

# Der Wert von Recycling für das Gelingen der deutschen Energiewende

## Themenbereich 9

Felix Kullmann<sup>1(1)</sup>, Peter Markewitz<sup>(1)</sup>, Leander Kotzur<sup>(1)</sup>, Detlef Stolten<sup>(1, 2)</sup>

<sup>(1)</sup> Institut für Energie- und Klimaforschung: Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3), Forschungszentrum Jülich GmbH

<sup>(2)</sup> Lehrstuhl für Brennstoffzellen, RWTH Aachen University

### **Kurzfassung:**

Im „European Green Deal“ fordert die Europäische Kommission eine Mobilisierung der Industrie für eine saubere und kreislauforientierte Wirtschaft. Mithilfe der Kreislaufwirtschaft sollen sowohl bisher nicht ausgeschöpfte Emissionsminderungspotenziale der Ressourceneffizienz erschlossen werden als auch die stoffliche Nachfrage der chemischen Industrie vollständig auf erneuerbare Rohstoffe umgestellt werden (Defossilisierung). Gleichzeitig sind die Treibhausgasminderungsziele bis zum Jahr 2050 einzuhalten. Da alle potenziell möglichen Maßnahmen zur Emissionsminderung durch Wechselwirkungen miteinander verknüpft sind, ist die Bewertung im Hinblick auf Kosteneffizienz, Effektivität und Einhaltung von Klimaschutzz Zielen einer einzelnen Maßnahme nicht möglich. Die Effekte dieser Maßnahmen auf das Gesamtenergiesystem, sowie die Transformationskosten sollen mit einem Energiesystemmodell quantifiziert und bewertet werden. Auf diese Weise werden kohärente Szenarien erstellt, mit denen Langfriststrategien im Industriebereich aber auch deren Wechselwirkungen auf andere Sektoren untersucht werden können.

Die Auswertung der Szenarien zeigt, dass sowohl unterschiedliche Recyclingmaßnahmen als auch Strategien zur Defossilisierung große Effekte auf das Gesamtenergiesystem haben. Eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2050 ohne Recyclingmaßnahmen ist nur durch einen erheblichen finanziellen Mehraufwand zu erreichen. Im Gegensatz zum Referenzfall steigen die kumulierten Kosten der Transformation um 84%, bzw. 557 Mrd. €, zusätzlich an. Weiterhin lässt sich feststellen, dass für das heutige Energiesystem Mehrkosten in Höhe von 13 Mrd. €/a zu verzeichnen sind, wenn nicht recycelt würde.

Durch eine Defossilisierung der chemischen Industrie steigt der Wasserstoffbedarf des Gesamtenergiesystems auf 562 TWh an. Im Gegensatz zum Referenzfall erhöhen sich die kumulierten Kosten der Transformation um 32%, bzw. 212 Mrd. €. Die Klimaziele zu erreichen und die chemische Industrie zu defossilisieren, ohne den Import von wasserstoff-basierten Energieträgern, stellt eine enorme Herausforderung an ein autarkes Energiesystem.

**Keywords:** Energiesystem, Recycling, Defossilisierung, Klimaziele, Optimierung

## 1 Motivation und zentrale Fragestellung

Im „European Green Deal“ fordert die Europäische Kommission eine Mobilisierung der Industrie für eine saubere und kreislauforientierte Wirtschaft [1]. Um Klimaneutralität zu erreichen, müssen deswegen die Synergien zwischen der Kreislaufwirtschaft und der Verringerung von Treibhausgasemissionen so gut wie möglich ausgenutzt werden [2]. Mithilfe der Kreislaufwirtschaft sollen sowohl bisher nicht ausgeschöpfte

---

<sup>1</sup> „Jungautor“ Forschungszentrum Jülich GmbH, Tel. +49 2461-85446, f.kullmann@fz-juelich.de

Emissionsminderungspotenziale der Ressourceneffizienz erschlossen werden als auch die stoffliche Nachfrage der chemischen Industrie vollständig auf erneuerbare Rohstoffe umgestellt werden (Defossilisierung). Gleichzeitig sind die Treibhausgasminderungsziele bis zum Jahr 2050 einzuhalten. Offen ist, welche Auswirkungen bestimmte Recyclingmaßnahmen und Defossilisierungsstrategien auf die Transformation des deutschen Energiesystems haben, insbesondere im Hinblick auf Kosteneffizienz und Treibhausgasminderungspotenzial. Damit die Gesellschaft die mit dem Energiewandel verbundenen Herausforderungen akzeptieren und sich ihnen stellen kann, müssen Energiesystemanalysen aus vielen verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden. Diese Arbeit zielt deswegen darauf ab, ein Energiesystemmodell so weiterzuentwickeln, dass durch eine umfassende Modellierung industrieller Prozesse und der Implementierung von Recyclingoptionen sowie der stofflichen Kreislaufführung von CO<sub>2</sub>, konsistente nationale Treibhausgasminderungsstrategien für Deutschland untersucht werden können und zusätzlich die Effekte dieser Maßnahmen auf das Gesamtenergiesystem quantifiziert und bewertet werden können.

## 2 Methodische Vorgangsweise

Um die Effekte von Recyclingmaßnahmen systemisch und quantitativ bewerten zu können, ist eine Verknüpfung von Energiesystem- und Stoffstrommodellierung erforderlich [3]. Als Grundlage für die Analysen wird das integrierte nationale Energiesystemmodell FINE-NESTOR für Deutschland eingesetzt [4]. Dieses sektoral und zeitlich hoch aufgelöste Modell berechnet für das Jahr 2050, sowie den Transformationspfad dorthin, das kostenoptimale Energiesystemdesign für Deutschland unter Berücksichtigung von Klimagasreduktionszielen. Um Aussagen über die Transformation der deutschen Industrie treffen zu können, wurde das Energiesystemmodell um grundlegende Erweiterungen der Modellierung des Industriesektors weiterentwickelt. Industrieprozesse werden so detailliert abgebildet, dass mehr als 66% des heutigen industriellen Endenergieverbrauchs prozessscharf optimiert werden. Dadurch lassen sich Recyclingverfahren bewerten und Strategien zur Defossilisierung des nicht-energetischen Bedarfs untersuchen. Recyclingoptionen werden als zusätzliche Alternative zu den konventionellen Prozessen, die auf Primärrohstoffe angewiesen sind, implementiert. Dadurch stehen sie in Konkurrenz, um die jeweilige Güternachfrage kostenoptimal, bei gleichzeitiger Einhaltung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Gesamtsystems, decken zu können. Dementsprechend werden keine Recyclingquoten exogen vorgegeben, sondern modellendogen als Teil der Optimierung berechnet. Die zukünftig verfügbare Menge an Sekundärrohstoffen wird durch einen Ansatz aus der Materialflussmodellierung abgeschätzt. Dabei wird über eine Häufigkeitsverteilung berechnet, in welchem Jahr eine bestimmte Menge eines Materials aus dem vorhandenen anthropogenen Bestand anfällt und dem Energiesystem wieder als Sekundärrohstoff zu Verfügung steht.

Für die nachfolgenden Analysen wurden insgesamt drei Szenarien gerechnet. Ein Szenario stellt den Referenzfall (REF95) dar, bei dem weder besondere Bemühungen im Bereich des Recyclings getroffen werden noch eine Defossilisierung der chemischen Industrie angestrebt wird. Als einziger Treiber für die Transformation des deutschen Energiesystems sind die exogen gesetzten Treibhausgasemissionen zu sehen, die im Jahr 2050 für eine annähernde Treibhausgasneutralität sorgen. Im Recycling-Szenario (woRec) dürfen keine Recyclingmaßnahmen vom Modell genutzt werden. Alle Industriegüter müssen dementsprechend über die jeweiligen Primärrouten produziert werden. Dieses Szenario stellt somit eine „Value-Off“ – Analyse dar. Ein weiteres Szenario untersucht die Effekte der

Defossilisierung der chemischen Industrie (GreenChem). Dabei ist neben der Treibhausgasminderung die Umstellung zu erneuerbaren Rohstoffen in der chemischen Industrie eine weitere Randbedingung, die erfüllt werden muss.

### 3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Recycling- und Defossilisierungs-Szenarien dem Referenzszenario REF95 gegenübergestellt. Dabei liegt der Fokus auf den Effekten, die sich im Gesamtsystem und insbesondere im Industriesektor zeigen. Von großer Bedeutung sind die Veränderungen des Primärenergieverbrauchs, der Stromerzeugung und des industriellen Endenergiebedarfs. Anschließend werden die Systemkosten der Szenarien am Referenzszenario REF95 gespiegelt, um Aussagen über die Kosteneffizienz von bestimmten Maßnahmen treffen zu können. Im Anschluss wird ein Ausblick auf die Auswirkungen eines Extremeszenarios auf die Spitzenlast im Energiesystem anhand eines Exkurses gegeben.

#### 3.1 Szenarienvergleich

Die Änderung des Primärenergieverbrauchs des Recycling- und Defossilisierungs-Szenarios im Vergleich zum Referenzszenario sind in Abbildung 1 dargestellt. Während im Recycling-Szenario ein deutlicher Unterschied im Hinblick auf den absoluten Verbrauch im Jahr 2050 zu erkennen ist, ändert sich im Defossilisierungs-Szenario lediglich die Zusammensetzung des Primärenergieverbrauchs. Ohne Recycling steigt der Primärenergiebedarf im Jahr 2050 um ca. 300 TWh zusätzlich an. Vor allem die Nachfrage nach Wasserstoff steigt signifikant. Im Szenario GreenChem ist zu erkennen, dass der gesamte fossile nicht-energetische Bedarf (Erdgas und Rohöl) substituiert wird. Auch hierbei spielt Wasserstoff mit ca. 160 TWh eine entscheidende Rolle. Insgesamt ändert sich der absolute Primärenergiebedarf allerdings kaum.

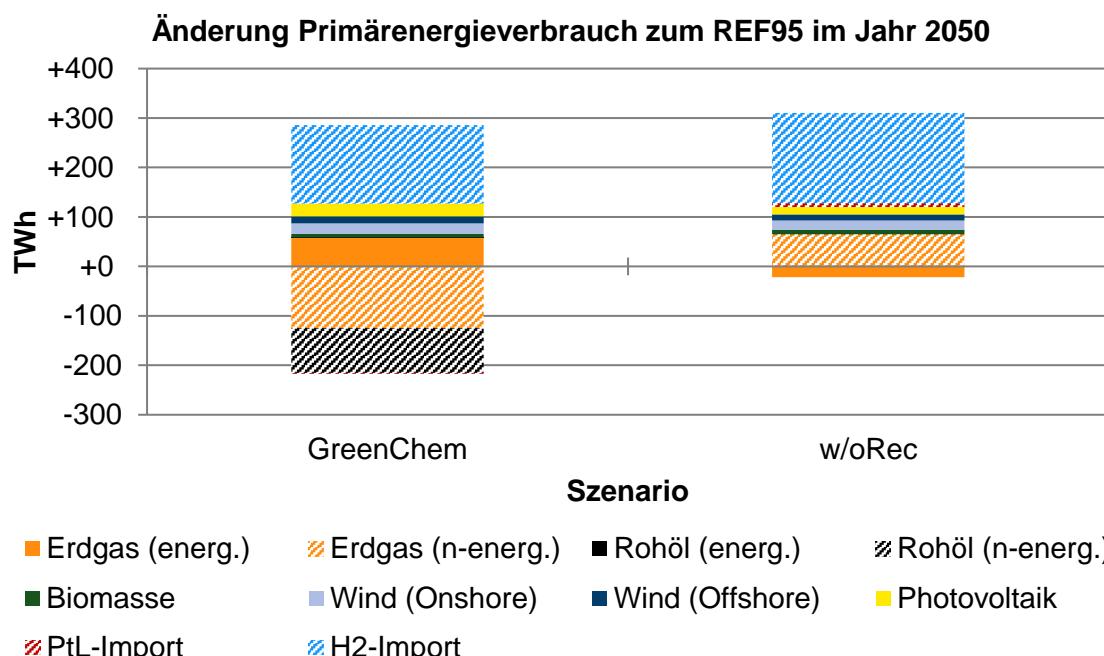


Abbildung 1 Änderung des Primärenergieverbrauchs über alle Szenarien im Vergleich zum REF95 im Jahr 2050

Auffällig ist zudem, dass durch die forcierte Defossilisierung in der chemischen Industrie ein CO<sub>2</sub>-Budget frei wird, das in anderen Bereichen eine Nutzung von kostengünstigem Erdgas erlaubt (ca. 60 TWh).

Die Änderung des Wasserstoffbedarfs im Jahr 2050 ist Abbildung 2 zu entnehmen. In beiden Szenarien zeigt sich jeweils ein Wasserstoffmehrbedarf im Industriesektor. Im Szenario *GreenChem* ist vor allem die Umstellung auf innovative Industrieprozesse, wie bspw. die Erzeugung von hoch-veredelten Chemikalien über die Methanol-to-Olefins Route oder die Fischer-Tropsch-Synthese für den höheren Wasserstoffbedarf verantwortlich. Dadurch benötigt der Industriesektor etwa 185 TWh Wasserstoff zusätzlich. Insgesamt werden für eine Defossilisierung ca. 160 TWh Wasserstoff im gesamten Energiesystem mehr benötigt. Ohne die Möglichkeit zu Recyclen, werden sogar 170 TWh Wasserstoff zusätzlich verbraucht.

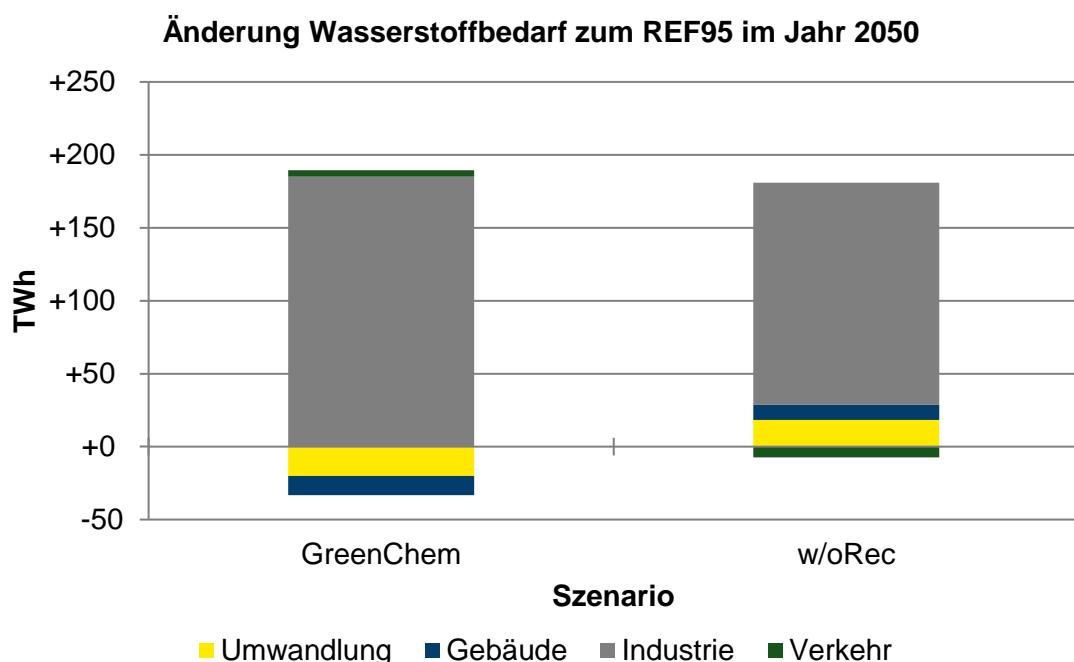


Abbildung 2 Änderung des Wasserstoffbedarfs über alle Szenarien im Vergleich zum REF95 im Jahr 2050

Der detaillierte Wasserstoffbedarf des Industriesektors ist in Abbildung 3 dargestellt. Daraus lässt sich erkennen, dass eine Defossilisierung vor allem für die Herstellung von Naphtha (+94 TWh) und Methanol (+89 TWh) zusätzlich grünen Wasserstoff benötigt. Außerdem lässt sich festhalten, dass es im Jahr 2050 kostengünstiger ist Wasserstoff aus der Stahl- und Zementindustrie in die chemische Industrie zu verschieben, anstatt mehr Wasserstoff inländisch zu erzeugen oder aus dem Ausland zu importieren. Ohne Recycling wird sowohl für die Stahlherstellung (+36 TWh) als auch für die Methanolherstellung (+41 TWh) mehr Wasserstoff benötigt. Dies liegt zum einen daran, dass kein Stahlrecycling über den Elektrolichtbogenofen erlaubt ist und dadurch mehr Wasserstoff-Direktreduktion betrieben werden muss. Zum anderen liegt es daran, dass auch kein Altkunststoff recycelt werden kann, wodurch die Nachfrage nach primären hochveredelten Chemikalien steigt, die über die Methanol-to-Olefins Route gedeckt wird.

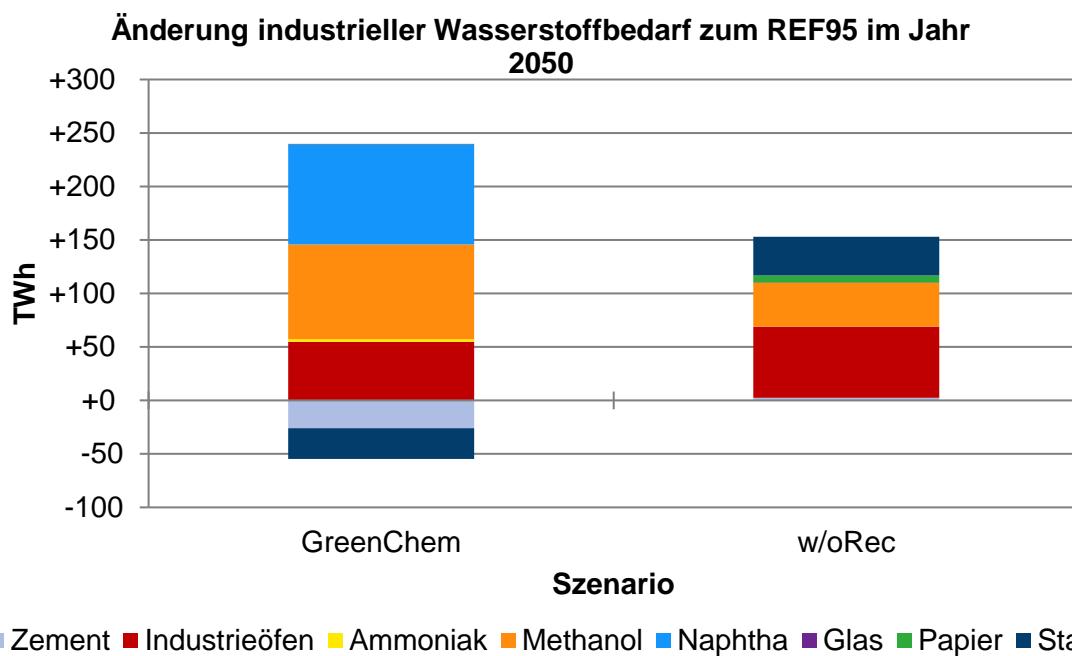


Abbildung 3 Änderung des industriellen Wasserstoffbedarfs über alle Szenarien im Vergleich zum REF95 im Jahr 2050

Wie sich der industrielle Endenergiebedarf im Jahr 2050 im Vergleich zum Referenzszenario verhält, ist in Abbildung 4 zu sehen. Für eine Defossilisierung ist hauptsächlich eine Veränderung des Energieträgermixes zu erkennen, der absolute Endenergiebedarf bleibt annähernd gleich. Im Szenario w/oRec zeigt sich der Effizienz-Charakter von Recyclingmaßnahmen. Ohne Recycling steigt der Endenergiebedarf in der Industrie um ca. 300 TWh im Vergleich zum Referenzfall.

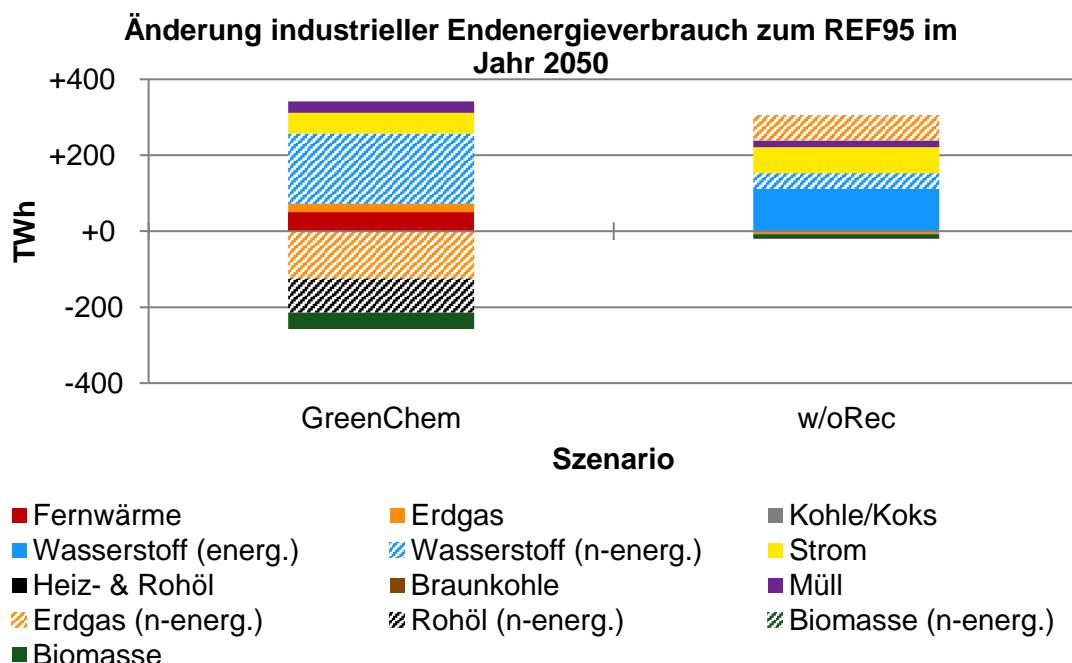


Abbildung 4 Änderung des industriellen Endenergiebedarfs über alle Szenarien im Vergleich zum REF95 im Jahr 2050

Eine Defossilisierung der chemischen Industrie erfordert im Jahr 2050 eine Substitution von fossilem Erdgas und Rohöl in Höhe von mehr als 200 TWh. Dabei spielt der Einsatz von Wasserstoff eine entscheidende Rolle.

Die kumulierten Mehrkosten über die gesamte Transformation der Szenarien sind in Abbildung 5 aufgetragen. Dabei lässt sich feststellen, dass eine Umstellung auf erneuerbare Rohstoffe in der chemischen Industrie zusätzlich zur Treibhausgasreduktion, den finanziellen Mehraufwand um ca. ein Drittel erhöht.

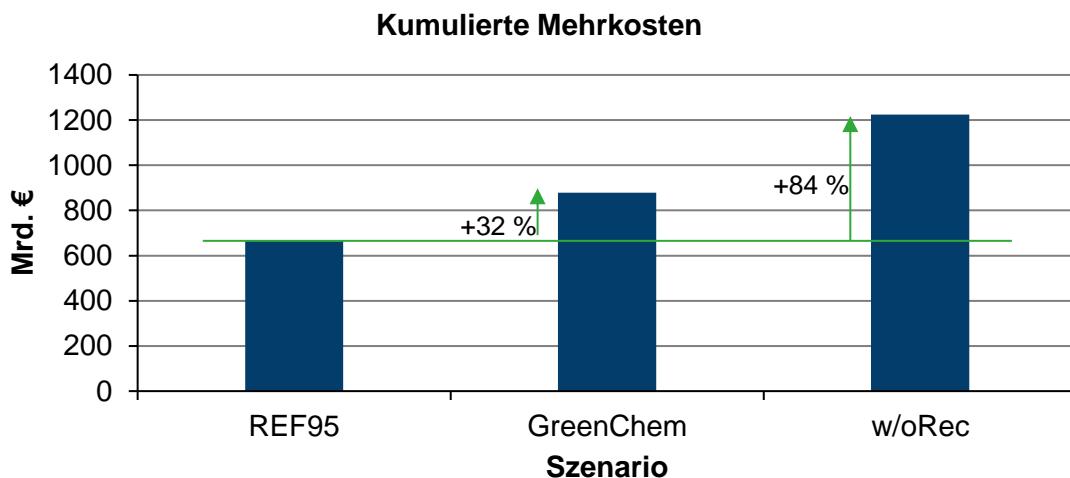


Abbildung 5 Kumulierte Mehrkosten über die gesamte Transformation der jeweiligen Szenarien.

Eine noch signifikantere Steigerung der Mehrkosten ist zu beobachten, wenn dem Energiesystem keine Recyclingmaßnahmen zu Verfügung stehen. Auf diese Weise steigt der monetäre Mehraufwand um 84% an. Weiterhin ergibt sich für das Energiesystem, dass bereits heute Mehrkosten in Höhe von 13 Mrd. €/a zu verzeichnen wären, wenn nicht recycelt würde. Im Vergleich der Szenarien ist allerdings zu beachten, dass im Szenario GreenChem mit der Defossilisierung ein zusätzliches Ziel erreicht wird. Im Szenario w/oRec werden lediglich die Treibhausgasemissionen reduziert.

### 3.2 Exkurs: Auswirkungen eines Extremeszenarios auf die Spitzenlast im Energiesystem

In diesem Unterabschnitt wird untersucht, wie sich die Spitzenlast des Energiesystems im Jahr 2050 verhält und welche Auswirkungen ein Extremeszenario auf die Spitzenlast hat. Dazu wird die Spitzenlast des Szenarios GreenChem ausgewertet und mit der Spitzenlast des Szenarios GreenChemX verglichen. Beim Szenario GreenChemX handelt es sich um eine Extremvariante des Szenarios GreenChem, bei dem kein Wasserstoff aus dem Ausland importiert werden darf. Die Erreichung der Klimaziele sowie die zusätzliche Randbedingung der Defossilisierung muss dementsprechend mit einem autarken<sup>2</sup> Energiesystem erreicht werden.

Für die Defossilisierung der chemischen Industrie werden im Jahr 2050 mehr als 660 GW Stromerzeugungskapazitäten benötigt. Im Vergleich zu heute (ca. 229 GW in 2021 [5]) entspricht das in etwa einer Verdreifachung der benötigten Kapazität. Die Jahresdauerlinie für

<sup>2</sup> Der Import von wasserstoffbasierten Energieträgern ist verboten, nicht allerdings der Import von Strom. Das Szenario soll damit einen Fall darstellen, bei dem die erforderlichen Wasserstoffimportmengen nicht zur Verfügung stehen oder die notwendige Infrastruktur nicht vorhanden ist.

die Stromerzeugung im Jahr 2050 für die Szenarien GreenChem und GreenChemX ist in Abbildung 6 dargestellt.

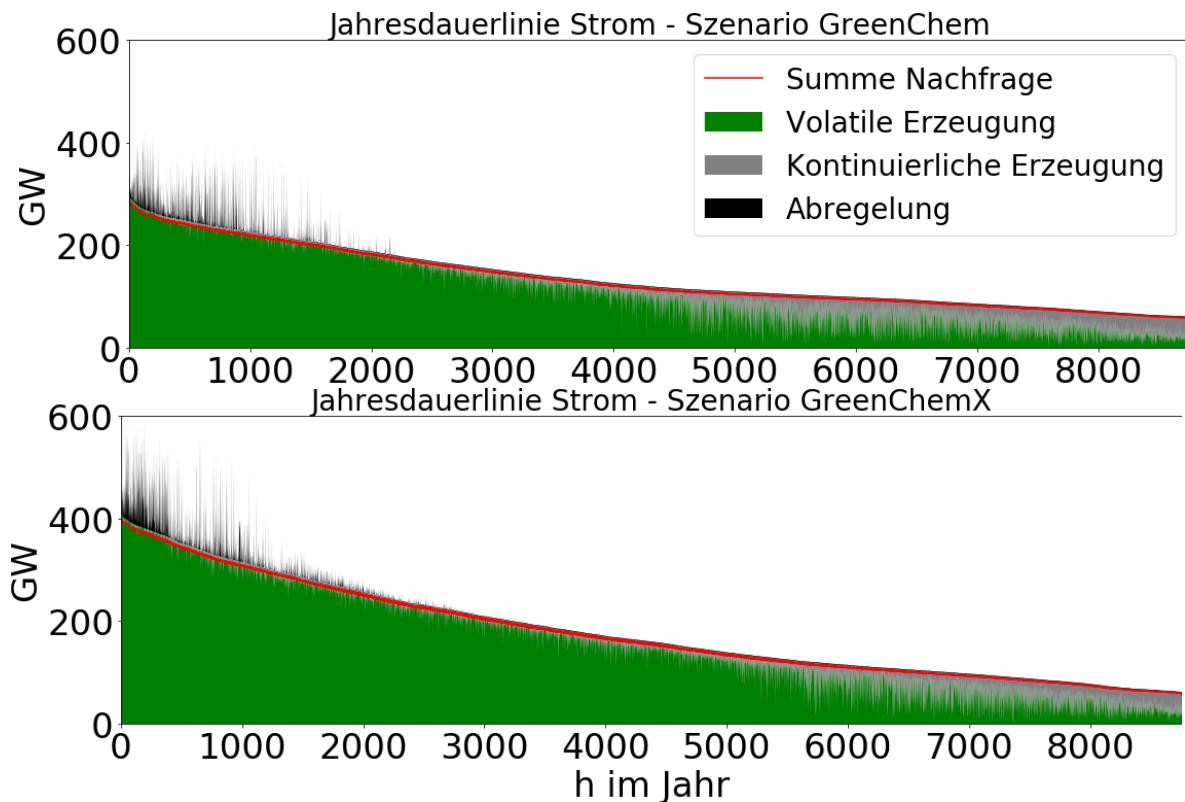


Abbildung 6 Jahresdauerlinie der Stromerzeugung und -nachfrage der Szenarien GreenChem (oben) und GreenChemX (unten) im Jahr 2050.

Insgesamt ergibt sich für die maximale Stromnachfrage des Szenarios GreenChem im Jahr 2050 ein Wert von 290 GW, der am 02. November benötigt wird. Zur gleichen Zeit findet auch die maximale Erzeugung mit 298 GW statt. Im Extremeszenario ohne Wasserstoffimporte, bei der ein zusätzlicher Ausbau der Stromerzeugungskapazitäten auf über 900 GW erfolgt, steigt die Jahreshöchstlast auf 403 GW an. Dies entspricht einer Vervielfachung im Vergleich zum heutigen Wert (ca. 80 GW [6]) um den Faktor 3,5 (GreenChem), bzw. 5 (GreenChemX). Im Szenariorahmen für den Netzentwicklungsplan 2021-2035 wird von einer Jahreshöchstlast im Jahr 2030 von über 100 GW ausgegangen [7]. Um die Klimaziele im Jahr 2050 kostenoptimal zu erreichen ist aufgrund des massiven Ausbaus erneuerbarer Stromerzeugungsanlagen auch mit einer signifikanten Steigerung der Jahreshöchstlast zu rechnen. Ein autarkes Energiesystem würde enorme Anstrengungen an den Stromnetzausbau stellen, die im Kontext dieser Arbeit allerdings nicht weiter untersucht werden.

In Abbildung 7 ist der Anteil der volatilen Stromerzeugung an der gesamten Erzeugung in Relation zur Jahresdauerlinie aufgetragen. Über das gesamte Jahr 2050 beträgt der Anteil der volatilen Stromerzeugung (bspw. Wind- und PV-Anlagen) 83% von der gesamten Stromerzeugung im Szenario GreenChem.

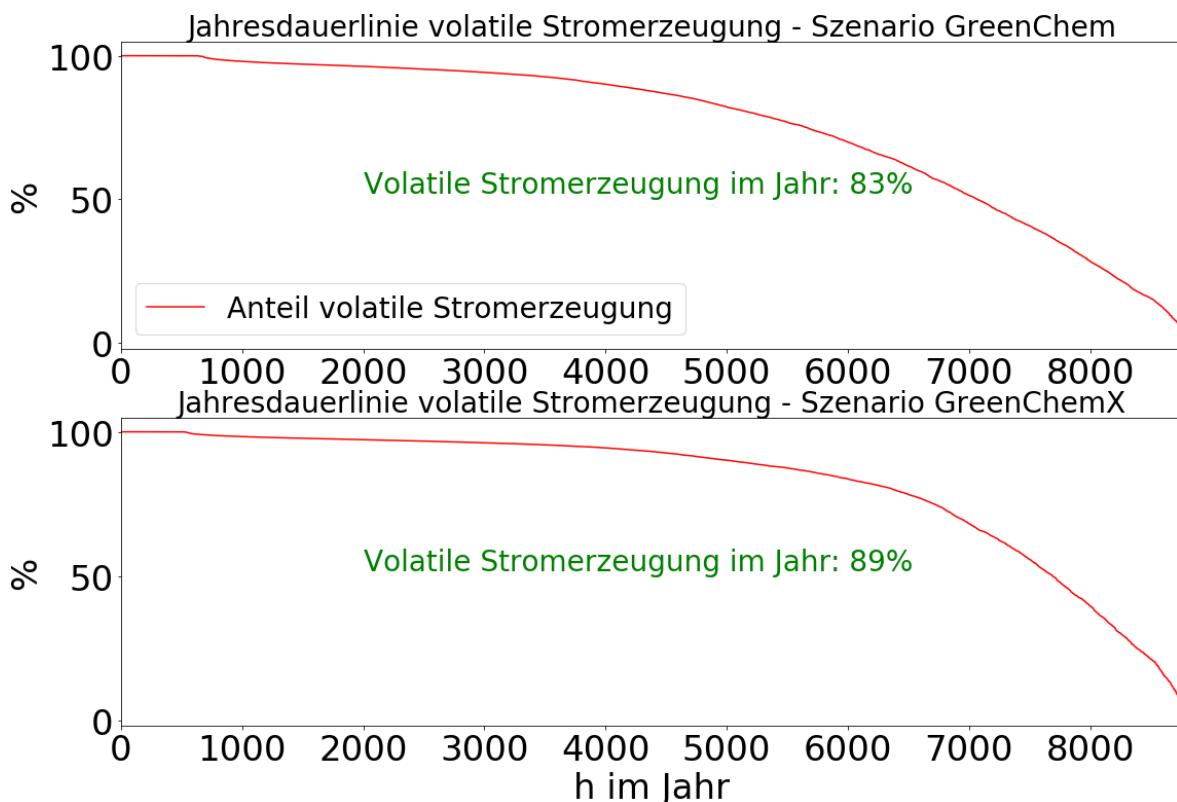


Abbildung 7 Jahresdauerlinie des Anteils volatiler Stromerzeugung (inkl. Speicher) im Jahr 2050 des Szenarios GreenChem (oben) und des Szenarios GreenChemX (unten).

Ohne Wasserstoffimporte steigt dieser Anteil im Szenario GreenChemX auf 89%. Durch den erhöhten Ausbau der Wind- und PV-Anlagen erhöht sich die volatile Stromerzeugung über das Jahr gesehen. Ein Vergleich mit heutigen Werten (ca. 35% [6]) zeigt den großen Wandel der bis zum Jahr 2050 zu vollziehen ist, um das gezeigte Energiesystem zu verwirklichen und die Klimaziele auf diese Weise zu erreichen. Bei der Betrachtung der Jahreshöchstlast wird die strenge modellbedingte Optimierung des Energiesystemdesigns wie auch seines Betriebs deutlich. Bei einer tatsächlichen volatilen Stromerzeugung im Jahr 2050 von ca. 1000 TWh im Szenario GreenChem werden lediglich 20 TWh abgeregelt. Dies entspricht einem Anteil von lediglich 2% und spricht für einen optimalen Einsatz der volatilen Stromerzeugung im Energiesystem. Ebenso verhält es sich im Szenario GreenChem. Im Jahr 2050 werden über volatile Stromerzeuger ca. 1450 TWh Strom erzeugt. Abgeregelt wurden 30 TWh (ca. 2%).

## 4 Schlussfolgerungen

### Recycling

Ohne die Möglichkeit zu recyceln, ergibt sich ein Mehrbedarf von 300 TWh im Jahr 2050 für den Primärenergiebedarf, der fast ausschließlich durch einen höheren Energiebedarf im Industriesektor in Höhe von 285 TWh bedingt ist. Für die Stahlproduktion werden 36 TWh mehr Wasserstoff benötigt im Vergleich zum Referenzszenario REF95, sodass 98 TWh Wasserstoff im Jahr 2050 in Direktreduktionsanlagen eingesetzt werden. Außerdem werden im Vergleich zum REF95 zusätzlich 41 TWh Wasserstoff für die Methanloherstellung benötigt. Insgesamt liegt der industrielle Wasserstoffbedarf damit mehr als 150 TWh über dem des REF95 bei ca. 350 TWh. Eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 95% im Jahr 2050 ohne Recyclingmaßnahmen ist nur durch einen erheblichen finanziellen Mehraufwand zu erreichen. Im Gegensatz zum Referenzfall steigen die kumulierten Kosten der Transformation um 84%,

bzw. 557 Mrd. €, zusätzlich an. Weiterhin lässt sich feststellen, dass ohne Recycling bereits heute Mehrkosten in Höhe von 13 Mrd. €/a zu verzeichnen sind.

### Defossilisierung

Für den Primärenergieverbrauch ergibt sich durch eine Defossilisierung der chemischen Industrie ein Mehrbedarf von 80 TWh im Jahr 2050. Der gesamte nicht-energetische Bedarf an Erdgas und Rohöl wird durch Wasserstoff ersetzt. Es werden lediglich 7 Mt Stahl über Direktreduktionsanlagen mit grünem Wasserstoff im Jahr 2050 erzeugt. Damit sinkt der Wasserstoffbedarf im Vergleich zum REF95 um 29 TWh zugunsten des höheren Wasserstoffbedarfs in der chemischen Industrie. Für die Methanolherstellung im Jahr 2050 werden 89 TWh mehr Wasserstoff benötigt. Hauptsächlich ist dieser Anstieg durch einen grünen Methanolbedarf von mehr als 19 Mt für die Erzeugung von hoch-veredelten Chemikalien zu begründen. Der industrielle Wasserstoffbedarf liegt damit mehr als 185 TWh über dem des Referenzszenarios. Insgesamt steigt der Wasserstoffbedarf des Gesamtenergiesystems um 160 TWh, die ausschließlich über Import bereitgestellt werden. Eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 95% im Jahr 2050 bei zusätzlicher Defossilisierung der chemischen Industrie führt zu erhöhten Mehrkosten. Im Gegensatz zum Referenzfall steigen die kumulierten Kosten der Transformation um 32%, bzw. 212 Mrd. €, zusätzlich an. Dieser Mehraufwand ist vor allem durch den erhöhten Wasserstoffimport bedingt.

### Exkurs

Es lässt sich festhalten, dass die zu erreichenden Klimaziele, bzw. die Defossilisierung der chemischen Industrie, große Auswirkungen auf den Ausbau und den Einsatz erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten haben. Abschließend kann gezeigt werden, dass der Versuch die Energiewende autark zu leisten, d.h. ohne wasserstoffbasierte Energieträgerimporte, die Jahreshöchstlast um weitere 100 GW erhöhen wird. Das Erreichen der Klimaziele und der Defossilisierung der chemischen Industrie haben einen enormen Effekt auf die Jahreshöchstlast. Zur genaueren Untersuchung der Jahreshöchstlast ist es allerdings notwendig räumlich und zeitlich höher aufgelöste Modelle heranzuziehen.

### **Literatur**

- [1] European Commission. The European Green Deal; 2019.
- [2] European Commission. A new Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe; 2020.
- [3] Kullmann F, Markewitz P, Stolten D, Robinius M. Combining the worlds of energy systems and material flow analysis: a review. Energ Sustain Soc 2021;11(1).
- [4] Lopion, Markewitz, Stolten, Robinius. Cost Uncertainties in Energy System Optimization Models: A Quadratic Programming Approach for Avoiding Penny Switching Effects. Energies 2019;12(20):4006.
- [5] Bundesnetzagentur. Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur: Stand: 19.01.2021; 2021.
- [6] Bundesnetzagentur. Strommarktdaten. [May 21, 2021]; Available from: <https://www.smard.de/home>.
- [7] Bundesnetzagentur. Genehmigung des Szenariorahmens für den Netzentwicklungsplan 2021-2035; 2020.