

## INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort.....	2
Grußwort Minister Prof. Dr. Andreas Pinkwart .....	3
Die Doctoral School Closed Carbon Cycle Economy – Ein interdisziplinäres Konzept zur Förderung des notwendigen Verständnisses für einen nachhaltigen Energie- und Strukturwandel.....	4
Das Wicked Problem des Strukturwandels im Rheinischen Revier – eine partizipatorische Systemanalyse.....	7
Der Einsatz Rheinischer Braunkohle zur Bodenverbesserung .....	11
Konflikte im und um das Rheinische Braunkohlerevier – Vernetzung vs. Partikularisierung durch soziale Medien .....	15
Resilienz durch dezentrale, cross-sektorale Energiesysteme auf Quartiersebene .....	18
Grundlagen für die Entwicklung neuer Online-Messtechnik für H <sub>2</sub> -reiche Gasströme.....	21
Steuerung von Folgenutzungen in ehemaligen Braunkohlerevieren mittels Raumordnung und Bauleitplanung: Rechtliche Möglichkeiten und Grenzen .....	24
Flexibilisierung der Stromproduktion durch variable Biogasproduktion .....	28
Steuerung von Folgenutzungen in ehemaligen Braunkohlerevieren mittels Fachplanung und -Genehmigung .....	30
Herstellung kurzketziger Olefine aus Synthesegasen.....	33
Synergetische Nutzung von Gülle und Kohle zur Erzeugung von Biogas und Düngemitteln...36	
Die Wahrnehmung und Bewertung von Transformationsprozessen durch Bürger:innen – Eine empirische Untersuchung am Beispiel des Braunkohleausstiegs im Rheinischen Revier .....	38
Transformation der Energieversorgung im Kontext der Beendigung der Kohleverstromung .42	
Ökobilanzielle Bewertung netzgekoppelter Energiespeicher .....	45
Elektrokatalytische Herstellung von Synthesegas .....	49
Innovationsnetzwerke und Wissensdiffusion im Rheinischen Revier - Ein Ansatz agentenbasierter Modellierung .....	52
Die Rolle Deutschlands im Kontext der Energiewende. Eine ethische Untersuchung normativer Zielkonflikte unter besonderer Berücksichtigung des Braunkohleausstiegs.....	56
Impressum.....	59

## VORWORT

Als Teil des virtuellen Innovations- und Technologiezentrums Carbon Conversion (ITZ CC, s. auch <https://itzcc.de>) beschäftigt sich die interdisziplinäre *Doctoral School Closed Carbon Cycle Economy* (DS CCCE) an der Ruhr-Universität Bochum seit Mai 2019 mit Fragen des für die Energie- und Rohstoffwende notwendigen Strukturwandels, insbesondere unter den Randbedingungen des Rheinischen Reviers.

Im ITZ CC werden Know-how, Anlagen und Komponenten sowie Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur zentralen und dezentralen Kohlenstoffkonversion und -nutzung zusammengeführt und für die Industrie und die Regionen nutzbar gemacht. Mit dieser Maßnahme werden neue Strukturen und Kapazitäten geschaffen, um einen techno-ökonomischen, wissensbasierten Strukturwandel in den Braunkohleregionen zu gestalten. Dazu wurden die bereits gut ausgeprägten Strukturen und Kapazitäten der Verbundpartner Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Fraunhofer UMSICHT), der Ruhr-Universität Bochum (RUB) und der RWE Power AG virtuell zu einer neuen Plattform gebündelt.

Ziel der *Doctoral School Closed Carbon Cycle Economy* ist die Etablierung eines strukturierten Promotionsprogramms, das vor dem Hintergrund des im Rheinischen Braunkohlereviers absehbar bevorstehenden Wandels, die wissenschaftliche Basis für einen nachhaltigen, ökonomisch tragfähigen Strukturwandel entwickelt. Aufgegriffen werden dabei u.a. technische, naturwissenschaftliche, juristische, ökonomische, sozialwissenschaftliche und ethische Aspekte. Die DS CCCE bildet auf diese Weise fachlich hochqualifizierte Expertinnen und Experten mit interdisziplinärem Problemverständnis aus, die zu Treibern des Strukturwandels im Rheinischen Braunkohlerevier werden können.

In der DS CCCE arbeiten und forschen zurzeit 26 Doktorandinnen und Doktoranden aus acht Fakultäten, von denen 17 im Rahmen des ITZ CC aus Mitteln des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen finanziert werden. Notwendiger Weise sind die Promotionsthemen in den meisten Fällen fachspezifisch. Aber durch die in verschiedenen Formaten eingeübte Zusammenarbeit in der DS CCCE haben die Doktorandinnen und Doktoranden ein ausgeprägt interdisziplinäres Verständnis für Probleme des Strukturwandels entwickelt – die praktischen Probleme, mit denen sich das Rheinische Revier konfrontiert sieht, sind interdisziplinär und müssen ebenso gelöst werden.

Auf den nachfolgenden Seiten werden die DS CCCE sowie die darin untersuchten Forschungsfragen und erste Ergebnisse der Promotionsarbeiten der aus Mitteln der DS CCCE finanzierten Promovierenden vorgestellt.

Viel Spaß beim Lesen



Prof. Dr.-Ing. Roland Span



Dr.-Ing. Nico Schneider





## GRÜßWORT MINISTER PROF. DR. ANDREAS PINKWART

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

die große Aufgabe unserer Zeit – die Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft hin zur Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 – verlangt enorme Anstrengungen, die wegen der tiefgreifenden Veränderungen aller Lebensbereiche zwingend auf eine ganzheitliche Perspektive angewiesen sind. Das große D der Transformation – Defossilisierung – muss von drei I flankiert werden: Innovation, Interdisziplinarität und Integration. Letzteres zielt auf den gesellschaftlichen Zusammenhalt, den es beim Umbau von Wirtschaft und Gesellschaft zu bewahren gilt.

Ziel des virtuellen Innovations- und Technologiezentrums Carbon Conversion ist es, die wissenschaftliche Kompetenz in der deutschen Forschungslandschaft zu erhalten, weiter auszubauen und Konversionstechnologien für heimische und nachhaltige Kohlenstoffquellen für die Industrie verfügbar zu machen. Die Doctoral School Closed Carbon Cycle Economy (DS CCCE) ist ein herausragendes Beispiel dafür, wie die interdisziplinäre Erforschung zentraler Fragestellungen im Kontext der klimaneutralen Transformation dazu beitragen kann, ganzheitliche Lösungsansätze zu skizzieren.

Der Übergang zu nachhaltigen, geschlossenen Kohlenstoffkreisläufen ist ein wesentlicher Faktor der Transformation insgesamt. Im Rheinischen Revier, das sich mit dem Strukturwandel einer Jahrhundertaufgabe gegenüber sieht, die wir als Jahrhundertchance betrachten, ist das Thema der Rohstoff- und Energiewende von besonderer Relevanz. Gerade in dem Spannungsfeld von bisheriger Prägung durch die Braunkohlegewinnung und -verstromung einerseits und dem Pfad zur vollständigen Defossilisierung andererseits liegen enorme Chancen für einen beispielgebenden Übergang in eine zukunftsfähige Wirtschaftsweise. Neben technischen und ökonomischen Fragen ist eine Gelingensbedingung für den erfolgreichen Strukturwandel die aktive Integration der Bürgerinnen und Bürger der Region in den Prozess des Wandels. Bei der Entwicklung eines solchen umfassenden Verständnisses der Transformation leistet die DS CCCE parallel und mit Bezug zu der Erforschung technisch-ökonomischer Fragestellungen einen wertvollen Beitrag.

Die vorliegende Broschüre zeigt mit der Vorstellung spannender Promotionsthemen und -projekte das beeindruckende wissenschaftliche Potenzial der Nachwuchsforscherinnen und -forscher und mag so inspirierende und motivierende Einblicke geben in relevante Forschung für Strukturwandel und Transformation. Den Promovierenden am DS CCCE wünsche ich für den Fortgang ihrer Arbeiten viel Erfolg.

Beste Grüße

Prof. Dr. Andreas Pinkwart

## DIE DOCTORAL SCHOOL CLOSED CARBON CYCLE ECONOMY – EIN INTERDISZIPLINÄRES KONZEPT ZUR FÖRDERUNG DES NOTWENDIGEN VERSTÄNDNISSES FÜR EINEN NACHHALTIGEN ENERGIE- UND STRUKTUR- WANDEL

Dr.-Ing. Nico Schneider, Prof. Roland Span

Lehrstuhl für Thermodynamik, Ruhr-Universität Bochum

Zum Erreichen globaler Klimaziele und zur Reduzierung der nationalen Treibhausgasemissionen, wurde 2016 in Deutschland der Klimaschutzplan 2050 verabschiedet, der die erforderlichen Reduktionsschritte festlegt. Diese beinhalten eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 40 % bis 2020, 55 % bis 2030, 70 % bis 2040 und schließlich eine Reduktion von rund 85 % im Jahr 2050 gegenüber 1990. Der Klimaschutzplan gliedert sich in fünf Hauptsektoren: Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr und Landwirtschaft. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die 1990 und 2014 von diesen Sektoren verursachten Emissionen und die Zwischenziele bis 2030 gemäß des Klimaschutzplans 2050 [1].

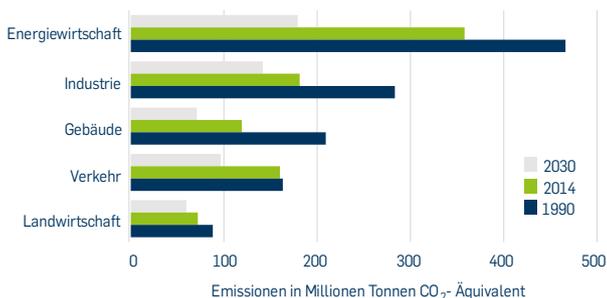


Abbildung 1: Treibhausgasemissionen der fünf im Klimaschutzplan 2050 festgelegten Sektoren, die in den Jahren 1990 und 2014 erzeugt wurden, und die vorläufigen Emissionsziele bis 2030 gemäß [1].

Wie sich zeigt, spielt der Energiesektor eine zentrale Rolle, die dessen Umstrukturierung zur Reduzierung von Emissionen unumgänglich macht. Im Rahmen der Energiewende wurden dazu bereits wichtige Schritte unternommen und eingeleitet, so dass die Emissionen durch den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien und den schrittweisen Ausstieg aus fossilen Energieträgern bis 2030 um 61 - 62 % gegenüber 1990 reduziert werden sollen [1]. Der vollständige Ausstieg aus der Kohleverstromung in Deutschland ist für das Jahr 2038 vorgesehen [2]. Dennoch ist Kohle derzeit neben den erneuerbaren Energien einer der wichtigsten Energieträger in der Stromerzeugung in Deutschland. Im Jahr 2018 stammten rund 35 Prozent der Bruttostrom-

erzeugung aus Kohle (22,5% Braunkohle, 12,9% Steinkohle), ebenso viel wie aus erneuerbaren Energien [3]. Während die Steinkohleförderung in Deutschland im Jahr 2018 eingestellt wurde, ist Braunkohle derzeit der wichtigste heimische fossile Energieträger. Braunkohle wird in Deutschland ausschließlich oberflächennah in Tagebauen abgebaut, die sich auf drei Abbaugelände verteilen:

Tilman Bechthold,  
RWE Power AG,  
Leiter Forschung & Entwicklung

Liebe Leserinnen und Leser,

die Energiewende birgt eine Vielzahl komplexer Aufgaben, die längst nicht mehr über Einzeldisziplinen und nicht rein technisch zu lösen sind. Der Rechtsrahmen, die öffentliche Akzeptanz, die Ökonomie und auch ethische Fragen spielen ebenfalls eine entscheidende Rolle.

Neben den notwendigen technischen Entwicklungen ermöglicht insbesondere die Doctoral School eine breitgefächerte Behandlung aller dieser Themen und einen fruchtbaren Austausch zwischen den Disziplinen.

Dem hat auch die Landesregierung NRW Rechnung getragen und wir danken für die Förderung des ITZ-CC zum Schulterchluss zwischen universitärer Grundlagenforschung, Technologietransfer und industriellem Einsatz.



Abbildung 2: Deutsche Braunkohlereviere gemäß [4].

das Rheinische Braunkohlerevier, das Lausitzer Revier und das mitteldeutsche Revier, welche in Abbildung 2 dargestellt sind.

Aufgrund der lokalen Verfügbarkeit des günstigen Energieträgers Braunkohle haben sich in den Braunkohleregionen typische Industriestrukturen entlang der Wertschöpfungsketten rund um die Braunkohlengewinnung, -veredelung und -verstromung entwickelt. Zudem haben sich Zweige energieintensiver Industrien wie die Chemie-, Zement- und Stahlindustrie in den Regionen angesiedelt, deren Produktionsstrukturen bisher im Wesentlichen auf der Verarbeitung fossiler Kohlenstoffverbindungen beruhen. Der bevorstehende Ausstieg aus der Kohleverstromung und das "Null-Emissions"-Ziel erfordern daher einen Systemwechsel sowohl in der Energiewirtschaft als auch in den energieintensiven Industrien, der einen grundlegend anderen Umgang mit kohlenstoffhaltigen Rohstoffen beinhalten muss. Für die vom Kohleausstieg betroffenen Regionen gilt es daher nicht nur, Alternativen zu den bisherigen Arbeitsplätzen in der Braunkohleversorgung und -nutzung zu entwickeln, sondern auch den Strukturwandel so zu gestalten, dass die konventionelle Kohlenstoffwirtschaft durch eine neue, nachhaltigere Kohlenstoffwirtschaft ersetzt wird. Der anstehende Energie- und Strukturwandel bietet somit die Chance und die Regionen das Potenzial für einen

erfolgreichen Übergang zu einer nachhaltigen Energieversorgung und -erzeugung. Der anstehende Strukturwandel in den Braunkohleregionen kann wichtige Beiträge zu einer nachhaltigen Kohlenstoffwirtschaft leisten, wenn im Gleichschritt mit dem geplanten Rückgang der Braunkohleverstromung zukunftsfähige Nachfolgetechnologien für Industrie-arbeitsplätze in den Regionen kooperativ auf der Basis von Forschung und Entwicklung etabliert werden.

Die Entwicklung nachhaltiger Strukturen, Wertschöpfungsketten und letztlich einer Modellregion erfordert jedoch nicht nur geeignete Technologien, sondern auch gesellschaftliche und ethische Akzeptanz sowie geeignete wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen. Ein Energie- und Strukturwandel auf der technischen Ebene allein ist nicht zielführend und nachhaltig, da der Wandel letztlich das Lebens- und Arbeitsumfeld jedes Einzelnen betrifft; gesellschaftliche Akzeptanz ist daher ein erfolgsbestimmender Faktor. Der Transformationsprozess zu einer Modellregion muss daher zwangsläufig interdisziplinär begleitet werden.

**Prof. Dr.-Ing. Eckhard Weidner,**  
Fraunhofer UMSICHT,  
Institutsleiter

Die interdisziplinäre Ausrichtung der Doctoral School mit dem großen Thema „Strukturwandel“ ist neu und hat bereits zu spannenden Ergebnissen und Kooperationen geführt. Davon profitieren nicht nur die Promotionsstudentinnen und -studenten sondern auch wir als Projektpartner. Die Doctoral School steht daher Modell für die Bearbeitung komplexer und umfassender Fragestellungen, die im Zuge einer missionsorientierten Forschung und Entwicklung immer wichtiger werden.

Und genau hier setzt die Doctoral School Closed Carbon Cycle Economy (DS CCCE) an: Um das notwendige interdisziplinäre Verständnis für die erforderlichen Themen frühzeitig zu fördern und eine gemeinsame Sprache zu entwickeln, beschäftigt sich DS CCCE an der Ruhr-Universität Bochum unter anderem mit Fragen der stofflichen Nutzung von Kohlenstoffen, nachhaltigen Kohlenstoffkreisläufen, der Energieversorgung, der Entwicklung neuer Wirtschaftscluster und Aspekten des anstehenden Strukturwandels im Rheinischen Revier und bietet gleichzeitig ein begleitendes interdisziplinäres Aus- und Weiterbildungsprogramm für die Doktorandinnen und Doktoranden an.

Die DS CCCE ist ein vom Land Nordrhein-Westfalen gefördertes Projekt und Teil des Virtuellen Innovations- und Technologiezentrums Carbon Conversion (ITZ CC), das gemeinsam mit den Verbundpartnern Fraunhofer UMSICHT und RWE Power AG Know-how, Anlagen und Komponenten sowie Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur zentralen und dezentralen Kohlenstoffumwandlung und -nutzung bündelt und für die Industrie und das Rheinische Revier nutzbar macht. Die DS CCCE beschäftigt sich dabei u.a. mit naturwissenschaftlich-technischen Grundlagen sowie geistes- und sozialwissenschaftlichen Fragestellungen, die am Beispiel des Rheinischen Reviers zur Entwicklung einer Modellregion beitragen und im weiteren Verlauf auf andere betroffene Regionen übertragen werden können.

Die DS CCCE bildet damit die Grundlage für eine interdisziplinäre Ausbildung von Promovierenden in Themen, die für die Transformation zu geschlossenen Kohlenstoffkreisläufen relevant sind. Dabei ist die eigentliche wissenschaftliche Ausbildung disziplinär - auch der beste interdisziplinäre Ansatz braucht zunächst wissenschaftlich exzellent ausgebildete Expert:innen für unterschiedliche Fragestellungen. Die Struktur der DS CCCE stellt jedoch durch interdisziplinäre Formate (z.B. Vortragsreihen, Promovierendenseminare, Workshops und Retreats) sicher, dass ihre Mitglieder neben der Bearbeitung ihrer eigentlichen Promotionsthemen gleichzeitig das notwendige interdisziplinäre Verständnis für die relevanten Fragestellungen entwickeln. Diese begleitenden Aktivitäten fördern den Austausch zwischen den Promovierenden der verschiedenen Disziplinen und tragen so zur Entwicklung einer gemeinsamen Sprache und eines gemeinsamen Verständnisses der Probleme bei, die zu lösen sind, um den Übergang zu geschlossenen Kohlenstoffkreisläufen langfristig zu meistern.

Während sich viele interdisziplinäre Graduiertenprogramme zwar über mehrere Fachbereiche und Studienrichtungen erstrecken, gehören die beteiligten Disziplinen aber meist noch demselben übergeordneten Wissenschaftszweig an (bspw. gehören Chemie und Biologie beide zu den Naturwissenschaften). Die DS CCCE verfolgt in dieser Hinsicht einen weitgehend neuen Ansatz, indem es die Expertise von vier übergreifenden Wissenschaften in ihren Arbeiten vereint. Die derzeit an der DS CCCE beteiligten Fachbereiche gehören zu den akademischen Wissenschaftszweigen Geisteswissenschaften, Naturwissenschaften, Sozialwissenschaften und Technische Wissenschaften<sup>1</sup>. Derzeit werden 17 Promotionsstellen durch die DS CCCE finanziert, 9 weitere Promovierende nehmen finanziert durch andere Projekte am Programm teil. Die von den im Rahmen der DS CCCE geförderten Promovierenden untersuchten Fachgebiete und damit verbundenen Forschungsfragen sowie erste Ergebnisse werden auf den folgenden Seiten vorgestellt (alphabetisch sortiert nach Nachname des/der Doktorand:in).

## Referenzen

- [1] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB). Climate Action Plan 2050. Berlin; 2016. <https://www.bmu.de/publikation/climate-action-plan-2050-de> (Last accessed: 14.09.21)
- [2] Germany: Law on Phasing-Out Coal-Powered Energy by 2038 Enters into Force. Library of Congress; 2020. <https://www.loc.gov/item/global-legal-monitor/2020-08-31/germany-law-on-phasing-out-coal-powered-energy-by-2038-enters-into-force/> (Last accessed: 14.09.21)
- [3] Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). Kohle; 2021. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/kohlepolitik.html> (Last accessed: 14.09.21)
- [4] Öko-Institut. Die deutsche Braunkohlenwirtschaft. Historische Entwicklungen, Ressourcen, Technik, wirtschaftliche Strukturen und Umweltauswirkungen. Study commissioned by Agora Energiewende and the European Climate Foundation; 2017.

<sup>1</sup> in alphabetischer Reihenfolge, Systematik gem. OECD, 2002

# DAS WICKED PROBLEM DES STRUKTURWANDELS IM RHEINISCHEN REVIER – EINE PARTIZIPATORISCHE SYSTEMANALYSE

Miriam Athmer

*Prof. Michael Roos, Lehrstuhl für Makroökonomik, Ruhr-Universität Bochum*

Mit Deutschlands Beschluss zum Kohleausstieg bis spätestens 2038 wird dem Rheinischen Revier ein relevantes wirtschaftliches Standbein entzogen, dessen Lücke nun strukturell geschlossen werden muss. Dabei sind nicht nur ökonomische Aspekte wie der Einfluss auf regionale Wertschöpfungs- und Lieferketten oder der Wegfall von mehreren Tausend direkten, indirekten und induzierten Arbeitsplätzen von Bedeutung. Durch die enge Verbindung der Braunkohleindustrie zu regionalplanerischen Handlungsfeldern wie z. B. Flächennutzung, Gestaltung von Infrastruktur oder auch zu Aspekten wie der regionalen Kultur ergibt sich die Chance und Notwendigkeit für Maßnahmen in vielfältigen Bereichen, über die wirtschaftliche Perspektive hinaus. Dieser vielseitige Handlungsbedarf spiegelt sich auch in der politischen Agenda wider. So hat die Zukunftsagentur Rheinisches Revier mit dem Strukturstärkungsgesetz Kohleregionen die Zuständigkeit erhalten, den Strukturwandel in der Region in vier sogenannten Zukunftsfeldern zu betreuen:

- Energie und Industrie,
- Innovation und Bildung,
- Ressourcen und Agrobusiness
- Raum- und Infrastruktur.

(Anlage 3 zu §1 Abs. 3 StStG)

In diesem Forschungsprojekt soll dieser Anspruch, den Strukturwandel über verschiedene Aktivitäten zu gestalten weitergehend untersucht werden. Die bestehende politische Beschreibung des Handlungsbedarfs soll überprüft und erweitert werden, indem verschiedene Stakeholdergruppen befragt und ihre Zukunftsvisionen erfasst und abgeglichen werden.

## **Der ‚Wicked Problem‘-Begriff als grundlegende Theorie**

Die Untersuchungen im Projekt basieren auf der These, dass die Herausforderung des Strukturwandels im Rheinischen Revier als ein Wicked Problem betrachtet werden kann.

Der Begriff des Wicked Problems wurde 1973 von Horst W. J. Rittel und Melvin M. Webber (Rittel &

Webber 1973) entwickelt. Er findet seinen Ursprung in der Sozialplanung, hat sich seitdem aber interdisziplinär etabliert. Ein Wicked Problem, zu übersetzen als verzwicktes Problem, lässt sich zusammengefasst als eine komplexe planerische Problemstellung beschreiben, deren Definition für jede:n Betrachter:in unterschiedlich ausfällt. Ebenso gibt es keine endgültige Lösungsmenge und keinen Lösungspfad, der für alle Anspruchsgruppen gleichermaßen zufriedenstellend ist. Zudem haben Wicked Problems langfristige Auswirkungen und keinen Endzeitpunkt. Das Besondere an Wicked Problems

## Dr. Alexander Opitz, Zukunftsagentur Rheinisches Revier GmbH

Die Promotionsprojekte von Frau Athmer und Herrn Stehr leisten einen entscheidenden Beitrag zur wissenschaftlichen Evaluation des Strukturwandels – so liefert beispielsweise die Modellierung der Akteurslandschaft nicht nur wichtige theoretische Erkenntnisse, sondern hilft auch ganz praktisch bei Systematisierung der Handlungsfelder und der Ausgestaltung der Prozesse im Rheinischen Revier.

Nicht zuletzt konnten alle Teilnehmer von den Vernetzungsmöglichkeiten bei den Workshops zu Wissens- und Innovationsnetzwerken profitieren.

Ich wünsche Frau Athmer und Herrn Stehr alles Gute und hoffe, weiterhin an den Aktivitäten der DS CCCE teilhaben zu können.

ist, dass sich Planer:innen einer „One-Shot-Operation“ ausgesetzt sehen, d.h. sie haben keinen zweiten Versuch und auch keine Möglichkeit, Lösungen umfassend zu erproben. Dabei ist das Wicked Problem einzigartig – es gibt keine Blaupause aus anderen Planungsprozessen, die sich eins zu eins auf den Fall übertragen lässt. Das Konzept folgt dabei einem systemtheoretischen Grundgedanken: Ein Wicked Problem ist mit anderen sozioökonomischen Problemen/Systemen vernetzt und steht in Wechselwirkung zu diesen. Bekannte Beispiele für solche Wicked Problems sind der Klimawandel oder die Energiewende. (z. B. Rittel & Webber 1973, Head 2008, Kolko 2012, Levin et al. 2012)

Diese zusammengefassten Kriterien erinnern an die Herausforderungen, mit denen sich das Rheinische Revier mit seinem wirtschaftlichen Strukturwandel konfrontiert sieht. Deshalb wurde das Konzept des Wicked Problems in diesem Projekt als theoretische Basis gewählt. Für das Forschungsprojekt wird insbesondere eine Weiterentwicklung der Ursprungsdefinition von Wicked Problems von Brian Head (2008) zugrunde gelegt, die Wicked Problems anhand von drei Dimensionen charakterisiert:

- Die *Komplexität* von Elementen, Sub-Systemen und deren Interdependenzen
- *Unsicherheit* mit Blick auf Risiken, Handlungskonsequenzen und sich verändernde Muster und Rahmenbedingungen
- Die *Divergenz* und Fragmentierung von Standpunkten, Werten und strategischen Intentionen verschiedener Stakeholder

Das Projekt nimmt eine tiefere Beschreibung des Strukturwandels im Rheinischen Revier anhand dieser drei Dimensionen vor. Dabei stellen sich verschiedene Fragen: Wie unterscheidet sich die Beschreibung der Herausforderung des Struktur-

wandels aus der Perspektive unterschiedlicher Stakeholder? Welche Zielvisionen haben diese Stakeholder? Inwieweit werden diese Perspektiven von der aktuellen politischen Planung abgedeckt? Wo besteht Konsens, wo zeigt die Planung Lücken und an welchen Stellen ergibt sich vielleicht sogar Konfliktpotential?

### **Stakeholder-Partizipation als grundlegender methodischer Ansatz**

In der Definition von Wicked Problems spielen die Perspektiven und Zukunftsvisionen von Stakeholdern auf verschiedenen Ebenen eine ausschlaggebende Rolle. Für die Erarbeitung einer Systembeschreibung, die verschiedene Perspektiven abbildet und sich so mehrschichtig zusammenfügt, steht deshalb die Partizipation von Stakeholdern im methodischen Vordergrund dieses Projekts. Ein konkretes Werkzeug zur Umsetzung einer solchen partizipatorisch erarbeiteten Beschreibung des Systems des Strukturwandels im Rheinischen Revier sind Methoden wie z. B. Causal Loop Diagramme, die die Elemente eines betrachteten Systems/einer Fragestellung kartieren und ihre Beziehungen zueinander aufzeigen (Sedlacko et al. 2014).

Die Regierung hat für das Rheinische Revier ein Leitbild festgelegt, das „die nachhaltige Weiterentwicklung der industriellen Wertschöpfungsketten“ in der Region fokussiert (Anlage 3 zu §1 Abs. 3 StStG). Bei der Auswahl, welche Stakeholderperspektiven abgeglichen werden sollen, wird deshalb die weitläufig anerkannte Definition von Nachhaltigkeit als Einklang der drei Dimensionen ökonomischer, sozialer und ökologischer Aspekte herangezogen (Purvis et al. 2018; §1 Abs. 3 StStG). Entsprechend werden im Projekt Workshops mit Vertreter:innen aus drei übergeordneten Stakeholdergruppen durchgeführt: aus der Wirtschaft, aus der Zivilgesellschaft und von ökologischen Interessensvertretungen. Mit jeder



Abbildung 1: Relevante Handlungsfelder im Strukturwandel des Rheinischen Reviers. Screenshot der interaktiven Ergebnisdokumentation im Online-Workshops mit wirtschaftlichen Stakeholdern. (Quelle: Eigene Darstellung)

Gruppe werden Workshops zu den drei Dimensionen Komplexität, Divergenz und Unsicherheit abgehalten. Anhand dieser drei Aspekte sollen die Zielvisionen für das Rheinische Revier abgefragt werden. Die Erarbeitung läuft über Fragestellungen und Diskussionen wie z. B. welche Handlungsfelder als relevant angesehen werden, wie die Region im Jahr X aussehen soll oder welche Risiken aus Perspektive der Stakeholder bestehen.

Die Einladung der Teilnehmenden erfolgt auf Basis einer Stakeholderanalyse des wirtschaftlichen Strukturwandels im Rheinischen Revier. Diese wurde anhand öffentlicher Quellen wie Veranstaltungsdokumentationen, Zeitungsartikeln oder regionalwirtschaftlicher Studien durchgeführt. Eine Erweiterung erfolgte durch einen Abgleich mit Stakeholderlisten von regionalen Institutionen und Unternehmen. So konnten 15 übergeordnete und 75 untergeordnete Stakeholdergruppen identifiziert werden. Aus diesem Katalog erfolgt die Akquise für die Workshops.

## Ergebnisse und Ausblick

In bisherigen Terminen mit wirtschaftlichen Stakeholdern, die aufgrund der Corona-Pandemie online durchgeführt wurden, konnten erste Zwischenergebnisse generiert werden. Abbildung 1 zeigt beispielhaft einen Screenshot aus den Online-Workshops, bei denen die Teilnehmenden interaktiv mit digitalen Notizzetteln gearbeitet haben. Die Teilnehmenden haben aus ihrer Sicht relevante Handlungsfelder zunächst gesammelt und im in Abbildung 1 gezeigten Schritt priorisiert. Die als besonders wichtig empfundenen Themen wurden im Workshop noch tiefergehend diskutiert. Aus den bisherigen Ergebnissen konnte ein erstes systemisches Mapping erstellt werden, das 29 Handlungsfelder verknüpft (siehe Abbildung 2).

In weiteren Workshops, auch mit Vertreter:innen der zivilgesellschaftlich und der ökologisch einzuordnenden Anspruchsgruppen, sollen diese Ergebnisse erweitert werden. So ergibt sich ein Abbild der Zukunftsvision aus Perspektive der jeweiligen Stakeholder, das zudem um ein Mapping der aktuellen Planung der Politik ergänzt wird. Quellen für letztere sind z. B. die Gesetzgebung um den Kohleausstieg

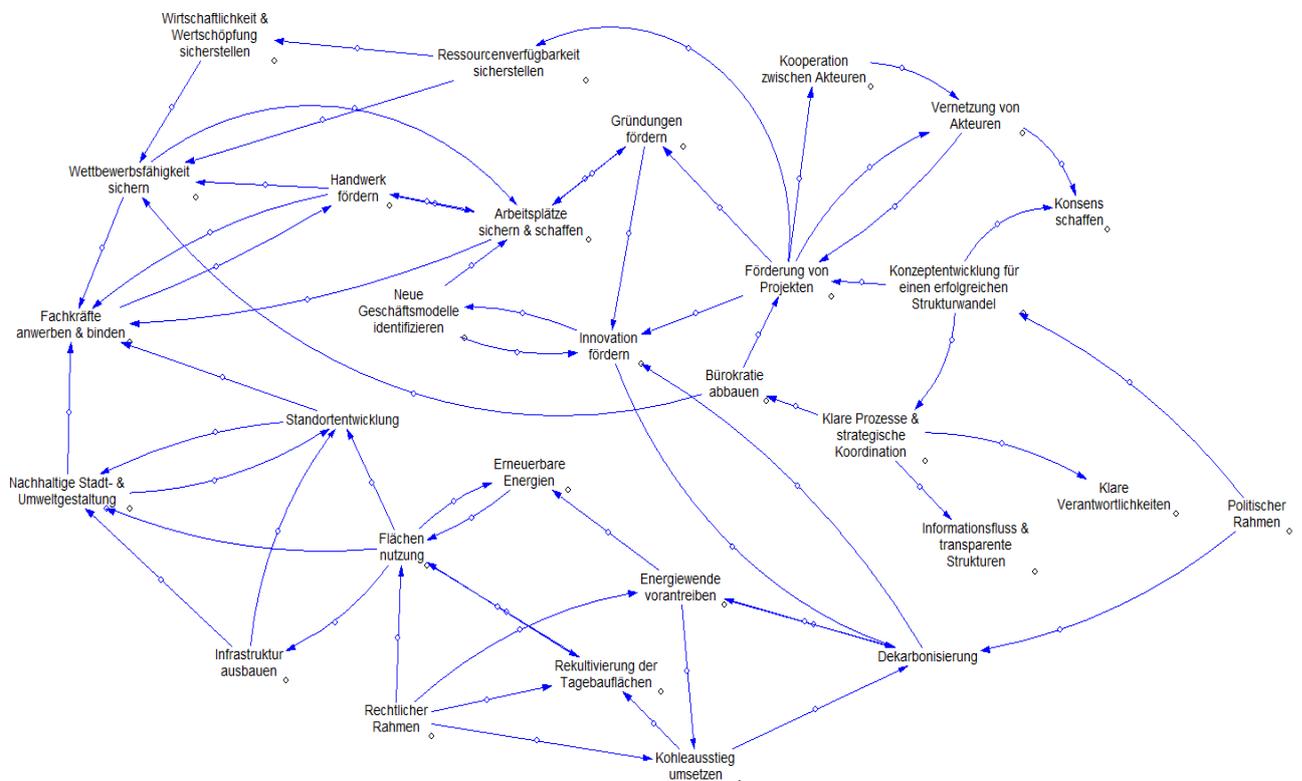


Abbildung 2: Erstentwurf eines Mappings der systemischen Zusammenhänge zwischen Handlungsfeldern im Strukturwandel des Rheinischen Reviers. Zwischenergebnis aus dem digitalen Workshop mit wirtschaftlichen Stakeholdern. (Quelle: Eigene Darstellung)

oder politische Vereinbarungen wie der Reviervertrag 2030 der Landesregierung in Zusammenarbeit mit der Zukunftsagentur Rheinisches Revier.

So soll sich eine umfassende Beschreibung des Wicked Problems des Strukturwandels im Rheinischen Revier zusammenfügen. Diese dient dazu, Synergien, Abweichungen und Konfliktpotenziale unterschiedlicher Stakeholderperspektiven auf den Strukturwandel des Rheinischen Reviers sichtbar zu machen.

### Referenzen

- Head, B.W., 2008. Wicked Problems in Public Policy. *Public Policy*, 3 (2), S. 101-118.
- Kolko, J., 2012. Wicked problems: Problems worth solving: A handbook & a call to action. Austin Center for Design, Austin (TX).
- Levin, K., Cashore, B., Bernstein, S. & Auld, Graeme, 2012. Overcoming the tragedy of super wicked problems: constraining our futures to ameliorate global climate change. *Policy Sciences*, 45(2), S. 123-152.
- Purvis, B., Mao, Y. & Robinson, D., 2018. Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustainability Science*, 14 (3), S. 681-695.
- Rittel, H.W.J. & Webber, M.M., 1973. Dilemmas in a General Theory of Planning. *Policy Sciences*, 4(2), S. 155-169.
- Sedlacko, M., Martinuzzi, R.-A., Röpke, I., Videira, N. & Antunes, P., 2014. Participatory systems mapping for sustainable consumption: Discussion of a method promoting systemic insights. *Ecological Economics*, 106, S. 33-43.

## Dr. Sebastian Moritz, Kompetenzfeld Strukturwandel, Wirtschaftsförderung Rhein- Erft GmbH

Wie die Jahrhundertaufgabe Strukturwandel bewältigt wird, hängt maßgeblich davon ab, ob in den kommenden Jahren konsensfähige Planungsansätze und Zieldefinitionen für die multidimensionalen Herausforderungen des Rheinischen Reviers entwickelt werden.

Systemisch orientierte Forschungsansätze bieten vor diesem Hintergrund die Möglichkeit, Phänomene wie Interdependenz, Risiken oder Unsicherheit konzeptionell gewinnbringend zu integrieren und sich den komplexen Eigendynamiken regionaler Raumsysteme auf Augenhöhe anzunähern.

Um das „Wicked Problem Strukturwandel“ zu lösen, sind Instrumente wie systemisches Mapping aus meiner Sicht ideal geeignet, da sie nicht nur bestehende Adaptionskapazitäten aufzeigen können, sondern ebenso in der Lage sind, frühzeitig vor emergenten Transformationsbarrieren zu warnen.

# DER EINSATZ RHEINISCHER BRAUNKOHLE ZUR BODENVERBESSERUNG

Martin Benz

*Prof. Harald Zepp, Lehrstuhl Angewandte Physische Geographie, Ruhr-Universität Bochum  
Prof. Bernd Marschner, AG Bodenkunde und Bodenbiologie, Ruhr-Universität Bochum*

Die Zunahme der Weltbevölkerung, der Klimawandel, steigende Umweltbelastungen und die erhöhte Nachfrage nach Lebensmitteln und Rohstoffen stellen eine enorme Herausforderung für die Menschheit dar. Einschneidende Änderungen auf industrieller und landwirtschaftlicher Ebene sind notwendig, um unsere Lebensgrundlagen zu bewahren. Welche Rolle dabei die Qualität des Bodens spielt und wie dienlich Braunkohle dabei als Bodenverbesserer sein kann, wird im folgenden Promotionsprojekt geklärt.

## Hintergrund

Durch Klimawandel, Waldrodung und intensive Landwirtschaft sind Böden weltweit einem Verlust an organischer Bodensubstanz ausgesetzt. Schätzungsweise haben Böden bereits zwischen 30 % und 75 % ihrer ursprünglichen Kohlenstoffvorräte durch landwirtschaftliche Eingriffe verloren (Lal et al., 2007). Gleichzeitig hat die organische Bodensubstanz eine zentrale Bedeutung für die Qualität und Funktionalität des Bodens. Der Abbau dieser Substanz hat negative Auswirkungen auf die Bodenfruchtbarkeit, auf die Nahrungsmittelproduktion, auf ökologische Prozesse und auf die Emission klimarelevanter Gase. Eine direkte Maßnahme, um dem Verlust an organischer Bodensubstanz entgegenzuwirken, ist der Einsatz von organischen Bodenverbesserern. Ein bedeutender Vertreter ist die Pflanzenkohle. Ihr Potenzial zur landwirtschaftlichen Ertragssteigerung ist jedoch uneindeutig (Kavitha et al., 2018). Auch Finanzierbarkeit, Verfügbarkeit und mögliche Schadstoffeinträge können eine Hürde für die Anwendung sein (Quilty und Cattle, 2011).

Könnte Braunkohle eine Alternative darstellen? Studien belegen, dass Braunkohle u.a. die Wasserspeicherkapazität, die Kationenaustauschkapazität, die Struktur und Nährstoffverfügbarkeit von Böden positiv beeinflusst und somit ähnliche Potenziale wie Pflanzenkohle besitzt (Amoah-Antwi et al., 2020). Dies liegt nicht zuletzt an ihrer porösen physikalischen Struktur (Abb. 1). Braunkohle könnte auch bei der Verbesserung des landwirtschaftlichen Nährstoffkreislaufs eine wichtige Rolle einnehmen. Gegenwärtig ergeben sich bei der Düngung auf intensiv bewirtschafteten Flächen hohe Stickstoffverluste, welche vorrangig durch die Auswaschung von Nitrat und die Emission von Ammoniak und Lachgas

entstehen. Diese Verluste limitieren nicht nur landwirtschaftliche Erträge, sondern belasten maßgeblich die Umwelt und tragen zum Klimawandel bei. Studien belegen, dass organische Bodenverbesserer mit hohem Kohlenstoffgehalt, wie Braunkohle, als Dünger-Additiv erfolgreich eingesetzt werden können, um diese Stickstoffverluste zu unterbinden (Cao et al., 2021).

## Zielsetzung und Forschungsfragen

Das Promotionsprojekt erforscht die Möglichkeiten einer nachhaltigen stofflichen Nutzung von Braunkohle als Bodenverbesserer. Dabei stehen folgende Ziele im Fokus:

- Die Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit zur Ertragssteigerung
- Die Anreicherung und Stabilisierung organischer Bodensubstanz zur „Kohlenstoffsequestrierung“
- Die Reduktion landwirtschaftlicher Nährstoffverluste zum Schutz von Umwelt und Klima

Es soll geklärt werden, welche stofflichen Eigenschaften und Wirkungsmechanismen den bodenverbessernden Effekten von Braunkohle zugrunde liegen, um Hinweise für eine geeignete landwirtschaftliche Anwendung zu erhalten. Aus dieser Zielsetzung ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Ist Rheinische Braunkohle für die Bodenverbesserung geeignet und gibt es herkunftsbedingte Qualitätsunterschiede?

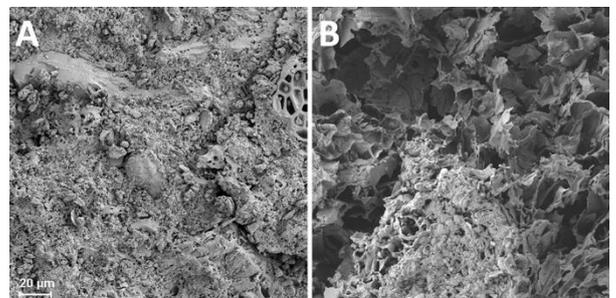


Abbildung 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von (A) Braunkohle und (B) Pflanzenkohle.

- Unter welchen landwirtschaftlichen Bedingungen (Bodenart und Bewirtschaftung) ist eine Bodenverbesserung durch Braunkohlezugabe wirksam?
- Dient die Zugabe von Braunkohle als langfristiger Kohlenstoffspeicher im Boden und trägt sie zum nachhaltigen Aufbau der organischen Bodensubstanz bei?
- Verfügen co-fermentierte Gärreste aus Gülle und Braunkohle über eine verbesserte Düngewirkung?
- Kann der Einsatz von Braunkohle Stickstoffverluste und damit verbundene Umweltbelastungen verringern und die Düngereffizienz erhöhen?
- Welche Vorteile hat Braunkohle gegenüber Pflanzenkohle als organischer Bodenverbesserer?

### Versuchskonzept

Um diese Fragen zu beantworten, wurden landwirtschaftliche Experimente durchgeführt, welche die Auswirkung von Braunkohle und Pflanzenkohle auf den Boden, Nährstoffkreisläufe und Pflanzen untersuchen. Dafür wurden mehrere Versuchsböden ausgewählt, die sich wesentlich in ihrer Textur, ihrem pH-Wert und ihrem Gehalt an organischer Bodensubstanz unterscheiden. Dies ermöglicht es, die Wirkung von Kohlen unter diversen landwirtschaftlichen Bedingungen zu simulieren. Unverwitterter Löss von einer Rekultivierungsfläche des Rheinischen Braunkohlereviere bildet ein interessantes Forschungsobjekt (Abb. 2), weil das Substrat aufgrund seines unverwitterten Zustands und dem Fehlen organischer Bodensubstanz kaum Bodenfruchtbarkeit besitzt. Gleichzeitig besteht hohes Potenzial zur Bodenverbesserung. Als potenzielle Bodenverbesserer wurden eine Auswahl an Braunkohlen des Rheinischen Braunkohlereviere, wie auch Pflanzen-



Abbildung 2: Probenahme von unverwittertem Lösssubstrat (Rekultivierungsboden) aus einer Rekultivierungsfläche am Tagebau Garzweiler.

kohle aus pyrolysiertem Häckselgut der Baumpflege, verwendet. Diese wurden den Versuchsböden alleinig, oder als Dünger-Additiv zugeführt.

In einem Gewächshausversuch (Abb. 3) wurde die Wirkung beider Kohlen auf das Wachstum von Weizen und Raps untersucht. Untersucht wird, ob die Veränderung physikalisch-chemischer Bodeneigenschaften und ein unterschiedliches Angebot an Pflanzennährstoffen Wachstumseffekte hervorrufen.

In einem Inkubationsversuch (Abb. 4) wurden Böden mit Gärresten gedüngt, die entweder bereits während des Gärprozesses oder erst kurz vor der Bodenapplikation mit Braunkohle bzw. Pflanzenkohle versetzt wurden. Der Versuch soll zeigen, ob Braunkohle und Pflanzenkohle die nach der Düngung entstehenden Emissionen von Nitrat, Ammoniak und Lachgas unterbinden können, und ob ein vorangehender synergetischer Gärprozess mit den Kohlen einen zusätzlichen Einfluss auf diese Bodenprozesse ausübt. Dabei wird vermutet, dass Adsorptions-

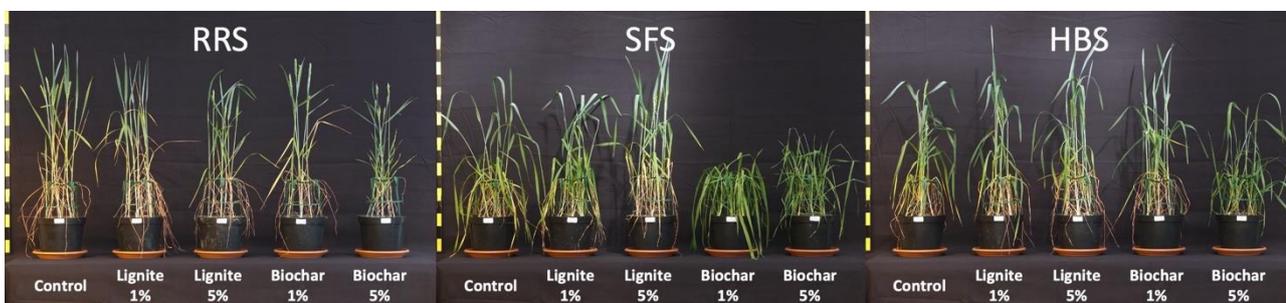


Abbildung 3: Gewächshausversuch. Wachstum von Sommerweizen 57 Tage nach Pflanzung auf Rekultivierungsböden aus dem Tagebau Garzweiler (RRS), auf sandigem Boden unter Grünlandbewirtschaftung aus Recklinghausen (SFS) und einer Parabraunerde unter Grünlandbewirtschaftung aus Bochum Laer (HBS). Die Böden wurden zuvor mit jeweils 1 % und 5 % Braunkohle (Lignite) oder Pflanzenkohle (Biochar) behandelt.

mechanismen der Kohlen, aber auch durch die Kohlen beeinflusste Immobilisierungsprozesse von Mikroorganismen eine wichtige Rolle spielen.



Abbildung 4: Inkubationsversuch am KIT-Campus Alpin. Messung der Emission von Lachgas, Ammoniak, Methan und Kohlenstoffdioxid aus Böden, welche zuvor mit co-fermentierten Gärresten aus Rindergülle und Braunkohle bzw. Pflanzenkohle gedüngt wurden.

Um die in den vorherigen Versuchen gezeigten Effekte auch unter landwirtschaftlichen Bedingungen zu prüfen, wurde ein Freilandversuch (Abb. 5) angelegt. Dabei wurden die Bodenverbesserer dem Boden alleinig (als Pendant zum Gewächshausversuch) und als Dünger-Additiv (als Pendant zum Inkubationsversuch) zugeführt. Messungen am Boden und Ertragsbestimmungen an verschiedenen Ackerkulturen zeigen über einen Zeitraum von 1,5 Jahren auf welche Weise beide Kohlen der Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit, dem Ertragspotenzial, der Düngewirkung und dem Nährstoffkreislauf dienlich sein können.

### **Erste Ergebnisse und Diskussion**

Die alleinige und substantielle Applikation von Braunkohle und Pflanzenkohle zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit zeigte im Gewächshaus- und Freilandversuch kurzfristig auf allen Böden keine Ertragssteigerung. Im Gewächshausversuch gab es sogar, vermutlich bedingt durch eine Festlegung von Stickstoff, eine Hemmung des Pflanzenwachstums (Abb. 3). Diese Hemmung war bei der Anwendung von Pflanzenkohle stärker ausgeprägt als bei Braunkohle. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass beide Bodenverbesserer auf längere Sicht eine Rolle spielen könnten, zumal diese eine lange Verweildauer im Boden besitzen. So können das Bodengefüge, die Durchlüftung, die Nährstoff- und Wasserspeicherkapazität, der pH-Wert und viele weitere Bodeneigenschaften beeinflusst werden, welche erst im lang-

fristigen Maßstab zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit beitragen. Der Gewächshausversuch zeigte beispielsweise, dass die Zugabe beider Kohlen die Keimung begünstigt und den Wasserverlust des Bodens reduziert. Braunkohle hatte eine versauernde, Pflanzenkohle eine basische Wirkung auf den Boden-pH-Wert. In bestimmten Umweltsituationen sind diese Bodeneigenschaften für das Pflanzenwachstum förderlich. Um dennoch kurzfristig keine Ertragseinbußen zu erfahren, sollte bei Anwendung von Braunkohle auf eine ausreichende Verfügbarkeit von Pflanzennährstoffen, insbesondere Stickstoff, geachtet werden. Der Freilandversuch weist außerdem darauf hin, dass bereits Böden mit moderater Fruchtbarkeit eine nur marginale Verbesserung durch den Zusatz von Braunkohle und Pflanzenkohle erfahren. Die Anwendung dieser organischen Bodenverbesserer sollte demnach für Grenzertragsböden oder Rekultivierungsflächen vorbehalten sein.

Der substantiellen Anreicherung von Böden mit Braunkohle zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit steht deren Anwendung als Dünger-Additiv entgegen. Im Freilandversuch zeigt sich die Tendenz, dass



Abbildung 5: Freilandversuch. Versuchsfläche auf dem Hof Bergmann, Bochum Laer kurz nach Applikation und Einarbeitung von Gärresten in Kombination mit Braunkohle und Pflanzenkohle (03.12.2020).

Braunkohle, wie auch Pflanzenkohle, die Mineralisierung und die davon abhängige Verfügbarkeit und Auswaschung von Stickstoff beeinflussen. Die Effekte sind jedoch zu uneindeutig, um direkte Empfehlungen für die landwirtschaftliche Anwendung auszusprechen. Diese Beobachtungen sollten weiter untersucht werden, indem man standardisierte Versuche zur Nitratauswaschung im Labor, oder auch Freilandversuche auf anfälligen Böden durchführt. Über die Wirkung von Braunkohle auf die Emission von Ammoniak und Lachgas liegen zurzeit noch keine Ergebnisse aus dem Inkubationsversuch vor. Die bisherigen Beobachtungen lassen eine Reduktion der Emissionen vermuten.

## Schlussfolgerungen

Rheinische Braunkohle hat aufgrund seiner stofflichen Beschaffenheit und seiner Wirkung im Boden das Potenzial unter bestimmten landwirtschaftlichen Voraussetzungen als organischer Bodenverbesserer erfolgreich eingesetzt zu werden. Sie nimmt Einfluss auf Pflanzenkeimung, den pH-Wert und die Wasserspeicherung des Bodens und ist persistent gegen mikrobiellen Abbau. Dennoch wird ihr Einfluss auf die Bodenfruchtbarkeit eher langfristig, in den Jahren nach der Anwendung, vermutet. Eine direktere Wirkung ist voraussichtlich bei der Anwendung von Braunkohle als Dünger-Additiv möglich. Braunkohle zeigt die Tendenz Einfluss auf die Stickstoffdynamik im Boden zu haben und vorläufige Beobachtungen lassen vermuten, dass die Emission stickstoffhaltiger und klimarelevanter Gase bei der Düngung unterbunden wird. Bis auf wenige Ausnahmen ist die Wirkung von Braunkohle auf den Boden mit der von Pflanzenkohle vergleichbar. Braunkohle könnte somit einen alternativen Bodenverbesserer für bestimmte landwirtschaftliche Bedingungen darstellen.

## Referenzen

- Amoah-Antwi, C., Kwiatkowska-Malina, J., Thornton, S. F., Fenton, O., Malina, G., & Szara, E. (2020). Restoration of soil quality using biochar and brown coal waste: A review. *Science of the Total Environment*, 722, 137852.
- Cao, X., Reichel, R., Wissel, H., Kummer, S., & Brüggemann, N. (2021). High carbon amendments increase nitrogen retention in soil after slurry application—an incubation study with silty loam soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-13.
- Kavitha, B., Reddy, P. V. L., Kim, B., Lee, S. S., Pandey, S. K., & Kim, K. H. (2018). Benefits and limitations of biochar amendment in agricultural soils: A review. *Journal of environmental management*, 227, 146-154.
- Lal, R., Follett, R. F., Stewart, B. A., & Kimble, J. M. (2007). Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. *Soil science*, 172(12), 943-956.
- Quilty, J. R., & Cattle, S. R. (2011). Use and understanding of organic amendments in Australian agriculture: a review. *Soil Research*, 49(1), 1-26.

## Carbon Sequestration @ NRW - Hochschule Bochum (Studentisches Projekt)

Carbon Sequestration @ NRW ist ein Projekt von Prof. Jan Paul Lindner und Studierenden der Nachhaltigen Entwicklung an der Hochschule Bochum.

Wir suchen nach einem kosteneffizienten und nachhaltigen Weg Kohlenstoff aus der Atmosphäre zu entfernen und in dauerhaften Strukturen zu binden. Dafür nutzen wir Pflanzenkohle, welche durch die Pyrolyse nachwachsender Rohstoffe erzeugt wird.

In unserer Kooperation mit Martin Benz und in dessen Promotionsprojekt sehen wir großes Potenzial gemeinsam Strategien zur Bindung von Kohlenstoff auf landwirtschaftlich genutzten Flächen zu entwickeln und gleichzeitig zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit beizutragen.

## KONFLIKTE IM UND UM DAS RHEINISCHE BRAUNKOHLEREVIER – VERNETZUNG VS. PARTIKULARISIERUNG DURCH SOZIALE MEDIEN

Rabea Bieckmann

*Prof. Rolf G. Heinze; Dr. Anna-Lena Schönauer, Lehrstuhl für Allgemeine Soziologie, Arbeit und Wirtschaft, Ruhr-Universität Bochum*

**E**in Thema, welches seit geraumer Zeit einen festen Platz in den Medien und auch den sozialen Netzwerken hat und online sowie offline zu Diskussionen führt, ist die Energiewende in Deutschland. Durch die Energiewende sind Regionen, wie das Rheinische Braunkohlerevier besonders in den Fokus der Öffentlichkeit gerückt. „Hoffnung und Frust im Rheinischen Revier“ (Deutschlandfunk 2020) oder „6000 Jobs bei RWE weniger: Kohleausstieg hat erhebliche Folgen fürs Rheinische Revier“ (Kölner Stadtanzeiger 2020) sowie „Rheinisches Revier: Volle Zuversicht für den Strukturwandel“ (Kölnische Rundschau 2020) lauten Titel aus den Nachrichten, welche auf den ersten Blick erkennen lassen, welche ambivalenten Auffassungen zu den Geschehnissen in der Region vertreten sind. Dies spiegelt sich auch in den sozialen Medien wider, in denen die Anliegen der Zivilgesellschaft zunehmend artikuliert und verbreitet werden. Die Verbreitung von Informationen über Plattformen wie Facebook oder Twitter sind auch im Diskurs um die Energiewende zu beobachten. Vor dem Hintergrund des anstehenden Kohleausstiegs Deutschlands ergeben sich zahlreiche Kontroversen rund um den Klimaschutz, Umsiedlungen, Arbeitsplätze sowie die Chancen und Grenzen des Strukturwandels u. a. im Rheinischen Revier. Insbesondere durch die Besetzung des Hambacher Forsts und das Aufbegehren von Bürgerinitiativen gegen Umsiedlungen rückte das Rheinische Braunkohlerevier immer wieder in den Fokus der Medien und politischer Diskussionen. Damit ist die Region Austragungsort diverser Konflikte rund um die Energiewende allgemein und um die Aspekte Heimat, Arbeitsplätze, Klimaschutz und Energieversorgung im Speziellen. Diverse Akteur:innen der Politik sowie der Zivilgesellschaft und der Wirtschaft sind an den Debatten beteiligt, wobei diese bei der Vielzahl an Themen nur mühsam ausdifferenziert werden können. Soziale Medien spielen im Diskurs eine relevante Rolle und befeuern die Konflikte z. T. durch die Verbreitung von (Fehl-)Informationen und ungefilterte Meinungsäußerungen. Durch die niedrigschwellige Möglichkeit teilzunehmen, können sich nun auch Personen äußern, die zuvor keine Möglichkeit hatten, gehört zu werden. Zudem eröffnen sich die Chancen zur spontanen Vernetzung von Akteur:innen, wie es in der Vergangenheit schon bei

der Organisation von Protesten gegen Tagebaue und Kraftwerke im Rheinischen Revier zu beobachten war. Insbesondere Diskussionen unter öffentlichen Beiträgen bei Facebook ufern oftmals aus, sodass häufig mehrere hundert Kommentare zu einzelnen Themen zu finden sind. Einerseits kann jede:r in den Kommentaren öffentlich die eigene Meinung kundtun, kritische Fragen stellen oder die Chance zur Vernetzung mit Gleichgesinnten nutzen. Andererseits bietet die Kommentarspalte auch Raum für Hass, Hetze und Beleidigungen.



*Abbildung 1: Das Internet bietet Möglichkeiten für einen konstruktiven Austausch und die Vernetzung von Bürger:innen, aber auch Raum für Hass und Hetze.*

In diesem Dissertationsprojekt wird u. a. der Frage nachgegangen, welche Bedeutung Online-Kommentare und Diskussionen von zivilgesellschaftlichen Akteur:innen für den Diskurs über die Energiewende bezogen auf das Rheinische Braunkohlerevier haben. Darüber hinaus wird erforscht, ob und inwiefern diese Online-Debatten zur Vernetzung beitragen können oder ob diese eher als Katalysatoren für Konflikte wirken. Erforscht wird, welche Themen rund um die Energiewende besonders diskursiv sind und welche Akteur:innen im Diskurs eine besondere Rolle spielen. Auch wird der Frage nachgegangen, inwiefern sich die Berichterstattung in den Printmedien, mit den Beiträgen von Bürger:innen decken, oder ob jeweils andere Aspekte im Fokus stehen.

## Vorgehen und Empirie

Um der Frage nach der Bedeutung der Äußerungen von zivilgesellschaftlichen Akteur:innen in den sozialen Medien nachzugehen, wurde eine engmaschige Beobachtung der Thematik in den sozialen Medien durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass neben den üblichen Kanälen und Gruppen von z. B. Fridays for Future oder Bürgerinitiativen, insbesondere online geteilte Zeitungsbeiträge als Diskussionsort fungieren. Um einen regionalen Zusammenhang zu gewährleisten, wurden zunächst Beiträge und Diskussionen auf der Facebook-Seite der Aachener Zeitung als Forschungsgegenstand ausgewählt. Die empirische Basis bilden einschlägige Beiträge der Lokalzeitung, welche auf der Plattform Facebook geteilt und kommentiert wurden. Prinzipiell ist eine „Vollerhebung“ der gesamten geteilten Artikel zur Debatte in einem bestimmten Zeitraum geplant. Da jedoch nicht alle Beiträge so umfassend kommentiert werden, wurde zunächst mit Stichproben zu verschiedenen Zeitpunkten als Ausgangspunkt gestartet. Dazu wurde auf der Facebook-Seite der Aachener Zeitung nach den Keywords „Rheinisches (Braunkohle)-Revier, Energiewende, Strukturwandel oder Protest“ gesucht und sich auf das Jahr 2019 beschränkt. Dieser Zeitraum wurde ausgewählt, da dort einige Proteste und die Besetzung des Hambacher Forstes stattfanden. Dazu kommt, dass die Entscheidung des Kohleausstiegs zu der Zeit noch bevorstand und das Thema auch medial weit verbreitet war. Zudem wurde bewusst ein Zeitpunkt vor Beginn der Corona-Pandemie gewählt, da sich damit der Diskurs und auch die Aktionen vor Ort schlagartig änderten. Die meist diskutierten Beiträge und somit der betrachteten Konfliktlinien sind u. a. die Ergebnisse der Kohlekommission, die Kosten für den Hambacher Forst, der Bau eines Protestcamps vor Ort, eine Großdemo von Fridays for Future, der Besuch von Greta Thunberg im Tagebau, eine Räumungsaktion im Hambacher Forst und die Besetzung von Braunkohlelagern durch Greenpeace-Aktivist:innen.

Für die Erhebung werden die ursprünglichen Artikel, welche einerseits in den Printzeitungen abgedruckt und auch online veröffentlicht wurden, abgespeichert. Darüber hinaus werden die jeweils geteilten Beiträge bei Facebook samt allen Kommentaren erhoben und mit Informationen wie dem Datum des Beitrags, dem Datum des Abspeicherns, der Kommentaranzahl, Verbreitung etc. versehen. Hinweise auf die Kommentierenden werden jeweils anonymisiert, woraufhin die Dateien mit MaxQda und der quantitativen Inhaltsanalyse (vgl. Früh 2015 und Rössler 2017) ausgewertet werden.

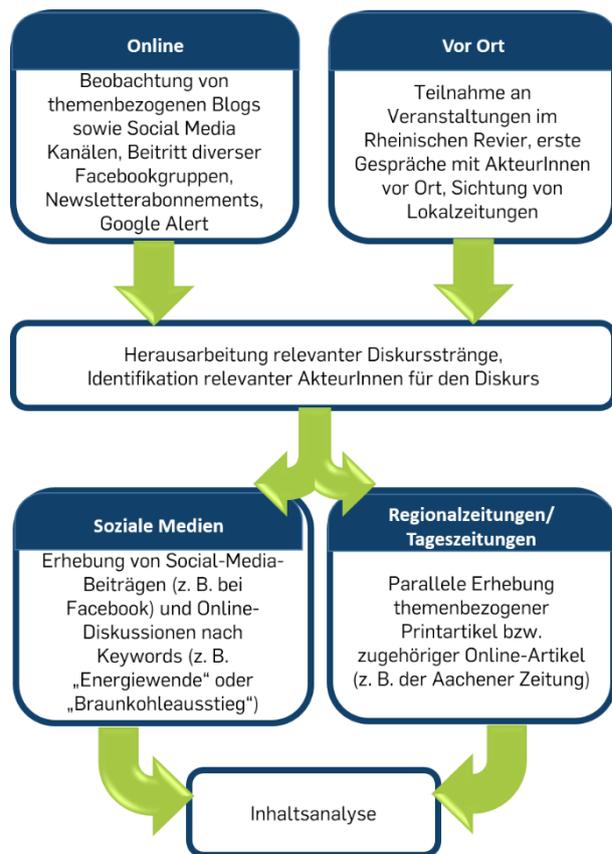


Abbildung 2: Skizze des Forschungsdesigns.

Im weiteren Verlauf des Projektes ist es denkbar die Datenerhebung auszuweiten und weitere Social-Media-Plattformen sowie weitere Zeitungen in den Blick zu nehmen.

## Einordnung und Ausblick

Online-Kommentare sind schon seit einiger Zeit Gegenstand wissenschaftlicher Forschung, wobei die Ergebnisse ambivalent ausfallen. Haake stellt u. a. fest, dass allein die Existenz von Kommentaren unter den Artikeln die Aufmerksamkeit anderer Nutzer:innen darauf lenkt und diese Artikel ggf. relevanter erscheinen lassen (vgl. Haake 2015: 205). In einem anderen Kontext wurde festgestellt, dass sich manche Proteste zwar online entwickeln, sich dann aber in Aktionen vor Ort verlagern (Harlow 2011). Hier spielten User-Kommentare bei Facebook für den Zusammenschluss der Zivilgesellschaft eine relevante Rolle. Demnach motivierten Leser:innenkommentare mancher Personen andere Personen vor Ort aktiv zu werden (Harlow 2011: 237 f.). Baringhorst stellt die These auf, dass durch digitale Öffentlichkeiten „nicht nur neue Möglichkeiten einer staatlichen Überwachung und kommerziellen

Datenausbeutung der Nutzer, sondern auch neue Möglichkeiten für eine macht- und herrschaftskritische Gegen-Überwachung durch das Internet nutzende Bürger [entstehen]" (Baringhorst 2019: 103). Darüber hinaus wird in den Ausführungen von Ziegele und Jost (2020) deutlich, dass User-Kommentare auch von geringer Qualität und Unhöflichkeit geprägt sein können, was sie als „uncivil user comments“ beschreiben (Ziegele & Jost 2020: 892). Das Vorhandensein von Leser:innen-Kommentaren und Beiträgen ist somit nicht gleichzusetzen mit konstruktiven Diskussionen.

Ob und inwiefern die Online-Kommentare im Kontext des Kohleausstiegs zur Vernetzung der Bürger:innen vor Ort beitragen oder ob diese eher zur einer Partikularisierung führen, kann derzeit noch nicht abschließend beantwortet werden. Nach einer ersten (Vor-)Auswertung der Daten deutet sich an, dass die Kommentarspalten rege zum Austausch genutzt werden, wobei auch inzivile Kommentare eine Rolle spielen.

### Referenzen

- Baringhorst, Sigrid (2019): Der Nutzer als Wächter – Zivilgesellschaftliche Medienpraktiken eines herrschaftskritischen Going Public im Internet. In: Bedford-Strohm, Jonas, Höhne, Florian & Julian Zeyher-Quattlander (Hg.): Digitaler Strukturwandel der Öffentlichkeit. Interdisziplinäre Perspektiven auf politische Partizipation im Wandel. Nomos: Baden-Baden, S. 103-119.
- Deutschlandfunk (2020): Nach Kohleausstieg-Entscheidung: Hoffnung und Frust im Rheinischen Revier. [online] [https://www.deutschlandfunk.de/nach-kohleausstieg-entscheidung-hoffnung-und-frust-im.1773.de.html?dram:article\\_id=468113](https://www.deutschlandfunk.de/nach-kohleausstieg-entscheidung-hoffnung-und-frust-im.1773.de.html?dram:article_id=468113) (abgerufen am 29. März 2022).
- Früh, Werner (2015): Inhaltsanalyse. 8. Auflage. UVK Verlagsgesellschaft: Konstanz und München.
- Haake, Gianna (2015): Das Wissen der Leser. Lesercommentare zwischen Wissenschaftsjournalismus und Social Web. UVK Verlagsgesellschaft: Konstanz und München.
- Harlow, Summer (2011): Social media and social movements: Facebook and an online Guatemalan justice movement that moved offline. In: new media & society 14(2), S. 225-243.
- Kölner Stadtanzeiger (2020): 6000 Jobs bei RWE weniger: Kohleausstieg hat erhebliche Folgen fürs Rheinische Revier. [online] <https://www.ksta.de/politik/6000-jobs-bei-rwe-weniger-kohleausstieg-hat-erhebliche-folgen-fuers-rheinische-revier-33758004> (abgerufen am 29. März 2022).
- Kölnische Rundschau (2020): Rheinisches Revier: Volle Zuversicht für den Strukturwandel. [online] <https://www.rundschau-online.de/wirtschaft/rheinisches-revier-volle-zuversicht-fuer-den-strukturwandel-33761796> (abgerufen am 29. März 2022).
- Rosanvallon, Pierre (2017): Die Gegen-Demokratie. Politik im Zeitalter des Misstrauens. Hamburger Edition: Hamburg.
- Rössler, Patrick (2017): Inhaltsanalyse. 3. Auflage. UVK Verlagsgesellschaft: Konstanz und München.
- Ziegele, Marc & Pablo B. Jost (2020): Not Funny? The Effects of Factual Versus Sarcastic Journalistic Responses to Uncivil User Comments. In: Communication Research. Volume 47(6), S. 891-920

## Dirk Brügge, Kreisdirektor Rhein-Kreis Neuss und Vorsitzender des Revierknotens für Infrastruktur und Mobilität der Zukunfts- agentur Rheinisches Revier

Die Doctoral School Closed Carbon Cycle Economy (DS CCCE) beschäftigt sich mit zentralen Themen des Strukturwandels. Planerische Fachfragen, Kommunikationsthemen, Netzwerke Fragen der Energiewirtschaft und Energieversorgung und viele weitere Themen aus den Bereichen Naturwissenschaften, Ingenieurwissenschaften sowie Geistes- und Gesellschaftswissenschaften werden hier wissenschaftlich fundiert behandelt. Die so gewonnenen Erkenntnisse liefern wichtige Beiträge für die aktive Gestaltung des Strukturwandels vor Ort im Rheinischen Braunkohlerevier.

## RESILIENZ DURCH DEZENTRALE, CROSS-SEKTORALE ENERGIESYSTEME AUF QUARTIERSEBENE

Jakob Böhm

Prof. Christian Doetsch, Lehrstuhl Cross Energy Systems, Ruhr-Universität Bochum / Fraunhofer UMSICHT Oberhausen

Der Begriff Resilienz wird in unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen genutzt, um das Verhalten von Systemen in Folge einer Belastung zu beschreiben [1]. In Abbildung 1 sind vier Phasen einer universellen Strategie aufgeführt, um resilientes Systemverhalten sicherzustellen [2].

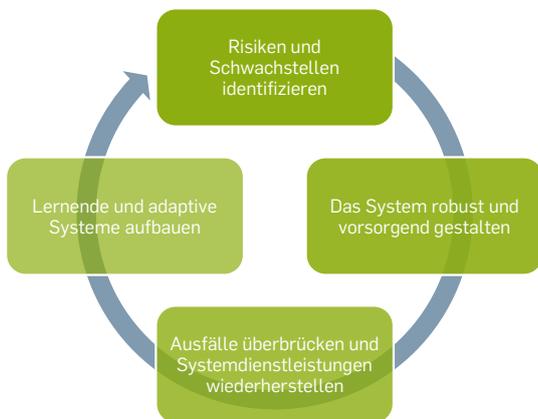


Abbildung 1: Ablauf einer universellen Strategie für resilientes Systemverhalten [2].

Besonders aktuelle Beispiele für die Nutzung des Begriffs sind psychische Resilienz von Einzelpersonen und von Gesellschaften während der Corona Pandemie. Eine weitere Betrachtungsweise ist die Resilienz von Lieferketten. Diese wurde zunächst bekannt durch die Blockierung des Suez-Kanal 2021 durch die *Ever Given*. Noch aktueller sind Auswirkungen, die eine Unterbrechung der Öl- und Gaslieferketten in Folge des Kriegs in der Ukraine auf das Energiesystem haben.

### Resilienz im Energiesystem

Die Nutzung des Begriffs Resilienz im Kontext von Energiesystemen erfolgt zumeist im Hinblick auf die Versorgungssicherheit. Gerade im Kontext der angestrebten Energiewende treten neue Risiken für diese auf. Das Ende der Kohleverstromung und der Umstieg zu mehr erneuerbaren Energien führt beispielsweise dazu, dass die Energieerzeugung dezentraler und volatiler wird. Dadurch steigt die Komplexität der Systeme. Die parallel stattfindende Digitalisierung der Systemkomponenten ist dabei

sowohl technisches Hilfsmittel als auch eine zusätzliche potenzielle Schwachstelle der Systeme.

In Abbildung 2 ist eine Systemleistung  $y(t)$  für ein resilientes (—) und ein nicht resilientes Systemverhalten (---) über der Zeit  $t$  dargestellt. Resiliente Systeme zeichnen sich dadurch aus, in Folge von Störwirkungen weniger Systemleistung einzubüßen und diese auf verringertem Niveau zu stabilisieren während nicht resiliente Systeme kollabieren. Bei Energiesystemen wird dann von einem Blackout gesprochen. Resiliente Systeme lassen sich schneller Wiederherstellen als nicht resiliente.

Das Energiesystem wird als (sozio-)technisches System betrachtet. Solche Systeme bestehen aus technischen Komponenten, wie z. B. Wandlungsanlagen, Speichern und Menschen, die energieverbrauchende Geräte nutzen. Nur die Interaktionen dieser Gruppen werden zunächst berücksichtigt, während ökonomische Einflüsse vernachlässigt werden.

In Abbildung 2 wird zwischen Störereignissen und – Wirkungen unterschieden. Störereignisse für Energiesysteme lassen sich grundsätzlich in die in Tabelle genannten Kategorien einteilen [3]. Die aufgeführten Ereignisse haben in der Regel starke Auswirkungen, allerdings nur sehr geringe Auftretenswahrscheinlichkeiten (so genannte *High Impact – Low Probability Events*). Beispielhaft genannt sei hier Vandalismus aus der Kategorie der

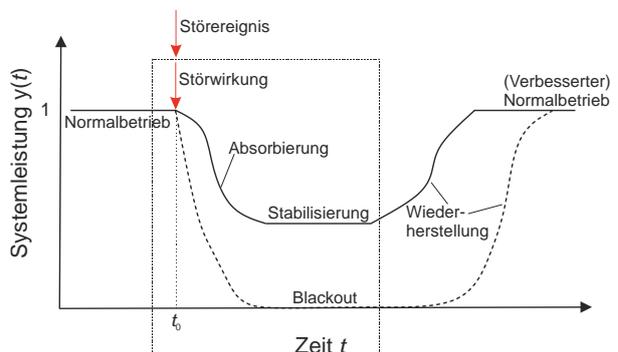


Abbildung 2: Übersicht einer Systemleistung  $y(t)$  nach einem Störereignis: resilientes (—) und nicht resilientes Systemverhalten (---).

physisch-menschlichen Störereignisse. Die Auftrittswahrscheinlichkeit auf Einzelkomponenten wie eine Zuleitung zu einem Quartier ist sehr gering, die resultierenden Schäden für das Quartier sind allerdings groß und ggf. auch langfristig.

Für die Betrachtung der Resilienz eines Energiesystems ist es allerdings zweitrangig wodurch die Störung hervorgerufen wird. Vielmehr sind das Ausmaß und die Dauer der Störungen relevant. Viele dieser Störszenarien sind für die Endkunden und auch die Energieunternehmen zunächst abstrakt. Der Krieg in der Ukraine zeigt aber, dass globale Systemänderungen lokale Auswirkungen haben. Daher berücksichtigen Strategien zur Umsetzung resilienten Verhaltens immer Szenarien, die über das planbare hinausgehen.

### **Strategien zur Umsetzung von Resilienz**

Um resilientes Verhalten von Energiesystemen zu ermöglichen stehen drei Strategien zur Verfügung. In ihrer Komplexität aufsteigend sind das:

- Resilienz durch Robustheit
- Resilienz durch modulare Redundanz
- Resilienz durch intelligente Funktionslimitierung

Von Resilienz durch Robustheit wird gesprochen, wenn die betrachteten Komponenten bekannte Schadensereignisse (z. B. Stürme) unbeschadet überstehen. Die Auslegung der Systemkomponenten erfolgt an Hand von Jahrhundertereignissen. Robustheitsstrategien wirken dem Schadensereignis direkt entgegen. In der Darstellung in Abbildung 2 liegen diese vor dem Zeitpunkt  $t_0$ , da keine Minderung der Systemleistung entsteht.

Resilienz durch modulare Redundanz ist eine Erweiterung des N-1 Kriteriums, bei dem ein System weiterfunktioniert, wenn ein Betriebsmittel ausfällt, hin zum N-X Kriterium. Das N-X Kriterium sichert eine grundlegende Systemleistung auch bei mehreren ausfallenden Komponenten. Diese Strategie wirkt

insbesondere bei undefinierten Ereignissen mit bekannten Auswirkungen (z. B. Ausfall spezifischer Anlagen). Zusätzliche Betriebsmittel werden vorgehalten, um im Schadensfall die Funktion des ausgefallenen Betriebsmittels zu übernehmen. Durch die Nutzung mehrerer kleiner Anlagen anstatt von zwei großen kann die vorgehaltene Überkapazität verringert werden und gleichzeitig die Restkapazität im Schadensfall erhöht werden.

Resilienz durch intelligente Funktionslimitierung ist eine Strategie, in der die Betriebsweise geändert wird um die Systemleistung zu stabilisieren. Dabei werden Limitierungen der Systemleistung und Ausfälle von Teilsystemen eingeplant um das Gesamtsystem zu stabilisieren. Ein Beispiel für systemstabilisierende Maßnahmen sind energetische Versorgungslevel, die eine stabile Systemfunktion auf unterschiedlichem Niveau erlauben.

### **Resilienz auf Quartiersebene**

Im Rahmen dieses Promotionsprojekts erfolgt die Definition und Bewertung der Resilienz von Energiesystemen zu nächst auf Quartiersebene. Diese Einschränkung bietet den Vorteil, dass die Sektoren Industrie und Gewerbe und Handel zunächst nicht betrachtet werden und einfachere Ableitungen getroffen werden können. Dafür stehen auf Quartiersebene unterschiedliche cross-sektorale Technologien zur Verfügung.

Das Verständnis des Begriffs Wohnquartiere ist sehr heterogen. Hier wird unter Quartier die gemeinsame Betrachtung von 36 Haushalten in Einfamilienhäusern verstanden. Die Energiebedarfe dieser Haushalte werden über aktivitätsbezogene Lastprofile abgebildet [4].

Der Begriff der Sektorenkopplung bzw. cross-sektorale Kopplung beschreibt die Verknüpfung der Bereiche Strom, Wärme, Gas, Verkehr und Industrie. Dabei wird eine Energieform (z. B. Strom) in eine andere (z. B. Wärme) oder in einen anderen Energieträger umgewandelt (Power-to-Gas). Auch Speichertechnologien sind Teil eines cross-sektoralen

Kategorie	Beispiele
Physisch-menschlich	Vandalismus, Terrorismus, Krieg, menschliches Versagen
Physisch-natürlich	Starkwetterereignisse, Erdbeben, solare Stürme
Cyber	Denial-of-Service, Bad Data Intrusion
Technisch	Kaskadeneffekte

Tabelle 1: Kategorisierung möglicher Störereignisse auf Energiesysteme mit Beispielen [3].

Systems. [5] Die wichtigste cross-sektorale Technologie auf Quartiersebene ist die Wärmepumpe. Damit werden die Sektoren Strom und Wärme verknüpft. Außerdem können die Batteriespeicher von Elektroautos nicht nur für die Mobilität genutzt werden, sondern auch als Stromspeicher für die Haushalte dienen.

Insbesondere in Bestandsquartieren werden bisher häufig zentrale Stromerzeugung und fossile Wärmeerzeugung genutzt. Die Wärmeerzeugung erfolgt dabei entweder dezentral mit Gasheizungen in den Häusern oder zentral mittels Fernwärme aus Blockheizkraftwerken.

Den Einfluss solcher dezentraler, cross-sektoraler Technologien im Vergleich zu traditionellen Bestandsquartieren auf die Resilienz von Energiesystem wird in diesem Projekt untersucht. Je nach Konfiguration der Energiesysteme unterscheiden sich die Wirkungen von Störereignissen. Cross-sektorale Systeme haben einen höheren Strombedarf als herkömmliche. Um eine resiliente Stromversorgung sicherstellen zu können, sind dabei insbesondere Stromspeicher notwendig, um Ausfälle zu überbrücken. Außerdem kann die Strategie der intelligenten Funktionslimitierung, wo Teilausfälle und Einschränkungen der Energieversorgung der Haushalte akzeptiert werden, einen Beitrag leisten das Energiesystem zu stabilisieren.

Der Struktur- und Energiewandel im Rheinischen Revier bietet die Möglichkeit entsprechende Energiesysteme nachhaltig umzusetzen und so zu einer Modellregion zu werden.

## Referenzen

- [1] D. E. Alexander, „Resilience and disaster risk reduction: an etymological journey“, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Jg. 13, Nr. 11, S. 2707–2716, 2013, doi: 10.5194/nhess-13-2707-2013.
- [2] acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., Hg., *Das Energiesystem resilient gestalten: Maßnahmen für eine gesicherte Versorgung*. München, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:3:2-106010>
- [3] S. Mishra, K. Anderson, B. Miller, K. Boyer und A. Warren, „Microgrid resilience: A holistic approach for assessing threats, identifying vulnerabilities, and designing corresponding mitigation strategies“, *Applied Energy*, Jg. 264, S. 1–17, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114726.
- [4] LoadProfileGenerator. 10.6, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.loadprofilegenerator.de/download/>
- [5] M. Sterner und I. Stadler, *Energiespeicher: Bedarf, Technologien, Integration*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2014

## Prof. Dr. jur. Walter Frenz, RWTH Aachen

Im Gefolge des Kohleausstiegs bis spätestens 2038 bzw. nach dem Ampel-Koalitionsvertrag "idealerweise" bis 2030 geht es um nichts weniger als die Transformation des Rheinlands in eine Bergbaufolgelandschaft mit gänzlich neuen Nutzungsformen. Daher bedarf es der näheren Untersuchung, wie dieser Übergang rechtlich von Statten geht. Dabei stellen sich diverse schwierige Fragen wie die Dauer der Geltung des Bergrechts und die Verzahnung dieses Rechtsgebietes etwa mit dem Planungs- und fachspezifisch mit dem Wasserrecht. Diese wichtigen Rechtsfragen untersuchen in herausragender Weise die diversen Promotionsvorhaben an der Ruhr-Universität Bochum, die in dieser Broschüre vorgestellt werden. Namentlich erwähnt sei die Arbeit von Laura Kühn mit dem Titel STEUERUNG VON FOLGENUTZUNGEN IN EHEMALIGEN BRAUNKOHLEREVIEREN MITTELS FACHPLANUNG UND -GENEHMIGUNG. Ich wünsche gutes Gelingen und spannende Ergebnisse - so zu den Auswirkungen des Vorziehens des Kohleausstiegs.

# GRUNDLAGEN FÜR DIE ENTWICKLUNG NEUER ONLINE-MESSTECHNIK FÜR H<sub>2</sub>-REICHE GASSTRÖME

Vanessa Kaub

Prof. Roland Span, Lehrstuhl für Thermodynamik, Ruhr-Universität Bochum

Die im Rheinischen Braunkohlerevier bevorstehenden Transformationsprozesse werden, von der Sicherstellung der Versorgungssicherheit in Bezug auf Strom und Wärme bis hin zur stofflichen Nutzung von Braunkohle, verschiedene großtechnische Prozesse mit sich bringen, bei denen H<sub>2</sub>-reiche Gasströme gehandhabt, transportiert und abgerechnet werden. Für diese zukunftssträchtigen Technologien kann sich das Rheinische Braunkohlerevier zur Modellregion entwickeln. Der Umgang mit entsprechenden Gasströmen bringt aber erhebliche messtechnische Herausforderungen mit sich, die mit den heute für Erdgase verfügbaren Verfahren und Geräten nicht ohne weiteres bewältigt werden können. Verfahren und Geräte müssen an neue Gaszusammensetzungen angepasst und weiterentwickelt werden. Im Bereich der Messtechnik sind vielfach hoch spezialisierte, global agierende kleine und mittelständische Unternehmen aktiv, deren Ansiedlung in einer Modellregion naheliegend wäre und die die Wirtschaftskraft des Rheinischen Braunkohlerevierts nachhaltig stärken könnten.

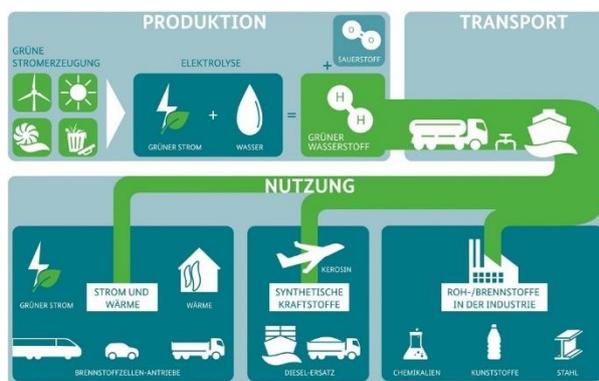


Abbildung 1: Produktion, Transport und Nutzung von grünem Wasserstoff [1]

Neben grünem Wasserstoff gibt es, je nach Ursprung des kleinen Moleküls, in der Farbenlehre des Wasserstoffs unter anderem blau und grau [2]. Unabhängig von dem Ursprung steht jedoch jeder Weg vor dem gleichen Problem:

Wo kann der Wasserstoff zwischengespeichert und wie transportiert werden?

Und hier drängt sich eine bereits vorhandene Infrastruktur als offensichtliche Lösung auf: Das Erdgasnetz und dessen bewährte Infrastruktur.

## Das Erdgasnetz und Wasserstoff

Eine Einspeisung des Wasserstoffs als Form von Speicherung elektrischer Energie bringt einige Vorteile mit sich, aber auch einige Problematiken, die nicht ohne Weiteres umgangen werden können. Als Brückenlösung auf dem Weg zu einer Infrastruktur, die zu großen Teilen Wasserstoff als Energieträger oder Edukt chemischer Reaktionen verwendet, überwiegt der Nutzen hier allerdings eindeutig. Somit bleiben Kapazitäten an zugebauten, regenerativen Energieträgern sowie Elektrolyseuren nicht ungenutzt, sondern werden vermehrt ausgenutzt. Allerdings ist die Einspeiserate von Wasserstoff und dessen lokale maximale Konzentration stark begrenzt, unter anderem auf Grundlage der Regelungen für erdgasbetriebene Fahrzeuge [3]. Grund hierfür ist der immense Einfluss, den Wasserstoff auf die Gasqualitäten des Erdgases hat, welche üblicherweise zur Charakterisierung und Klassifizierung genutzt werden.

## Einfluss auf Gaseigenschaften

Zu erwähnen sind hier besonders der volumetrische Heizwert, der Sauerstoffbedarf, die Dichte und die Explosionsgrenzen. Alle der exemplarischen Gaseigenschaften und deren Änderung bewirken an unterschiedlichen Stellen innerhalb der Erdgasversorgung (negative) Veränderung.

Ein sinkender volumetrischer Heizwert bedeutet einen sinkenden Energieinhalt, der aus der Verbrennung des Energieträgers gewonnen werden kann. Somit muss für einen Endverbraucher mehr Volumen Erdgas bezogen werden, um den gleichen Energieoutput zu erhalten, was in erster Linie einen Kostenfaktor darstellt. Außerdem kann ein, je nach Wasserstoffgehalt, steigender Gasbedarf und -output einen Druckabfall innerhalb der Erdgasleitungen erzeugen. Ein sinkender Sauerstoffbedarf bei der Verbrennung von Gasgemischen mit Wasserstoff bedeutet, im Vergleich zu konventionellem Erdgas, in erster Linie einen Effizienzverlust von Verbrennern. Die Verbrennungsluft, die gefördert und in vielen Fällen vorgewärmt wird, wird somit zu immer

größeren Teilen mit dem Abgas wieder abgeführt, ohne zur Verbrennung benötigt worden zu sein. Außerdem bedeutet ein steigender Wasserstoffanteil im Erdgas eine geringere Dichte, da Wasserstoff, als leichtes Molekül auch hier einen großen Einfluss auswirkt, vor allem im Vergleich zu den verhältnismäßig schweren Kohlenwasserstoffen, wie sie sonst im Erdgas vorhanden sind. Dies führt vor allem zu Veränderungen der Verbrennungseigenschaften und einem vergrößerten Quotienten zwischen Brenngas und Verbrennungsluft. Neben diesen technisch relevanten Beispielen ändert sich allerdings noch eine weitere, sicherheitstechnisch relevante Größe: Die Explosionsgrenze. Besonders zu erwähnen ist hier die obere Grenze, da die untere Explosionsgrenze von Wasserstoff, reinem Methan und Wasserstoff/Methan Gemischen nahezu identisch sind. Allerdings wird die obere Grenze durch H<sub>2</sub>-Anreicherungen weiter nach oben geschoben.

	Einfluss H <sub>2</sub>	Effekt
vol. Heizwert	sinkt	weniger Energieinhalt
Sauerstoffbedarf	sinkt	Effizienzverlust
Dichte	sinkt	Problematik Verbrenner
Explosionsgrenze (obere)	steigt	Sicherheitsbedenken

Tabelle 1: Einfluss steigender H<sub>2</sub>-Konzentrationen auf die Erdgasqualität

Ohne die Kenntnis der Wasserstoffkonzentration im Erdgas und der damit einhergehenden, schnellen Justierung der Endgeräte, kann es zu hohen Effizienzverlusten und Beschädigungen an Gerätschaften kommen. Wie schon viele Studien gezeigt haben, kann dies mit passender Justierung verhindert werden, wozu allerdings die Konzentration des Wasserstoffs im Erdgas bekannt sein muss [4]. Dies führt nun zu der Herausforderung, ein flexibles, schnell ansprechendes und kleines Messgerät zu entwickeln.

### Wasserstoffkonzentrationen messen

Während viele Messverfahren zur Bestimmung der Gasqualität von Erdgas auf Infrarotspektroskopie beruhen, müssen diese bei signifikanten Wasserstoffkonzentrationen mit anderen Messtechniken erweitert werden, da Wasserstoff als gleichatomares Molekül mit Infrarotstrahlen nicht detektierbar ist. Eine Möglichkeit dieses Problem zu umgehen, liegt nun in der Messung von unterschiedlichen

## Prof. Dr. Christiane Vaeßen, Region Aachen Zweckverband

Strukturwandel wie der im Rheinischen Revier ist immer Gemeinschaftsaufgabe. Der Blick aus verschiedenen Perspektiven und interdisziplinäres Arbeiten sowie Forschen sind Grundlage für nachhaltiges Wirtschaften und geschlossene Kreisläufe. Das führt zu einer erfolgreichen und lebenswerten Gesellschaft in der Zukunft.

Die Region Aachen – inmitten einer Jahrhundert-Transformation – begrüßt deshalb interdisziplinäre Ansätze wie die des ITZ CC und der DS CCCE an der Ruhr-Universität Bochum.

Stoffgrößen, wie beispielsweise Dichte, Schallgeschwindigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität und Permittivität.

Durch die vielen unterschiedlichen Komponenten, die sich im Erdgasnetz befinden, ergibt sich jedoch eine fast unendliche Anzahl an Möglichkeiten die Zusammensetzung auf Basis einzelner Messdaten zu bestimmen. Deswegen muss das Messprinzip mehreren Regeln folgen, um den messtechnischen Aufwand so gering wie möglich zu halten, aber das Ergebnis so genau wie möglich zu erhalten. So sollten die betrachteten Messgrößen beispielsweise unabhängig voneinander sein. Außerdem ist es von klarem Vorteil, wenn die übrigen Komponenten die ausgewählten Messgrößen in die entgegengesetzte Richtung beeinflussen. Rein sensitive Systeme, um die unbekanntes Wasserstoffkonzentrationen zu bestimmen, sind zwar kommerziell erhältlich, bedürfen jedoch knappen Wartungsintervallen und hohen Investitionen, da diese meist aus Edelmetallen wie Platin bestehen. Eine einfache Wasserstoffbestimmung ist damit also nicht ohne Weiteres möglich.

Durch eine Kombination von zwei oder mehr Messgrößen in unterschiedlichen Temperatur- und Druckbereichen wird die Wasserstoffkonzentration

ausreichend zuverlässig berechenbar. So führt eine Kombination von der thermischen Wärmeleitfähigkeit sowie der Schallgeschwindigkeit des Gasgemisches in zwei unterschiedlichen Zustandspunkten mit einem Druckgradienten von mindestens 30 MPa zu einer erfolgreichen, korrelativen Bestimmung des Wasserstoffgehalts innerhalb einer Toleranz von  $\pm 2$  Vol.-%. Um den Druckgradienten nach Möglichkeit zu umgehen, da die Konzentrationen direkt beim Verbraucher gemessen werden sollte, wird das System um ein optisches Messverfahren erweitert. In Frage kommen hierfür unter anderem Infrarotmesstechnik oder Raman-Spektroskopie, wobei mit Hilfe von ersterem die Gaszusammensetzung ohne Wasserstoff aufgeschlüsselt und mit einem weiteren Verfahren kombiniert wird. Mittels Raman-Spektroskopie ist der Wasserstoffgehalt sensitiv detektierbar, benötigt allerdings noch mindestens eine weitere Messgröße, um die übrigen Bestandteile zu quantifizieren. Im Vergleich zur Infrarotspektroskopie steigen mit der Raman-Spektroskopie jedoch technischer Aufwand und somit sowohl Kosten, als auch Größe eines potentiellen Messgerätes zur Messung der Wasserstoffkonzentration.

#### **Ausblick**

Der nächste Schritt innerhalb des Promotionsprojektes ist die Analyse mit welchem optischen Verfahren das bestehende Prinzip erweitert werden kann. Darüber hinaus wird die experimentelle Umsetzung und Verifizierung des Verfahrens, welches aktuell auf der Messung von thermischer Leitfähigkeit und Schallgeschwindigkeit von dem Multikomponentengemisch Erdgas basiert, angestrebt. Demnach bestehen die nächsten Anforderungen darin, das vorhandene Modell um eine spektroskopische Messgröße zu erweitern, experimentell zu verifizieren und, sofern möglich, nicht nur die Wasserstoffkonzentration bestimmen, sondern auch die übrigen Komponenten des Gasgemisches über korrelative Berechnungen quantifizieren zu können. In diesem Rahmen werden Unsicherheiten der Ergebnisse so weit toleriert, dass eine Berechnung der relevanten Gasqualitäten innerhalb der Unsicherheiten liegen, wie sie innerhalb der Erdgasinfrastruktur, auch ohne Wasserstoffzugabe, toleriert und einkalkuliert werden.

#### **Referenzen**

[1] Der Weg des Wasserstoffs – Projektträger Jülich im Auftrag des BMBF (<https://www.fona.de/de/aktuelles/nachrichten/2020/nationale-wasserstoffstrategie-verabschiedet.php>) (Stand 30.03.22)

### Bodo Middeldorf, Zukunftsagentur Rheinisches Revier, Geschäftsführer

Sehr geehrte Damen und Herren,

das Rheinische Revier steht mit dem Ausstieg aus der Braunkohle und der Transformation zu einem klimaneutralen Industriestandort vor einer immensen Aufgabe. Bei ihrer Bewältigung setzen wir auf innovative Lösungen und den Einsatz interdisziplinärer Kompetenz. Die Promotionsprojekte im Rahmen der Closed Carbon Cycle Economy leisten hierzu einen wichtigen Beitrag. Fragen etwa zur Akzeptanz des Strukturwandels oder zur Effektivität von Innovationsnetzwerken liefern Erkenntnisse für eine zielgerichtete Ausgestaltung der Transformationsprozesse. Im Gegenzug gelingt über die Zusammenarbeit zugleich der Abgleich von Theorie und Praxis. So stimulieren sich Denken und Tun gegenseitig, um gemeinsam die Region in eine sichere und lebenswerte Zukunft zu führen. Wir danken daher allen Doktoranden, die sich mit uns auf den Weg zur Entwicklung und Umsetzung neuer technologischer und gesellschaftlicher Impulse im Rheinischen Revier machen.

Mit besten Grüßen

Bodo Middeldorf

- [2] Horng, P.; Kalis, M.; IKEM-Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V.: Wasserstoff-Farbenlehre; Kurzstudie, 2020.
- [3] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen: Regulierung von Wasserstoffnetzen-Bestandsaufnahme, 2020.
- [4] Müller-Syring, G.; Henel, M.: Wasserstofftoleranz der Erdgasinfrastruktur inklusive aller assoziierter Anlagen; DVGW Abschlussbericht (DE), 2014.

## STEUERUNG VON FOLGENUTZUNGEN IN EHEMALIGEN BRAUNKOHLEREVI- REN MITTELS RAUMORDNUNG UND BAULEITPLANUNG: RECHTLICHE MÖG- LICHKEITEN UND GRENZEN

**Moritz Klanten**

*Prof. Klaus Joachim Grigoleit, Institut für Berg- und Energierecht, Ruhr-Universität Bochum /  
Fachgebiet für Raumplanungs- und Umweltrecht, TU Dortmund*

*Prof. Christian Pielow, Institut für Berg- und Energierecht / Recht der Wirtschaft, Ruhr-Univer-  
sität Bochum*

**G**anz im Sinne einer Closed Carbon Cycle Economy heißt es im Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und der FPD: „Wir machen es zu unserer gemeinsamen Mission, den Ausbau der Erneuerbaren Energien drastisch zu beschleunigen und alle Hürden und Hemmnisse aus dem Weg zu räumen“. Eine drastische Beschleunigung erscheint dabei auch dringend nötig. Vor dem Hintergrund der aktuellen Ereignisse in Osteuropa ist es nicht mehr „nur“ der Klimawandel, der die Energiewende so dringlich macht, vielmehr kommt nun auch noch eine veritable Krise der Versorgungssicherheit hinzu.

Erneuerbare Energien können hier der Ausweg sein. Das Recht erweist sich dabei als Ermöglicher und Bremsen zugleich. Eine – wie im Koalitionsvertrag vorgesehene – Solarpflicht ist sicher ein wichtiger Schritt hin zu geschlosseneren Kohlenstoffkreisläufen; die umfangreichen und zeitintensiven Planungs- und Genehmigungsprozesse im Rahmen des Windenergieausbaus dürften dagegen eher strangulierende Wirkung haben und einer Closed Carbon Cycle Economy entgegenstehen.

Mit einem dritten – gleichsam verwandten – Aspekt beschäftigt sich das Dissertationsvorhaben des Verfassers. Denn die Fokussierung auf Erneuerbare Energien hat gleichzeitig zur Folge, dass die



*Abbildung 1: Energie im Wandel – traditionelle Energieerzeugungsmodelle treten immer mehr in den Hintergrund. (Quelle: pixabay)*

Energieerzeugung mithilfe fossiler Brennstoffe zurückgefahren wird. Dieser Wandel betrifft ganz besonders das Rheinische Braunkohlenrevier. Der jahrhundertlange Abbau von Braunkohle soll in naher Zukunft weitgehend zum Erliegen kommen. Die Folgen für die Region sind immens – die Anstrengungen des Staates, negative Folgen durch finanzielle Hilfen abzufedern, sind es ebenfalls.

Doch durch Geld allein wird der Strukturwandel nicht gelingen. Daneben ist vielmehr eine planvolle Steuerung des Transformationsprozesses



*Abbildung 2: Gelebte Energietransformation - im Vordergrund ein Schaufelradbagger und der Abbau fossiler Energieträger, im Hintergrund eine Windkraftanlage zur Nutzbarmachung Erneuerbarer Energien. (Quelle: pixabay)*

notwendig. Die Dissertation mit dem Titel „Steuerung von Folgenutzungen in ehemaligen Braunkohlerevieren mittels Raumordnung und Bauleitplanung; Rechtliche Möglichkeiten und Grenzen“ greift dies auf. Denn nur mithilfe einer – gegebenenfalls an die Herausforderungen angepassten – Raumordnung und Bauleitplanung kann der Transformationsprozess zum Erfolg werden.

### **Steuerung mittels Raumordnung und Bauleitplanung**

Die Raumordnung und die Bauleitplanung sind zentrale Planungs- und Steuerungsinstrumente des Staates. Mit ihrer Hilfe werden Räume überfachlich – also nicht nur im Hinblick auf bestimmte Fachmaterien – betrachtet und die Nutzungen innerhalb der Räume gesteuert und koordiniert.

Die Raumordnung behandelt die „überörtliche“ Planungsebene. Ihre Steuerungswirkung entfaltet sie maßgeblich über Raumordnungspläne. Diese Pläne werden gemäß § 7 Abs. 1 S. 1 Raumordnungsgesetz (ROG) für „einen regelmäßig mittelfristigen Zeitraum“ aufgestellt, d.h. für einen Zeitraum von etwa zehn bis 15 Jahren. Im Rahmen des Landesentwicklungsplans wird dabei der gesamte „Raum“ Nordrhein-Westfalen betrachtet und einer (vergleichsweise groben) Steuerung zugeführt. Die Regionalpläne wiederum werden aus dem Landesentwicklungsplan entwickelt und steuern und koordinieren auf dessen Grundlage die Nutzungen in einer bestimmten Region. Die Regionalpläne sind detailreicher als der Landesentwicklungsplan, aber auf engere Räume begrenzt.

Die „örtliche“ Ebene wird über die Bauleitplanung abgebildet. Auch hier entfalten Pläne steuernde Wirkung – zu nennen sind insbesondere der Flächennutzungsplan (ein Plan für das gesamte Gemeindegebiet) sowie die hieraus zu entwickelnden

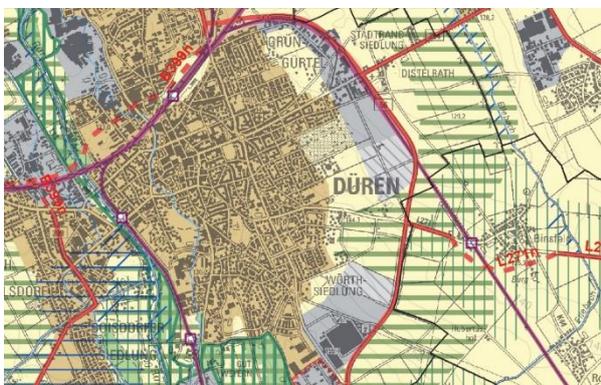


Abbildung 3: Zeichnerische Festlegungen in einem Regionalplan (Regionalplan Köln, [https://url.nrw/bet\\_rpk](https://url.nrw/bet_rpk)).

Bebauungspläne. Mit den Bebauungsplänen werden einzelne Bereiche des Gemeindegebiets betrachtet und präzise Vorgaben für Vorhaben im jeweiligen Planungsbereich getroffen (bspw. über die Dachneigung eines Hauses oder die Art der baulichen Nutzung).



Abbildung 4: Ausschnitt aus einem Bebauungsplan (Stadt Düren, [www.dueren.de](http://www.dueren.de)).

### **Die stockende Planungskaskade**

Damit die Pläne der verschiedenen Planebenen – die zudem noch von verschiedenen Akteuren erlassen werden – nicht konträr zueinanderstehen, sondern zusammen ein kohärentes Planungsgefüge ergeben, sind die verschiedenen Pläne aufeinander abzustimmen. Das Bundesverwaltungsgericht spricht in diesem Zusammenhang auch von einer „Abfolge von Planungsentscheidungen auf Bundes- und Landesebene mit fortschreitender Verdichtung bis hin zu konkreten Festsetzungen auf Gemeindeebene“ (BVerwG, Urt. v. 29.4.2010 – 4 CN 3/08, BVerwGE 137, 38, 43). Zu Recht kann deshalb von einer „Planungskaskade“ gesprochen werden.

Diese Planungskaskade ist im Rheinischen Revier gestört. Denn bei der dortigen Transformation handelt es sich gerade nicht um einen langsamen, natürlichen Prozess, der sich über kaskadierende Pläne abbilden lässt. Die politisch angestoßene Transformation soll sich vielmehr in einem vergleichsweise kurzen Zeitraum vollziehen. Die entscheidenden Planwerke können aufgrund des Zeithorizonts nicht nacheinander, sondern müssen vielmehr nebeneinander errichtet werden. In diese „formelle“ Planung sollen dabei auch Erkenntnisse aus „informellen“ Planungsprozessen Eingang finden, also etwa Impulse aus Beteiligungsformaten der Zukunftsagentur Rheinisches Revier GmbH oder Anregungen von Akteuren wie der NEULAND HAMBACH GmbH.

Hinzukommt, dass mit den Braunkohlenplänen ein für das Rheinische Revier spezifischer Raum-

## Boris Linden, NEULAND HAMBACH GmbH

Die Raumplanung im Rheinischen Revier kann mit dem Kohleausstieg nicht einfach linear fortgeschrieben werden. Die Prozesse werden komplexer, weil die Planung interkommunal abzustimmen, mit übergeordneten Planungsträgern zu verschränken und im Sinne der Nachhaltigkeit auf die Zukunft auszurichten ist. Die Menschen vor Ort sind heute stärker zu beteiligen. Gleichzeitig müssen die Prozesse insgesamt beschleunigt, agiler und flexibler werden. Planung ist neu zu denken und zu formatieren: technisch, rechtlich, organisatorisch, kulturell.

ordnungsplan besteht, dessen Verhältnis zur Regionalplanung noch nicht vollends geklärt ist. Und selbst wenn die simultane Planung gelingt, stellt sich noch das besondere Problem des Zeithorizonts.



Abbildung 5: Der Hambach-Loop – Vorschlag der NEULAND HAMBACH GmbH als ein Beispiel „informeller“ Planungsprozesse (Bild: bgmr Landschaftsarchitekten).

### Ausgewählte Literatur

Grigoleit/Engelbert/Strothe/Klanten: Booster für die Windkraft, NVwZ 2022, S. 512

Grigoleit/Klanten: Die Anwendung des § 43f EnWG auf nicht planfestgestellte Bestandsleitungen, RdE 2022, i.E.

Grigoleit/Klanten: #HambiBleibt – Paukenschlag des VG Köln?, NWVBl. 2022, S. 144

Grigoleit/Klanten: Möglichkeiten einer Solarpflicht, NVwZ 2022, S. 32

Grigoleit/Klanten: Die Zulassung von Änderungen im Anzeigeverfahren nach § 43f EnWG, EnWZ 2020, S. 435

Denn insbesondere die Raumordnungspläne sind auf lange Zeiträume ausgelegt (vgl. hierzu auch § 38a Landesplanungsgesetz NRW). Zukünftige Entwicklungen müssen also prognostiziert werden und diese Prognosen Eingang in die Planung finden. Im Rahmen des extrem dynamischen Transformationsprozesses ist allerdings Vieles noch nicht genau absehbar. Der Erlass von Planwerken für „regelmäßig mittelfristige“ Zeiträume wird damit noch zusätzlich erschwert.

### **Rechtliche Möglichkeiten und Grenzen**

Diese Probleme werden im Rahmen der Dissertation behandelt. Sie soll dabei „rechtliche Möglichkeiten und Grenzen“ in zweierlei Hinsicht aufzeigen.

Zum einen werden die Raumordnung und Bauleitplanung einer tiefgehenden rechtlichen Analyse unterzogen und die bereits skizzierten Herausforderungen auf kurz- bis mittelfristige Lösungen untersucht. Stellt das Bundes- und/oder das Landesgesetz bereits geeignete Instrumente zur Verfügung, um die angesprochenen Probleme zu bewältigen? Ist etwa die landesplanerische Experimentierklausel nach § 38 Landesplanungsgesetz NRW sinnvoll und zielführend? Oder bedarf es – und hierfür spricht nach dem Stand der derzeitigen Analyse viel – eines korrigierenden bzw. flexibilisierenden Eingriffs des Gesetzgebers?

Zum anderen werden durch den Transformationsprozess die Sollbruchstellen unseres Planungssystems offenbart. Punktgenaue „Feinjustierungen“ mögen das bestehende System ertüchtigen. Einige strukturelle Herausforderungen lassen sich hierdurch aber allenfalls kaschieren, nicht aber beheben. Massive Transformationsprozesse wie im Rheinischen Revier dürften in Zukunft – gerade vor dem Hintergrund des demographischen Wandels und der Klimakrise – aber eher zu- als abnehmen. Kann sich vor diesem Hintergrund nicht eine strukturelle Anpassung des Planungsrechts empfehlen?

Die vorstehenden Ausführungen zeigen: Der Transformationsprozess bedarf kluger Weichenstellungen und vorausschauenden Handelns. Ob sich die Raumordnung und die Bauleitplanung in diesem Zusammenhang bewähren, bleibt abzuwarten.

icae

International Conference on Applied Energy



Bochum · Germany

14<sup>th</sup>

International Conference  
on Applied Energy

Aug. 8-11, 2022

[www.applied-energy.org/icae2022](http://www.applied-energy.org/icae2022)

### Welcome to ICAE2022, the 14<sup>th</sup> International Conference on Applied Energy!

With about 800 participants, ICAE2021 was held online in November 2021 due to Covid restrictions. For 2022 we trust in the success of the international vaccination campaigns and in low incident numbers in summer – the 14<sup>th</sup> ICAE is planned as hybrid conference at Ruhr University Bochum, Germany, on August 8 – 11, 2022. On-site participation is preferred. Excursions are foreseen for August 12<sup>th</sup>. The theme of ICAE2022 is “Closing Carbon Cycles – A Transformation Process Involving Technology, Economy, and Society”. ICAE2022 will include keynotes and invited speeches, plenary sessions, dedicated workshops, and oral and poster presentations on various topics. The list of topics relevant to the conference includes (but is not limited to):

- Renewable Energy
- Clean Energy Conversion Technologies
- Mitigation Technologies
- Intelligent Energy Systems
- Energy Storage
- Energy Sciences
- Energy Ethics, Policy, Economics & Regulations

As special topic of the 14<sup>th</sup> ICAE, Transformation Processes in Power Supply, Raw Material Supply, and Urban Structures will be addressed.

#### Key Dates : extended to May 26<sup>th</sup>

- Deadline for draft short papers: ~~May 12<sup>th</sup>~~, 2022
- Feedback on review: June 16<sup>th</sup>, 2022
- Revised short papers due: June 30<sup>th</sup>, 2022
- Final notification of acceptance: July 7<sup>th</sup>, 2022
- Final program online: July 25<sup>th</sup>, 2022
- Registration open: February 26<sup>th</sup>, 2022
- End of early bird registration: June 9<sup>th</sup>, 2022
- Final chance to change mode of participation: July 1<sup>st</sup>, 2022
- Closure of online registration: August 1<sup>st</sup>, 2022
- Conference: August 8<sup>th</sup> – 11<sup>th</sup>, 2022

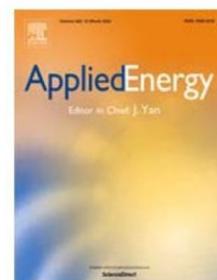
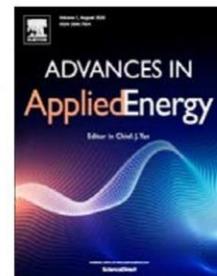
All papers will be peer-reviewed. Accepted short papers will be published in Energy Proceedings ([www.energy-proceedings.org](http://www.energy-proceedings.org)) and need to be presented orally or as poster at the conference. Selected papers from ICAE2022 will be recommended for further consideration of publication of extended versions in prestigious journals including Applied Energy and Advances in Applied Energy.

For more information please visit [www.applied-energy.org/icae2022](http://www.applied-energy.org/icae2022) or contact [icae2022@applied-energy.org](mailto:icae2022@applied-energy.org). Please contact us if you would like to propose and organize a session, a panel, a workshop, or a special forum at the conference.

We look forward to meeting you at ICAE2022 in Bochum!

Prof. R. Span, Chair of the 14<sup>th</sup> ICAE and

Prof. J. Yan, Co-Chair of the 14<sup>th</sup> ICAE



**CALL FOR PAPERS**  
Deadline for Draft Papers  
**May 26<sup>th</sup>, 2022**

## FLEXIBILISIERUNG DER STROMPRODUKTION DURCH VARIABLE BIOGASPRODUKTION

Matthias Körber

Prof. Roland Span, Lehrstuhl für Thermodynamik, Ruhr-Universität Bochum

Prof. Mandy Gerber, Fachbereich für Mechatronik und Maschinenbau, Hochschule Bochum

Der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromproduktion in Deutschland nimmt stetig zu. Die große Herausforderung der nächsten Jahre ist es, diese Entwicklung fortzuführen und gleichzeitig Strategien zum Ausgleich der Fluktuation von Wind- und Solarenergie zu entwickeln. Neben verschiedenen Speichertechnologien kann auch die bedarfsgerechte Produktion von Biogas einen Teil dazu beitragen. Diesen Ansatz, der Betreibern von Biogasanlagen ermöglichen könnte auf Gasspeichererweiterungen zu verzichten, schätzt auch die Bundesregierung als erfolgsversprechend ein, was durch eine verstärkte Förderung der flexiblen Biogaserzeugung in der neuen Auflage des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG 2021) widerspiegelt wird. Dabei kann Strom aus Biogas nicht nur ins Netz eingespeist werden; Biogas bietet auch die Möglichkeit dezentral als Ausgleichsenergieträger eingesetzt zu werden, beispielsweise in einer energieautarken Kommune.

Um die bedarfsorientierte Biogasproduktion experimentell und praxisnah zu untersuchen, wurde die Residuallast der realen Kommune Simris (Schweden, Daten von Rosvall *et al.*, 2020) als Basis für die Anpassung der Biogasproduktion gewählt. Diese Kommune strebt Stromautarkie an und bezieht elektrische Energie derzeit aus einem Windrad und einer Solaranlage. Übersteigt der Stromverbrauch der Kommune die Produktion, wird Energie aus dem Netz bezogen, bei Überschuss wird Energie eingespeist. Eine flexibel betriebene Biogasanlage, in Kombination mit einem kleinen Energiespeicher,

bietet die Möglichkeit unabhängig vom Netz und damit von fossilen Ausgleichsenergieträgern zu sein, wie in Abbildung 1 dargestellt.

In bisherigen Untersuchungen zur bedarfsgerechten Biogaserzeugung wurde meist versucht Tageslastprofile abzufahren. Um reale Residuallasten durch Biogas ausgleichen zu können, ist jedoch eine unregelmäßige Biogasproduktion notwendig. Da es Hinweise gibt, dass sich die Mikroorganismen an regelmäßige Belastung anpassen können (Golkowska *et al.*, 2012), ist es von Bedeutung zu beobachten, ob sie dazu auch bei stark schwankenden Belastungen imstande sind.

Um die Biogasproduktion zu flexibilisieren, müssen Substrate mit unterschiedlichen Abbaukinetiken gezielt eingesetzt werden. Als schnell abbaubares Substrat eignet sich dafür die Zuckerrübe, deren Anbau im Rheinischen Revier durch die dort ansässige Zuckerindustrie weit verbreitet ist. Auch Abfallprodukte aus der Zuckerindustrie sind denkbar. Wechselnde Substrate und Raumbelastungen führen jedoch zu Beanspruchungen der Biozönose, was in Instabilitäten und Prozesshemmungen resultieren kann. Die Herausforderung besteht also darin den durch die Residuallast vorgegebenen Gasbedarf möglichst gut abzudecken und dabei einen stabilen Prozess sicherzustellen.

### Experimentelle Untersuchungen

Die Flexibilisierung der Biogasproduktion wird an drei identischen Rührkesselreaktoren ( $V = 40 \text{ L}$ ) bei einer Temperatur von  $39 \text{ °C} (\pm 1 \text{ °C})$  untersucht.

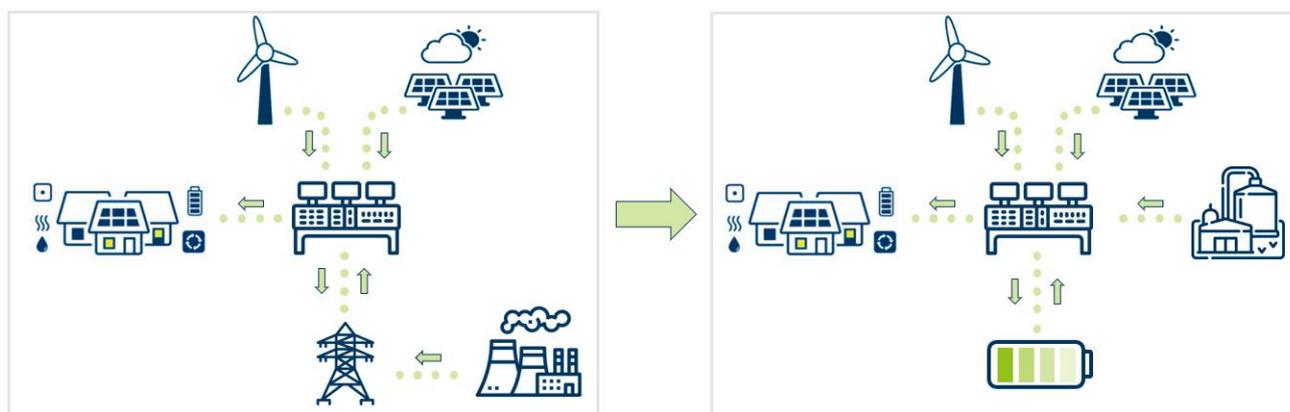


Abbildung 1: Realisierung einer stromautarken Kommune mithilfe einer Biogasanlage und eines Energiespeichers.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft einen der eingesetzten Versuchsreaktoren inkl. Steuerungseinheit. Um die Agglomerate der verschiedenen symbiotischen Mikroorganismen nicht zu beeinträchtigen, werden die Reaktoren bei langsamen Rührgeschwindigkeiten durchmischt. Als Substrate werden Maissilage und Zuckerrüben eingesetzt. In Übereinstimmung mit dem im EEG 2021 vorgegebenen Maisdeckel, beträgt der Anteil von Maissilage im Substratmix maximal 40 %. Zusätzlich wird bei Bedarf Rindergülle hinzugegeben, um die Fließfähigkeit zu erhalten. Die entstandenen Gasmengen werden mithilfe von Trommelgaszählern aufgezeichnet. Die Prozessstabilität wird durch Analysen der Gaszusammensetzung, der Pufferkapazität (FOS/TAC) und des pH-Wertes sowie der Konzentrationen verschiedener Fettsäuren (VFA) überwacht.

### Ausgewählte Ergebnisse

Ein Ausschnitt der Ergebnisse einer Versuchsreihe ist in Abbildung 3 zu sehen. Die Biogasproduktion der Versuchsanlagen konnte dabei gut an die Residuallast der Kommune angepasst werden. Aufgrund der biologischen Trägheit des Prozesses und der hohen Fluktuation der Residuallast, ist eine exakte Übereinstimmung von Bedarf und Produktion nicht möglich und auch nicht angestrebt. Abweichungen können in der Praxis über den internen Gasspeicher, über den fast jede Anlage verfügt, ausgeglichen werden. Die Substratzugaben, die in Abbildung 3 ebenfalls dargestellt sind, wurden mithilfe eines kinetischen Modells und eines Optimieralgorithmus bestimmt. Dazu wurde das Modell anhand von Messdaten der Vorwochen parametrisiert. Anschließend wurden die Substratzugaben mithilfe eines nichtlinearen Optimierungsverfahrens so bestimmt, dass die Abweichung zwischen berechneter Gasproduktion und Gasbedarf minimal ist. Diese Vorgehensweise erleichtert in der Praxis die Betriebsführung von dynamisch betriebenen Biogasanlagen.

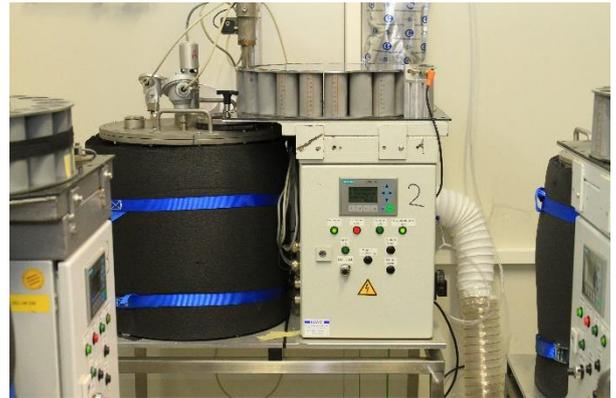


Abbildung 2: Versuchsreaktor mit Steuerungseinheit.

Prozesshemmungen deuten sich zunächst in steigenden Fettsäurekonzentrationen an. Anschließend ist ein erhöhter FOS/TAC-Wert bemerkbar, bevor der pH-Wert sinkt und sich die Hemmung negativ auf Methananteil und Gasproduktion auswirkt. Durch die zeitweisen hohen Belastungen traten vereinzelt erhöhte VFA- und FOS/TAC-Werte auf. Diese wurden jedoch in Zeiten niedriger Belastung rasch wieder abgebaut, wodurch die Prozessstabilität zu keinem Zeitpunkt beeinträchtigt war. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die bedarfsorientierte Biogaserzeugung mit Hilfe eines einfachen kinetischen Modells gut realisiert werden konnte und der untersuchte Prozess eine hohe Resilienz gegenüber Hemmungen aufweist.

### Referenzen

- Golkowska, K.; Sibisi-Beierlein, N.; Greger, M. (2012), Kinetic Considerations on Thermophilic Digestion of Maize Silage at Different Feeding Modes. *Chemie Ingenieur Technik*, 84(9), 1551–1558.
- Rosvall, J.; Jansson, S.; Carlström, H.; Ekerlund, K. (2020), INTERFLEX - EON (SWE) open access data: Zenodo

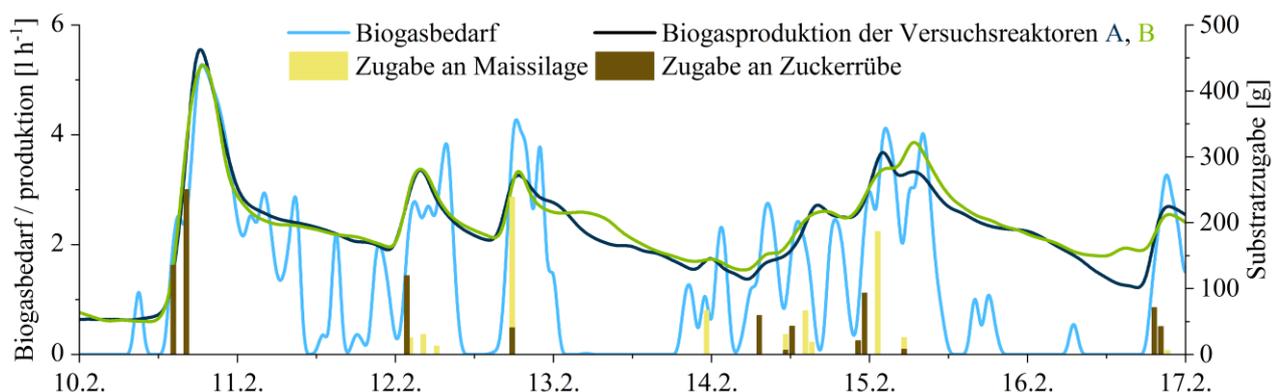


Abbildung 3: Biogasbedarf basierend auf der Residuallast der Kommune Simris im Februar 2019, Biogasproduktion der Laborreaktoren sowie Substratzugaben.

## STEUERUNG VON FOLGENUTZUNGEN IN EHEMALIGEN BRAUNKOHLEREVIEREN MITTELS FACHPLANUNG UND -GENEHMIGUNG

Laura Kühn

*Prof. Johann-Christian Pielow, Institut für Berg- und Energierecht, Ruhr-Universität Bochum*

*Prof. Klaus Joachim Grigoleit, Raumplanungs- und Umweltrecht, TU Dortmund*

Am 14.8.2020 trat das Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung (Kohleverstromungsbeendigungsgesetz – KVBG) in Kraft<sup>1</sup>. Als Hauptbestandteil des Kohleausstiegsgesetzes regelt es die schrittweise und möglichst stetige Reduzierung und Beendigung der Erzeugung elektrischer Energie durch den Einsatz von Kohle in Deutschland, so § 1 Abs. 1 S. 2 KVBG. Folge dieser politischen Entscheidung und Inhalt weiterer Regelungen des KVBG ist die Stilllegung der Kohlekraftwerke bis spätestens 2038, § 2 Abs. 2 KVBG. Hinsichtlich der Braunkohlenanlagen bedeutet dies zudem die Einstellung des Bergbaubetriebes in den diesen vorgelagerten und sie beliefernden Braunkohletagebauen, denn die dort gewonnene Braunkohle ist nicht anderweitig absetzbar („Verbundsystem Braunkohle“<sup>2</sup>). Als besonders raum- und bodenintensive Vorhaben unterliegen die nordrhein-westfälischen Braunkohletagebaue einer ebenso komplexen wie langfristig angelegten Planungskaskade des Raum- und Fachplanungsrechts, die die Einstellung des Bergbaubetriebes und die Entstehung einer Bergbaufolgelandschaft in Form einer Rekultivierung oder Renaturierung einschließt und eine Fülle an Rechtsproblemen mit sich bringt.

Vor diesem Hintergrund möchte das Dissertationsvorhaben das Verhältnis zwischen der Einstellung der verbliebenen drei Braunkohletagebaue des Rheinischen Reviers (Inden, Hambach und Garzweiler II) und der für die Tagebaue angedachten sog. Folgenutzungen unter planungsrechtlichen Gesichtspunkten untersuchen.

### **Die Einstellung des Bergbaubetriebes und Tagebaufolgenutzungen**

Bergbaubetriebe dürfen nur auf Grund von Plänen (Betriebsplänen) errichtet, geführt und eingestellt werden, die vom Unternehmer – im Rheinischen Revier die RWE Power AG – aufgestellt und von der zuständigen Behörde zugelassen worden sind, § 51 Abs. 1 S. 1 Bundesberggesetz (BBergG). Für die Einstellung eines Betriebes ist ein Abschlussbetriebsplan aufzustellen, § 53 Abs. 1 S. 1 BBergG. Voraussetzung für die Zulassung desselbigen ist u.a., dass

die Wiedernutzbarmachung der Oberfläche in der vom einzustellenden Betrieb in Anspruch genommenen Fläche sichergestellt sein muss, § 55 Abs. 2 Nr. 2 BBergG.

Das BBergG definiert die Wiedernutzbarmachung als die ordnungsgemäße Gestaltung der vom Bergbau in Anspruch genommenen Oberfläche unter Beachtung des öffentlichen Interesses, § 4 Abs. 4 BBergG. Was jedoch konkret unter einer „ordnungsgemäßen Gestaltung“ zu verstehen ist und welche Belange unter das „öffentliche Interesse“ subsumiert werden können, ist nicht abschließend geklärt. Relevanz gewinnt die Frage indes dadurch, dass sowohl die sachliche als auch die zeitliche Reichweite der Verpflichtung zur Wiedernutzbarmachung für die Bergbauunternehmer bestimmt werden muss, um das Regime des Bergrechts enden und in das Regime der jeweiligen Folgenutzung übergehen zu lassen.



Abbildung 1: Ein Blick in die Zukunft am Tagebau Hambach - Forum :terra nova (© Zukunftsagentur Rheinisches Revier).

Der Begriff der Folgenutzung ist gesetzlich nicht definiert. Gemeint ist die Nutzung, die auf der wiedernutzbarmachten Fläche erfolgen soll<sup>3</sup>. Naheliegender erscheint die Abgrenzung anhand einer Einzelfallbetrachtung der konkret anvisierten Folgenutzungen im Rheinischen Revier vorzunehmen. Nach derzeitigem Planungsstand sind dies die Herstellung von Tagebaurestseen, forstliche Flächen inkl. Seeböschungen, landwirtschaftliche Flächen,

<sup>1</sup> Gesetz vom 8.8.2020 (BGBl. I 1818)

<sup>2</sup> WSB-Kommission, Abschlussbericht, S. 40 ff.

<sup>3</sup> Beddies, Rechtsfragen eines Bergwerkes, S. 39 ff.

Verkehrsflächen, sowie sonstige Flächen, etwa zur Entstehung von Industrie- und Gewerbegebieten<sup>4</sup>. Um derartige Flächen zu gestalten, bedarf es der Plan- und Genehmigungsverfahren der jeweiligen Fachgesetze, die es auf das Bergrecht abzustimmen und möglicherweise sogar umfassend zu steuern gilt, was die derzeitigen Rechtsregime nur in Ansätzen vorsehen.

### Steuerung der Konflikte innerhalb der Planungskaskade

Mit dem Begriff der Planungskaskade ist ein System gemeint, das mehrere Plan- und Genehmigungsverfahren für ein Vorhaben sowohl auf verschiedenen aufeinanderfolgenden Ebenen, als auch parallel bzw. quer verlaufend vorsieht.

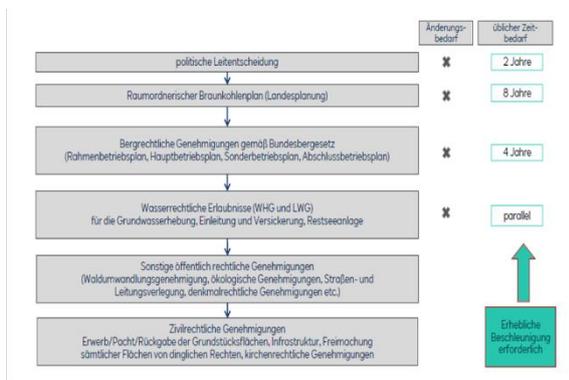


Abbildung 2: Planungskaskade für einen Bergbaubetrieb (© RWE Power AG).

Für die Einstellung der Braunkohlebergwerke im Rheinischen Revier, bedurfte es zunächst einer sog. politischen Leitentscheidung, die die nordrhein-westfälische Landesregierung am 23.3.2021 als Reaktion auf die Entscheidung des vorgezogenen Kohleausstiegs, erneut und unter Berücksichtigung der anstehenden Veränderungen in den Tagebauen, beschlossen hat. Die Rechtsnatur ist näher zu bestimmen; laut eigenen Angaben enthält sie die Vorgaben der Landesregierung für die Braunkohlenplanung und ist die landesplanerische Grundlage für die Arbeit des Braunkohlenausschusses<sup>5</sup>, der nunmehr, „auf der zweiten Ebene“ mit der Planung befasst ist.

Dies folgt aus dem nordrhein-westfälischen Landesplanungsplanungsgesetz (LPIG NRW), das in den §§ 20 ff. die Aufstellung von Braunkohlenplänen für betroffene Gebiete, wie das Rheinische Revier, vorsieht. Die Braunkohlenpläne bestehen aus textlichen

und zeichnerischen Festlegungen, die insbesondere Angaben über die Grundzüge der Oberflächengestaltung und Wiedernutzbarmachung in Abbau- und Aufschüttungsgebieten einschließlich der im Rahmen der Rekultivierung angestrebten Landschaftsentwicklung enthalten müssen, § 26 Abs. 2 S. 1, 2 LPIG NRW, demnach ebenfalls, und noch vor der Betriebsplanaufstellung durch die Bergbauunternehmen, mit der Gestaltung der Bergbaufolgelandschaft befasst sind.

Letztere sind sodann mit den Braunkohlenplänen in Einklang zu bringen, so § 29 Abs. 3 S. 2 LPIG NRW. Ob es sich bei dieser Regelung um eine umfassende Bindungswirkung handelt und wie weit diese reicht ist fraglich. Ebenso fraglich ist, ob die Braunkohlenpläne auch geeignet sein könnten um Plan- und Genehmigungsverfahren der Folgenutzungen zu binden und dadurch auf das Bergrecht abzustimmen und zu steuern.

Exemplarisch sei das Verhältnis zwischen Bergrecht und Wasserrecht bei dem Entstehen eines Tagebaurestsees genannt. Hier ist auf der einen Seite der Bergbauunternehmer zur Wiedernutzbarmachung der Oberfläche verpflichtet (s.o.). Auf der anderen Seite sieht das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) für die Herstellung eines Gewässers, wie hier des Tagebaurestsees, die Durchführung eines Planfeststellungsverfahrens seitens der zuständigen Behörde vor, §§ 67 Abs. 2 S. 1, § 68 Abs. 1 WHG. Dieses ist von einer Abwägung aller öffentlichen und privaten Belange durch die Wasserbehörde geprägt, während die Bergbehörde den von der Bergbauunternehmerin aufgestellten Betriebsplan genehmigen muss, sofern die gesetzlichen Voraussetzungen vorliegen<sup>6</sup>. Beide werden weitestgehend unabhängig voneinander durchgeführt, was zur Folge haben könnte, dass divergierende Genehmigungen bzw. Pläne vorliegen oder diese erheblich zeitversetzt oder gar nicht mehr erfolgen.

Sinnvoll erscheint daher eine Steuerung der Verfahren, sei es durch den übergeordneten Braunkohlenplan, durch die Bestimmung eines leitenden Trägerverfahrens oder die Koordination durch eine sog. „one stop agency“. Diese und weitere Möglichkeiten möchte das Dissertationsvorhaben eingehend analysieren und praxisorientiert bewerten.

<sup>4</sup> MWIDE NRW, Leitentscheidung 2021: Neue Perspektiven für das Rheinische Braunkohlerevier.

<sup>5</sup> Pressestelle des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie, Landeskabinett beschließt neue Leitentscheidung, 23.3.2021, abrufbar unter: <https://www.wirtschaft.nrw/pressemitteilung/landeskabinett-beschliesst-neue-leitentscheidung>

<sup>6</sup> Von Hammerstein, in: Boldt/Weller/Kühne/von Mäßenhausen, BBergG, Vor. § 50 Rn. 13.

### **Die besondere Problematik des vorgezogenen Ausstiegs aus der Kohleverstromung**

Der durch das KVBG festgesetzte Ausstieg aus der Kohleverstromung und die damit einhergehende Stilllegung der Kraftwerke und Braunkohletagebaue soll mindestens sieben Jahre früher stattfinden als ursprünglich geplant und genehmigt (2038 statt 2045). Die aktuelle Ampelregierung strebt einen noch weiter vorgezogenen Ausstieg aus der Kohleverstromung bis 2030 an<sup>7</sup>; der derzeit bestehende Angriffskrieg Russlands in der Ukraine und die damit einhergehenden Sorgen um die Versorgungssicherheit in der Bundesrepublik Deutschland sollen daran nichts ändern<sup>8</sup>. Das hat die Notwendigkeit der Um- bzw. Neuplanung der aktuellen Pläne, insb. bzgl. des Tagebaus Hambach zur Folge.

Technisch ist dies erforderlich, da sich das Abbau- und Tagebaufeld der Braunkohle aufgrund des Verbleibs eines erheblichen Anteils der Braunkohle in der Erde, verkleinert, was dazu führt, dass sich die Abbaugrenzen verschieben. Dies erfordert u.a. eine Anpassung der Restseelage mit einer entsprechenden Neigung der Seeböschungen, um eine dauerhafte Standfestigkeit gewährleisten zu können.<sup>9</sup>

Rechtlich folgt die Erforderlichkeit der Neuplanung aus dem zu diesem Zweck erlassenen § 30 Abs. 1 S. 3 LPtG NRW<sup>10</sup>, der i.V.m. S. 1 eine Überprüfung und ggf. Änderung des bestehenden Braunkohlenplans insb. dann vorsieht, wenn eine Entscheidung der Landesregierung vorliegt, die Nutzung der Braunkohle geordnet zu beenden und eine geordnete Gewinnung bis zum Zeitpunkt der Beendigung sicherzustellen. Eine solche stellt die o.g. politische

Leitentscheidung der nordrhein-westfälischen Landesregierung dar.

Da die Durchführung der Plan- und Genehmigungsverfahren erfahrungsgemäß bis zu 15 Jahre in Anspruch nehmen kann (vgl. Abbildung 2) ist fraglich, ob eine Beschleunigung bzw. angesichts stetiger Entwicklungen in der Energiewirtschaft und -politik, eine flexible (Neu-)Gestaltung von Plan- und Genehmigungsverfahren erforderlich ist und wie diese ausgestaltet werden könnten.

In diesem Kontext möchte das Dissertationsvorhaben abschließend sowohl die aktuelle, heißt bereits zu diesem Zweck erlassene Beschleunigungs-Gesetzgebung, insbesondere auf ihre Tauglichkeit hin bewerten. Im Vordergrund stehen sollen aber regionale Lösungen für das Rheinische Revier, wie etwa die Etablierung einer befristeten „Sonderwirtschaftszone – Braunkohle“ mit besonderem landesrechtlichen Fach- und Raumordnungsregime, das sowohl Maßnahmen zur Beschleunigung der Plan- und Genehmigungsverfahren als auch solche zur flexiblen Anpassung und Änderung dieser bereit hält, um auf etwaige politische Richtungswechsel adäquat reagieren und zugleich Rechtssicherheit vermitteln zu können.

### **Referenzen**

- Beddies, Dirk, Rechtsfragen im Zusammenhang mit der Einstellung eines Bergwerkes, Köln, Berlin, Bonn, München 1995.
- Boldt, Gerhard / Weller, Herbert / Kühne, Gunther / von Mäßenhausen, Hans-Ulrich, Bundesberggesetz Kommentar, 2. Auflage, Berlin/Boston, 2016.



Abbildung 3: Rekultivierte Inde im Jahr 2013 (© RWE Power AG).

<sup>7</sup> Mehr Fortschritt wagen – Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit, Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP), S. 58, in dem es heißt „Zur Einhaltung der Klimaschutzziele ist auch ein beschleunigter Ausstieg aus der Kohleverstromung nötig. Idealerweise gelingt das schon bis 2030.“

<sup>8</sup> BMWK, Papier: Versorgungssicherheit stärken – Abhängigkeiten reduzieren, S. 3.

<sup>9</sup> MWIDE NRW, Leitentscheidung 2021: Neue Perspektiven für das Rheinische Braunkohlerevier, S. 20.

<sup>10</sup> Artikel 1 des Gesetzes vom 8. Juli 2021 (GV. NRW. S. 904), in Kraft getreten am 16. Juli 2021.

## HERSTELLUNG KURZKETTIGER OLEFINE AUS SYNTHESGASEN

Tobias Kull

*Prof. Ulf-Peter Apfel, Anorganische Chemie I, Ruhr-Universität Bochum*  
*Prof. Martin Muhler, Technische Chemie, Ruhr-Universität Bochum*

**K**urzkettige Olefine (Oberbegriff für alle acyclischen und cyclischen Kohlenwasserstoffe mit mind. einer Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindung) sind Teil der am meisten produzierten Grundchemikalien in der chemischen Industrie. Ausgehend von diesen Stoffen werden eine Vielzahl unterschiedlichster Folgeprodukte hergestellt und in allen Bereichen des täglichen Lebens verwendet. Beispiele für Endprodukte der Produktionsketten kurzkettiger Olefine sind Kunststoffe, Lösungsmittel und Fasern, aber auch Farben und Beschichtungen. In der heutigen chemischen Industrie werden diese Grundchemikalien zumeist mittels des Cracking-Verfahrens aus Rohöl gewonnen. In diesem Verfahren werden die langen Kohlenwasserstoffketten im Rohöl durch den Einsatz hoher Temperaturen (600 – 850 °C) in kurzkettige Olefine und andere kürzere Kohlenwasserstoffe zerbrochen.<sup>1</sup> Dieser Prozess erzeugt jedoch ein breites Produktgemisch, welches nur durch aufwändige und kostenintensive Trennungsverfahren nutzbar gemacht werden kann. Außerdem verwendet das Cracking-Verfahren einen begrenzten und fossilen Rohstoff als Ausgangsmaterial, wodurch der Prozess nicht nachhaltig ist.

Ein alternativer und potenziell nachhaltiger Rohstoff für die Herstellung kurzkettiger Olefine und anderer Kohlenwasserstoffe ist Synthesegas. Dieses Gasgemisch, bestehend aus Wasserstoff ( $H_2$ ) und Kohlenmonoxid (CO) kann beispielsweise aus der Elektroreduktion von  $CO_2$  und der Wasserelektrolyse

gewonnen werden.<sup>2,3</sup> Wird das  $CO_2$  aus Abgasen anderer industrieller Prozesse gewonnen und beide Prozesse mit erneuerbaren Energien betrieben, können so sogar negative Kohlenstoffbilanzen erreicht werden. Des Weiteren ist es möglich, aus Abfällen mittels Vergasung Synthesegas zu generieren und somit einen geschlossenen Kohlenstoffkreislauf zu erreichen.<sup>4</sup>

Aus diesen Gründen liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Umsetzung von Synthesegas zu kurzkettigen Olefinen durch den OX-ZEO Prozess, bei dem ein zweikomponentiger Kompositkatalysator, bestehend aus einem Metalloxid und einem Zeolithen verwendet wird.<sup>5</sup> Dieser Kompositkatalysator ist die Kombination aus einem Methanolsynthesekatalysator (Metalloxid) und einem Methanol-to-olefins Katalysator (Zeolith) und weist im OX-ZEO Prozess eine höhere Stabilität auf als die einzelnen Bestandteile in ihren jeweiligen Prozessen. Ein weiterer Vorteil des OX-ZEO Prozesses gegenüber dem Cracking-Verfahren ist die hohe Selektivität, die erreicht werden kann. Dies ermöglicht die Produktion der Stoffgruppe der kurzkettigen Olefine mit einer Selektivität von über 80 % unter den Kohlenwasserstoffen.<sup>6</sup>

Zwei Herausforderungen, die in der Forschung zum OX-ZEO Prozess verbleiben sind die Maximierung des CO Umsatzes und die Minimierung des unerwünschten Nebenproduktes  $CO_2$ . Um den Gesamtprozess dahingehend zu optimieren, ist es essenziell die einzelnen Komponenten des Katalysators und Einflüsse auf Änderungen dieser auf den Prozess im Detail zu verstehen.

### Forschungsfrage

Der OX-ZEO Prozess gehört zu den heterogenen Katalyse-Verfahren. Bei dieser Form der Katalyse wird ein fester Katalysator eingesetzt, über den flüssige oder gasförmige Edukte geleitet werden. Die dabei ablaufenden Reaktionen finden auf der Katalysatoroberfläche statt (siehe Abb. 2), weshalb die Oberflächenstruktur einen maßgeblichen Einfluss auf die Reaktion hat. Strukturen, die die Oberflächenbindung zu Eduktmolekülen in einem optimalen Maße begünstigen, erhöhen die katalytische Aktivität des Materials, während aktive Zentren auf der Oberfläche, die zu stark oder zu schwach binden zu einer

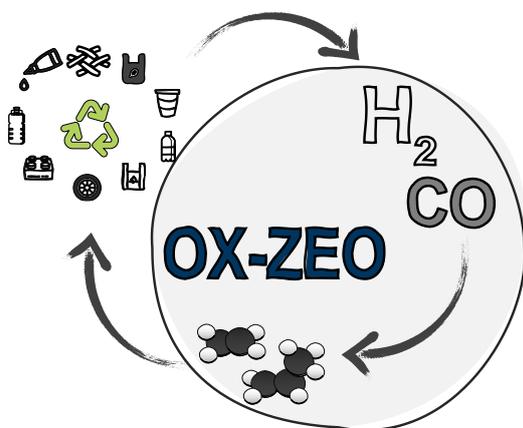


Abbildung 1: Schema eines möglichen, geschlossenen Kohlenstoffkreislaufes mit dem OX-ZEO Prozess als Teilschritt.

geringeren Aktivität führen. Aus diesem Grund ist es wichtig, Oberflächeneigenschaften heterogener Katalysatoren zu kennen und deren Einfluss auf den katalytischen Prozess zu verstehen, um gezielt Reaktionsprodukte zu fördern und Umsätze zu maximieren. Eine Forschungsfrage, die sich in diesem Kontext ergibt, ist nun: Wie beeinflussen Veränderungen der Oberflächenbeschaffenheit des OX-ZEO Katalysators die Kohlenwasserstoff- und CO<sub>2</sub>-Selektivitäten und den Umsatz des CO?

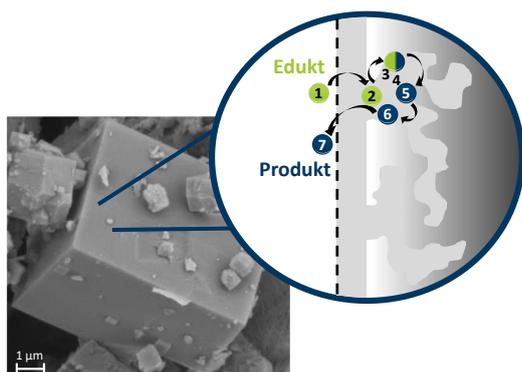


Abbildung 2: Schema eines heterogenen Katalyse Prozesses am Beispiel einer Zeolithen Oberfläche. 1: Diffusion durch Grenzfilm; 2: Porendiffusion; 3: Adsorption; 4: Reaktion; 5: Desorption; 6: Porendiffusion; 7: Diffusion durch Grenzfilm.

### Ansatz

Der hier verwendete erste Ansatz zum Beantworten der zuvor genannte Forschungsfrage ist es, den Fokus zunächst auf eine der beiden Komponenten des Katalysators, das Metalloxid, zu legen. Um den Einfluss des Oxids auf den OX-ZEO Prozess genauer zu verstehen, wurde eine Reihe verschiedener Metallchromate der allgemeinen Form  $M\text{Cr}_2\text{O}_4$  (mit  $M = \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Zn}$ ) synthetisiert und mit einem kommerziellen H-ZSM-5 Zeolithen kombiniert. Der so hergestellte Kompositkatalysator wurde dann auf seine katalytische Aktivität hin untersucht. Dazu wurde das Katalysatorgranulat in einen Rohrreaktor gegeben, durch den nach einer Vorbehandlungsphase ein Synthesegasgemisch bei 25 bar und 400 °C geleitet wurde. Die dabei entstandenen Reaktionsprodukte wurden dann mittels einer gaschromatographischen Analyse identifiziert und quantifiziert. Des Weiteren wurde die Oberfläche des Oxides durch Röntgendiffraktometrie (XRD), Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS), BET-Messungen sowie Rasterelektronenmikroskopbilder (REM) und energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) charakterisiert. In einem weiteren Schritt wurde dann

## Volker Mießeler, Bürgermeister Kreisstadt Bergheim

Kohle und Kohlenstoff ist nicht nur im Rheinischen Revier ein wichtiger Motor in der Industrie. Die Überlegung, wie dieser Rohstoff im Kreis geführt und immer wieder genutzt werden kann ist meiner Meinung nach von herausragender Bedeutung, gerade nach dem Ende des Braunkohleabbaus.

Mit den Partnern Fraunhofer Umsicht und RWE Power AG ist das ITZ CC hervorragend aufgestellt um diese Aufgabe zu beleuchten.

Das DS CCCE und die fachlich breit angelegten Dissertationen der Doktorandinnen und Doktoranden werden wichtige Impulse auch für die Kreisstadt Bergheim bringen. Dies gilt meiner Meinung nach insbesondere, aber nicht ausschließlich, für die Arbeiten über die Einstellung und Akzeptanz der Bürger\*innen, über Raumordnung, Fachplanung und Genehmigungen bis hin zur Transformation der Energieversorgung und Herstellung von Synthesegasen.

das Material mit der größten katalytischen Aktivität in seiner Zusammensetzung, sprich im Verhältnis der Metalle im Oxid zueinander, variiert und erneut in Kombination mit H-ZSM-5 getestet.

### Bisherige Ergebnisse

Bei der Testung der Metallchromat-Materialien in Kombination mit dem kommerziellen H-ZSM-5 Zeolithen, konnte ein deutlicher Einfluss der unterschiedlichen Metallzentren sowohl auf die Reaktionsprodukte als auch auf die Umsatzmenge der Edukte nachgewiesen werden. Die Oberflächen-Charakterisierung der Materialien zeigt, dass die Struktur der Materialien sehr ähnlich aufgebaut ist und damit, dass die unterschiedlichen

Reaktionsergebnisse in erster Linie durch die unterschiedlichen Metallspezies im Oxid verursacht werden. Die Variation der Zusammensetzung des Materials mit der größten katalytischen Aktivität ( $\text{ZnCr}_2\text{O}_4$ ) zeigt, dass die Kristallstruktur des Oxides einen erheblichen Einfluss auf den OX-ZEO Prozess hat. Die unterschiedlichen Zusammensetzungen des  $\text{ZnCr}_2\text{O}_4$  Oxides weisen laut der XRD-Analyse unterschiedliche Kristallstrukturen auf, wobei eine Mischung aus einer Spinellphase und einer  $\text{ZnO}$ -Phase zu höheren Umsätzen, eine reine Spinellphase hingegen zu einer höheren Olefin-Selektivität führt.

### Weitere Schritte

In weiteren Testreihen soll nun die Zeolithkomponente des OX-ZEO Katalysators sowie deren Einfluss auf den Gesamtprozess näher untersucht werden. Dazu sollen die zuvor synthetisierten Oxide mit einem weiteren kommerziellen H-ZSM-5 Zeolithen mit anderen strukturellen Eigenschaften und mit einer Reihe anderer Zeolitharten kombiniert und getestet werden. Des Weiteren sollen Kombinationen aus Oxiden, die die Umsetzung von  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2$  katalysieren können, mit den oben genannten Materialien zeigen, ob die Menge an produziertem  $\text{CO}_2$  so vermindert werden kann. Mit den durch diese Untersuchungen gesammelten Erkenntnissen kann der OX-ZEO Prozess dann in der Art optimiert werden, dass hohe Umsätze mit hohen Selektivitäten einzelner Kohlenwasserstoffgruppen und einer geringen Selektivität für Nebenprodukte, wie  $\text{CO}_2$ , erreicht werden.

## Harald Zillikens, Bürgermeister Stadt Jüchen

Sehr geehrte Damen und Herren,

die Stadt Jüchen ist mit einer Großfläche vom Braunkohletagebau Garzweiler unmittelbar betroffen. Daher ist das Thema „Strukturwandel“ für Jüchen die ganzheitliche Herausforderung der kommenden Jahre und Jahrzehnte.

Ich freue mich daher über die interdisziplinären Forschungsergebnisse, aus denen sicherlich auch für die Stadt Jüchen Lösungen, praktische Ideen und Maßnahmen abgeleitet werden können.

Für die Zukunft wünsche ich allen Doktorandinnen und Doktoranden weiterhin viel Erfolg für ihre Arbeiten.

### Referenzen

- (1) Sadrameli, S. M. *Fuel* 2015, 140, 102–115. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.09.034.
- (2) junge Puring, K.; Siegmund, D.; Timm, J.; Möllenbruck, F.; Schemme, S.; Marschall, R.; Apfel, U.-P. *Adv. Sustainable Syst.* 2021, 5 (1), 2000088. DOI: 10.1002/advsu.202000088.
- (3) Hoof, L.; Thissen, N.; Pellumbi, K.; junge Puring, K.; Siegmund, D.; Mechler, A.; Apfel, U.-P. *SSRN Journal* 2021. DOI: 10.2139/ssrn.3991077.
- (4) Chan, Y. H.; Syed Abdul Rahman, S. N. F.; Lahuri, H. M.; Khalid, A. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 2021, 278, 116843. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116843. Published Online: Mar. 1, 2021.
- (5) Jiao, F.; Li, J.; Pan, X.; Xiao, J.; Li, H.; Ma, H.; Wei, M.; Pan, Y.; Zhou, Z.; Li, M.; Miao, S.; Li, J.; Zhu, Y.; Xiao, D.; He, T.; Yang, J.; Qi, F.; Fu, Q.; Bao, X. *Science (New York, N.Y.)* 2016, 351 (6277), 1065–1068. DOI: 10.1126/science.aaf1835.
- (6) Huang, Y.; Ma, H.; Xu, Z.; Qian, W.; Zhang, H.; Ying, W. *Fuel* 2020, 273, 117771. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117771.

## SYNERGETISCHE NUTZUNG VON GÜLLE UND KOHLE ZUR ERZEUGUNG VON BIOGAS UND DÜNGEMITTELN

Anna Leithäuser

Prof. Mandy Gerber, Fachbereich für Mechatronik und Maschinenbau, Hochschule Bochum

Prof. Roland Span, Lehrstuhl für Thermodynamik, Ruhr-Universität Bochum

Aufgrund enthaltener Pflanzennährstoffe wie beispielsweise Stickstoff (N) eignet sich Gülle hervorragend als natürlicher Dünger. Neben der direkten Nutzung als Düngemittel kann Gülle zudem zur Produktion von Biogas verwendet werden. Die dazu notwendige Vergärung von Gülle hat einen überwiegend positiven Einfluss auf die Düngewirkung. Zudem werden Geruchs- und Treibhausgasemissionen bei der Lagerung reduziert (Clemens et al., 2006). In viehstarken Regionen kommt es zu erhöhten Gülleaufkommen und damit einhergehend hohen Nitratkonzentrationen in Boden und Grundwasser, wodurch ein weiter Transport von Gärresten und Wirtschaftsdünger notwendig ist (Gienau et al., 2018). Aufgrund des hohen Wasseranteils ist dieser jedoch ökologisch und ökonomisch nicht sinnvoll.

Eine Lösung kann die Beimischung von (Braun-)Kohle zur Güllevergärung sein. Ziel hierbei ist es, in einem synergetischen Prozess Stickstoff aus der Gülle an die Kohle zu binden und gleichzeitig die Biogasproduktion zu steigern. Bei einer anschließenden Trennung von flüssiger und fester Phase verbleibt der Stickstoff möglichst konzentriert in der festen Phase. Durch den reduzierten Wassergehalt wird der Transport der Nährstoffe rentabel und kann zur Vermeidung von Überdüngung in güllereichen Gebieten beitragen. Durch die Nutzung der nährstoffbeladenen Kohle als Bodenverbesserer und Düngemittel wird diese zurück in den Boden gegeben, wodurch fossile Kohlendioxidemissionen in die Atmosphäre vermieden werden. Die aktive Kohlenstoffzugabe in den Boden kann zudem die Bodenqualität, zum Beispiel durch Erhöhung der Wasserhaltekapazität, verbessern (Umweltbundesamt,

2016). Dadurch eröffnet sich für den Strukturwandel im Rheinischen Revier ein alternativer Nutzungspfad für die Braunkohle und ein neuer Wirtschaftsmarkt.

Neben der Nutzung von Braunkohle wird zusätzlich die Zugabe von Pflanzenkohle zur Güllevergärung untersucht. Pflanzenkohle wird durch hydrothermale Karbonisierung oder Pyrolyse aus kohlenstoffhaltigen Materialien, z.B. Holzverschnitt oder Klärschlamm, hergestellt. Dadurch wird der Kohlenstoff, welcher zuvor durch die Pflanzen via Photosynthese aus der Atmosphäre aufgenommen wurde, langfristig gebunden und in den Boden eingetragen. Da die Kosten für Pflanzenkohle jedoch deutlich über jenen für Braunkohle liegen, müssen hier zusätzlich wirtschaftliche Aspekte betrachtet werden. Die Steigerung der Biogasproduktion und der Einfluss auf Düngeeigenschaften durch Kohlezugabe werden in der Fachliteratur bisher weitestgehend getrennt voneinander behandelt. Daher liegt, neben dem Vergleich von Braun- und Pflanzenkohle, ein wichtiger Fokus dieses Forschungsvorhabens auf der simultanen Untersuchung dieser Aspekte. Zudem ist das Ziel, die Kohlezugabe durch Anpassung bestehender Biogasanlagen zu ermöglichen und die hierfür notwendigen Umbaumaßnahmen zu minimieren.

### Methodisches Vorgehen

Im Rahmen der Promotion werden Versuche im Labormaßstab zur gemeinsamen Vergärung von Gülle und Braunkohle sowie Gülle und Pflanzenkohle durchgeführt. Die feste Phase wird hinsichtlich einer Nutzung als Bodenverbesserer und Düngemittel untersucht.

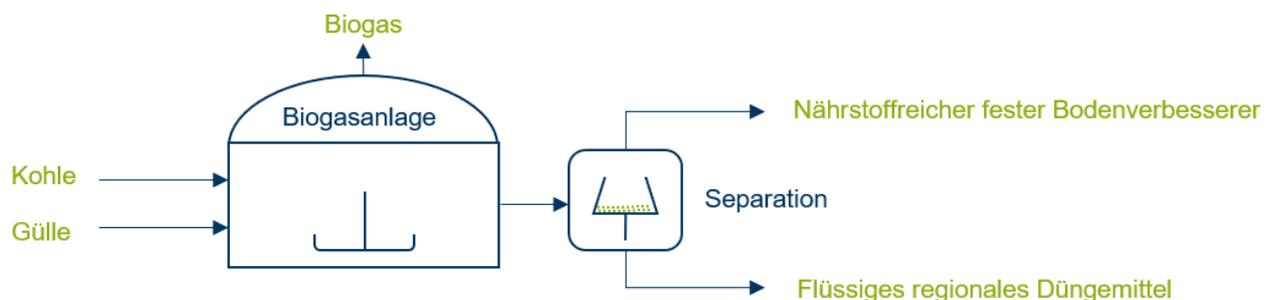


Abbildung 1: Schema einer Anlage zur Vergärung von Gülle mit Kohlezugabe und anschließender Aufbereitung des Gärrestes zur Düngemittelherstellung.

Zunächst wird anhand der Fachliteratur ein Spektrum geeigneter Mischungsverhältnisse und Korngrößen der Kohle definiert und diese im Batch-Verfahren untersucht. Batch-Versuche dienen der grundsätzlichen Bewertung des möglichen Biogasertrags und der anaeroben biologischen Abbaubarkeit eines Stoffes. Zusätzlich können qualitative Aussagen über die Abbaugeschwindigkeit und potentielle Prozesshemmungen getroffen werden. Dazu werden neben der quantitativen Messung des Biogasertrages verschiedene Analysen durchgeführt, z.B. zur Zusammensetzung des entstandenen Biogases, sowie der Zusammensetzung von Gülle und Kohle vor und nach der Vergärung. Der Gärrest wird anschließend durch eine Zentrifuge in feste und flüssige Phase getrennt und die Stickstoffgehalte beider Phasen analysiert. So kann der Einfluss unterschiedlicher Kohlemengen und Korngrößen auf die zu erwartende Biogasproduktion und Düngemittelqualität bewertet werden.

Im Anschluss werden vielversprechende Ansätze gezielt im semi-kontinuierlichen Verfahren untersucht. Dieses liefert unter anderem zusätzliche Informationen über die Effizienz und Stabilität des Prozesses im Dauerbetrieb. Die regelmäßige Entnahme von Gärrest ermöglicht zudem Rückschlüsse auf die Düngemittelqualität der entstandenen Produkte. Da großtechnische Anlagen in der Regel kontinuierlich betrieben werden, kann bei semi-kontinuierlichen Versuchen außerdem von einer erhöhten Übertragbarkeit auf die Praxis ausgegangen werden.

### Ausgewählte Ergebnisse

In Batch-Versuchen wurde unter anderem die Zugabe von 37,5 g Braunkohle pro Liter Fermenterinhalt untersucht. Dazu wurden sowohl Ansätze mit reiner Rindergülle (RG) als auch Ansätze mit Rindergülle und Braunkohle (RG+BK) vergoren. Wie in Abbildung 2 zu erkennen, wird die Biogasproduktion

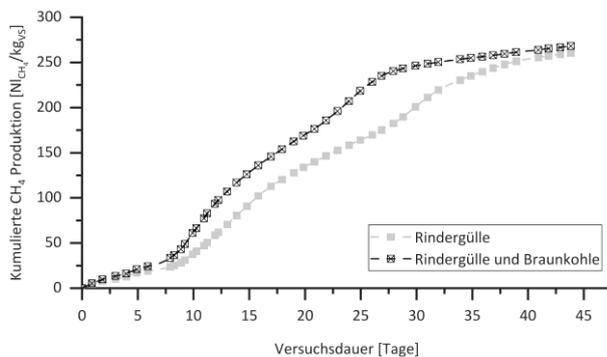


Abbildung 2: Methanproduktion von Rindergülle im Batch-Verfahren mit und ohne Braunkohlezugabe.

durch die Braunkohlezugabe beschleunigt. Die Kohlezugabe bewirkte außerdem eine Erhöhung des Anteils an sich nach der Phasentrennung in der festen Phase befindlichen Stickstoffs um 95% (Abbildung 3).

Insofern sich die Ergebnisse in semi-kontinuierlichen Versuchen reproduzieren lassen, weist dies auf die Möglichkeit hin, die Verweilzeit des Substrates im Fermenter zu verkürzen und somit einen höheren Substratdurchsatz bei gleichem Ausbaurvolumen zu ermöglichen. Durch die Vermarktung des festen Gärrestes als Düngemittel und Bodenverbesserer kann die Rentabilität der Biogasanlage zusätzlich gesteigert werden.

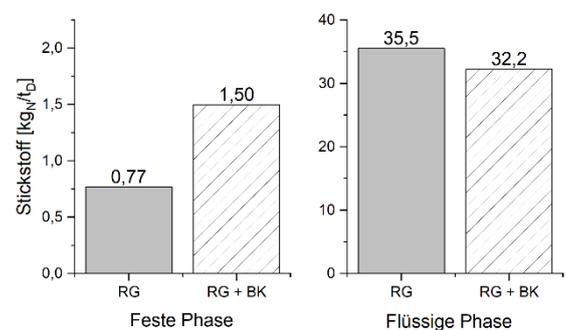


Abbildung 3: Stickstoffmenge (kg N pro Tonne Fermenterinhalt) in fester und flüssiger Phase mit und ohne Braunkohlezugabe.

### Referenzen

- Clemens, J., Trimborn, M., Weiland, P., Amon, B., 2006. Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112 (2-3), 171–177. 10.1016/j.agee.2005.08.016.
- Gienau, T., Brüß, U., Kraume, M., Rosenberger, S., 2018. Nutrient Recovery from Biogas Digestate by Optimised Membrane Treatment. *Waste Biomass Valor* 9 (12), 2337–2347. 10.1007/s12649-018-0231-z.
- Umweltbundesamt (Ed.), 2016. Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer "veränderter" Biomasse als Bodenhilfsstoffe für die C-Sequestrierung in Böden, Dessau-Roßlau.

## DIE WAHRNEHMUNG UND BEWERTUNG VON TRANSFORMATIONSPROZESSEN DURCH BÜRGER:INNEN – EINE EMPIRISCHE UNTERSUCHUNG AM BEISPIEL DES BRAUNKOHLEAUSSTIEGS IM RHEINISCHEN REVIER

Cathérine Momberger

*Prof. Rolf G. Heinze und Dr. Anna-Lena Schönauer - Lehrstuhl für Allgemeine Soziologie, Arbeit und Wirtschaft, Ruhr-Universität Bochum*

Die Energiewende und damit verbundene Projekte führen immer wieder zu großen Diskussionen in Deutschland, sowohl in Medien als auch vor Ort. Dabei ist die allgemeine Zustimmung zu einer Umstellung auf eine effizientere und klimaschonendere Energieproduktion und -nutzung, kurz zur Energiewende, unter den deutschen Bürger:innen hoch (vgl. Setton 2019: 8). Dennoch zeigen sich mitunter beim Stromtrassenausbau oder bei der Planung und Umsetzung von Windparks lokal Widerstände, die nicht nur aus langwierigen Planungs- und Genehmigungsverfahren resultieren, sondern sich auch auf Seiten der Bürger:innen ergeben, die gegen das Vorhaben sind (vgl. Hoeft et al. 2017). Unter Umständen führen solche Widerstände zu Verzögerungen oder dem Abbruch der Projekte, trotz der politisch angestrebten Ausbauziele. Dies ist kein neues Phänomen, das sich erst seit dem politischen Einläuten der Energiewende durch den Entschluss zum Atomausstieg in 2011 zeigt. Stattdessen haben Bürger:innen auch davor bereits an der Regional- oder Städteplanung teilgenommen, indem sie sich beispielsweise bei Planungen miteingebracht oder gegen Planungen und deren Folgen protestiert haben. So gab es auch immer wieder Initiativen und Demonstrationen gegen andere Infrastrukturanlagen, z.B. gegen Autobahnen oder gegen Telekommunikationsinfrastruktur (vgl. Ulmer und Hiller 2007). Besondere Aufmerksamkeit und womöglich auch Bedeutung bekommen diese Aushandlungen und Proteste um die Gestaltung der Landschaft im Zuge der Energiewende unter dem Eindruck des Pariser Klimaabkommens und den damit verbundenen Zielen Deutschlands, seine Treibhausgasemissionen möglichst schnell und möglichst weit zu senken. Denn gerade im Energiesektor werden durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen viele Treibhausgase freigesetzt, die durch andere Formen der Energieproduktion auf Basis erneuerbarer Energien eingespart werden könnten.

Nicht zuletzt im Zuge der sich neu formierten Bewegung Fridays for Future geriet in Deutschland die Braunkohleproduktion und -verstromung in die Kritik. Denn nicht nur ist die Braunkohleverbrennung ein sehr CO<sub>2</sub>-intensives Verfahren zur Energiegewinnung, sondern auch der Abbau von Braunkohle in verschiedenen Revieren in Deutschland bedeutet seit Jahrzehnten eine starke Veränderung der Landschaft durch offene Tagebaue und Umsiedlungen von Ortschaften und deren Bewohner:innen. Besonders in die mediale Öffentlichkeit geriet dabei die Kritik um die mögliche Abholzung einer bewaldeten Fläche im Rheinischen Revier, angrenzend an den Tagebau Hambach, um Platz für die Verbreiterung des Tagebaus zu schaffen (vgl. Kaiser 2020). Unter Eindruck aber eben auch unter Druck dieser Ereignisse, wurde 2020 ein Gesetz zum Ausstieg aus der Kohleverstromung beschlossen, das vorsieht, spätestens 2038 keine weitere Braunkohle zu fördern oder zu verstromen. Damit soll die Energiewende weiter voranschreiten und die CO<sub>2</sub>-Reduktion in Deutschland intensiviert werden.

### **Transformation in den Braunkohlerevieren**

Dieser Wandel in der Stromerzeugung bedeutet nicht nur für Gesamtdeutschland eine Umstellung dessen, was ins Netz eingespeist wird und nachher „als Strom aus der Steckdose“ fließen soll. Gerade für die Regionen in denen kürzlich oder aktuell bis womöglich 2038 weiterhin Braunkohletagebaue und -Kraftwerke betrieben werden, bedeutet es einen starken und tiefgreifenden Wandel. Denn dort ist die Geschichte der Regionen jeweils enorm von der Braunkohlewirtschaft im Positiven wie im Negativen beeinflusst worden. Während durch den Braunkohleausstieg auf der einen Seite keine weiteren Ortschaften dem Flächenwandel der Braunkohletagebaue weichen müssen, wird auf der anderen Seite ein Wirtschaftsbereich in den Regionen stark eingeschränkt, der für einige eine gut bezahlte und

## Dr. Michael Walther, IN4climate.NRW

Schon auf unsere Beiträge zur Ringvorlesung folgten immer interessante Diskussionen mit der gesamten Runde.

Vor allem aber der enge direkte Kontakt mit einzelnen Promotionsprojekten zum Rheinischen Revier haben unser dort angesiedeltes Projekt wirklich vorangebracht.

vormals auch gut angesehene Beschäftigung bot. Den Forderungen nach mehr gelebtem Klimaschutz und weniger Feinstaubbelastung durch Tagebaue stehen die Sorgen über wirtschaftliche Sackgassen und finanzielle Engpässe gegenüber.

Das größte Braunkohlerevier Deutschlands ist das Rheinische Braunkohlerevier, im Dreieck zwischen den Städten Köln, Aachen und Düsseldorf. Hier leben etwa 2,4 Millionen Menschen, die mal mehr und mal weniger stark von dem Braunkohleausstieg betroffen sind. Zwar steht die Region wirtschaftlich relativ gut dar und verfügt über Verflechtungen in andere Regionen und Wirtschaftszweige außerhalb des Energiesektors. Dennoch sind fast 9.000 Beschäftigte direkt von dem Braunkohleausstieg betroffen (vgl. RWI 2018: 87) und auch geschichtlich hat der Braunkohlesektor eine große Rolle für die Entwicklung und Bedeutung der Region gespielt, die häufig mindestens in Bezug auf das Thema der Umsiedlungen auch immer wieder von den Bewohner:innen (konflikthaft) thematisiert wurde und wird (vgl. Schmid-Engbrodt und Schmidt 2020; Wüst 1977).

Es stellt sich die Frage, wie die Bürger:innen in dem Revier den schon seit Jahren stattfindenden langsamen Wandel um die Braunkohle und nun den auch politisch beschlossenen Braunkohleausstieg wahrnehmen und bewerten. Zwar gibt es allgemeine Forschung zur Energiewende, bei der auch die Einstellungen zum (Braun-)Kohleausstieg berücksichtigt wurden. So stimmen laut dem Nachhaltigkeitsbarometer 64% der Deutschen dem Kohleausstieg zu, 21% sind ambivalent und 14% sind dagegen (vgl. Wolf 2020: 11). Die weitere Energiewendeforschung zeigt allerdings auch, wie eingangs erläutert, dass diese sehr abstrakte Befürwortung nicht gleichzusetzen ist mit der vollen Akzeptanz der Maßnahmen durch die betroffenen Bürger:innen vor Ort (vgl. Dütschke et al. 2019: 222; Sütterlin und Siegrist 2017: 358). Häufig gibt es auch ambivalente oder ablehnende Stimmen. Ein dezidierter Blick auf die Einstellungen der Bewohner:innen des Rheinische Reviers, ihre Sorgen und Wünsche, Erwartungen und Hoffnungen zu einem sie betreffendem Wandel und dem Braunkohleausstieg fehlt bisher.

Dabei kann eine solche Untersuchung letztlich dazu beitragen zu verstehen, wie Transformationsprozesse, die in Deutschland nicht nur im Rahmen der Energiewende oder zum Klimaschutz angestrebt



Abbildung 1: Blick in den Tagebau beim ehemaligen Dorf Etzweiler im Rheinischen Revier, Foto von Mika Baumeister on Unsplash.

werden, von betroffenen Bürger:innen wahrgenommen werden und worin sie ihre eigene Rolle in diesen Wandlungsprozessen sehen. Eine in der sozial- und politikwissenschaftlichen Forschung im Zuge von solchen Transformationsprozessen häufig diskutierte These ist, dass Bürger:innen Wandel- und Transformationsprozesse bei denen sie involviert sind und die sie mitgestalten können, eher annehmen und akzeptieren (vgl. Butzlaff 2019). Dabei verweist die Forschung jedoch auch darauf, dass Beteiligung und Partizipation an politischen Prozessen, und damit auch bei bestimmten Transformationsprojekten, nicht voraussetzungslos ist. Daher ist sie auch nicht über alle sozialen Gruppen gleichverteilt und nicht alle Gruppen nehmen gleich stark an den unterschiedlichen politischen Prozessen teil (vgl. Schäfer und Schoen 2013). Viel mehr hängt Beteiligung beispielsweise davon ab, wieviel Zeit Personen zur Verfügung steht, ob sie Interesse an dem speziellen Thema haben, es ihnen wichtig ist, oder auch, ob es bereits formelle Teilnehmungsformate gibt, die sie kennen oder sie Bekannte haben, die sie zum Mitmachen motivieren (vgl. Scholzman et al. 2018: 50ff).

### **Forschungsdesign und erste Ergebnisse**

Mit dem vorgestellten Promotionsprojekt soll diese beschriebene Lücke gefüllt werden. So sollen erstens die Wahrnehmung und Bewertung des Braunkohleausstieges durch Bürger:innen im Rheinischen Revier, ihre Betroffenheiten, Sorgen und Wünsche rund um das Thema erfasst werden, um eine empirisch gesättigte Bestandsaufnahme geben zu können. Zweitens sollen politische Einstellungen, Werte und Beteiligungswünsche zum Braunkohleausstieg im Rheinischen Revier, sowie die Beteiligung limitierenden Eigenschaften und Faktoren, die sozio-ökonomischen Ressourcen, erhoben werden. Durch die Verbindung der Stränge können schließlich Rückschlüsse darauf gezogen werden, ob es systematische Unterschiede in der Bewertung des Braunkohleausstieges nach unterschiedlichen sozialen Gruppen gibt, beispielsweise Personen, denen der Braunkohleausstieg im Rheinischen Revier sehr wichtig ist, sich auch deutlich häufiger beteiligen, oder ob bestimmte politische Einstellungen auch mit einer anderen Art der Bewertung des Ausstieges und

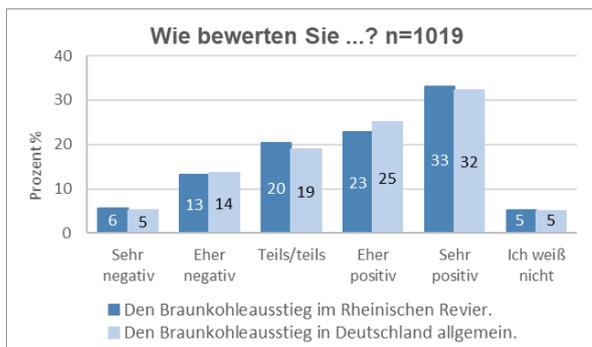


Abbildung 2: Bewertung des Braunkohleausstiegs in Deutschland und im Rheinischen Revier.

anderen Vorstellungen zur Bewältigung des Strukturwandels zusammenhängen.

Um die vorgestellten Forschungsfragen zu beantworten wurde eine quantitativ-standardisierte Online-Umfrage mit Hilfe eines (Befragungs-)Panelanbieters unter Bewohner:innen des Rheinischen Reviers durchgeführt. Insgesamt konnten so 1.019 Befragte im Alter von 14-81 Jahren aus dem Revier erreicht und zu ihren Einstellungen und Betroffenheiten zum Braunkohleausstieg befragt werden. In ersten Analysen zeigt sich, dass die Befragten den Braunkohleausstieg im Revier als auch in Deutschland allgemein, zwar mehrheitlich befürworteten. Daneben gibt es aber auch viele Befragte, die dem Braunkohleausstieg ambivalent oder ablehnend gegenüberstehen. Trotz der lokalen Betroffenheit der Befragten, von denen die Hälfte angibt in der Nähe eines Braunkohlekraftwerks oder -tagebaus zu wohnen, unterscheiden sich diese Ergebnisse zunächst nicht erheblich von beispielsweise den Ergebnissen des Nachhaltigkeitsbarometers, bei denen Bürger:innen aus Gesamtdeutschland befragt wurden. Der Ausstieg wird von den meisten Befragten auch als dem Gemeinwohl Deutschlands zuträglich eingeschätzt.

Darüber hinaus zeigt sich, dass die befragten Bürger:innen zwar vor allem politische Akteur:innen in der Verantwortung sehen den Braunkohleausstieg zu gestalten und dafür Sorge zu tragen, dass dieser gelingt. Dennoch sollen diese die Gestaltung nicht allein übernehmen. So geben die meisten Befragten an, dass Bürger:innen und Initiativen sowie die Zivilgesellschaft in den Strukturwandelprozess miteinander verbunden werden sollen und in unterschiedlicher Form an der Gestaltung teilhaben oder darüber

## Stefan Pfenning, Bürgermeister Gemeinde Inden

Liebe Leserinnen und Leser,

als Teil des rheinischen Reviers ist die Gemeinde Inden stark vom Braunkohleabbau geprägt, da fast zwei Drittel der Gemeindefläche auf den Tagebau entfallen. Mit dem Ende des Braunkohleabbaus ist die Gemeinde Inden mit Ihren Bürgerinnen und Bürgern somit direkt vom Strukturwandel betroffen und stellt sich mit verschiedenen Struktur-Projekten für die Zukunft auf. Als Gemeinde begrüßen wir die wissenschaftliche Arbeit des DS CCCE, die einen wichtigen Beitrag zur langfristigen Gestaltung des Strukturwandels im rheinischen Braunkohle-  
revier leistet und somit Grundlagen für zukünftiges Handeln schafft.

mitentscheiden sollen.

Der Wunsch der Beteiligung geht allerdings über die tatsächlichen Beteiligung der befragten Bürger:innen und deren persönlich wahrgenommene Wichtigkeit dessen hinaus. So beteiligten sich für oder gegen den Braunkohleausstieg beispielsweise über Demonstrationen oder auch online etwa ein Drittel der Befragten. Es zeigt sich auch, dass formelle Beteiligungsformate im Revier den befragten Bürger:innen weitestgehend unbekannt sind und nicht genutzt wurden.

### Referenzen

Butzlaff, Felix . 2019. Transformation durch Demokratisierung? Wertewandel und neue Konfliktlinien. In Nachhaltige Nicht-Nachhaltigkeit. Warum die ökologische Transformation der Gesellschaft nicht stattfindet. Hrsg. Ingolfur Blühdorn, Felix Butzlaff, Michael Deflorian, Daniel Hausknost und Mirijam Mock, 255–286. Bielefeld: transcript.

Dütschke, Elisabeth, Paula Bögel, Su-Min Choi, Joachim Globisch und Uta Burghard . 2019. Soziale Akzeptanz als erweitertes Verständnis des Akzeptanzbegriffs – eine Bestimmung der Akteure für den Prozess der Energiewende. In Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation, Hrsg. Cornelia Fraune, Michele Knodt, Sebastian Gözl und Katharina Langer, 211–230. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Hoelt, Christoph, Sören Messinger-Zimmer und Julia Zilles (Hrsg.) . 2017. Bürgerproteste in Zeiten der Energiewende: Lokale Konflikte um Windkraft, Stromtrassen und Fracking. Bielefeld: transcript.

Kaiser, Ruben . 2020. Bäume, die die Welt bedeuten. Der Hambacher Forst als Symbol der deutschen Klimabewegung. Soziologiemagazin 13 (2), 51–67.

RWI . 2018. Erarbeitung aktueller vergleichender Strukturdaten für die deutschen Braunkohleregionen: Projektbericht für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) Projektnummer: I C 4 – 25/17.

Schäfer, Armin und Harald Schoen . 2013. Mehr Demokratie, aber nur für wenige? Der Zielkonflikt zwischen mehr Beteiligung und politischer Gleichheit. Leviathan 41 (1), 94–120.

Schmid-Engbrodt, Anja und Judith Schmidt . 2020. Umsiedlungsgeschichte als Lebensgeschichte: Ein Forschungs- und Dokumentationsprojekt des LVR-Instituts für Landeskunde und Regionalgeschichte zu den letzten 'Umsiedlungsdörfern' im Abbaugbiet des Braunkohlentagebaus Garzweiler II. Rheinisch-westfälische Zeitschrift für Volkskunde 2019/2020 (64/65), 101–116.

Setton, Daniela . 2019. Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energiewende 2018: Kernaussagen und Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse: Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung (IASS).

Sütterlin, Bernadette und Michael Siegrist . 2017. Public acceptance of renewable energy technologies from an abstract versus concrete perspective and the positive imagery of solar power. Energy Policy 106, 356–366.

Ulmer, Frank und Sylvia Hiller . 2007. Innovative Verfahren der Konfliktschlichtung bei der Standortbestimmung von Mobilfunksendeanlagen: Abschlussbericht. Stuttgart.

Wolf, Ingo . 2020. Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energiewende 2019: Kernaussagen und Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse: Institut für transformative Nachhaltigkeitsforschung (IASS).

Wüst, Karl-Heinz . 1977. Zur Umsiedlung von Dörfern im rheinischen Braunkohlegebiet am Beispiel Königshoven. Berlin: Technische Universität Berlin.

## TRANSFORMATION DER ENERGIEVERSORGUNG IM KONTEXT DER BEENDIGUNG DER KOHLEVERSTROMUNG

Sophie Pathe

Prof. Valentin Bertsch, Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft, Ruhr-Universität Bochum

Dr. Julian Röder, Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft, Ruhr-Universität Bochum

Das Rheinische Revier deckt derzeit etwa ein Zehntel des deutschen Strombedarfs [1]. Die vorhandenen Braunkohlekraftwerke werden allerdings spätestens bis zum Jahr 2038 abgeschaltet und der Braunkohletagebau eingestellt [2]. Zentraler Grund für die politische Entscheidung des Ausstiegs aus der Kohleverstromung ist die Verminderung des Ausstoßes von Treibhausgasen, allen voran Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) und der durch diese Emissionen verursachten Klimaänderung. Derzeit verursacht der Energiesektor auch über die Klimaänderung hinaus einen großen Anteil der gesamten potenziell schädlichen Umweltwirkungen [3]. Diese werden z. B. durch Emission verschiedener Stoffe wie Treibhausgasen, Feinstaub oder Stickstoffoxiden, den Verbrauch von Ressourcen oder die Nutzung von Flächen verursacht. Im Kontext des Klimawandels und anderer Umweltprobleme besteht ein wachsender Bedarf an nachhaltigen Lösungen im Energiesektor. Diese Lösungen sind von besonderer Bedeutung für Regionen, in denen eine Transformation des Energiesystems stattfindet oder bevorsteht, wie es im Rheinischen Revier der Fall ist.



Abbildung 1: Lage von Braunkohlekraftwerken (braun) im Rheinischen Revier sowie Verlauf der Hoch- und Höchstspannungsstromleitungen (blau, pink; Projekt EnLAG15) im Jahr 2020.

### Methodik

Wertvolle Erkenntnisse zu den Auswirkungen verschiedener Maßnahmen und Entscheidungen bei der Transformation der Energieversorgung, wie z. B. dem Ausbau und der Integration regenerativer Erzeugungstechnologien oder dem Ausbau der Netze, können **Energiesystemmodelle** (ESM) liefern. Eine Möglichkeit, ökologisch nachhaltige Lösungen im Energiesektor zu identifizieren und zu bewerten, ist die zusätzliche Berücksichtigung von Umweltwirkungen in diesen Modellen.

Die Analyse des Energiesystems des Rheinischen Reviers fokussiert in dieser Arbeit insbesondere die Investitionsplanung. Investitionsplanungsmodelle dienen der Ermittlung des Aus- und Rückbaubedarfs im Energiesystem für einen betrachteten Zeitraum in der Zukunft. Dieser beträgt in der Regel mehrere Jahre bzw. Jahrzehnte, da es sich im Energiesektor um sehr langlebige Investitionen handelt. Das Optimierungsziel des Energiesystemmodells ist üblicherweise die Minimierung der Kosten des gesamten Energiesystems unter Befriedigung des Energiebedarfs in jedem Zeitschritt und Einhaltung vorgegebener Randbedingungen. Randbedingungen können z. B. vorhandene Ressourcen oder politische Vorgaben wie der Ausstieg aus der Kohleverstromung und Kernenergienutzung in Deutschland sein. [4]

Die Berücksichtigung direkter CO<sub>2</sub>- oder Treibhausgasemissionen in Energiesystem-Optimierungsmodellen ist durchaus üblich, während andere Umweltwirkungen oft vernachlässigt werden. Auch wenn der Klimawandel als große Herausforderung zu Recht besondere Beachtung erfährt, sollten andere Umweltwirkungen bei der Transformation des Energiesystems nicht vernachlässigt werden. Unter Umständen entstehen Konkurrenzsituationen zwischen verschiedenen Aspekten des Umweltschutzes. Die meisten gerichtlichen Klagen gegen Windenergieanlagen werden z. B. mit Aspekten des Artenschutzes begründet. Dies ist ein Beispiel für einen Zielkonflikt zwischen Klima- und Artenschutz.

Die Berücksichtigung weiterer ökologischer Aspekte, neben den üblichen technisch-ökonomischen

Zielen, erfordert eine Mehrzieloptimierung von Energiesystemen. In dieser Arbeit wird dies durch die Kombination eines Energiesystemmodells mit einer Ökobilanz von Energieumwandlungstechnologien erreicht.

Die **Ökobilanz** ist eine Methodik zur ganzheitlichen ökologischen Bewertung von Produkten. Dabei wird der gesamte Lebenszyklus des Produkts, von der Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgung, untersucht. In Abhängigkeit der Input- und Outputströme, z. B. Materialien oder Energie, des Produktlebenszyklus werden potenzielle Umweltwirkungen ermittelt. Diese werden auf den quantitativen Nutzen des Produkts bezogen, z. B. eine kWh Strom im Stromnetz. [5] Die Kombination von ESM und Ökobilanz ermöglicht die Berücksichtigung der Herstellungs- und der Nutzungsphase von Kraftwerken sowie verschiedener Umweltwirkungen. Zusätzlich zur Optimierung der Kosten wird, durch Variation der Zielfunktion des ESM, die Optimierung verschiedener Umweltwirkungen ermöglicht sowie die gleichzeitige Optimierung von Kosten und Umweltwirkungen in einer Mehrzieloptimierung.

### Fallstudie

Aufgrund der zentralen Lage und der bestehenden Energieinfrastruktur des Rheinischen Reviers werden, um belastbare Schlussfolgerungen ziehen zu können, zusätzlich ganz Deutschland und die Nachbarländer sowie Schweden und Norwegen analysiert (s. Abbildung 2). Hierfür sind detaillierte Kenntnisse des derzeitigen Energiesystems erforderlich, z. B. Daten zu vorhandenen regenerativen und konventionellen Erzeugungsanlagen, Netzen und Verbrauchern. Zusätzlich werden Potenzialflächen für den Ausbau von Windenergie- und Photovoltaikanlagen im Rheinischen Revier ermittelt.



Abbildung 2: Räumliche Auflösung des Modells. Die in der Abbildung angeschnittenen Länder (Frankreich, Norwegen, Schweden) werden vollständig berücksichtigt.

Für diese Arbeit wird das Energiesystemmodell Backbone verwendet [6]. Es ist ein open source Modell, das die Berücksichtigung verschiedener Sektoren (z. B. Strom, Wärme, Verkehr) ermöglicht und sich durch eine hohe Anpassungsfähigkeit auszeichnet. Mit Backbone wird eine Investitionsplanung des Stromsystems des Rheinischen Reviers für das Zieljahr 2040 durchgeführt, nach dem geplanten Ausstieg Deutschlands aus der Kernenergie und der Kohleverstromung. Innerhalb des Energiesystemmodells werden in diesem Fall neben den Kosten drei Umweltwirkungen berücksichtigt, abgebildet durch Treibhausgasemissionen (Global Warming Potential, GWP), urbane Landnutzung (Urban Land Occupation Potential, ULOP) und Metallverbrauch (Metal Depletion Potential, MDP).

### Ergebnisse

Im Folgenden werden beispielhaft einige Ergebnisse dargestellt. Bei individueller Optimierung der vier Ziele (s. Abbildung 3) werden im Rheinischen Revier nur wenige Technologien zur Stromerzeugung eingesetzt.

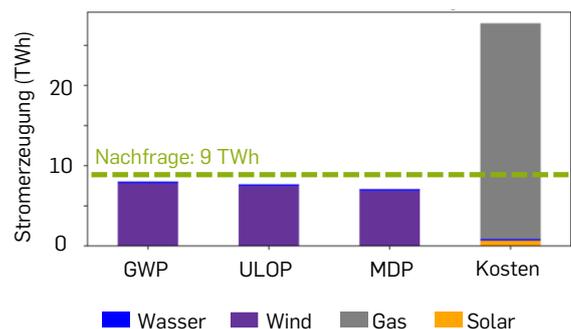


Abbildung 3: Zusammensetzung der Stromerzeugung im Rheinischen Revier 2040 bei jeweiliger Minimierung eines der vier Ziele Treibhausgasemissionen (GWP), urbane Landnutzung (ULOP), Metallverbrauch (MDP) bzw. Kosten. Die angenommene Nachfrage beträgt 9 TWh. Die ESM-Daten stammen aus pypsa-eur [7]. Die Skalierung für 2040 basiert auf Pitzcker et al [8]. Die Ökobilanz-Daten stammen aus der Datenbank ecoinvent 3 [9].

Bei Optimierung der drei umweltbezogenen Ziele wird hauptsächlich Windenergie ausgebaut. Die Stromnachfrage (9 TWh) im Rheinischen Revier wird bei Minimierung der Kosten deutlich übertroffen und bei Minimierung der drei Umweltwirkungen leicht unterschritten. Innerhalb des Energiesystemmodells wird diese Differenz durch Im- bzw. Exporte mit anderen Regionen ausgeglichen sowie ein Anteil der zusätzlichen Stromerzeugung für Speicher genutzt. Zum Vergleich: Im Rheinischen Revier wurden im Jahr 2020 allein von den Braunkohle-

kraftwerken 36 TWh Strom bereitgestellt [1]. Die Stromerzeugung sinkt also für alle vier Modellvarianten wesentlich.

Mit Methoden der Mehrzieloptimierung lassen sich zusätzlich sog. Pareto-Fronten erzeugen. Als Beispiel ist die gleichzeitige Optimierung von Kosten und Metallverbrauch in Abbildung 4 dargestellt. Eine Erhöhung der Kosten um ca. 20 % ermöglicht eine Reduktion des MDP um ca. 50 % gegenüber der kostenminimalen Lösung. Die MDP-Vermeidungskosten steigen bei einer deutlichen Verringerung der MDP-Werte stark an. Es ist auch zu erkennen, dass eine vollständige Vermeidung der Umweltwirkung nicht möglich ist. Dies ist damit zu begründen, dass sowohl die Auswirkungen der Nutzungsphase als

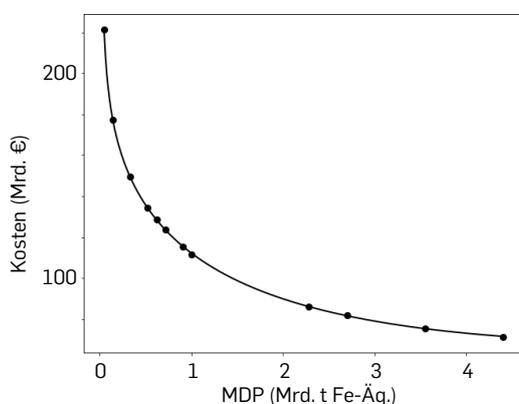


Abbildung 4: Pareto-Front der Mehrzieloptimierung von Kosten und Metallverbrauch (MDP).

auch die der Konstruktionsphase von Energieanlagen berücksichtigt werden. Dies gilt im Wesentlichen auch für die Optimierung von Kosten und Treibhausgasemissionen bzw. Kosten und urbaner Landnutzung. Durch die hohe Transparenz bietet diese Methode ein großes Potenzial und wertvolle Erkenntnisse für das Auflösen von Zielkonflikten im Rahmen von Transformationsprozessen, z. B. zwischen Kosten und Umweltwirkungen.

### Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Berücksichtigung der verschiedenen Umweltwirkungen im Energiesystemmodell sowie die Minimierung dieser Wirkungen zusätzlich zu den Kosten ermöglicht wertvolle Erkenntnisse über die Zusammenhänge dieser Ziele. Je nach Zielsetzung zeigt sich eine starke Präferenz für einige wenige Technologien. Bei allen umweltbezogenen Zielen stützt sich der zukünftige Strommix des Rheinischen Reviers stark auf die Windenergie. Unabhängig von der Zielsetzung nimmt die Stromerzeugung im

Rheinischen Revier bis 2040 im Vergleich zu 2020 ab. Wesentliche Einschränkungen dieser Studie, die in zukünftigen Arbeiten adressiert werden sollen, sind die begrenzte Anzahl der berücksichtigten Umweltwirkungen, die Vernachlässigung des Übertragungsnetzes und die Verwendung vergangenheitsbezogener Ökobilanz-Daten.

Die integrierte Berücksichtigung verschiedener Ziele (z. B. Umweltwirkungen) in ESMs ist sehr wichtig, vor allem vor dem Hintergrund von Zielkonflikten im Rahmen von Transformationsprozessen, insbesondere in Strukturwandelregionen wie dem Rheinischen Revier. Die bevorstehenden Herausforderungen sind in diesen Regionen enorm, gleichzeitig bieten sich vor dem Hintergrund der verschiedenen (ökologischen) Krisen unserer Zeit aber auch Chancen, z. B. zur Implementierung und Nutzung nachhaltiger Energieversorgungskonzepte.

### Referenzen

- [1] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Energy Charts, [www.energy-charts.de](http://www.energy-charts.de)
- [2] Herberg, J. et al. Partizipative Governance und nachhaltiger Strukturwandel. Zwischenstand und Handlungsmöglichkeiten in der Lausitz und im Rheinischen Revier. - IASS Brochure; 2020.
- [3] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press; 2021.
- [4] Möst, D.; Fichtner, W.; Grunwald, A. (Hrsg.) Energiesystemanalyse: Tagungsband des Workshops "Energiesystemanalyse" vom 27. November 2008 am KIT Zentrum Energie, Karlsruhe; KIT Scientific Publishing: Karlsruhe, Germany, 2009.
- [5] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen, DIN EN ISO 14040, 2018.
- [6] Helistö et al., Backbone – An Adaptable Energy Systems Modelling Framework, Energies 2019. Source code: <https://gitlab.vtt.fi/backbone/backbone>
- [7] pypsa-eur, version rub-ee 2021-03-08. <https://github.com/PyPSA/pypsa-eur>
- [8] Pietzcker, R., Osorio, S., Rodrigues, R. Tightening EU ETS targets in line with the European Green Deal: Impacts on the decarbonization of the EU power sector. Applied Energy 2021;293.
- [9] Wernet, G. et al. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment 2016;21(9)1218–1230.

# ÖKOBILANZIELLE BEWERTUNG NETZGEKOPPELTER ENERGIESPEICHER

Simon Schürhoff

*Prof. Christian Doetsch, Lehrstuhl Cross Energy Systems, Ruhr-Universität Bochum / Fraunhofer UMSICHT*

Energiespeichern wird eine Schlüsselrolle bei der Dekarbonisierung der europäischen Energiesysteme zugesprochen[1]. Golombek u.a. [2] gehen beispielsweise für ein dekarbonisiertes Europa von einer benötigten Speicherkapazität von 351 GWh aus. Moser u.a. [3] erwarten eine geringere Speicherkapazität von 10 TWh. Es herrscht jedoch Einigkeit darüber das Energiespeicher benötigt werden, weshalb diese ökologisch bewertet werden sollten.

## Hintergrund

Die meisten Studien, die eine ökologische Bewertung von Energiespeichern in Betracht ziehen, verwenden die Ökobilanzierung beziehungsweise das „Life Cycle Assessment“ zur Quantifizierung der ökologischen Auswirkungen von Energiespeichern. Typischerweise wird in einer Ökobilanz der vollständige Lebenszyklus eines Produktes bewertet. Energiespeicher, die direkt oder indirekt an ein elektrisches Netz angeschlossen sind, können in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden und z.B. durch ihren Betrieb in dieser spezifischen Anwendung und im definierten Energiesystem zur Emissionsminderung oder zur Emissionssteigerung beitragen. Diese anwendungsspezifischen Veränderungen der Emissionen sind bisher kaum untersucht worden, während die reine technologiebezogene und ökonomische Betrachtung für verschiedene Energiespeichersysteme Stand der Forschung ist. In bisherigen Studien zur Ökobilanzierung von Energiespeichern wird die Nutzungsphase der Energiespeicher häufig nicht oder sehr vereinfacht betrachtet. Da der Lebenszyklus eines Produktes immer auch eine Nutzungsphase enthält, sollte diese auch betrachtet werden, wenn die Bewertung vollständig sein soll. [4, S. 11]

Der typische Lebenszyklus eines Energiespeichers mit der Reihenfolge und Unterteilung der einzelnen Lebenswegphasen ist in Abbildung 1 dargestellt. In der ersten Phase, die in der Abbildung als „Rohstoffgewinnung“ bezeichnet ist, werden Betriebsmittel und Energieaufwendungen berücksichtigt, die für die Extraktion der Rohstoffe aus ihren Fundstätten und für die ersten Weiterverarbeitungs- und Aufbereitungsschritte benötigt werden. Die Produktionsphase umfasst alle Aufwendungen, die mit der Produktion der Energiespeicher-Komponenten

verbunden sind und in der Transportphase werden die Aufwendungen für Transport, Aufstellung und Installation zusammengefasst. Die Entsorgungsphase kann aus einer Deponierung oder thermischen Verwertung bestehen. Alternativ können die Materialien, aus denen der Energiespeicher besteht, recycelt werden. Die Methode der Ökobilanzierung lässt offen, ob die zurückgewonnenen Stoffe für ein gleiches oder ein anderes Produkt verwendet werden. Für die Nutzungsphase werden in einer Ökobilanz alle Aufwendungen betrachtet, die zwischen der Installation und der Entsorgung eines Produktes auftreten. Da Energiespeicher mit dem Energiesystem interagieren und mit ihm in Wechselwirkung stehen, müssen diese Effekte, die auch eine Einsparung von Treibhausgasen beinhalten können, in eine Bewertung der Nutzungsphase einbezogen werden. Dies ist jedoch bei ökobilanziellen Bewertungen von Energiespeichern nicht der Fall. Auch die DIN-Normen für Ökobilanzen geben keinen Rahmen für eine solche Betrachtung von Produkten. [5] Innerhalb dieser Arbeit wird ein Ansatz entwickelt, der diese Lücke für Energiespeicher schließen soll.

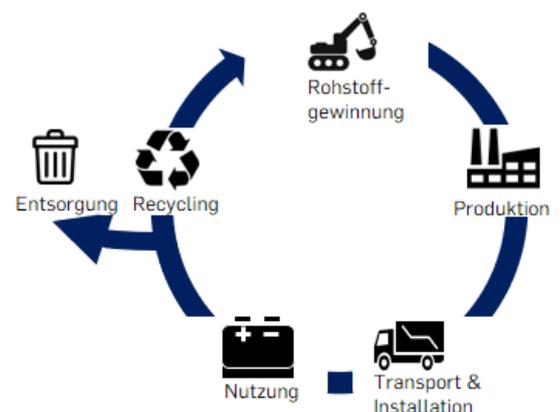


Abbildung 1: Beispielhafter Produktlebenszyklus eines Energiespeichers

## Speicherbetrachtung

Es existieren verschiedene Speichertypen, die unterschiedlich funktionieren und klassifiziert werden können. Darunter sind mechanische und (thermo-)mechanische Speicher wie Pumpspeicherkraftwerke und Druckluftspeicherkraftwerke sowie

elektro-chemische Speicher wie Lithium-Ionen-Akkumulatoren, Blei-Säure-Akkumulatoren, Natrium-Schwefel-Akkumulatoren und Redox-Flow-Batterien. In der hier beschriebenen Arbeit soll eine allgemeingültige Aussage über den Effekt getroffen werden, der mit dem Einsatz von Energiespeichern erreicht werden kann. Da es die genannte Vielzahl von Speichern gibt und alle in unterschiedliches Verhalten an den Tag legen, werden die Speicher auf charakteristische Größen reduziert. In den Analysen werden vor allem der Wirkungsgrad und die Ausspeicherzeit bzw. das Verhältnis der Speicherkapazität zur Leistung variiert. Dabei entspricht die Speicherkapazität der Energiemenge, die zwischen Einspeicherung und Ausspeicherung gespeichert werden kann. Tabelle 1 zeigt Werte für diese Größen, die typisch für die jeweiligen Energiespeicher sind und sowohl der Literatur [6] entstammen als auch an Hand aktuell installierter Energiespeicher ermittelt wurden [7].

Speichertyp	Wirkungsgrad [%]	Ausspeicherzeit [kWh/kW]
Pumpspeicherkraftwerk	70 - 87	1 - 10
Druckluftspeicherkraftwerk	43 - 70	1 - 20
Lithium-Ionen-Akkumulator	75 - 97	0,5 - 8
Blei-Säure-Akkumulator	63 - 90	1 - 10
Natrium-Schwefel-Akkumulator	75 - 90	1 - 8
Redox-Flow-Batterien	65 - 85	2 - 12

Tabelle 1: Typische Wirkungsgrade und Ausspeicherzeiten von verschiedenen Energiespeichern [6][7].

### Anwendungsbetrachtung

Die Betrachtung der Speicheranwendungen für unterschiedliche Energiesysteme erfolgt innerhalb des Energiesystemmodells, „PyPSA“ (Python for Power System Analysis) [8].

Es gibt starke Unterschiede von Energiesystemen, die heute auf der Welt existieren, die sich dauerhaft verändern. Innerhalb der Modellierung wird dies berücksichtigt, indem verschiedene Energiesysteme untersucht werden, die sich in der Zusammensetzung der Erzeugungseinheiten an Hand realer Energiesysteme orientieren, aber alle den gleichen

## Volker Mielchen, Zweckverband LANDFOLGE Garzweiler

In den Tagebaufolgelandschaften entstehen neue Potenziale für Erneuerbare Energien. Die neuen Energielandschaften müssen Landwirtschaft, Energieproduktion und Biodiversität integriert denken. Im Bereich Garzweiler wollen wir hierfür einen großflächigen Demonstrationsraum entwickeln und so einen Beitrag zum Strukturwandel leisten.

Verbrauch berücksichtigen, um Vergleichbarkeit sicherzustellen. Mit Hilfe von Informationen über die Stromerzeugung in den OECD-Ländern der „International Energy Agency“ (IEA) [9] werden Szenarien entworfen, die typische Erzeugungsstrukturen abbilden. In vier der Szenarien macht jeweils eine Art von Energieträgern den größten Anteil der Erzeugung aus on- und offshore Windenergie im Wind Szenario, nukleare Energie im nuklear Szenario, Energie aus fossilen Energieträgern im fossil Szenario und Energie aus Wasserkraft im Wasserszenario. In einem mittleren Szenario sind alle typischen Energieträger vorhanden, die in den Daten der IEA vorkommen und deren Anteile sind verteilt wie in den Ländern, in denen kein Energieträger dominierend ist.

Die aktuell betrachteten Anwendungen sind die Anwendungen, die zur Integration der erneuerbaren Energien dienen.

- Windenergieintegration
- Eigenverbrauchserhöhung von Photovoltaikanlagen
- Pufferspeicher zur Integration von Elektromobilität

Die Anwendungen werden zunächst einzeln untersucht und das Modell so ausgerichtet, dass entsprechend der Anwendungen optimiert wird. Beispielsweise wird im Fall der Windenergieintegration

versucht, so viel Energie wie möglich aus Windkraftwerken verbraucht werden kann dabei werden Speicher explizit dafür eingesetzt. Es wird immer auch eine Optimierung ohne Energiespeicher zum Vergleich durchgeführt. Als Ergebnis dieser Optimierung erhält man die Energie, die durch die verschiedenen Erzeugungseinheiten erzeugt werden muss um den Verbrauch zu decken bei unterschiedlichen Speicherkapazitäten die im System betrachtet werden und auch die Energie die ohne Energiespeicher erzeugt werden muss. Aus der Differenz zwischen den Ergebnissen mit Speicher und ohne Speicher kann jeweils der Effekt des Speichereinsatzes abgelesen werden.

Um diese Effekte in die Ökobilanz einfließen lassen zu können, werden mit Hilfe der Ökobilanzdatenbank „Ecoinvent“ [10] der Erzeugung von Energie aus einem jeweiligen Energieträger eine Umweltwirkung zugeordnet. Die Differenz der Umweltwirkungen im Vergleich vom Speichereinsatz und keinem Speichereinsatz stellen dann den ökobilanziellen Nutzen der Speicheranwendung dar. Abbildung 2 zeigt exemplarisch diesen Nutzen im Fall der klimaschädlichen Umweltwirkungen als „Global Warming Potential“ GWP gemessen in kg-CO<sub>2</sub>-eq, wenn Energiespeicher zu Integration von Windenergie verwendet werden. Dabei wurde auf die Darstellung des Szenarios mit fossilen Energieträgern und des Wasserszenarios verzichtet, da hier auf Grund der geringen installierten Leistung an Windenergie und der Flexibilität der anderen Erzeugungseinheiten kein Energiespeicher notwendig ist. Bei den weiteren Szenarien kommt es zu einer Reduktion der Emissionen. Es wird deutlich das im Windszenario, wo schon viele Windenergieanlagen installiert sind, die größte Reduktion der Emissionen erfolgt, während bei dem nuklearen Szenario bei geringeren

Speicherkapazitäten sich prozentual eine höhere Reduktion zeigt als im mittleren Szenario. Bei höheren Speicherkapazitäten ist jedoch die Reduktion im mittleren Szenario prozentual größer.

### Diskussion und Ausblick

In der Arbeit konnte gezeigt werden, dass eine Beurteilung der ökologischen Effekte auf diese Weise möglich ist und der Einsatz von Energiespeichern in 3 von 5 betrachteten Szenarien zur Emissionsreduktion innerhalb des Energiesystems führt wenn der Energiespeicher zur Windenergieintegration eingesetzt wird.

Im Weiteren müssen auch die restlichen Emissionen, die mit dem Lebenszyklus der Energiespeicher verbunden sind, erfasst werden. Mit Hilfe dieser kann festgestellt werden, ob der Speichereinsatz aus ökologischer Sicht sinnvoll ist. Dies wird im Rahmen einer Meta-Analyse bereits vorhandener Studien erfolgen. Durch die Betrachtung in den verschiedenen Szenarien kann nachgewiesen werden, welchen Effekt Energiespeicher vor und während der Transformation der Energiesysteme auf die ausgestoßenen Emissionen haben.

### Referenzen

- [1] European Commission, Study on energy storage - Contribution to the security of the electricity supply in Europe, 2020.
- [2] R. Golombek, A. Lind, H.-K. Ringkjøb und P. Seljom, „The role of transmission and energy storage in European decarbonization towards 2050“, Energy, Jg. 239, S. 122159, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122159.
- [3] M. Moser, H.-C. Gils und G. Pivaro, „A sensitivity analysis on large-scale electrical energy storage requirements in Europe under consideration of innovative storage technologies“, Journal of

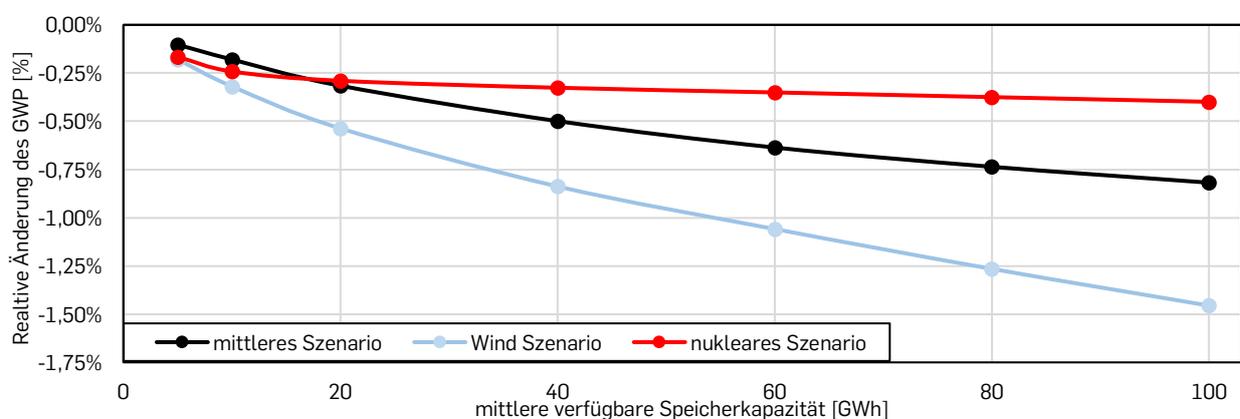


Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung der relativen Änderung des GWP bei dem Einsatz von Energiespeichern mit verschiedenen Kapazitäten, zur Windenergieintegration in drei verschiedenen Szenarien, mit einem Wirkungsgrad von 80 % und einer Ausspeicherzeit von einer Stunde.

Cleaner Production, Jg. 269, S. 122261, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122261.

- [4] R. Frischknecht, Lehrbuch der Ökobilanzierung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020.
- [5] DIN EN ISO 14044 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020, DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- [6] X. Luo, J. Wang, M. Dooner und J. Clarke, „Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation“, Applied Energy, Jg. 137, S. 511–536, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081.
- [7] National Technology and Engineering Solutions of Sandia, NTESS, Global Energy Storage Database. [Online]. Verfügbar unter: <https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/projects.html> (Zugriff am: 15. Juni 2021).
- [8] T. Brown, J. Hörsch und D. Schlachtberger, „PyPSA: Python for Power System Analysis“, Journal of Open Research Software, Jg. 6, 2018, Art. no. 4, doi: 10.5334/jors.188.
- [9] International Energy Agency, Electricity Information: Annual data on electricity and heat supply and consumption for OECD and selected non-OECD countries. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/electricity-information> (Zugriff am: 3. August 2021).
- [10] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz und B. Weidema, „The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology“, Int J Life Cycle Assess, Jg. 21, Nr. 9, S. 1218–1230, 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1087-8.

## Dr. Tim Grüttemeier, Städteregionsrat und Vorsitzender der Gesellschafterversammlung der Zukunftsagentur Rheinisches Revier

Strukturwandel im Rheinischen Revier ist mehr als die Substitution von der Braunkohle. Die in der Doctoral School gewonnenen Erkenntnisse aus der Geistes- und Gesellschaftswissenschaft, der Ingenieurwissenschaft und der Naturwissenschaft bilden die Grundlage und sind wichtiger Anhaltspunkt für Zukunftsthemen im Rheinischen Revier. Die Erkenntnisse sind elementar und können, verbunden mit der Praxis und den Menschen vor Ort, den Weg für das umfassende Gelingen des Strukturwandels im Rheinischen Revier ebnen. Dass aus Wissenschaft und Forschung konkrete Projekte für eine Region erwachsen können, zeigen Projekte wie Bio4MatPro oder die Umsetzung des Forschungsflugplatzes Aachen-Merzbrück in der StädteRegion Aachen. Hier ist konkret fassbar, wie Impulse aus der Wissenschaft Wertschöpfung generieren können.

## ELEKTROKATALYTISCHE HERSTELLUNG VON SYNTHESEGAS

Mathias Smialkowski

Prof. Ulf-Peter Apfel, Lehrstuhl für anorganische Chemie 1, Ruhr-Universität Bochum

Die Energieerzeugung aus fossilen Brennstoffen ist monolithisch mit der Freisetzung des Treibhausgases Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) verbunden. Mit Aufdeckung des Klimawandels und dessen negativen Folgen für Mensch und Umwelt starteten nach und nach die Bemühungen die anthropogene Freisetzung dieses Gases in die Atmosphäre zu vermindern. Mit Etablierung der „Erneuerbaren Energien“, wie unter anderem Wind-, Wasser- und Solar- kraft bezeichnet werden, sollte die Abkehr von klimaschädlichen, fossilen Energieträgern gelingen. Jedoch ist die flächendeckende Verwendung und die Integration ins bestehende Energienetz eine große Herausforderung. Ein großes Problem ist die Volatilität der zur Verfügung stehenden Energie. So kann beispielsweise Windenergie nur bei einem entsprechenden Mindest- sowie Höchstmaß an vorhandenem Wind effizient in elektrische Energie umgewandelt werden. Eine ähnliche Problematik ergibt sich bei der Nutzung von Solarenergie, welche nur bei Tageslicht in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Dies ist aber nicht immer synchron mit dem bestehenden Energiebedarf, sodass Zwischenspeicher und flexible Prozesse benötigt werden, um die Differenzen zwischen Bedarf und Verfügbarkeit auszugleichen – idealerweise Sektor-verknüpfend.<sup>[1]</sup>

In vielen Bereichen der chemischen Industrie sind Produktionsstrukturen auf die Verwendung erdölbasierter Ausgangsstoffe, wie Wasserstoff oder Kohlenmonoxid angewiesen. Die Mischung aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid wird meist als „Synthesegas“ bezeichnet und in variierendem Stoffmengenverhältnis für die Herstellung einer Vielzahl chemischer Zwischenprodukte benötigt. Eine vollständige

Umrüstung des chemischen Sektors würde durch den hohen Investitionsbedarf den Wechsel auf nachhaltige Rohstoff- und Energiequellen hemmen oder gar zum Erliegen bringen, weshalb hybride Strukturen zur Sektorenkupplung notwendig sind. Ein mögliches Bindeglied zwischen dem nachhaltig gestalteten Energiesektor und der chemischen Industrie stellt die Umwandlung von elektrischer in chemische Energie dar. Dieses Konzept wird auch als „Power-to-X“ bezeichnet, wobei das „X“ für verschiedene Produkte, wie eben Kohlenmonoxid und Wasserstoff, aber andere chemische Produkte stehen kann (Abbildung 1). Im Prinzip wird hier mit Hilfe von elektrischem Strom Synthesegas erzeugt.<sup>[2,3]</sup>

Mittels der sogenannten Elektrolyse von Wasser kann molekularer Wasserstoff generiert und bereitgestellt werden („Wasserspaltung“). Dazu wird eine elektrische Spannung an eine elektrochemische Zelle angelegt, welche von Wasser durchströmt wird. Die Elektroden bilden Plus- und Minuspol innerhalb der Zelle und sind mit speziellen Materialien beschichtet. Diese Katalysator-Materialien senken die benötigte Energie für den Prozess der Wasserspaltung herab. Am Minuspol (die „Kathode“) entsteht der wertvolle Wasserstoff, wohingegen am Pluspol (die „Anode“) molekularer Sauerstoff entsteht. Die Reaktion am Minuspol wird mit „HER“ (Hydrogen evolution reaction) abgekürzt. Der gesamte Aufbau wird als „Elektrolyseur“ bezeichnet.

Des Weiteren kann das Treibhausgas  $\text{CO}_2$  mittels Elektrizität und Wasser in kurzkettinge Kohlenwasserstoffe (synthetisches Erdgas), einfache Alkohole (Methanol, Ethanol) oder Kohlenmonoxid (CO) reaktiv umgewandelt werden („ $\text{CO}_2\text{RR}$ “). Die Funktionsweise der  $\text{CO}_2$ -Umwandlung ist sehr ähnlich zur Wasserspaltung. Auch hier ist ein Katalysator auf den Elektroden notwendig, um die Reaktion effizient und zielgerichtet ablaufen zu lassen.

Durch Parallelschaltung der Elektrolyse von Wasser und der elektrochemischen CO-Produktion könnte Synthesegas aus erneuerbaren Energien erzeugt und in einem nachgeschalteten Prozess direkt verwendet werden. Somit wäre Power-to-X eine sinnvolle Technologiegruppe zur symbiotischen Verknüpfung der verschiedenen Sektoren.

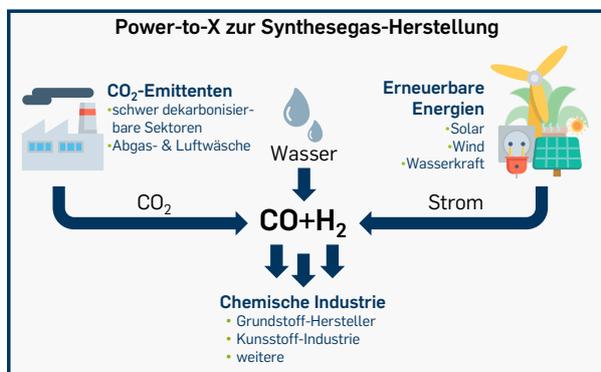


Abbildung 1: Grundidee der Sektorkupplung mittels Power-to-X.

Elektrolyseure zur Herstellung von Wasserstoff sind bereits käuflich zu erwerben, benötigen meist aber teure und empfindliche Katalysatoren auf Basis von seltenen Edelmetallen, wie Platin oder Iridium. Die Entwicklung robuster, effizienter und dennoch kostengünstiger Alternativen zu diesen Katalysator-Materialien ist daher ein wichtiger Teilaspekt zur wirtschaftlichen Nutzung dieser Technologie. Die Stabilität spielt neben der Effizienz ebenfalls eine wichtige Rolle. Die Katalysatoren müssen eine hohe Langlebigkeit unter Prozessbedingungen aufweisen. Dies ist bei der Erforschung solcher Materialien zu berücksichtigen.

Die genannten Aspekte sind auch größtenteils auf die elektrokatalytische CO<sub>2</sub>-Reduktion zutreffend. Die Anwendung der CO<sub>2</sub>-Reduktion bietet ein hohes Einsatzpotential, welches jedoch durch Hürden, wie der geringen Langlebigkeit der Katalysator-Systeme, die Produktselektivität, sowie die Wirkungsgrade der aktuell eingesetzten Materialien, gemindert wird. Die verwendeten Katalysatoren basieren vor allem auf Kupfergruppenmetallen (Kupfer, Silber, Gold), sowie Schwermetallen (Cadmium, Blei, Bismuth) mit aufwändiger Nanostrukturierung. Neben den Kosten und möglichen Gesundheitsgefahren der Ausgangsstoffe, hat auch die erforderliche Nanostrukturierung einen zusätzlich preissteigernden Effekt und erschwert eine Skalierung auf industriell relevante Größenordnungen.

Die Materialklasse der „Pentlandite“ (M<sub>9</sub>X<sub>8</sub>, M = Fe, Co, Ni; X = S), welche zu den Metallsulfiden gehören, haben das Potential die genannten Nachteile der herkömmlichen Materialien zu überwinden. Dabei bieten sowohl der Schwefel (S), als auch die Metalle (M) Möglichkeiten zur Variation und Optimierung. So kann ein Austausch des Schwefels mit anderen Elementen, wie z.B. Selen, erfolgen oder die Stoffmengenverhältnisse der Metalle variiert werden.<sup>[4-7]</sup> Dabei können die Materialien mit relativ einfachen Mitteln hergestellt werden, wie beispielsweise durch die Hochtemperatursynthese im Ofen oder mittels Mechanochemie in einer Hochleistungskugelmühle.<sup>[8,9]</sup> Daraus ergibt sich eine Vielzahl an möglichen Varianten an Katalysatoren für die elektrokatalytische Wasserstoffherzeugung oder die CO<sub>2</sub>-Reduktion. Zur Überwindung der genannten Nachteile herkömmlicher Systeme ist neben der Optimierung und dem tieferen Verständnis der Katalysatoren auch das Design und Verständnis der Katalysator-Umgebung von großer Bedeutung. An dieser Stelle knüpft dieses Promotionsprojekt an. Das Ziel ist die Bereitstellung optimierter Katalysatoren und Elektroden.<sup>[10]</sup>

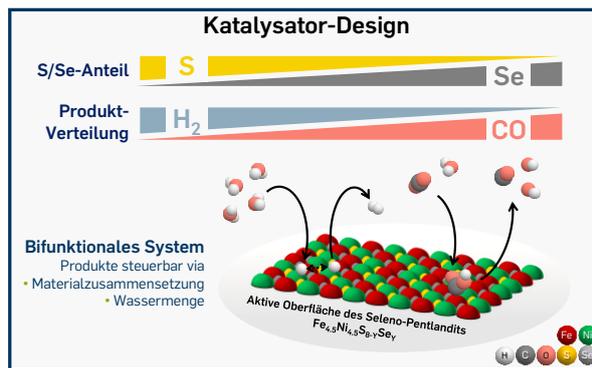


Abbildung 2: Ergebnisse des Katalysator-Designs von Seleno-Pentlanditen.

Der Austausch von Schwefel durch Selen wurde im Rahmen der Promotion bereits betrachtet und die Ergebnisse in der Fachpresse publiziert (Abbildung 2).<sup>[11,12]</sup> Eine neue Materialklasse der synthetischen Seleno-Pentlandite mit der allgemeinen Summenformel Fe<sub>4.5</sub>Ni<sub>4.5</sub>S<sub>8-y</sub>Se<sub>y</sub> (Y = 1 - 5) wurde geschaffen und elektrochemisch bezüglich der Wasserstoffherzeugung und der CO<sub>2</sub>-Reduktion untersucht. Phasenreine Seleno-Pentlandite wurden bis zu einem maximalen Selenanteil von fünf Äquivalenten erhalten (Y = 5). Es wurde belegt, dass mit steigendem Selenanteil der Materialien, die Bindungslängen und interatomaren Abstände innerhalb der Substanzen zunehmen. Die Folge daraus waren eine verminderte Reaktivität bei der Wasserstoffherzeugung, da die für die Aktivität verantwortlichen Zentren auf der Oberfläche nicht mehr im idealen Abstand zueinander angeordnet waren. Dies hatte jedoch auch zur Folge, dass die Selen-reichen Materialien eine höhere Aktivität für die elektrokatalytische CO<sub>2</sub>-Reduktion in organischen Lösemitteln aufwiesen. Diese Aktivitätssteigerung nahm analog zum Selenanteil zu, wobei als CO<sub>2</sub>-Hauptprodukt CO erhalten wurde. Des Weiteren wurde der Effekt der Wassermenge auf das Reduktionsverhalten der Katalysatoren untersucht. Wie bereits erwähnt kann die Reduktion von CO<sub>2</sub> nur in der Gegenwart von Wasser korrekt ablaufen. Hier kann es allerdings vermehrt zur H<sub>2</sub>-Produktion kommen, welche dann mit der CO<sub>2</sub>-Reduktion konkurriert und dessen Effizienz mindert. Aus diesem Grund wurden die Experimente in wasserarmen und wasserreichen Elektrolyten durchgeführt. Im wasserarmen Elektrolyten wurde Kohlenmonoxid als Hauptprodukt erhalten und Wasserstoff nur in sehr geringen Mengen erzeugt. Im wasserreichen Elektrolyten hingegen kehrte sich das Verhältnis um und Wasserstoff war das Hauptprodukt neben sehr geringen Mengen an CO.

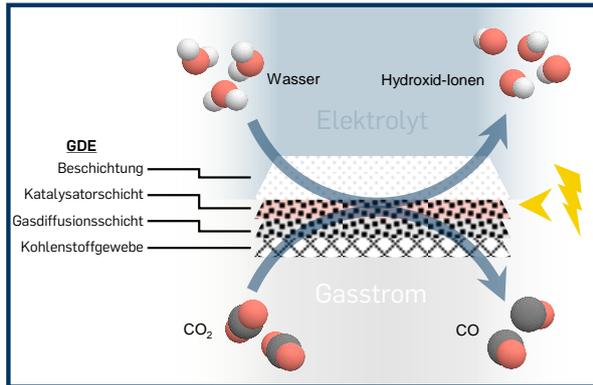


Abbildung 3: Konzept einer Gasdiffusionselektrode.

Diese Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit der Elektroden- und Prozess-Optimierung nachfolgend zur Materialuntersuchung. Zwar können die beschriebenen Katalysatoren in Bulkform verwendet werden und es ist keine künstliche Nanostrukturierung erforderlich, was die Schlichtheit der hier beschriebenen Katalysatoren unterstreicht – allerdings zeigen die Ergebnisse auch, dass sowohl das Katalysatormaterial als auch die Reaktionsbedingungen eine wichtige Rolle bei der Abstimmung der CO<sub>2</sub>RR-Aktivität spielen. Die Optimierung der Reaktionsumgebung der hier beschriebenen Materialklasse durch Änderung der Elektrodenzusammensetzung sollte daher ebenfalls zu einer verbesserten CO<sub>2</sub>RR in wässrigen Umgebungen führen und wird derzeit untersucht. Die Grundidee ist, dass der Katalysator uneingeschränkt in wässrigen Medien verwendet werden kann, ohne dass die parasitäre Wasserstoffproduktion die Effizienz der CO<sub>2</sub>-Reduktion vermindert. Dazu werden die Materialien in feiner Pulverform verwendet und in Gasdiffusionselektroden (GDE) eingebaut (Abbildung 3). Solche GDEs sind mehrlagige Kompositelektroden und bestehen zum einen aus dem elektrochemisch aktiven Katalysatormaterial, wie beispielsweise dem Fe<sub>4.5</sub>Ni<sub>4.5</sub>S<sub>4</sub>Se<sub>4</sub>-Material, Kohlenstoff als Träger, Polytetrafluorethene (PTFE) als Binder und einer Gasdiffusionslage auf Kohlenstoffgewebebasis. Die GDE wird dazu in eine spezielle Zelle eingebaut, bei der die Elektrode einseitig mit gasförmigen CO<sub>2</sub> bespült wird. Auf der anderen Seite befindet sich der Elektrolyt, durch den sich die Ionen zwecks Leitfähigkeit bewegen können, und die Gegenelektrode. Das CO<sub>2</sub> diffundiert in der GDE durch die Diffusionslage an den Katalysator und wird dort zum gewünschten Produkt umgesetzt. Das Wasser, muss ebenfalls durch die GDE an die Oberfläche des Katalysators diffundieren. In der Theorie kann durch Anpassung der Schichtdicken, besondere Additive, Elektrolytzusammensetzung, Katalysatormenge und vielen

weiteren Parametern, die Wassermenge reguliert und die Reaktion zugunsten der CO<sub>2</sub>RR verschoben werden.<sup>[13]</sup> Die Forschungen in diesem Bereich dauern noch an.

## Referenzen

- [1] Martin Wietschel et al., *Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen*, Bundesministerium Für Umwelt, Naturschutz Und Nukleare Sicherheit, Dessau-Roßlau, 2019.
- [2] R. Daiyan, I. MacGill, R. Amal, *ACS Energy Lett.* 2020, 5, 3843–3847.
- [3] M. Ozturk, I. Dincer, *Int. J. Hydrog. Energy* 2021, 46, 31511–31522.
- [4] B. Konkona, K. junge Puring, I. Sinev, S. Piontek, O. Khavryuchenko, J. P. Duerholt, R. Schmid, H. Tueysuez, M. Muhler, W. Schuhmann, U.-Peter. Apfel, *Nat. Commun.* 2016, 7, 12269–12277.
- [5] S. Piontek, C. Andronescu, A. Zaichenko, B. Konkona, K. junge Puring, B. Marler, H. Antoni, I. Sinev, M. Muhler, D. Mollenhauer, B. Roldan Cuenya, W. Schuhmann, U.-P. Apfel, *ACS Catal.* 2018, 8, 987–996.
- [6] S. Piontek, K. junge Puring, D. Siegmund, M. Smialkowski, I. Sinev, D. Tetzlaff, B. R. Cuenya, U.-P. Apfel, *Chem. Sci.* 2019, 10, 1075–1081.
- [7] D. Tetzlaff, K. Pellumbi, K. junge Puring, D. Siegmund, W. S. K. Polet, M. P. Checinski, U.-P. Apfel, *ChemElectroChem* 2021, 8, 3161–3167.
- [8] A. Sugaki, A. Kitakaze, *Am. Mineral.* 1998, 83, 133–140.
- [9] D. Tetzlaff, K. Pellumbi, D. M. Baier, L. Hoof, H. Shastry Barkur, M. Smialkowski, H. M. A. Amin, S. Grätz, D. Siegmund, L. Borchardt, U.-P. Apfel, *Chem. Sci.* 2020, 11, 12835–12842.
- [10] D. Siegmund, S. Metz, V. Peinecke, T. E. Warner, C. Cremers, A. Grevé, T. Smolinka, D. Segets, U.-P. Apfel, *JACS Au* 2021, 1, 527–535.
- [11] M. Smialkowski, D. Siegmund, K. Pellumbi, L. Hensgen, H. Antoni, M. Muhler, U.-P. Apfel, *Chem. Commun.* 2019, 55, 8792–8795.
- [12] K. Pellumbi, M. Smialkowski, D. Siegmund, U.-P. Apfel, *Chem. – Eur. J.* 2020, 26, 9938–9944.
- [13] K. Junge Puring, D. Siegmund, J. Timm, F. Möllenbruck, S. Schemme, R. Marschall, U.-P. Apfel, *Adv. Sustain. Syst.* 2021, 5, 2000088.

# INNOVATIONSNETZWERKE UND WISSENSDIFFUSION IM RHEINISCHEN REVIER - EIN ANSATZ AGENTENBASIERTER MODELLIERUNG

**Christian Stehr**

*Prof. Michael Roos, Lehrstuhl für Makroökonomik, Ruhr-Universität Bochum*

Wissen ist Macht. Dieses altbekannte geflügelte Wort hat seit seiner ersten dokumentierten Erwähnung nichts von seiner Relevanz eingebüßt. Die hochentwickelten Industrieländer werden auch als Wissensgesellschaften oder -ökonomien bezeichnet, in denen Wissen als die zentrale Ressource gesehen wird. Dieser Perspektive folgt auch dieses Forschungsprojekt und kann daher in der Neo-Schumpeterianischen Theorie, einem Teilgebiet der Volkswirtschaftslehre, verortet werden.<sup>1</sup> Gemäß dieses Ansatzes basieren Innovationen auf Wissensgenerierung und -diffusion, und werden als die Hauptantriebskräfte für wirtschaftliche Entwicklung angesehen (Hanusch und Pyka 2007).

Ein Blick in das Wirtschafts- und Strukturprogramm der Zukunftsagentur Rheinisches Revier (ZRR 2021) zeigt, dass auch hier Wissen und Innovationen als zentrale Schlüssel zur Bewältigung der Herausforderungen des Strukturwandels im Rheinischen Revier gesehen werden. In Übereinstimmung mit aktueller wirtschaftswissenschaftlicher Literatur sieht die ZRR (2021) ein leistungsfähiges regionales Innovationssystem als Voraussetzung für den Erfolg der Region an. Einen wichtigen Bestandteil eines solchen Systems bilden sogenannte Innovationsnetzwerke. In diesen Netzwerken interagieren eine breite Anzahl verschiedener ökonomischer Akteure, um bestehendes Wissen auszutauschen und neues Wissen zu generieren (Kudic 2014).

Der Untersuchung ebendieser Innovationsnetzwerke und ihrer Dynamiken im Rheinischen Revier widmet sich dieses Forschungsprojekt. Zentrale Fragen, die beantwortet werden, sind: Wie bildet sich das Innovationssystem, wie entstehen Kooperationen und wie findet Wissensdiffusion statt? Welche Hemmnisse existieren bei diesen Prozessen?

## **Agentenbasierte Modellierung als Werkzeug der Wahl**

Bei der Untersuchung eines Innovationsnetzwerks können konventionelle wirtschaftswissenschaftliche Methoden nur mit Abstrichen eingesetzt werden. Zum einen müssen die Unterschiede der einzelnen Akteure sowie ihre Verhältnisse untereinander in einem Netzwerk abgebildet werden. Zum anderen muss auch die Ressource Wissen explizit

einbezogen werden. Da diese Voraussetzungen durch agentenbasierte Modellierung erfüllt werden, kommt diese bei dem Forschungsprojekt als wissenschaftliches Untersuchungswerkzeug zum Einsatz. Bei der agentenbasierten Modellierung werden die wesentlichen für die Untersuchung relevanten Eigenheiten eines Systems vereinfacht abgebildet. Akteure aus dem realen System können als Agenten mit unterschiedlichen Eigenschaften integriert werden. Das Verhalten der Agenten wird dann per Computer simuliert und führt zu Effekten für das ganze betrachtete System (im hier vorliegenden Fall führt beispielsweise der Austausch von Wissen unter den

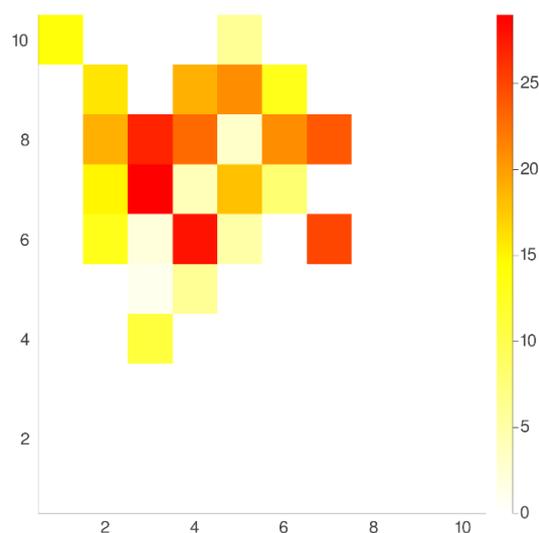


Abbildung 1: Wissensmatrix eines Agenten zu Beginn der Simulation. In den farbigen Feldern liegt das Wissen des Agenten zwischen 1 und 30.

Agenten zu einem bestimmten Wissensgesamtiveau des Systems, in Abhängigkeit davon, wie effizient dieser Austauschprozess abläuft). Ein weiterer Vorteil dieses Werkzeugs liegt darin, dass Auswirkungen wirtschaftspolitischer Eingriffe virtuell untersucht werden können, bevor sie in der Realität zum Einsatz kommen (Müller et al. 2017).

## **Programmierung der Hauptprozesse des Modells**

Aufbauend auf bereits vorhandenen agentenbasierten Modellierungen von Innovationsnetzwerken in

<sup>1</sup> Der Name geht zurück auf den Ökonomen Joseph Schumpeter (1912), der als einer der ersten Autoren die besondere Bedeutung von Innovationen für den Wirtschaftsprozess herausstellte.

der Forschungsliteratur (wie dem von Müller et al. 2017), stehen bei dem hier programmierten Modell zwei wesentliche Prozesse im Vordergrund:

- der Wissenstransfer
- die Kooperationspartnersuche

Der Wissenstransfer stützt sich auf zwei wichtige Konzepte, wie sie in einem viel beachteten Papier von Cohen und Levinthal (1990) beschrieben sind: Einerseits hängt die Fähigkeit von Organisationen oder Unternehmen, Innovationen zu generieren, oft vom Zugang zu externem Wissen ab, andererseits muss aber auch die Fähigkeit zur Aufnahme dieses Wissens gegeben sein. Diese Fähigkeit ist wiederum daran geknüpft, ob schon Vorwissen im jeweiligen Wissensfeld vorhanden ist und ob das Wissen nicht zu weit vom eigenen entfernt ist. Dieses Phänomen wird als die kognitive Distanz bezeichnet (Nootboom et al. 2007). Für Agenten im Modell heißt das, dass für einen erfolgreichen Wissenstransfer zwei Bedingungen erfüllt sein müssen: Erstens muss das zu lernende Wissen in einem Feld liegen, in dem eigenes Wissen vorhanden ist, oder an einen Bereich mit eigenem Wissen angrenzen (Abbildung 1 zeigt beispielhaft eine Wissensmatrix eines zufälligen Agenten mit insgesamt 100 Feldern. In den Feldern der unteren rechten Ecke könnte dieser Agent momentan kein Wissen aufnehmen). Zweitens darf das

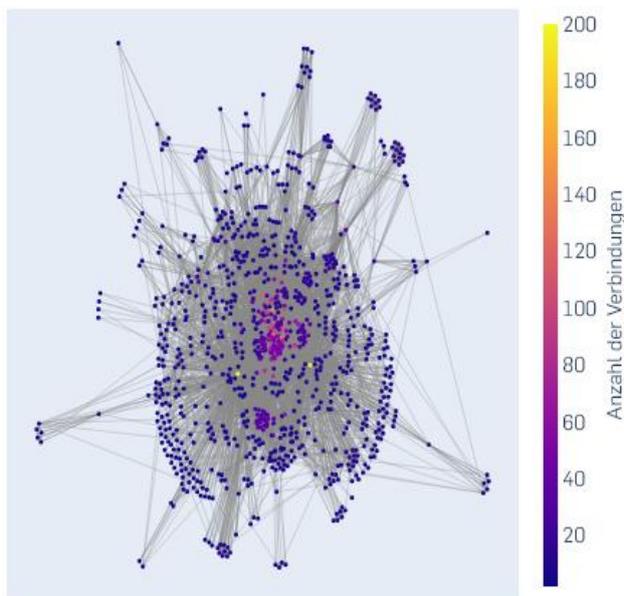


Abbildung 2: Innovationsnetzwerk des Rheinischen Reviers basierend auf Daten des Förderkatalogs, 2020. Knoten: Unternehmen, Organisationen etc. Kanten: Verbindungen über gemeinsame Verbundprojekte.

## Dr. Phil Friedrichsmeier, Kompetenzfeld Innovations- transfer, Wirtschaftsförderung Rhein-Erft GmbH

Die Einbindung eines möglichst großen Kreises an Stakeholdern ist für die Klärung von Zielbildern im Kontext des Strukturwandels im Rheinischen Revier von nicht zu unterschätzender Bedeutung. Im unmittelbaren Austausch zwischen einzelnen Akteuren / Vertretern von Akteursgruppen ist es in den Workshops von Frau Athmer und Herrn Stehr gelungen Rollenbilder und Einflüsse zu klären bzw. zu schärfen. Weiterhin konnten wesentliche Handlungsfelder im Strukturwandel-Prozess herausgearbeitet und Maßnahmen in den relevantesten Handlungsfeldern abgeleitet werden.

Als ein zentrales Ergebnis konnte ein Bild der Interdependenzen zwischen fast 30 Kernthemen aus der Perspektive der wirtschaftlichen Stakeholder erstellt werden, welches den überaus komplexen Kernprozess „Strukturwandel im Rheinischen Revier“ aus wirtschaftlicher Sicht aufspannt.

Niveau des Wissens in dem entsprechenden Feld nicht zu weit vom eigenen entfernt sein (maximale kognitive Distanz).

Um Wissen von anderen Agenten aufzunehmen, begeben sich Agenten auf Kooperationspartnersuche, wobei verschiedene Suchmodi zum Einsatz kommen. Dieser Prozess ist im Modell der Förderpraxis auf Bundesebene nachempfunden, bei dem sich gemeinsame Partner zu einem Forschungsverbund zusammenfinden und bei erfolgreichem Antrag für einen begrenzten Zeitraum

gefördert werden können (BMBF 2022). Daten für das Rheinische Revier zeigen, dass diese Art der Förderung in den letzten Jahrzehnten immer häufiger zum Einsatz kommt. Abbildung 2 zeigt das Innovationsnetzwerk im Rheinischen Revier anhand von Daten über Verbundprojekte aus dem online verfügbaren Förderkatalog (BMBF 2022), die im Jahr 2020 aktiv waren.

### Modellierung mit Stakeholderunterstützung

Diese aus vorhandener Literatur und Empirie abgeleiteten Inhalte des Modells werden zusätzlich mit Elementen aus dem partizipatorischen Modellieren mit Stakeholdern ergänzt. Bei dieser Art des Modellierens wird direkt mit Stakeholdern zusammen an Modellentwicklung, Ergebnisinterpretation, möglichen Interventionen und anderen Inhalten gearbeitet. Dies verstärkt die Glaubwürdigkeit der Ergebnisse und die Nützlichkeit für potentielle Entscheidungsträger (Voinov und Bousquet 2010).

Zu diesem Zweck wurden bisher drei Workshops mit Stakeholdern aus dem Rheinischen Revier (Coronabedingt online) abgehalten. Teilnehmende kamen beispielsweise aus der ZRR, aus Wirtschaftsförderungen oder großen in der Region tätigen Unternehmen. Anhand einer ersten Rohfassung wurden das Modell und zugrundeliegende Prozesse und Parameter im Laufe der Workshops mithilfe des Inputs der Stakeholder weiterentwickelt.

### Der Simulationsablauf

Die Simulation wird für jede verschiedene Parametereinstellung und einer bestimmten Anzahl von Simulationsschritten mehrfach durchgeführt. Abbildung 3 zeigt vereinfacht, welche Aktionen jeder Agent in jedem Schritt der Simulation durchläuft.

Dipl.-Ing. Carsten Krause,  
HyCologne Wasserstoff Region  
Rheinland e.V.

Unser Verein HyCologne arbeitet unter dem Motto „Vernetzen. Entwickeln. Machen.“ an innovativen und nachhaltigen Wasserstoff-Projekten – da sind für uns Forschungsprojekte, die diesen Dreiklang unterstützen, natürlich spannend. Die Einladung, bei den Workshops in den Projekten von Miriam Athmer und Christian Stehr aktiv zu werden, war für uns nicht nur eine Gelegenheit, ihre Forschung zu unterstützen. Wir konnten mit anderen Akteuren im Strukturwandel im Rheinischen Revier in Kontakt kommen und wertvolle Eindrücke mitnehmen.

Zuerst werden die direkten Verbindungen bei abgelaufenen Projekten beendet und neue Verbindungen geknüpft, sofern passende Partner gefunden werden können. Als nächstes folgt der Wissenstransfer mit allen zu diesem Zeitpunkt direkt verbundenen Agenten, sofern passende Wissensfelder existieren und die kognitive Distanz nicht überschritten wird.

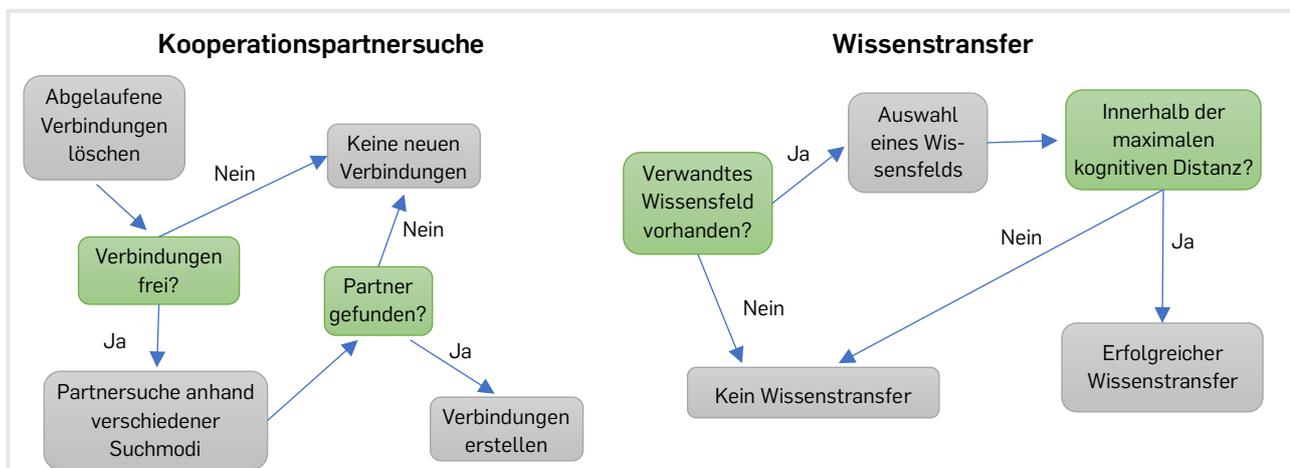


Abbildung 3: Vereinfachte Übersicht der Aktionen eines Agenten während eines Simulationsschritts

### **Ergebnisse und Ausblick**

Die Zusammenarbeit mit den Stakeholdern hat sich als sehr wertvoll für den Entstehungsprozess des agentenbasierten Modells erwiesen. Insbesondere die Fragen, wie Organisationen und Unternehmen Kooperationspartner finden und welche Faktoren bei einem Transfer von Wissen eine Rolle spielen, lieferten entscheidende Erkenntnisse bei der Konfiguration der Prozesse und Parameter des Modells.

Nachdem das Modell weiter validiert und Sensitivitätsanalysen unterzogen wurde, können in einem nächsten Schritt Experimente und Hypothesen im Modell getestet werden. So können beispielsweise auch Rückschlüsse über die Auswirkungen von innovationspolitischen Entscheidungen im Rheinischen Revier eingeschätzt werden.

Die finalen Ergebnisse sollen daraufhin noch einmal den Stakeholdern präsentiert werden, sodass diesen die Möglichkeit zu einem abschließenden Feedback gegeben wird.

Voinov, A. und Bousquet, F., 2010. Modelling with stakeholders. *Environmental modelling & software*, 25(11), S. 1268-1281.

ZZR Zukunftsagentur Rheinisches Revier, 2021. Wirtschafts- und Strukturprogramm für das Rheinische Zukunftsrevier 1.1 (WSP 1.1).

### **Referenzen**

BMBF Bundesministerium für Forschung und Bildung, 2022. Förderkatalog. <http://www.foerderportal.bund.de/foekat>, letzter Zugriff am 02.03.2022.

Cohen, W.M. und Levinthal, D.A., 1990. Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. *Administrative science quarterly*, S. 128-152.

Hanusch, H. und Pyka, A. eds., 2007. *Elgar companion to neo-Schumpeterian economics*. Edward Elgar Publishing.

Kudic, M., 2014. Innovation networks in the German laser industry: Evolutionary change, strategic positioning, and firm innovativeness. Springer.

Müller, M., Kudic, M. und Pyka, A., 2017. Ex-ante Evaluation von Investitionsalternativen: Am Beispiel von Wissenstransfer-, Lern- und Innovationsprozessen. *TATuP-Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis*, 26(3), S. 51-57.

Nooteboom, B., Van Haverbeke, W., Duysters, G., Gilsing, V. und Van den Oord, A., 2007. Optimal cognitive distance and absorptive capacity. *Research policy*, 36(7), S. 1016-1034.

Schumpeter, J.A., 1912. Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung: Eine Untersuchung ueber Unternehmerrgewinn. Kaptial, Kredit, Zins und den Konjunkturzyklus. Duncker und Humblot, Berlin.

## DIE ROLLE DEUTSCHLANDS IM KONTEXT DER ENERGIEWENDE. EINE ETHISCHE UNTERSUCHUNG NORMATIVER ZIELKONFLIKTE UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DES BRAUNKOHLEAUSSTIEGS

Friederike Henke (geb. Asche)

*Prof. Klaus Steigleder, Arbeitsbereich Angewandte Ethik, Ruhr-Universität Bochum*

Die Ethik als Teilgebiet der Philosophie ist die Wissenschaft der Moral. Innerhalb dieser Disziplin existieren verschiedene Ansätze, um moralisch gebotene Handlungen herzuleiten und zu rechtfertigen. Einer von ihnen ist der sogenannte rechte-basierte Ansatz. Dieser wird in diesem Dissertationsprojekt verfolgt und u.a. an Alan Gewirths 1978 erschienenen Buch „Reason and Morality“ anknüpfend hergeleitet. Einige der wichtigsten Punkte seien an dieser Stelle kurz zusammengefasst:

Jeder Mensch besitzt die gleichen moralischen Rechte, welche als Anspruchsrechte auf die notwendigen Voraussetzungen für ein selbstbestimmtes Leben zu verstehen sind. Laut Gewirth lassen sich diese Rechte direkt aus der Tatsache ableiten, dass Menschen intentional agieren - also Handlungen vollziehen. Sie müssen somit auch anerkennen, dass sie bestimmte konstitutive Güter benötigen. Diese sind laut Gewirth Freiheit und Wohlergehen. Wer leugnet, dass er oder eine andere ein Recht auf diese Güter innehat, verwickelt sich seiner Theorie zufolge in einen Selbstwiderspruch.

In der Praxis können moralische Rechte, aufgrund der Komplexitäten realer Bedingungen, in Konflikte miteinander geraten. Das heißt, dass eine Situation entsteht, in der ein oder mehrere Menschen Anspruchsrechte auf bestimmte Güter innehaben, diese aber nicht alle gleichzeitig erfüllt werden können. Hier ist es wichtig, dass sich moralische Rechte hierarchisch zueinander verhalten. In der Regel lässt sich also entscheiden, welches moralische Recht in einer gegebenen Konfliktsituation handlungsleitend ist. Es kann zum Beispiel gerechtfertigt sein, das Versprechen, bei einem Umzug zu helfen, zu brechen, wenn für denselben Zeitraum ein wichtiges Bewerbungsgespräch angesetzt wird. Auch lassen sich Fälle von Notwehr rechtfertigen oder auch bestimmte, meist durch den Staat ausgeübte, Freiheitseinschränkungen (Vgl., Gewirth 1978).

Eine besondere Rolle in dieser Hierarchie moralischer Rechte spielen diejenigen Rechte, die Henry Shue als basale Rechte klassifiziert. Sie beziehen sich auf derart grundlegende Voraussetzungen eines menschenwürdigen Lebens, dass sie unter keinen Umständen eingeschränkt werden dürfen – auch

nicht für die Gewährleistung anderer moralischer Rechte. Zu diesen basalen Rechten zählen laut Shue das Recht auf (körperliche) Sicherheit, Subsistenzrechte sowie Partizipation und Bewegungsfreiheit als zwei Arten von Freiheitsrechten (Vgl., Shue 1996). Aus diesen Erkenntnissen lassen sich nun im Bereich der Klimaethik einige Schlussfolgerungen für die moralische Bewertung des Klimawandels ziehen.

### ***Verletzung grundlegender moralischer Rechte durch die Folgen des Klimawandels***

Die Forschung bezüglich der Ursachen und Folgen des Klimawandels hat zweifelsfrei ergeben, dass die Erderwärmung durch das menschliche Emittieren von Treibhausgasen verursacht wird und dass die Konsequenzen, in Form von beispielsweise Hitze, Dürren, Extremwetterereignissen und dem Anstieg des Meeresspiegels, für das (Über-)Leben vieler heutiger und zukünftiger Menschen extrem bedrohlich sind (Vgl., Lynas 2021). Damit wird der Klimawandel auch zu einem erheblichen moralischen Problem. Durch die Folgen des Klimawandels sind insbesondere die oben dargestellten grundlegenden moralischen Rechte von zahlreichen Menschen betroffen. Da der Klimawandel außerdem durch menschliches Handeln verursacht wurde und wird, lassen sich diese Betroffenheiten als moralische Rechtsverletzungen klassifizieren. Auf diese muss schnellstmöglich und konsequent reagiert werden (Vgl., Shue 2020; 2014). Doch was genau lässt sich nun aus diesem Handlungsgebot ableiten?

Zunächst einmal ist festzustellen, dass das exzessive Emittieren von Treibhausgasen beendet werden muss. Sämtliche Energiesysteme müssen so transformiert werden, dass bei der Nutzung von Energie – also beim Heizen, motorisierten Fortbewegen oder Nutzen von elektrischen Geräten – keine zusätzlichen Treibhausgase mehr in die Atmosphäre gelangen und dort ihre schädigende Wirkung entfalten. Dieser Prozess wird auch als Dekarbonisierung und das angestrebte Ziel als Klimaneutralität betitelt. In Deutschland wurde durch das Klimaschutzgesetz festgelegt, die Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen (Vgl., Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 2021). Eines der

ambitioniertesten Teilprojekte in diesem Kontext ist der Braunkohleausstieg, der bis spätestens 2038 vollzogen worden sein soll (Vgl., Bundesregierung 2020). Ähnlich wie das Handlungsgebot „Klimawandel durch Dekarbonisierung bekämpfen!“ lässt sich auch das Handlungsgebot „Kohleausstieg!“ vergleichsweise leicht herleiten. Die Braunkohleverstromung ist eine der klimaschädlichsten Arten, Strom zu generieren. 2019 entstanden durch die fossile Stromerzeugung insgesamt 222 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen, davon entfielen 113 Mio. Tonnen auf die Braunkohleverstromung (Vgl., Umweltbundesamt 2021). Eine erfolgreiche Eindämmung des Klimawandels ist also ohne den Kohleausstieg schwer vorstellbar. Da der Kampf gegen den Klimawandel derart dringend ist, besitzt somit auch der Kohleausstieg eine hohe moralische Priorität. Nun könnte die Frage gestellt werden, ob an dieser Stelle die Arbeit der Ethik nicht getan sei. Es wurden Rechtsverletzungen festgestellt sowie die notwendigen Handlungsgebote identifiziert, die diesen Rechtsverletzungen Rechnung tragen sollen.

### **Umsetzungsproblematiken im Kontext des Braunkohleausstiegs**

Dem ist, wie dieses Dissertationsprojekt u.a. zeigen soll, nicht so. Wie oben bereits erwähnt, verhält es sich in der Realität meist so, dass verschiedene moralische Ansprüche in Konflikt geraten können. So ist es auch in diesem Fall: Bei der Umsetzung von Maßnahmen wie dem Kohleausstieg werden ebenfalls moralische Rechte tangiert. Sie laufen folglich Gefahr, verletzt zu werden. So sind mit wirtschaftlichen Aspekten wie der Wettbewerbsfähigkeit eines Staates oder einer Region sowie einer gesicherten Energieversorgung ebenfalls grundlegende moralische Rechte verknüpft – beispielsweise in Bezug auf die Nahrungsmittel- und Gesundheitsversorgung. Diese Aspekte sind dem Kampf gegen den Klimawandel also nicht grundsätzlich unterzuordnen. Stattdessen muss stets sehr genau abgewogen werden, in welcher Form und bis zu welchem Grad sie eingeschränkt werden können und dürfen. Nun ist es eher unwahrscheinlich, dass durch den Kohleausstieg die Wettbewerbsfähigkeit oder die Energieversorgung Deutschlands derart stark betroffen sein wird, dass basale (grundlegende) Rechte verletzt werden. Trotzdem kann es im Kontext dieser Konfliktfelder zu Ungerechtigkeiten kommen. Wenn unter Klimaschutzmaßnahmen zuvorderst weniger privilegierte Menschen leiden, zum Beispiel, wenn Energiepreise durch bestimmte Maßnahmen steigen und so die soziale Teilhabe für ärmere Bevölkerungsteile erschwert wird, dann widerspricht dies dem sogenannten Leistungsfähigkeitsprinzip.

Dieses besagt, dass mit dem Grad an vorhandenen Möglichkeiten zur Lösung eines Problems (finanzielle oder andere Ressourcen, Macht, Intelligenz, gesellschaftliche Rollen) auch der Grad an moralischer Verantwortung für dieses steigt (Vgl., Roser und Seidel 2013, 110–17; Shue 2015, 16/17). Auch vermeidbare soziale Härten, die möglicherweise regional durch einen nachteiligen, durch den Braunkohleausstieg ausgelösten, Strukturwandel entstehen, können nicht mit dem simplen Verweis auf den Kampf gegen den Klimawandel gerechtfertigt werden. Diese Problematiken sprechen zwar nicht grundsätzlich dagegen, ambitionierte Klimaschutzmaßnahmen zu implementieren, aber sie zeigen, dass ihre Umsetzung sehr komplex, konfliktbeladen und in bestimmten Umsetzungsformen ethisch nicht gerechtfertigt sind. Worauf ist also zu achten?

### **Ethische Handlungsempfehlungen**

Zunächst müssen Klimaschutzmaßnahmen bestimmten Kriterien der Effektivität genügen. Das heißt, sie müssen erkennbar in eine ganzheitliche klimapolitische Strategie eingebettet sein, die darauf ausgerichtet ist, auf globaler Ebene die Konzentration an Treibhausgasen in der Atmosphäre zu reduzieren. Andernfalls tragen sie nicht dazu bei, den Klimawandel zu bekämpfen und so basale Rechte, die durch diesen gefährdet sind, zu schützen. Sie können folglich auch nicht auf diese Art und Weise gerechtfertigt werden. Unmittelbar negative Konsequenzen, die durch die Klimaschutzmaßnahme selbst verursacht werden können (bspw. Arbeitsplatzverluste), verfügen dann über keine Rechtfertigungsgrundlage mehr. Damit zusammenhängend muss sehr ambitioniert daran gearbeitet werden, nach wie vor bestehende Wissenslücken in Bezug auf ein regeneratives Energiesystem zu schließen. Unter Expertinnen und Experten herrschen nach wie vor Debatten zum Beispiel darüber, wie und ob ein zu 100% auf Erneuerbaren basierendes Energiesystem funktionieren kann, wie hoch die Energie- und Speicherbedarfe in einigen Jahrzehnten ausfallen werden oder welche Rolle Wasserstoff spielen wird (Vgl., Heard u. a. 2017). Um die spezielle Rolle des Braunkohleausstiegs konstruktiver und gehaltvoller beurteilen zu können, wäre es zielführend, hier größere Einigkeit zu erreichen.

Neben dieser Entwicklung einer ganzheitlichen Strategie und der Identifizierung sowie Schließung von Wissenslücken, muss auf die unweigerlich entstehenden sozialen Härten reagiert werden. In jeder Umsetzungsform des Kohleausstiegs wird es zu Einschnitten in die Lebensrealität der betroffenen Menschen kommen. Dies muss politisch so begleitet

werden, dass die Betroffenen nicht in ihren anfangs erwähnten konstitutiven Rechten verletzt werden. Dies droht beispielsweise im Falle von Arbeitsplatzverlusten in Bezug auf die Möglichkeit zur sozialen Teilhabe.

Außerdem müssen demokratischeschädigende gesellschaftliche Entwicklungen im Blick behalten werden. Insbesondere die Thematik des Braunkohleausstiegs eignet sich ideal für die politische Agenda rechtspopulistischer Parteien wie der AfD (Vgl., Miosga 2019; Radtke und Schreurs 2019; Selk, Kemmerzell, und Radtke 2019). Hier sollte durch eine geeignete Kommunikationsstrategie zwischen Politik, Gesellschaft und Wissenschaft aber auch durch kluge Reaktionen auf die dargestellten Komplexitäten reagiert werden. Das ist notwendig, um zum einen Errungenschaften der liberalen Demokratie nicht aufs Spiel zu setzen und zum anderen, um Klimaschutzmaßnahmen nicht dadurch ad absurdum zu führen, indem sie Vertreterinnen und Vertretern klimawandelskeptischer Positionen zu mehr politischer Macht verhelfen.

### Fazit

Obschon Klimaschutzmaßnahmen wie der Kohleausstieg dringend moralisch geboten sind, ergeben sich bei der konkreten Umsetzung ebenfalls moralisch relevante Herausforderungen, die in normativen Zielkonflikten münden. Eine sorgfältige Analyse dieser Herausforderung ist zentral, um eine ethisch gerechtfertigte Umsetzung des Kohleausstiegs zu implementieren.

### Quellenverzeichnis

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). 2021. „Neues Klimaschutzgesetz“. 27. September 2021.

<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2021/10/14-neues-klimaschutzgesetz.html>.

Bundesregierung. 2020. „Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung und zur Änderung weiterer Gesetze (Kohleausstiegsgesetz)“. Dokumentations- und Informationssystem für Parlamentsmaterialien (DIP). 8. August 2020. <http://dipbt.bundes-tag.de/extrakt/ba/WP19/2587/258735.html>.

Gewirth, Alan. 1978. Reason and Morality. Chicago, London: The University of Chicago Press.

Heard, B. P., B. W. Brook, T. M. L. Wigley, und C. J. A. Bradshaw. 2017. „Burden of proof: A comprehensive review of the feasibility of 100% renewable-electricity systems“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76: 1122–33.

Lynas, Mark. 2021. 6 Grad mehr. Die verheerenden Folgen der Erderwärmung. Hamburg: Rowohlt.

Miosga, Manfred. 2019. „Systemtransformation in Zeiten eines zunehmenden Populismus. Soziale Innovationen als Elemente einer erfolgreichen Gestaltung der umkämpften Energiewende vor Ort“. In *Energiewende in Zeiten des Populismus*, herausgegeben von Radtke, Jörg, Weert Canzler, Miranda Schreurs, und Stefan Wurster, 101–41. Wiesbaden: Springer VS.

Radtke, Jörg, und Miranda A. Schreurs. 2019. „Klimaskeptizismus und populistische Bewegungen in Europa und den USA“. In *Energiewende in Zeiten des Populismus*, 145–79. Wiesbaden: Springer VS.

Roser, Dominic, und Christian Seidel. 2013. Ethik des Klimawandels. Eine Einführung. Darmstadt: WBG.

Selk, Veith, Jörg Kemmerzell, und Jörg Radtke. 2019. „In der Demokratiefalle? Probleme der Energiewende zwischen Expertokratie, partizipativer Governance und populistischer Reaktion“. In *Energiewende in Zeiten des Populismus*, herausgegeben von Jörg Radtke, Weert Canzler, Miranda Schreurs, und Stefan Wurster, 31–66. Wiesbaden: Springer VS.

Shue, Henry. 1996. Basic Rights, Subsistence, Affluence, and U.S. Foreign Policy. 2. Aufl. Princeton: Princeton University Press.

Shue, Henry. 2014. Climate Justice. Vulnerability and Protection. Oxford: Oxford University Press.

Shue, Henry. 2015. „Historical Responsibility, Harm Prohibition, and Preservation Requirement: Core Practical Convergence on Climate Change“. *Moral Philosophy and Politics* 2 (1): 7–31.

Shue, Henry. 2020. „Basic Rights and Climate Change“. In *Basic Rights, Subsistence, Affluence, and U.S. Foreign Policy, 40th Anniversary Edition*, 181–253. Princeton: Princeton University Press.

Umweltbundesamt. 2021. „Energiebedingte Emissionen“. 2. Juni 2021. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen#energiebedingte-emissionen-durchstromerzeugung>.

**Weitere Informationen zur  
Doctoral School Closed Carbon Cycle Economy  
unter**



[www.rdccce.rub.de/doctoralschool](http://www.rdccce.rub.de/doctoralschool)

## IMPRESSUM

### Herausgeberin

*Doctoral School Closed Carbon Cycle Economy  
Sprecher: Prof. Dr.-Ing. Roland Span  
Lehrstuhl für Thermodynamik  
IC 3-129  
Universitätsstr. 150  
44801 Bochum*

*Telefon 0234 32-23034  
Email: DS-CCCE@rub.de*

### Autor:innen

*Promovierende der DS CCCE (s. entsprechende Beiträge)  
Beiträge, Grußworte und Statements weiterer Autor:innen sind kenntlich gemacht.  
Die Verantwortung für den Inhalt liegt alleine bei den Autor:innen.*

### Gestaltung, Realisierung und Koordination

*Dr.-Ing. Nico Schneider*

Bochum, Mai 2022

Die Projekte "Doctoral School Closed Carbon Cycle Economy" und das Verbundvorhaben ITZ CC „Virtuelles Innovations- und Technologiezentrums zur stofflichen Nutzung nachhaltiger Kohlenstoffquellen (Carbon Conversion CC) in NRW" werden durch das

**Ministerium für Wirtschaft, Innovation,  
Digitalisierung und Energie  
des Landes Nordrhein-Westfalen**



gefördert.