auf Stahl aus Wasserstoff. Abgerufen unter: https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/fossilfreie-stahlindustrie-schweden-setzt-auf-stahl-aus-wasserstoff/24161892.html am 31.3.2021

eia (2018/1), U.S. Energy Information Administration: Today in Energy - Coal power generation declines in United Kingdom as natural gas, renewables grow. Abgerufen unter: https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=35912 am 3.2.2021

Eionet (2020/1): Eionet»CDR»Germany»European Union (EU) obligations»Greenhouse gas Monitoring Mechanism Regulation (MMR)»Art. 05 & 07 and UNFCCC - Greenhouse gas inventiontories»GHG inventories»GHG Inventory EU 15-01-2020»DEU_2020_2018_09012020_135536_started. Abgerufen unter: https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envxh8awg/DEU_2020_2018_09012020_135536_started.xlsx/manage_document am 5.11.2020

EnergieAgentur.NRW (2016/1): Lastmanagement in Nordrhein-Westfalen: Potentiale, Hemmnisse, Handlungsoptionen. Abgerufen unter: https://broschuerenservice.nrw.de/energieagentur/shop/Lastmanagement_in_Nordrhein-Westfalen:_Potenziale_Hemmnisse_Handlungsoptionen am 31.3.2021

EnergieAgentur.NRW (2017/1): Energieeffizienz in der Ernährungsindustrie. Abgerufen unter: https://www.energieagentur.nrw/energieeffizienz/energieeffizienz-nach-branchen/energieeffizienz_in_der_ernaehrungsindustrie?print=1 am 21.3.2021

EnergieAgentur NRW (2018/1): Doppelte Ernte mit Agrophotovoltaik. Abgerufen unter: https://www.energieagentur.nrw/blogs/erneuerbare/beitraege/doppelte-ernte-agrophotovoltaik-anlage-liefert-positive-bilanz/ am 31.3.2021

EnergieAgentur.NRW (2020/1): CO_2-Bilanzierung von Transporten. Abgerufen unter: https://www.energieagentur.nrw/klimaschutz/ccf/co2-bilanzierung_von_transporten am 15.12.2020

EnergieAgentur.NRW (2020/2): 304.000 Arbeitsplätze in 2018 bei erneuerbaren Energien in Deutschland. Abgerufen unter: https://www.energieagentur.nrw/eanrw/304.000_arbeitsplaetze_in_2018_bei_erneuerbaren_energien_in_deutschland am 31.3.2021

EnergieAgentur.NRW (2020/3): Windenergie Überblick. Abgerufen unter: https://www.energieagentur.nrw/eanrw/304.000_arbeitsplaetze_in_2018_bei_erneuerbaren_energien_in_deutschland am 1.2.2021

EnergieAgentur.NRW (2020/4): Knapp 200.000 Wärmepumpen beheizen NRW - Energiezahl der Woche. Abgerufen unter: https://www.energieagentur.nrw/geothermie/waermepumpen/knapp_200.000_waermepumpen_beheizen_nrw am 31.3.2021

EnergieAgentur.NRW (2021/1): Information: Nichtwohngebäude - Daten und Fakten. Abgerufen unter: https://www.energieagentur.nrw/gebaeude/energieeffiziente-nichtwohngebaeude/nichtwohngebaeude_in_deutschland__daten_und_fakten am 24.01.2021

EnergieAgentur.NRW (2021/2): Plattform Sektorenkopplung. Abgerufen unter: https://www.energieagentur.nrw/tool/sektorenkopplung/Plattform.Sektorenkopplunginformation/erneuerbare-energien.php am 2.2.2021

EnergieAgentur.NRW (2021/3): Geothermie in NRW - Standortcheck. Abgerufen unter: https://www.geothermie.nrw.de/geothermie_basisversion/?lang=de am 26.2.2021

Energiedepesche (2019/1): Hrsg.: Bund der Energieverbraucher e.V. Ausgabe September 2019, 34. Jahrgang "Ortstermin: Kohleausstieg im Kieler Wärmenetz", S. 26 f.

Energiedepesche (2019/2): Hrsg.: Bund der Energieverbraucher e.V. Ausgabe September 2019, 34. Jahrgang "Sonnenaufgang im Wärmenetz", S. 28 f.

Energiezukunft (2020/1): Solarpotenzial - Wasserflächen für schwimmende Photovoltaik. Abgerufen unter: https://www.energiezukunft.eu/erneuerbare-energien/solar/wasserflaechen-fuer-schwimmende-photovoltaik/ am 6.1.2021

Engler (2021/1), D.; Groh, E. D.; Gutsche, G. & Ziegler, A.: Acceptance of climate-oriented policy measures under the COVID-19 crisis: An empirical analysis for Germany. *Climate Policy*, 1–17. Abgerufen unter: https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1864269 am 27.1.2021

Enkhardt (2018/1), Sandra: PV-Magazine. Startschuss für sektorkoppelnden Stahlspeicher in Berliner Quartier. Abgerufen unter: https://www.pv-magazine.de/2018/10/22/startschuss-fuer-sektorenkoppelnden-stahlspeicher-in-berliner-quartier/ am 06.01.2021

EPA (2019/1), United States Environmental Protection Agency: Global Greenhouse Gas Emissions Data. Abgerufen unter: https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data am 31.3.2021

EREC (2009/1), Greenpeace International (Hrsg.): [r]enewables – Infrastructure needed to save the climate. (Die »Netzstudie«), Amsterdam (Niederlande) / Brüssel (Belgien) 2009

Europäische Kommission (2011/1): Weißbuch zum Verkehr - Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem. Abgerufen unter: https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/strategies/doc/2011_white_paper/white-paper-illustrated-brochure_de.pdf am 31.3.2021

European Parlament (2021/1): Report on the New Circular Economy Action Plan. Abgerufen unter: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0008_EN.pdfhttps://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2021-0008_EN.pdf am 15.2.2021

European Commission (2020/1): Fossil CO_2 and GHG emissions of all world countries - 2019 report. Abgerufen unter: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=booklet2019&dst=GHGpc&sort=des9 am 31.3.2021

evoulution2green (2018/1): Innovation City Ruhr: Modellstadt Bottrop. Abgerufen unter: https://evolution2green.de/sites/evolution2green.de/files/documents/2018-01-e2g-fallstudie_waerme_bottrop_adelphi.pdf am 19.02.2021

EWI-Uni Köln (2019/1): Auswirkungen einer Beendigung der Kohleverstromung bis 2038 auf den Strommarkt, CO_2-Emissionen und ausgewählte Industrien. Eine Analyse des Abschlussberichts der WSB-Kommission. Abgerufen unter: https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2019/08/EWI-Studie_Auswirkungen-Kohleausstieg-bis-2038_20200515.pdf am 22.11.2020

Expertenkommission »Monitoring der Energiewende« (2019/1): Effiziente Energiewende jetzt statt warten auf das grüne Gas. Abgerufen unter: https://www.deneff.org/fileadmin/downloads/20190820_Gr%c3%bcne_Gase_und_Energieeffizienz_-_Expertenpapier.pdf am 31.3.2021

Farrell (2019/1), D. M.; Suiter, J. & Harris, C.: 'Systematizing' constitutional deliberation - The 2016–18 citizens' assembly in Ireland. Irish Political Studies, 34(1), 113–123. Abgerufen unter: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07907184.2018.1534832?journalCode=fips20 am 23.2.2021

FA Wind (2019/1) - Fachagentur Windenergie an Land; Quentin, Jürgen; BWE: Hemmnisse beim Ausbau der Windenergie in Deutschland. Abgerufen unter: https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/pressemitteilungen/2019/20190719_FA_Wind_Branchenumfrage_beklagte_WEA_Hemmnisse_DVOR_und_Militaer.pdf am 6.1.2021

FA Wind (2021/1): Natur- und Artenschutz. Abgerufen unter: https://www.fachagentur-windenergie.de/themen/natur-und-artenschutz/ am 30.3.2021

FAZ (2019/1): Niedrigwasser - Alle Nachrichten und Informationen der F.A.Z. zum Thema. Abgerufen unter: https://www.faz.net/aktuell/gesellschaft/thema/niedrigwasser am 13.11.2020

FAZ (2021/1): Bund-Länder-Kompromiss bei Agrarreform: Es zählt nicht mehr alleine die Fläche der Betriebe. Abgerufen unter: https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/bund-und-laender-einigen-sich-bei-eu-agrarreform-17266083.html

Feld, Lars P. et al. (2019/1): Sachverständigenrat. Aufbruch zu einer neuen Klimapolitik. Sondergutachten. Abgerufen unter: https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/gutachten/sg2019/sg_2019.pdf am 22.11.2020

Fell (2019/1), H.-J. & Traber, T. - EnergieWatchGroup: Sektorale Treibhausgasemissionen weltweit. Abgerufen unter: http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/EWG-Kurzanalyse-THG_2019.pdf am 3.2.2021

FernUni Hagen (2020/1): Wasserstoff: Weit mehr als ein Ersatztreibstoff. Abgerufen unter: https://www.fernuni-hagen.de/universitaet/aktuelles/2020/12/am-03-wasserstoff_weit-mehr-als-ein-ersatztreibstoff.shtml am 21.3.2021

FES (2019/1), Friedrich Ebert Stiftung, Prognos AG, Max Ostermayer: Jobwende – Effekte der Energiewende auf Arbeit und Beschäftigung. Abgerufen unter: https://www.fes.de/studie-jobwende am 16.1.2021

FH Bielefeld (2019/1): Neue Materialien für smarte Düngemittel in der ökologischen Landwirtschaft von morgen. Abgerufen unter: https://www.fh-bielefeld.de/presse/pressemitteilungen/neue-materialien-fuer-smarte-duengemittel-in-der-oekologischen-landwirtschaft-von-morgen am 27.2.2021

FIS (2017/1), Forschungs-Informations-System: Netzrückspeisung bei Schienenfahrzeugen mit Elektrotraktion. Abgerufen unter: https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/342892/ am 10.2.2021

FNN (2020/1), Forum Netztechnik Netzbetrieb im VDE: Deutsches Höchstspannungsnetz. Abgerufen unter: https://www.vde.com/resource/blob/1941438/44d7d556e6b5b7cd1e2f6cae0e5ce501/vde-fnn-karte-stromnetz-deutschland-2020-data.pdf am 12.2.2021

FNR (2018/1): Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Abgerufen unter: https://fnr.de/fileadmin/fnr/pdf/mediathek/22004416.pdf am 31.3.2021

FÖS (2019/1), Zerzawy, F.; Fiedler, S.: Lenkungs- und Verteilungswirkungen einer klimaschutzorientierten Reform der Energiesteuern. Abgerufen unter: http://www.foes.de/pdf/2019-07-FOES_CO2Preis_Hintergrundpapier_BMU.pdf am 31.03.2021

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (2014/1): Regionale Lastmanagement-Potenzialen stromintensiver Prozesse. Abgerufen unter: https://www.ffegmbh.de/download/veroeffentlichungen/433_lastmanagement_graz/FfE_LMM-Potenziale-stromintensiver-Prozesse.pdf am 1.4.2021

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (2018/1): CO_2 – Verminderung in der Primäraluminiumherstellung. Abgerufen unter: https://www.ffegmbh.de/images/stories/veroeffentlichungen/720_Energiewende_in_der_Industrie/CO2-Verminderung_in_der_Prim%C3%A4raluminiumherstellung.pdf am 31.3.2021

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (2020/1): CO_2-Verminderung im Papiergewerbe. Abgerufen unter: https://www.ffegmbh.de/images/stories/veroeffentlichungen/720_Energiewende_in_der_Industrie/CO2-Verminderung_im_Papiergewerbe.pdf am 31.3.2021

Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (2020/1): Welche strombasierten Kraftstoffe sind im zukünftigen Energiesystem relevant? Abgerufen unter: https://www.ffe.de/publikationen/veroeffentlichungen/863-welche-strombasierten-kraftstoffe-sind-im-zukuenftigen-energiesystem-relevant am 31.3.2021

Fraunhofer IAO (2019/1): Autonomes Fahren im Kontext der Stadt von Morgen [AFKOS]. Abgerufen unter: http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-5436689.pdf am 21.11.2020

Fraunhofer IEE. (2018/1): 2030 kohlefrei: Wie eine beschleunigte Energiewende Deutschlands Beitrag zum Pariser Klimaschutzabkommen sicherstellt. Abgerufen unter: http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-518419.html am 31.3.2021

Fraunhofer ISE (2013/1): Institut für Solare Energiesysteme, Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas: Energiesystem Deutschland 2050. Abgerufen unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE_Energiesystem-Deutschland-2050.pdf am 23.2.2021

Fraunhofer ISE (2018/1): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Abgerufen unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf am 31.3.2021

Fraunhofer ISE (2018/2): Stromerzeugung in Deutschland im Jahr 2017. Abgerufen unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/daten-zu-erneuerbaren-energien/Stromerzeugung_2017.pdf am 23.2.2021

Fraunhofer ISE (2018/3): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Abgerufen unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf am 2.2.2021

Fraunhofer ISE (2019/1): Photovoltaics report. Abgerufen unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf am 31.3.2021

Fraunhofer ISE (2020/1): Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland im Jahr 2019. Abgerufen unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/Stromerzeugung_2019_2.pdf am 26.01.2021

Fraunhofer ISE (2020/2): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE, *1*(99), 1–91. Abgerufen unter: https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf am 2.2.2021

Fraunhofer ISE (2020/3): Agri-Photovoltaik - Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Abgerufen unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/APV-Leitfaden.pdf am 8.2.2021

Fraunhofer ISI (2017/1), Mader, S., Fraunhofer IML, PTV Group, M Five, TUHH: Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-LKW. Abgerufen unter: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21906.86725 am 31.3.2021

Fraunhofer IWES (2014/1): Geschäftsmodell Energiewende. Abgerufen unter: https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschungsthemen/energie/Studie_Energiewende_Fraunhofer-IWES_20140-01-21.pdf am 31.3.2021

Fraunhofer IWES (2015/1) u.a.: Klimaschutzziele nur mit Wärme durch Strom aus erneuerbaren Energien erreichbar. Pressemitteilung. Abgerufen unter: https://www.iee.fraunhofer.de/de/presse-infothek/Presse-Medien/Pressemitteilungen/2015/strom_waerme_interaktion.html am 31.2.2021

Frontier economics (2016/1): Energiewende in Deutschland – Perspektiven für Industrie und Gewerbe. Kurzstudie im Auftrag von IHK NRW und DIHK. Abgerufen unter: https://www.frontier-economics.com/media/1082/20161129_energiewende-in-deutschland-perspektiven-fur-industrie-gewerbe_frontier.pdf am 31.3.2021

Frühwald (2013/1), Der Beitrag von Forst und Holz zum Klimaschutz: Beispiel Nordrhein-Westfalen. Abgerufen unter: http://forum-holzbau.com/pdf/EBH_2013_Fruehwald_Knauf.pdf am 6.12.2020

Fuhrhop (2020/1), Daniel: Zehn-Punkte-Plan für flächensparendes Wohnen. Abgerufen unter: https://www.daniel-fuhrhop.de/wp-content/uploads/Zehn-Punkte-Plan-fla%CC%88chensparendes-Wohnen.pdf am 24.2.2021

Funk (2016/1), Birgit; Trettin, Reinhard; Zoz, Henning. From slag to high performance concrete – Manufacturing Futur-Beton. Sciencedirect. Abgerufen unter: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317319041 am 31.3.2021

Fuss (2018/1), Sabine u. a.: Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. Abgerufen unter: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabf9f/pdf am 31.3.2021

FVEE (2014/1): Regenerative Wärmequellen für Wärmenetze. Abgerufen unter: http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2014/th2014_07_03.pdf am 02.12.2020

FWSRR (2019/1): Positiver Bescheid der Bezirksregierung Düsseldorf. Abgerufen unter: http://www.fwsrr.de/presse/news-presseservice/news-presseservice-detail/news/-8b4855c8f1/index.html?tx_news_pi1%255Bcontroller%255D=News&tx_news_pi1%255Baction%255D=detail&cHash=35efa42d5b11f04df6de558d34dbb412 am 28.03.2021

GDA (2021/1) Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.: Produktion und Bedarf. Abgerufen unter: http://www.aluinfo.de/produktion-und-bedarf.html am 28.4.2021

Gensch (2020/1), Carl-Otto (Öko-Institut); Marscheider-Weidemann, Frank (Fraunhofer ISI): Nachhaltige Basischemie in Deutschland – Herausforderungen einer Roadmap. Abgerufen unter: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Strukturwandel-Chemie.pdf am 19.3.2021

Giovannetti (2017/1), Federico; Kastner, Oliver; Schlatmann, Rutger; Cordes, Tom; Kramer, Wolfgang; Riepl, Manuel; Pröll, Markus; Staudacher, Lars: FVEE Themen, Innovationsbedarfe für Erneuerbare Energien, Solare Wärme und Kälte. Abgerufen unter: https://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2017/th2017_06_05.pdf am 23.01.2021

GEG (2020/1) Gebäudeenergiegesetz. Abgerufen unter: http://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf am 03.01.2021

Gerhardt (2017/1) u.a.: Analyse eines europäischen -95%-Klimazielszenario über mehrere Wetterjahre. Abgerufen unter: http://www.energieversorgung-elektromobilitaet.de/includes/reports/Auswertung_7Wetterjahre_95Prozent_FraunhoferIWES.pdf am 31.3.2021

gfma (2020/1), Global Financial Markets Association; BCG - Boston Consulting Group: Climate Finance Markets and the Real Economy - Sizing the Global Need and Defining the Market Structure to Mobilize Capital. Abgerufen unter: https://www.sifma.org/wp-content/uploads/2020/12/Climate-Finance-Markets-and-the-Real-Economy.pdf am 4.12.2020

Ghiotto (2019/1), Luciana; Echaide, Javier: Analysis of the agreement between the European Union and the Mercosur. Abgerufen unter: https://www.annacavazzini.eu/wp-content/uploads/2020/01/Study-on-the-EU-Mercosur-agreement-09.01.2020-1.pdf am 26.4.2021

Göke (2018/1), Leonard u.a.: Erfolgreicher Klimaschutz durch zügigen Kohleausstieg in Deutschland und Nordrhein-Westfalen. Abgerufen unter: https://doi.org/10.18723/diw_wb:2018-33-1 am 3.2.2021

Goetzberger (1981/1): Kartoffeln unter dem Kollektor. Abgerufen unter: http://www.agrophotovoltaik.de/ am 31.3.2021

Grass (2015/1), Hubertus, Stiftung Energie und Klimaschutz: Energiewende aktuell - Zentrale Rolle für HGÜ-Leitungen? Abgerufen unter: https://www.energie-klimaschutz.de/energiewende-aktuell-hgue-leitungen/ am 12.2.2021

Greenpeace (2020/1) Energy: Grün oder blau? Wege in die Wasserstoff-Wirtschaft 2020 bis 2040. Abgerufen unter: https://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/2020_Studie_Gruen_oder_Blau_final.pdf am 25.4.2021

Greenpeace (2020/2): Homeoffice kann über 5 Millionen Tonnen CO2 sparen. Abgerufen unter: https://www.greenpeace.de/presse/presseerklaerungen/homeoffice-kann-ueber-5-millionen-tonnen-co2-sparen am 26.4.2021

Grigoleit (2020/1), K. J.: Rechtsgutachten zu „Landesrechtliche Möglichkeiten einer verpflichtenden Nutzung der Solarenergie an und auf Gebäuden in Nordrhein-Westfalen“

Grüne Fraktion NRW (2021/1): Klima schützen - Mehr Solar auf die Dächer. Abgerufen unter: https://gruene-fraktion-nrw.de/wp-content/uploads/20212019/1)/02/Positionspapier-GRUeNE-LTF-Klima-schuetzen-Mehr-Solar-auf-die-Daecher.pdf am 23.2.2021

Grüne NRW (2019/1): Rettet den Wald - von NRW bis Amazonien. Abgerufen unter: https://gruene-nrw.de/2019/10/rettet-den-wald-von-nrw-bis-amazonien/ am 15.3.2021

Grunewald (2010/1), Jan; Will, Thomas: Energetische Sanierung von Baudenkmalen: Pilotstudie des sächsischen Staatsministerium des Inneren. Abgerufen unter: https://www.lfd.sachsen.de/download/Pilotstudie_Energetische_Sanierung.pdf am 20.01.2021

GPF (2016/1), Martens, Jens; Seitz, Karolin, Herausgeber Global Policy Forum, Rosa-Luxemburg-Stiftung – New York Office: Auf dem Weg zu globalen Unternehmensregeln. Abgerufen unter: https://www.globalpolicy.org/sites/default/files/Globale_Unternehmensregeln_online_1.pdf am 31.3.2021

Hamburg Institut (2020/1), prognos (Auftraggeber AGFW, Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.): Perspektive der Fernwärme – Gutachten. Abgerufen unter: https://www.hamburg-institut.com/images/pdf/studien/AGFW_Perspektive_der_Fernwaerme_2030_final.pdf am 20.01.2021

Hanke (2019/1), Steven, In Tagespiegel Background: Finanzierungsmodell für klimaneutrale Industrie. Abgerufen unter: https://background.tagesspiegel.de/energie-klima/finanzierungsmodell-fuer-klimaneutrale-industrie am 16.3.2021

Health Care Without Harm Europe (2018/1): Umweltverträgliche Anästhesiepraxis für Europa. Abgerufen unter: https://noharm-europe.org/sites/default/files/documents-files/5410/Umweltvertra%CC%88gliche_Ana%CC%88sthesiepraxis_fu%CC%88r_Europa-Briefing.pdf am 31.3.2021

HeidelbergCement (2019/1): Auf eine saubere Zukunft bauen. Abgerufen unter: https://www.heidelbergcement.de/de/zement/umwelt-oekologie am 31.3.2021

HeidelbergCement (2019/2): HeidelbergCement und die RWTH Aachen forschen zur Bindung von CO_2 in Mineralien. Information vom 29. Juni 2017. Abgerufen unter: https://www.heidelbergcement.com/de/pi-29-06-2017 am 31.3.2021

Heinrich-Böll-Stiftung (2019/1), VCD: Mobilitätsatlas – Daten und Fakten für die Verkehrswende. Abgerufen unter: https://www.boell.de/sites/default/files/2019-11/mobilitaetsatlas.pdf?dimension1=ds_mobilitaetsatlas am 31.3.2021

Heinrich-Böll-Stiftung (2019/2): Plastikatlas – Daten und Fakten über eine Welt voller Kunststoff. Abgerufen unter: https://www.boell.de/de/2019/05/14/plastikatlas?dimension1=ds_plastikatlas am 31.3.2011

Heinrich-Böll-Stiftung (2020/1): A Societal Transformation Scenario for Staying Below 1.5°C. Abgerufen unter: https://www.boell.de/de/2020/12/09/societal-transformation-scenario-staying-below-15degc am 15.1.2021

Helaba (2019/1): Nordrhein-Westfahlen. Gemeinsam ans Werk. Abgerufen unter: https://www.helaba.de/blueprint/servlet/resource/blob/docs/505132/64d559982a95e3b25d27dd028add9ad4/regionalfokus-20190918-data.pdf am 22.11.2020

Henger (2017/1): Handlungsempfehlungen für mehr Investitionen in den Klimaschutz. Abgerufen unter: https://www.iwkoeln.de/studien/iw-analysen/beitrag/ralph-henger-michael-voigtlaender-handlungsempfehlungen-fuer-mehr-investitionen-in-den-klimaschutz.html am 02.01.2021

Hentschel (2010/1), Karl-Martin: Es bleibe Licht - 100% Ökostrom für Europa ohne Klimaabkommen. Deutscher Wissenschafts-Verlag, Baden-Baden 2010

Hentschel (2018/1), Karl-Martin: Demokratie für morgen - Roadmap zur Rettung der Welt - Mit einem konkreten Entwurf für ein gerechtes Europa. UVK Verlag 2018

Hertwich (2018/1), Edgar; Wood, Richard: The growing importance of scope 3 greenhouse gas emissions from industry. Abgerufen unter: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aae19a/pdf am 31.3.2021

Holcim (2018/1): Umweltdaten 2018. Abgerufen unter: https://www.holcim.de/de/holcim-publiziert-umweltdaten-2018-im-internet am 31.3.2021

Holcim (2018/2): Nachhaltigkeitsbereich 2018. Abgerufen unter: https://www.holcim.de/de/nachhaltigkeitsbericht am 31.3.2021

Howarth (2020/1), C., Bryant, P., Corner, A., Fankhauser, S., Gouldson, A., Whitmarsh, L. & Willis, R.: Building a Social Mandate for Climate Action: Lessons from COVID-19. Environmental and Resource Economics, *76*(4), 1107–1115. Abgerufen unter: https://doi.org/10.1007/s10640-020-00446-9 am 5.2.2021

Hüser (2015/1), Tobias: Rohstoffversorgung - Neues Verfahren für die Herstellung von Aromaten entdeckt. Abgerufen unter: https://www.process.vogel.de/neues-verfahren-fuer-die-herstellung-von-aromaten-entdeckt-a-472187/ am 19.3.2021

Huneke (2017/1); Perez; Linkenheil; Niggemeier, Greenpeace Energy: Kalte Dunkelflaute - Robustheit des Stromsystems bei Extremwetter. Abgerufen unter: https://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/170629_GPE_Studie_Kalte-Dunkelflaute_Energy-Brainpool.pdf am 31.3.2021

HYPOS (2017/1): White Paper zur Fortführung der HYPOS Strategie. Abgerufen unter: https://www.hypos-eastgermany.de/fileadmin/content/downloads/pdf/hypos-whitepaper_zur_strategiefortfuehrung_2017_0.pdf am 22.11.2020

HYPOS (2018/1): Positionspapier rechtliche Rahmenbedingungen. Abgerufen unter: https://www.hypos-eastgermany.de/fileadmin/content/content/Positionspapiere/HYPOS_2018_Postionspapier_zu_den_rechtlichen_Rahmenbedingungen.pdf am 22.11.2020

ICCT (2020/1), International Counsel on Clean Transportation; Pavlenko, Nikita; Comer, Bryan; Zhou, Yuanrong; Clark, Nigel; Rutherford, Dan: The climate implications of using LNG as a marine fuel. Abgerufen unter: https://theicct.org/sites/default/files/publications/Climate_implications_LNG_marinefuel_01282020.pdf am 11.2.2020

IEK (2019/1), Forschungszentrum Jülich: Wege für die Energiewende. Abgerufen unter: https://www.fz-juelich.de/iek/iek-3/DE/_Documents/Downloads/transformationStrategies2050_studySummary_2019-10-31.pdf.pdf?__blob=publicationFile am 31.3.2021

ifeu (2019/1): Sozialer Klimaschutz in Mietwohnungen. Abgerufen unter: https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/Kurzstudie_BUND_ifeu_2019_Sozialer-Klimaschutz-in-Mietwohnungen.pdf am 13.12.2020

ifeu (2019/2): Der Kohleausstieg und die Auswirkung auf die betroffenen Wärmenetze. Abgerufen unter: https://www.ifeu.de/wp-content/uploads/190820_Kohleausstieg_und_Fernwaerme_Bericht_v06.pdf am 04.01.2021

IN4CLIMATE.NRW (2020/1): Chemisches Kunststoffrecycling – Potenziale und Entwicklungsperspektiven. Abgerufen unter: https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/IN4climate.NRW/AG-Papiere/2020/in4climatenrw-chemisches-kunststoffrecycling-web-de.pdf am 31.3.2021

IN4CLIMATE.NRW (2021/1): Über uns - Als bundesweit einzigartige Plattform, auf der Industrie, Wissenschaft und Politik zusammenarbeiten, bietet IN4climate.NRW einen Raum für die Erarbeitung innovativer Strategien für eine klimaneutrale Industrie. Abgerufen unter: https://trid.trb.org/view/1682639 am 31.3.2021

Industrieverband Agrar (2014/1): Wichtige Zahlen Düngemittel - Produktion • Markt • Landwirtschaft. Abgerufen unter: https://www.bv-agrar.de/sites/default/files/pdf/info/statistik/iva_2013-14.pdf am 19.3.2021

INES (2019/1): Gasspeicherstandorte. Abgerufen unter: https://erdgasspeicher.de/erdgasspeicher/gasspeicherstandorte/ am 7.2.2021

Ingenieur.de (2018/1): Rohstoffbörse geplant – Recycelter Bauschutt statt Sandmangel. Abgerufen unter: https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/bau/recycelter-bauschutt-statt-sandmangel/ am 30.3.2021

Institut für nachhaltige Wirtschaft und Logistik (2018/1): Potenzialanalyse Methanol als emissionsneutraler Energieträger für Schifffahrt und Energiewirtschaft. Abgerufen unter: https://www.maritimes-cluster.de/fileadmin/user_upload/Dokumente/Studie-Potenzialanalyse-Methanol-Schifffahrt-2018.pdf am 31.3.2021

Intraplan (2019/1), Consult GmbH, BAG-Luftverkehr, BMVI (Auftraggeber): Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr, Mittelfristprognose Winter 2018/19. Abgerufen unter: https://www.bag.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Verkehrsprognose/verkehrsprognose_Winter_2018_2019.pdf?__blob=publicationFile am 31.3.2021

IPCC (2014/1): Climate Change 2014 Synthesis Report. Abgerufen unter: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf am 31.3.2021

IPCC (2018/1): Special Report Global Warming of 1.5ºC. Abgerufen unter: https://www.ipcc.ch/sr15/ am 31.3.2021

ISV (2018/1), Universität Stuttgart; Friedrich, Markus u. a.; (Auftraggeber: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V u. a.): MEGAFON - Modellergebnisse geteilter autonomer Fahrzeugflotten des oeffentlichen Nahverkehrs. Abgerufen unter: http://docplayer.org/78886274-Megafon-modellergebnisse-geteilter-autonomer-fahrzeugflotten-des-oeffentlichen-nahverkehrs.html am 31.3.2021

IT.NRW (2001/1): Wohnungsbestand in den Geminden Nordrhein-Westfalen am 31.Dezember 2000. Abgerufen unter: https://webshop.it.nrw.de/gratis/F249%20200000.pdf am 20.11.2020

IT.NRW (2012/1): Baufertigstellungen und Bauabgänge in Nordrhein-Westfalen 2015. Abgerufen unter: https://webshop.it.nrw.de/gratis/F229%20201100.pdf am 03.01.2021

IT.NRW (2013/1): Baufertigstellungen und Bauabgänge in Nordrhein-Westfalen 2015. Abgerufen unter: https://webshop.it.nrw.de/gratis/F229%20201200.pdf am 03.01.2021

IT.NRW (2014/1): Baufertigstellungen und Bauabgänge in Nordrhein-Westfalen 2015. Abgerufen unter: https://webshop.it.nrw.de/gratis/F229%20201300.pdf am 03.01.2021

IT.NRW (2015/1): Baufertigstellungen und Bauabgänge in Nordrhein-Westfalen 2015. Abgerufen unter: https://webshop.it.nrw.de/gratis/F229%20201400.pdf am 03.01.2021

IT.NRW (2016/1): Baufertigstellungen und Bauabgänge in Nordrhein-Westfalen 2015. Abgerufen unter: https://webshop.it.nrw.de/gratis/F229%20201500.pdf am 03.01.2021

IT.NRW (2017/1): Baufertigstellungen und Bauabgänge in Nordrhein-Westfalen 2016. Abgerufen unter: https://webshop.it.nrw.de/gratis/F229%20201600.pdf am 03.01.2021

IT.NRW (2017/2): Viehbestand und tierische Erzeugung. Abgerufen unter: https://www.it.nrw/statistik/wirtschaft-und-umwelt/land-und-forstwirtschaft/viehbestand-und-tierische-erzeugung am 7.3.2021

IT.NRW (2018/1): Baufertigstellungen und Bauabgänge in Nordrhein-Westfalen 2017. Abgerufen unter: https://webshop.it.nrw.de/gratis/F229%20201700.pdf am 03.01.2021

IT.NRW (2019/1): Wohnen in Nordrhein-Westfalen - wie wohnt NRW? Abgerufen unter: https://www.it.nrw/node/98007/pdf am 16.11.2020

IT.NRW (2019/2): Baufertigstellungen und Bauabgänge in Nordrhein-Westfalen 2018. Abgerufen unter: https://webshop.it.nrw.de/gratis/F229%20201800.pdf am 03.01.2021

IT.NRW (2020/1): 622 Quadratkilometer der Landesfläche Nordrhein-Westfalens sind Gewässerflächen. Abgerufen unter: https://www.it.nrw/622-quadratkilometer-der-landesflaeche-nordrhein-westfalens-sind-gewaesserflaechen-100743 am 13.12.2020

IT.NRW (2020/2): Wohnungsbestand in den Gemeinden Nordrhein-Westfalens am 31. Dezember 2019. Abgerufen unter: https://webshop.it.nrw.de/gratis/F249%20201900.pdf am 13.12.2020

IT.NRW (2020/3): Baufertigstellungen und Bauabgänge in Nordrhein-Westfalen 2019. Abgerufen unter: https://webshop.it.nrw.de/gratis/F229%20201900.pdf am 03.01.2021

IT.NRW (2020/4): Rohstoffverbrauch und Rohstoffproduktivität. Abgerufen unter: https://www.it.nrw/statistik/eckdaten/rohstoffverbrauch-und-rohstoffproduktivitaet-2242 am 14.2.2021

IT.NRW (2020/5): Die Hälfte der landwirtschaftlichen Betriebe in NRW lebt von der Viehhaltung. Abgerufen unter: https://www.it.nrw/die-haelfte-der-landwirtschaftlichen-betriebe-nrw-lebt-von-der-viehhaltung-100172 am 29.1.2021

IT.NRW (2020/6): Themenschwerpunkt Wald. Abgerufen unter: https://www.it.nrw/node/101205/pdf am 2.3.2021

Ivanova (2020/1), Diana u.a.: Quantifying the potential for climate change mitigation of consumption options. Abgerufen unter: https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8589 am 26.1.2021

IWR (2020/1), Int. Wirtschaftsforum Regenerative Energien: Forscher steigern Wirkungsgrad von Power-to-Gas Anlagen kräftig. Abgerufen unter: https://www.iwr.de/news.php?id=35044 am 26.01.2021

Jacob (2020/1) Klaus, Max-Planck-Forschung, Heft 4/2020: Wald wandelt das Klima. Abgerufen unter: https://www.mpg.de/16352347/MPF_2020_4 am 28.3.2021.

Johnson (2019/1), T., Tipler, K. & Camarillo, T.: Monumental Decisions: How Direct Democracy Shapes Attitudes in the Conflict over Confederate Memorials. *PS: Political Science & Politics*, *52*(4), 620–624. Abgerufen unter: https://www.cambridge.org/core/journals/ps-political-science-and-politics/article/monumental-decisions-how-direct-democracy-shapes-attitudes-in-the-conflict-over-confederate-memorials/7C6780E5958066CEE0350F36457C846C am 23.2.2021

Jülich Forschungszentrum (2019/1): Von der Braunkohle zur Bioökonomie - Ein Gespräch mit Pflanzenforscher Ulrich Schurr zur möglichen Rolle der Bioökonomie im Strukturwandel. Abgerufen unter: https://www.fz-juelich.de/portal/DE/Presse/beitraege/2019/schurr-biooekonomie/_node.html am 18.3.2021

KEA-BW (2021/1); Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Auftraggeber); Kommunale Wärmeplanung - Handlungsleitfaden. Abgerufen unter: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Leitfaden-Kommunale-Waermeplanung-barrierefrei.pdf am 25.01.2021

KE-CONSULT (2018/1); Esser, Klaus u.a.; Auftraggeber: Deutscher Industrie- und Handelskammertag e.V. (DIHK): Autonomes Fahren - Aktueller Stand, Potentiale und Auswirkungsanalyse. Abgerufen unter: https://www.dihk.de/resource/blob/3924/b1d16ab3418ee25133fe2efdfa04c832/studie-autonomes-fahren-data.pdf am 31.3.2021

Klepper (2019/1), Gernot; Thrän, Daniela: Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Abgerufen unter: https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2019/02/.pdf am 31.3.2021

Klimaschutz durch Kreislaufwirtschaft (2020/1): Beitrag der Kreislaufwirtschaft zum Klimaschutz. Abgerufen unter: https://www.klima-kreislaufwirtschaft.de/klimaschutz-und-kreislaufwirtschaft/beitrag-der-kreislaufwirtschaft-zum-klimaschutz/ am 5.3.2021

Knauer (2014/1), Roland: Steinkohlebergbau - Pumpen für die Ewigkeit. Abgerufen unter: https://www.spektrum.de/news/ewigkeitskosten-wasser-pumpen-bis-in-alle-ewigkeit-spektrum-de/1222444 am 23.2.2021

Knitterscheidt (2019/1), Kevin: Was Salzgitter vom Start in eine CO_2-arme Stahlproduktion abhält. Abgerufen unteer: https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/stahlhersteller-was-salzgitter-vom-start-in-eine-co2-arme-stahlproduktion-abhaelt/24946074.html?ticket=ST-43832665-A4lf1fBdEHEtO5emVAfp-ap4-(14) am 31.3.2021

Kraftfahrt-Bundesamt (2020/1): Pressemitteilung Nr. 6/2020 - Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2020. Abgerufen unter: https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/Fahrzeugbestand/pm06_fz_bestand_pm_komplett.html am 20.12.2020

Kreis Schleswig-Flensburg (2020/1): Integriertes Umweltprogramm. Abgerufen unter: https://www.schleswig-flensburg.de/media/custom/2120_2410_1.PDF?1522833342 am 31.3.2021

Krug (2011/1), Joachim u.a.: Potenziale zur Vermeidung von Emissionen sowie der zusätzlichen Sequestrierung im Wald und daraus resultierenden Fördermaßnahmen. Abgerufen unter: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/bitv/dn049785.pdf am 7.3.2021

Kythreotis (2019/1), A. P.; Mantyka-Pringle, C.; Mercer, T. G.; Whitmarsh, L. E.; Corner, A.; Paavola, J.; … Castree, N.: Citizen Social Science for More Integrative and Effective Climate Action: A Science-Policy Perspective. Frontiers in Environmental Science, 7. Abgerufen unter: https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00010 am 23.2.2021

Lakner (2021/1): Europas Agrarpolitik für Bauern, Umwelt und Natur ökologisch ausgestalten – Landesregierung muss starke Eco-Schemes unterstützen. Abgerufen unter: https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST17-3654.pdf am 27.4.2021

Landesregierung NRW (2019/1): Ausbau Erneuerbarer Energien. Abgerufen unter: https://www.land.nrw/de/pressemitteilung/das-fuenfte-entfesselungspaket-erleichtert-den-konsequenten-ausbau-der-erneuerbaren am 02.02.2021

Landesregierung NRW (2019/2): Status-quo-Bericht „Bildung für nachhaltige Entwicklung in NRW“. Abgerufen unter: https://www.bne.nrw.de/fileadmin/Dateien/BNE/Status-quo-Bericht-BNE-Strategie-NRW.pdf am 13.3.2021

Landtag NRW (2019/1): Bericht der Landesregierung zur Erhebung von Erneuerungsmaßnahmen an kommunalen Schienenstrecken. Abgerufen unter: https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMV17-1848.pdf am 2.4.2021

Landtag NRW (2019/2): Anhörung zur Stärkung und Instandhaltung von Wasserstraßen in Nordrhein-Westfalen. Abgerufen unter: https://www.landtag.nrw.de/home/aktuelles-presse/meldungen/pressemitteilungen-und-informati/pressemitteilungen/2019/09/0409-anhoerung-wasserstrassen.html?kjahr=2020&kmonat=11 am 3.4.2021

Landtag NRW (2020/1): Antrag der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen - Finanzierung des Öffentlichen Personennahverkehrs: Solirisches Bürgerticket als lokales Modellprojekt ermöglichen. Drucksache 17/10628. Abgerufen unter: https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMD17-10628.pdf am 1.1.2021

Landtag NRW (2020/2): Antrag der Fraktion der CDU der Fraktion der SPD der Fraktion der FDP und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN - Einfach, einheitlich und erprobt: Mit E-Ticket und E-Tarif ein landesweit einheitliches und verständliches Tarifsystem für einen attraktiveren Öffentlichen Personennahverkehr ermöglichen. Drucksache 17/11962. Abgerufen unter: https://opal.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMD17-11962.pdf am 1.1.2021

Landtag NRW (2020/3): Antwort der Landesregierung auf die Kleine Anfrage von BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN "Wie schätzt die Landesregierung die wirtschaftliche Situation des Flughafen Köln/Bonn ein und wie verhält sie sich bei den Überlegungen zur Privatisierung der Bodenverkehrsdienste?". Drucksache 17/8489. Abgerufen unter: https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMD17-8489.pdf am 1.1.2021

Landtag NRW (2020/4): Antrag der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN - Luftverkehrskonzept für NRW. Drucksache 17/8764. Abgerufen unter: https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMD17-8764.pdf am 1.1.2021

Landtag NRW (2020/5): Klimaschutzgesetz. Abgerufen unter: https://www.landtag.nrw.de/home/dokumente_und_recherche/gesetzgebungsportal/aktuelle-gesetzgebungsverfahr/klimaschutzgesetz.html am 2.2.2021

Landtag NRW (2020/6): Entwurf des Klimaanpassungsgesetzes Nordrhein-Westfalen. Abgerufen unter: https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMV17-4417.pdf am 28.1.2021

Landtag NRW (2020/7), Drucksache 17/10078 Ergänzung der Antwort auf die Große Anfrage 15: Kommunaler Klimaschutz in NRW. Abgerufen unter: https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMD17-10078.pdf am 31.3.2021

Landtag NRW (2020/8): Entwurf eines Gesetzes zum Schutz und zur Pflege der Denkmäler im Lande Nordrhein-Westfalen. Abgerufen unter: https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMV17-3439.pdf am 22.2.2021

Landtag NRW (2021/1): Welche Fortschritte macht der Klimaschutz in NRW im Wärmesektor? Abgerufen unter: https://gruene-fraktion-nrw.de/wp-content/uploads/2021/02/Antwort-17-12477-Klimaschutz-Waermesektor.pdf Welche Fortschritte macht der Klimaschutz in NRW im ... am 2.2.2021

Landtag NRW (2021/2): Antwort der Landesregierung auf die Kleine Anfrage von BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Welche Klimawirkung hat die Bodennutzung in NRW? Drucksache 17/12223. Abgerufen unter: https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMD17-12347.pdf am 28.2.2021

Landtag NRW (2021/3): Gesetzentwurf der Landesregierung – Zweites Gesetz zur Änderung des Gesetzes zur Ausführung des Baugesetzbuches in Nordrhein-Westfalen. Abgerufen unter: https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMD17-13426.pdf am 26.4.2021

Landwirtschaftskammer (2015/1): Das Klimaschutzgesetz - Der Klimaschutzplan. Abgerufen unter: https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/klima/klimaschutzplan-nrw-gruber.htm am 27.2.2021

Landwirtschaftskammer (2018/1): Nährstoffbericht NRW 2017. Abgerufen unter: https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/naehrstoffbericht/index.htm am 27.2.2021

Lanier (2013/1), Jaron: Wem gehört die Zukunft? – Du bist nicht der Kunde der Internetkonzerne. Du bist Ihr Produkt. Hoffmann und Campe 2014 (englische Ausgabe: Who Owns the Future? – Simon & Schuster, New York 2013)

LANUV (2008/1): Hinweise zur Kompensation im Zusammenhang mit Wald. Abgerufen unter: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/natur/pdf/Hinweise_2005.pdf am 27.2.2021

LANUV (2012/1): Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW Teil 1 Windenergie. *LANUV-Fachbericht 40*, 171. Abgerufen unter: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30040a.pdf am 26.01.2021

LANUV (2013/1): Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Potentialstudie Erneuerbare Energien Teil 2 - Solarenergie. LANUV-Fachbericht 40. Abgerufen unter: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30040b.pdf am 20.11.2020

LANUV (2014/1): Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW. Teil 3 - Biomasse-Energie. *LANUV - Fachbericht 40*, 249. Abgerufen unter: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30040c.pdf am 3.2.2021

LANUV (2016/1): Potenzialstudie Pumpspeicherkraftwerke Nordrhein-Westfalen. Abgerufen unter: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30062_fabe_62_web.pdf am 3.2.2021

LANUV (2017/1): Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW. Teil 5 - Wasserkraft. *LANUV - Fachbericht 40*, 249. Abgerufen unter: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/Fachbericht_40_Teil_5-Wasserkraft.pdf am 31.3.2021

LANUV (2017/2): Daten zur Natur in Nordrhein-Westfalen 2016, Fachbericht 83. Abgerufen unter: https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/veroeffentlichungen/publikationen/fachberichte?tx_cartproducts_products%5Bproduct%5D=886&cHash=3333d4a6d8b82c8d1ebf6f9510ec28de am 28.2.2021

LANUV (2018/1): Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Potentialstudie Warmes Grubenwasser. LANUV-Fachbericht 90. Abgerufen unter: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/LANUV_fabe96_Potenzialstudie_Industrielle_Abwaerme_web.pdf am 20.11.2020

LANUV (2018/2): Erstes landesweites Solarkataster für Nordrhein-Westfalen ist online. Abgerufen unter: https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/veroeffentlichungen/pressemitteilungen/pressearchiv/746-erstes-landesweites-solarkataster-fuer-nordrhein-westfalen-ist-online am 03.02.2021

LANUV (2018/3): Flächenbewirtschaftung. Abgerufen unter: https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/landwirtschaft-und-ernaehrung/flaechenbewirtschaftung/ am 26.2.2021

LANUV (2019/1): Energieatlas NRW. Abgerufen unter: https://www.energieatlas.nrw.de/site/ am 23.1.2021

LANUV (2019/2), Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Potentialstudie Industrielle Abwärme. LANUV-Fachbericht 96. Abgerufen unter: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/LANUV_fabe96_Potenzialstudie_Industrielle_Abwaerme_web.pdf am 20.11.2020

LANUV (2019/3): Weiterhin große Potenziale für Strom aus Photovoltaik in NRW. Abgerufen unter: https://www.lanuv.nrw.de/landesamt/veroeffentlichungen/pressemitteilungen/details/2454-weiterhin-grosse-potenziale-fuer-strom-aus-photovoltaik-in-nordrhein-westfalen am 31.1.2021

LANUV (2019/4): Treibhausgas-Emissionsinventar - Nordrhein-Westfalen 2017. Abgerufen unter: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/LANUV-Fachbericht_95_WEB.pdf am 8.3.2021

LANUV (2020/1); Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: Treibhausgas-Emissionsinventar - Nordrhein-Westfalen 2018 - LANUV-Fachbericht 105. Abgerufen unter: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30105.pdf am 5.11.2020

LANUV (2020/2): Klimafolgenmonitoring. Abgerufen unter: https://www.lanuv.nrw.de/kfm-indikatoren/ am 13.11.2020

LANUV (2020/3): Energieatlas NRW, Wärmekataster. Abgerufen unter: https://www.energieatlas.nrw.de/site/planungskarte_waerme am 22.11.2020

LANUV (2020/4): Energiedaten NRW 2019. Abgerufen unter: https://www.energieatlas.nrw.de/site/werkzeuge/energiestatistik am 22.1.2021

Leibnitz (2021/1): Strom von der Hauswand. Abgerufen unter: https://www.leibniz-gemeinschaft.de/ueber-uns/neues/forschungsnachrichten/forschungsnachrichten-single/newsdetails/strom-von-der-hauswand.html am 5.2.2021

Lenton (2020/1), Timothy M; Rockström, Johan; Gaffney, Owen; Rahmstorf, Stefan; Richardson, Katherine; Steffen, Will; Schellnhuber, Hans-Joachim: Climate tipping points — too risky to bet against. The growing threat of abrupt and

irreversible climate changes must compel political and economic action on emissions. Abgerufen unter: https://www.nature.com/articles/d41586-019-03595-0 am 31.3.2021

Liebe (2017/1), U.; Bartczak, A. & Meyerhoff, J.: A turbine is not only a turbine: The role of social context and fairness characteristics for the local acceptance of wind power. Energy Policy, 107, 300–308. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.043

Lieferkettengesetz (2019/1): Initiative Lieferkettengesetz. Abgerufen unter: https://lieferkettengesetz.de/ am 31.03.2021

LEE NRW (2020/1): Erneuerbare-Energien-Bilanz 2019 für Nordrhein-Westfalen. Abgerufen unter: https://www.lee-nrw.de/presse/mitteilungen/erneuerbare-energien-bilanz-2019-fuer-nordrhein-westfalen/ am 2.2.2021

Lienhoop (2018/1), N.: Acceptance of wind energy and the role of financial and procedural participation: An investigation with focus groups and choice experiments. *Energy Policy*, *118*, 97–105. Abgerufen unter: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.063 am 31.3.2021

Löfken (2010/1), Jan Oliver, Wissenschaft aktuell: Europas Stromnetz der Zukunft. Abgerufen unter: https://www.wissenschaft-aktuell.de/extra_rubriken/Europas_Stromnetz_der_Zukunft.html am 13.3.2021

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (2019/1), Michalski, Jan; Altmann, Matthias; Bünger, Ulrich, Weindorf, Werner (Auftraggeber: Wirtschaftsminister NRW: Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen. Abgerufen unter: https://www.in4climate.nrw/nachrichten/details/wirtschaftsministerium-veroeffentlicht-studie-zur-wasserstoffnutzung-in-nordrhein-westfalen/ am 29.1.2020

LUT (2019/1), Lappeenranta University of Technology, Energy Watch Group: Global Energy System based on 100% Renewable Energy – Power, Heat, Transport, Desalination Sectors. Abgerufen unter: http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/EWG_LUT_100RE_All_Sectors_Global_Report_2019.pdf am 19.12.2020

Maier (2019/1), Joseph: Innovative Möglichkeiten zur wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Energiespeicherung. Artikel vom Autor per Mail zugeschickt.

Maagøe (2019/1), Viegand: Erfahrungen mit der Wärmeplanung in Dänemark. Abgerufen unter: https://docplayer.org/187187233-Erfahrungen-mit-der-waermeplanung-in-daenemark.html am 28.1.2021

Maritimes Cluster Norddeutschland (2019/1): Methanol 3.0: Grüne Wertschöpfungsketten als Chance für eine nachhaltigere Schifffahrt. Abgerufen unter: https://www.maritimes-cluster.de/news/aktuelles/methanol-30-gruene-wertschoepfungsketten-als-chance-fuer-eine-nachhaltigere-schifffahrt/ am 31.3.2021

Matthes (2019/1), Felix.: Tagesspiegel Background: Standpunkt – CO_2-Preis jenseits der Leerformel. Abgerufen unter: https://background.tagesspiegel.de/CO2-Preis-jenseits-der-Leerformel am 31.3.2021

Matzig (2020/1), Roland: CO_2-neutraler Gebäudebestand bis 2050 – wie geht das? Serielle Sanierung in der Masse. Vortrag auf dem Herbstforum Zukunft Altbau 2020. Abgerufen unter: https://www.zukunftaltbau.de/veranstaltungen/herbstforum-altbau/ am 12.02.2021

Mayr (2018/1): Photovoltaik in der Landwirtschaft. Abgerufen unter: https://www.pvaustria.at/wp-content/uploads/Mayr_PV-in-der-LW.pdf am 31.3.2021

MCC (2019/1): Optionen für eine CO_2 – Preisreform. MCC-PIK-Expertise für den Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung. Abgerufen unter: https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/B2.3_Publications/Working%20Paper/2019_MCC_Optionen_f%C3%BCr_eine_CO2-Preisreform_final.pdf am 21.11.2020.

MCC (2020/1): Schnellschätzung: Globaler CO_2-Ausstoß Anfang April 17 Prozent niedriger als vor Corona. Abgerufen unter: https://www.mcc-berlin.net/news/meldungen/meldungen-detail/article/globaler-co2-ausstoss-17-prozent-niedriger-als-vor-corona.html am 4.11.2020

MD (2020/1): Mehr Demokratie e. V.; Bürgerbegehren Klimaschutz: Handbuch Klimaschutz - Wie Deutschland das 1,5-Grad-Ziel einhalten kann. Oekom Verlag, München 2020

MD (2020/2): Mehr Demokratie e. V.; Handbuch Klimaschutz - Wie Deutschland das 1,5-Grad-Ziel einhalten kann. Website zum Buch. Abgerufen unter: https://handbuch-klimaschutz.de/ am 4.11.2020

Meadows (1972/1), Donella; Randers, Jørgen; Meadows, Dennis; Behrends, William: The Limits to Growth: A Report to The Club of Rome. Abgerufen unter: http://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/Limits-to-Growth-digital-scan-version.pdf am 23.02.2020

MELUND (2018/1): Bericht der Landesregierung Energiewende und Klimaschutz in Schleswig-Holstein - Ziele, Maßnahmen und Monitoring 2018. Abgerufen unter: https://www.landtag.ltsh.de/infothek/wahl19/drucks/00800/drucksache-19-00818.pdf am 28.1.2021

MKULNV (2015/1), Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Klimaschutzplan Nordrhein-Westfalen - Klimaschutz und Klimafolgenanpassung. Abgerufen unter: https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Dateien/Download-Dokumente/Broschueren/klimaschutzbericht_nrw_151201.pdf am 22.11.2020

MKULNV (2015/2): Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas 31.3.2021

MKULNV (2015/3): Öko-Landwirtschafts-Strategie NRW 2020. Abgerufen unter: https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDFs/landwirtschaft/oeko_landwirtschafts_strategie_nrw_2020.pdf am 5.3.2021

MKULNV (2016/1): Umweltbericht Nordrhein-Westfalen 2016. Abgerufen unter: https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDFs/umwelt/umweltbericht/umweltbericht_nrw_2016.pdf am 5.3.2021

Monheim (2019/1): Startschuss für die autonom fahrenden Linienbusse in Monheim am Rhein. Abgerufen unter: https://www.monheim.de/stadtleben-aktuelles/news/nachrichten/startschuss-fuer-die-autonom-fahrenden-linienbusse-in-monheim-am-rhein-6644/ am 2.1.2021

Müller (2014/1), Valerie; Süddeutsche Zeitung: Baden in der Braunkohlegrube. Abgerufen unter: https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/renaturierung-baden-in-der-braunkohlegrube-1.2004029 am 5.2.2021

muenster.de (2015/1): Bilanz zum Jahrestag des Ausnahme-Unwetters. Abgerufen unter: https://www.muenster.de/stadt/unwetter-bilanz-gruenflaechen.html am 26.1.2021

MULNV (2017/1), Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Umweltwirtschaftsbericht Nordrhein-Westfahlen 2017. Abgerufen unter: https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/uwb_2017.pdf am 22.11.2020

MULNV (2018/1): Lebensmittelverschwendung in privaten Haushalten. Abgerufen unter: https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/lebensmittelverschwendung_private_haushalte.pdf am 4.3.2021

MULNV (2020/1): Waldzustandsbericht NRW 2020, Kurzfassung. Abgerufen unter https://www.umwelt.nrw.de/mediathek/broschueren/detailseite-broschueren?backId=147&broschueren_id=14329&cHash=5ddff91dbe87c15191e63d4c0bd00c1d am 6.12.2020

MULNV (2020/2): Umwelt.NRV - Nutztierhaltung. Abgerufen unter: https://www.umwelt.nrw.de/landwirtschaft/tierhaltung-und-tierschutz/nutztierhaltung am 27.2.2021

MULNV (2020/3): Ökologischer Landbau. Abgerufen unter: https://www.umwelt.nrw.de/landwirtschaft/landwirtschaft-und-umwelt/oekologischer-landbau am 27.2.2021

MULNV (2021/1): Konsum und Wertschätzung von Lebensmitteln. Abgerufen unter: https://www.umwelt.nrw.de/verbraucherschutz/konsum-und-wertschaetzung-von-lebensmitteln am 4.3.2021

MULNV (2021/2): Deponien. Abgerufen unter: https://www.umwelt.nrw.de/umwelt/umwelt-und-ressourcenschutz/abfall-und-kreislaufwirtschaft/deponien am 5.3.2021

MULNV (2021/2): Flächenverbrauch. Abgerufen unter: https://www.umwelt.nrw.de/umwelt/umwelt-und-ressourcenschutz/boden-und-flaechen/flaechenverbrauch/ am 10.4.2021

Munich Re (2020/1): Klimawandel – eine der größten Herausforderungen für die Menschheit – unsere Antworten. Abgerufen unter: https://www.munichre.com/de/risiken/klimawandel-eine-herausforderung-fuer-die-menschheit.html am 31.3.2021

MVG (2020/1), Märkische Verkehrsgesellschaft Lüdenscheid: Abgerufen unter: https://www.mvg-online.de/fileadmin/user_upload/user_upload/Dokumente/Tarif/csm_Geltungsbereich_PPT_2020-3_fd861576e9.png am 10.12.2020

MWIDE (2020/1), Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen: Klimaschutzgesetz. Verabschiedet 2013, abgerufen unter: https://www.klimaschutz.nr w.de/instrumente/klimaschutzgesetz/ am 21.11.2020

MWIDE (2020/2): Kooperation zur Digitalisierung von Verwaltungsprozessen, insbesondere über die Nutzung und gemeinsame Weiterentwicklung des Beteiligungsportals des Freistaates Sachsen hier: Abschluss einer Verwaltungsvereinbarung. Abgerufen unter: https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMV17-3959.pdf am 5.1.2021

MWIDE (2020/3): Klimaschutz in Nordrhein-Westfalen Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen, Ziele und Strategien, Instrumente und Perspektiven. Abgerufen unter: https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMI17-285.pdf am 10.1.2021

MWIDE (2020/4): Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen. Abgerufen unter: https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/mwide_br_wasserstoff-roadmap-nrw_web-bf.pdf am 31.3.2021

MWME (2005/1): Rohstoffsicherung in Nordrhein-Westfalen - Arbeitsbericht. Abgerufen unter: https://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/themen/r/regionalplanung_rohstoffsicherung/624_rohstoffbericht.pdf am 15.2.21

NABU (2010/1): Klimaschutz in der Landwirtschaft. Abgerufen unter: http://imperia.verbandsnetz.nabu.de/imperia/md/content/nabude/landwirtschaft/klimaschutz-landwirtschaft-web.pdf am 7.3.2021

NABU (2011/1): Anforderungen an einen Sanierungsfahrplan. Abgerufen unter: https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/nabu-sanierungsfahrplan_endg.pdf am 22.01.2021

NABU (2020/1): Maßnahmenvorschläge zur Beschleunigung des naturverträglichen Ausbaus der Windenergie an Land. Abgerufen unter: https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/wind/arbeitspapier_windenergie_und_artenschutz_gr__ne_nabu_201205.pdf am 16.2.2021

NABU NRW (2016/1), Positionspapier: Wald und Wild in NRW. Abgerufen unter: http://nrw.nabu.de/natur-und-landschaft/waelder/waldundwild/21831.html am 6.12.2020

Nature Communications (2018/1); Lawrence, M. G.; Schäfer, S.; Muri, H.; Scott, V.; Oschlies, A.; Vaughan, N. E.; Boucher, O.: Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. Abgerufen unter: https://doi.org/10.1038/s41467-018-05938-3 am 31.3.2021

Nature Communications (2019/1): Environmental co-benefits and adverse side-effects of alternative power sector decarbonization strategies. Abgerufen unter: https://www.nature.com/articles/s41467-019-13067-8.pdf am 31.3.2021

Naturstrom (2021/1): Kalte Nahwärme - Brennstofffrei heizen in Ihrem Neubaugebiet. Abgerufen unter: https://www.naturstrom.de/kommunen/kalte-nahwaerme am 31.3.2021

Navigant (2019/1), & Fraunhofer IEE: Wissenschaftliche Fundierung der Beratungen zu Abstandsregelungen bei Windenergie an Land. Abgerufen unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/wissenschaftliche-fundierung-der-beratungen-zu-abstandsregelungen-bei-windenergie-an-land.pdf?__blob=publicationFile&v=4 am 4.2.2021

NEE (2020/1), Netzwerk Europäischer Eisenbahnen e.V.: TU Berlin; VPI, Verband der Güterwagenhalter in Deutschland e.V.: CO_2-Minderung im Güterverkehr durch deutlichen Modal Shift. Abgerufen unter: https://www.netzwerk-bahnen.de/news/verkehrsverlagerung-muss-am-lkw-trailer-ansetzen-studie-der-tu-berlin-stellt-gravierende-co2-reduktionen-in-aussicht.html am 11.11.2020

NEWA (2020/1): New European Wind Atlas. Abgerufen unter: https://map.neweuropeanwindatlas.eu/ am 3.2.2021

NewClimate. (2016/1), Greenpeace (Auftraggeber): Was bedeutet das Pariser Abkommen für den Klimaschutz in Deutschland? Abgerufen unter: https://newclimateinstitute.files.wordpress.com/2016/02/160222_klimaschutz_paris_studie_02_2016_fin_neu1.pdf am 2.2.2021

Niederrheinappell (2020/1): Wasser. Abgerufen unter: https://niederrheinappell.de/wasser/ am 25.4.2021

Odenwald (2019/1), Michael (Fokus): Klimawandel – Gefährliche Kipp-Punkte - Das passiert, wenn wir das 1,5-Grad-Ziel nicht einhalten. Abgerufen unter: https://www.focus.de/wissen/klima/klimawandel-das-passiert-wenn-wir-das-1-5-grad-ziel-nicht-einhalten_id_10779382.html am 23.02.2020

Öko-Institut (2016/1), Fraunhofer ISE, Irees: Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 – Verkehr. Abgerufen unter: https://www.oeko.de/oekodoc/2517/2016-047-de.pdf am 28.12.2020

Öko-Institut (2016/2): Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Sektoren Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und Industrie. Abgerufen unter: https://www.oeko.de/oekodoc/2518/2016-048-de.pdf am 22.01.2021

Öko-Institut (2018/1): Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Abgerufen unter: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratON-O-Lkw-Technologievergleich-2018.pdf am 29.12.2020

Öko-Institut (2019/1); Prognos AG: Zukunft Stromsystem II. Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung. Vom Ziel her denken. Abgerufen unter: https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF-Zukunft-Stromsystem-2.pdf am 3.2.2021

Öko-Institut (2019/2), im Auftrag der Klima-Allianz: Quantifizierung Maßnahmenvorschläge 2030 Landwirtschaft. Abgerufen unter: https://www.oeko.de/publikationen/p-details/quantifizierung-von-massnahmenvorschlaegen-der-deutschen-zivilgesellschaft-zu-thg-minderungspotenzia/ am 31.3.2021

Ökolandbau.de (2021/1): Ökofläche und Ökobetriebe in Deutschland. Abgerufen unter: https://www.oekoland-bau.de/landwirtschaft/biomarkt/oekoflaeche-und-oekobetriebe-in-deutschland am 22.2.2021

Ostberg (2013/1), Sebastian; Lucht, Wolfgang; Schaphoff, Sybill; Gerten, Dieter (PIK): Critical impacts of global warming on land ecosystems. Abgerufen unter: https://www.earth-syst-dynam.net/4/347/2013/esd-4-347-2013.pdf am 31.3.2021

Osterburg (2009/1), Bernhard, u.a: Erfassung, Bewertung und Minderung von THG-Emissionen des deutschen Agrar- und Ernährungssektors. Abgerufen unter: https://www.econstor.eu/handle/10419/39359 am 31.3.2021

Otto (2019/1), Ilona; Lucht, Wolfgang; Schellnhuber, Hans Joachim u. a.: Social tipping dynamics for stabilizing Earth's climate by 2050. Abgerufen unter: https://www.pnas.org/content/117/5/2354 am 10.2.2020

Partizipendium.de (2019/1), Paust, Andreas: CONSUL – Open Software für Bürgerbeteiligung. Abgerufen unter: https://partizipendium.de/consul-open-software-fuer-buergerbeteiligung/ am 5.1.2021

Pietroni (2017/1), A. A.; Fernahl, A.; Linkenheil, C. P. & Huneke, F.: Klimaschutz durch Kohleausstieg. Abgerufen unter: https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/20170628-greenpeace-studie-klimaschutz-kohleausstieg.pdf am 3.2.2021

PIK (2019/1); Potsdam Institute for Climate Impact Research: Tipping Elements - the Achilles Heels of the Earth System. Abgerufen unter: https://www.pik-potsdam.de/en/output/infodesk/tipping-elements am 31.3.2021

PIK (2019/2): Die unterschätzten Risiken des Kohleausstiegs. *Jg*, (6), 4–7. Abgerufen unter: https://www.pik-pots-dam.de/members/pahle/pahle-edenhofer-et-al-risiken-kohleausstieg.pdf am 3.2.2021

PNAS (2018/1): Trajectories of the Earth System in the Anthropicene. Abgerufen unter: https://www.pnas.org/con-tent/115/33/8252 am 31.3.2021

Prognos AG (2018/1): Status-quo der Regionalen Innovationsstrategien zur „intelligenten Spezialisierung" (RIS3) der Bundesländer. Abgerufen unter: https://s3platform.jrc.ec.europa.eu/documents/20182/253663/20170622_Prog-nos_RIS3-Strategien_Deutschland_Studie_Final_public.pdf/cb5f7dcf-f1e2-4bfe-8d66-996712558554 am 21.11.2020

Prognos AG (2018/2): Zukünftige Handelsfelder zur Förderung von Maßnahmen zur Strukturanpassung in Braunkohlere-gionen. Abgerufen unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/endbericht-prognos-zukuenftige-handlungsfelder-foerderung-von-massnahmen-zur-strukturanpassung-in-braunkohleregio-nen.pdf?__blob=publicationFile&v=16 am 22.11.2020

Prognos AG (2018/3): Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende. Abgerufen un-ter: https://www.zukunftsheizen.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Prognos-Endbericht_Fluessige_Energietraeger_Web-final.pdf am 31.12.2020

Prognos (2018/4); Altenburg, Sven u. a.; ADAC (Auftraggeber): Einführung von Automatisierungsfunktionen in der Pkw-Flotte. Abgerufen unter: https://www.adac.de/-/media/pdf/motorwelt/prognos_automatisierungsfunktio-nen.pdf?la=de-de&hash=4FE03D2842A22A8F900AE176AFCA6887 am 31.3.2021

Prognos AG (2019/1): Beschäftigungseffekte der BDI-Klimapfade. Abgerufen unter: https://www.arbeit-umwelt.de/be-schaeftigungseffekte-einer-ambitionierten-klimapolitik/ am 2.2.2021

Proplanta (2020/1): Schnelle Regelung für Windrad-Mindestabstand in NRW gefordert. Abgerufen unter: (https://www.proplanta.de/agrar-nachrichten/energie/schnelle-regelung-fuer-windrad-mindestabstand-in-nrw-gefor-dert_article1597666721.html) am 4.2.2021

Proplanta (2020/2): Abgerufen unter: https://www.proplanta.de/agrar-nachrichten/agrarpolitik/wird-der-oekolandbau-in-nrw-ausgeweitet_article1600771485.html am 19.1.2021

Oekolandbau.de (2020/1): Ökofläche und Ökobetriebe in Deutschland. Abgerufen unter: https://www.oekoland-bau.de/landwirtschaft/biomarkt/oekoflaeche-und-oekobetriebe-in-deutschland/ am 7.3.2021

Quaschning (2016/1), Volker: Sektorkopplung durch die Energiewende. Abgerufen unter: https://www.volker-quaschning.de/publis/studien/sektorkopplung/Sektorkopplungsstudie.pdf am 19.11.2020

Rachmann (2008/1), Gerold u.a.: Abgerufen unter: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/bitv/dk039994.pdf am 7.3.2021

Radio Vest (2020/1): Stadt Marl steckt acht Millionen Euro in Radwege. Abgerufen unter: https://www.radiovest.de/artikel/stadt-marl-steckt-acht-millionen-euro-in-radwege-812915.html am 18.12.2020

Recharge (2020/1), Collins, Leigh: Green hydrogen 'cheaper than unabated fossil-fuel H_2 by 2030': Hydrogen Council. Abgerufen unter: https://www.rechargenews.com/transition/green-hydrogen-cheaper-than-unabated-fossil-fuel-h2-by-2030-hydrogen-council/2-1-741658 am 31.3.2021

Regionomica (2013/1): Bericht: Potentialanalyse zur intelligenten Spezialisierung in der Innovationsregion Rheinisches Revier (IRR). Abgerufen unter: https://www.rheinisches-revier.de/media/130617_kurzfassung_potenzialanalyse_irr_komplett.pdf am 22.11.2020

Rentmeister (2018/1), Christina: Chronik - Die schlimmsten Orkane in Deutschland. Abgerufen unter: https://rp-online.de/panorama/deutschland/nach-friederike-lothar-kyrill-ela-das-waren-die-schlimmsten-orkane-in-deutschland_aid-17631129 am 26.1.2021

Rifkin (2019/1), Jeremy: Der globale Green New Deal. Campus Verlag GmbH, Frankfurt a. M. 2019

Rinke (2019/1), Florian: Immer weniger Menschen machen den Führerschein. Aufgerufen unter: https://rp-online.de/leben/auto/news/fuehrerschein-immer-weniger-junge-leute-besitzen-eine-fahrerlaubnis_aid-38535651 am 2.12.2020

Ritchie (2019/1), Hannah; Roser, Max: CO_2 and Greenhouse Gas Emissions. Abgerufen unter: https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions#how-have-global-co2-emissions-changed-over-time am 31.3.2021

Ruhr-Guide (2020/1): Verkehrswende im Ruhrgebiet. Abgerufen unter: https://www.ruhr-guide.de/ruhrstadt/artikel-ruhrstadt/verkehrswende-im-ruhrgebiet/28087,0,0.html am 2.1.2021

RWTH Aachen (2020/1); Walter, Grit; SCI4CLIMATE.NRW: Klimaneutrale Grundstoffindustrie NRW - Einleitung. Abgerufen
unter: https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Veranstaltungen/2020/20201204_Statuskonferenz/Pr%C3%A4sentationen_Plenum/WissWirt_Walther_Einleitung.pdf am 10.3.2021

Salcos-Salzgitter-AG (2020/1): Salzgitter Low CO_2 Steel Making. Abgerufen unter: https://salcos.salzgitter-ag.com/ am 31.3.2021

Schlacke (2021/1), Sabine, WWU Münster: Stellungnahme für die Enquetekommission V – Gesundes Essen. Gesunde Umwelt. Gesunde Betriebe. des Landtags von Nordrhein-Westfalen zum Thema Klimaschutz und nachhaltige Ressourcennutzung in NRW. Abgerufen unter:
https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST17-3562.pdf am 10402021

Schüller (2021/1), Konrad, FAZ: Forderungen zum Klimaschutz - Können Zertifikate den Flächenfraß aufhalten? Abgerufen unter: https://www.faz.net/aktuell/politik/inland/klimaschutz-koennen-zertifikate-den-flaechenfrass-aufhalten-17207408.html am 14.3.2021

SCI (2016/1): Vernetzte Güterverkehrsmobilität - Potenziale für eine Verlagerung weiterer Güterverkehre von der Straße auf die Schiene. Abgerufen unter: https://www.vm.nrw.de/presse/pressemitteilungen/Archiv-des-MBWSV-2017/2017_03_16_VerGueMo/161118_VernGuetermob_NRW_SCI.pdf am 6.1.2021

SCI4CLIMATE.NRW (2020/1): Materialflüsse und Wertschöpfungskette der Stahl- und Zementindustrie in Nordrhein-Westfalen. Abgerufen
unter: https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Produkte_und_Wertsch%C3%B6pfungsketten/sci4climate-web-stahl-und-zement.pdf am 20.3.2021

SCI4CLIMATE.NRW (2020/2): Wissenschaft. Abgerufen unter: https://www.in4climate.nrw/akteure/wissenschaft/ am 21.3.2021

SCI4CLIMATE.NRW (2020/3): Charta für eine Energiewende-Industriepolitik – Ein Diskussionsvorschlag von Agora Energiewende und Roland Berger. Abgerufen
unter: https://www.in4climate.nrw/fileadmin/Downloads/Ergebnisse/SCI4climate.NRW/Szenarien/2020/sci4climatenrw-steckbrief-agora-2017-charta-energiewende-industriepolitik.pdf am 21.3.2021

Shell (2020/1): Shell Rheinland Raffinerie. Abgerufen unter: https://www.shell.de/ueber-uns/projects-and-sites/shell-rheinland-refinery.html am 5.11.2020

Simonds (2019/1), Dave: Hybrid airliners could come to dominate the skies. In The Economist, 29.06.2019. Abgerufen unter: https://www.economist.com/science-and-technology/2019/06/29/hybrid-airliners-could-come-to-dominate-the-skies am 31.3.2021

SimplyScience (2020/1): Ab aufs Wasser: Schiffsmotoren. Abgerufen unter: https://m.simplyscience.ch/teens-liesnach-archiv/articles/ab-aufs-wasser-schiffsmotoren.html am 31.3.2021

Solites (2019/1): Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme: Das Wissensportal für die saisonale Wärmespeicherung. Abgerufen unter: https://www.steinbeis.de/de/verbund/suche-im-steinbeis-verbund/detail.html?tx_z7suprofiles_detail%5Bprofile%5D=729&cHash=8b41f9592b248b742b2dd43f1f474c6d am 5.1.2021

Sommer (2021/1), A. U.: Vorlesung Politische Philosophie der Gegenwart: 9. Modernisierung, Individualisierung und das Ende der Stellvertretung? II: Universalisierungsdruck, Populismus und illiberale Demokratien. Freiburg i.Br.

Sonnenseite (2021/1): Lithium aus der Meerwasserentsalzungsanlage. Abgerufen unter: https://www.sonnenseite.com/de/wissenschaft/lithium-aus-der-meerwasserentsalzungsanlage/ am 9.4.2021

Spiegel (2020/1): Test in Norwegen - Schwarze Farbe könnte Windräder weniger tödlich für Vögel machen. Abgerufen unter: https://www.spiegel.de/consent-a-?targetUrl=https%3A%2F%2Fwww.spiegel.de%2Fwissenschaft%2Ftechnik%2Fwindkraft-schwarze-farbe-koennte-windraeder-weniger-toedlich-fuer-voegel-machen-a-de889617-6b6e-4de6-91ac-d1b3424c5f34&ref=https%3A%2F%2Fstartpage.com%2F am 5.2.2021

Spiegel (2021/1): Neues Personenbeförderungsgesetz – Fahrdienste bekommen mehr Freiheiten. Abgerufen unter: https://www.spiegel.de/consent-a-?targetUrl=https%3A%2F%2Fwww.spiegel.de%2Fauto%2Fpersonenbefoerderungsgesetz-bundestag-beschliesst-neue-regeln-fuer-uber-free-now-und-co-a-2fa886de-b8d7-482c-92fa-1834093c7fab am 2.4.2021

Srnicek (2016/1), Nick: Platform Capitalism. Wiley and Sons, Cambridge [Großbritannien] 2016

SRU (2012/1): Schienengüterverkehr 2050 - Szenarien für einen nachhaltigen Güterverkehr. Abgerufen unter: https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/03_Materialien/2012_2016/2013_MzU_45_Schienenguetererkehr2050.pdf?__blob=publicationFile&v=6 am 29.12.2020

SRU (2017/1): Umsteuern erforderlich - Klimaschutz im Verkehrssektor. Abgerufen unter: https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2016_2020/2017_11_SG_Klimaschutz_im_Verkehrssektor.pdf?__blob=publicationFile&v=26 am 28.12.2020

SRU (2019/1): Für die Umsetzung ambitionierter Klimapolitik und Klimaschutzmaßnahmen (Offener Brief an das Klimakabinett). Abgerufen unter: https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2016_2020/2019_09_Brief_Klimakabinett.pdf?__blob=publicationFile&v=5 am 31.3.2021

Stadt Essen (2019/1): Modal-Split 2035 - Handlungskonzept im Rat diskutiert. Abgerufen unter: https://www.essen.de/meldungen/pressemeldung_1326741.de.html am 5.12.2020

Stadt Köln (2015/1): Köln mobil 2025. Abgerufen unter: https://www.stadt-koeln.de/mediaasset/content/pdf66/koeln-mobil-2025.pdf am 5.12.2020

Stadt Münster (2015/1): Verkehr in Zahlen. Abgerufen unter: https://www.stadt-muenster.de/verkehrsplanung/verkehr-in-zahlen.html am 5.12.2020

Stadtwerke Kiel (2021/1): Wirtschaftlich, zukunftsfähig und sicher - Die Technik im Kraftwerk im Überblick - Elektrodenkessel. Abgerufen unter: https://www.stadtwerke-kiel.de/ueber-uns/kuestenkraftwerk/technik am 26.2.2021

Stahl (2020/1): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2020. Abgerufen unter: https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2020/11/WV-Stahl_Fakten-2020_rz_neu_Web.pdf am 19.3.2021

Statista (2021/1): Aluminium - Verwendete Menge in Deutschland nach Sektoren 2018. Abgerufen unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28203/umfrage/verwendung-von-aluminium-nach-industriezweigen-in-2007/#professional am 19.3.2021

Statistisches Bundesamt (2020/1): Von Eigentümern bewohnte Wohnungen (Eigentümerquote) 2018. Abgerufen unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/_Grafik/_Interaktiv/eigentuemerquote.html;jsessionid=76496DAF0DA7ED69152A95E1E0D77893.internet8711 am 16.11.2020

Stena Line (2020/1): Supergreen – So funktionierts. Abgerufen unter: https://www.stenaline.de/supergreen/so-funktionierts am 31.3.2021

Stratmann (2020/1), Klaus: Gasnetzbetreiber legen Plan für deutschlandweites Wasserstoffnetz vor. In Handelsblatt 28.1.2020, abgerufen unter: https://app.handelsblatt.com/politik/deutschland/energiewende-gasnetzbetreiber-legen-plan-fuer-deutschlandweites-wasserstoffnetz-vor/25476674.html?fbclid=IwAR1QYzxQt-gUtdRz-ncCEbD38jGpbNW8NPrXr8-aqOmtfKcCkzt3GtvpeK5c&ticket=ST-2956579-gVkdBpJxqem4TSFxyO9j-ap6 am 7.2.2021

SYSTEMIQ (2020/1): The Paris Effect - how the climate agreement is Reshaping the global economy. Abgerufen unter: https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2020/12/The-Paris-Effect_SYSTEMIQ_Full-Report_December-2020.pdf am 3.1.2021

Theurer (2021/1), Marcus; in FAZ 21.2.2021: Die Industrie will mehr Klimaschutz. Abgerufen unter: https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/klima-energie-und-umwelt/die-industrie-will-mehr-klimaschutz-17206023.html am 3.3.2021

Thießen (2016/1), Friedrich: Ein Flughafenkonzept für NRW - Grundzüge einer rationalen Flughafenpolitik. Abgerufen unter: https://monarch.qucosa.de/api/qucosa%3A20561/attachment/ATT-0/ am 2.4.2021

Thünen (2013/1): Report 11, Handlungsoptionen für den Klimaschutz in Agrar- und Forstwirtschaft. Abgerufen unter: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn052858.pdf am 29.9.2019

Thünen (2019/1): Report 71, Lebensmittelabfälle-Baseline 2015. Abgerufen unter: https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_71.pdf am 31.3.2021

Tiddens (2014/1), Harris: Wurzeln für die lebende Stadt - Wie wir die Eigenverantwortung von Stadtteilen stärken können und warum diese mehr Wertschätzung verdienen. Oekom Verlag, München 2014

TKH2Steel (2020/1), ThyssenKrupp: Mit Wasserstoff zur klimaneutralen Stahlproduktion. Abgerufen unter: https://www.thyssenkrupp-steel.com/de/unternehmen/nachhaltigkeit/klimastrategie/ am 20.3.2021

TU Berlin (2019/1): ELEKTRA – emissionsfrei auf dem Wasser. Abgerufen unter: https://www.tu-berlin.de/?209591 am 17.2.2021

UBA (2010/1): CO_2-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3773.pdf am 31.3.2021

UBA (2012/1): Klimawirksamkeit des Flugverkehrs. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/klimawirksamkeit_des_flugverkehrs.pdf am 31.3.2021

UBA (2013/1): Anpassung - Handlungsfeld Wasser, Hochwasser- und Küstenschutz. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/anpassung-an-den-klimawandel/anpassung-auf-laenderebene/handlungsfeld-wasser-hochwasser-kuestenschutz am 13.11.2020

UBA. (2013/2). Potential der Windenergie an Land. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial_der_windenergie.pdf am 3.2.2021

UBA (2013/3): Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/globale_landflaechen_und_biomasse_kurz_deutsch_bf.pdf am 31.3.2021

UBA (2013/4): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/treibhausgasneutrales_deutschland_im_jahr_2050_langfassung.pdf am 31.3.2021

UBA (2014/1): Der Weg zum klimaneutralen Gebäudebestand. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/hgp_gebaeudesanierung_final_04.11.2014.pdf am 20.01.2021

UBA (2014/2): Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/nachhaltige-kaelteversorgung-in-deutschland-an-den am 19.3.2021

UBA (2016/1): Umweltschädliche Subventionen in Deutschland 2016. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/uba_fachbroschuere_umweltschaedliche-subventionen_bf.pdf am 31.3.2021

UBA (2016/2): Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position_power_to_gas-power_to_liquid_web.pdf am 31.3.2021

UBA (2016/3): Rebound-Effekte - Empirische Ergebnisse und Handlungsstrategien. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/rebound-effekte am 26.4.2021

UBA (2017/1): Klimaschutz im Verkehr: Neuer Handlungsbedarf nach dem Pariser Klimaschutzabkommen. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-07-18_texte_45-2017_paris-papier-verkehr_v2.pdf am 29.12.2020

UBA (2017/2): Daten und Fakten zu Braun- und Steinkohlen. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/171207_uba_hg_braunsteinkohle_bf.pdf am 3.2.2021

UBA (2018/1): Entwicklung des Stromverbrauchs nach Sektoren. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren am 31.3.2021

UBA (2018/2): Szenario Luftverkehr Deutschland unter Einbezug von Umweltaspekten. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-12-14_texte_109-2018-nachhaltige-gueterinfrastruktur.pdf am 31.3.2021

UBA. (2018/3): Beschäftigungsentwicklung in der Braunkohleindustrie: Status quo und Projektion. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/publikationen/2018-07-25_climate-change_18-2018_beschaeftigte-braunkohleindustrie.pdf am 31.3.2021

UBA (2018/4): Energieerzeugung aus Abfällen. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-06-26_texte_51-2018_energieerzeugung-abfaelle.pdf am 31.3.2021

UBA (2018/5): Inländische Entnahme von Rohstoffen und Materialimporte. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/rohstoffe-als-ressource/inlaendische-entnahme-von-rohstoffen am 15.2.2021

UBA (2019/1): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdf am 31.3.2021

UBA (2019/2): Bracker, Joß; Seebach, Dominik (Öko-Institut), Pehnt, Martin (IFEU): Strombilanzierung im Verkehrssektor. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-11-07_texte_134-2019_strom-verkehrsmittelvergleich_0.pdf am 31.3.2021

UBA (2019/3): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf am 31.3.2021

UBA (2019/4): Kein Grund zur Lücke - So erreicht Deutschland seine Klimaschutzziele im Verkehrssektor für das Jahr 2030. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/19-12-03_uba_pos_kein_grund_zur_lucke_bf_0.pdf am 26.02.2020

UBA (2019/5): Klimabilanz 2018: 4,5 Prozent weniger Treibhausgasemissionen - Umweltbundesamt legt erste detaillierte Schätzung vor. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/klimabilanz-2018-45-prozent-weniger am 28.12.2020

UBA (2019/6): Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-19_texte_114-2019_energieversorgung-verkehr.pdf am 31.3.2021

UBA (2019/7): Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten (2. Auflage). Abgerufen
unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190215_uba_fachbrosch_rtd am 24.1.2021

UBA (2019/8): Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/das_monitoringbericht_2019_barrierefrei.pdfam 31.3.2021

UBA (2019/9): Rohstoffnutzung und ihre Folgen. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/rohstoffe-als-ressource/rohstoffnutzung-ihre-folgen am 31.3.2021

UBA (2019/10): Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas am 31.3.2021

UBA (2019/11): Emissionen der Landnutzung, -änderung und Forstwirtschaft. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung am 31.3.2021

UBA (2019/12): Aktuelle Entwicklung und Perspektiven der Biogasproduktion aus Bioabfall und Gülle. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktuelle-entwicklung-perspektiven-der am 27.2.2021

UBA (2019/13): Position der Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (KRU) - Substitutionsquote - Ein realistischer Erfolgsmaßstab für die Kreislaufwirtschaft! Abgerufen

unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/190722_uba_kommp_substitutionsquote_bf.pdf am 31.3.2021

UBA (2019/14): Künstliche Intelligenz im Umweltbereich - Anwendungsbeispiele und Zukunftsperspektiven im Sinne der Nachhaltigkeit. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-06-04_texte_56-2019_uba_ki_fin.pdf am 26.4.2021

UBA (2020/1): Fahrleistungen, Verkehrsaufwand und „Modal Split". Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#fahrleistung-im-personen-und-guterverkehr am 5.12.2020

UBA (2020/2): Tempolimit auf Autobahnen mindert CO_2-Emissionen deutlich. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/tempolimit-auf-autobahnen-mindert-co2-emissionen am 31.3.2021

UBA (2020/3): Beschäftigung im Umweltschutz. Abgerufen unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020_hgp_beschaeftigung_im_umweltschutz_final_bf.pdf am 31.3.2021

UBA (2020/4): Eisen und Stahl. Abgerufen am: https://www.umweltbundesamt.de/eisen-stahl#hinweise-zum-recycling am 15.2.2021

UBA (2021/1): CO_2-Rechner des Umweltbundesamtes - Mobilität - Flugreisen. Abgerufen unter: https://uba.co2-rechner.de/de_DE/mobility-flight-calculator#panel-calc am 26.1.2021

Umweltamt Wiesbaden (2015/1): Landeshauptstadt Wiesbaden, Umweltamt (Herausg.): Leitfaden Energetisches Sanierung denkmalgeschützter Gebäude in Wiesbaden. Abgerufen unter: https://www.wiesbaden.de/medien-zentral/dok/leben/planen-bauen-wohnen/P141_SL-WI_Leitfaden_150317_web.pdf am 20.01.2021

Unfolded (2019/1): Ausgezeichnete CO_2-Bilanz von Kartonverpackungen durch neue Studie belegt. Abgerufen unter: https://www.mm-karton.com/news-unfolded/ausgezeichnete-co2-bilanz-von-kartonverpackungen-durch-neue-studie-belegt/ am 31.3.2021

Unnerstall (2018/1): Thomas: Energiewende verstehen. Die Zukunft von Autoverkehr, Heizen und Strompreisen. Abgerufen unter: https://www.springer.com/de/book/9783662577868 am 24.01.2021

UNO (2020/1): Helping governments and stakeholders make the SDGs a reality. Abgerufen unter: https://sustainabledevelopment.un.org/topics/sustainabledevelopmentgoals am 31.3.2021

VCI (2019/1): Kurzfassung der Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Abgerufen unter: https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet-kurzfassung.pdf am 21.11.2020

VCI (2020/1): Verband der chemischen Industrie: Chemiewirtschaft in Zahlen 2020. Abgerufen unter: https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/chemiewirtschaft-in-zahlen-print.pdf am 19.1.2021

VDA (2017/1): E-Fuels sind notwendig, um EU-Klimaschutzziele des Verkehrssektors zu erreichen. Abgerufen unter: https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/20171108-e-fuels-sind-notwendig-um-eu-klimaschutzziele-des-verkehrssektors-zu-erreichen.html am 31.3.2021

VDE (2020/1), FNN - Forum Netztechnik/Netzbetrieb: Deutsches Höchstspannungsnetz. Abgerufen unter: https://www.vde.com/resource/blob/1941438/44d7d556e6b5b7cd1e2f6cae0e5ce501/vde-fnn-karte-stromnetz-deutschland-2020-data.pdf am 13.1.2021

VDM (2021/1), Verband Deutscher Metallhändler: Metallrecycling ist aktiver Klimaschutz. Abgerufen unter: http://www.vdm.berlin/themen.php?i=19# am 15.1.2021

VDP (2021/1), Verband deutscher Papierfabriken: Publikationen - Angebot - Papier Kompass - Papier kompakt, Papierfakten. Abgerufen unter: https://www.vdp-online.de/publikationen/angebot am 21.3.2021

VDV (2018/1): Stellungnahme des VDV Nordrhein-Westfalen „Masterplan für die Elektrifizierung von Bahnstrecken in NRW". Abgerufen unter: https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/dokumentenarchiv/Dokument/MMST17-806.pdf am 2.4.2021

VDV (2020/1): Voll elektrisch! Sonderprogramm zur Finanzierung von Elektrifizierungsvorhaben und Hybridlösungen. Abgerufen unter: https://www.vdv.de/voll-elektrisch_i.pdfx am 2.4.2021

VDZ (2019/1): Recycling von Beton. Abgerufen unter: https://www.vdz-online.de/zementindustrie/nachhaltigkeit/recycling-von-beton/ am 31.3.2021

VDZ (2020/1), Verband Deutscher Zementwerke: Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Abgerufen unter: https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_Dekarbonisierung_Zement_Beton_2020.pdf am 8.3.2021

Vierjahn (2020/1), Birte; Universität Duisburg-Essen: Klima- und umweltschonende Technologie - Ammoniak als nachhaltiger Energieträger. Abgerufen unter: https://www.uni-due.de/2020-02-05-ammoniak-cracker am 19.3.2021

Viessmann (2019/1), Eisspeicher – innovative Energiequelle. Abgerufen unter: https://www.viessmann.de/de/wohngebaeude/waermepumpe/eis-energiespeicher.html am 05.01.2021

VM-NRW (2019/1), Ministerium für Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen: Mobilität in Nordrhein-Westfalen - Daten und Fakten 2018/2019 Straßenverkehr – ÖPNV und Eisenbahn – Binnenschiffsverkehr – Luftverkehr. Abgerufen unter: https://broschueren.nordrheinwestfalendirekt.de/herunterladen/der/datei/mobilitaet-in-nrw-daten-und-fakten-2018-2019-pdf/von/mobilitaet-in-nordrhein-westfalen-daten-und-fakten-2018-2019/vom/vm/3160 am 20.11.2020

Volkswagen (2020/1): Wasserstoff oder Batterie? Bis auf Weiteres ein klarer Fall. Abgerufen unter: https://www.volkswagenag.com/de/news/stories/2019/08/hydrogen-or-battery--that-is-the-question.html# am 10.2.2021

Warren (2015/1), M. E. & Gastil, J.: Can Deliberative Minipublics Address the Cognitive Challenges of Democratic Citizenship? *The Journal of Politics*, *77*(2), 562–574. Abgerufen unter: https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/680078 am 12.3.2021

WBAE (2020/1), Wissenschaftliche Beirat für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz: Politik für eine nachhaltigere Ernährung - Eine integrierte Ernährungspolitik entwickeln und faire Ernährungsumgebungen gestalten. Abgerufen unter: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/agrarpolitik/wbae-gutachten-nachhaltige-ernaehrung.pdf?__blob=publicationFile&v=3 am 12.3.2021

WBGU (2020/1), Wissenschaftliche Beirat Globale Umweltveränderungen: Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration. Abgerufen unter: https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2020/pdf/WBGU_HG2020_ZF.pdf am 12.3.2021

Welt (2018/1), Rolf Schraa: Wo sollen 50.000 neue Jobs herkommen? Abgerufen unter: https://www.welt.de/regionales/nrw/article177210034/Kohleausstieg-in-NRW-Wo-sollen-50-000-neue-Jobs-herkommen.html am 30.1.2021

Westfalengas (2021/1): Übersicht Produktsortiment natürliche und halogenfreie Kältemittel. Abgerufen unter: https://westfalen.com/de/de/geschaeftskunden/gase/kaeltemittel/uebersicht-produktsortiment-kaeltemittel/?L=0 am 19.3.2021

Wenzel (2020/1), Frank-Thomas: DB Cargo setzt auf Expressgüterzüge. Kieler Nachrichten 5.12.2020

Wien Energie (2019/1): Stärkste Großwärmepumpe Mitteleuropas pumpt in Wien. Abgerufen unter: https://www.wienenergie.at/blog/staerkste-grosswaermepumpe-mitteleuropas-pumpt-in-wien/ am 26.2.2021

Wikipedia (2019/1): Erdgasspeicher. Abgerufen unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Erdgasspeicher am 20.11.2020

Wikipedia (2019/2): Übertragungsverlust. Abgerufen unter: https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%9Cbertragungsverlust am 8.2.2021

Wikipedia (2019/3): BECCS. Abgerufen unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Bioenergie_mit_CO2-Abscheidung_und_-Speicherung am 26.11.2019

Wikipedia (2020/1): CarbFix. Abgerufen unter: https://de.wikipedia.org/wiki/CarbFix am 15.11.2020

Wikipedia (2020/2): Liste der Aluminiumhütten. Abgerufen unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Aluminiumh%C3%BCtten am 19.3.2021

Wikipedia (2020/3): Liste der größten Stahlhersteller. Abgerufen unter: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Liste_der_gr%C3%B6%C3%9Ften_Stahlhersteller&action=history am 19.3.2021

Wikipedia (2021/1): Stahl - Ökologie und Recycling. Abgerufen unter: https://de.wikipedia.org/iki/Stahl#%C3%96kologie_und_Recycling am 15.2.2021

Wikipedia (2021/2): Liste der Erdölraffinerien. Abgerufen unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Erd%C3%B6lraffinerien#Deutschland am 19.3.2021

Wikipedia (2021/3): Liste der Länder nach Treibhausgas-Emissionen. Abgerufen unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_L%C3%A4nder_nach_Treibhausgas-Emissionen am 25.4.2021

Winterhagen (2019/1), Johannes: So werden Lithium-Ionen-Akkus recycelt. Abgerufen unter: https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/technik/so-werden-lithium-ionen-akkus-recycelt-16454686.html am 9.4.2021

Wirtschaft.NRW (2019/1): Strukturwandel Rheinisches Revier. Abgerufen unter: https://www.wirtschaft.nrw/strukturwandel-im-rheinischen-revier am 8.2.2021

Wirtschaft.NRW (2020/1): Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Nordrhein-Westfalen. Abgerufen unter: https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/pk_thgemissionen_grafiken.pdf am 27.2.2021

Wirtschaftswoche (2020/1): Thyssen-Krupp treibt Pläne für CO_2-freie Stahlproduktion voran. Abgerufen unter: https://www.wiwo.de/unternehmen/industrie/stahlkonzern-thyssen-krupp-treibt-plaene-fuer-co2-freie-stahlproduktion-voran/26138730.html am 20.3.2021

WKO (2019/1): Innovation aus Schweden: Stahlindustrie stellt auf Wasserstoff um. Abgerufen unter: https://www.wko.at/service/aussenwirtschaft/schweden-stahlindustrie-stellt-auf-wasserstoff-um.html am 31.3.2021

WN (2021/1): Land plant Pipelines bis Lingen - Wasserstoff-Revolution aus der Röhre. Abgerufen unter: https://www.wn.de/NRW/4310451-Land-plant-Pipelines-bis-Lingen-Wasserstoff-Revolution-aus-der-Roehre am 7.2.2021

Wolff (2020/1), Reinhard: Auf der Suche nach einem grünen Treibstoff. In Tageszeitung, 7.2.2020. Abgerufen unter: https://taz.de/Neuer-Treibstoff-fuer-Schiffe/!5662280&s=Auf+der+Suche+nach+einem+gr%C3%BCnen+Treibstoff/ am 31.3.2021

World Bank Group (2019/1): Total greenhouse gas emissions. Abgerufen unter: https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.GHGT.KT.CE am 31.3.2021

WRI (2017/1), World Resource Institute: Climate Science, Explained in 10 Graphics. Abgerufen unter: https://www.wri.org/blog/2017/04/climate-science-explained-10-graphics am 31.3.2021

Wuppertal (2012/1) Institut: Potenzialscreening zur Vorbereitung des Klimaschutzplanes NRW, (November), 1–80. Abgerufen unter: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7484/file/7484_Potenzialscreening.pdf am 31.3.2021

Wuppertal (2017/1) Institut, Greenpeace (Auftraggeber): Verkehrswende für Deutschland - Der Weg zu CO_2-freier Mobilität bis 2035. Abgerufen unter: www.wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/Mobilitaetsszenario_2035_Langfassung.pdf am 31.3.2021

Wuppertal (2020/1) Institut; Fridays for Future (Auftraggeber): CO_2-neutral bis 2035 – Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze. Abgerufen unter: https://fridaysforfuture.de/wp-content/uploads/2020/10/FFF-Bericht_Ambition2035_Endbericht_final_20201011-v.3.pdf am 20.12.2020

Wuppertal (2020/2) Institut: Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung. Abgerufen unter: https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/LEE-H2-Studie.pdf am 31.3.2021

Wupperverband (2018/1): Extremer Starkregen am 29.05.2018. Abgerufen unter: https://www.wupperverband.de/meldung/news/2018/05/extremer-starkregen-am-29-05-2018 am 26.1.2021

WWF (2015/1): Das große Wegschmeißen. Abgerufen unter: https://www.wwf.de/2015/juni/das-grosse-wegschmeissen/ am 31.3.2021

Wyputta (2020/1), Andreas, in TAZ 17.12.2020: Minusgeschäft Regionalflughäfen -Eine Luft-Nummer. Abgerufen unter: https://taz.de/Minusgeschaeft-Regionalflughaefen/!5733827/ am 2.4.2021

Zeit (2019/1) Online: Klimawandel - Mehr Hochwasser in Deutschland. Abgerufen unter: https://www.zeit.de/wissen/umwelt/2019-08/klimawandel-hochwasser-regenmengen-ueberschwemmung-europa am 13.11.2020

Zensus (2014/1), Statistische Ämter des Bundes und der Länder; Zensus 201, Gebäude mit Wohnraum sowie Wohngebäude nach Baujahr. Abgerufen unter: https://ergebnisse.zensus2011.de/#StaticContent:05,GWZ_1_1_1,m,table am 03.01.2021

Zukunftsagentur Rheinisches Revier (2020/1): Wirtschafts- und Strukturprogramm für das Rheinische Zukunftsrevier 1.0. Abgerufen unter: https://www.rheinisches-revier.de/media/buergerbroschuere_zukunftsrevier_1.pdf 31.3.2021

Zukunft Mobilität (2013/1): Groningen - die wahre Fahrradhauptstadt. Abgerufen unter: https://www.zukunft-mobilitaet.net/34091/urbane-mobilitaet/groningen-niederlande-radverkehr-dokumentation/ am 13.1.2021

Zukunftsnetz Mobilität NRW (2018/1), Infas: Was wissen wir Neues zum Mobilitätsverhalten? Fachtagung 13.12.2018 in Köln. Abgerufen unter: https://www.zukunftsnetz-mobilitaet.nrw.de/sites/default/files/infas_mid_zukunftsnetz_mobilitaet_nrw_fachtagung2018_20181212.pdf am 1.12.2020