

Masterplan Energiewende

Prof. Dr.-Ing. Hans Schäfers, HAW Hamburg
Competence Center für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz an der HAW Hamburg

Inhalt

- 1) Das Problem
- 2) Die (bisher einzige) Lösung und ein (sehr ambitionierter) Masterplan für Klimaneutralität bis 2045
- 3) Können wir uns das leisten?

Inhalt

- 1) Das Problem
- 2) Die (bisher einzige) Lösung und ein (sehr ambitionierter) Masterplan für Klimaneutralität bis 2045
- 3) Können wir uns das leisten?

Fünf große Studien zu einem vollständig regenerativen Energiesystem (100% EE) in Deutschland („The big 5“)

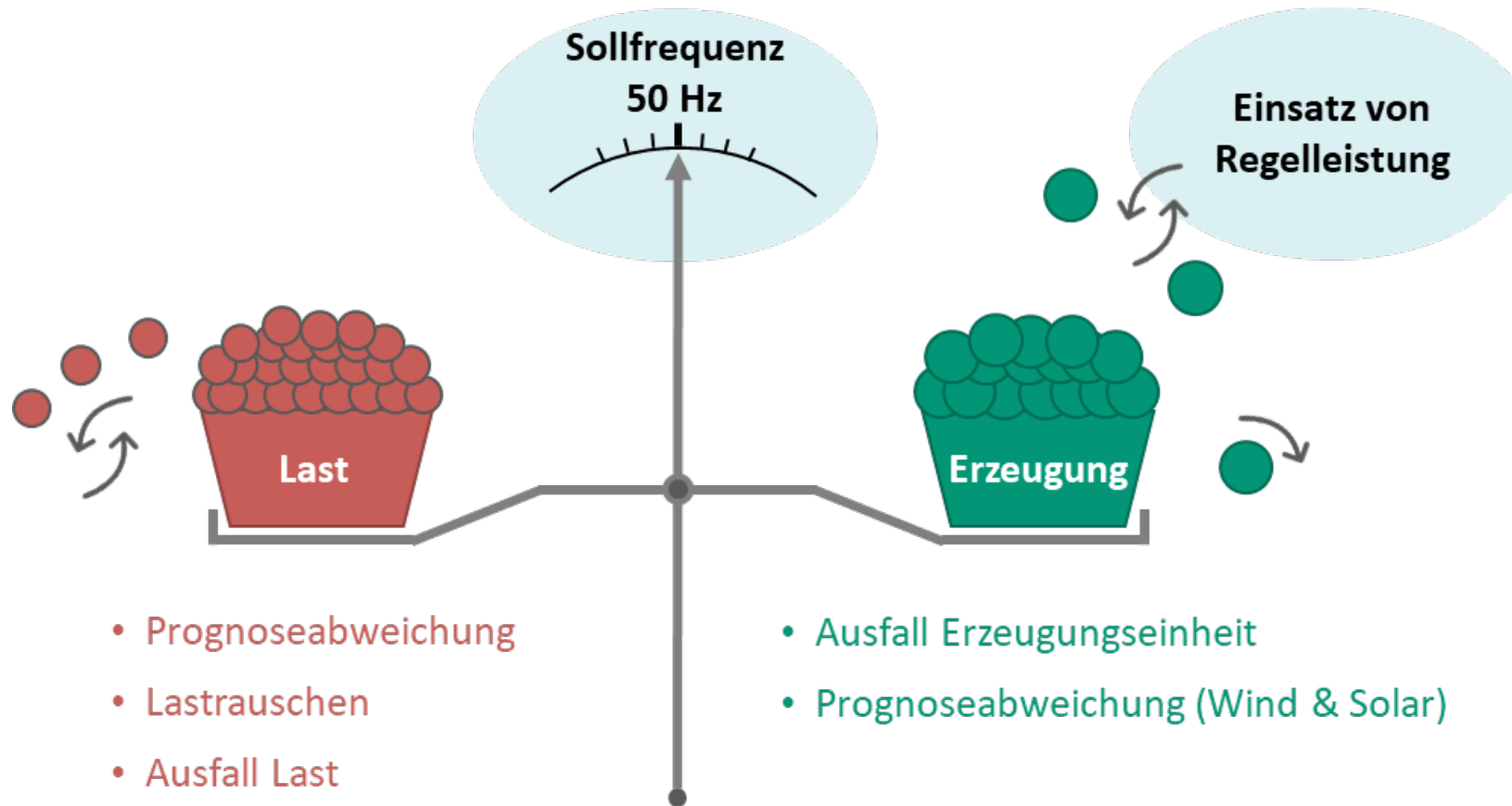
- „Klimaneutrales Deutschland 2045“, herausgegeben von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende,
- dena-Leitstudie „Aufbruch Klimaneutralität“
- „Klimapfade 2.0“, Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI),
- „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3“, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)
- „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität“ Forschungsprojekt Ariadne.

Zusätzlich eine Meta Studie,
die die fünf Studien vergleicht
(<https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/vergleich-big-5/>)



1 Das Problem

Strom ist keine speicherbare Energieform, sondern „Energie auf der Durchreise“

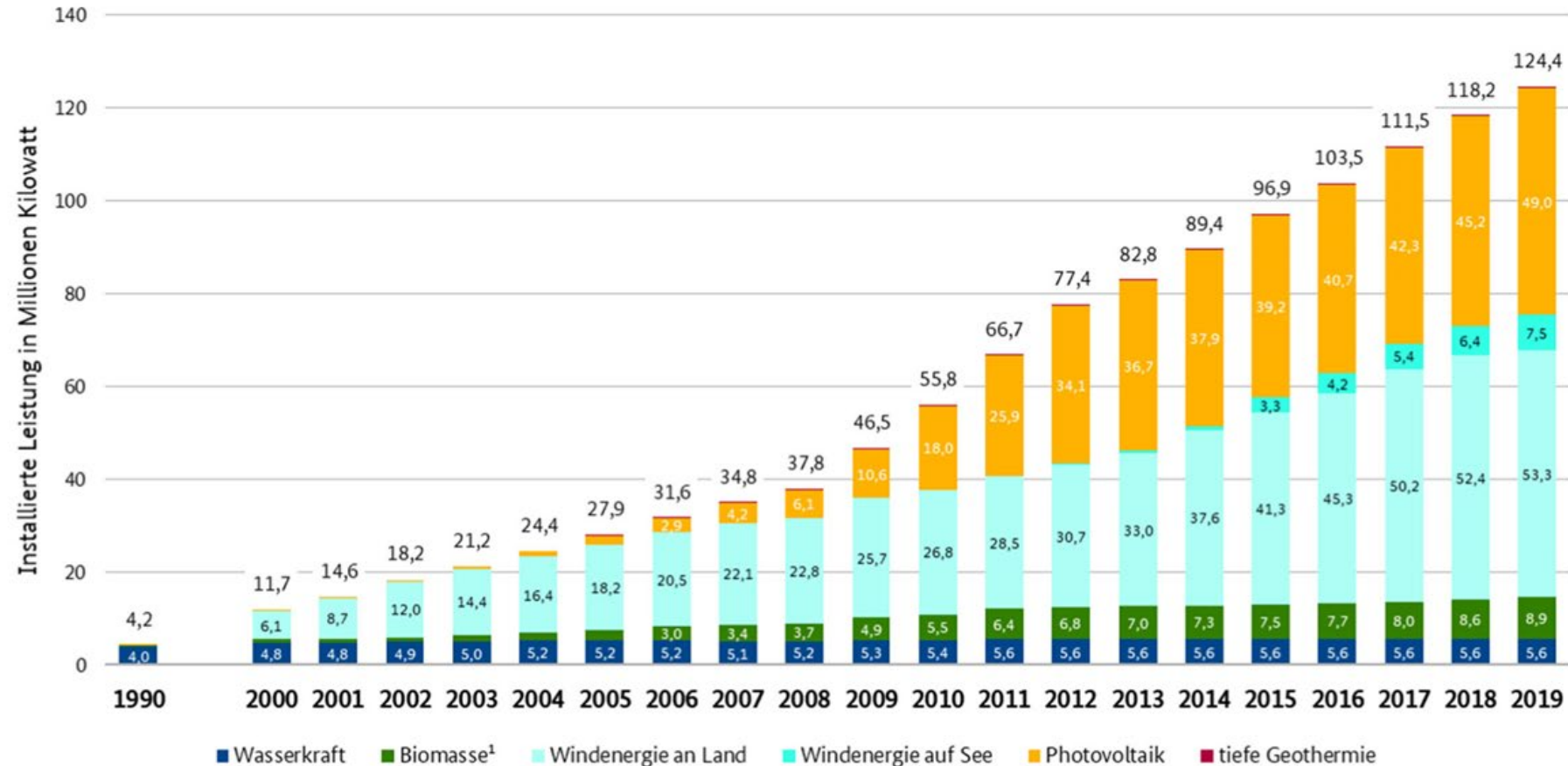


Quelle: Verstege, J. F. (n.a.)

1 Das Problem

Lösung des Klimawandels nur möglich durch Umbau des Energiesystems auf EE Stromerzeugung

Entwicklung der installierten Leistung zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland



2023

Solar : 81,82 GW
Wind offshore : 8,46 GW
Wind onshore : 61,03 GW
Biomasse : 9,03 GW
Laufwasser : 4,94 GW

Summe: 165,3 GW

FHG ISE (2024)

BMWi (2020)

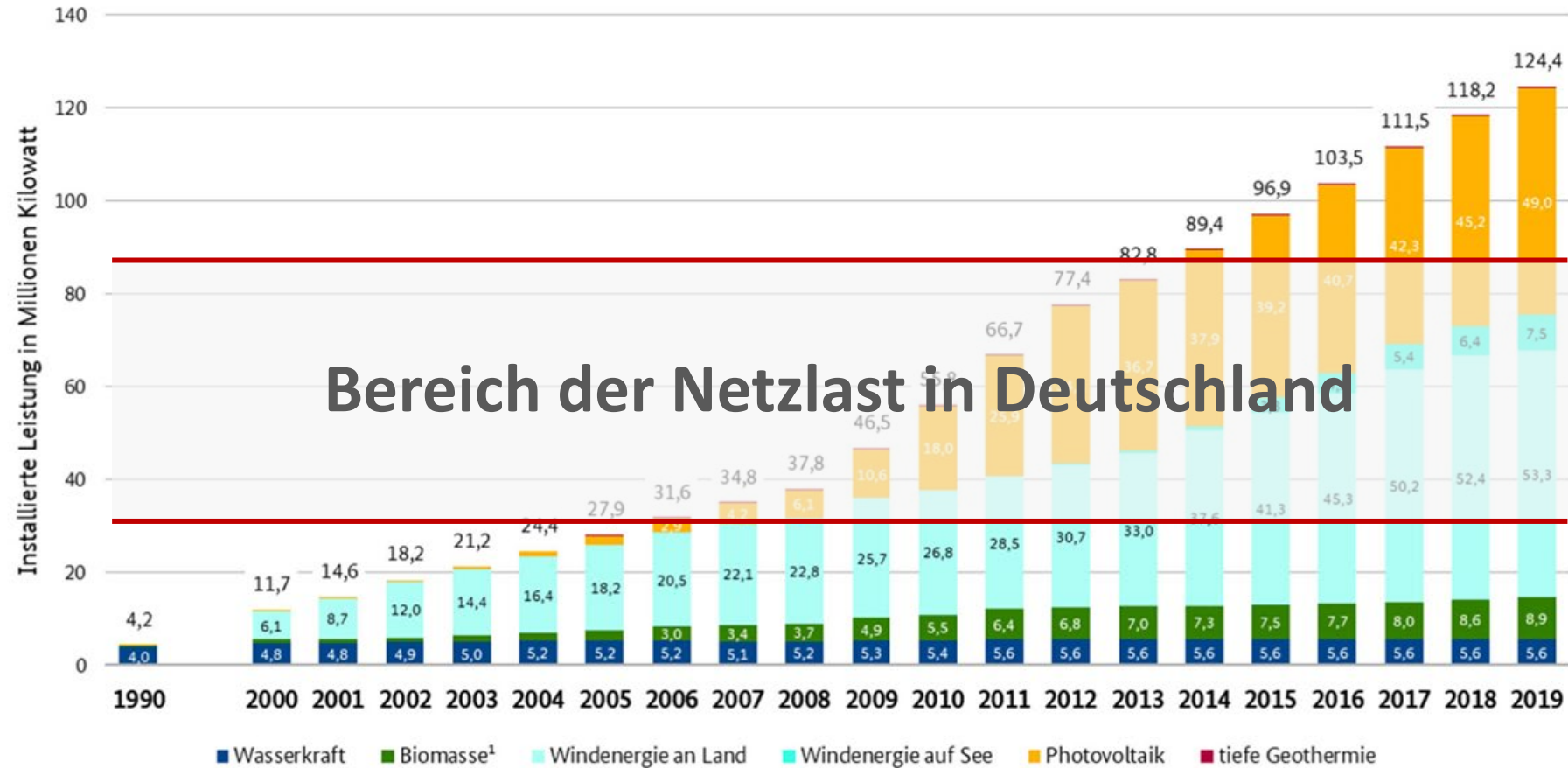
¹ inkl. feste und flüssige Biomasse, Biogas, Biomethan, Klär- und Deponiegas, ohne biogenen Anteil des Abfalls

BMWi auf Basis Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat); Stand: Februar 2020

1 Das Problem

Paradigmenwechsel vom Lastfolge- zum Erzeugungsfolgebetrieb im Stromsystem

Entwicklung der installierten Leistung zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland



2025

Solar : 104,9 GW
Wind onshore : 64,67 GW
Wind offshore : 9,22 GW
Biomasse : 9,20 GW
Wasser : 6,44 GW
Summe: 194,5 GW

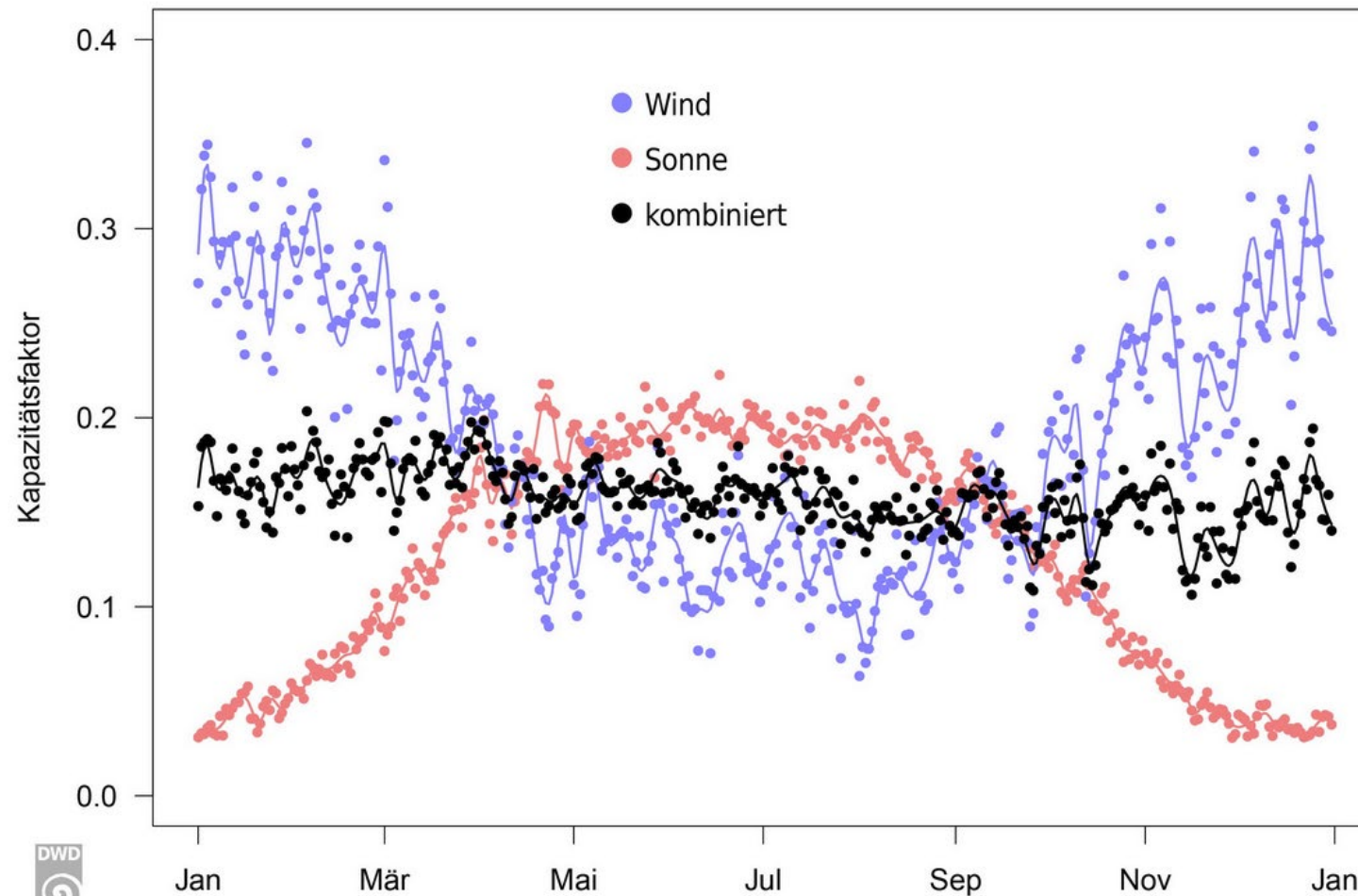
FHG ISE (2025)

BMWi (2020)

¹ inkl. feste und flüssige Biomasse, Biogas, Biomethan, Klär- und Deponiegas, ohne biogenen Anteil des Abfalls

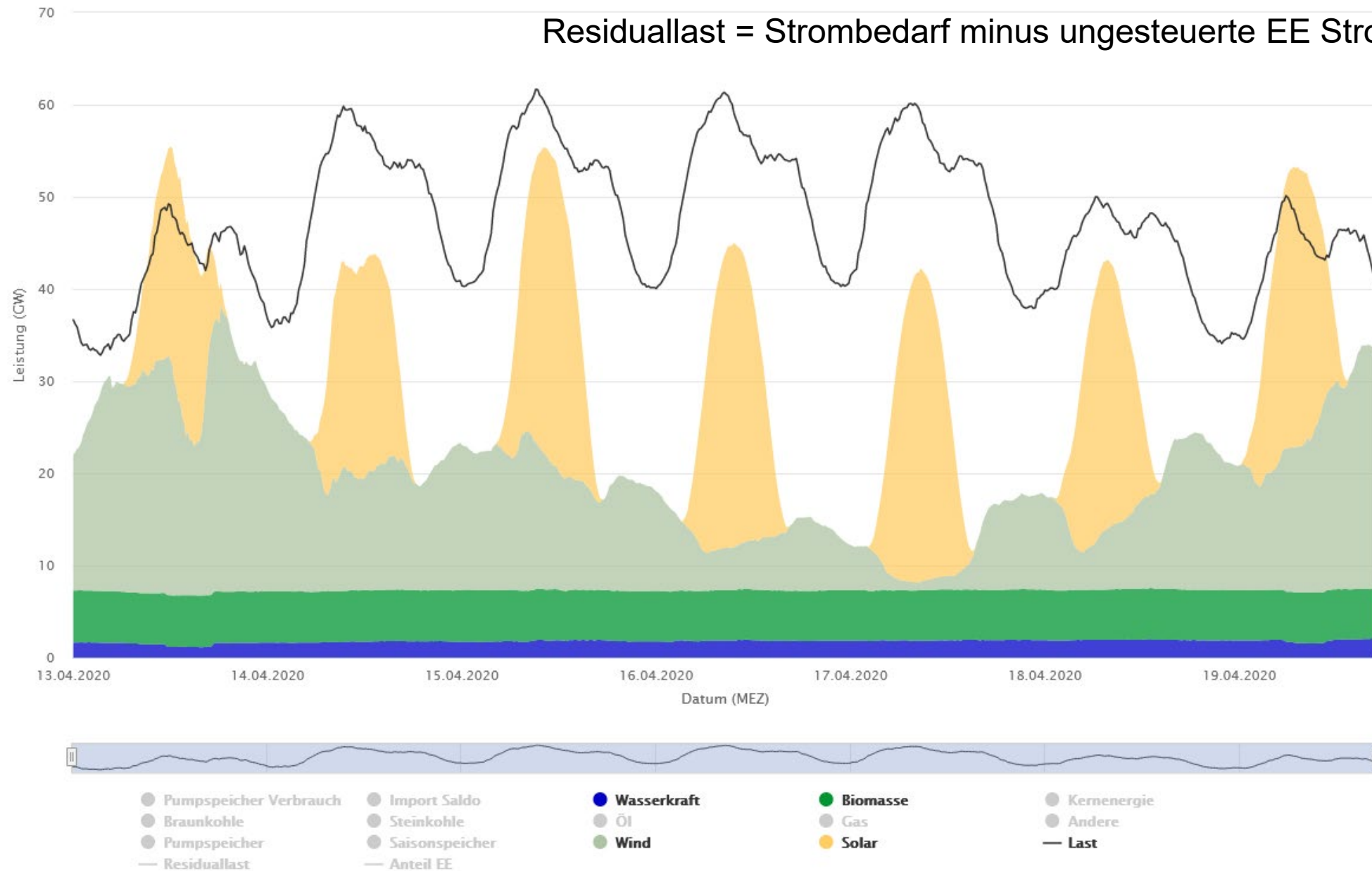
BMWi auf Basis Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat); Stand: Februar 2020

Der mittlere Jahresgang des Kapazitätsfaktors über Deutschland (Mittelwert 1995 bis 2015)



1 Das Problem

Stromerzeugung aus EE in D in der Woche 16 2020: Zum ersten Mal negative Residuallast



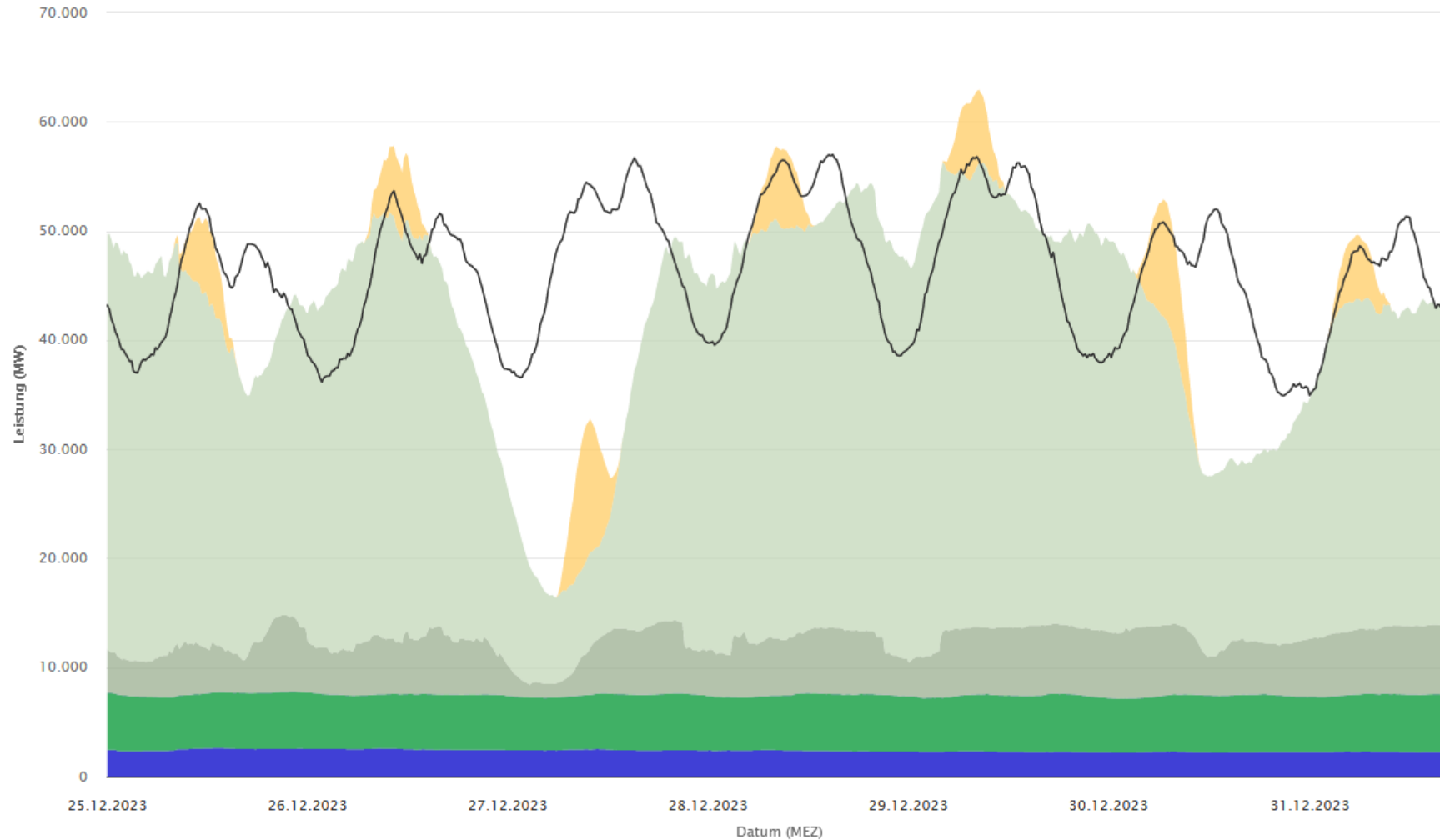
FHG ISE (2021b)

Das Problem: Residuale Lasten

Stromerzeugung aus EE in D in der Woche 52 2023: Eine Woche jeden Tag negative Residuallasten

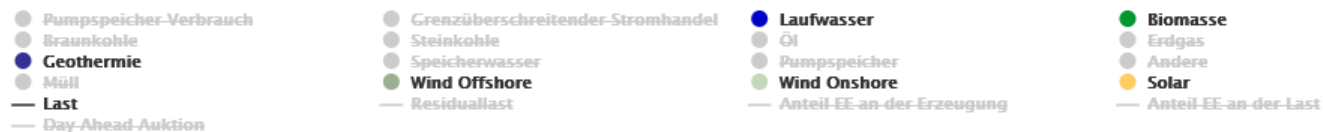
Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland in Woche 52 2023

Energetisch korrigierte Werte



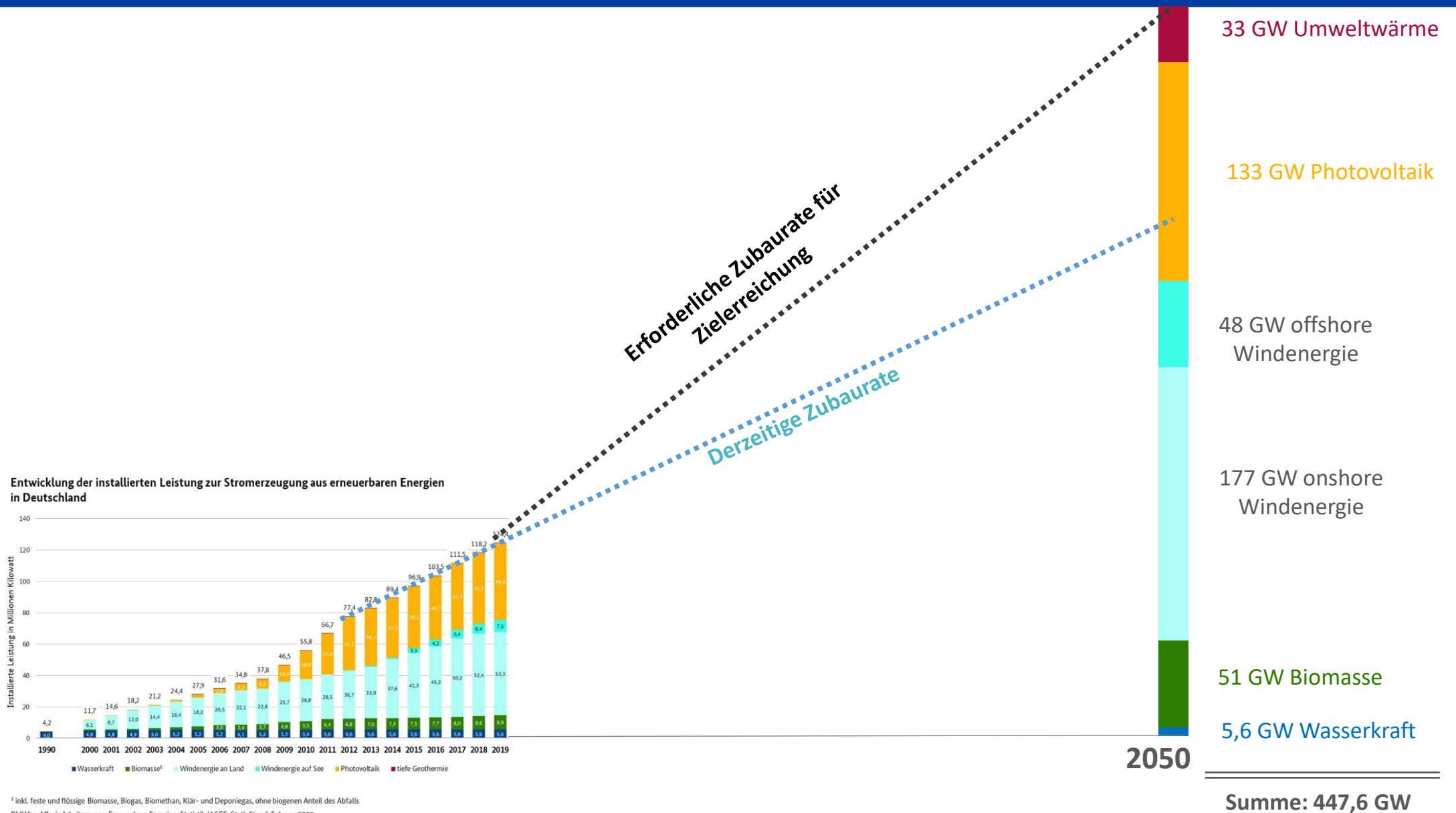
Kapazitätsfaktor eher
> 0,3

FHG ISE (2021b)



1 Das Problem

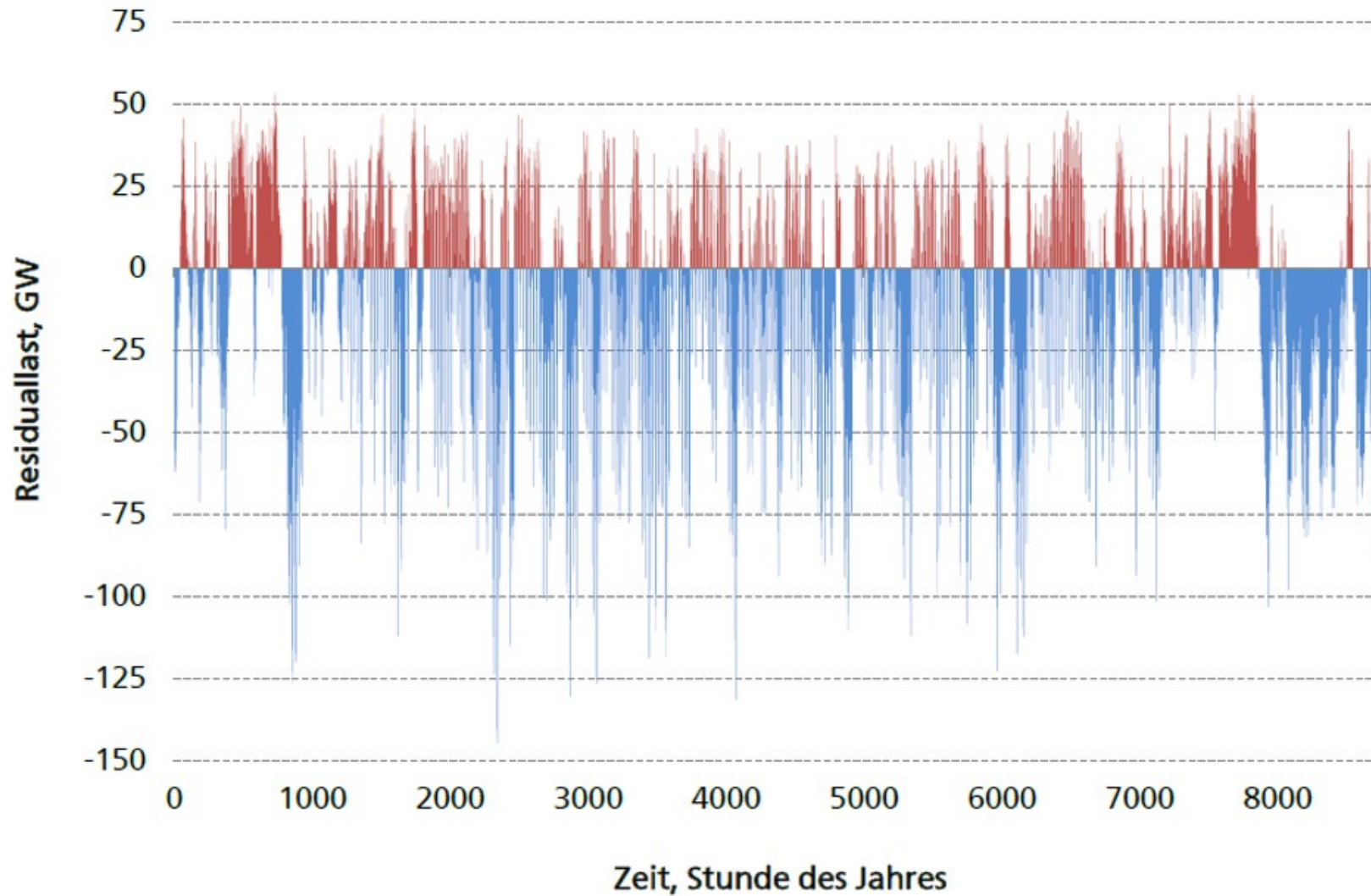
Für 95% CO₂-Reduktion benötigte Anschlussleistung bis 2050 (ACATECH 2017)



1 Das Problem

Residuale Last bei 85% CO2 Reduktion

Residuallast = Strombedarf minus ungesteuerte EE Stromproduktion



	Min.	Max.
	GW	GW
Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien	2,7	201,5
Last	22,6	60,8
Residuallast	-144,8	52,9

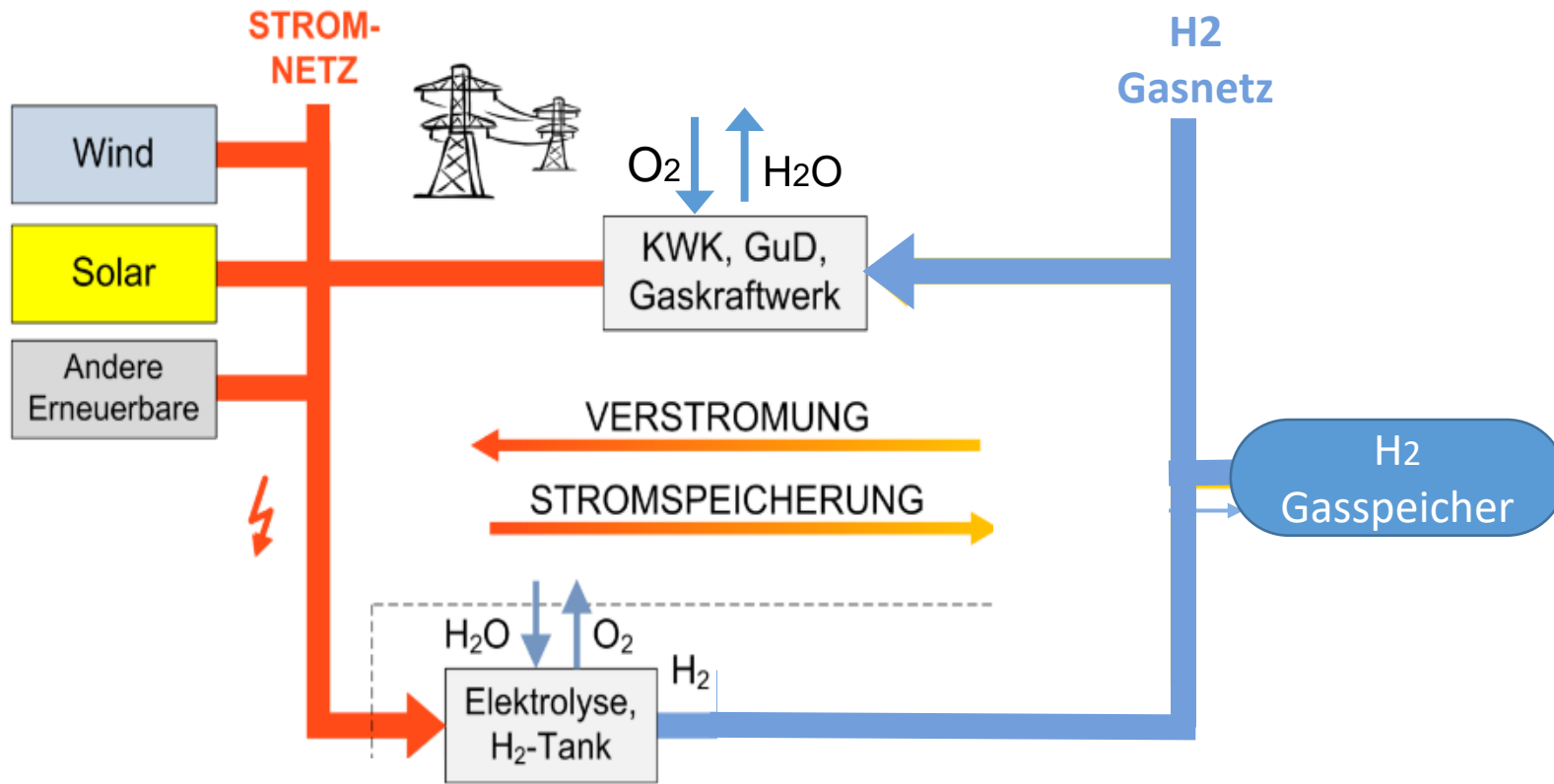
Fraunhofer ISE (2013, S.28)

Inhalt

- 1) Das Problem
- 2) Die (bisher einzige) Lösung und ein (sehr ambitionierter) Masterplan für Klimaneutralität bis 2045
- 3) Können wir uns das leisten?

Die Lösung

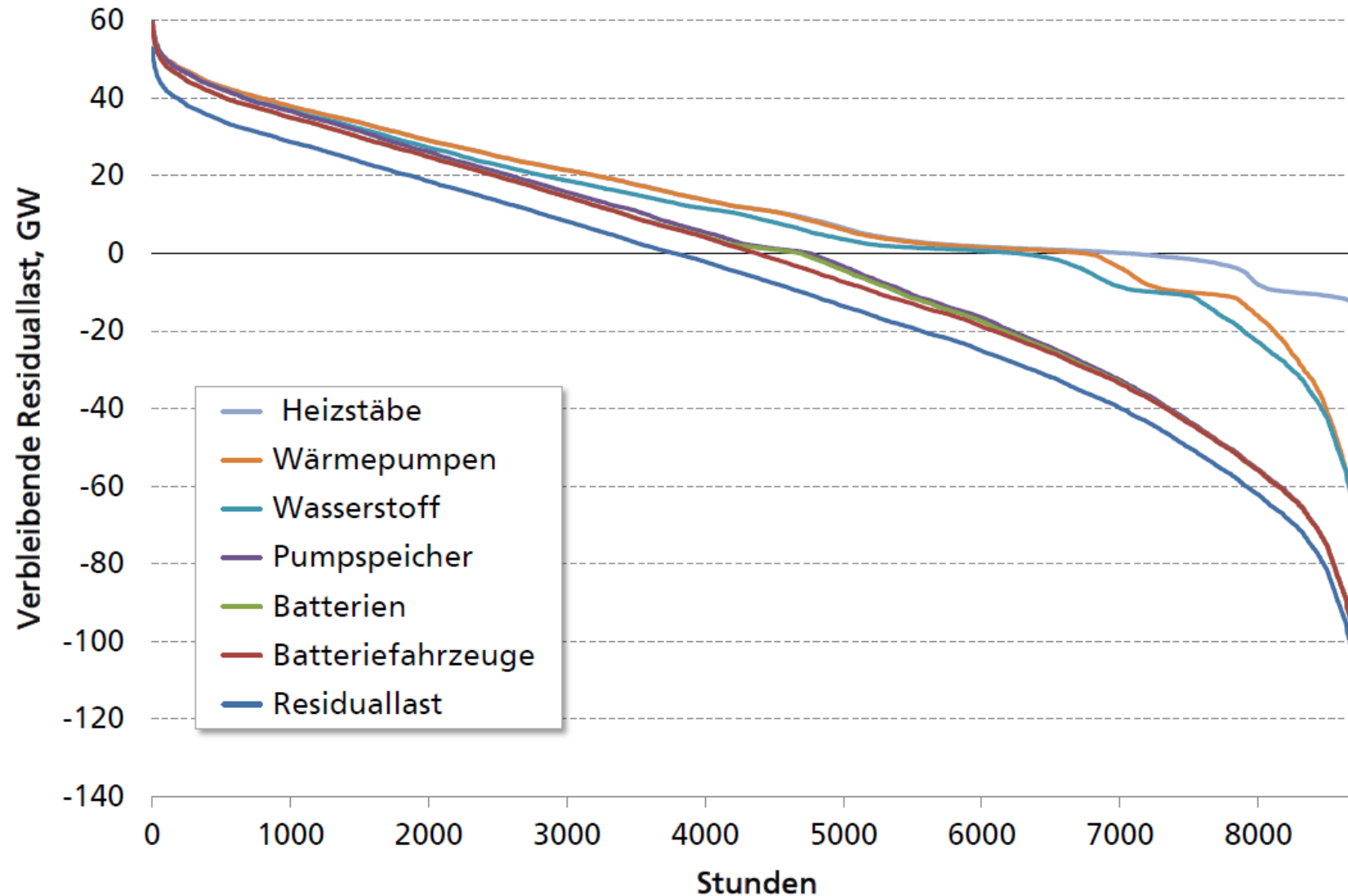
Power to Gas als Langzeitspeicher für 100% EE



Sterner et al. (2009, S.54) - bearbeitet

½ Das Problem ist auch die Lösung ...

Nutzung der negativen Residuallast in den Sektoren Verkehr, Industrie und Wärme

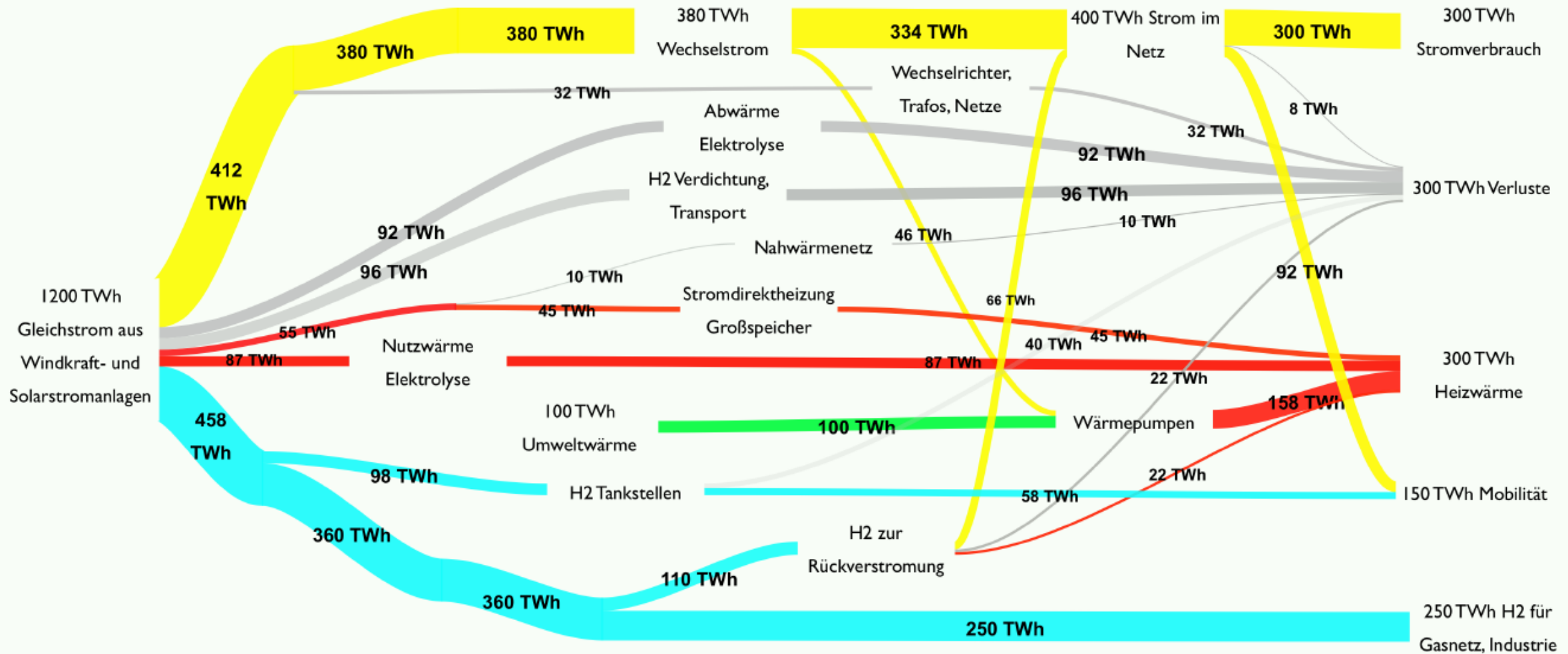


Ausgleich der residualen Lasten ist NUR möglich durch stärkere Kopplung des Stromsektors an die anderen Energiesektoren.

Wichtiges Bindeglied dabei ist der GASSEKTOR in dem der aus Elektrolyse (Basis EE Strom) gewonnene Wasserstoff aufgenommen und zwischengespeichert werden kann.

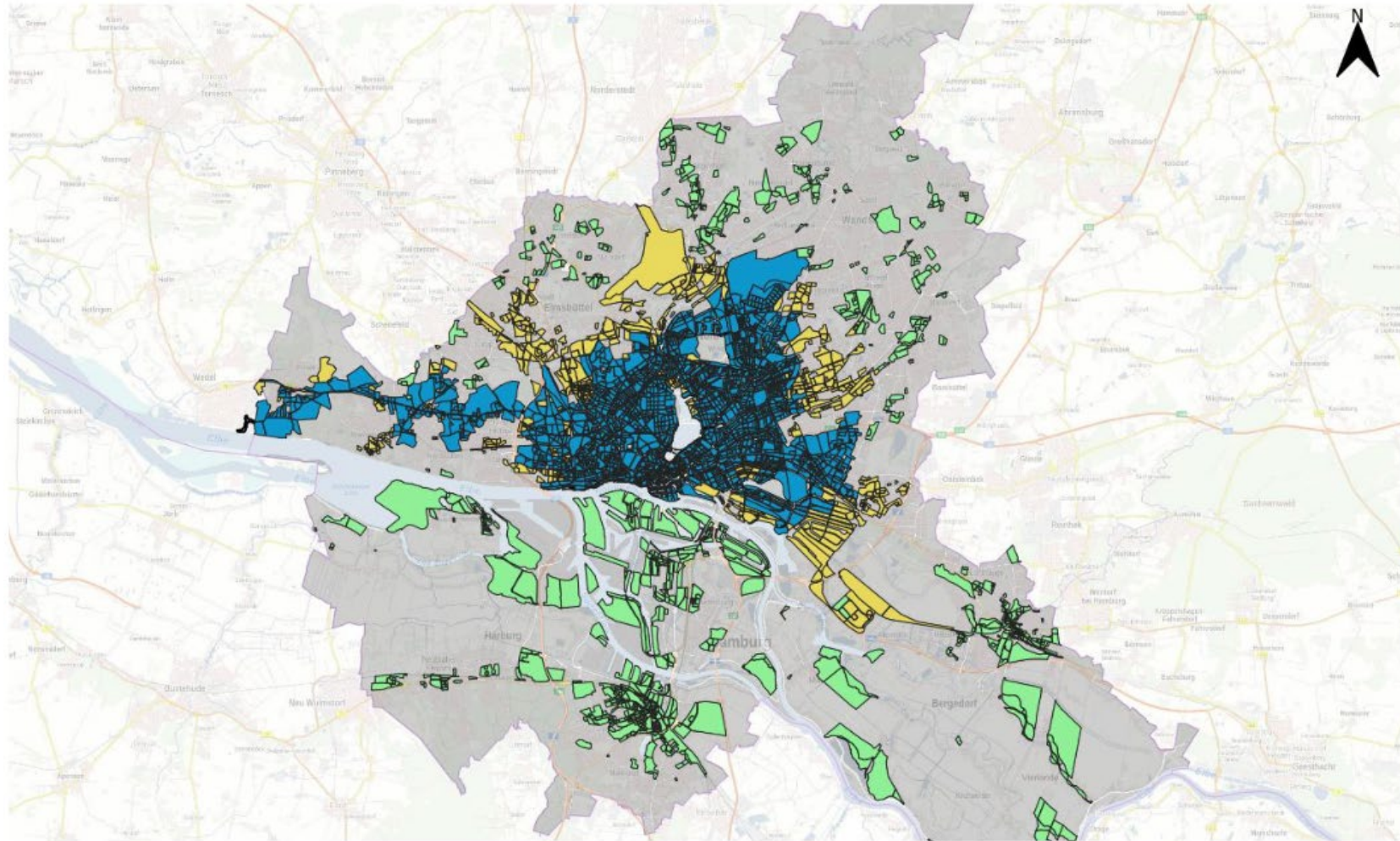
Fraunhofer ISE (2013, S.29)

2 Die Lösung



Kommunale Wärmeplanung zur Vorstruktururierung

Wärmenetze oder individuelle Wärmeversorgung (=Wärmepumpen i.d.R.)



Quartiersanalyse HH - Baublockebene - Kriterium WLD >2 MWh/m*a

■ Ausbau Fernwärme ■ Quartierslösung
■ Dezentral ■ Bestand Fernwärme

Quelle Hintergrundbild: ©GeoBasis-DE / BKG 2022

Quelle:

<https://www.hamburg.de/contentblob/17123654/ea66cb263aa13705ae3263dfe00c210a/data/klimaschutzziele-wohngebaeude-megawatt.pdf>

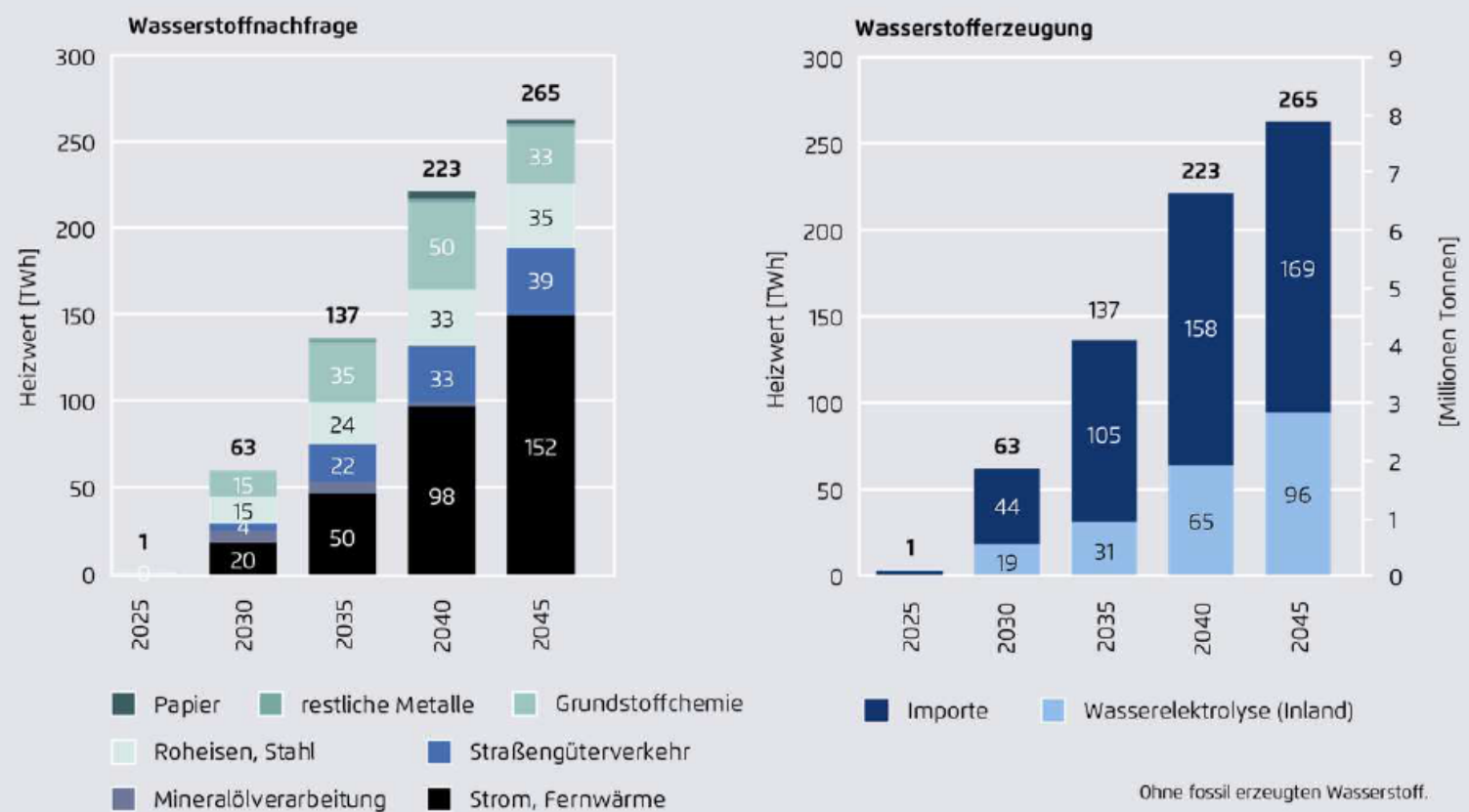
2 Die Lösung

Ein aktuelles Szenario: KN45 – Studie im Auftrag der Agora Energiewende von 2021

In drei Schritten zur Klimaneutralität: Schritt 2: -95% THG bis 2045



CO₂-freie Wasserstoffherzeugung und -nutzung in Deutschland



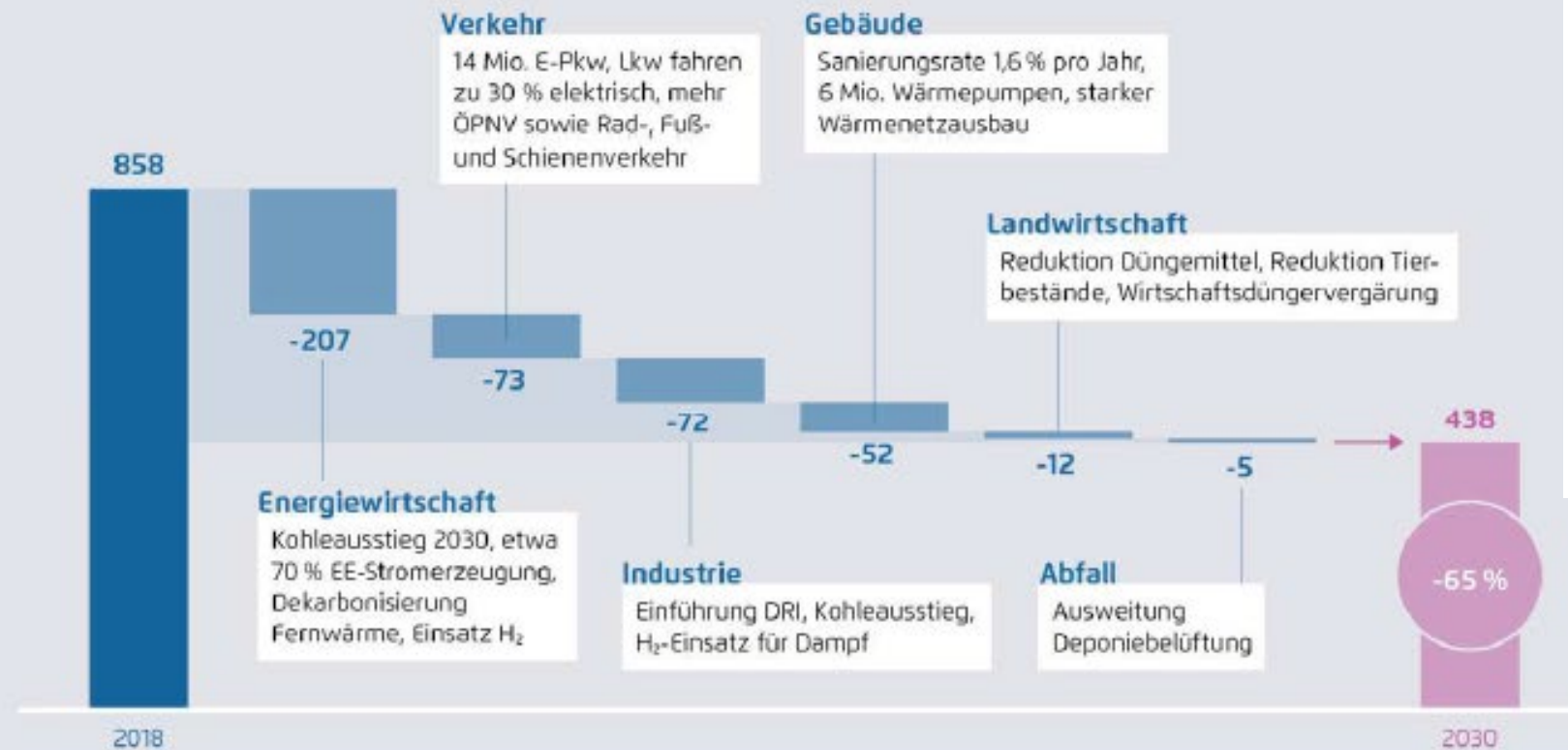
- Wasserstoffnachfrage 265 TWh in 2045, 40 TWh mehr als im selben Jahr der Vorgängerstudie
- 36% des Wasserstoffbedarfs werden importiert
- Kein Wasserstoff in der dezentralen Gebäudewärme
- Alle Bedarfe an PtL-Kraftstoffen werden importiert, insgesamt 158 TWh
- PtL Nutzung im int. Flugverkehr (103 TWh) und Industrie (35 TWh)
- Gesamtmenge an Wasserstoff und PtL ist 422 TWh in 2045

2 Die Lösung

Ein aktuelles Szenario: KN45 – Studie im Auftrag der Agora Energiewende von 2021

In drei Schritten zur Klimaneutralität: Schritt 1: -65% THG bis 2030

65 Prozent Minderung bis 2030 (Treibhausgas-Emissionen in Mio. t CO₂-Äq.)



Hinweis: H₂ = Wasserstoff

Quelle: Prognos 2021

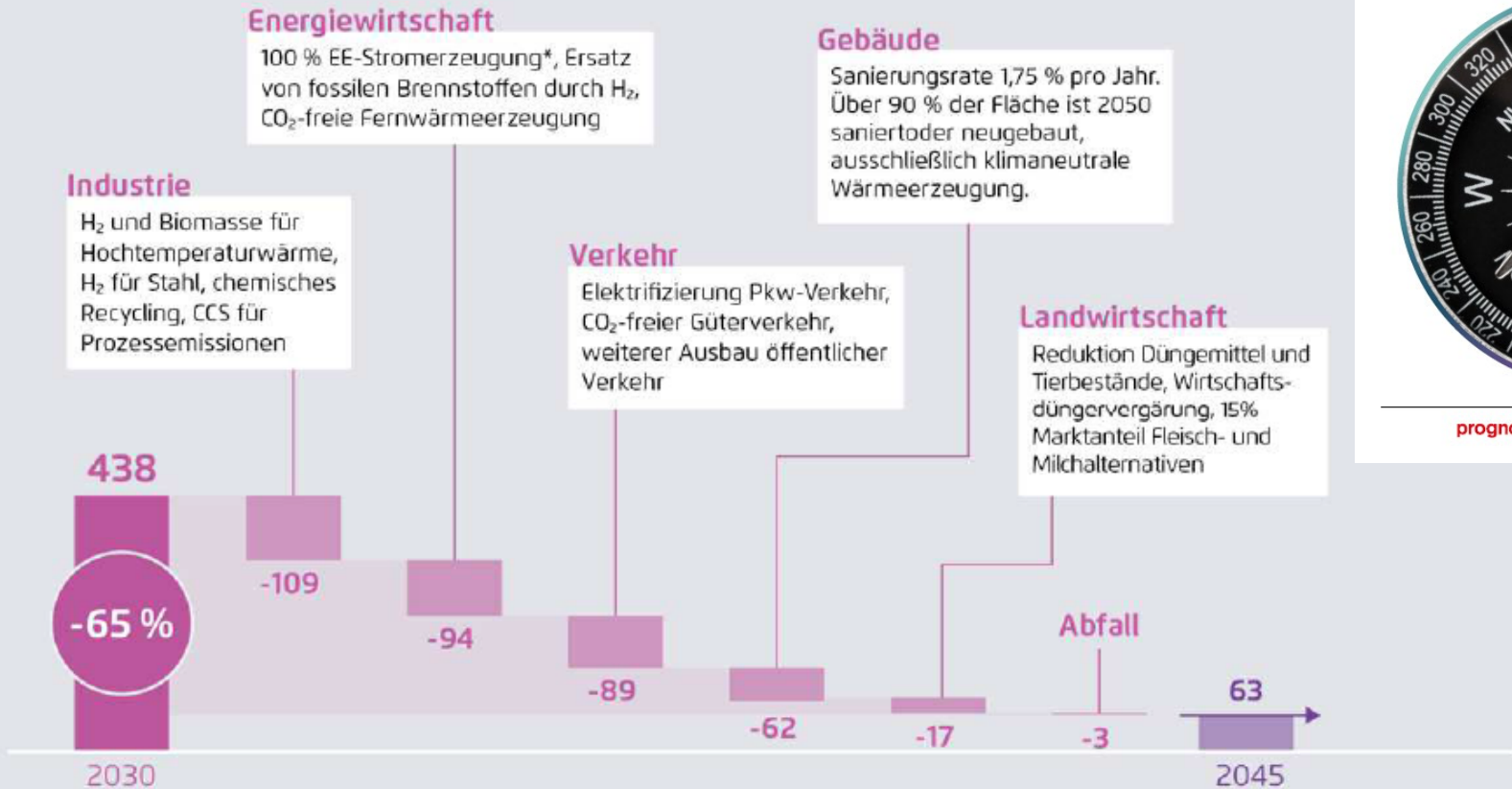


2 Die Lösung

Ein aktuelles Szenario: KN45 – Studie im Auftrag der Agora Energiewende von 2021

In drei Schritten zur Klimaneutralität: Schritt 2: -95% THG bis 2045

95 Prozent Minderung bis 2045 (Treibhausgas-Emissionen in Mio. t CO₂-Äq.)



* inkl. Stromerzeugung aus erneuerbar erzeugtem Wasserstoff, zwischengespeichertem und importiertem erneuerbarem Strom.

Quelle: Prognos 2021



Klimaneutrales Deutschland 2045

Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann

ZUSAMMENFASSUNG



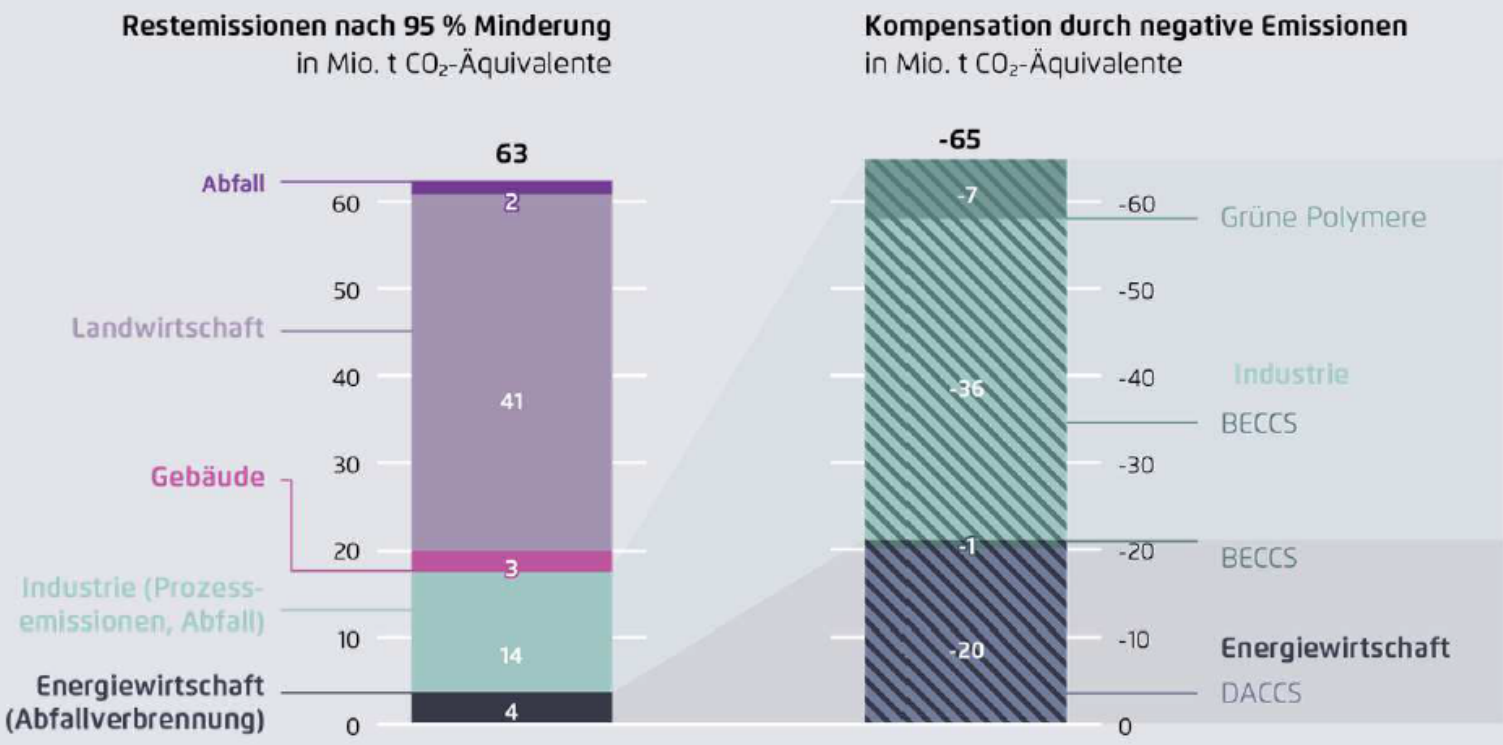
2 Die Lösung

Ein aktuelles Szenario: KN45 – Studie im Auftrag der Agora Energiewende von 2021

In drei Schritten zur Klimaneutralität: Schritt 2: -95% THG bis 2045



Schritt 3 im Detail – residuale THG-Emissionen & deren Kompensation in 2045



- *Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS):* Abscheidung und geologische Lagerung von CO₂ aus Biomasseverbrennung
- BECCS-Einsatz konzentriert in Hochtemperaturwärme für Industrie via fester Biomasse
- *Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS):* direkte CO₂-Abscheidung aus der Luft mit anschließender Einlagerung
- Grüne Polymere binden jährlich 7 Mio. t CO₂-Äq.
- Netto-Emissionsniveau von minus 30 Millionen Tonnen CO₂-Äq. 2050

Inhalt

- 1) Das Problem
- 2) Die (bisher einzige) Lösung und ein (sehr ambitionierter) Masterplan für Klimaneutralität bis 2045
- 3) Können wir uns das leisten?

Und was wird das kosten.... ?

Die (zusätzlichen) Kosten des Umbaus des Energiesystems

- Fraunhofer ISE schätzte 2015 die benötigten Investitions- und Kapitalkosten eines vollständig regenerativen Energiesystems auf etwa 3 -3,5 Bill. € (kumulativ)
(Fraunhofer ISE 2015, S. 39 ff)
- McKinsey Studie von 2021 schätzt doppelt so hohe Kosten: 6 Bill. € (kumulativ)
(McKinsey 2021)
- Gesamtinvestitionen in Höhe von 6 Bill. EUR entsprächen jährlichen Investitionen von rund 240 Mrd. EUR bis 2045
(ca. 7% des Bruttoinlandsproduktes (BIP), McKinsey)
- Die reinen Mehrkosten eines vollständig regenerativen gegenüber einem/dem fossilen Energiesystem liegen
lt. Fraunhofer bei etwa 1,5 bis 2 Bill. €. und
lt. McKinsey bei 1 Bill.€
(Mehrkosten = Gesamtkosten minus „ohnehin-Kosten“ für Ersatz bzw. Instandhaltung bereits bestehender Infrastruktur, Anlagen und Gebäude)
- Bis 2045 (24 Jahre) wären das **zusätzlich notwendige Investitionen in Höhe von 42 bis 83 Mrd.€/a.** (1-2% des BIP)



Erkenntnis 1: Die Energiewende wird nicht billig.

Und können wir uns das leisten ?

Die Kosten des Umbaus des Energiesystems entsprechen denen der Wiedervereinigung

- Zusätzliche Investitionen in Höhe von 42 bis 83 Mrd.€/a entsprechen
 - 1-2% des BIP, oder
 - 7-14% des Bundeshaushalts 2021.
- Zum Vergleich:
Die Kosten der deutschen Wiedervereinigung werden für den Zeitraum 1990 -2014 (ebenfalls 24 Jahre) auf 2 Bill. € geschätzt. (Wikipedia 2021)
- Die jährlichen Ausgaben der Wiedervereinigung liegen aktuell (immer noch) bei etwa 100 Mrd. €/a (ebd.)

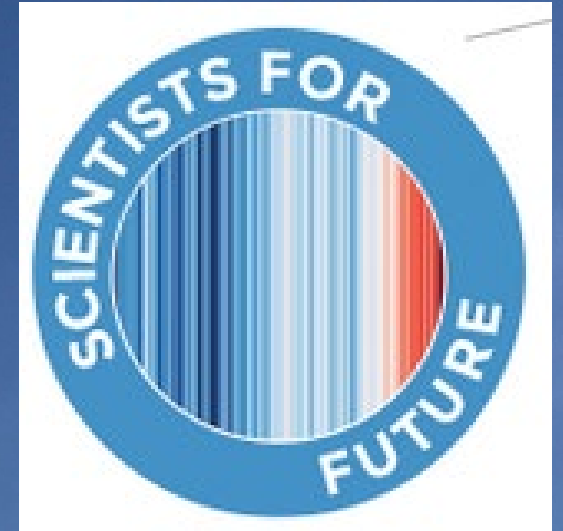
 Erkenntnis 2: Die Energiewende wird (voraussichtlich) nicht teurer als die Wiedervereinigung!

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Hans Schäfers,
Professor für intelligente Energiesysteme und Energieeffizienz

Leiter des
Competence Center für erneuerbare Energien und Energieeffizienz (CC4E)
Energiecampus der HAW Hamburg
Am Schleusengraben 24, 21029 Hamburg
[hans.schaefers\[at\]haw-hamburg.de](mailto:hans.schaefers[at]haw-hamburg.de)



Herausgeber: Competence Center für Erneuerbare Energien und EnergieEffizienz
www.cc4e.de

- BMWi (2020). *Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2019 – Abbildung: Entwicklung der installierten Leistung*. Zuletzt abgerufen am 16.09.2020 unter: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Entwicklung/entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland.html;view=renderPrint
- ACATECH (2017): Ausfelder et al.: »Sektorkopplung« – Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. München 2017. : Zuletzt abgerufen am 11.05.2021 unter: https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/PDFs/ESYS_Analyse_Sektorkopplung.pdf
- Fraunhofer ISE (2013). *ENERGIESYSTEM DEUTSCHLAND 2050*. Zuletzt abgerufen am 02.03.2020 unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE_Energiesystem-Deutschland-2050.pdf
- Fraunhofer ISE (2015). Was kostet die Energiewende. Zuletzt abgerufen am 10.05.2021 unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/was-kostet-die-energiewende.html>
- Sterner et al. (2009). *Erneuerbares Methan*. Zuletzt aufgerufen am 17.03.2020 unter http://www.eurosolar.de/de/images/stories/pdf/SZA%201_2010_Sterner_farbig.pdf
- Prognos 2021: Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Zusammenfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. Zuletzt abgerufen am 10.05.2021 unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf
- Wikipedia 2021: Kosten der deutschen Einheit. Zuletzt abgerufen am 10.05.2021 unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Kosten_der_deutschen_Einheit#cite_note-1
- Mc Kinsey & Company 2021: Net-Zero Deutschland: Chancen und Herausforderungen auf dem Weg zur Klimaneutralität bis 2045. Zuletzt abgerufen am 23.09.2021 unter: <https://www.mckinsey.com/de/news/presse/studie-net-zero-deutschland-klimaneutralitaet-chancen-herausforderungen>