

Abschlussbericht – Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Projekt: Vernetzungs- und Transferprojekt (ReInvent - Reduzierung von Treibhausgasen durch Prozessinnovationen in der Grundstoffindustrie)

Förderkennzeichen: 01LJ2009A - F

Berichtszeitraum: 01.01.2021 – 31.03.2026

Verbundkoordinator: DECHEMA e.V.
Dennis Krämer
Tel.: +49 69 7564-618
E-Mail: dennis.kraemer@dechema.de

Projektpartner:



1. Inhalt

Abschlussbericht – Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse	1
Arbeitspaket 1: Projektmanagement und Berichterstattung.....	3
AP1.1 Kommunikation mit PT und BMFTR sowie Berichterstattung.....	3
AP1.2 Lenkungsreis.....	3
Arbeitspaket 2: Begleitung und Vernetzung	4
AP2.1 KlimPro-Industrie Interne Plattform zum Datenaustausch	4
AP2.2 Organisation und Durchführung von Statuskonferenzen	5
AP2.3 Erarbeitung von Performance-Indikatoren und einer Methodik zur projektübergreifenden Potentialanalyse (TÖA, Nachhaltigkeitsbewertung)	7
AP2.4 und AP2.5 Branchenspezifische und Branchenübergreifende Workshops	8
AP2.6 Bestimmung der Performanceindikatoren und Finalisierung der Methodik für die projektübergreifende Potentialanalyse	14
Arbeitspaket 3: Technologietransfer.....	14
AP3.1 Interaktion nationale und internationale wissenschaftlich-technische Fachgremien.....	14
AP3.2 Formate für technische und kaufmännische Entscheider	15
AP3.3 Branchenspezifische und branchenübergreifende Potenzialanalyse	16
AP3.4 Räumliche Analyse, Infrastruktur.....	20
AP3.5 Stakeholderanalyse, Analyse fördernder Aspekte und Hemmnisse.....	24
AP3.6 Branchenspezifische und –übergreifende Technologiepfade.....	25
Arbeitspaket 4: Öffentlichkeitsarbeit	31
AP4.1 Öffentliche Website und Soziale Medien.....	31
AP4.2 Videoclips und allgemeine Pressearbeit	31
AP4.3 Messeauftritt.....	31
AP 4.4 Öffentliche Ergebnisdarstellung.....	33
Fazit	33

Arbeitspaket 1: Projektmanagement und Berichterstattung

AP1.1 Kommunikation mit PT und BMFTR sowie Berichterstattung

Über die gesamte Projektlaufzeit übernahm die DECHEMA als Konsortialführer die Koordination des Vernetzungs- und Transferprojekts RelInvent. Ziel war es, die Ressourcen sowie die komplementären Expertisen aller Projektbeteiligten wirksam zu bündeln, um die Projektziele zu erreichen und den im Rahmen von KlimPro-Industrie geförderten Projekten bestmögliche Unterstützung zu bieten.

Ein zentrales Element der Koordinationsarbeit war der kontinuierliche und enge Austausch mit dem Projektträger DLR. In allen Berichtszeiträumen stand die DECHEMA in regelmäßigem Kontakt mit dem Projektträger, um über den aktuellen Projektstand zu informieren, strategische Fragestellungen zu adressieren und die weitere Ausrichtung der Projektaktivitäten gemeinsam zu diskutieren. Vertreterinnen und Vertreter des Projektträgers wurden fortlaufend zu relevanten Projekttreffen eingeladen, insbesondere zu den Lenkungskreistreffen sowie zu Workshops. In diesen Formaten wurden der Fortschritt und wesentliche Ergebnisse des Projekts vorgestellt, geplante Maßnahmen erläutert und die nächsten Schritte abgestimmt.

Der Austausch und die Abstimmung zwischen den RelInvent-Projektpartnern wurde darüber hinaus strukturiert über AP1.2 organisiert und damit eine verlässliche interne Kommunikations- und Koordinationsbasis geschaffen. Insgesamt trug dieses Vorgehen dazu bei, die Projektaktivitäten transparent zu steuern, frühzeitig gemeinsame Entscheidungen herbeizuführen und die Umsetzung der geplanten Maßnahmen über die gesamte Laufzeit konsistent weiterzuentwickeln.

AP1.2 Lenkungskreis

Im Arbeitspaket 1.2 wurde der projektinterne Austausch der RelInvent-Verbundpartner strukturiert organisiert und damit die Grundlage für eine kontinuierliche Abstimmung, transparente Entscheidungswege und eine effiziente Steuerung des Begleitprojekts geschaffen. Zentrales Gremium hierfür war der Lenkungskreis, dem alle Projektpartner angehören und dem die DECHEMA als Koordinator vorsitzt. Der Lenkungskreis begleitet die Entwicklungen im Projektverlauf und trifft grundlegende Entscheidungen zur Weiterentwicklung des Projekts.

Zur laufenden Koordination wurden über die gesamte Projektlaufzeit regelmäßige digitale Jour-fixe-Termine etabliert. Bereits im ersten Berichtszeitraum wurden monatliche Videokonferenzen durchgeführt; ab 2023 fanden die Jour fixe verbindlich jeweils am ersten Donnerstag eines Monats statt. Diese Termine dienten der Abstimmung aktueller Arbeitsschritte, der Koordination der Aktivitäten im Begleitprojekt sowie der zeitnahen Klärung offener Punkte zwischen den Partnern.

Parallel dazu wurden in jedem Jahr Lenkungskreistreffen organisiert und durchgeführt. Im Jahr 2021 fanden zwei Treffen statt: das erste am 03.05.2021 (pandemiebedingt digital durch die DECHEMA

organisiert) und das zweite am 26.10.2021 als Präsenztreffen in Frankfurt bei der DECHEMA. In den Folgejahren wurden jeweils zwei Lenkungskreistreffen umgesetzt, die reihum durch Projektpartner ausgerichtet wurden: 2022 am 07.06. in Düsseldorf (Organisation durch BFI) sowie am 16.11. in Höhr-Grenzhausen (FGF); 2023 am 09.02. in Düsseldorf (VDZ) sowie am 07.09. in Essen (IZF); 2024 am 20.02. in Offenbach (HVG) sowie am 05.09. in Essen (GWI); und 2025 am 18.02. (Ausrichtung durch GWI) sowie am 03.12. als Treffen in Frankfurt bei der DECHEMA. Die jeweiligen Protokolle wurden fortlaufend dokumentiert und als Anlagen zu den Berichten bereitgestellt.

Ein weiterer Schwerpunkt im AP 1.2 lag im Aufbau der projektbezogenen Außendarstellung und in der Ergänzung des Konsortiums um fehlende Branchenexpertise. Zu Projektbeginn wurde in Abstimmung mit allen Projektpartnern sowie dem Projektträger DLR ein ReInvent-Logo entwickelt, das seitdem für die Öffentlichkeitsarbeit eingesetzt wird. Darüber hinaus wurde wie geplant eine öffentliche Ausschreibung nach § 9 UVgO durchgeführt, um einen Projektpartner mit Expertise aus der Stahlindustrie einzubinden. Die Ausschreibung wurde über www.service.bund.de sowie über die ReInvent-Projektwebsite veröffentlicht; die Vergabeunterlagen umfassten ein Dokument mit allgemeinen Informationen und Verfahrensbeschreibung sowie ein Leistungsverzeichnis mit detaillierter Leistungsdefinition und Zeitrahmen. Die Angebotsfrist endete am 22.11.2021; nach Prüfung der Angebote erhielt das BFI fristgerecht den Zuschlag (Zuschlagsfrist 01.12.2021), sodass das Vergabeverfahren im Berichtszeitraum abgeschlossen werden konnte. Die Ausarbeitung der für die Zusammenarbeit erforderlichen vertraglichen Grundlagen (u. a. Geheimhaltungsvereinbarung angelehnt an den Konsortialvertrag) wurde vorbereitet und Anfang 2022 finalisiert. Das BFI nahm daraufhin zum 01.01.2022 die Arbeit auf und übernahm im Rahmen von ReInvent die Betreuung der KlimPro-Industrie-Projekte der Stahlbranche.

Insgesamt stellte AP 1.2 damit die kontinuierliche interne Koordination, die arbeitsfähige Governance-Struktur (Lenkungskreis) sowie die regelmäßige operative Abstimmung (Jour fixe) sicher und ermöglichte zugleich die gezielte Erweiterung des Konsortiums und die konsistente Außendarstellung des Projekts über die gesamte Laufzeit.

Arbeitspaket 2: Begleitung und Vernetzung

AP2.1 KlimPro-Industrie Interne Plattform zum Datenaustausch

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde eine Infrastruktur für den Dokumentenaustausch innerhalb des ReInvent-Verbunds sowie – in einem zweiten Schritt – für den projektübergreifenden Austausch mit den Akteuren aus KlimPro-Industrie aufgebaut und weiterentwickelt.

Zu Projektbeginn wurde für die ReInvent-Projektpartner eine Microsoft-Teams-Plattform eingerichtet, um den projektinternen Dokumentenaustausch zu vereinfachen. Dort werden seitdem zentrale Unterlagen abgelegt und können von allen Teammitgliedern eingesehen und gemeinsam bearbeitet

werden. Eine projektübergreifende Austauschplattform mit externen Akteuren wurde im ersten Berichtszeitraum zunächst nicht aufgesetzt. Als vorbereitende Maßnahme wurde jedoch eine Nextcloud-Lizenz durch die DECHEMA erworben; die Nutzung startete ab dem 01.05.2022, um künftig Dokumente mit allen KlimPro-Industrie-Akteuren teilen zu können. Im Berichtszeitraum 2022 wurde die interne Ablage über Microsoft Teams fortgeführt und parallel eine Nextcloud als Plattform für den projektübergreifenden Dokumentenaustausch eingerichtet. Ziel war es, ab 2023 insbesondere diejenigen Daten strukturiert einzusammeln, die für das Arbeitspaket 3 (Technologietransfer) von den geförderten Projekten benötigt werden. In der Plattform wurden Fragebögen zur Datenerhebung im Kontext der projektübergreifenden Potenzialanalyse bereitgestellt. Die KlimPro-Forschungsprojekte wurden aufgefordert, dort Angaben insbesondere zu den ökonomischen Auswirkungen der Prozesse zu machen.

Insgesamt wurde damit über die Projektlaufzeit eine zweistufige Austauschstruktur etabliert: Microsoft Teams als stabiles System für den internen Verbund sowie Nextcloud als skalierbare Lösung für den projektübergreifenden Austausch und die Datenerhebung mit den externen KlimPro-Industrie-Projekten.

AP2.2 Organisation und Durchführung von Statuskonferenzen

Koordinatorentreffen

Am 2. November 2021 hat das Koordinatorentreffen der BMFTR-Fördermaßnahme KlimPro-Industrie stattgefunden. Die Veranstaltung wurde von der DECHEMA organisiert. Vor dem Hintergrund der pandemischen Lage wurde die Veranstaltung online durchgeführt. Im Rahmen der Veranstaltung wurden alle bereits zu dem Zeitpunkt bewilligten Projekte der Fördermaßnahme vorgestellt und diskutiert. Des Weiteren haben die Vertreterinnen und Vertreter von ReInvent in fünf-minütigen Impulsvorträgen jeweils auf die Herausforderungen in den jeweiligen Branchen aufmerksam gemacht und somit den Rahmen zur späteren Diskussion eröffnet. Die Veranstaltung diente dazu, dass sich die Projektkoordinatorinnen und Projektkoordinatoren gegenseitig kennenlernen und mehr über die anderen Projekte der Fördermaßnahmen erfahren. Somit sollen frühzeitig mögliche Synergiepotenziale erkannt werden. Des Weiteren wurden den Projektvertreterinnen und -vertretern die Aktivitäten der Begleitmaßnahme ReInvent vorgestellt.

Organisation der 1. Statuskonferenz

Die erste Statuskonferenz von KlimPro-Industrie fand am 26./27. April 2023 in Berlin statt. Die Veranstaltung wurde am EUREF-Campus durchgeführt. An der Veranstaltung haben 104 Personen teilgenommen.

Wie geplant, wurden im Programm die Projekte in Branchen aufgeteilt und vorgestellt. Zu Beginn der Veranstaltung lag der Fokus auf der Glasindustrie. Es wurden von der HVG zwei Keynotevorträge für

die Veranstaltung gewonnen. Herr Dr. Johann Overath vom Bundesverband Glasindustrie sprach über die Herausforderungen der Glasindustrie Herr Dr. Michael Hahn, Head of Melting Development und Senior Principle Scientist bei der Schott AG, stellte Praxisbeispiele aus der Glasindustrie vor. Des Weiteren wurden die finalen Ergebnisse der Glasprojekte MiGWa und Glas-CO₂ im Rahmen der Glassession vorgestellt. Von Seiten des Begleitprojekts stellte am zweiten Tag Herr Dr. Christian Dannert das Potenzial von branchenspezifischen und branchenübergreifenden Technologiepfaden vor. Am Ende des ersten Tages wurde eine Posterparty organisiert. Insgesamt wurden 16 Poster von Projektvertretern vorgestellt. An den Postern hat ein sehr guter Austausch zwischen den Teilnehmerinnen und Teilnehmern stattgefunden. Des Weiteren organisierte das Begleitprojekt im Rahmen der Veranstaltung ein World Café, wobei die Punkte „Fördernde Aspekte und Hemmnisse“, „Branchenübergreifende Technologiepfade“ und „Potenzialanalyse“ diskutiert wurden.

Organisation der 2. Statuskonferenz

Die 2. Statuskonferenz fand vom 12. bis 13. November 2024 in Dortmund im Dortmunder U statt. Im Rahmen der Veranstaltung haben alle geförderten Projekte in einer 15-minütigen Präsentation den Stand der Vorhaben vorgestellt. Wie bereits bei der ersten Statuskonferenz wurden die Projekte im Programm branchenbezogen aufgeteilt und vorgestellt. Dennis Krämer eröffnete die Statuskonferenz und Herr Dr. Dominic Larue begrüßte als BMFTR-Verantwortlicher von KlimPro-Industrie die Teilnehmerinnen und Teilnehmer. Im Anschluss zeigte Dennis Krämer eine Übersicht der letzten drei Jahre von KlimPro-Industrie und RelInvent. Der Fokus des Eröffnungsprogramms der 2. Konferenz lag auf der Stahlindustrie, wobei Keynote-Vorträge von Herrn Dr. Henrik Adam vom Stahlinstitut VDEh sowie Herrn Dr. Boris Kohnen von thyssenkrupp Steel Europe gehalten wurden. Abgerundet wurde das Programm durch eine Slido-Session, wobei das Publikum rund um die Erreichung der Klimaschutzziele befragt wurden, und einer Postersession. Am zweiten Tag der Veranstaltung sprach Herr Dr. Jörg Leicher vom GWI im Rahmen einer Keynote über „Strom? Wasserstoff? Dekarbonisierungsoptionen für Hochtemperaturprozesswärme“.

Organisation der Abschlusskonferenz "Zukunft Grundstoffindustrie: Forschung, Transformation und Klimaziele"

RelInvent organisierte am 23./24. Februar 2026 die Abschlusskonferenz von KlimPro-Industrie. Die Veranstaltung fand im Humboldt-Carre in Berlin statt. Das Programm setzte sich aus den Präsentationen zu den Abschlussergebnisse der Projekte und Keynotes sowie zwei Podiumsdiskussionen zusammen. Von der DECHEMA wurden als Keynotespeaker Dr. Dominik Nied, Vice President Group Sustainability HeidelbergMaterials, Prof. Rüdiger Deike, Lehrstuhl für Metallurgie der Eisen- und Stahlerzeugung der Universität Duisburg-Essen, Herrn Prof. Andreas Bode, VP CO₂ & Process Innovation von Lhoist und Herrn Prof. Robert Schlögl, Präsident der Alexander von Humboldt-Stiftung gewinnen. RelInvent stellte die Ergebnisse der Begleitforschung vor. Herr Dr. Fleischmann man

der HVG präsentierte die vorläufigen Ergebnisse der projektübergreifenden Potenzialanalyse, Herr Dr. Dannert ging bei der Darstellung der Ergebnisse der Bewertung von möglichen Synergien zwischen den Branchen näher darauf ein, wie das Potential weiter ausgeschöpft werden könnte. Herr Dr. Giese stellte stellvertretend für das GWI die Ergebnisse der GIS-Analyse vor. Herr Dr. Barascu-Wilde stellte zusammenfassend vor, welche Erfolge in den Projekten zu verzeichnen waren, u. a. welche TRL-Sprünge in allen Teilprojekten geschafft wurden. Des Weiteren wurden in seinem Vortrag Erkenntnisse aus ReInvent-Workshops und Gesprächen mit Entscheidungsträgern geteilt. Eine Zusammenfassung der Veranstaltung sowie die Möglichkeit zur Einsicht in die freigegebenen Präsentationsfolien existiert auf der Website unter https://reinvent-klimpro.de/Veranstaltungen/Wrap_Up+Abschlusskoferenz-p-1870.html.

AP2.3 Erarbeitung von Performance-Indikatoren und einer Methodik zur projektübergreifenden Potentialanalyse (TÖA, Nachhaltigkeitsbewertung)

Für die projektübergreifende ökonomische und ökologische Potenzialbewertung der Fördermaßnahme KlimPro-Industrie wurde eine einheitliche Methodik samt konsistenter Datenbasis entwickelt. Ziel ist es, dass alle Projektverbünde ihre Techno-ökonomischen Analysen (TÖA) und Life Cycle Assessments (LCA) nach vergleichbaren Vorgaben durchführen, damit ReInvent Projektergebnisse gegenüberstellen und das Gesamtpotenzial kumuliert darstellen kann.

Im Verlauf der Projektlaufzeit wurde zunächst ein Methodik-Entwurf gemeinsam mit allen ReInvent-Partnern erarbeitet und mit dem Projektträger DLR abgestimmt. Die Methodik wurde anschließend in einem branchenübergreifenden Workshop (13. Mai 2022) den KlimPro-Industrie-Projekten vorgestellt und diskutiert. Aus den Rückmeldungen wurden wesentliche inhaltliche Erweiterungen abgeleitet: Die Potenzialanalyse berücksichtigt nun auch Treibhausgasemissionen aus vorgelagerten Prozessen, um mögliche Emissionsverlagerungen sichtbar zu machen. Zudem wurde die Erfassung energiebasierter Emissionen von Scope 1 auf Scope 2 erweitert, um Verschiebungen gegenüber tatsächlichen Emissionsminderungen besser abgrenzen zu können. Kennzahlen wurden auf aktuelle Veröffentlichungen (Stand 2022) aktualisiert und in die überarbeitete Fassung integriert.

2023 wurde der Leitfaden mehrfach fortgeschrieben, u. a. durch die Einbindung aktueller Quellen und Kennzahlenreferenzen (z. B. aus regelmäßig erscheinenden Berichten). Parallel wurde ein Fragebogen zur strukturierten Erfassung der projektspezifischen Kenndaten der KlimPro-Industrie -Projekte entwickelt, in den Jour-fixe-Runden abgestimmt und als Word-Formular bereitgestellt. Ein interner Testlauf (HVG, KlimPro-Industrie-Projekt „Glas-CO₂“) zeigte Verständnisschwierigkeiten, die zu einer Überarbeitung mit präziseren Formulierungen führten.

Im Berichtszeitraum 2024 wurden Methodik und Fragebogen finalisiert und über Nextcloud an die KlimPro-Industrie-Projekte verteilt. Seitdem ist ein regelmäßiger Aktualisierungsprozess etabliert:

quartalsweise wird geprüft, ob neue bzw. aktualisierte Kennzahlen (z. B. Strommix Deutschland, Brennstoff-Footprints) oder relevante Veröffentlichungen u. a. von UBA und DEHSt vorliegen, und der Leitfaden wird bei Bedarf entsprechend aktualisiert. Dieser Aktualisierungsmodus wurde 2025 fortgeführt.

AP2.4 und AP2.5 Branchenspezifische und Branchenübergreifende Workshops

Die Branchenvertreter haben im Laufe des Vorhabens die ihnen zugeordneten Projekte angesprochen und Meetings abgehalten, um projektübergreifende Fragestellungen identifizieren zu können. Die Themen, die für die Mehrheit der Projekte relevant waren, wurden aufgenommen, um sie im Rahmen von verschiedenen Workshops diskutiert. Die folgenden branchenspezifischen und branchenübergreifenden Workshops wurden von ReInvent durchgeführt:

CO₂ als Rohstoff

Am 08.12.22 hat die DECHEMA einen Online-Workshop für die Projekte organisiert, die CO₂ als Edukt nutzen. Die Projekte Glas-CO₂, K⁴, Pretaca, SynGas2Ethen wurden vorgestellt und diskutiert. Dabei wurden besonders darauf eingegangen, welche CO₂-Quellen genutzt werden. Ferner wurde diskutiert, welche Reinheit das CO₂ für den Prozess benötigt und welche gemeinsamen Prozessschritte es gibt. Es wurde festgestellt, dass geringe Überlappung zu technologischen Aspekten zwischen den Projekten besteht, da sich die Prozesse und Produkte, die hergestellt werden sollen, stark unterscheiden. Regulatorische Fragestellungen, wie mit CO₂ rechtlich umgegangen werden muss, betraf alle Projekte und wurde diskutiert.

Branchenübergreifender Workshop am GWI

Am 13.05.2022 wurde am GWI der erste branchenübergreifende Workshop mit den bis dahin beteiligten KlimPro-Industrie-Verbundprojekten durchgeführt, siehe Abbildung 1.

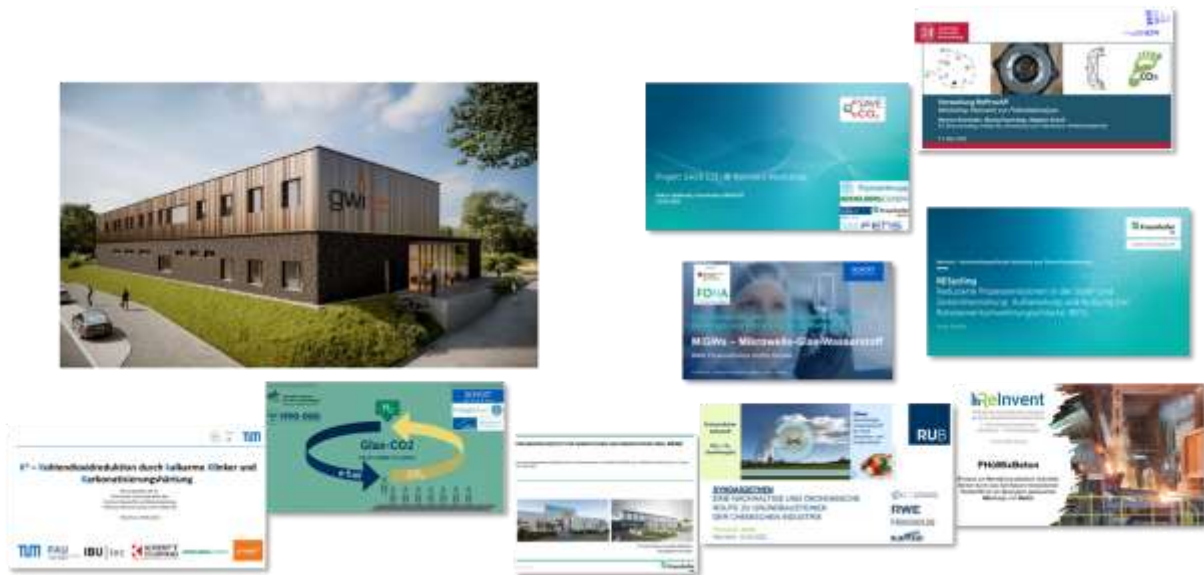


Abbildung 1: Vorträge auf dem 1. branchenübergreifenden Workshop am GWI am 13.05.2022

Der branchenübergreifende Workshop in Essen fand auf Einladung des GWI statt. Die einzelnen KlimPro-Industrie-Projekte haben sich vorgestellt und Fragen zu den einzelnen Projekten beantwortet. Brancheübergreifende Aspekte wurden herausgearbeitet. Das Hauptaugenmerk der Veranstaltung wurde auf den ersten Entwurf der Potentialanalyse gerichtet und mit den Industrievertretern diskutiert. Vor diesem Hintergrund wurden zu dem Workshop explizit auch die LCA-Verantwortlichen aus den KlimPro-Industrie-Projekten eingeladen.

Vertreter der Stahlbranche haben auf die Notwendigkeit der Berücksichtigung von Scope 2 und 3 Emissionen zur THGE-Bilanzierung/Erfassung innerhalb des Leitfadens für die Potentialanalyse hinwiesen. Diese sowie die Hinweise der KlimPro-Industrie-Beteiligten der anderen Branchen wurden zur Modifizierung des bisher erstellten Leitfadens berücksichtigt.

Vernetzung der Stahlprojekte – Schwerpunkt Schlacke

Am 22.06.2022 wurde ein Branchenworkshop der Stahlbranche vom BFI organisiert und durchgeführt. Teilgenommen haben die Projektkoordinatoren und Projektbearbeiter der KlimPro-Industrie-Projekte SaveCO₂, FlexLBO und RESycling. In diesem Workshop der Stahlbranche wurden den Projektbeteiligten der zum Teil erst im Jahr 2022 gestarteten Projekte ReInvent sowie gegenseitig die KlimPro-Industrie-Projekte mit aktuellem Projektstand vorgestellt. Das Verbundprojektes ReInvent und dessen Ziele und Aufgaben wurde vorgestellt. Dabei wurde die Zusammenarbeit von ReInvent und KlimPro-Industrie innerhalb der Stahlbranche sowie im Gesamtverbund über alle beteiligten Branchen hinweg hervorgehoben. Ferner wurden alle KlimPro-Industrie-Projekte und deren Ziele und Aufgaben kurz vorgestellt sowie mögliche gemeinsame Inhalte in den Fokus gesetzt, um die Teilnehmer für eine mögliche Interaktion zu sensibilisieren. Fachlich wurde das gemeinsam im Vorfeld gewählte Thema Schlacke für den Branchenworkshop gewählt. Der Austausch erfolgte im Rahmen der KlimPro-Industrie-Projektvorträge innerhalb der den Vorträgen nachfolgenden Fragerunden.

Keramik, Feuerfest, Glas- und Zementindustrie

Im Bereich Keramik, speziell der Ziegelindustrie, gab es bis zum Ende des Berichtszeitraumes 2023 nur ein laufendes Projekt. Daher wurde entschieden, den branchenspezifischen Workshop mit den Bereichen Feuerfest-, Glas- und Zementindustrie zusammenzulegen. Die Planungen und Vorbereitungen wurden in Zusammenarbeit der HVG, GWI, VDZ, FGF und IZF durchgeführt und der Workshop für den 29.03.2023 in Offenbach terminiert. Während des Workshops lag der Schwerpunkt auf der Vermeidung und Erfassung von CO₂-Emissionen, Systemgrenzen, die CO₂-Abscheidung und -Nutzung, und vor allem der Diskussion über Lösungsmöglichkeiten und Hemmnisse.

Der geplante Workshop fand wie geplant am 29. März 2023 in Offenbach am Main als Präsenzmeeting statt. Nach der Begrüßung und Vorstellung des Begleit- und Transfervorhabens RelInvent durch Herrn Krämer von der DECHEMA erfolgte die Kurzvorstellung folgender KlimPro-Industrie-Projekte:

- MiGWa (CO₂-Einsparung bei der Glasherstellung durch neuartige und klimaschonende Beheizung)
- Glas-CO₂ (Kreislaufführung des Kohlendioxids bei der Glasherstellung durch die Erzeugung synthetischer Brennstoffe)
- Spaltgas (Grünes Spaltgas als Brenngas zur Ziegelherstellung)
- K4 (Kohlendioxidreduktion durch kalkarme Klinker und Karbonatisierungshärtung)
- RESycling (Aufbereitung und Nutzung von Roheisenentschwefelungsschlacke in der Zementindustrie)
- PhoeMixBeton (Prozess zur Herstellung alkalisch-aktivierter Binder durch das Schmelzen mineralischer Reststoffe für ein ökologisch gesteuertes Mixdesign von Beton)
- H2TO (Entwicklung einer innovativen wasserstoffbasierten Ofentechnologie zur Herstellung tonkeramischer Werkstoffe)

Die darauffolgenden Impulsvorträge (CO₂-Prozessemissionen und Dekarbonisierung, Erfassung der CO₂-Emissionen und Systemgrenzen, Abscheidung und -nutzung) wurden als Grundlage für Diskussionen und Gespräche in den Workshops, die nach der Mittagspause durchgeführt wurden, genutzt.

Die Ergebnisse des Workshops zu Carbon Capture and Storage/Utilisation sind kurz zusammengefasst:

- Im Laufe des Workshops kamen verschiedene Sichtweisen zur Sprache, wobei es den Teilnehmern wichtig war eine gewisse Technologieoffenheit zu betonen, da die Techniken der CCS bzw. CCU noch nicht ausgereift genug seien.
- Wichtig war den Teilnehmern zu betonen, dass für eine Applikation des Verfahrens ein gesicherter Rahmen aus Normen und Regularien wichtig ist, um das abgeschiedene CO₂ auch sinnvoll weiterverwenden zu können.

- Dabei wurde auch eine weitere Nutzung (CCU) einer Abscheidung (CCS) vorgezogen. Explizit wurde die chemische Industrie als möglicher Abnehmer für das CO₂ genannt.
- Aus dem Bereich der Ziegel- bzw. Keramikindustrie kam der Einwand, dass durch die mittelständische Struktur der Branche und die aufgrund der speziellen Feuerungsbedingungen geringen Konzentrationen von CO₂ im Abgas eine Abscheidung und der Abtransport des CO₂ nur unter hohen Kosten möglich sei.
- Hier sei es evtl. besser an anderer Stelle mittels ‚direct air capture‘ (DAC) eine Abscheidung aus der Luft zu generieren und dies über Zertifikate den Betrieben gutzuschreiben.
- Hier wurde von Seiten des UBA eingewendet, dass es möglicherweise eine Bagatellregelung für unvermeidbare CO₂ Emissionen geben könnte, so dass nicht jede Emission abgefangen werden muss.
- Bezüglich der Möglichkeit entstehende Kosten beim Kunden geltend zu machen, zeigte sich ein geteiltes Bild. Vertreter von Industrien, die näher am Endkunden sind, sagten, dass der Kunde einen gewissen Aufpreis bereit ist zu bezahlen, wohingegen Vertreter der Rohstoffindustrie sagten, dass ihr Geschäft faktisch nur über den Preis ablaufe. Die Gruppe einigte sich darauf, dass der Preisdruck steige je weiter weg der „Kunde“ in der Herstellungskette vom privaten Endverbraucher ist.

Alles in Allem waren die Gruppen der Idee CCS bzw. CCU einzusetzen gegenüber aufgeschlossen, wobei niemand Beispiele anführen konnte, den Einsatz dieser Technologie im eigenen Unternehmen bzw. der eigenen Branche aktuell zu planen.

Im Workshop zu Emissionen und Systemgrenzen wurden folgende Themenkreise diskutiert:

- Schließung von Stoffkreisläufen
- Sinn die Nachkette mit einzubeziehen, da Nutzung nicht kontrolliert werden kann
- Grundstoffe (Scope 3 Vorkette) einzubeziehen ist sinnvoll
- Beim Maschinenbau ist Scope 3 (Vor- und Nachkette) relevant
- Wie sinnvoll ist es CO₂-Einsparungen für Endprodukteinheit (z.B. Verpackungseinheit) zu bestimmen?
- Vorsicht: Gefahr der Doppelerfassung. Scope 2 und/oder 3 sind das Scope 1 eines anderen Prozesses.

Im Workshop Emissionen und Dekarbonisierung waren nachfolgende Themen Anlass zur Diskussion:

- Kosten für erneuerbare Brennstoffe
- Reinheitsanforderungen an das CO₂ für CCU
- Gesetzliche Regularien; Einordnung/Zuordnung von (recyclten, CCU, synthetischen Brennstoffen) Stoffströmen
- Notwendigkeit Regularien und Normen anzupassen, zu ergänzen, neu zu erstellen

- Gefahren, Verlagerung (in die Vorkette) als Minderung auszuweisen
- Chemieindustrie als CO₂-Senke;
- DAC (direct air capture)
- Wasserstoffverbrennung im (ökonomischen) Vergleich/Wettbewerb zu Methanverbrennung + CCS
- Kosten für erneuerbare Brennstoffe
- Kosten für erneuerbare Brennstoffe aus CO₂-Kreisläufen

Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Workshops und eine Abschlussdiskussion schlossen den Tag ab.

Branchenworkshop Chemie/Stahl

Der Branchenworkshop der Chemie- und Stahlbranche wurde 2023 zusammengelegt, um Gemeinsamkeiten, Synergien und Möglichkeiten eines Zusammenwirkens der Branchen bei der Vermeidung von prozessbedingten CO₂-emissionen zu erörtern. Am 12.09.2023 wurde dazu der gemeinsame Branchenworkshop bei der DECHEMA in Frankfurt a.M. durchgeführt. Teilgenommen haben die Vertreter des DLR, die Projektleiter der KlimPro-Industrie-Projekte der Chemie- und Stahlbranche als auch Industriepartner dieser Projekte sowie die Branchenvertreter von RelInvent (von Seiten DECHEMA, BFI, GWI, HVG, IFZ). Die von den KlimPro-Industrie-Projektleitern gehaltenen Vorträge adressierten Schnittmenge und vergangene Zusammenarbeit von Chemie- und Stahlbranche. Folgende Schnittmengen wurden in den Projekten definiert (Projekte, bei denen keine Schnittmenge definiert wurden, sind hier nicht aufgeführt):

- Fabrik: Die in Projekt herzustellenden Briketts aus Fasen und gefilterten Stäuben sind als Brennstoff einsetzbar und somit nicht für die Chemische Industrie relevant.
- NuCOWin: Produkte aus dem im Projekt untersuchten Wiebergprozess: CO als Rohstoff oder Brennstoff. Die geforderte Reinheit des COs zur Nutzung in der Chemischen Industrie kann nach derzeitiger Einschätzung zurzeit noch nicht erfüllt werden und ist noch eine Herausforderung.
- SaveCO₂: Schlacken aus den Schmelzprozessen sind für die Glasindustrie als CaO Lieferant interessant aber aufgrund der Eisengehalte nicht dort einsetzbar. Die Chemische Industrie sieht hier keine Anwendung.
- Flex LBO: Aus dem EAF-Prozess sind Abwärme, CO₂ und Schlacke verfügbar. Die Schlacke enthält Eisen.
- SynGas2Ethen: CO, H₂ und CO₂ können gut in dem zu entwickelnden und zu untersuchenden Prozess genutzt werden. Hierfür ist eine hohe Reinheit der Stoffe von Bedeutung. Enthaltene Eisen und Metalle in den Edukten sind für den Prozess nicht so kritisch.

Fazit aus den während des Workshops geführten Diskussionen wird deutlich, dass ein weiterhin zu erwartender, jedoch zukünftig wesentlich geringerer Prozessbedingter CO₂-Ausstoß im Vergleich zum derzeitigen Ausstoß auftreten wird. Die Chemieindustrie benötigt Kohlenstoff, der z.B. aus bei der Stahlproduktion abgeschiedenen CO₂ genutzt werden kann (CCU wie z. B. im Projekt Carbon2Chem). Dabei ist für die Chemieindustrie Voraussetzung, dass der Kohlenstoff in möglichst reiner Form vorliegt. Die Chemieindustrie kann andererseits nicht den in der Stahlindustrie bei der Wasserstoffgewinnung anfallenden Sauerstoff nutzen, da sie nur sehr kleine Mengen für die Prozesse benötigt.

Workshop Feuerfeste Werkstoffe

Am 25. Juni 2025 organisierte der ReInvent-Verbundpartner Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. einen branchenübergreifenden Workshop „Feuerfeste Werkstoffe“ für die Mitarbeitenden in laufenden oder bereits abgeschlossenen KlimPro-Industrie-Projekten.

Der erste Teil des Workshops zum Thema „Gaskorrosion und Wasserstoffverbrennung“ wurde von Dr. Ansgar Schepers von der Firma Beck u. Kaltheuner geleitet. Vertreter/innen der KlimPro-Industrie-Projekte stellten ihre Arbeit vor und beschrieben die in den Projekten vorhandenen Kontaktpunkte bzw. Problemstellungen im Bereich feuerfeste Materialien. Dr. Schepers fasste den aktuellen Stand der Forschung und Entwicklung zu Gaskorrosion von feuerfesten Materialien bei geänderter Gaschemie sowie den Angriff von Brenngasen auf feuerfeste Materialien und Auskleidungen von wasserstoffbeheizten Brennöfen zusammen. Die 20 Teilnehmenden diskutierten lange und intensiv über die Thematik.

Der zweite Teil des Workshops zum Thema „Glas und Klinker“ fand unter der Leitung von Markus Dietrich von RHI Magnesita statt. Herr Dietrich stellte ausführlich den Stand der Technologie der feuerfesten Werkstoffe bei der Umstellung auf klimaneutrale Glasherstellung, insbesondere durch elektrische Beheizung dar.

Alle Teilnehmenden an dem Workshop konnten auch an einem vom 24. bis 26. Juni 2025 vom European Centre for Refractories gGmbH organisierten Seminar „FEUERFEST – Schlüsseltechnologie und ihre Anwendungen“ teilnehmen. Damit hörten die Mitarbeiter/innen der KlimPro-Industrie-Projekten für drei Tage Vorträge von Expert/innen aus der Feuerfestindustrie zu Themenbereichen wie Werkstoffkunde, basische und saure Erzeugnisse, Verschleißmechanismen und ungeformte feuerfeste Erzeugnisse teil. Im Bereich Anwendungen folgten Vorträge zu feuerfesten Anwendungen in der Zement-, Glas- und Gießereiindustrie. Mit diesem breit gefächerten Programm bekamen die Projektteilnehmenden und Partner von KlimPro-Industrie einen umfassenden Einblick in die Feuerfestindustrie und ihre Werkstoffe.

Die Kombination aus dem Seminar und der Diskussion spezifischer Fragen der jeweiligen KlimPro-Industrie-Projekte in dem Workshop vermittelte umfangreiches Wissen für die Teilnehmenden. Damit

und mit den geknüpften Kontakten können in verschiedensten Projekten unterschiedlicher Branchen durch Handgriffe wie eine angepasste Ofenauskleidung oder die Verwendung neuer Feuerfest-Technologien weitere CO₂-Einsparungen erzielt werden.

AP2.6 Bestimmung der Performanceindikatoren und Finalisierung der Methodik für die projektübergreifende Potentialanalyse

Ein Entwurf der Methodik für die projektübergreifende Potenzialanalyse wurde Vertretern der KlimPro-Industrie-Projekte in einem branchenübergreifenden Workshop am 13. Mai 2022 präsentiert. Die anschließenden Diskussionen bekräftigten, dass zur umfassenden Ermittlung des CO₂ -Minderungspotenzials auch zum Teil auch Treibhausgasemissionen aus vorgelagerten Prozessen in der Potenzialanalyse bewertet werden sollten. Dies kann dazu beitragen, die Verlagerung von prozessbedingten Treibhausgasemissionen in vorgelagerte Prozesse erkennbar zu machen. Die Methodik für die projektübergreifende Potenzialanalyse wurde entsprechend angepasst.

Es wurde ein Fragebogen zur Erfassung der Performanceindikatoren zur Potentialanalyse erarbeitet und einem Testlauf unterzogen. Damit steht das Werkzeug zur Verfügung, um die Kennwerte der Projekte zu erfassen, die Ergebnisse der einzelnen KlimPro-Industrie-Projekte zusammenzutragen und einzuordnen. Der Fragebogen zur Erfassung der Performanceindikatoren zur Potentialanalyse wurde im nach der Textphase fertiggestellt und an die Projekte mit der Bitte um Eintragung der Daten verteilt. 16 von 19 Projekten in KlimPro-Industrie Aufruf 1 haben Kenndaten bis zur Erstellung des Berichts zur Potentialanalyse zur Verfügung gestellt (s. §§ AP3.3).

Die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse wird mit Hilfe eines eigens erstellten Python-Programms vorgenommen, das auch den Export von Teilergebnissen in csv-Dateien zur weiteren Verarbeitung bzw. Nutzung ermöglicht.

Arbeitspaket 3: Technologietransfer

AP3.1 Interaktion nationale und internationale wissenschaftlich-technische Fachgremien

Im Unterarbeitspaket 3.1 wurden nationale und internationale wissenschaftlich-technische Fachgremien systematisch in die Technologietransfer-Aktivitäten von RelInvent eingebunden. Die Verbundpartner nutzten hierfür ihre etablierten branchenspezifischen Gremien- und Verbandsstrukturen, um RelInvent-relevante Inhalte regelmäßig zu kommunizieren, Feedback aus der Industrie aufzunehmen und den Transfer der Erkenntnisse aus KlimPro-Industrie in die jeweiligen Branchen zu unterstützen.

Durch die direkte Einbindung der Fachgremien von HVG, GWI, BFI, VDZ, FGF und DECHEMA wurde der Informationsaustausch mit den zugehörigen Industriebranchen frühzeitig initiiert. Ergänzend erfolgte

ein kontinuierlicher Austausch über die Mitarbeit in weiteren Netzwerken und Gremien (u. a. FOGI, DVGW sowie Gremien der Aluminiumindustrie). Pandemiebedingt verlief der Austausch zu Beginn des Projekts zunächst zurückhaltender; mit zunehmender Möglichkeit zu Präsenzformaten wurde die Interaktion ab 2022 deutlich intensiviert – insbesondere über Messen, Konferenzen und Fachveranstaltungen.

Beispiele für die regelmäßige Einbindung und Information der Fachöffentlichkeit waren u. a. die Vorstellung und Diskussion von Dekarbonisierungsthemen im Rahmen des IZF-Seminars (21./22.09.2021) sowie fortlaufende Beiträge auf etablierten Branchenformaten (z. B. jährliches IZF-Seminar, Branchenkongress der Grobkeramik, Würzburger Ziegellehrgang). Inhaltliche Schwerpunkte lagen dabei insbesondere auf der Dekarbonisierung industrieller Prozesse sowie der Anwendung von Wasserstoff und Ammoniak im Kontext der KlimPro-Industrie-Projekte. Auch andere Partner informierten innerhalb ihrer Verbände und Arbeitskreise über RelInvent, beispielsweise die FGF in Sitzungen des „Ausschuss Technik“ des DFFI e. V. sowie beim International Colloquium on Refractories 2022; zusätzlich wurden Gespräche mit nationalen und internationalen Gremien u. a. im Umfeld der glasstec 2022 weiter vertieft.

Darüber hinaus wurden RelInvent- und KlimPro-Industrie-Themen auch in übergreifende Fach- und Standardisierungsdiskussionen eingebracht. So wurde im April 2024 im Rahmen einer vom GWI organisierten Veranstaltung zur CO₂-neutralen Energieversorgung ein Überblicksvortrag zu KlimPro-Industrie platziert. 2025 erfolgte die Teilnahme an Veranstaltungen des DIN (Normen und Standards für Technologien zur THG-Vermeidung) sowie des Fraunhofer ISI (Regulatorik zu Carbon Management und Ableitung unterstützender Vorschläge für die Gesetzgebung).

Insgesamt zeigt UAP 3.1, dass die RelInvent-Projektpartner ihre branchenspezifischen Fachgremien kontinuierlich informiert und aktiv eingebunden haben. Damit wurde ein dauerhafter Kommunikations- und Rückkopplungskanal zwischen RelInvent/KlimPro-Industrie und den relevanten Fach-Communities geschaffen, der den Technologietransfer über die gesamte Projektlaufzeit hinweg wirksam unterstützt hat.

AP3.2 Formate für technische und kaufmännische Entscheider

Die DECHEMA hat am 23. Mai 2024 einen online Workshop für technische und kaufmännische Entscheider organisiert. Das Treffen hatte zum Ziel, mit den Teilnehmern zu diskutieren, welche Zeichen gesetzt werden, und welche Rahmenbedingungen vorherrschen bzw.

geschaffen werden müssen, damit im Unternehmen die Entscheidung getroffen wird, eine Innovation im Bereich klimafreundlicher/-neutraler Produktion in Richtung Markteinführung voranzutreiben.

Das Vernetzungs- und Transferprojekt RelInvent hat strategische Entscheider der Unternehmen der Projekte der BMFTR-Fördermaßnahme KlimPro-Industrie eingeladen, um über Ihre

Innovationsstrategie zu diskutieren und gemeinsam branchenspezifische und branchenübergreifende interne und externe Schwellen zu identifizieren, die auf dem Weg vom Projektergebnis zum marktfähigen Produkt zu bewältigen sind.

AP3.3 Branchenspezifische und branchenübergreifende Potenzialanalyse

In vielen Industriezweigen und -prozessen stellen die aus dem Herstellungsprozess oder aus einer Verbrennung (Erwärmungs- bzw. Heizvorgang, Thermoprozessanlage) stammenden, direkten Emissionen von Treibhausgasen (THG) eine Herausforderung dar. Diese Emissionen sollen mit Hilfe neuer, innovativer Technologien und Prozesse bis 2045 [Klimaschutzgesetz 2021: Klimaneutralität bis 2045. (www.bundesregierung.de), vom 25.06.2021] vermieden oder neutralisiert werden, so dass die Klimaneutralität der industriellen Fertigungsprozesse erreicht wird.

Die innerhalb verschiedener Sektoren und Branchen mit Hilfe unterschiedlichster Technologien im Rahmen der BMFTR-Fördermaßnahme KlimPro-Industrie ermittelten Emissionsminderungen sollen nun in eine vergleichbare Form gebracht und zusammengeführt werden, wobei Doppelnennung vermieden und reine Verschiebungen von Scope1 in Scope 2 oder 3 erkannt werden sollen.

Die Darstellung der Ergebnisse wird auf der Ebene der unterschiedlichen Branchen der Grundstoffindustrien aggregiert. Die Ergebnisse werden auch dahingehend überdacht, Aspekte der Branchen- und Sektorkopplung zu ermitteln. Eine Erklärung der Scopes findet sich in untenstehender Aufzählung und eine Visualisierung ist in Abbildung 2 zu finden.

- „Scope 1 (Direkte Emissionen): Hierbei handelt es sich um sog. direkte Emissionen, die aus Quellen stammen, die sich direkt im Besitz oder unter der Kontrolle eines Unternehmens befinden. Beispiele hierfür sind die Verbrennung fossiler Brennstoffe und Prozessemissionen.
- Scope 2 (Indirekte Emissionen durch leitungsgebundenen Energieverbrauch): Diese Emissionen entstehen bei der Erzeugung von eingekauftem Strom, Dampf, Wärme oder Kälte. Unternehmen berücksichtigen hier die Auswirkungen ihrer Energieversorgung auf die Umwelt.
- Scope 3 (Eingekaufte Emissionen in der Wertschöpfungskette): Dieser Scope umfasst alle anderen indirekten Emissionen, die in der Wertschöpfungskette eines Unternehmens entstehen, wie beispielsweise von Lieferanten, Kunden und durch Transport.“ [https://klimaschutz-wirtschaft.de/greenhouse-gas-protocol-scopes-leicht-erklart/ am 11.02.2025]

Emissions-Kategorien (Scopes) nach dem Greenhouse Gas Protocol

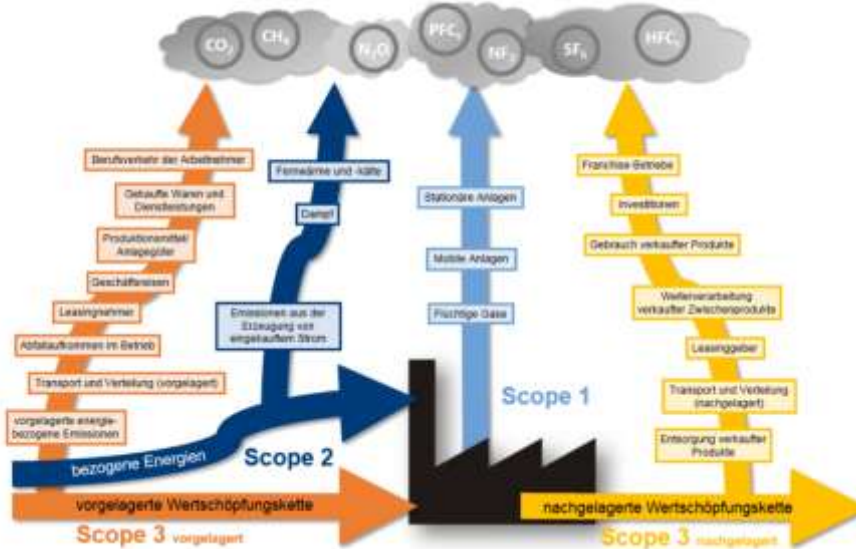


Abbildung 2: Emissions-Kategorien (Scopes) nach dem Greenhouse Gas Protocol (Energie Agentur. NRW) [<https://allianz-entwicklung-klima.de/toolbox/was-sind-Scopes-geltungsbereiche-bei-der-berechnung-der-unternehmensbezogenen-treibhausgasemissionen/> am 03.03.2022]

Um eine mehrfache Erfassung von CO₂-Emissionen zu vermeiden, werden die Kennzahlen zur Beschreibung der Ergebnisse der einzelnen Projekte wie im Folgenden beschrieben ermittelt. Die Bilanzgrenzen sind dabei durch die angewandte Methodik vorgegeben und werden bei der Weitergabe von Zahlenwerten eindeutig deklariert werden. Es werden zur Ermittlung die für den Emissionshandel relevanten CO₂-Äq. Minderungspotentiale der direkten Emissionen erfasst und ausgewiesen (oft auch als Scope 1 gekennzeichnet; bei Verwendung von LCA-Nomenklatur als ‚gate to gate‘ ausgewiesen).

So wird vermieden, dass z.B. die Emissionsminderungen, die bei der Erzeugung elektrischer Energie erreicht werden, vom Erzeuger und vom Verbraucher parallel bedacht und abgerechnet werden oder die Minderungspotentiale bei der Herstellung von Roh- und Ausgangsstoffen dem Hersteller und dem Kunden gutgeschrieben werden, ohne dass dies erkenntlich ist.

Primär soll das technische Emissionsminderungspotential in Zahlen gefasst werden. Dabei soll die Vorgehensweise erlauben, vergleichbare (absolute) Zahlen zu erhalten, die mit den aktuellen CO₂-Äq.-Emissionen aus den VET-Berichten der DEHSt in Zusammenhang gebracht werden können.

Warum Scope 2 vergleichend betrachten? Um den Umstieg von direkter Erzeugung von Energie (im Besonderen von Wärme, Dampf und Strom) auf einen Bezug von außen nicht mit einer Verlagerung der Emissionen und damit einer nur scheinbaren Reduktion zu verbinden, soll außerdem der Einsatz aller Energieträger vor und nach Umsetzung der Projekte (Projektideen, Minderungstechnologien) bilanziert und verglichen werden (also Scope 2).

Um für (karbonatische) Rohstoffe eine reine Verschiebung in die Vorkette zu verhindern und nur reale CO₂-Minderung zu erfassen bzw. zu erkennen: Scope 3.

Geht man auf die Suche nach Werten für die THG-Emissionen der Industrie in D im Jahr 2024, so erhält man Zahlen zwischen 80 und 153 Mio. t CO₂-Äq. bis 273 Mio. t CO₂-Äq. [<https://emvg.energie-und->

management.de/filestore/newsimgorg/Statista-Grafiken/Diverse/THG_Emissionen_nach_Sektoren_Quelle_Umweltbundesamt.orig.pdf am 11.03.2026].

Abbildung 3 veranschaulicht die Summanden innerhalb der einzelnen Betrachtungsweisen. Ausgehend von den Tätigkeiten/Aktivitäten nach der Einteilung im Deutschen Emissionshandel lassen sich unterschiedlich aggregierte Werte ausweisen. Die Tätigkeiten 1 und 7 bis 29 stellen die Grundstoffindustrie dar und sind im Tortendiagramm zusammengefasst (»102 Mio. t CO₂-Äq.). Schließt man die Anlagen zur Energieerzeugung (Tätigkeiten 2 bis 6 mit ca. 170 Mio. t CO₂-Äq.) mit ein, dann summieren sich die THG-Emissionen der Industrie in Deutschland im Jahr 2024 zu ca. 273 Mio. t CO₂-Äq.. Als Ausgangsbasis wurde bei den weiteren Betrachtungen die Summe der Tätigkeiten 1,7 bis 29 als der Ausgangswert der Grundstoffindustrie ausgewiesen und im Nachfolgenden als Vergleichswert herangezogen.

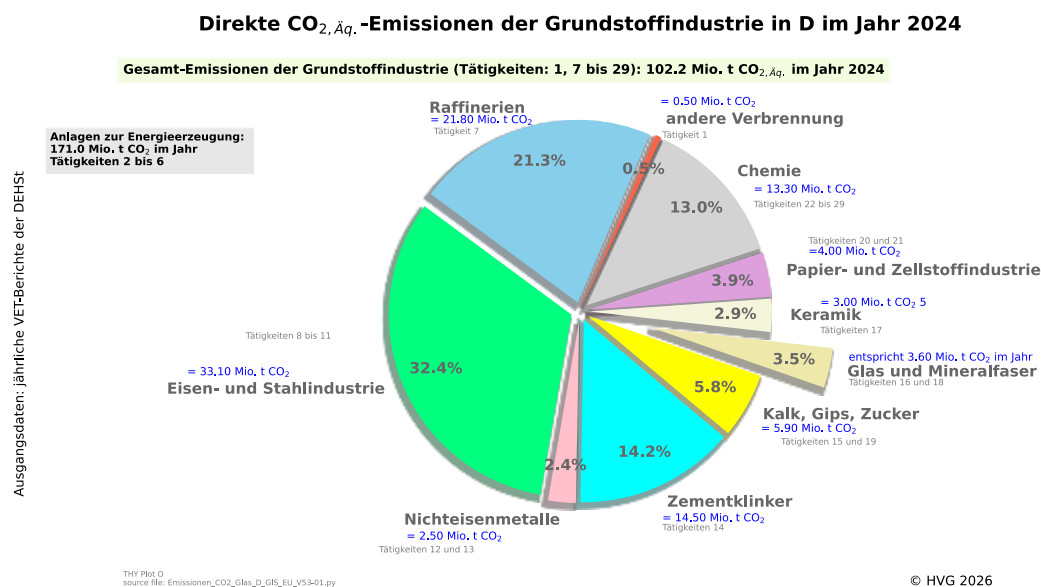


Abbildung 3: CO₂-Äq.-Emissionen der Grundstoffindustrie (Tätigkeiten 1,7 bis 29 nach DEHSt: 102 Mio. t CO₂-Äq.) und des Sektors Industrie (Tätigkeiten: 1 bis 29 à 273 Mio. t CO₂-Äq.) im Jahr 2024 in Deutschland.

Das von den Projekten in KlimPro-Industrie ausgewiesene direkte Minderungspotential durch Anwendung der Minderungstechnologie ist für die einzelnen Projekte anonymisiert in Abbildung 4 ausgewiesen. Dabei ist zu beachten, dass noch nicht für alle Projekte die abschließenden Zahlen vorliegen (16 von 19 Projekten stellen eine Beurteilung und Werte zur Verfügung).

Auch die Zuordnung einzelner Projekte zu Branchen ist nicht immer auf den ersten Blick nachzuvollziehen. Die Papierbranche scheint in Abbildung 5 mit ihrem Projekt keinen ausgewiesenen Minderungsbeitrag zu leisten. Dies ist jedoch nicht richtig: die Minderung wird durch einen Prozessschritt der Keramischen Industrie erreicht, in dem das Produkt der Papierindustrie für einen verminderten CO₂-Ausstoß verantwortlich ist. Weitere Verschiebungen (Stahl zu Zement) ergeben sich z. Bsp. durch Nutzung von Reststoffen aus der Stahlherstellung bei der Zementproduktion.

Minderungspotential der direkten CO_{2,Äq.}-Emissionen durch KlimPro-Maßnahme in Mio. t CO_{2,Äq.} pro Jahr

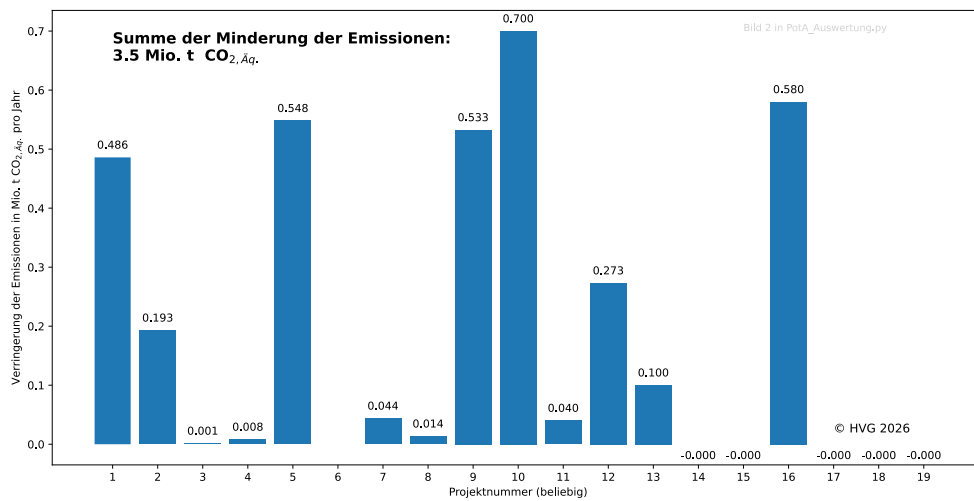


Abbildung 4: Minderungspotential der THG-Emissionen der einzelnen Projekte im Aufruf KlimPro-Industrie 1 des BMFTR.

Minderungspotential der CO₂-Emissionen durch KlimPro-Industrie Projekte

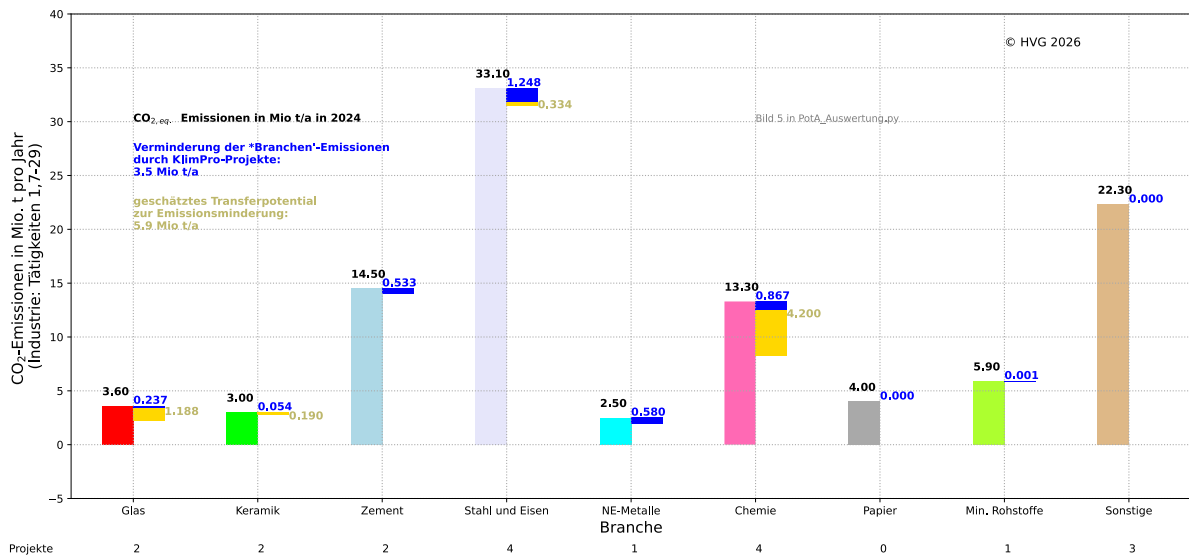


Abbildung 5: THG-Emissionen im Jahr 2024 in D (linke, farbige Säule mit Emissionen in Mio. t CO₂-Äq. in schwarzer Schrift); direktes Minderungspotential der aggregierten Maßnahmen in blauer Schrift und Branchen-internes Transferpotential in goldener Schrift. Datenstand im März 2026.

Vergleicht man die Minderungspotentiale der einzelnen Branchen der Grundstoffindustrie mit den CO₂-Äq.-Emissionen aus dem Jahr 2024 ergibt sich Abbildung 5. Der Wert in schwarzer Schrift weist die Emissionen von 2024 aus. In blauer Schrift sind die direkten Einsparpotentiale im betrachteten Prozess bzw. der untersuchten Technologie genannt und in goldener Schrift ist das Potential ausgewiesen, das durch den Transfer der Technologie innerhalb der Branche möglich scheint. Der Transfer in andere Branchen ist auch von Experten nicht so leicht fassbar und wird daher nicht quantitativ ermittelt. Außerdem lassen sich zum Beispiel Untersuchungen zu regenerativen Brennstoffen in allen Branchen theoretisch umsetzen. Hier lässt sich aber schwer abschätzen, ob die Technologie sich durchsetzt und der erneuerbare Brennstoff in ausreichender Menge zu Verfügung steht. Wollte man daher das

Transferpotential in Zahlen fassen, lassen sich zw. „nichts und alles“ Werte vertreten. Eine seriöse Bewertung ist so nicht möglich.

In Summe ergibt sich so ein „minimales Mindest“-Einsparpotential an direkten Emissionen von mindestens 3,5 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr und eine weitere Minderung von ca. 5,9 Mio. t durch Branchen-internen Transfer auf andere Anlagen und Prozesse. Die Umsetzung der Emissionsminderung soll bis spätestens im Jahr 2045 erfolgen, wobei einzelne Technologiewechsel bereits in den nächsten 5 Jahren umgesetzt werden können, wenn die entsprechenden Stoff- bzw. Energieträgerströme zur Verfügung stehen.

Unter Berücksichtigung der noch nicht erfassten Projekte und noch nicht erfasster Transferpotentiale lässt sich so eine Minderung der CO₂-Äq.-Emissionen durch die Förderung der Projekte in KlimPro-Industrie 1 um 10 bis 15% annehmen.

AP3.4 Räumliche Analyse, Infrastruktur

Die Transformation energieintensiver Industrien hin zu treibhausgasneutralen Prozessen stellt eine der zentralen Herausforderungen der Energiewende dar. Insbesondere Branchen wie Glas, Stahl, Zement oder Chemie sind auf eine zuverlässige und kontinuierliche Energieversorgung angewiesen. Vor diesem Hintergrund gewinnen räumliche Analysen zunehmend an Bedeutung, da sie helfen, die Verfügbarkeit von Energiequellen, Infrastrukturen und industriellen Standorten systematisch zu bewerten. Geographische Informationssysteme (GIS) bieten hierfür ein leistungsfähiges Werkzeug.

GIS ist ein computergestütztes System zur Erfassung, Verwaltung, Analyse und Visualisierung von räumlichen Daten. Es ermöglicht die Verknüpfung von geografischen Informationen (z. B. Koordinaten, Standorte) mit attributiven Daten (z. B. Energieverbrauch, Emissionen).

Im Rahmen des Projekts RelInvent wurden GIS-Analysen genutzt, um bestehende Infrastrukturen, erneuerbare Energiepotenziale sowie industrielle Bedarfe räumlich zu verknüpfen und daraus Entscheidungsgrundlagen abzuleiten.

Für die im Projekt RelInvent vertretenen Grundstoffindustrien und Projektbeteiligten der KlimPro-Industrie-Initiative wurden die Standorte in GIS eingepflegt und den Branchen zugeordnet, siehe Abbildung 6. Anhand der zur Verfügung gestellten Energiedaten für diese Standorte wurden die potenziellen CO₂-Emissionen ermittelt, siehe Abbildung 7, und daraus wiederum der potentielle Wasserstoffbedarf, siehe Abbildung 8.

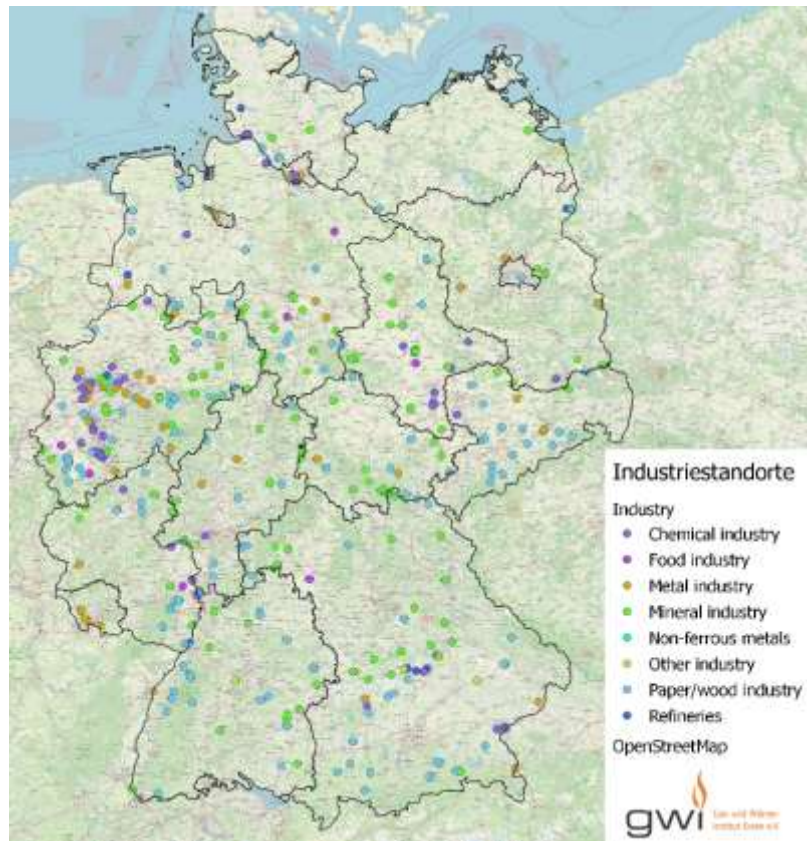


Abbildung 6: Räumlich aufgelöste Standortorte und -branchen in GIS (Quelle: GWI).

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen, dass Industriestandorte häufig in bestehenden Infrastrukturclustern konzentriert sind. Hier korrelieren die hohen CO₂-Emissionen mit der Ansammlung von energieintensiven Industrien, dabei ist die räumliche Nähe zu Energieinfrastrukturen ein entscheidender Standortfaktor.

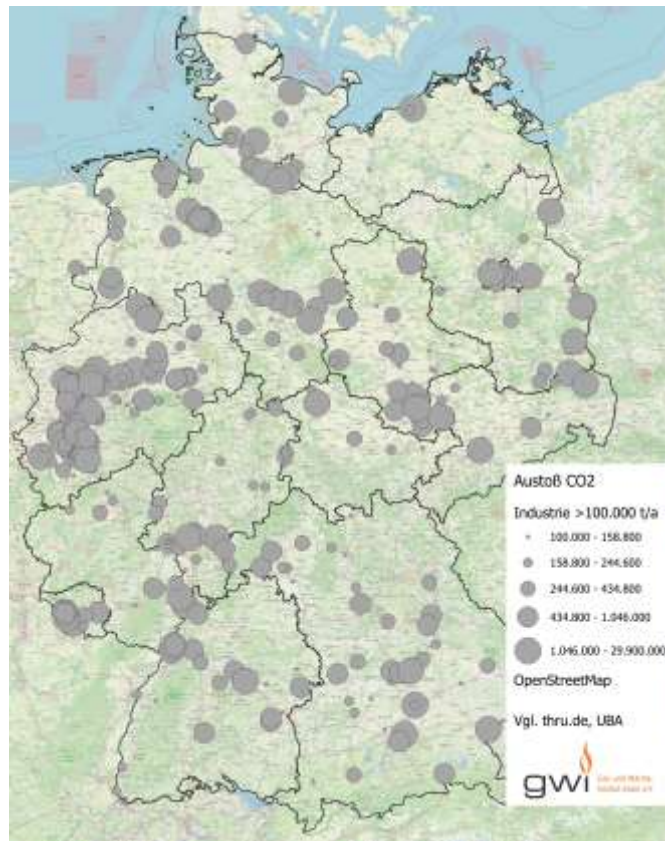


Abbildung 7: CO₂-Emissionen, ermittelt nach den Energiebedarfen der Standorte (Quelle: GWI).

Anhand der Abbildung 8 lässt sich sehr jedoch schnell erkennen, dass der zukünftige Wasserstoffbedarf sich auf diese industriellen Cluster konzentriert. Für viele kleinere Standorte zeigt die räumliche Überlagerung mit dem geplanten Wasserstoffnetz potenzielle Versorgungslücken. Für diese Standorte müssen alternative Dekarbonisierungsmöglichkeiten (z. B. Elektrifizierung, Verwendung von Wasserstoffderivaten, wie Ammoniak) gefunden werden.

In einer detaillierten Analyse der Glasindustrie in Nordrhein-Westfalen im Projekt HyGlass¹ wurde ermittelt, ob die Kapazität des erzeugten grünen Stroms der in einem Umkreis von 10 bzw. 20 km der jeweiligen Glasstandorte in NRW installierten Solar- und Windkraftanlagen ausreichen würde, genügend grünen Wasserstoff mittels Elektrolyse zu produzieren. Für die Volllaststunde von Windkraftanlagen wurden 1.800 h/a und für PV-Anlagen 980 h/a angenommen. Der Wirkungsgrad eines Elektrolyseurs wurde 0,7 angenommen.

¹ HyGlass - Wasserstoffnutzung in der Glasindustrie als Möglichkeit zur Reduzierung von CO₂-Emissionen und des Einsatzes erneuerbarer Gase – Untersuchung der Auswirkungen auf den Glasherstellungsprozess und Analyse der Potenziale in NRW, Fördernr.: PRO 0087 A, Abschlussbericht Juni 2022, <https://www.gwi-essen.de/publikationen/abschlussbericht-hyglass/> (April 2026)

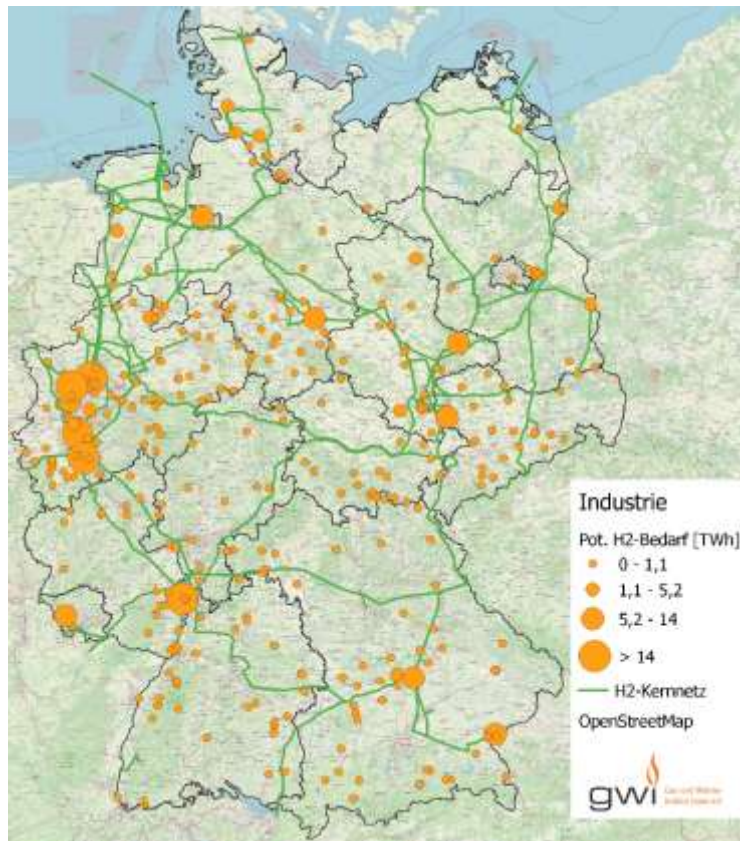


Abbildung 8: Potentielle Wasserstoffbedarfe der Industrieunternehmen inkl. Wasserstoffkernnetz (Quelle: GWI)

In Abbildung 9 sind die entsprechenden Ergebnisse dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass selbst bei der sehr optimistischen Annahme, dass lokale Windkraftanlagen ausschließlich Strom zur Erzeugung von Wasserstoff bereitstellen, die Wasserstofferzeugungskapazitäten nicht ausreichen, um die notwendigen Wasserstoffmengen bereitzustellen. Lediglich an einem Standort (von 9 Glasstandorten in NRW) kann im Umkreis von 10 km ausreichend Wasserstoff hergestellt werden. Wird der Radius auf 20 km erweitert, könnten potenziell 3 Standorte in NRW ausreichend mit Wasserstoff versorgt werden. Die in der Nähe der Glasstandorte installierten PV-Anlagen können hingegen nicht annähernd die notwendigen Strommengen erzeugen, um den Wasserstoffbedarf für die Glasherstellung decken zu können. Diese Schätzung unterstreicht, dass für energieintensive Industrien wie die Glasindustrie der Zugang zu einer dekarbonisierten Energieinfrastruktur, sei es ein vollständig grünes Stromnetz oder ein Wasserstoffnetz, für ihre eigenen Dekarbonisierungsanstrengungen von entscheidender Bedeutung ist. Insbesondere für Anwendungen, die kontinuierlich 24 h über Jahre und Jahrzehnte betrieben werden und somit auf eine sichere Energieversorgung angewiesen sind, wird die lokale Stromerzeugung und/oder Wasserstoffproduktion in der Regel nicht ausreichen, um ihren Bedarf zu decken.

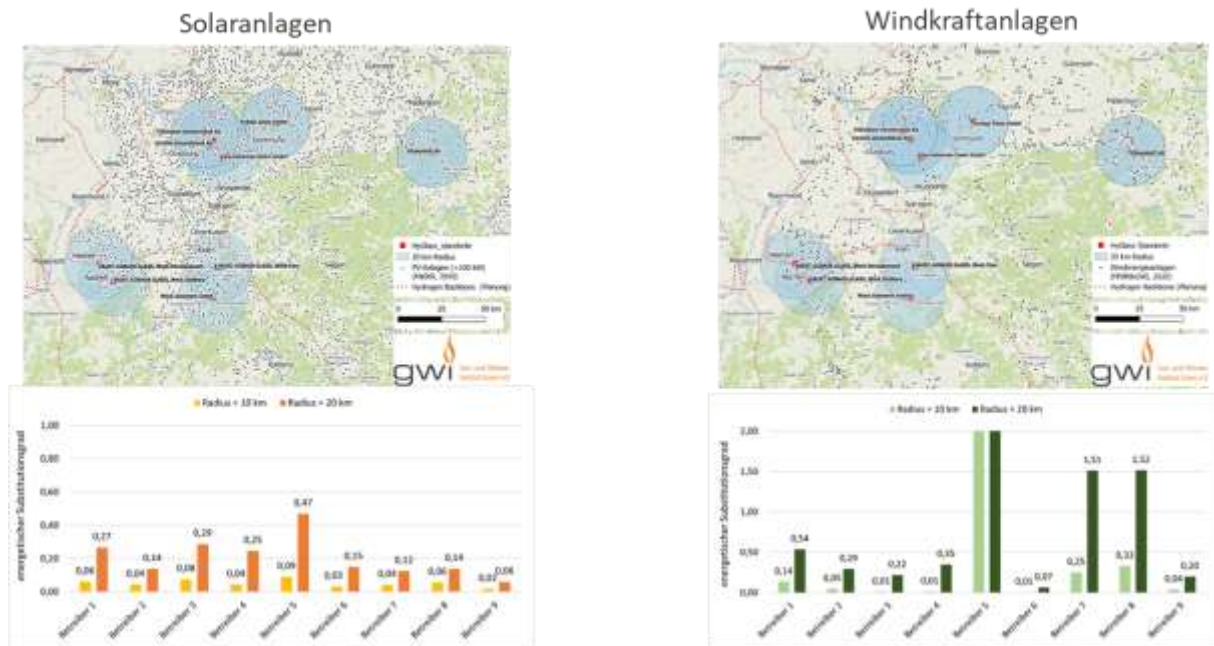


Abbildung 9: H₂-Erzeugungspotenzials im Umkreis von 10 und 20 km vom Glasherstellungsstandort durch Solar- und Windkraftanlagen [1].

Die dargestellten Ergebnisse zeigen die Möglichkeiten und Potentiale der GIS-Analysen. So lassen sich leicht qualitative und quantitative Bewertungen verschiedener Transfermaßnahmen der Dekarbonisierungsoptionen ableiten und Versorgungsengpässe z. B. in ländlichen von klein- und mittelständischen Industrien geprägten Gebieten aufzeigen für die alternative Lösungen gefunden werden müssen.

AP3.5 Stakeholderanalyse, Analyse fördernder Aspekte und Hemmnisse

Im Rahmen von AP 3.5 wurden im Projektverlauf fortlaufend neue relevante Stakeholder identifiziert und gezielt in die Bearbeitung projektübergreifender Fragestellungen eingebunden. Diese Einbindung erfolgte insbesondere über die Einladung zu ReInvent-Veranstaltungen sowie durch die aktive Ansprache in geeigneten Fachformaten, um Perspektiven aus Industrie, Politik und Forschung systematisch aufzunehmen und in die Analyse einfließen zu lassen.

Der formale Start der Arbeiten erfolgte im Zuge der 1. Statuskonferenz (April 2023). Dort wurden die Teilnehmerinnen und Teilnehmer in einem Workshop über Zielsetzung und Vorgehen von AP 3.5 informiert und in die inhaltliche Ausgestaltung eingebunden. Konkret wurde während der Statuskonferenz am 26.–27.04.2023 im Workshop „Fördernde Aspekte und Hemmnisse“ anhand der vom IFZ und BFI erarbeiteten Leitfragen diskutiert, welche Faktoren die Umsetzung bzw. Anwendung der in KlimPro-Industrie entwickelten Technologien und Verfahren begünstigen oder behindern. Die Diskussionen fanden in Arbeitsgruppen statt und bezogen branchenübergreifend die relevanten Konferenzteilnehmenden aus den Bereichen Wirtschaft, Politik und Wissenschaft ein. Damit wurde eine breite Stakeholder-Beteiligung an den projektübergreifenden Fragestellungen sichergestellt.

Ergänzend wurden auch außerhalb der ReInvent-eigenen Veranstaltungen Stakeholder in einschlägigen Fachkreisen adressiert, um die Analyse zu vertiefen und zusätzliche Akteursperspektiven einzubeziehen. So nahm Dr. Hatzfeld an der Tagung zur industriellen Beheizung (14. Fachtagung Industrielle Brennertechnik und nachhaltige Wärmeerzeugung, 07.–08.11.2023) teil und diskutierte dort mit den Teilnehmenden die Akzeptanz und Einführung neuer CO₂-mindernder Technologien in industriellen Beheizungsprozessen; entsprechende Aspekte wurden auch in einer Podiumsdiskussion aufgegriffen.

Als wiederkehrende Hemmnisse – beispielhaft u. a. für die Stahlbranche, aber auch branchenübergreifend – wurden insbesondere fehlende bzw. unzureichende regulatorische Rahmenbedingungen (z. B. für den Einsatz von Wasserstoff in Beheizungsprozessen) sowie eine noch nicht ausreichend verfügbare Infrastruktur genannt, etwa hinsichtlich einer zentralen Versorgung mit H₂ und/oder Strom zur H₂-Erzeugung mittels Elektrolyse an Industriestandorten. Insgesamt wurde AP 3.5 damit als iterativer Prozess angelegt, in dem Stakeholder kontinuierlich erweitert, eingebunden und über geeignete Formate in die Bewertung von fördernden Aspekten und Hemmnissen integriert wurden.

AP3.6 Branchenspezifische und -übergreifende Technologiepfade

Die Analyse diente der projektübergreifenden Untersuchung und Bewertung der im Rahmen der KlimPro-Industrie-Maßnahme entwickelten Technologien und Prozesse. Ausschlaggebend ist die Dekarbonisierung und Ressourceneffizienz der deutschen Grundstoffindustrie durch die Identifikation und strukturierte Einordnung derjenigen Technologien und Verfahrenskombinationen, die zu einer treibhausarmen bzw. treibhausneutralen Produktion in der Grundstoffindustrie führen können. Im Fokus stand die Frage, welche Innovationen, Produkte (im Sinne von Stoffen) und Prozesse aus den KlimPro-Industrie-Projekten in weitere Branchen übertragen werden können, um CO₂-Emissionen zu reduzieren und neue Wertschöpfungspotenziale zu erschließen.

Zentrale Aspekte wie die Weiterverwendung von Nebenprodukten (z. B. Ammoniumsulfat, aufbereitete Roheisenentschwefelungsschlacke, Spaltgas) und das Transferpotenzial technologischer Lösungen (z. B. H₂-Oxy-Brenner, Spaltgasreaktoren, elektrochemische Membranverfahren) waren hierbei maßgeblich für die Auswertung.

Der Nutzen für die Grundstoffindustrie liegt in der Schließung von Stoffkreisläufen, der Substitution fossiler Brennstoffe und der Erschließung neuer Märkte durch branchenübergreifende Kooperationen. Die Untersuchung des Transferpotenzials zielte darauf ab, Synergien zwischen Projekten und Branchen zu analysieren und den möglichen Einsatz der entwickelten Technologien in weiteren Branchen zu evaluieren.

Die Auswertung basierte auf Informationen, die von den KlimPro-Industrie-Projekten in einem Fragebogen zu den Themen Prozessinnovationen, Stoffströme sowie Verwertungsabsichten bereitgestellt wurden. Die methodische Vorgehensweise umfasste eine qualitative Analyse der Fragebögen, um Prozessschritte, Produkte und technologische Innovationen zu erfassen.

Ein zentraler Punkt der Transferpotentialanalyse war die Aufbereitung und Weiterverwendung von industriellen Reststoffen, die bisher nicht oder nur begrenzt genutzt wurden. Zusätzlich wurden Produkte betrachtet, die aus KlimPro-Industrie-Technologien in anderer Qualität oder Quantität zur Verfügung stehen. Das Nutzungspotenzial sowie die Anwendungsmöglichkeiten der Neben- und Endprodukte werden in Abbildung 10 veranschaulicht.

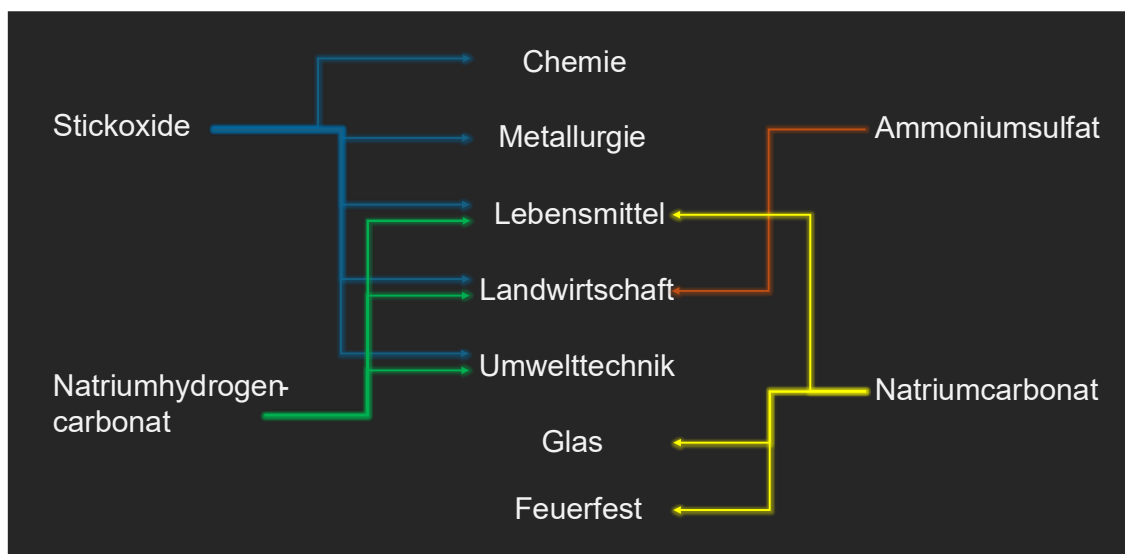


Abbildung 10: Grafische Darstellung exemplarischer Stoffe aus den neu entwickelten oder verbesserten

Prozessen der KlimPro-Industrie-Einzelprojekte und ihre Weiterverwendungsmöglichkeiten in anderen Branchen.

Durch innovative Verfahren entstehen hochwertige Produkte, die in verschiedenen Anwendungsbereichen eingesetzt werden können:

- Schwefel- und stickstoffhaltige Verbindungen eignen sich als Düngemittel für spezifische Bodenarten und tragen so zur Schließung von Nährstoffkreisläufen bei.
- Beispiel Schlacken aus dem Projekt „RESycling“

Die Aufbereitung von Roheisenentschwefelungsschlacke (RES) führt zu Ammoniumsulfat (einem stickstoff- und schwefelhaltigen Düngemittel) und Eisenkonzentraten, die in der Stahl- und Düngemittelindustrie wiederverwendet werden. Besonders innovativ ist die Rückgewinnung von Schwefelverbindungen, die bisher als Abfall entsorgt wurden. Durch diesen geschlossenen Kreislauf werden Ressourcen geschont und Emissionen aus der Düngemittelproduktion reduziert.

- Aufbereitete mineralische Reststoffe können als Zementersatz oder Füllmaterial im Tiefbau und der Infrastruktur verwendet werden. Dies reduziert nicht nur den Bedarf an primären Rohstoffen, sondern verringert auch die CO₂-Emissionen in der Zement- und Baustoffindustrie.
- Die Substitution fossiler Brennstoffe durch alternative, klimaneutrale Energieträger ermöglicht eine deutliche Reduktion der Prozessemissionen in energieintensiven Industrien. Besonders vielversprechend ist der Einsatz von grünen Gasen, die in bestehenden Prozessen Erdgas ersetzen können, ohne die Produktqualität zu beeinträchtigen.
- Beispiel CO₂ aus dem Projekt „KlimProMem“
Durch elektrochemische Membranverfahren wird CO₂ aus Industrieabgasen abgetrennt und zu Natriumcarbonat (Soda) oder Natriumhydrogencarbonat umgewandelt. Diese Stoffe sind Grundchemikalien für die Glas-, Waschmittel- oder Lebensmittelindustrie und zeigen, wie Abfallströme zu wertvollen Produkten werden können.
- Metallurgische Nebenprodukte wie Hüttensand oder Schlacken aus der Stahlproduktion lassen sich als Zusatzstoffe in der Zement- und Baustoffindustrie einsetzen. Dies reduziert nicht nur den Bedarf an primären Rohstoffen, sondern senkt auch die CO₂-Emissionen der Zementherstellung deutlich (weniger klimaintensiver Klinker nötig).
- Beispiel Hüttensand aus dem Projekt „NuCOWin“
Der im Hochofenprozess anfallende Hüttensand wird bisher nur begrenzt als Zusatzstoff in der Zementindustrie genutzt. Durch optimierte Aufbereitungsverfahren lässt sich seine Qualität so steigern, dass er bis zu 30 % des Klinkers in Zement ersetzen kann. Dies reduziert nicht nur den CO₂-Fußabdruck der Zementproduktion, sondern schafft auch eine nachhaltige Alternative zu primären Rohstoffen. Das Projekt zeigt, dass Hüttensand durch Feinmahlung und Aktivierung sogar in hochwertigen Betonen eingesetzt werden kann – ein Mehrwert für die Baustoffindustrie, der bisher ungenutzt blieb.
- Filterstäube und Abgase aus Hochtemperaturprozessen enthalten oft wertvolle Metalle oder Mineralien, die nach Aufbereitung in der Keramik- oder Glasindustrie als Sekundärrohstoffe genutzt werden können. (Beispiel: die Rückgewinnung von Zink oder Eisenoxiden – Verwendung als Farbpigmente oder Funktionsmaterialien)
- Beispiel aus dem Projekt „PRETACA“
Die im Projekt untersuchten Filterstäube aus der Feuerfestindustrie enthalten wertvolle Metalloxide, die nach einer thermischen oder chemischen Aufbereitung als Rohstoffe für die Keramik- oder Glasindustrie dienen können. Dies ersetzt primäre Rohstoffe wie Zinkoxid oder Eisenoxid und reduziert gleichzeitig die Entsorgungskosten für die produzierenden Betriebe.

Die kontinuierliche Weiterentwicklung neuer Technologien sowie die Verbesserung bestehender Prozesse eröffnen bedeutende Chancen zur Senkung der CO₂-Emissionen. Durch die Übertragung dieser innovativen Ansätze auf weitere Branchen lässt sich der Nutzen noch deutlich verstärken und ein nachhaltiger Beitrag zum Klimaschutz leisten. Einige Beispiele der neu entwickelten und optimierten Technologien sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1. Beispiele für neu entwickelte oder verbesserte Innovationen und deren potenzielle Weiterverwendung in anderen Branchen.

Innovative Technologien	Verwendung in anderen Industriezweigen
Spaltgasreaktor	Keramik
Spaltgasgeeignete Brenner	In allen Industrien, um Erdgas zu ersetzen
H ₂ -Oxy-Brenner	Aluminium, Chemie, Zement oder Stahl
H ₂ -Brenner	Keramik, Glas, Zement oder Stahl
Elektrochemische Membranverfahren	CO ₂ -Verwertung für z. B. Soda und Natron

Die Übertragung dieser Technologien erfordert gezielte Kommunikation und ein tiefes Verständnis der neuen Systeme. Hierzu zählen zum Beispiel Brenner, Packungskolonnen oder der Umbau auf alternative Energieträger. So lassen sich die entwickelten Lösungen erfolgreich in die Praxis überführen und ausbauen.

Ein zentrales Beispiel ist die Nutzung von H₂-Brennern, die vielen Industriebereichen den Umstieg auf klimaneutrale Beheizung deutlich erleichtern kann. Dabei geht es nicht nur um reinen Wasserstoff, sondern auch um verschiedene Synthesegase, die in den KlimPro-Industrie-Projekten untersucht wurden. Diese Technologien bieten zudem Potenzial für weitere Branchen, wie etwa der Ziegelherstellung, welche in dem Projekt „Spaltgas“ (siehe Abbildung 11) erfolgreich entwickelt und erprobt ist. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist diese Erkenntnisse zugänglich zu machen und ihre Anwendung in anderen Sektoren aktiv zu fördern.

Die Ergebnisse der Technologiepfade als Teil des Vernetzungs- und Transferprojekt ReInvent zeigen eindrucksvoll, wie Technologien und Stoffströme, die ursprünglich in einer Branche entwickelt wurden, durch gezielte Aufbereitung und Anpassung erhebliches Potenzial für den Transfer in andere Industrien entfalten. Innovationen wie optimierte Katalysatorverfahren oder metallurgische Nebenprodukte können durch Spill-Over-Effekte in völlig neuen Anwendungsfeldern wie Kunststoff-, Beschichtungs-, Baustoff-, Keramik- oder Glasindustrie genutzt werden.

Spaltgas

Ziel: Grünes Spaltgas als Brenngas zur Ziegelherstellung

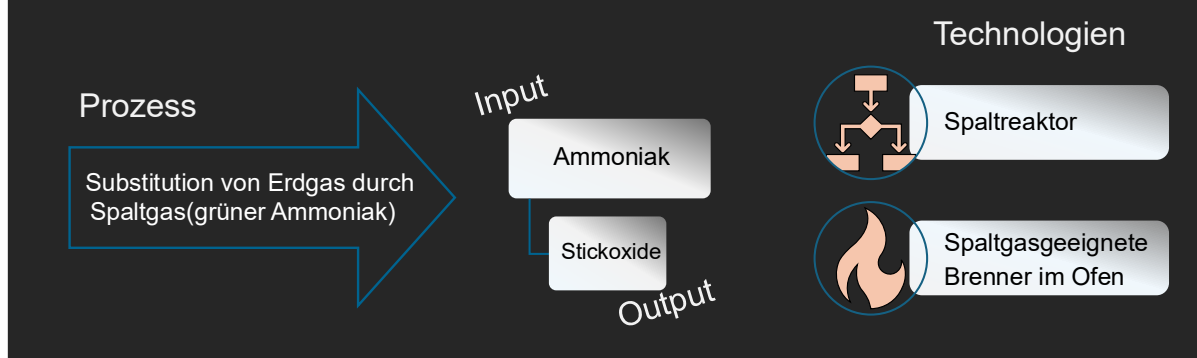


Abbildung 11: Exemplarische Darstellung des In- und Outputs sowie der weiterverwendbaren Technologien des KlimPro-Industrie Projektes „Spaltgas“.

Ein zentraler Erfolgsfaktor der Transferpotentialanalyse ist die Umwandlung bisher ungenutzter Reststoffe in wertvolle Rohmaterialien, die nicht nur die Kreislaufwirtschaft stärken, sondern auch ökologische Vorteile durch die Reduktion von Abfall und Emissionen schafft. Besonders vielversprechend sind dabei marktrelevante Nischen mit hoher Klimawirkung, wie etwa spezifische Anwendungen in der Zementproduktion, die erhebliche CO₂-Einsparungen ermöglichen und maßgeblich zur Erreichung der Klimaziele beitragen. Die Analyse der Stoffsympiosen und Technologietransformmöglichkeiten zeigt, dass kreislaufwirtschaftliche Ansätze die Materialeffizienz steigern und durch den branchenübergreifenden Einsatz innovativer Technologien (z. B. H₂-basierter Brennersysteme) die Abkehr von fossilen Energieträgern beschleunigen und prozessbedingte Emissionen direkt reduzieren. Damit leisten diese Lösungen einen entscheidenden Beitrag zur Dekarbonisierung und wirtschaftlichen Stärkung der Grundstoffindustrie.

Ein weiterer Schlüssel liegt in der Nutzung universeller Bausteine wie CO₂ und CO, die als Verbindungselemente zwischen Branchen fungieren. Während diese Stoffe in der Chemieindustrie als wertvolle Rohstoffe genutzt werden, fallen sie in metallurgischen oder Hochtemperaturprozessen als Nebenprodukte an. Diese Schnittstellen bieten die Chance, nachhaltige Stoffkreisläufe zu etablieren, die Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit gleichermaßen stärken. Unternehmen profitieren dabei von neuen Wertschöpfungsketten und Kosteneinsparungen, während die Abhängigkeit von primären Rohstoffen sinkt.

Für die Wirtschaft ergibt sich daraus ein doppelt positiver Effekt: Sie kann ihre Klimaziele erreichen und gleichzeitig wettbewerbsfähiger werden. Diese Transformation fördert die Entwicklung nachhaltiger Geschäftsmodelle, die langfristig Ressourcen schonen und die Marktposition der Unternehmen stärken.

Die identifizierten Transferpotenziale wirken auf drei Ebenen: Industrien können durch den branchenübergreifenden Austausch von Stoffströmen und Technologien ihre Prozesse effizienter und klimaschonender gestalten, wie z. B. durch die Nutzung von Nebenprodukten als Rohstoffe oder den Einsatz universeller Technologien wie H₂-Brenner. Unternehmen erschließen sich neue Absatzmärkte und Kostensenkungen, indem sie bisher ungenutzte Reststoffe vermarkten oder innovative Verfahren in anderen Sektoren anwenden, was ihre Wettbewerbsfähigkeit steigert. Für die deutsche Gesamtwirtschaft bedeutet dies eine Stärkung der Kreislaufwirtschaft, geringere Importabhängigkeiten und die Entstehung zukunftssicherer Wertschöpfungsketten.

Durch die systematische Vernetzung von Industrien können Skaleneffekte entstehen, die sowohl CO₂-Emissionen reduzieren als auch neue Geschäftsmodelle und -beziehungen erschließen können. Gleichzeitig fördert der Transfer innovativer Lösungen und Ansätze für den Einsatz von Technologien in fachfremden Branchen und steigert die Resilienz der Lieferketten. Langfristig trägt dies dazu bei, Ressourcen effizienter zu nutzen und die Transformationsfähigkeit der Grundstoffindustrie zu beschleunigen.

Um die Transferpotenziale voll auszuschöpfen und die Grundstoffindustrie nachhaltiger und widerstandsfähiger zu gestalten, gilt es, drei zentrale Punkte umzusetzen:

Eine verbesserte Kommunikation zwischen den Branchen ist entscheidend, um den Austausch zu fördern und die vorhandenen Potenziale besser zu nutzen. Hier können branchenübergreifende Plattformen als Brücke dienen, um den Wissensaustausch zu erleichtern und praktische Werkzeuge für die Vernetzung anzubieten.

Zudem sind konkrete Pilotprojekte ein wichtiger Hebel, um den Transfer von Technologien und Stoffströmen in die Praxis zu bringen. Wenn diese Projekte und ihre Erfolge sichtbar gemacht und aktiv beworben werden, steigt das Vertrauen in die neuen Ansätze, und der Austausch zwischen den Branchen wird gestärkt.

Schließlich würde eine stärkere Vernetzung von Forschung, Wirtschaft und Politik helfen, regulatorische Hürden frühzeitig zu erkennen und gemeinsam pragmatische Lösungen zu erarbeiten. So lässt sich der Transfer von Innovationen und Stoffen zum Nutzen aller Beteiligten beschleunigen und umsetzen.

Arbeitspaket 4: Öffentlichkeitsarbeit

AP4.1 Öffentliche Website und Soziale Medien

2021 wurde der Internetauftritt <https://reinvent-klimpro.de/> erstellt. Der Webauftritt diente dazu, die Ergebnisse von ReInvent sowie der weiteren geförderten Projekte von KlimPro-Industrie darzustellen und mit der Öffentlichkeit zu teilen. Auf der Website wurden Projektbeschreibungen eingepflegt und Neuigkeiten aus den Vorhaben kontinuierlich veröffentlicht. So wurden z. B. Hinweise zu Veranstaltungen, Interviews und Projektvideos der Begleitmaßnahme online gestellt.

Über die Projektlaufzeit wurden regelmäßig Informationen über KlimPro-Industrie auf LinkedIn geteilt.

AP4.2 Videoclips und allgemeine Pressearbeit

Im Rahmen von ReInvent wurden verschiedene Imagevideos produziert, um die Ziele und Aktivitäten des Projekts sowie den Beitrag zur Transformation der Industrie sichtbar zu machen. Das erste Video stellt die Arbeit und Rolle von ReInvent als Vernetzungs- und Transferprojekt vor. In rund vier Minuten bündelt Beiträge aller ReInvent-Vertreter und bietet einen kompakten Überblick über die wissenschaftliche Begleitung der geförderten Projekte. Es verdeutlicht, welche Formen der Unterstützung ReInvent bereitstellt und wie die Projekte auf ihrem Weg kontinuierlich begleitet werden. Das zweite Video fokussiert die Herausforderungen der beteiligten Branchen bei der Vermeidung von Treibhausgasen und beim Erreichen der deutschen Klimaschutzziele.

Daraus wurden sieben kurze Clips erstellt und veröffentlicht.

Des Weiteren wurde jeweils ein Projektvideo zu den Projekten PRETACA und RESyycling erstellt und veröffentlicht. Die Videos sind unter folgendem Link abrufbar:

<https://reinvent-klimpro.de/Ergebnisse/Videos+%C3%BCber+ReInvent.html>

Die Videos wurden über LinkedIn und dem DECHEMA-Newsletter geteilt.

AP4.3 Messeauftritt

Messen und Ausstellungen waren zentrale Elemente für die Selbstdarstellung von KlimPro-Industrie in den Fachcommunities und ein wichtiger Beitrag zum Technologietransfer. Im ersten Quartal des Projekts wurden Messen der verschiedenen Branchenvertretern identifiziert, die für einen ReInvent-Messestand in Betracht gezogen werden konnten.

So wurde ReInvent und KlimPro-Industrie im Projektverlauf auch auf ausgewählten Branchenmessen oftmals über die Stände der jeweiligen Branchenvertreter sichtbar gemacht und einem breiten Fachpublikum vorgestellt. So erfolgte die Präsentation auf der ceramitec vom 21.–24.06.2022 in München (Leitmesse der Keramikindustrie). Darüber hinaus wurde ReInvent auf der Tecna vom 27.–30.09.2022 in Rimini (Italien) am Stand des IZF vorgestellt. Ebenfalls im Jahr 2022 war ReInvent auf der

glasstec vom 20.–23.09.2022 in Düsseldorf präsent – hier auf dem Gemeinschaftsstand von HVG-DGG. Im Jahr 2023 wurde RelInvent zudem auf der Thermprocess vom 12.–16.06.2023 in Düsseldorf vorgestellt, und zwar auf Teilmesseständen der FOGi, am BFI-Stand, GWI-Stand sowie am IOB durch das Projekt FlexLBO.

Des Weiteren hat die DECHEMA auf der ACHEMA 2024 einen eigenen KlimPro-Industrie-Messestand geplant und umgesetzt. Die Messe fand vom 10. bis 14. Juni 2024 in Frankfurt am Main statt. Ziel war es, Nachwuchsforschende sowie Interessierte aus Industrie und Wissenschaft anzusprechen und das Netzwerk zu erweitern.

Der Stand befand sich im Hallenbereich „Forschung und Innovation“ und umfasste eine Fläche von 28 Quadratmetern. Die Gestaltung folgte einem dreiteiligen Konzept:

1. Visuelle Darstellung auf der Rückwand – Diese veranschaulichte die Gesamtzielsetzung von KlimPro-Industrie. Wechselnde Bilder zeigte die CO₂-Emissionen verschiedener Branchen, die erforderlichen Einsparungen entlang eines Zeitstrahls sowie Lösungsansätze aus den KlimPro-Industrie-Projekten. Zusätzlich wurde die Implementierung neuer Pfade, wie Effizienzsteigerungen, Elektrifizierung oder der Umstieg auf Wasserstoff, dargestellt.
2. Exponate aus geförderten Projekten – Drei ausgewählte Projekte präsentierten verschiedene Materialproben als Anschauungsmaterial. Dabei kamen unter anderem Exponate von ReprovAP), RESycling, K4 und Glas-CO₂ zum Einsatz.
3. Diskussionsbereich mit Sitzgelegenheiten – Ein Tresen mit Sitzmöglichkeiten sowie eine Sitzecke vor der Leinwand boten Raum für vertiefende Gespräche.

Durch diese strukturierte Gestaltung konnte der Messestand sowohl fachliche Informationen vermitteln als auch den interaktiven Austausch mit den Besuchenden fördern.

Die ACHEMA bot den richtigen Rahmen für die Ausstellung: 2.842 Unternehmen aus 56 Nationen präsentierten ihre neuesten Ausrüstungen und innovative Verfahren für die Chemie-, Pharma-, Lebensmittel- und verwandte Industrien. Insgesamt kamen 106.001 Teilnehmer aus 141 Ländern, wobei nahezu 50 % der Besucher aus dem Ausland kamen.

Auch auf der Fachmesse GLASSTEC2024 in Düsseldorf im Oktober 2024 war das Begleitprojekt RelInvent auf dem Gemeinschaftsstand der Deutschen Glastechnischen Gesellschaft (DGG) vertreten. Sowohl Mitarbeiter von HVG als auch des GWI standen am Stand bei Fragen zu RelInvent zur Verfügung. (Teil-)Ergebnisse der KlimPro-Industrie-Projekte (MiGWa, Glas-CO₂) wurden präsentiert und konnten mit Vertretern der Forschungsinstitute am Gemeinschaftsstand zur Glasforschung diskutiert werden. Auf der Leitmesse der Keramikindustrie, der ceramitec, vom 9.-12. April 2024 in München wurde das Begleitprojekt RelInvent auf dem Stand des IZF vorgestellt und diskutiert. Mit dem Schwerpunkt der Dekarbonisierung der Keramikindustrie, speziell der Nutzung von Wasserstoff (Projekt H2TO) und Ammoniak (Projekt Spaltgas), konnten erste Ergebnisse einem breiten Publikum präsentiert werden.

Die Auswirkungen der Gasart auf die Produktqualität und die Versorgungssicherheit standen bei den Gesprächen im Fokus.

AP 4.4 Öffentliche Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisse der Projektverbände, die Analysen und Erkenntnisse, die aus RelInvent gewonnen werden, werden in einem öffentlich zugänglichen Dokument zusammengeführt. Mit dem Dokument wird das Ziel adressiert, die Methoden und Ergebnisse der Projektverbände und von RelInvent derart aufzuarbeiten und zusammenzufassen, dass die öffentliche Diskussion auf einer fach- und sachgerechten Grundlage geführt wird. Die branchenspezifischen und branchenübergreifenden Erkenntnisse und Ergebnisse können die technische Grundlage für politische und unternehmerische Entscheidungen darstellen. Die öffentliche Ergebnisdarstellung wird nach Ablauf des Projekts erfolgen.

Fazit

Das Projekt RelInvent verlief insgesamt planmäßig und die Projektpartner konnten im Verlauf des Vorhabens weitestgehend alle vorgesehenen Aufgaben erfüllen. Die Nachwirkungen der Coronapandemie sowie die teils verzögerten Bewilligungen der Verbundprojekte haben den Zeitplan von RelInvent insbesondere zum Beginn der Projektlaufzeit beeinflusst. Infolgedessen wurden beispielsweise Veranstaltungen und Berichte etwas später als ursprünglich vorgesehen durchgeführt. Insgesamt konnte der Zeitplan wieder eingeholt werden, so, dass nahezu alle Aufgaben im Rahmen des Zeitplans fertiggestellt werden konnten. Eine Ausnahme ist die Erstellung einer Abschlusspublikation. Da einige Projektergebnisse der geförderten Projekte nach der Laufzeit von RelInvent übermittelt wurden, kann die Publikation erst nach Ende des Vorhabens fertiggestellt und veröffentlicht werden.

Die KlimPro-Industrie-Projekte aus der ersten Phase konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Lediglich das Projekt CODA unter der Koordination des MPI Magdeburg musste vorzeitig beendet werden, da ein beteiligter Industriepartner aus dem Konsortium ausgeschieden ist. Im Rahmen von RelInvent wurde eine Umfrage mit den Projekten durchgeführt, in welcher die Projekte ihre Ziele und eine Selbsteinschätzung der Zielerreichung und der TRL-Sprünge darstellen sollten. Von den insgesamt 17 Forschungsprojekten haben 11 teilgenommen, so dass die Ergebnisdarstellung als relevant jedoch nicht vollständig einzuschätzen ist. Die 11 teilnehmenden Projekte formulierten 33 Teilziele. Auf Basis von insgesamt 33 formulierten Teilzielen fällt die Zielerreichung sehr positiv aus: 50 % der Teilziele wurden vollständig erfüllt, weitere 42 % konnten teilweise erreicht werden. Zudem wurden 3 % der Ziele sogar übererfüllt, während lediglich 5 % nicht erfüllt wurden. Die Gründe für Untererfüllungen sind dabei eher prozessual als grundsätzlich: Entweder liefen Betriebs- bzw. Langzeitversuche noch oder selbstgesetzte KPIs wurden (marginal) unterschritten. Dies zeugt von der kritischen

Auseinandersetzung der Projekte mit den eigenen Ergebnissen und zeigt gleichzeitig das immanente Potenzial der Technologien.

Generell zeigte sich über die Fördermaßnahme hinweg ein sehr erfreulicher Fortschritt: Der Reifegrad (TRL) der betrachteten Technologien konnte im Durchschnitt um 2,1 Stufen gesteigert werden. Die Entwicklung verlief dabei dynamisch und differenziert – die erzielten TRL-Sprünge lagen je nach Teilziel zwischen 1 und 4 Stufen. Besonders hervorzuheben ist, dass mehrere der 33 genannten Teilziele finale TRL von 7 (3 Teilziele) sowie TRL 6 (8 Teilziele) erreicht haben und damit wichtige Meilensteine auf dem Weg zur Anwendung gesetzt wurden.

Gleichzeitig bestätigte sich das erwartete Gesamtbild, dass der TRL der meisten Technologien noch nicht vollständig ausgereift sind. Um das vorhandene Potenzial konsequent zu heben, wurden unterschiedliche Bedarfe formuliert. Die Top 3 dieser Bedarfe waren „Weitere Forschung“ zur Erhöhung des Technologiereifegrades, „weitere Fördermittel“ um diese Forschung zu finanzieren, sowie „regulatorische Anpassungen“. Positiv hervorzuheben ist, dass alle Projekte eine Weiterentwicklung der technologischen Ansätze anstreben – und zwar nicht nur über öffentlich geförderte Projekte, sondern auch über interne Maßnahmen und den damit verbundenen privatwirtschaftliche Investitionen. Dies ist dahingehend besonders, da es ein echtes unternehmerisches Interesse beweist. Somit ist die Kommerzialisierung klar als Zielbild erkennbar. Damit diese erfolgreich gelingt, braucht es neben der technischen Weiterentwicklung auch unterstützende Rahmenbedingungen – insbesondere regulatorische Anpassungen, sinkende Energiekosten sowie den weiteren Ausbau bzw. die Verfügbarkeit der notwendigen Infrastruktur. Insgesamt unterstreichen diese Ergebnisse eine sehr solide Ausgangsbasis und eine klare Perspektive für die nächsten Schritte in Richtung Marktreife.

Neben der technologischen Reife und der Rahmenbedingungen ist zudem aber noch ein weiterer Aspekt zu betrachten – der Market Pull. Denn ein konservativer Markt, mit Unsicherheiten auf der Seite der Anwender und Abnehmer, sowie eine hohe Aversion gegen hohe CAPEX können ernstzunehmende Hindernisse darstellen.

Durch die Forschungsarbeiten der Projekte sowie dem Dialog zwischen und unter den Vertretern der verschiedenen Branchen wurden die förderpolitischen Ziele adressiert. Im Folgenden werden die Erkenntnisse und weiterhin bestehenden Hindernisse zur Erreichung der Klimaschutzziele aus den einzelnen Branchen zusammengefasst.

Zement

Die deutsche Zementindustrie hat in den vergangenen Jahrzehnten umfangreiche Klimaschutzmaßnahmen ergriffen. Seit 1990 konnten so die CO₂-Emissionen bereits um etwa ein Viertel reduziert werden. Bei der weiteren CO₂-Minderung stößt die Zementindustrie jedoch

zunehmend an Grenzen. Das liegt besonders an den prozessbedingten Emissionen der Klinkerherstellung, die mit heute verfügbarer Technik nicht minderbar sind.

Ein wichtiger Ansatz zur Dekarbonisierung, der in der Vergangenheit verfolgt wurde und auch in Zukunft wichtig sein wird, ist die kontinuierliche Absenkung der Klinkergehalte in den Zementen. Die Roadmap des VDZ sieht eine Absenkung des Klinker-Zement-Faktors von aktuell 70 % auf 53 % im Jahr 20250 vor. Hier setzen drei der durch die BMFTR-Fördermaßnahme KlimPro-Industrie geförderten Projekte an: „K4“, „RESyycling“ und „PhoeMixBeton“.

Die in den Projekten untersuchten CO₂-Minderungsmaßnahmen haben das Potenzial, einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung der Zement- und Betonherstellung zu leisten. Eine weitere entscheidende Rolle werden in Zukunft vor allen Dingen die Abscheidung von CO₂ im Zementwerk und dessen Nutzung bzw. Speicherung („Carbon Capture and Utilisation/Storage“ – CCUS) spielen.

Glas

Die in Deutschland ansässige Glasindustrie unternimmt seit Jahren Anstrengungen, um die CO₂-Äq.-Emissionen bei der Glasproduktion zu senken. Im Vergleich zu 1990 konnte bis zum Jahr 2024 eine Minderung um 24 % erreicht werden. Ohne regenerative, alternative Energieträger und neue Technologien sind keine größeren Einsparungen mehr zu erreichen, um aus der Verbrennung kommendes CO₂ und vor allem prozessbedingtes CO₂ zu vermeiden.

Eine Möglichkeit die prozessbedingten CO₂-Emissionen ist zu mindern, ist, den Einsatz von Recyclingscherben bei der Glasherstellung zu erhöhen. Die Verfügbarkeit von qualitativ gut sortierten Scherben stellt hier eine Grenze dar, bei der aktuellen Recyclingquote von ca. 85% bei Behälterglas in Deutschland.

Von den KlimPro-Industrie-Projekten aus dem 1. Aufruf sind 2 der Glasbranche zugeordnet:

- Glas-CO₂: Eine Machbarkeitsstudie zur Verbindung von P2X und CCUS um CO₂ im Kreislauf zu fahrend und dabei prozessbedingte CO₂-Emissionen abzufangen.
- MiGWa: Einsatz von Mikrowellen als effiziente (Hilfs- und Sekundär-)Energieträger zur Schmelze von Glas. Als ein erneuerbarer Brennstoff wurde dabei das Verhalten von Glas und H₂ mit untersucht.

Bei den Projekten ergab sich, dass

- der Kreislauf technologisch mit (in anderen Prozessen und Branchen) eingespielten Technologien möglich ist, aber ökonomisch bei den aktuellen Randbedingungen nicht tragbar wäre.
- Wasserstoff ein möglicher Brennstoff zur Schmelze von Glas sein kann, aber die Verfügbarkeit das essenzielle Problem beim industriellen Einsatz ist. Die Wechselwirkung von Glas mit H₂ oder seinen Abgasen (Wasser) ist beherrschbar.

- Mikrowellen sind als Hilfsenergieträger bei der Glasschmelze prinzipiell einsetzbar, aber weitergehende Untersuchungen sind von Nöten.

Stahl

Seit Jahrzehnten wird mit neu entwickelten Technologien und Verfahren die energetische Effizienzsteigerungen in den Prozessketten der Stahlherstellung und -bearbeitung sowie die gesamte Prozesskette vorangetrieben. Die CO₂-Emissionen wurden in Europa um rd. 30 % vermindert, wobei etwa die Hälfte auf den Rückgang der Stahlherstellung in Europa zurückzuführen ist.

Die für die Klimaziele der Bundesregierung und EU bis 2045 nun erforderlichen weiteren und drastischen Verminderung der CO₂-Emissionen ist durch Veränderung der Verfahren, neue Verfahren zur Roheisenherstellung z. B. Direktreduktion und Einsatz von zukünftigen kohlenstofffreien Energieträgern wie Wasserstoff und regenerativen Strom zu erreichen. Dies bringt sehr große Herausforderungen und Risiken für die Branche mit sich. An diesen wird in der Branche aktiv geforscht und Pilot- sowie Demonstrationsanlagen werden dazu betrieben.

Im Rahmen der BMFTR-Fördermaßnahme KlimPro-Industrie setzten die geförderten Projekte SaveCO₂, FlexLBO, RESycling, NuCOWin, FaBrik und H₂-Alu in dieser Forschungsthematik mit spezifischen Forschungsfragen an oder erforschten ergänzende Maßnahmen zur CO₂-Einsparung. Die untersuchten und erreichten CO₂-Minderungsmaßnahmen der geförderten Projekte sind Beiträge, die einerseits aufgrund der grundlegenden Prozessumstellung notwendig werden bzw. neue Technologien ermöglichen und andererseits CO₂ Minderungen durch Prozessoptimierung oder Rohstoffrecycling. Die Projekte leisten damit einen Beitrag zur CO₂-Einsparung neben den entscheidenden Prozessveränderungen und Einsatz regenerativer Energieträger, die zur CO₂-Vermeidung zukünftig notwendig sind.

Keramik

Die im Rahmen von KlimPro-Industrie durchgeführten Projekte der Keramikindustrie – Spaltgas, H₂TO und PaKerNat – zeigen, dass alternative Brenngase einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung energieintensiver Brennprozesse leisten können. Insbesondere die Untersuchungen zu Spaltgas (NH₃) sowie Wasserstofftechnologien im Tunnelofen (H₂TO) liefern wichtige Erkenntnisse für die zukünftige klimaneutrale Produktion keramischer Erzeugnisse. Die Projekte H₂TO und PaKerNat sind zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht abgeschlossen.

Sowohl Wasserstoff als auch sein Derivat Ammoniak (NH₃) sind CO₂ neutrale Brennstoffe. Die Versuche mit wasserstoffhaltigem Spaltgas verdeutlichen, dass eine Substitution fossiler Energieträger technisch möglich ist. Durch den hohen Wasserstoffanteil im vorgespaltene Ammoniak, d. h. mit erhöhtem Wasserstoffanteil, ergeben sich Vorteile beim NH₃-Einsatz hinsichtlich der Verbrennungsdynamik. Eine

sichere Zündung und eine stabile Flamme können bei entsprechender Brennerkonfiguration erreicht werden. Die Änderungen in der Wärmeübertragung durch den Wegfall der Strahlungskomponente CO₂ kann durch den höheren Wasserdampfanteil ausgeglichen werden. In der Keramikindustrie ist die Wärmeübertragung durch Konvektion wesentlich, welche durch nahezu identische Volumenströme erhalten bleibt.

Im Projekt H₂TO konnte nachgewiesen werden, dass der Einsatz von Wasserstoff im Tunnelofen grundsätzlich realisierbar ist. Die keramischen Produkte der Ziegelindustrie zeigten dabei keine wesentlichen negativen Auswirkungen hinsichtlich Farbe, Gefüge oder Qualität. Anders verhält es sich bei den untersuchten Schammotten. Hier sind nach Abschluss des Projektes erst verlässliche Aussagen zu erwarten.

Gleichzeitig wurde deutlich, dass wasserstoffbasierte Brennprozesse neue Herausforderungen mit sich bringen. Vor allem die Bildung thermischer NO_x-Emissionen ist stark von Brennergeometrie, Luftführung und Temperaturverteilung abhängig. Bei Untersuchungen zu ammoniakbasierten Energieträgern traten zusätzlich NH₃- und N₂O-Emissionen als kritische Aspekte hervor. Hier besteht weiterhin erheblicher Forschungsbedarf hinsichtlich Emissionsminderung und Ofentechnik.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine vollständige Elektrifizierung derzeit nur eingeschränkt wirtschaftlich und technisch umsetzbar erscheint, während wasserstoffhaltige Gase insbesondere für Hochtemperaturprozesse ein realistischer Entwicklungspfad sein können.

Insgesamt bestätigen die Projekte der Keramikindustrie innerhalb von KlimPro-Industrie, dass die Transformation hin zu klimaneutralen Brennprozessen technisch möglich ist. Für eine industrielle Umsetzung sind jedoch weitere Demonstrationsanlagen, eine sichere Wasserstoffinfrastruktur sowie wirtschaftlich tragfähige Energiepreise erforderlich. Besonders die Weiterentwicklung emissionsarmer Brennersysteme und die Optimierung der Prozessführung werden entscheidend für den zukünftigen Einsatz von Wasserstoff und Spaltgas in Tunnelöfen sein.

Chemie

In den vergangenen fünf Jahren hat sich die CO₂-Bilanz der chemischen Industrie in Deutschland spürbar verändert – weniger durch einen einzelnen „Gamechanger“ als durch das Zusammenspiel aus Effizienzfortschritten, Brennstoffwechsel und einem beschleunigten Transformationsdruck. Unternehmen haben Energie- und Ressourceneffizienzprogramme ausgeweitet (u. a. Prozessoptimierung, Wärmerückgewinnung, Digitalisierung/Advanced Process Control) und an vielen Standorten schrittweise von kohlenstoffintensiveren Energieträgern auf Erdgas sowie zunehmend auf Strom aus erneuerbaren Quellen umgestellt. Parallel gewann der Bezug von Grünstrom (PPAs), der Ausbau eigener erneuerbarer Erzeugung und die Elektrifizierung einzelner Prozesse an Bedeutung. Ein weiterer wichtiger Hebel war die Kreislaufwirtschaft: Mehr mechanisches und chemisches Recycling, verbesserte Stoffstromsteuerung sowie der Einsatz von Sekundärrohstoffen senken die

Scope-3-Emissionen und reduzieren den Bedarf an fossilen Einsatzstoffen. In einigen Wertschöpfungsketten wurde zudem begonnen, alternative Kohlenstoffquellen (z. B. biogene Rohstoffe, CO₂-basierte Feedstocks) zu pilotieren, auch wenn diese Ansätze bisher überwiegend im Demonstrationsmaßstab sind.

Die größten Treiber dieser Entwicklung waren der europäische und nationale Regelungsrahmen – insbesondere der EU-Emissionshandel und zunehmende Berichtspflichten, sowie deutlich gestiegene Energiepreise und Versorgungsrisiken seit 2021/22 – die Effizienz und Substitution ökonomisch attraktiver machten, als auch steigende Kundenanforderungen entlang der Lieferketten (z. B. CO₂-Fußabdruck von Produkten, „low-carbon“ Materialien) und der wachsende Wettbewerb um klimafreundliche Produkte. Gleichzeitig hat sich die Lage aber auch ambivalent entwickelt: Produktionsrückgänge in energieintensiven Segmenten und temporäre Lastanpassungen haben Emissionen teils kurzfristig reduziert, ohne dass dies automatisch eine strukturelle Dekarbonisierung bedeutet.

Handlungsbedarf besteht vor allem in der Skalierung der „tiefen“ Dekarbonisierung: Der Hochlauf von grünem Wasserstoff und klimaneutralen Grundstoffen (z. B. e-Methanol, e-Naphtha), die Elektrifizierung großer Prozesswärme, sowie CCU/CCS-Optionen für unvermeidbare Emissionen benötigen verlässliche Infrastruktur, schnellere Genehmigungen und wettbewerbsfähige Strom- und Wasserstoffpreise. Zudem müssen Netzausbau, Anschlusskapazitäten und langfristige Beschaffungsmodelle (PPAs, H₂-Abnahmeverträge) beschleunigt werden. Schließlich bleibt die Kreislaufwirtschaft ein Schlüsselthema: Standardisierte Mass-Balance-Regeln, mehr sortenreine Sammel- und Sortierströme, sowie Investitionen in Recyclingkapazitäten sind nötig, damit der Einsatz von Rezyklaten und alternativen Kohlenstoffquellen in der Breite wirksam wird. Insgesamt zeigt sich: Die letzten Jahre haben die Richtung klarer gemacht – die eigentliche Transformation entscheidet sich nun an Skalierung, Infrastruktur und wettbewerblichen Rahmenbedingungen.

Im Rahmen von KlimPro-Industrie haben die Projekte ReProvAP, RESycling, CODA, PRETACA, SynGas2Ethen und KlimProMem innovative Prozesse zur Vermeidung von Treibhausgasen in der chemischen Industrie erforscht.

Schlussbemerkung

Unverändert steht die deutsche Grundstoffindustrie vor zentralen technologischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Herausforderungen, um Treibhausgasemissionen nachhaltig zu senken. Technologisch bleibt die Dekarbonisierung bzw. Defossilisierung energieintensiver Prozesse eine Schlüsselaufgabe: Die Herstellung von Stahl, Zement, Chemikalien und weiteren Grundstoffen basiert weiterhin stark auf fossilen Energieträgern wie Erdgas und Kohle, während zentrale Prozessrouten (z. B. Hochofentechnologie, Dampfreformierung von Methan) nur eingeschränkt elektrifizierbar sind bzw. den Umstieg auf klimaneutrale Alternativen erfordern. Hinzu kommt die notwendige Umstellung

der Kohlenstoffbasis: Fossile Rohstoffe dienen nicht nur als Energieträger, sondern sind zugleich Hauptkohlenstoffquelle vieler chemischer Produkte. Der verstärkte Einsatz alternativer Kohlenstoffquellen (Biomasse, CO₂-Nutzung, Recycling von Kunststoffabfällen) setzt neue Technologien, skalierbare Prozesse und geeignete Infrastrukturen voraus. Ebenso bleibt die Hochskalierung von Wasserstofftechnologien essenziell – etwa für klimafreundliche Prozessrouten in der Stahlproduktion oder der Ammoniaksynthese –, wird jedoch durch begrenzte Verfügbarkeit, hohe Kosten sowie fehlende Transport- und Speicherkapazitäten gebremst. Viele klimafreundliche Technologien befinden sich weiterhin in Pilot- oder Demonstrationsphasen; für relevante Emissionsminderungen ist eine deutlich schnellere Skalierung erforderlich.

Wirtschaftlich sind die Transformationsanforderungen mit sehr hohen Investitionen in Anlagen, Infrastruktur und Forschung verbunden. Viele Unternehmen sind dabei auf staatliche Unterstützung, robuste Geschäftsmodelle und langfristige Investitionssicherheit angewiesen. Gleichzeitig erhöhen hohe Energiepreise und strengere Umweltauflagen in Deutschland und der EU den Wettbewerbsdruck; ohne geeignete Flankierung besteht weiterhin das Risiko von Produktionsverlagerungen (Carbon Leakage). Regulatorisch sind zentrale Rahmenbedingungen – etwa für Import, Transport und Nutzung von Wasserstoff sowie für CO₂-Transport und -Speicherung (CCS) – noch nicht vollständig geklärt bzw. standardisiert. Der EU-Emissionshandel setzt zwar wichtige Dekarbonisierungsanreize, kann aber die Wettbewerbsfähigkeit belasten, sofern keine ausreichenden Kompensations- und Fördermechanismen greifen. Für die nächste Phase der Umsetzung sind daher verlässliche, langfristige Strategien und Instrumente entscheidend, um die begonnenen Transformationspfade zu stabilisieren und in die Breite zu tragen.