

MEHR AUS WIND

SEKTORENKOPPLUNG:

WIE VERKEHR, WÄRME UND INDUSTRIE KLIMAPOLITISCH UND
WIRTSCHAFTLICH VON DER WINDENERGIE PROFITIEREN



Herausgeber

Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE)
EUREF-Campus 16
10829 Berlin

T +49 (0)30/212 341-210
F +49 (0)30/212 341-410
info@wind-energie.de
www.wind-energie.de

V.i.S.d.P.: Wolfram Axthelm

Redaktion

Ina Kietzmann, Philip Matthiessen

Layout

Ina Kietzmann, Sebastian Lechler

Autoren

Ina Kietzmann, Matthias Stark, Philip Matthiessen, Julius Petersik, Roman Rudnik

Druck

Senser Druck GmbH, Augsburg

Berlin, September 2022, 1. Auflage

Haftungsausschluss

Die in dieser Broschüre enthaltenen Angaben und Informationen sind nach bestem Wissen erhoben, geprüft und zusammengestellt. Eine Haftung für unvollständige oder unrichtige Angaben, Informationen und Empfehlungen ist ausgeschlossen, sofern diese nicht grob fahrlässig oder vorsätzlich verbreitet wurden.

INHALT

EINLEITUNG

NICHT NUR NOTWENDIG, SONDERN AUCH MACHBAR	5
ENERGIE IST MEHR ALS STROM	6
ZU DEN VORTEILEN DER SEKTORENKOPPLUNG	8

POWER TO GAS

WIE FUNKTIONIERT POWER-TO-GAS?	12
POWER-TO-GAS BEISPIELE	14
DIE VIELFALT DER SPEICHERTECHNOLOGIEN	16

POWER TO MOBILITY

WIE FUNKTIONIERT POWER-TO-MOBILITY?	18
WASSERSTOFF UND E-MOBIL: WARUM WIR BEIDES BRAUCHEN	20

POWER TO HEAT

WIE FUNKTIONIERT POWER-TO-HEAT?	22
POWER-TO-HEAT BEISPIELE UND ANWENDUNGSBEREICHE	24

DIE INFRASTRUKTUR WIRD SICH ÄNDERN	26
SO MUSS SICH DER STROMMARKT ÄNDERN	28

QUELLENANGABEN UND BILDNACHWEIS	30
---------------------------------------	----



NICHT NUR NOTWENDIG, SONDERN AUCH MACHBAR!

Liebe Leser*innen, liebe Unterstützer*innen
der Energiewende,

in Ihren Händen halten Sie die neue Broschüre des BWE zum Thema Sektorkopplung. Hinter diesem eher sperrigen Begriff verbirgt sich eine der entscheidendsten Herausforderungen für das Gelingen der Energiewende, nämlich die Frage, wie wir Erneuerbare Energien für andere Bereiche als nur die Stromerzeugung nutzbar machen können.

Diese Frage wird schon seit geraumer Zeit diskutiert, hat aber in den vergangenen Monaten nochmals deutlich an Bedeutung gewonnen. Durch den russischen Angriff auf die Ukraine haben sich zahlreiche Parameter im Energiesystem verschoben. Die Bundesregierung setzt der Gaslieferung aus Russland ein Ende. Es rächt sich, dass die deutsche Energiepolitik lange Jahre zu einseitig auf ebendieses Gas ausgerichtet war. Insbesondere energieintensive Industriezweige, wie beispielsweise Chemie oder Glasherstellung, sind noch immer auf Erdgas angewiesen.

Dass die Bundesregierung nun ihre Bezugsquellen diverser aufstellen möchte, ist ein richtiger Schritt – es darf aber nicht der einzige Schritt bleiben. Um künftige Versorgungskrisen und Abhängigkeiten zu vermeiden, kann es nur einen Weg geben: Die Umstellung der deutschen Energieversorgung auf 100 Prozent Erneuerbare Energien.

Die Erneuerbaren können mehr als nur Strom liefern: Geothermie, Solarthermie und mit Ökostrom betriebene Wärmepumpen liefern CO₂-freie und kostengünstige Wärme; und auch Photovoltaik und Windstrom können direkt und nachhaltig Wärme bereitstellen. Biogasanlagen können flexibel angesteuert werden, um Spitzen im Stromnetz abzufangen und aus Windenergie kann mittels Elektrolyseuren Grüner Wasserstoff produziert werden – jenes Gas, das im Wahlkampf mit dem geflügelten Wort »Champagner der Energiewende« umschrieben wurde und auf das insbesondere die Industrie setzt. Es stimmt daher positiv, dass es mittlerweile in fast allen Bundesländern Forschungs- oder Praxisprojekte zur Herstellung von grünem Wasserstoff gibt.



Damit könnte Deutschland den Energiebedarf im Verkehr, aber auch in der energieintensiven Industrie nicht nur aus nachhaltigen Quellen, sondern auch ohne Importe decken.

Diese Broschüre bietet einen Überblick über verschiedene Ansätze, die Sektoren Verkehr (Power to Mobility), Wärme (Power to Heat) und Erzeugung von Wasserstoff (Power to Gas) mit der Erzeugung von Windenergie zu koppeln und somit nachhaltig aufzustellen. Deutschland bietet hier mehr als nur vereinzelt Modellregionen und -projekte. Die Sektorkopplung ist vielerorts bereits gelebte Praxis.

Fest steht: Die Energiewende braucht die Sektorkopplung, um sichere und günstige Energie in allen Bereichen des Lebens verfügbar zu machen. Somit ist konsequente Sektorkopplung der Schritt vom Champagner der Energiewende hin zum Mineralwasser: günstig, lokal produziert und überall verfügbar.

Ihr

Hermann Albers
Präsident des Bundesverband WindEnergie e. V.

ENERGIEWENDE IST MEHR ALS STROM

Die Energiewende in Deutschland war lange Zeit eine Stromwende. Knapp die Hälfte unseres Stroms wird bereits mit Windenergie, Photovoltaik, Biomasse und Wasserkraft gedeckt. Dabei leistet die Windenergie an Land den größten Beitrag.

Aber Wind kann mehr. Das volle Potenzial der Windenergie an Land lässt sich erschließen, wenn wir sie mit weiteren Technologien kombinieren. Dazu gehört die Elektrifizierung des Verkehrs (»Power-to-Mobility«) und der Einsatz von Wärmepumpen (»Power-to-Heat«). Darüber hinaus bilden Elektrolyse und Methanisierung (»Power-to-Gas«) die Grundlage für eine zukünftige, erneuerbare Wasserstoff-Wirtschaft. Sie ermöglichen eine Fülle von Anwendungen in der Industrie, etwa in der Produktion von Stahl und Zement, und in Bereichen, die nicht elektrifiziert werden können, zum Beispiel dem Flugverkehr. Gemeinsam ermöglichen Elektrifizierung und grüner Wasserstoff so den Umbau hin zu einer CO₂-neutralen Wirtschafts- und Lebensweise. Über die Vorteile, Herausforderungen und Zukunftsperspektiven dieses Umbaus informiert Sie diese Broschüre.

Die Sektorenkopplung ist dringend nötig. Allein der Verkehrssektor nutzt nach wie vor über 95 Prozent fossile Energieträger, vor allem Benzin und Diesel aus Erdöl. Die Treibhausgas-Emissionen in diesem Bereich stiegen zuletzt sogar an – entgegen den politischen Zielvorgaben¹. Auch im Wärmebereich liegt der Anteil fossiler Energien noch bei über 70 Prozent².

Deshalb müssen wir nach der Stromwende nun die nächste Phase der Energiewende verstetigen: Die Dekarbonisierung aller Wirtschaftsbereiche und 100 Prozent Erneuerbare! Dafür können wir uns nicht leisten, Windstrom zu verschwenden. Sind die Windverhältnisse in einer Region gerade gut, müssen Windenergieanlagen immer häufiger abgeschaltet werden, weil der erzeugte Strom nicht verbraucht bzw. nicht schnell genug über das Netz abtransportiert werden kann³. Auch hier hilft eine Kopplung mit anderen Sektoren: Windstrom wäre nicht länger »überschüssig«, sondern kann als Gas nutzbar gemacht werden. Und dank vorhandener Gas-

speicher und -leitungen lässt er sich speichern, transportieren und genau dann und dort verwenden, wo er gebraucht wird. Umschalten statt abschalten – die Windbranche steht bereit. Auf Grundlage ihrer Nationalen Wasserstoff-Strategie von Juni 2020 schätzte die vorherige Bundesregierung den Wasserstoff-Bedarf in Deutschland bis zum Jahr 2030 auf 90 bis 110 Terawattstunden⁴. Um diesen Bedarf aus 100 Prozent Erneuerbaren decken zu können, braucht es einen kontinuierlichen Ausbau der Windenergie – und das deutschlandweit.

Denn Sektorenkopplung und Wasserstoff-Strategie gehen mit einem steigenden Strombedarf einher. Energieeffizienzmaßnahmen und die bessere Nutzung der vorhandenen Kapazitäten allein reichen nicht aus, um den Umbau der fossilen Wirtschaft zur Wasserstoff-Ökonomie voranzutreiben. Um den Energiebedarf Deutschlands zu decken, hat sich die Bundesregierung bis 2030 konkrete Ausbauziele gesetzt: 71 Gigawatt (GW) Windenergie an Land⁵ und 30 GW Offshore-Leistung auf See⁶. Die Windbranche will liefern. Ausreichend Flächen und schnelle Gesetzgebungsverfahren sind dafür genauso notwendig wie eine sinnvolle Abwägung wichtiger Naturschutzbelange.

Darüber hinaus müssen die richtigen politischen Entscheidungen getroffen werden, um die Effizienz der bestehenden Stromerzeugung zu erhöhen. Eine wichtige Entscheidung betrifft das Repowering von bestehenden Windenergieanlagen. Zahlreiche Bestandsanlagen können aufgrund des technischen Fortschritts ausgetauscht zu werden. Das Repowering von alten Anlagen mit neuen, leistungsstarken Anlagen ermöglicht an vielen Standorten auch die Reduzierung der Anlagenanzahl – bei gleichzeitiger Vervielfachung der Stromerträge.

Sollte es nicht gelingen, den Ausbau der Windenergie zu beschleunigen, besteht die Gefahr einer Stromlücke. Zusätzlich droht Deutschland bei der Sektorenkopplung international den Anschluss zu verlieren. Wer bei Power-to-Gas, Power-to-Heat und Power-to-Mobility heute die Nase vorn hat, sichert sich langfristigen Erfolg in der Energiewelt der Zukunft.

EINE EINFACHE RECHNUNG MEHR STROM – ABER MEHR ENERGIE

IV PHASEN DER ENERGIEWENDE

I BASISTECHNOLOGIEN

- Entwicklung Erneuerbare Energien
- Erster Ausbau Erneuerbare Energien
- Entwicklung Effizienztechnologien

 Reduktion bis 25 Prozent

II SYSTEMINTEGRATION

- Flexibilisierung, Digitalisierung
- Direkte Stromnutzung
- Entwicklung neuer Strommarkt

 25 bis 55 Prozent

III SYNTHETISCHE BRENNSTOFFE

- Hohe negative Residuallast
- Großskalige Elektrolyse
- SBK für Verkehr und Industrie

 55 bis 85 Prozent

IV FINALE DEKARBONISIERUNG

- Verdrängung fossiler Energieträger
- Erneuerbare Energien Importe
- Abschluss Umbau Energieversorgung

 100 Prozent

KONTINUIERLICHE TECHNOLOGIEENTWICKLUNG UND STEIGENDE ENERGIEEFFIZIENZ
ZUNEHMENDE SEKTORKOPPLUNG

INTEGRIERTES
ENERGIESYSTEM

Schon zwei Prozent der Landesfläche sind nach Schätzungen des Bundesverbands WindEnergie e.V. ausreichend, um genügend Windenergieanlagen für die Erreichung der Klimaneutralität bis 2045 zu installieren. Auf dieser Fläche könnten insgesamt 35.000 moderne onshore Anlagen mit einer Kapazität von rund 200 GW sauberen Strom für ganz Deutschland erzeugen. Hinzu kommen 70 GW offshore-Kapazitäten, die bis 2045 in Nord- und Ostsee ausgebaut werden sollen. Insgesamt würde die Windenergie somit jährlich rund 1.000 Terrawattstunden sauberen Strom erzeugen und dadurch rund 75 Prozent der aktuellen Emissionen einsparen.

ZU DEN VORTEILEN DER SEKTORENKOPPLUNG

Mehr als ein Jahrhundert lang lieferten fossile Brennstoffe die Energie für den industriellen Aufschwung Deutschlands. Sie garantierten sicheren Strom, waren regelbar und allzeit verfügbar. Die gleichen Anforderungen stellen Industrien wie Stahl und Chemie auch an die klimaneutralen Energieträger. Eine Umwandlung von grünem Strom zu grünem Gas – die Kopplung der Sektoren – wird damit unausweichlich.

Neben dem Ausgleichen der Volatilität von Strom aus Erneuerbaren können mit grünem Gas auch höhere Temperaturen erzeugt werden, die zum Beispiel beim Stahlkochen notwendig sind. Zahlreiche Politiker*innen in Europa setzen ihre Hoffnungen bei der Sektorenkopplung vollumfänglich auf Wasserstoff, der aus weit entfernten Regionen mit vermeintlich günstigeren Erzeugungsvoraussetzungen importiert wird. Doch diverse Studien lassen an dieser Strategie zweifeln.

Wie die Forscher*innen vom Wuppertal-Institut und DIW Econ errechneten, ist es möglich auch hierzulande konkurrenzfähig grünen Wasserstoff herzustellen. In den Kostenanalysen müssten nämlich alle ökonomischen Faktoren einbezogen

Die heimische Wasserstoffproduktion ist konkurrenzfähig.

werden. Dazu zählen im Wesentlichen die Transportkosten, die vor allem beim Transport per Schiff in die Höhe schnellen. Zusätzlich setzen Schiffsimporte von Wasserstoff die energieintensive Verflüssigung des Gases voraus?

Nach Einschätzung der Forscher*innen könnte eine zu stark auf Importe setzende Wasserstoffversorgung außerdem dazu führen, dass die potenziellen Erzeugungsländer ihre eigene Energiewende verschleppen. Das sonnenreiche Marokko etwa gewinnt aktuell noch 90 Prozent seines Energiebedarfs aus fossilen Energieträgern. Sollte die Erzeugung von grünem Gas zum Wirtschaftsfaktor werden, könnte das Land zunächst durch den Export Erlöse erzielen wollen, statt die eigene Energieversorgung zu klimaneutralisieren?

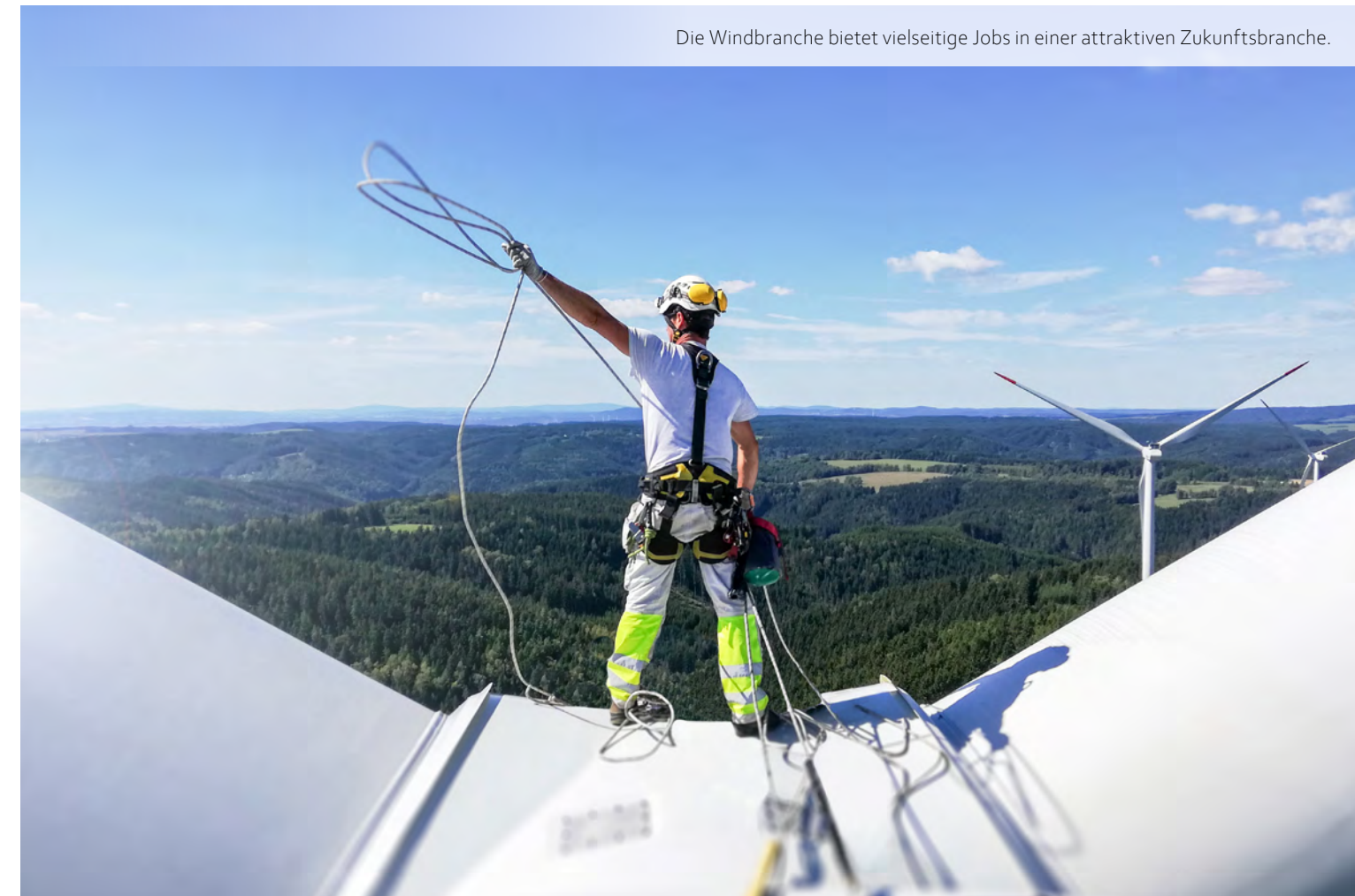
Neben den hohen Kosten von importiertem Wasserstoff und den Folgen für die Erzeugungsländer, ist die heimische Produktion von grünem Wasserstoff aber vor allem wegen der positiven Effekte für die regionale Wertschöpfung vorzuziehen. Die Forscher*innen berechneten für Deutschland eine zusätzliche Wertschöpfung von 30 Milliarden Euro im Jahr 2050. Dies beinhaltet die Nettoeinkommen der Beschäftigten in der Region, die Gewinne der Unternehmen und Gesellschafter*innen sowie die kommunalen Steuer-

800.000 Arbeitsplätze können entstehen.

einnahmen. Die Sektorenkopplung wird somit nicht zur teuren Klimaschutzmaßnahme, sondern zum wirtschaftlichen Erfolgsrezept. Zusätzlich könnten rund 800.000 Arbeitsplätze entstehen, die im direkten oder indirekten Zusammenhang mit grüner Wasserstoffproduktion stehen, so die Forscher*innen?

Die positiven Effekte für Wertschöpfung und Beschäftigung zeigen sich aber nicht erst in der Zukunft. Sie können unmittelbar gehoben werden, so die Forscher*innen, denn schon heute ist der Aufbau von Wasserstoffinfrastruktur dort ökonomisch sinnvoll, wo Strom aus Wind und anderen Erneuerbaren aufgrund fehlender Netzkapazitäten abgeregelt werden müsste?. Dies trifft vor allem auf Regionen in Norddeutschland zu. Auf der folgenden Seite können Sie erfahren, wo überall in Deutschland schon heute Sektorenkopplung, in der Regel durch grünen Wasserstoff, umgesetzt wird.

Angesichts dieser Vorteile sollte die deutsche Politik die Sektorenkopplung mit hier zu Lande produziertem Wasserstoff vorantreiben und nicht auf den Aufbau von Produktionskapazitäten im Ausland warten. Die großen Industriezweige wie Chemie, Automobil und Stahl haben mit ihrer Dekarbonisierung bereits begonnen und brauchen zügig große Mengen an grünem Gas. Für Deutschland bieten sich große Chancen zum Vorreiter und Spezialist auf dem künftigen Weltmarkt für grünen Wasserstoff zu werden. Es braucht nun eine clevere Industriestrategie der neuen Bundesregierung, um diese Potenziale zu nutzen.



BESTANDTEILE DER WERTSCHÖPFUNG AUF REGIONALER EBENE



VON DER MODELLREGION ZUR ANWENDUNG



- Praxisprojekt Wasserstoff
- Praxisprojekt Methan
- Forschungsprojekt Wasserstoff
- Forschungsprojekt Methan
- ⬠ sonstige Power-to-X

PRAXISBEISPIELE

Baden-Württemberg

1. **Freiburg:** Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme, Badenova AG & Co. KG, bnNetze GmbH
2. **Lampoldshausen:** zEAG Energie AG, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
3. **Grenzach-Wyhlen:** Energiedienst Holding GmbH
4. **Karlsruhe:** Engler-Bunte-Institut
5. **Stuttgart:** Netze BW GmbH

Bayern

6. **Hassfurt:** Windgas Haßfurt GmbH & Co. KG
7. **Straubing:** MicroPyros GmbH
8. **Ruhstorf an der Rott:** Hochschule Landhut
9. **Augsburg:** Stadtwerke Augsburg Holding GmbH
10. **Schwandorf:** microEnergy GmbH
11. **Arzberg:** Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V.

Berlin

12. **Schönefeld:** Flughafen BER Total Deutschland GmbH

Brandenburg

13. **Cottbus:** BTU Cottbus
14. **Falkenhagen:** Uniper Energy Storage GmbH
15. **Prenzlau:** ENERTRAG AG

Hamburg

16. **Hafencity:** Vattenfall GmbH
17. **Reitbrook:** Uniper Energy Storage GmbH
18. **Bahrenfeld:** Shell Deutschland Oil GmbH

Hessen

19. **Frankfurt am Main:** Areva H₂Gen GmbH
20. **Hanau:** Greencity GmbH
21. **Bad Hersfeld:** Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik

Mecklenburg-Vorpommern

22. **Grapzow:** Wind-Wasserstoff-Projekt GmbH & Co. KG
23. **Stralsund:** Hochschule Stralsund, Institut für Regenerative Energiesysteme
24. **Rostock:** Exytron GmbH

Niedersachsen

25. **Ostfriesland:** TenneT TSO GmbH, Gasunie Deutschland Transport Services GmbH
26. **Werlte:** Audi AG
27. **Salzgitter:** Salzgitter Flachstahl GmbH
28. **Haren (Ems):** Windpark Fehndorf
29. **Lingen:** Amprion GmbH, Open Grid Europe GmbH
30. **Sassenburg-Stüde:** Bernsteinsee Hotel GmbH
31. **Emden:** Stadtwerke Emden GmbH

Nordrhein-Westfalen

32. **Herten:** Anwenderzentrum HJ Herten GmbH
33. **Ibbenbüren:** Westnetz GmbH (innogy)
34. **Lemgo:** Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe
35. **Lünen:** RWE Power AG
36. **Metelen:** innogy SE/Westnetz GmbH
37. **Wesseling:** ITM Power GmbH, Shell Deutschland Oil GmbH

Rheinland-Pfalz

38. **Mainz:** Stadtwerke Mainz AG
39. **Alzey:** EWR AG
40. **Pirmasens-Winzeln:** Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens e.V.

Sachsen

40. **Dresden:** sunfire GmbH

Sachsen-Anhalt

41. **Bad Lauchstädt:** aus dem Hyposkonsortium
42. **Magdeburg 1:** OVGU Magdeburg Lehrstuhl Systemverfahrenstechnik
43. **Magdeburg 2:** MPI Magdeburg AG Prozesstechnik
44. **Leuna:** Total Energies, Sunfire GmbH

Schleswig-Holstein

45. **Brunsbüttel:** Wind to Gas Energy GmbH & Co. KG
46. **Reußenköge:** H-Tec Systems (GP Joule GmbH)
47. **Haurup:** Energie des Nordens GmbH
48. **Heide:** Raffinerie Heide
49. **Westre/Ellhöft:** Windpark Ellhöft GmbH & Co. KG

Thüringen

50. **Heubisch:** AVJ/Kumatec Hydrogen GmbH & Co. KG

Weitere Praxisbeispiele finden Sie online unter:
Energieatlas Rheinland-Pfalz:
<https://www.energieatlas.rlp.de/earp/praxisbeispiele/uebersichtskarte-praxisbeispiele>

Power-to-Gas-Technologie:
https://www.stadt-und-werk.de/meldung_33921.html

WIE FUNKTIONIERT POWER-TO-GAS?

Power-to-Gas (PtG) ist eine der Schlüsseltechnologien, die sich eignet, um Windstrom in größerem Maßstab in anderen Sektoren nutzbar zu machen. Das mit Hilfe von Elektrolyseuren hergestellte »grüne Gas« (Wasserstoff oder weiterverarbeitet zu synthetischem Methan) lässt sich problemlos längerfristig und in großen Mengen speichern und auch über lange Strecken transportieren⁸.

Die Technik für die PtG-Prozesse steht zur Verfügung, Transport- und Speicherkapazitäten sind vorhanden und die Industrieunternehmen wollen investieren. Viele Akteure auch aus der Windbranche sind bereit und willens, Investitionen zu tätigen, um den nächsten Schritt einer integrierten Energiewende zu gehen. Insbesondere für von Abregelungen betroffene Anlagen oder Anlagen ohne EEG-Vergütung kann die Technologie eine interessante und systemdienliche Erlösoption darstellen.

Dabei hat die PtG-Technologie den entscheidenden Vorteil, dass die Produktion genau in den Regionen stattfinden kann, in denen heute Energie aus Windkraft aufgrund von Netzengpässen ungenutzt bleibt⁸.

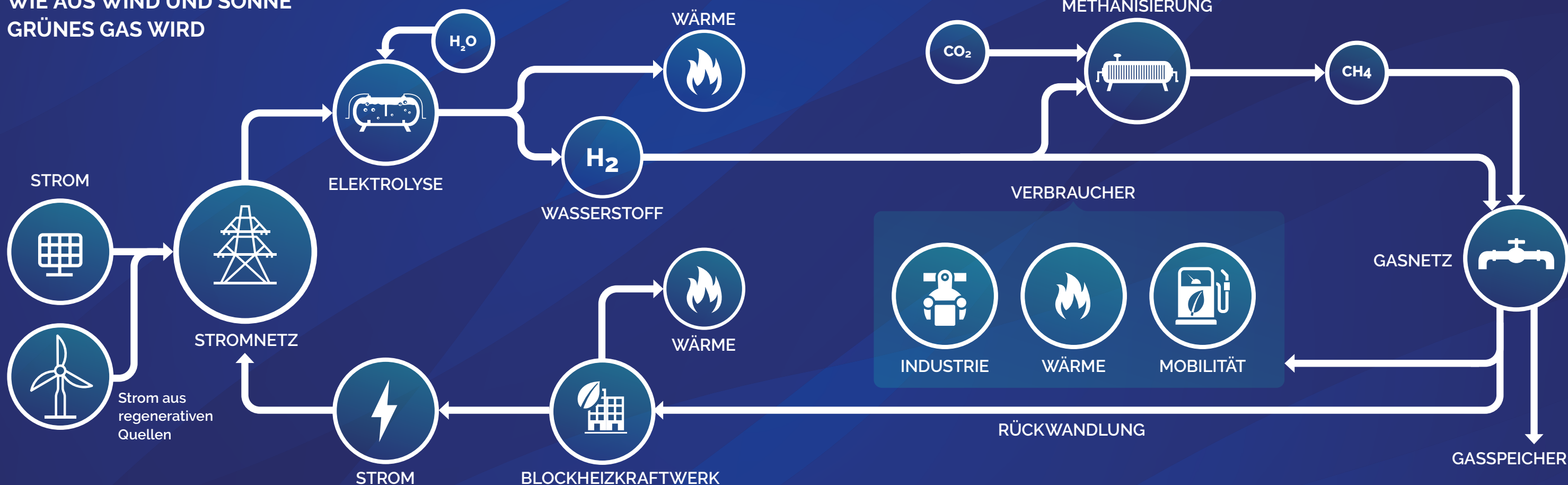
Die Speicherung und der Verbrauch können dank PtG an den Orten und zu den Zeitpunkten erfolgen, an denen diese sinnvoll sind. Hierfür können oft bereits bestehende Infrastrukturen und Anlagen (Gasnetz, Gasspeicher, Gasverbraucher) genutzt werden⁸. Der Aufbau der PtG-Strukturen, insbesondere von Anlagen zur Produktion von erneuerbaren Gasen, muss heute beginnen, um den Bedarf in Zukunft decken zu können.

Ein starker Heimatmarkt, der diese Technologien selbst nachfragt, ist eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg deutscher Hersteller von PtG-Technologie, die bereits heute zur technologischen Weltspitze gehören.

KLEINE FARBLEHRE: NICHT JEDER WASSERSTOFF IST GRÜN

- **Grüner Wasserstoff** wird durch Elektrolyse von Wasser ausschließlich unter Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien gewonnen.
- **Brauner Wasserstoff** wird durch Vergasung von Braunkohle hergestellt.
- **Grauer Wasserstoff** wird aus fossilen Brennstoffen, in der Regel durch den Einsatz von Erdgas im Wege der Dampfreformierung, gewonnen.
- **Roter Wasserstoff** wird unter Nutzung von Atomstrom hergestellt.
- **Orangener Wasserstoff** wird unter Nutzung von Biomasse oder Abfällen hergestellt.
- **Blauer Wasserstoff** ist grauer Wasserstoff, dessen CO₂ jedoch bei der Entstehung abgeschieden und gespeichert wird (Carbon Capture and Storage, CCS).
- **Gelber Wasserstoff** wird unter Nutzung herkömmlichen Netzstroms (allgemeiner Strommix) gewonnen. Als gelber Wasserstoff wird teilweise auch Wasserstoff bezeichnet, der aus Atomstrom gewonnen wird.
- **Türkiser Wasserstoff** wird über die thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) gewonnen. Anstelle von CO₂ entsteht fester Kohlenstoff, der gespeichert werden kann.
- **Schwarzer Wasserstoff** wird durch Vergasung von Steinkohle hergestellt.
- **Weißer Wasserstoff** kommt in der natürlichen Umgebung vor und kann beispielsweise durch Bohrungen gefördert werden. Als weißer Wasserstoff wird mitunter auch solcher Wasserstoff verstanden, der als Nebenprodukt in der chemischen Industrie anfällt.

WIE AUS WIND UND SONNE GRÜNES GAS WIRD



POWER-TO-GAS

BEISPIELE

In zahlreichen Projekten werden Power-to-Gas-Technologien eingesetzt, um überschüssigen Windstrom nutzbar zu machen. Diese siedeln sich mittlerweile nicht nur in den windreichen Regionen Norddeutschlands an, sondern auch in Mittel- und Süddeutschland. Hier einige Beispiele:

RH₂-WKA in Grapzow

Stromlieferant	»RH ₂ -WKA«
Standort	Grapzow, MV
Kennzahlen	28 WEA
Technologie	1-MW-alkalische Elektrolyse
Anschlussleistung	ca. 140 Megawatt
Versorgungsziel	ca. 125.000 Haushalte
Beteiligte	WIND-projekt, NOW GmbH

Das Vorhaben »RH₂-WKA« bei Grapzow in Mecklenburg-Vorpommern setzt auf die Umwandlung von Windstrom in regenerativen Wasserstoff (RH₂). Dazu nutzt das sogenannte »Wind-Wasserstoff-System« die Wasserelektrolyse, um Wasser (H₂O) unter dem Anlegen von Gleichspannung in Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂) zu spalten. Die beiden Gase können anschließend direkt weiterverarbeitet oder gespeichert werden. Eine Gasturbine oder eine Brennstoffzelle kann aus dem gespeicherten Gas bei Bedarf wieder neuen elektrischen Strom gewinnen. Bei dem Prozess entsteht zusätzlich Wärme, die zum Heizen genutzt werden kann. Das »Wind-Wasserstoff-System« ermöglicht dadurch eine zeitliche und räumliche Unabhängigkeit von Erzeugung und Nutzung regenerativer Energie. Die Anlage kann damit die Stromversorgung von ca. 125.000 Haushalten sicherstellen⁹.

Energiepark Bad Lauchstädt

Stromlieferant	Energiepark Bad Lauchstädt
Standort	Bad Lauchstädt, SA
Kennzahlen	40-MW-Windpark
Technologie	30-MW-Großelektrolyse
Versorgungsziel	Chemische Industrie und zukünftig Verkehr
Beteiligte	VNG Gasspeicher, Ontras Gastransport, DBI Freiberg, Terrawatt, Uniper Energy Storage

Eine Anlage in Bad Lauchstädt in der Nähe von Halle (Saale) nutzt die gleiche Technologie, allerdings in einem deutlich

größeren Maßstab. Ein 30-Megawatt-Großelektrolyseur wandelt Strom aus einem 40-MW-Windpark in Wasserstoff um. Dieser kann in einer umgewidmeten Salzkaverne zwischengespeichert und über eine umgestellte Gaspipeline direkt in das Wasserstoffnetz des mitteldeutschen Chemiedreiecks eingespeist werden. Perspektivisch soll der erzeugte Wasserstoff auch für die urbane Mobilität genutzt werden. Ziel des Projekts ist es, die Herstellung, den Transport, die Speicherung und den wirtschaftlichen Einsatz von grünem Wasserstoff in industriellem Maßstab zu untersuchen¹⁰.

Windwasserstoff Brunsbüttel

Stromlieferant	Windwasserstoff
Standort	Brunsbüttel, SH
Kennzahlen	15 MW-Windpark
Technologie	2,4-MW-PEM-Druckelektrolyse
Versorgungsziel	Erdgasnetz und Verkehr
Beteiligte	Wind to Gas Energy, SH Netz

Auch in Schleswig-Holstein wird überschüssige Energie in Form von Wasserstoff gespeichert. In Brunsbüttel bei Hamburg wird der Strom eines 15-MW-Windparks in Wasserstoff umgewandelt. Der Wasserstoff kann ins Erdgasnetz eingespeist oder direkt an der benachbarten Wasserstofftankstelle des Betreibers H₂ Mobility getankt werden. An dieser können täglich bis zu 80 Wasserstoff-PKW versorgt werden¹¹.

Power-to-Gas Ibbenbüren

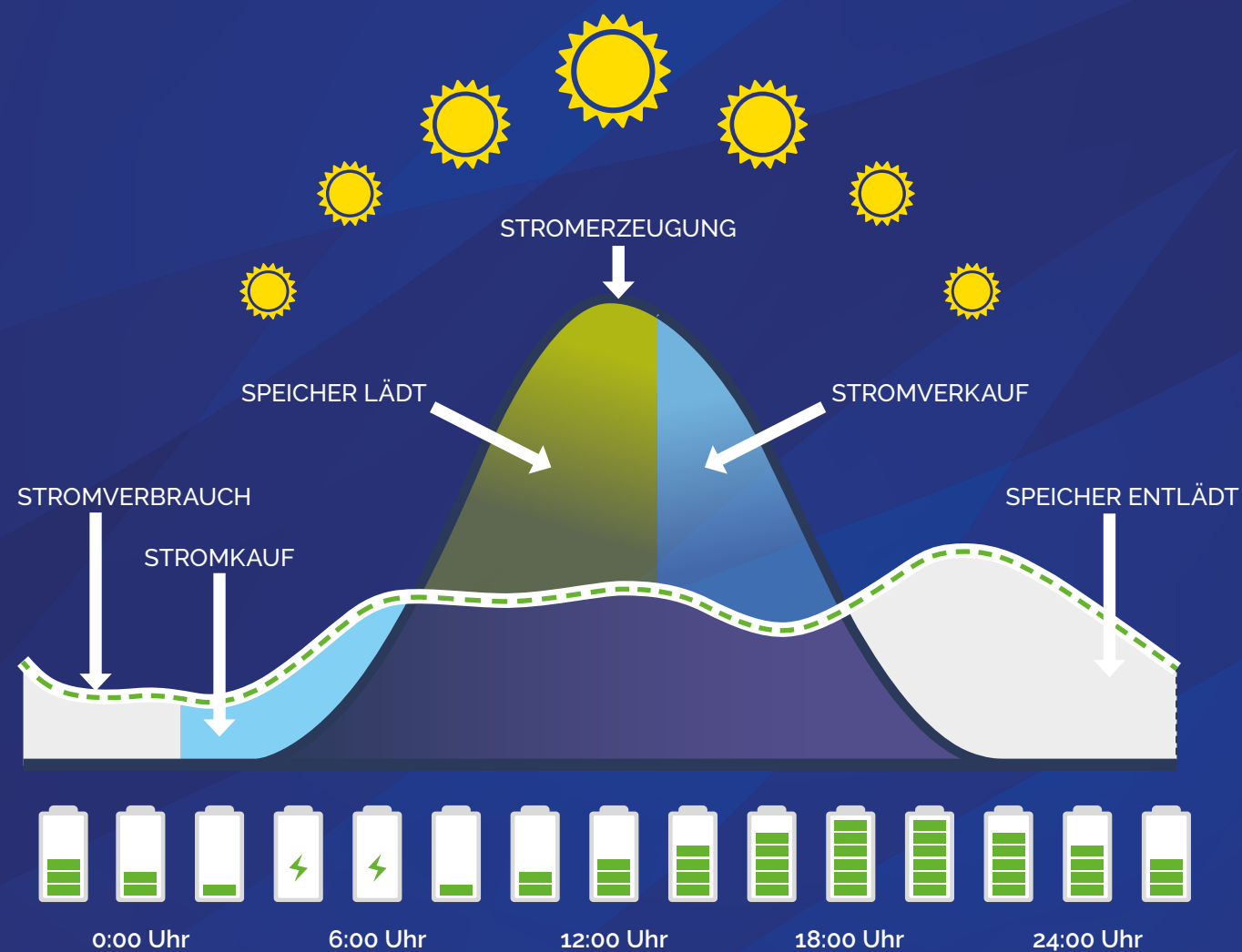
Stromlieferant	Power-to-Gas Ibbenbüren
Standort	Ibbenbüren, NRW
Technologie	Windparks der Umgebung PEM-Elektrolyse mit biologischer Methanisierung
Versorgungsziel	Erdgasnetz, Verkehr, Wärmemarkt
Beteiligte	RWE/innogy

Im nordrhein-westfälischen Ibbenbüren wird das Elektrolyseverfahren noch um die biologische Methanisierung erweitert. In einem Rieselbett-Reaktor werden dazu CO₂ aus einer Bioethanolanlage und Wasserstoff zu Methan umgesetzt. Dies hat den Vorteil, dass das regenerativ erzeugte Methan direkt ins Erdgasnetz gespeist werden kann. Herkömmlicher Wasserstoff kann dem Gas im Netz immer nur beigemischt werden^{12,13}.



EIN WICHTIGER PARTNER: SPEICHER ENTLASTEN DAS SYSTEM

In Zeiten hoher residualer Last (Stromnachfrage abzüglich der Erzeugung erneuerbarer Energien) muss genügend gesicherte Leistung zur Verfügung stehen. Dabei ist zwischen zwei Fällen zu unterscheiden: Einerseits muss genügend gesicherte Leistung bereitstehen, um die absolute Spitzenlast zu decken. Andererseits sind ausreichend Kapazitäten vorzuhalten, um die Stromnachfrage während Dunkelflauten bedienen zu können. Diesen Ausgleich können Speichertechnologien ermöglichen. Eine Auflistung dieser erfolgt auf der Nebenseite.



DIE VIELFALT DER SPEICHERTECHNOLOGIEN

Wasserstoff ist ein wichtiger Bestandteil bei der Dekarbonisierung der Sektoren Mobilität, Wärme und Industrie. Er verfügt über mehrere Eigenschaften, die ihn zu einem nützlichen Speichermedium machen. Wasserstoff verfügt über eine hohe Energiedichte, lässt sich fast überall produzieren und kann als Gas in Pipelines oder verflüssigt in Schiffen ohne Energieverluste transportiert werden. Doch aktuell sind die Produktionskosten noch sehr hoch und der Gesamtwirkungsgrad von der Erzeugung bis zur Verwendung ist vergleichsweise gering¹⁴. Aufgrund dessen wird Wasserstoff wohl nicht die einzige Speichertechnologie sein, die wir zum Erreichen der Klimaziele benötigen. Hier einige Beispiele:

Der **Lithium-Ionen-Akku** ist der bislang erfolgreichste Akkumulator aller Zeiten und steckt in fast allen portablen elektrischen Geräten, vom Smartphone bis zur Bohrmaschine. Auch Hersteller von E-Fahrzeugen setzen überwiegend auf die leistungsstarken Akkus. Sie überzeugen mit einem Wirkungsgrad von nahezu 100 Prozent und verfügen über eine gute Energiedichte von 0,65 MJ/kg. Die Batterien haben allerdings auch Nachteile. Zum einen ist die Größe des Akkus an die Größe der Zellen gebunden. Bei steigender Kapazität steigt somit auch die Gesamtgröße der Batterie. Außerdem entlädt sich die Batterie stetig und macht eine übersaisonale Speicherung unmöglich. Zum anderen ist die Produktion der Akkus mit hohen finanziellen, ökologischen und sozialen Kosten verbunden, da die benötigten Rohstoffe Lithium und Kobalt nur begrenzt vorkommen und vor allem in Ländern des globalen Südens gefördert werden¹⁵. In absehbarer Zeit wird es zudem Millionen von ausgedienten Akkus geben, in denen sich nicht nur wertvolle Edelmetalle verstecken, sondern auch umweltgefährdende Stoffe, die fachgerecht entsorgt werden müssen. Akkus ein Zweitleben einzuhauchen, ist das Ziel zahlreicher Start-ups. Sie arbeiten daran, die enthaltenen Rohstoffe für neue Batterien nutzbar zu machen. Second-Life-Batterien können Schnellladestationen mit zusätzlicher Energie versorgen und Strom in Solaranlagen zwischenspeichern.

Auch **Blei-Säure-Akkumulatoren** sind sehr weit verbreitet und finden vor allem in Starterbatterien oder der Notstromversorgung Anwendung. Sie sind relativ günstig und können Strom ohne Umwandlung direkt speichern. Sie verfügen allerdings nur über eine geringe Energiedichte von 0,11 MJ/kg, wodurch viele Einsatzmöglichkeiten verhindert werden¹⁶.

Pumpspeicher nutzen Wasserkraft, um in Zeiten hoher erneuerbarer Stromproduktion Energie zu speichern. Dazu pumpen sie Wasser den Berg hinauf, welches dann in nachfragestarken Zeiten herunterfließt und durch Turbinen und Generatoren wieder in Strom umgewandelt wird. Sie haben dabei einen Wirkungsgrad von circa 85 Prozent und stets geringe Kosten von 3 bis 5 ct/kWh. Problematisch an den großen Anlagen ist, dass sie einen großen Eingriff in die Natur erfordern und im Nutzungskonflikt mit anderen Wasserverbraucher*innen stehen. Vor allem in wasserreichen, bergigen Regionen bieten sie aber eine sinnvolle Stütze für die klimaneutrale Stromversorgung¹⁷.

In **Druckluftspeichern** wird mit überschüssiger Energie Luft unter Druck in einen Speicher wie zum Beispiel einen alten Salzstock gepumpt. Wird die Energie wieder benötigt, kann die entweichende Luft eine Turbine antreiben, um Strom zu erzeugen. In Deutschland hat sich diese Speichertechnologie jedoch noch nicht durchgesetzt. Zum einen, weil ihr Wirkungsgrad nur bei 65 bis 75 Prozent liegt. Das liegt auch daran, dass die Luft erst erhitzt werden muss, bevor sie die Turbinen antreiben kann, da diese sonst vereisen könnten. Zum anderen haben sie sich noch nicht durchgesetzt, weil die Investitionskosten relativ hoch sind¹⁸. In der Zukunft könnte sie aber an Bedeutung gewinnen, denn die Speicher lassen sich gut skalieren und vermeiden Flächennutzungskonflikte an der Oberfläche.



WIE FUNKTIONIERT POWER-TO-MOBILITY?

Der Verkehrssektor kann im Vergleich zu anderen Sektoren kaum CO₂-Reduktionen gegenüber 1990 verzeichnen¹⁹. Mit rund 25 Prozent Anteil an den weltweiten Treibhausgasemissionen müssen auch hier zügig Einsparungen erzielt werden²⁰.

Der Weg hin zu einer klimaneutralen Mobilität basiert auf zwei Säulen: Einerseits braucht es einen Wandel hin zu mehr Energieeinsparungen und Effizienz. Das bedeutet mehr nicht-motorisierte Fortbewegung und ÖPNV. Andererseits müssen die notwendigerweise motorisierten Fahrzeuge dann mit Erneuerbarer Energie betrieben werden, um die Abhängigkeit vom Erdöl zu beenden. Je besser die Mobilitätswende gelingt, desto weniger Energie wird letztlich im Verkehrssektor benötigt, und desto schneller kann der verbliebene Bedarf mit Wind und Sonne statt mit Benzin, Diesel und Kerosin gedeckt werden.

Die Mobilitätswende funktioniert in Großstädten anders als in Kleinstädten und nochmal anders auf dem Land. Priorität hat die Förderung des ÖPNV und des (bei Bedarf elektrisch unterstützten) Fahrradverkehrs. Der Individualverkehr mit dem Auto muss in jedem Fall erheblich reduziert werden. Wo trotzdem weiterhin ein Auto benötigt wird, kann es ef-

fizienter genutzt werden, zum Beispiel durch Carsharing oder einer plattformbasierten Verknüpfung von Fahrten in dieselbe Richtung.

Auch durch die Umstellung von Benzin- und Dieselauf Autos hin zu Elektroautos mit Batterie lässt sich eine Menge Energie einsparen. Denn während bei Verbrennungsmotoren ein Großteil der eingesetzten Energie als Wärme verloren geht, sind batteriebetriebene Elektroautos viel effizienter. Ihr Wirkungsgrad unter Berücksichtigung aller Übertragungsverluste liegt bei etwa 70 Prozent. Zum Vergleich: Ein Benzinmotor kommt im Stadtverkehr auf einen Wirkungsgrad von nur 10 bis 15 Prozent, ein Dieselmotor auf etwa 20 Prozent²¹.

Die hervorragende Effizienz batteriebetriebener E-Autos spielt auch beim Vergleich mit anderen Technologien eine wichtige Rolle. Dazu gehören Autos mit Brennstoffzelle, die mit Windstrom hergestellten (»grünen«) Wasserstoff tanken können. Hier liegt der Gesamtwirkungsgrad bei etwa 26 Prozent – und damit weit hinter der direkten Nutzung des Windstroms in Batterien²¹. Noch deutlicher wird es beim Vergleich direkter Stromnutzung mit dem Einsatz sogenannter E-Fuels in Verbrennungsmotoren. Hierbei geht auf so vielen

Umwandlungsstufen Energie verloren, dass am Ende nur 13 Prozent des Erneuerbaren Stroms tatsächlich genutzt werden. Durch diesen Effizienzvorteil machen die batteriebetriebenen E-Autos ihre produktionsbedingt schlechtere Klimabilanz nach wenigen Jahren Betriebszeit wett²¹. Viele Hersteller haben zudem angekündigt, in Zukunft noch umweltschonender bei der Batterieherstellung vorzugehen²². Und wenn Akkus von E-Autos auf dem Recyclinghof landen, sind sie noch längst nicht schrottreif: Sie enthalten nicht nur Rohstoffe für neue Batterien, sondern können Schnellladestationen mit zusätzlicher Energie versorgen und Strom in Solaranlagen zwischenspeichern.

Doch Wasserstoff und E-Fuels haben eine andere Stärke: Sie ergänzen die Elektromobilität dort, wo ein Einsatz von Batterien nicht möglich ist. Im Schiffs- und Flugverkehr etwa können die schweren Batterien nicht verwendet werden. Dort ist ein Rückgriff auf sogenannte strombasierte Kraftstoffe die beste Lösung. Auch im Güterverkehr können Wasserstoff und E-Fuels die direkte Elektrifizierung und Umstellung auf Schienenverkehr sinnvoll ergänzen²³. Die Effizienzvorteile der batterieelektrischen Fahrzeuge haben die deutsche Automobilindustrie bewegt, den Fokus beim Umbau ihrer

Produktionsstätten nahezu vollständig auf das Batterie-E-Auto zu legen. Dieser Transformationsprozess hat auch Auswirkungen auf die Beschäftigungssituation bei den großen PKW-Herstellern, ihren Zulieferern und den Auto-Werkstätten. Die neuen Fahrzeuge sind weniger komplex als Autos mit Diesel- und Benzinmotor und bestehen aus deutlich weniger Komponenten²⁴. Andererseits steigt durch die fortschreitende Digitalisierung die Nachfrage an Software und Datenverarbeitung zum Beispiel für die Entwicklung neuer Fahrzeug- und Servicekonzepte. Die Automobilhersteller wandeln sich dadurch von traditionellen Industrieunternehmen in integrierte Hard- und Softwareunternehmen²⁴.

Dieser Wandlungsprozess setzt die Beschäftigten einem erheblichen Veränderungsdruck aus. Wenn die Hersteller die Transformation erfolgreich gestalten wollen, müssen sie fundierte Vorhersagen über die quantitativen und qualitativen Auswirkungen von Elektromobilität und Digitalisierung und deren gegenseitig bedingten Wirkungen auf die Beschäftigung treffen. Nur dann können sie den notwendigen Veränderungsbedarf in allen betroffenen Arbeitsbereichen positiv steuern und ausbalancieren. Unter dem Strich dürften in allen Fällen aber positive Beschäftigungseffekte stehen.

WASSERSTOFF UND E-MOBIL: WARUM WIR BEIDE ANTRIEBE BRAUCHEN

Elektroautos mit Batterie überzeugen durch ihre hohe Effizienz. Für den Individualverkehr erscheinen sie als die beste Option. Doch es gibt Bereiche im Verkehrssektor, in denen die Nutzung einer Batterie ungeeignet ist, zum Beispiel weil die Ladeinfrastruktur fehlt oder nicht gebaut werden kann. Hier kann Wasserstoff eine Alternative sein. Doch welche Anwendungsmöglichkeiten für Wasserstoff-Mobilität gibt es, auf welchem Entwicklungsstand befinden sich diese und wo ist der Einsatz wirklich sinnvoll?

Linienbusse:

In einer Stadt wie Berlin legt ein Linienbus rund 450 km pro Tag zurück. Batteriebetriebene Busse haben bislang aber nur Reichweiten zwischen 150 bis 200 km. Das bedeutet, dass die Busse bis zu drei mal täglich geladen werden müssen und so für mehrere Stunden nicht verfügbar sind. Viele Verkehrsunternehmen interessieren sich daher für Wasserstoff-Busse. Diese haben kurze Tankzeiten (10 min) und hohe Reichweiten (ab 350 km). Somit können die Busse weiter fahren und sind schneller wieder einsatzbereit. Europaweit werden jetzt Dutzende solcher Busse bestellt. In Deutschland sind vor allem Köln und Wuppertal Vorreiter. In Köln waren Mitte 2021 bereits über 50 H₂-Busse im Einsatz. Wuppertal kam bis dato auf 10 Stück^{25, 26}.

Lastkraftwagen:

Die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs steht vor ähnlichen Herausforderungen wie der Busverkehr. Wegen der begrenzten Reichweiten und fehlender Ladeinfrastruktur steigen Logistikfirmen derzeit kaum auf elektrische Fahrzeuge um. Viele hoffen auf den Einsatz von Brennstoffzellen, die Reichweiten von bis zu 1.000 km ermöglichen. Eine neue Studie des IFEU Heidelberg sieht für den weitläufigen Einsatz von Wasserstoff-LKWs aber wenig Hoffnung. Aufgrund der hohen Wasserstoff-Preise könne man H₂-LKWs auch mittelfristig kaum wirtschaftlich betreiben. Darüber hinaus könnte der Einsatz von Wasserstoff im Straßengüterverkehr zu einem enormen Preisdruck führen und die Dekarbonisierung in anderen Bereichen verzögern. Die Batterie-LKWs hingegen hätten erheblich geringere Energiekosten als ihre fossilen Vorgänger. Neben dem Kostenfaktor, könnte sich auch das Reichweiten-Problem lösen. Modernste Batterie-LKWs schaffen mittlerweile durchaus 350 km. Viel weiter kann ein*e LKW-Fahrer*in aufgrund der Lenkzeiten in Europa am Stück auch nicht fahren. Die 45-minütigen Pflichtpausen könnten bei ausreichender Inf-

rastruktur zum Schnellladen ausreichen, um die Batterien der LKWs wieder zu füllen²⁷.

Züge:

In Deutschland sind noch über ein Drittel der Zugverbindungen nicht elektrisiert. Auf vielen Strecken lohnt sich der Bau von Oberleitungen einfach nicht. In Zukunft werden auch dort batterieelektrische oder Brennstoffzellenzüge fahren. Doch welche Technologie wird sich durchsetzen? Die meisten Verkehrsunternehmen in Deutschland setzen bislang auf Batterie-Züge. Diese haben den Vorteil, den Strom aus Oberleitungen nutzen und im Akkubetrieb fahren zu können, wo sie Reichweiten von bis zu 150 km erzielen. Das reicht für die meisten leitungsfreien Strecken in Deutschland aus. Expert*innen gehen daher davon aus, dass sich diese Variante durchsetzen wird. In Niedersachsen, wo es viele lange Bahnstrecken ohne Oberleitung gibt, testet man auch den Einsatz von Wasserstoffzügen. Im Sommer 2022 soll dort der erste Wasserstoffzug weltweit seinen Betrieb aufnehmen. Dies kann als Vorbild für Weltregionen dienen, in denen es längere leitungsfreie Strecken gibt. H₂-Züge könnten sich an hiesigen Orten durchsetzen²⁸.

Schiffe:

Die großen Container- und Kreuzfahrtschiffe auf See fahren noch immer hauptsächlich mit Schweröl. Auch hier kann Wasserstoff eine Option sein, um die extrem schadstoffreichen Emissionen der Schiffe zu reduzieren. Bislang fahren aber noch keine Wasserstoff-Tanker über die Weltmeere. Über den Erfolg von Wasserstoff auf See werden in Zukunft wohl vor allem die Besteuerung von Emissionen und fossilen Brennstoffen entscheiden. In der Binnenschifffahrt hingegen werden schon jetzt Erfolge verbucht. Im Berliner Westhafen hat im Mai 2022 das weltweit erste emissionsfreie Schiff den Betrieb aufgenommen. Die »Elektra« ist ein Kanalschubboot, dessen Motor gleichzeitig mit Wasserstoff-Brennstoffzellen und Batterien betrieben wird^{29, 30}.

Flugzeuge:

Auch die Luftfahrt setzt auf Wasserstoff. Die Firma Airbus hat angekündigt, bis 2035 emissionsfreies Fliegen zu ermöglichen. Dazu verfolgt Airbus zwei Ansätze. Zum einen werden herkömmliche Triebwerke so umgebaut, dass sie auch mit Wasserstoff betrieben werden können. Zum anderen forscht Airbus an der Entwicklung von Elektromotoren mit Brennstoffzellen. Die Entscheidung, welchen Weg man gehen will, soll bis 2025 fallen³¹.



WIE FUNKTIONIERT POWER-TO-HEAT?

Auf dem Weg zur Klimaneutralität muss auch die Wärmeversorgung dekarbonisiert werden. Die Nutzung von Strom aus Erneuerbaren Energien zur Warmegewinnung in sogenannten Power-to-Heat-Verfahren (deutsch: Strom zu Wärme) kann einen erheblichen Anteil dazu beitragen. Aktuell werden noch rund zwei Drittel der Wohngebäude in Deutschland mit fossilen Energien beheizt³². Um die Klimaziele im Gebäudesektor zu erreichen, muss auch hier zügig auf die Verwendung von grünem Strom umgestellt werden.

Um grünen Strom im Wärmebereich nutzen zu können, sind Power-to-Heat-Verfahren notwendig. Der Wärmespeicher Nechlin in Brandenburg etwa versorgt ein ganzes Dorf mit CO₂-freier Wärme. Dazu wird in einem Wärmespeicher Wasser mit Strom aus Windenergieanlagen aufgeheizt, die sonst abgeregelt würden. Der Speicher gibt seine Energie je nach Bedarf direkt an das örtliche Nahwärme-netz ab. Wie hier könnten hunderte Gemeinden und Städte mit erneuerbarer Wärme versorgt werden. Die Funktionsweise von den dafür notwendigen Technologien wie Durchlauferhitzer, Elektrodenkessel, elektrische Industrieöfen, Stromdirektheizungen, Speicherheizungen oder elektrische Wärmepumpen werden im folgenden Text erläutert.



POWER-TO-HEAT BEISPIELE

ANWENDUNGSBEREICHE

Bei den verschiedenen Power-to-Heat-Technologien muss man vor allem zwischen den Anwendungsbereichen unterscheiden. Um ein Wohnhaus zu beheizen, bietet sich die Wärmepumpe an. Sie nutzt die Erdwärme, um bei sehr hohen Wirkungsgraden Strom in Wärme umzusetzen.

Der Einbau von Wärmepumpen ist in den letzten Jahren enorm gestiegen. 2016 wurden rund 30 Prozent der neuen Wohngebäude in Deutschland mit einer Wärmepumpe ausgestattet. 2021 waren es schon über 50 Prozent der Neubauten – Tendenz weiter steigend³³. Denn nicht nur die Pumpen an sich werden immer billiger. Auch die jährlichen Betriebskosten liegen schon heute unter denen von Erdgas³⁴. Sind richtig hohe Temperaturen erforderlich, wie in der Industrie oder in großen Heizkraftwerken, kommen Elektrodenkessel zum Einsatz. In den riesigen Kesseln wird Wasser durch Strom erhitzt. Das heiße Wasser kann dann gespeichert

und je nach Bedarf zum Heizen genutzt werden. Kommt der Strom aus Erneuerbaren Energien, können so auch größere Wohneinheiten und Stadtviertel über Heizkraftwerke klimaneutral beheizt werden³⁵.

Anfang 2019 gab es 36 solcher Großanlagen mit Leistungen von 0,5 bis 60 Megawatt (MW) in Deutschland. Eine der größten Power-to-Heat-Anlagen Europas steht im Berliner

Wärmepumpen in 50 Prozent der Neubauten

Ortsteil Siemensstadt. Im Jahr 2019 löste die Anlage mit einer Leistung von 120 MW thermisch einen Steinkohleblock ab. Mit der erzeugten Fernwärme können 30.000 Haushalte versorgt werden³⁵.

Neben der Dekarbonisierung der Wärmeversorgung kann Power-to-Heat ähnlich wie Power-to-Gas auch das Stromnetz stabilisieren und einen erheblichen Beitrag zur Effizienzsteigerung der Energieversorgung leisten. Denn die Technologien können bevorzugt immer dann Strom in Wärme umwandeln, wenn es einen Überschuss im Netz gibt, zum Beispiel, weil der Wind kräftig weht. Flaut er ab, muss kein »frisch« erzeugter Strom für die Wärmeversorgung genutzt werden, da die zuvor gespeicherte Wärme in die Häuser und Wohnungen fließen kann³⁶.

Power-to-Heat-Technologien sind für den Erfolg der Energiewende unverzichtbar. Sie ermöglichen CO₂-freies Heizen, entkoppeln Energieerzeugung und -verbrauch, sind netzdienlich und ermöglichen so eine höhere volkswirtschaftliche Effizienz. Jede Kilowattstunde Strom in

Deutschland kann genutzt und die Kosten für die Abregelung von Anlagen minimiert werden.

Um dieses Potential zu nutzen, muss die Bundesregierung aktuelle Hemmnisse abbauen. Die breite Anwendung von Power-to-Heat wird vor allem durch die hohe Belastung

Power-to-Heat ist netzdienlich

von Strom mit Umlagen, Steuern und Abgaben verhindert. Hier es notwendig, zügig Wettbewerbsnachteile abzubauen und so den verschiedenen Technologien die Marktdurchdringung zu ermöglichen.

ENERGIEWANDLUNG MIT POWER TO HEAT



DIE INFRASTRUKTUR WIRD SICH ÄNDERN

Wenn sich Energieerzeugung und Verbrauch ändern, braucht es auch eine neue Infrastruktur. Das Netz der Zukunft muss den Fokus auf die Erneuerbaren legen und die Herausforderungen einer volatilen Energieerzeugung ausgleichen können. Die Tage des auf den ersten Blick vermeintlich billigen, stets regelbaren fossilen Stroms sind nicht erst seit dem Beschluss des Kohleausstiegs gezählt. Die Debatte um fossile Abhängigkeiten im Zuge des Kriegs in der Ukraine hat den Handlungsdruck noch einmal erhöht.

Die Politik hat sich für die Transformation ehrgeizige Ziele gesetzt, insbesondere beim Ausbau der Stromnetze und der Ladeinfrastruktur für Elektroautos. Bis 2030 soll die Zahl der öffentlichen Ladesäulen für E-Autos von heute 20.000 auf 1 Million ansteigen³⁷.

Doch die Anstrengung lohnt sich. Denn Berechnungen des Think-Tanks Agora Energiewende zeigen, dass die Elektromobilität zur Stabilität des Stromnetzes beitragen und die Kosten für den Netzausbau sogar senken kann. Voraussetzung dafür ist sogenanntes »netzdienstliches Laden«. Dafür werden Elektroautos vornehmlich dann geladen, wenn gerade viel Wind- und Solarstrom produziert wird. Liegt der Strombedarf später wieder über der Stromerzeugung, können die Fahrzeuge den Strom wieder aus ihren Batterien ins Netz einspeisen³⁸. Ein solches bidirektionales Laden der E-Autos wird bereits heute in Modellversuchen getestet. So zum Beispiel im baden-württembergischen Wangen, wo ein Netzbetreiber das »Netzdienstliche Heimladen« erfolgreich erprobt hat³⁹.

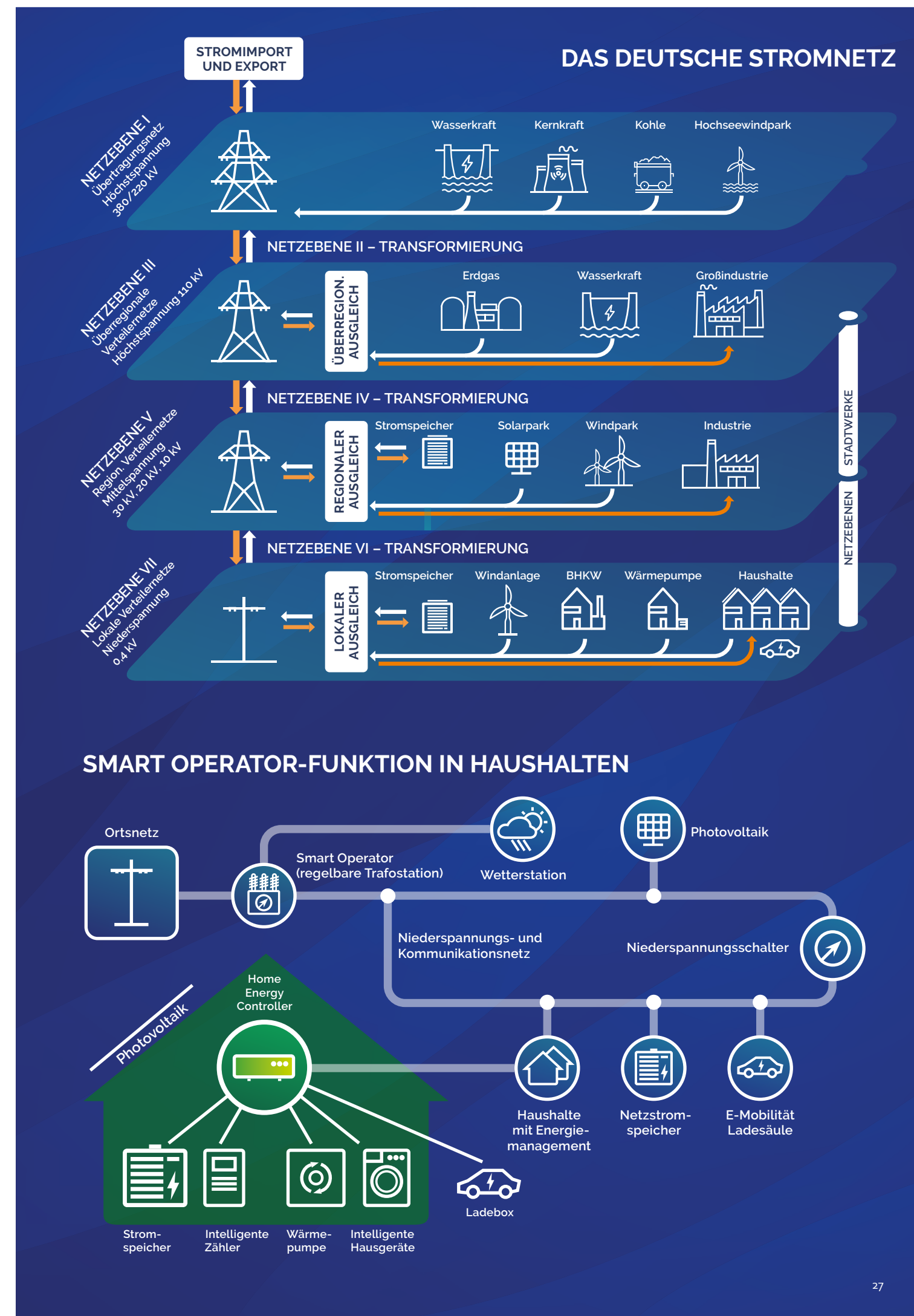
Für einen flächendeckenden Einsatz von intelligentem Laden fehlen häufig noch Anreize für Verbraucher, an einer Optimierung, also zeitlichen Verschiebung, ihres Stromver-

brauchs teilzunehmen. Voraussetzung dafür sind der Einbau von Smart Metern (digitalen Stromzählern) und eine verstärkte digitale Vernetzung der Verbraucher mit Netzbetreibern und Erzeugern.

Doch mit dem netzdienstlichen Be- und Entladen von Elektroautos ist es nicht getan. Der rasche Ausbau und die Optimierung des Stromnetzes bleiben für das Gelingen der Energiewende entscheidend. Das Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) beziffert den Investitionsbedarf allein im Übertragungsnetz bis 2030 auf etwa 50 Milliarden Euro⁴⁰. Das Übertragungsnetz stellt die höchste der sieben Netzebenen dar (siehe Abbildung) und transportiert insbesondere den Strom aus Offshore-Windenergie in Norddeutschland in Richtung Süden.

Doch der Ausbau dieser sogenannten »Stromautobahnen« geht seit Jahren nur schleppend voran. Das liegt auch daran, dass sich in den betroffenen Regionen mitunter starker Widerstand regt. Durch Klagen von Anwohner*innen wird der Bau teilweise um Jahre verzögert. Hier gilt es, Überzeugungsarbeit zu leisten und Betroffene früh in die Planung miteinzubeziehen⁴¹.

Gleichzeitig ist es sinnvoll zu prüfen, ob schon heute vorhandene Infrastruktur in das Energiesystem der Zukunft eingebunden werden kann. Neben den vorhandenen Stromleitungen und -speichern ist das insbesondere die Gas-Infrastruktur. Wo heute noch fossiles Erdgas gespeichert und transportiert wird, können zukünftig erneuerbare Gase fließen. Hier zeigt sich: Verstärkte Sektorenkopplung, also die Nutzung von grünem Strom zum Beispiel für das Heizen, lässt die Gesamtkosten für den Ausbau der Stromnetze sinken und kann Interessenkonflikte mit Bürger*innen vermeiden^{42 43}.



SO MUSS SICH DER STROMMARKT ÄNDERN

Die neue Bundesregierung will bis 2030 einen Anteil von 80 Prozent Erneuerbaren Energien am Bruttostrombedarf erreichen. Das aktuelle Strommarktdesign ist aber nicht in der Lage, den notwendigen Ausbau von Wind- und PV-Anlagen zu gewährleisten. Es braucht neue Rahmenbedingungen für den Strommarkt. Doch welche Maßnahmen sind notwendig?

Dieser Frage ist die Studie »Neues Strommarktdesign für die Integration fluktuierender Erneuerbarer Energien« im Auftrag des Bundesverbands Erneuerbare Energie (BEE) nachgegangen. Die wissenschaftliche Umsetzung erfolgte durch die Fraunhofer Institute für Energiewirtschaft und Netzbetrieb (IEE) und Solare Energiesysteme (ISE). Die Studie nimmt eine Modellierung der komplexen Zusammenhänge zwischen sehr hohen Wind- und PV-Leistungen, Investitionen in Flexibilitätsoptionen, Strompreisbildung und Stromnetzen vor, um herauszufinden, wie der Wandel vom Strommarkt mit fossilen Hauptlastträgern auf einen Strommarkt mit Erneuerbaren Hauptlastträgern erfolgen kann. Deutlich wird, dass sich beide Bausteine gegenseitig zentral bedingen. So benötigt die Sektorkopplung erneuerbare Strommengen für die Dekarbonisierung anderer Sektoren und umgekehrt sind die Erneuerbaren Energien abhängig von der Flexibilität und somit Marktstabilitätsrahmen, welche unter anderem die Sektorkopplung zur Verfügung stellt.

Obwohl sie schon heute aktiv den Börsenstrompreis senken, fehlt den Erneuerbaren mitunter eine betriebswirtschaftliche Grundlage. Eine zentrale Maßnahme, um diese Grundlage zu schaffen, ist die Flexibilisierung von Stromangebot und -nachfrage. Dazu müssen auf Erzeuger- und auf Verbraucherseite steuerbare Elemente ausgebaut und Sektorkopplungstechnologien wie Power-to-Gas oder Power-to-Heat genutzt werden.

Mit einer erhöhten Flexibilisierung kann der Einspeisevorrang für Erneuerbare Energien gestärkt und die wachsende

Systemverantwortung von Erneuerbaren Energien genutzt werden. Eine Überführung der aktuell festgelegten Förderdauer von 20 Jahren in eine Mengenförderung ermöglicht den Erneuerbaren außerdem, selbst auf Strompreise zu reagieren. Das sichert den wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen und stabilisiert den Strommarkt. Nach Einschätzung der Studienautor*innen können diese Maßnahmen die Erneuerbaren Energien ab 2040 marktfähig machen.

Ein zu geringer Ausbau an Flexibilität hingegen würde zu einem deutlich geringeren marktstabilisierenden Rahmen führen und somit die betriebswirtschaftliche Grundlage der Erneuerbaren Energien begrenzen und den notwendigen erneuerbaren Ausbau verhindern. Am deutlichsten kann dies gezeigt werden am Beispiel der nicht vergütungsfähigen Erneuerbaren Strommengen in negativen Strompreiszeitfenstern, welcher im §51 des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes 2021 gesetzlich festgelegt wird. Die Ergebnisse einer solchen Simulation hat der BEE in einer Strommarktdesignstudie für das Jahr 2050 prognostiziert.

Die Abbildung zeigt hierbei für die drei Haupttechnologien (Wind onshore, Wind offshore und Photovoltaik) die prozentualen Jahresenergiemenge, welche nicht vergütungsfähig wäre. Ganz links zu sehen ist der Ausgangspunkt unter Verwendung maximaler Verbrauchs- und Speicherflexibilität im Markt. Zu erkennen ist, dass bei der Windenergie ca. 3 bis 4 Prozent und bei der Photovoltaik ca. 10 Prozent der Jahreseinspeisung nicht vergütungsfähig wären. Für die Photovoltaik wäre somit eine betriebswirtschaftliche Grundlage für einige Projekte bereits gefährdet.

Werden nur 85 Prozent der maximalen Verbrauchs- und Speicherflexibilitäten erreicht, würden sich die nicht vergütungsfähigen Strommengen für alle Technologien fast verdoppeln. Die Photovoltaik würde mit knapp 20 Prozent nicht vergütungsfähigen Strommengen kaum noch eine

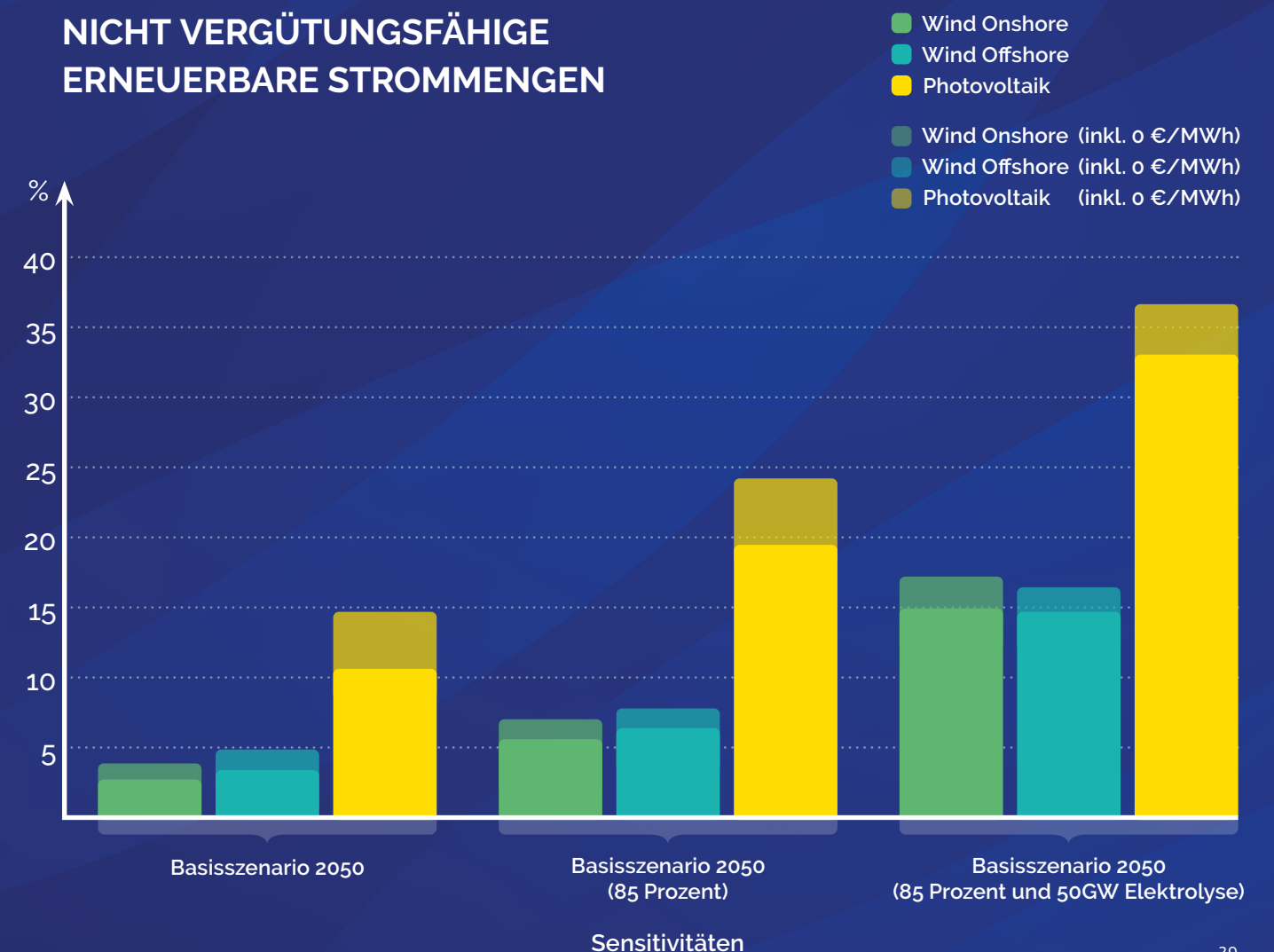
betriebswirtschaftliche Grundlage besitzen. Wird zudem die Elektrolyseleistung, eine der zentralen Flexibilitätsarten in Deutschland, begrenzt auf 50 GW, würde es eine weitere Verdopplung der nicht vergütungsfähigen erneuerbaren Strommengen geben und somit weder für die Photovoltaik noch für die Windenergie eine betriebswirtschaftliche Grundlage und somit einen realistischen Ausbaupfad darstellen.

Gleichzeitig ergab die komplexe Modellierung der Forscher*innen, dass die Versorgungssicherheit nahezu vollständig über Wind, Sonne, Bioenergie, KWK-Anlagen und Speicher gewährleistet werden kann. Außerdem ist der wirtschaftliche Aufbau von bis zu 100 GW Elektrolyse-Leistung hierzulande möglich. Die Notwendigkeit zum Import von grünem

Wasserstoff würde damit massiv reduziert, was neue Energie-Abhängigkeiten verhindert. Noch dazu hat der Aufbau von Wasserstoff-Erzeugungskapazitäten zahlreiche positive Effekte für die regionale Wertschöpfung. Dazu zählen die Schaffung von Arbeitsplätzen und hohe Steuereinnahmen.

Die Studienergebnisse sind eindeutig. Eine sichere, günstige und klimaneutrale Energieversorgung in Deutschland auf Grundlage von 100 Prozent Erneuerbaren ist möglich. Die Volatilität der Erneuerbaren kann ausgeglichen, die Versorgungssicherheit gewährleistet und dabei noch Hunderttausende Jobs geschaffen werden. Jetzt gilt es die Rahmenbedingungen zu setzen, um diese Transformation zur Erfolgsgeschichte zu machen⁴⁴.

NICHT VERGÜTUNGSFÄHIGE ERNEUERBARE STROMMENGEN



BILDNACHWEIS

Titel	GP Joule
Seite 4	BWE/Tim Riediger/nordpool
Seite 5	BWE/Silke Reents
Seite 9	iStockfoto/CharlieChesvick
Seite 15	BWE/Tim Riediger/nordpool
Seite 18	Daimler Pressefoto
Seite 21	BWE/Kira Kutscher
Seite 22	BWE/Silke Reents

QUELLENANGABEN

1. **Umweltbundesamt (10.8.2022):** Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs#endenergieverbrauch-steigt-seit-2010-wieder-an>
2. **Thermondo (10.8.2022):** Studie zu Heizungstechnik und Heizverhalten: <https://www.thermondo.de/info/waermewende/studien/thermondo-heizstudie/>
3. **Bundesnetzagentur (29.5.2019):** Monitoringbericht 2018: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2018/Monitoringbericht_Energie2018.pdf
4. **BMW (3.6.2020):** Die Nationale Wasserstoffstrategie: https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20
5. **Umweltbundesamt (10.8.2022):** Windenergie an Land: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/windenergie-an-land>
6. **Bundesregierung (10.8.2022):** Mehr Windenergie auf See: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/windenergie-auf-see-gesetz-2022968>
7. **Wuppertal-Institut/DIW-Econ (3.11.2020):** Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung: <https://wupperinst.org/fal-redaktion/downloads/projects/LEE-H2-Studie.pdf>
8. **Vattenfall (10.8.2022):** Power-to-Gas – einfach erklärt: <https://www.vattenfall.de/glossar/power-to-gas>
9. **RH₂-WKA (10.8.2022):** <https://www.rh2-wka.de/projekt.html>
10. **Energiepark Bad Lauchstädt (10.8.2022):** <https://energiepark-bad-lauchstaedt.de/>
11. **Wind2Energy (10.7.2021):** <https://www.w2g-energy.de/medien/>
12. **Stadt Ennigerloh (23.1.2019):** Power-to-Gas Ibbenbüren: https://www.stadt-ennigerloh.de/fileadmin/Dateien/Webseite/Dateien/Energiewendewoche/PowertoGasanlage_Ibben%C3%BCren.pdf
13. **Energate Messenger (23.10.2020):** <https://www.energate-messenger.de/news/206612/feldtest-fuer-gruenes-methan-aus-dem-bioreaktor-gestartet>
14. **Bundesregierung (10.8.2022):** Wasserstoff – Energieträger der Zukunft: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/wasserstoff-technologie-1732248>
15. **Batterieforum Deutschland (10.8.2022):** Lithium-Ionen-Batterien: <https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/lithium-ionen-batterien/>
16. **Batterieforum Deutschland (10.8.2022):** Blei-Säure-Batterien: <https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/blei-saeure-batterien/>
17. **Dena (10.8.2022):** Pumpspeicher: <https://www.dena.de/themen-projekte/energiesysteme/flexibilitaet-und-speicher/pumpspeicher/>
18. **Bundesverband Geothermie (2.4.2020):** Druckluftspeicher: <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/druckluftspeicher.html>
19. **Bundesregierung (10.8.2022):** Klimaschonender Verkehr
20. **Statista (27.7.2022):** CO₂-Emissionen weltweit nach Bereich: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167957/umfrage/verteilung-der-co-emissionen-weltweit-nach-bereich/>
21. **Agora-Verkehrswende (1.12.2019):** Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/Klimabilanz_Batteriefahrzeugen/32_Klimabilanz_strombasierten_Antrieben_Kraftstoffen_WEB.pdf
22. **Watson.de (30.4.2022):** <https://www.watson.de/nachhaltigkeit/gute%20nachricht/320805555-herstellung-von-batterien-fuer-e-autos-soll-umweltvertraeglicher-werden>
23. **Fraunhofer (10.8.2022):** <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/wasserstoff-so-bleiben-wir-mobil/eignung-wasserstoff-fuer-lkw-schiff-zug-flugzeug.html>
24. **Ifo-Institut (12.5.2021):** Strukturwandel in der Automobilindustrie: <https://www.ifo.de/DocDL/isd-2021-05-puls-et-al-automobilindustrie-strukturwandel.pdf>
25. **RVK (10.8.2022):** Wasserstoff für den ÖPNV: <https://www.rvk.de/projekt-null-emission/die-brennstoffzellen-hybridbusse>
26. **WSW (22.6.2021):** <https://www.wsw-online.de/unternehmen/presse-medien/presseinformationen/pressemeldung/meldung/wsw-wasserstoffbusse-erreichen-kostenparitaet-mit-dieselbussen/>
27. **IFEU-Institut (7.2.2022):** Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030: <https://www.ifeu.de/service/nachrichtenarchiv/2030-elektrische-lkw-schlagen-diesel-fahrzeuge-bei-kosten-und-klima-deutlich/>
28. **Tagesspiegel (13.5.2022):** <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/die-zuege-der-zukunft-wasserstoff-oder-akku/28338062.html>
29. **Umweltbundesamt (13.6.2022):** <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsstandards/seeschiffe-luftschadstoffe-energieeffizienz#luftverunreinigung-durch-seeschiffe>
30. **Berliner Morgenpost (16.5.2022):** <https://www.morgenpost.de/berlin/article235368409/Weltweit-erstes-emissionsfreie-Schiff-auf-der-Spree-unterwegs.html>
31. **FAZ (22.2.2022):** <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/klima-nachhaltigkeit/airbus-verspricht-wasserstoff-flugzeug-als-kerosin-ersatz-17825842.html>
32. **Thermondo (10.8.2022):** Studie zu Heizungstechnik und Heizverhalten: <https://www.thermondo.de/info/waermewende/studien/thermondo-heizstudie/>
33. **Solarify (8.6.2022):** <https://www.solarify.eu/2022/06/08/637-mehr-als-die-haelfte-neuer-wohngebaeude-mit-waermepumpen-beheizt/>
34. **Handelsblatt (18.5.2022):** <https://www.handelsblatt.com/finanzen/steigende-heizkosten-lohnt-sich-jetzt-eine-waermepumpe/28295194.html>
35. **Vattenfall (28.6.2018):** <https://group.vattenfall.com/de/newsroom/news/2018/juni/elektrodenkessel-power-to-heat>
36. **BDEW (27.4.2020):** Positionspapier – Power-to-Heat: https://www.bdew.de/media/documents/Stn_20200427_Power-to-Heat.pdf
37. **Bundesregierung (10.8.2022):** <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/verkehr-1672896>
38. **Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und The Regulatory Assistance Project (RAP) (26.8.2019):** Verteilnetzausbau für die Energiewende – Elektromobilität im Fokus https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/EV-Grid/AgoraRAP2019_VerteilnetzausbauElektromobilitaet_2019-08-26.pdf
39. **Netze BW (19.7.2022):** <https://www.netze-bw.de/News/netzlabor-intelligentes-heimladen-abgeschlossen>
40. **BMW (10.8.2022):** Ein Stromnetz für die Energiewende <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Dossier/netze-und-netzausbau.html>
41. **Energiewind – Orsted (16.4.2021):** Das Leid mit dem Leitungsbau: <https://energiewind.de/energiewinde.orsted.de/energiewindpolitik/stromnetz-ausbau-deutschland-fortschritt-proteste-gerichtsverfahren-karte>
42. **Enervis Energy Advisors im Auftrag des BWE und der Initiative Erdgasspeicher INES (12.12.2017):** Erneuerbare Gase – ein Systemupdate der Energiewende https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/o3-sektorenkopplung/20171212_studie_erneuerbare_gase.pdf
43. **Deutsche Energie-Agentur dena (Juni 2016):** Potenzialatlas Power to Gas https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9144_Studie_Potenzialatlas_Power_to_Gas.pdf
44. **Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (1.12.2021):** Studie: Neues Strommarktdesign für die Integration fluktuierender Erneuerbarer Energien: https://klimaneutrales-strom-system.de/pdf/20211213_BEE_Kurzversion_der_Studie_Neues_Strommarktdesign.pdf



Bundesverband WindEnergie