

# MODELLGESTÜTZTE ANALYSE VON MAßNAHMEN DER KREISLAUFWIRTSCHAFT IM DEUTSCHEN ENERGIESYSTEM

Felix KULLMANN<sup>1</sup>, Peter MARKEWITZ<sup>1</sup>, Martin ROBINIUS<sup>1</sup>, Detlef STOLTEN<sup>1,2</sup>

## Inhalt

Die Bundesregierung Deutschland beabsichtigt, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 1990 um 80 bis 95% zu reduzieren. Der Industriesektor in Deutschland zählt zu den energie- sowie emissionsintensivsten Sektoren. Im Jahr 2018 lag der Endenergieverbrauch der Industrie bei 736 TWh [1]. Um die CO<sub>2</sub> Emissionen zu verringern und somit die Treibhausgasreduktionsziele der Bundesregierung zu erreichen, ist es notwendig, auch in diesem Sektor mögliche Einsparmaßnahmen sowie Reduktionspotenziale zu erschließen. Großen Einfluss auf Energieverbrauch und somit CO<sub>2</sub>-Emissionen haben Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft. Nach Berechnungen der Europäischen Kommission können unter anderem mit Recyclingstrategien, CO<sub>2</sub>-Emissionen in Europa bei der Produktion von Zement, Aluminium, Kunststoff und Stahl in Höhe des jährlichen kombinierten Gesamtausstoßes (in 2017) von Irland, Portugal und Dänemark eingespart werden [2]. Der Einfluss solcher Maßnahmen auf das deutsche Gesamtenergiesystem ist aber zurzeit noch nicht identifiziert und quantifiziert.

Das CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial, die Energieeinsparungen sowie die Kosten für Recyclingstrategien, wurden berechnet, indem zunächst die Prozesse für die Stahl- und Aluminiumherstellung in einem linearen Optimierungsmodell abgebildet wurden. Neben den konventionellen Prozessrouten für die Herstellung von Primärstahl und -aluminium, werden auch alternative und zukünftig verfügbare Verfahren der Primärherstellung, sowie Verfahren der Sekundärproduktion modelliert. Die Energiebereitstellung erfolgt aus dem Gesamtenergiesystem für Deutschland heraus. So können Rückschlüsse möglicher Prozessroutenwechsel auf die Energiebereitstellung und die Gesamtsystemkosten gezogen werden.

## Methodik

Für die Analyse geeigneter Klimagaseminderungsstrategien werden am IEK-3 des Forschungszentrums Jülich Modelle entwickelt, mit denen ein nachhaltiges Energiesystem beschrieben werden kann. Das hier entwickelte Ein-Knoten-Modell berechnet einen Transformationspfad zum kostenoptimalen Energiesystem in 2050, unter der Berücksichtigung, dass die von der Bundesregierung gesetzten Treibhausgasemissionsreduktionen von 80%, bzw. 95%, im Jahr 2050 eingehalten werden [3]. Dieses Modell besteht aus einem Netzwerk aus Energiequellen, Transformationstechnologien, Energienachfragen und Speichern. Aufbauend auf wirtschaftlichen Faktoren, wie z.B. Betriebs- und Investitionskosten, und technischen Parametern, wie z.B. Wirkungsgraden, Volllaststunden und Lebensdauern, wird die kostenminimale Optimierung des Energiesystems nur durch Limits der erlaubten CO<sub>2</sub>-Emissionen und maximaler Potentiale einzelner Technologien beschränkt. Die verschiedenen Technologien zur Stahl- und Aluminiumherstellung werden dementsprechend mit wirtschaftlichen und technischen Parametern versehen, und die zukünftigen Verfahren sowie die Recyclingrouten als alternative Systemoption modelliert.

## Ergebnisse

Ziel der Untersuchung ist es Obergrenzen des Recyclingpotentials in Deutschland abzuschätzen und die Entwicklung der deutschen Industrie sowie der deutschen Abfallwirtschaft zu analysieren. Der kostenoptimale Vergleich der unterschiedlichen Herstellungsverfahren in der Stahl- und Aluminiumindustrie mit den Verfahrensrouten des Stahl- und Aluminiumrecyclings zeigt die Anteile der

---

<sup>1</sup> Institut für Energie- und Klimaforschung: Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3),  
Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich, Tel. +49 2461-85446, f.kullmann@fz-juelich.de

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Brennstoffzellen, RWTH Aachen University c/o Institut für Energie- und  
Klimaforschung (IEK-3), Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich, Tel. +49 2461 62-3076,  
d.stolten@fz-juelich.de

jeweiligen Prozesse an der Gesamtproduktion und deren Wirtschaftlichkeit bis zum Jahr 2050 auf. Die auf Basis der Modellergebnisse errechneten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten sind Grundlage für die Bewertung ob Strategien der Kreislaufwirtschaft, im Sinne der CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion, kosteneffiziente Maßnahmen für das deutsche Gesamtenergiesystem sind. Es zeigt sich, dass die möglichen Recyclingoptionen in der Stahlindustrie, zusammen mit dem Wasserstoff-Direktreduktionsprozess, kostenoptimale Alternativen in der Stahlherstellung darstellen. Die deutsche Stahlindustrie deckt im Jahr 2050 ca. 70% der Stahlnachfrage über die Sekundärroute. Außerdem leistet eine 50% höhere Recyclingquote des Post-Consumer-Stahls, im Bezug zu Heute, einen kostenoptimalen Beitrag zur energieeffizienten und CO<sub>2</sub>-armen Industrie. In der Aluminiumindustrie sind ähnliche Entwicklungen bis 2050 zu erwarten. Während in anderen Industriezweigen, z.B. der Chemieindustrie, häufig die Elektrifizierung das Mittel der Wahl zur CO<sub>2</sub>-Reduktion darstellt, ist Aluminiumrecycling eine kostenoptimale CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategie in der Aluminiumindustrie, die bereits heute fast vollständig elektrifiziert ist.

## Referenzen

- [1] AGEB: Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. Daten für die Jahre von 1990 bis 2018. AG Energiebilanzen e.V. 2019
- [2] European Commission: In-depth analysis in support of the commission communication com(2018) 773 - A clean planet for all. 2018
- [3] P. Lopion et al.: Cost Uncertainties in Energy System Optimization Models: A Quadratic Programming Approach for Avoiding Penny Switching Effects. *Energies* 2019, 12(20), 4006