Modellgestützte Analyse von Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem hin zur Treibhausgasneutralität

Thomas Schöb

Lehrstuhl für Brennstoffzellen

Fakultät für Maschinenwesen

RWTH Aachen University

und

Institut für Energie- und Klimaforschung

Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3)

Forschungszentrum Jülich GmbH

Wilhelm-Johnen-Straße

52428 Jülich

Mail: t.schoeb@fz-juelich.de

Tel: +49 171 4979702

Modellgestützte Analyse von Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem hin zur Treibhausgasneutralität

Einleitung

Mit dem Pariser Klimavertrag [1] bekennt sich die Bundesrepublik Deutschland zum Ziel die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Das Bundes-Klimaschutzgesetz [2] trägt dieser Verantwortung Rechnung und stellt verbindliche Ziele für die Reduktion der deutschen Treibhausgasemissionen auf. Es enthält folgende Emissionsziele: Bis zum Jahr 2030 sollen die Treibhausgasemissionen um mindestens 65% gegenüber 1990 reduziert werden. Für das Jahr 2045 ist das Erreichen von Netto-Treibhausgasneutralität in Deutschland gefordert. Darunter wird verstanden, dass ein bilanzielles „Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken“ [2] besteht.

Die Einhaltung der Emissionsreduktionsziele erfordert eine umfassende Transformation des deutschen Energiesystems, die umfangreiche Maßnahmen in allen Sektoren notwendig macht. Neben der Umstellung der Energieversorgung auf Erneuerbare Energien beinhaltet dies auch umfangreiche Reduktionsmaßnahmen in den Nachfragesektoren Industrie, Gebäude, Verkehr und in der Landwirtschaft. Aufgrund der hohen Komplexität und der vielfältigen Wechselwirkungen ist der Einsatz von Energiesystemmodellen, welche die gesamte Energieversorgung mit all ihren Verflechtungen abbilden, zur Analyse von geeigneten Transformationsstrategien unerlässlich. Dabei sind durch das Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität die Anforderungen an Energiesystemmodelle bezüglich des Umfangs der abgebildeten Sektoren und Treibhausgasemissionen angestiegen. In ihrer Analyse stellen Naegler et al. [3] jedoch fest, dass die Mehrheit der modellbasierten Langfristszenarien für die deutsche Energiewende mit Modellen erstellt wurden, die vor der Anpassung des Klimaschutzgesetzes im Jahr 2021 nicht alle Treibhausgasquellen berücksichtigten. Zudem enthielten die untersuchten Energiesystemmodelle nicht ausreichend Möglichkeiten zur Bereitstellung von negativen Emissionen, die zum Ausgleich der verbleibenden Restemissionen bei Treibhausgasneutralität benötigt werden. Für die Analyse konsistenter Transformationspfade hin zur Treibhausgasneutralität müssen bestehende Energiesystemmodelle daher angepasst werden, sodass alle Treibhausgasquellen und ausreichend Emissionssenken abgebildet sind. Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Weiterentwicklung eines bestehenden Energiesystemmodells, um damit konsistente, kostenoptimale Transformationspfade hin zur deutschen Treibhausgasneutralität analysieren zu können.

Methodische Vorgehensweise

Das verwendete integrierte Energiesystemmodell NESTOR, welches in dieser Arbeit weiterentwickelt wird, ist ein Optimierungsmodell, das die deutsche Energieversorgung sektorübergreifend von der Primär- bis zur Endenergie abbildet. In diesem Modell, welches durch Lopion [4] entwickelt wurde, ist das deutsche Energiesystem durch Energie- und Stoffquellen, Umwandlungstechnologien, Speichertechnologien und Energie- und Stoffsenken beschrieben. Die Zielfunktion des Optimierungsmodell ist die Minimierung der Gesamtsystemkosten, wobei eine Reihe von Nebenbedingungen (z.B.

Treibhausgasreduktionsziele, Deckung der Nachfragen nach Energieträgern) eingehalten werden müssen. Der kostenoptimale Transformationspfad für die stündlich aufgelösten Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude und Verkehr wird im Modell durch eine myopische Optimierung ermittelt. Dabei wird zunächst das Zieljahr 2045 optimiert und davon ausgehend obere und untere Grenzen für die Entwicklung des Energiesystems berechnet. Innerhalb dieser Grenzen muss sich der Transformationspfad bewegen, der in 5-Jahres-Schritten vom Ausgangsjahr 2020 bis zum Zieljahr optimiert wird.

Um die Transformation hin zur Treibhausgasneutralität vollständig abbilden zu können, wird das Optimierungsmodell in dieser Arbeit um die bilanzielle Abbildung von Nicht- CO_2 Emissionen (z.B. Methan oder Distickstoffmonoxid) erweitert, die im bestehenden Modell nicht ausreichend berücksichtigt waren. Dabei werden Treibhausgasemissionen der Sektoren Landwirtschaft und Abfall, die außerhalb der Bilanzgrenze des Energiesystemmodells liegen, durch exogen gesetzte Emissionspfade berücksichtigt. Zur Verringerung der verbleibenden Restemissionen bei Treibhausgasneutralität werden Möglichkeiten zur Abscheidung von CO_2 aus den Abgasen von Industrieprozessen im Modell implementiert und parametrisiert. Zudem wird der Transport und die permanente geologische Speicherung des abgeschiedenen CO_2 im Modell abgebildet. Dadurch können schwer oder nicht vermeidbare CO_2-Emissionen (z.B. in der Zementindustrie) abgeschieden und permanent gespeichert werden (CCS - Carbon Capture and Storage). Über diesen Pfad ist auch die Bereitstellung negativer Emissionen (vgl. Abbildung 1) möglich, falls Biomasse in Kraftwerken oder Industrieprozessen eingesetzt wird und die entstehenden CO_2-Emissionen abgeschieden und permanent gespeichert werden (BECCS- Biomasse mit Carbon Capture and Storage).

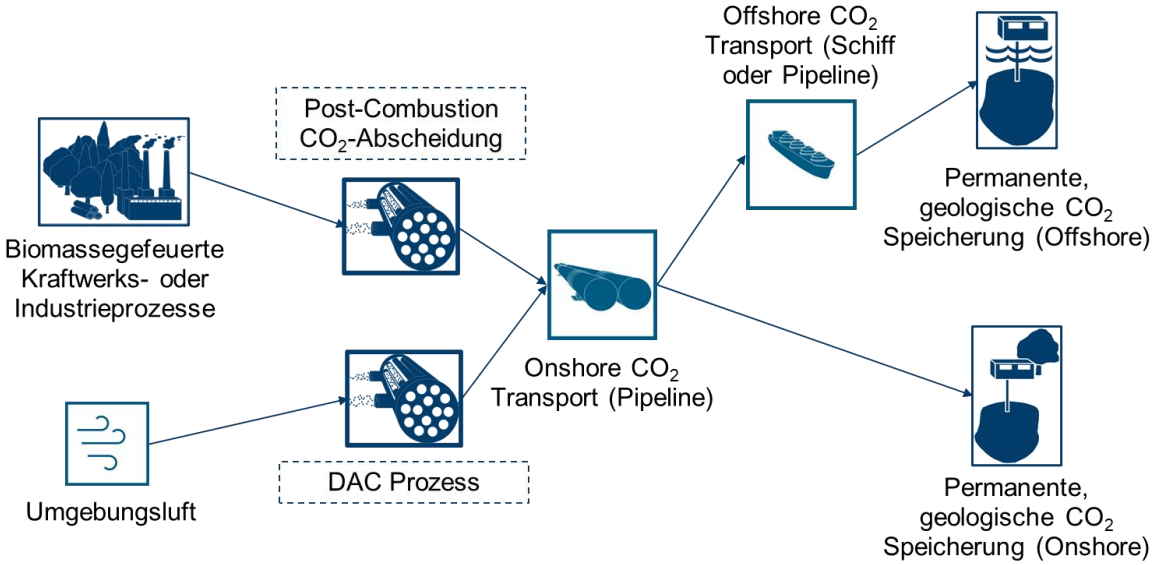


Abbildung 1: Modellierte Pfade zur Bereitstellung negativer Emissionen im Energiesystemmodell NESTOR

Eine weitere Option zur Bereitstellung negativer Emissionen stellt die direkte Abscheidung von CO_2 aus der Atmosphäre (Direct Air Capture of CO_2 – kurz DAC) dar, falls das CO_2 ebenfalls permanent geologisch gespeichert wird (vgl. Abbildung 1). Durch die detaillierte Abbildung von DAC-Prozessen im Energiesystemmodell NESTOR, können die energieverbrauchsrelevanten Nachfragen dieser Prozesse in den Transformationspfadanalysen berücksichtigt werden.

Ergebnisse

Die Optimierungsergebnisse zeigen, dass sich die Treibhausgasemissionen des deutschen Energiesystems bis zum Jahr 2030 auf 438 Mio. t $CO_{2äq}$ verringern (-65% gegenüber 1990), wobei der Energiesektor die schnellste Dekarbonisierung aufweist (vgl. Abbildung 2). Folglich werden die Treibhausgasreduktionsziele aus dem Klimaschutzgesetz vom Modell eingehalten. Dabei werden nur die Gesamtemissionen exogen vorgegeben, die sektorale Minderung der Emissionen ist Teil der kosteneffizienten Optimierung. Die schnelle Dekarbonisierung des Energiesektors ist wesentlich darauf zurückzuführen, dass aus kostenoptimalen Gründen der Kohleausstieg bereits bis zum Jahr 2030 erfolgt. Dies ermöglicht eine Kopplung des überwiegend auf Erneuerbaren Energien basierenden Energiesektors mit den anderen Sektoren des Energiesystems.

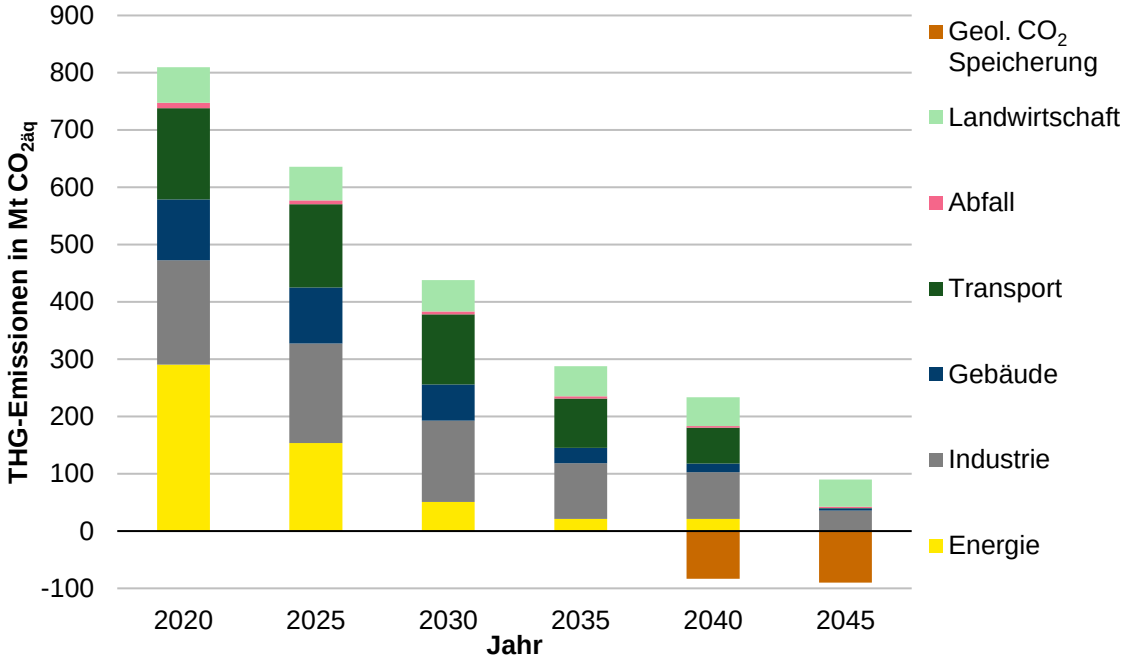


Abbildung 2: Treibhausgasemissionen im zeitlichen Verlauf nach Sektoren aufgeteilt

Im Jahr 2045 wird die Netto-Treibhausgasneutralität erreicht, es verbleiben jedoch Treibhausgasemissionen in Höhe von 90 Mio. t $CO_{2äq}$, die durch negative Emissionen ausgeglichen bzw. durch den Einsatz von CCS verringert werden müssen. Dabei verbleiben ca. 35 Mio. t $CO_{2äq}$ schwer vermeidbare Prozessemissionen im Industriesektor, wovon etwa 13 Mio. t CO_2, die bei der Zementherstellung entstehen, abgeschieden und permanent geologisch gespeichert werden. Zusammen mit den verbleibenden 48 Mio. t $CO_{2äq}$ aus der Landwirtschaft müssen die verbleibenden Emissionen in der Industrie und den anderen Sektoren des Energiesystems (z.B. Abfallsektor) durch negative Emissionen in Höhe von 77 Mio. t $CO_{2äq}$ ausgeglichen werden. Der Großteil der negativen Emissionen wird mit etwa 57 Mio. t CO_2 durch DAC-Anlagen und anschließende permanente Speicherung bereitgestellt, wobei für den Betrieb der DAC-Anlagen im Jahr 2045 etwa 72 TWh Elektrizität benötigt werden. BECCS stellt etwa 20 Mio. t CO_2 negative Emissionen bereit. Die Speicherpotenziale für die permanente geologische Speicherung von CO_2 in Höhe von jährlich 90 Mio. t $CO_{2äq}$ im Jahr 2045 sind in Deutschland vorhanden [5], jedoch fehlt hierfür derzeit noch die Rechtsgrundlage zur Nutzung.

Im Zuge der Transformation hin zur Treibhausgasneutralität steigt der Stromverbrauch auf etwa 1216 TWh im Jahr 2045 an, wobei etwa 665 TWh auf Maßnahmen der Sektorenkopplung entfallen (davon etwa 311 TWh für Elektrolyse, ca. 208 TWh für Wärmepumpen und Power-to-Heat (PtH) Anwendungen). Zur Deckung des Strombedarfs ist ein Ausbau der installierten Leistung von Photovoltaik auf etwa 450 GW erforderlich. Zudem müssen im Jahr 2045 etwa 213 GW an Onshore Windenergieanlagen und etwa 72 GW Offshore Windenergieanlagen installiert sein. Zur Überbrückung von Dunkelflauten müssen darüber hinaus etwa 86 GW an regelbarer Kraftwerksleistung installiert werden, die mit Wasserstoff oder Biomasse betrieben werden. Außerdem ist eine flexible Betriebsweise von Elektrolyseuren und Wärmepumpen zentral, um die Stromnachfrage an die volatile Stromerzeugung durch Erneuerbare Energien anzupassen. Dies wird anhand des Verlaufes der Stromerzeugung und -nachfrage im März 2045 aufgezeigt (vgl. Abbildung 3).

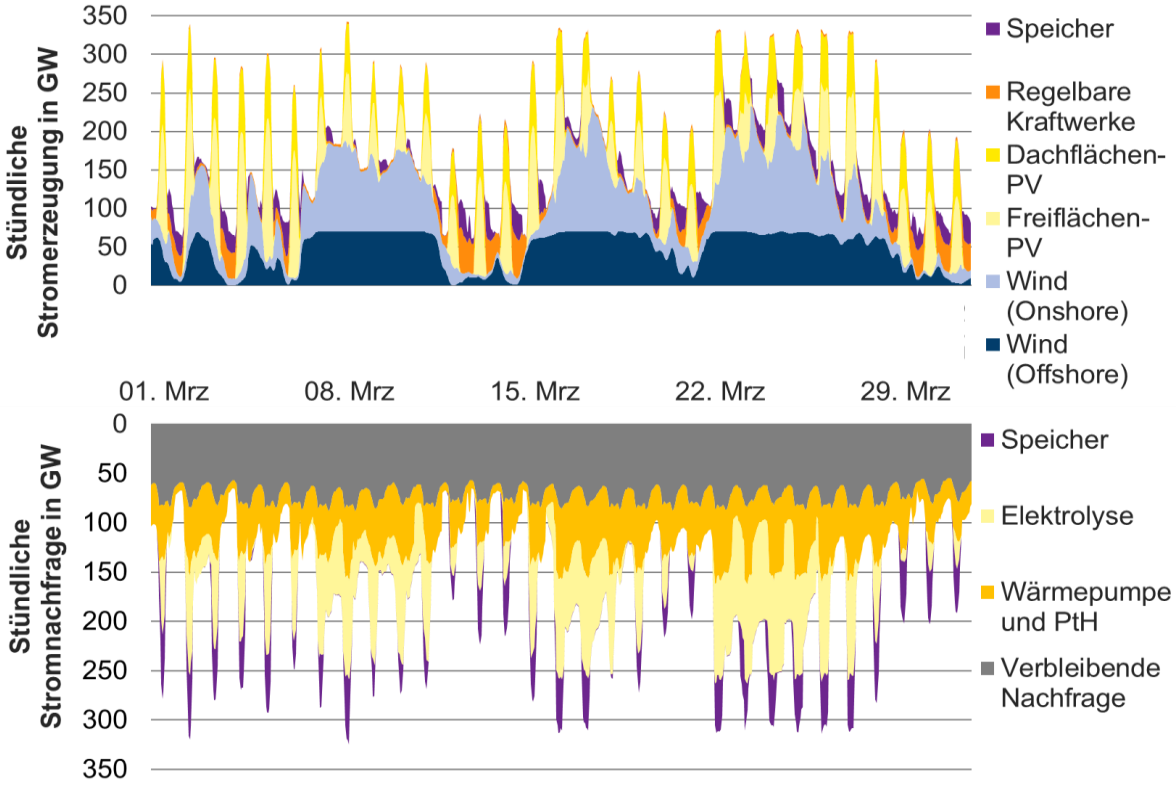


Abbildung 3: Stündliche Stromerzeugung und Stromnachfrage im März 2045

Der März des Jahres 2045 ist durch Zeiträume mit hoher Stromerzeugung durch Windenergieanlagen von bis zu ca. 233 GWh/h gekennzeichnet, weist jedoch auch Zeiträume mit sehr geringer Onshore und Offshore Windenergieeinspeisung auf (z.B. nur etwa 10 GW am 6. März zwischen 7-8 Uhr). Die Stromerzeugung durch Photovoltaikanlagen zeigt durch deren überwiegende Ausrichtung nach Süden ein Maximum zur Mittagszeit von bis zu ca. 267 GW am 5. März. Die installierten Stromspeicher werden überwiegend zu Zeiten mit hoher Photovoltaikeinspeisung geladen und geben die gespeicherte Energie dann in den Abend- und Nachtstunden ab. Fällt eine geringe Stromerzeugung durch Windenergie in diese Stunden, werden regelbare Kraftwerke zur Stromerzeugung eingesetzt. Gleichzeitig verringern Elektrolyseure sowie Wärmepumpen und PtH-Anwendungen ihre Stromnachfrage und tragen somit zum Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung durch Erneuerbare Energien bei. Diese flexiblen Stromnachfrager werden vor allem in den Zeiträumen mit hoher

Stromerzeugung betrieben, wobei bis zu 101 GW durch Elektrolyseure nachgefragt werden und bis zu 75 GW auf Wärmepumpen und PtH-Anwendungen entfallen. Aus Gesamtsystemsicht ist diese flexible Betriebsweise optimal, jedoch ist diese nur in Verbindung mit ausreichend Wärme- und Wasserstoffspeicherkapazitäten möglich, um Wasserstoff- und Wärmenachfrage zeitlich von der Erzeugung zu entkoppeln.

Wasserstoff stellt mit einem Bedarf von etwa 412 TWh im Jahr 2045 einen wichtigen Energieträger in einem treibhausgasneutralen Energiesystem dar. Dabei entfällt etwa 65% der Wasserstoffnachfrage auf den Industriesektor, wo der Wasserstoff überwiegend bei der Stahlherstellung und in der chemischen Industrie eingesetzt wird. Zudem werden etwa 117 TWh Wasserstoff im Verkehrssektor verbraucht, wobei hier die Wasserstoffnachfrage durch den Lkw-Transport dominiert wird. Der benötigte Wasserstoff wird insgesamt zu 53% inländisch durch Elektrolyse hergestellt, der verbleibende Anteil wird durch Importe via Pipelines aus Nordafrika und Südeuropa (ca. 150 TWh) und den Schiffsimport aus Nordeuropa (ca. 46 TWh) gedeckt.

Im Gebäudesektor ist zu Beginn des Transformationszeitraums eine Steigerung der energetischen Sanierungsrate auf etwa 2% und die konsequente Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen notwendig. Hierbei kommen zur Wärmebereitstellung im treibhausgasneutralen Energiesystem vor allem Luft- und Erdwärmepumpen zum Einsatz, die durch den Einsatz von Biomasseheizkraftwerken in Nahwärmenetzen ergänzt werden.

Schlussfolgerungen

Die Einhaltung der deutschen Emissionsreduktionsziele aus dem Klimaschutzgesetz erfordert einen schnellen und signifikanten Ausbau von Erneuerbaren Energien, Investitionen in Energieeffizienz und energetische Sanierungen sowie eine Umstellung der Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr weg von der Nutzung fossiler Energieträger auf die Nutzung von Wasserstoff, Biomasse und die direkte Nutzung von Elektrizität. Hierfür ist ein schneller Ausbau von Elektrolyseuren und Wärmepumpen notwendig, die mit ihrer flexiblen Betriebsweise zudem entscheidend zur Anpassung der Stromnachfrage an die volatile erneuerbare Stromerzeugung beitragen. Jedoch verbleiben bei der Netto-Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 Restemissionen in der Industrie und der Landwirtschaft, die durch den Einsatz von CO_2-Abscheidung und Speicherung vermindert oder durch negative Emissionen ausgeglichen werden müssen. Hierfür ist sicherzustellen, dass rechtzeitig ein Markthochlauf von Direct Air Capture Technologien stattfindet und die Voraussetzungen für eine permanente geologische CO_2-Speicherung in Deutschland geschaffen werden, da ohne diese Technologien die Treibhausgasneutralität nicht erreicht werden kann.

Referenzen

[1] United Nations / Framework Convention on Climate Change: *The Paris Agreement*, Paris, Dez. 2015. Verfügbar unter: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf

[2] *Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S.2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist.* Verfügbar unter: http://www.gesetze-im-internet.de/ksg/index.html

[3] T. Naegler et al.: *Exploring long-term strategies for the german energy transition - A review of multi-Sector energy scenarios, Renewable and Sustainable Energy Transition*, Bd. 1, S. 100010, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.rset.2021.100010.

[4] P. M. Lopion: *Modellgestützte Analyse kosteneffizienter CO2-Reduktionsstrategien*, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, RWTH Aachen, Jülich, 2020.

[5] acatech: *CCU und CCS - Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie*, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München, 2018.

Modellgestützte Analyse treibhausgasneutraler Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem

Thomas Schöb

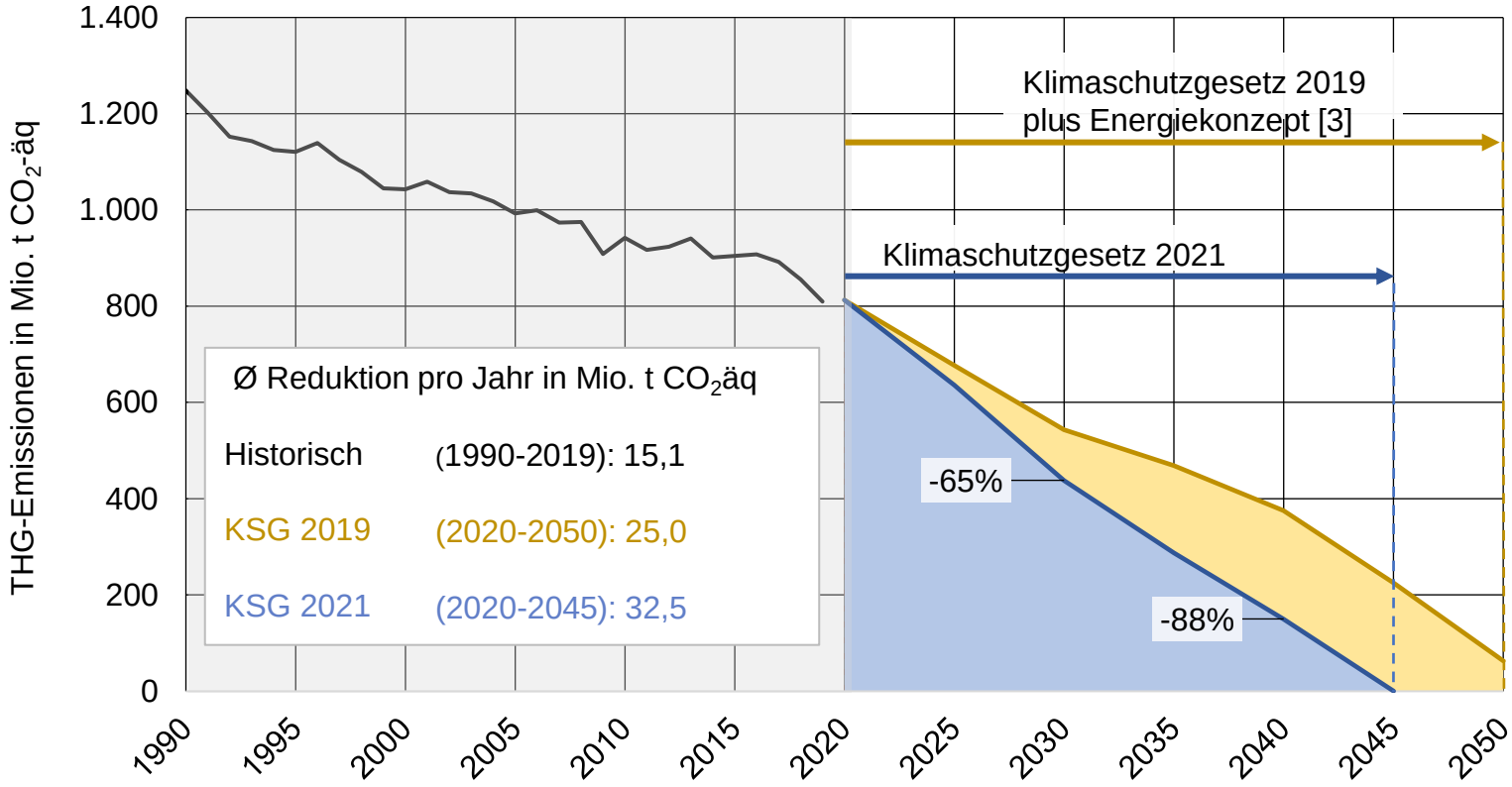
t.schoeb@fz-juelich.de

25.11.2022

RWTH Aachen &
Forschungszentrum Jülich
IEK-3: Institute of Techno-economic Systems Analysis

Motivation: Deutsche (Netto-)Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045

Historische Entwicklung der Treibhausgasemissionen [1] und Reduktionsziele nach dem Klimaschutzgesetz [2]



- Wie können die deutschen Klimaschutzziele und die Transformation des Energiesystems kostenoptimal erreicht werden?
- Wie werden die verbleibenden Restemissionen bei Treibhausgasneutralität ausgeglichen?

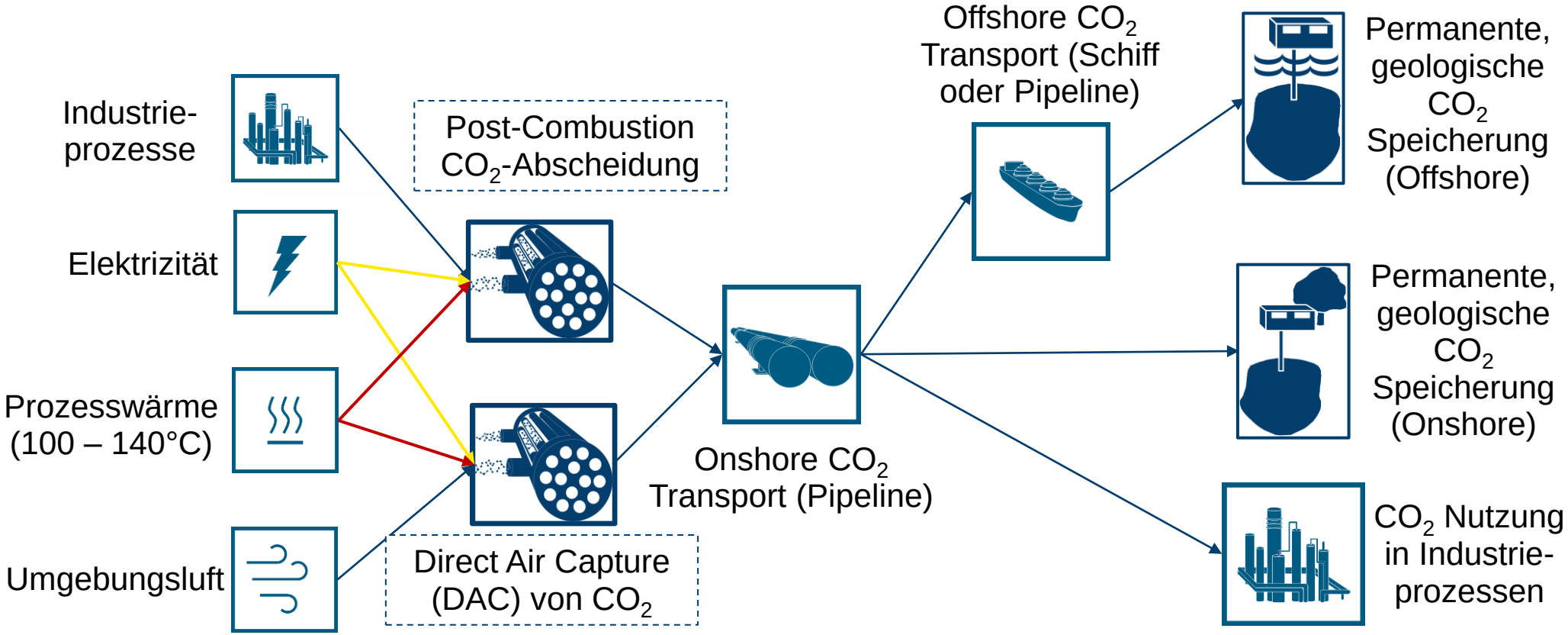
[1] P. Gniffke: Vorjahreschätzung der deutschen Treibhausgas-Emissionen für das Jahr 2020, Umweltbundesamt, März 2021

[2] Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S.2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist.

[3] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, 2010

Methodik: Energiesystemmodell zur Analyse treibhausgasneutraler Transformationspfade

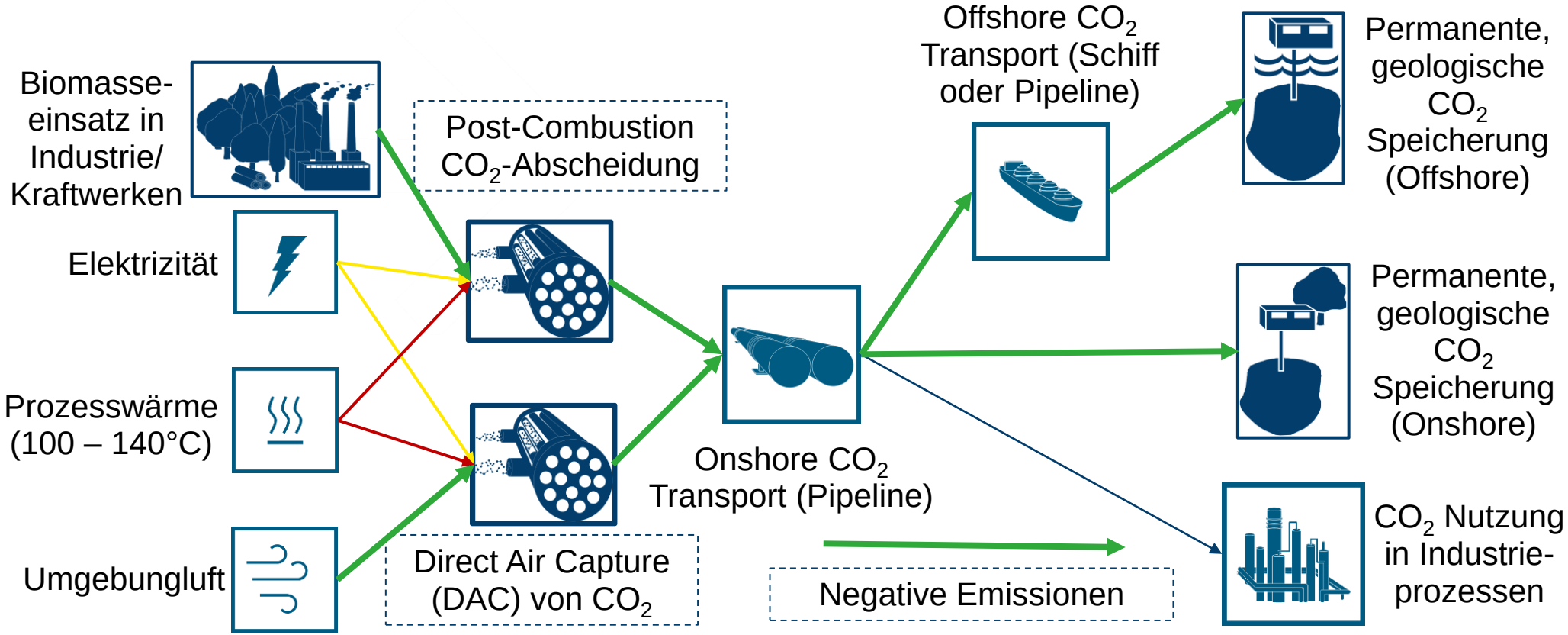
- Integriertes Energiesystemmodell NESTOR [1] mit myopischer Optimierung
- Erweiterung: Bilanzierung aller deutschen Treibhausgasemissionen (inkl. CH_4, N_2O, F-Gase)
- Erweiterung: Prozesse zur CO_2-Abscheidung und zur Bereitstellung negativer Emissionen



[1] P. M. Lopion: Modellgestützte Analyse kosteneffizienter CO2-Reduktionsstrategien, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, RWTH Aachen, Jülich, 2020.

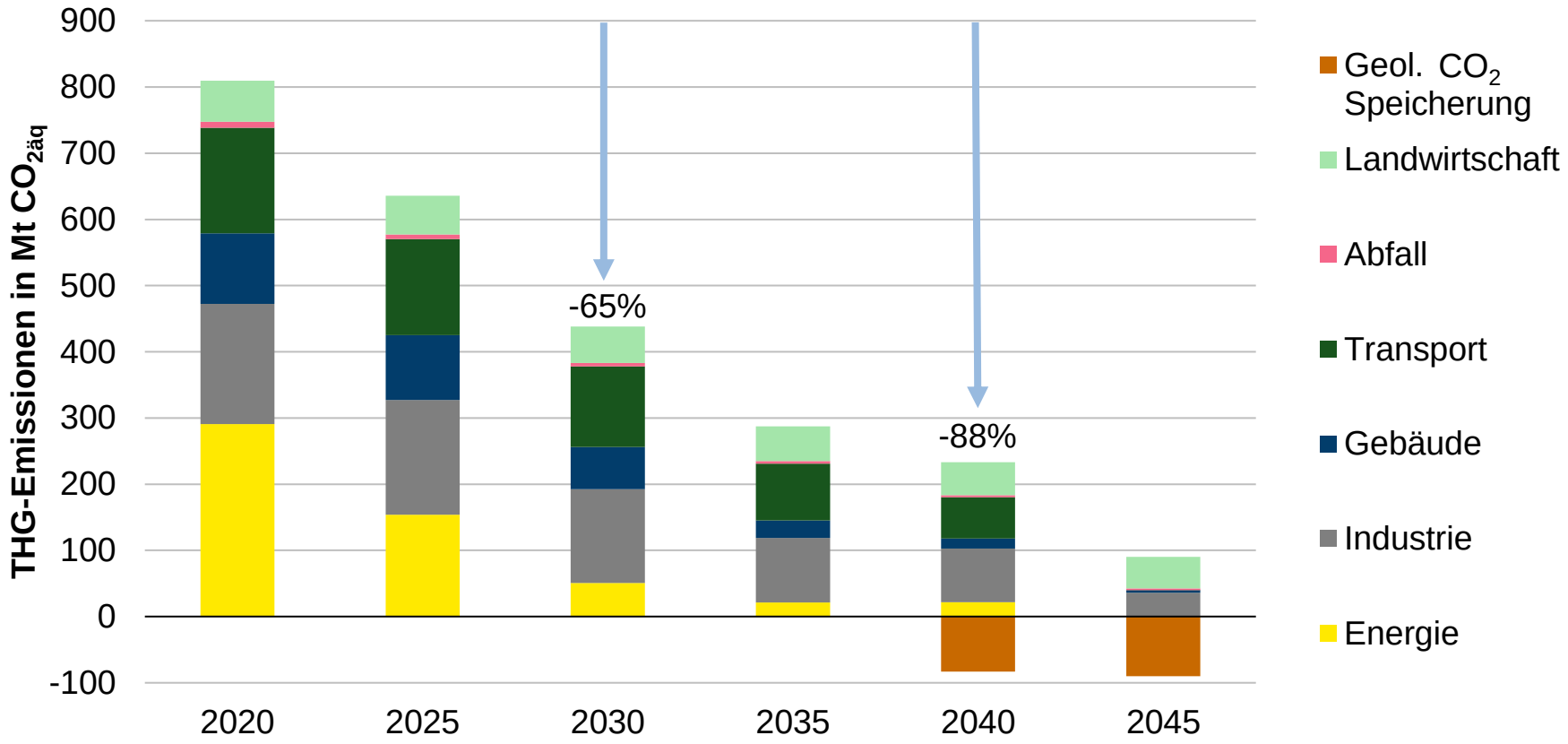
Methodik: Energiesystemmodell zur Analyse treibhausgasneutraler Transformationspfade

- Integriertes Energiesystemmodell NESTOR [1] mit myopischer Optimierung
- Erweiterung: Bilanzierung aller deutschen Treibhausgasemissionen (inkl. CH_4, N_2O, F-Gase)
- Erweiterung: Prozesse zur CO_2-Abscheidung und zur Bereitstellung negativer Emissionen



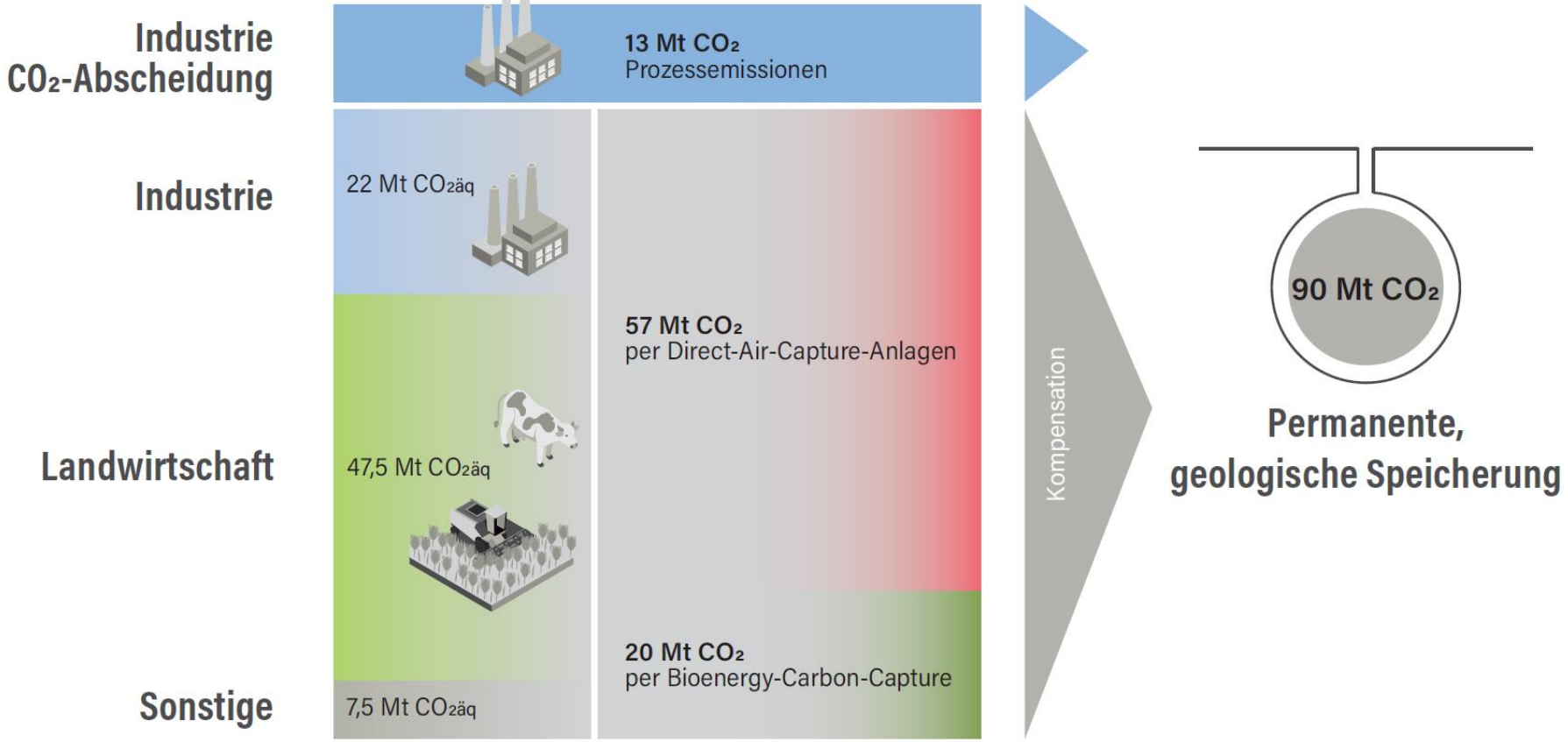
[1] P. M. Lopion: Modellgestützte Analyse kosteneffizienter CO2-Reduktionsstrategien, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, RWTH Aachen, Jülich, 2020.

Ergebnisse: Entwicklung der deutschen Treibhausgasemissionen



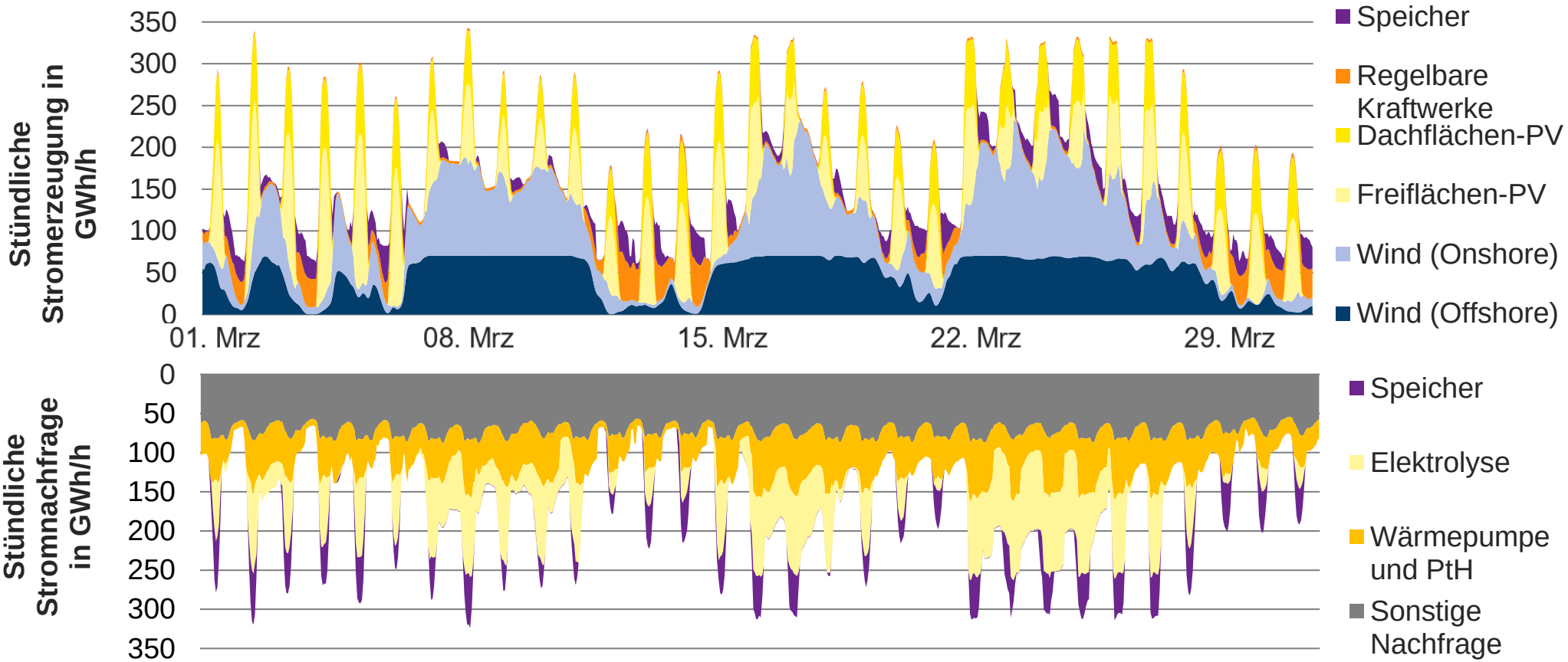
- Schnelle Dekarbonisierung des Energiesektors (-80% in 2030 gegenüber 2020)
- Treibhausgasneutralität ist nur mit permanenter geologischer CO_2 Speicherung zu erreichen

Ergebnisse: Restemissionen im Jahr 2045 und deren Ausgleich durch negative Emissionen



- Jährliche geologische CO_2 Speicherung von ca. 90 Mio.t im Jahr 2045 notwendig
- 77 Mio. t negative Emissionen durch DAC und Biomasse-CCS bereitgestellt

Ergebnisse: Stündliche Stromerzeugung und –nachfrage im März 2045



- Regelbare Kraftwerke und Speicher zur Überbrückung von Dunkelflauten benötigt
- Flexible Betriebsweise von Elektrolyseuren und Wärmepumpen zentral, um Angebot und Nachfrage in einem erneuerbaren Stromversorgungssystem aneinander anzupassen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Institut für Energie- und Klimaforschung
Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3)
Forschungszentrum Jülich
www.fz-juelich.de

Bei weiteren Fragen wenden Sie sich bitte an:

Thomas Schöb
+49 171 4979702
t.schoeb@fz-juelich.de.