

CLIMATE CHANGE

06/2024

Teilbericht

Dekarbonisierung der industriellen Produktion (DekarbInd)

AP2: Erarbeitung von Eckpunkten für die Dekarbonisierung der Stahlindustrie

von:

Ali Aydemir, Philine Warnke, Sascha Lehmann
Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Marlene Arens
Fraunhofer ISI/LUND University, Karlsruhe

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 06/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3719 41 303 0
FB001168

Teilbericht

Dekarbonisierung der industriellen Produktion (DekarInd)

AP2: Erarbeitung von Eckpunkten für die
Dekarbonisierung der Stahlindustrie

von

Ali Aydemir, Philine Warnke, Sascha Lehmann
Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Marlene Arens
Fraunhofer ISI/LUND University, Karlsruhe

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe

Abschlussdatum:

Juli 2022

Redaktion:

Fachgebiet III 2.2 Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie Christian Lehmann; Sebastian Plickert

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Januar 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Dekarbonisierung der industriellen Produktion (DekarbInd)

Das Pariser Klimaabkommen zielt darauf ab, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu begrenzen. Hierfür hat sich Deutschland das Ziel gesetzt, bis 2045 treibhausgasneutral zu werden. Um dies zu erreichen, müssen die Emissionen in allen Sektoren drastisch gesenkt werden. Im Bereich der industriellen Emissionen steht die Stahlindustrie besonders im Fokus, da sie hier für 20 % der Emissionen und damit für etwa 5 % der gesamten deutschen Emissionen verantwortlich ist. Hier setzt das Projekt DekarbInd an. Im Rahmen des zweieinhalbjährigen Projekts wurden Eckpunkte für eine Roadmap zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie herausgearbeitet. Stakeholder wie z. B. Stahlhersteller, Anlagenbauer, aber auch gesellschaftliche Interessengruppen und die Wissenschaft wurden auf partizipative Weise einbezogen. Sie nahmen aktiv an Workshops zu verschiedenen Themen teil, kommentierten Thesenpapiere und brachten so ihre Expertise in das Projekt ein. Dieser Abschlussbericht bietet Einblicke in Hemmnisse auf dem Weg zu einer Dekarbonisierung der Stahlproduktion und zeigt nächste Schritte und Maßnahmen auf, die dazu beitragen können, die Barrieren zu überwinden und die Stahlindustrie weiter in Richtung Dekarbonisierung zu lenken. Zentrale Aspekte sind dabei, die Umstellung auf Direktreduktion des Eisenerzes mit grünem Wasserstoff, die Erhöhung des Schrotteinsatzes und die Dekarbonisierung der Elektrostahlproduktion.

Abstract: Key points for a roadmap to decarbonise steel industry

The Paris Climate Agreement aims to limit global warming to well below 2 degrees Celsius compared to pre-industrial times. For this, Germany has the goal of becoming greenhouse gas neutral by 2045. To achieve this, emissions in all sectors must be drastically reduced. In the area of industrial emissions, the steel industry is particularly in focus, as it is responsible for 20 % of emissions here and thus for about 5 % of total German emissions. This is where the DekarbInd project comes in. Within the scope of the two-and-a-half-year project, key steps for a roadmap aimed to decarbonise the steel industry were drafted. Stakeholders such as steel producers, plant manufacturers, but also societal groups and the scientific community were involved in a participatory way. They participated in workshops on different topics and commented on thesis papers and thus contributed their expertise to the project. This final report offers insights into barriers on the way to decarbonisation of steel production and identifies next steps and measures that can help to overcome the barriers and steer the steel industry further towards decarbonisation. Key issues are the switch to direct reduction of iron ore with green hydrogen, increasing the use of scrap and decarbonising electric steel production.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
Zusammenfassung.....	9
Summary	14
1 Einleitung.....	19
2 Grundlagen, Ziele und Vorgehen	23
2.1 Grundlagen zu Roadmaps	23
2.2 Vorgehen und Ziele	24
3 Erkenntnisse aus dem Roadmapping	32
3.1 Vision.....	32
3.2 Technologien.....	32
3.3 Transformationspfad.....	37
3.4 Hemmnisse und Treiber	39
3.5 Maßnahmen.....	44
4 Eckpunkte für die Roadmap	55
4.1 Ausgangssituation	55
4.2 Eckpunkte für allgemeine Maßnahmen.....	57
4.3 Eckpunkte für einen Ausbau der DRI-Route	58
4.4 Eckpunkte für einen höheren Schrotteinsatz	60
4.5 Eckpunkte für die Schaffung von Leitmärkten.....	63
5 Quellenverzeichnis	65

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Transformationspfad, Hemmnisse und Treiber	10
Abbildung 2:	Übergreifende Maßnahmen	11
Abbildung 3:	Maßnahmen für DRI Anlagen	12
Abbildung 4:	Maßnahmen zur Erhöhung des Schrotteinsatzes.....	13
Abbildung 5:	Transformation Pathway, Barriers and Drivers	15
Abbildung 6:	General measures.....	16
Abbildung 7:	Measures for DRI plants	17
Abbildung 8:	Measures for the use of scrap	18
Abbildung 9:	Theoretischer Reinvestitionsbedarf für Hochöfen bis 2030.....	20
Abbildung 10:	Dekarblnd-Veranstaltungen	22
Abbildung 11:	Schritte beim Roadmapping	24
Abbildung 12:	Zusammenspiel Kerngruppe und Projektteam.....	26
Abbildung 13:	Gruppenarbeit Visionsworkshop.....	28
Abbildung 14:	Mindmap Visionsworkshop	29
Abbildung 15:	Synthese Technologien.....	30
Abbildung 16:	Synthese Hemmnisse, Treiber und Maßnahmen	31
Abbildung 17:	Technologien zur Dekarbonisierung der Eisenproduktion	33
Abbildung 18:	Transformationspfad	38
Abbildung 19:	Politikinstrumente	54
Abbildung 20:	Roadmap Eckpunkte Legende	55
Abbildung 21:	Roadmap Eckpunkte Ausgangssituation	56
Abbildung 22:	Roadmap Eckpunkte übergreifend.....	57
Abbildung 23:	Roadmap Eckpunkte DRI-Route	59
Abbildung 24:	Roadmap Eckpunkte Schrotteinsatz.....	61
Abbildung 25:	Roadmap Eckpunkte Leitmärkte	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammensetzung der Kerngruppe	25
Tabelle 2:	Veranstaltungen im Roadmappingkontext	27
Tabelle 3:	Akteure für allgemeine Maßnahmen	58
Tabelle 4:	Akteure für den DRI-Ausbau.....	60
Tabelle 5:	Akteure für einen höheren Schrotteinsatz.....	62
Tabelle 6:	Akteure für Leitmärkte	64

Abkürzungsverzeichnis

BDSV	Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen
BeWiSe	Begleitforschung Wasserstoff in der Stahlherstellung
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CAPEX	Capital Expenditures
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CCfD	Carbon Contracts for Difference
CCS	Carbon Capture and Storage
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle
Dekarblnd	Projektakürzung für Dekarbonisierung der Industrie
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
DRI	Direct reduced iron bzw. Eisenschwamm
EAF	Electric Arc Furnace
EU	Europäische Union
EU-ETS	EU-Emissionshandelssystem
F&E	Forschung und Entwicklung
Ff55	Fit für 55
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
HBI	Hot briquetted iron
IPCEI	Important Projects of Common European Interest
ISO	Internationale Organisation für Normung
KGT	Kerngruppentreffen
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
OPEX	Operational Expenditures
SAF	Submerged Arc Furnace
SD	Stakeholderdialog
SPI	Sustainable Product Initiative
TEHG	Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz
THG	Treibhausgas
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
WS	Workshop
WTO	World Trade Organization

Zusammenfassung

Zur Erreichung der Pariser Klimaziele ist es dringend notwendig, die Treibhausgasemissionen in der Stahlindustrie drastisch zu reduzieren. Ziel des DekarbInd-Projekts war es, Eckpunkte für eine Roadmap zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie in Deutschland zu entwickeln. Hierfür wurden Stakeholder partizipativ eingebunden.

Für das Roadmapping wurde zunächst eine Stakeholder-Gruppe (die sogenannte Kerngruppe) gebildet. Diese Gruppe bestand aus Vertretern und Vertreterinnen aus Wirtschaft, Politik, Gesellschaft und Wissenschaft. Zu den Wirtschaftsvertretern gehörten fünf Stahlproduzenten sowie mehrere Anlagenbauer. Gemeinsam mit dieser Gruppe wurde über einen Zeitraum von zwei Jahren Wissen für die Entwicklung der Eckpunkte zusammengetragen. Zu diesem Zweck wurden sechs Workshops durchgeführt, deren Ergebnisse in Thesenpapieren zusammengefasst und kommentiert wurden. Darüber hinaus wurden bestimmte Themen durch Interviews und vertiefende Workshops angereichert. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden schließlich genutzt, um einen Transformationspfad mit Treibern, Hemmnissen und Maßnahmen zu erstellen, der in einem abschließenden siebten Workshop auf Kontroversen und Lücken überprüft wurde. Auf dieser Grundlage wurden schließlich die Eckpunkte für die Roadmap zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie zusammengestellt.

Ausgangspunkt des Roadmappings war die zu Beginn gemeinsam entwickelte Vision:

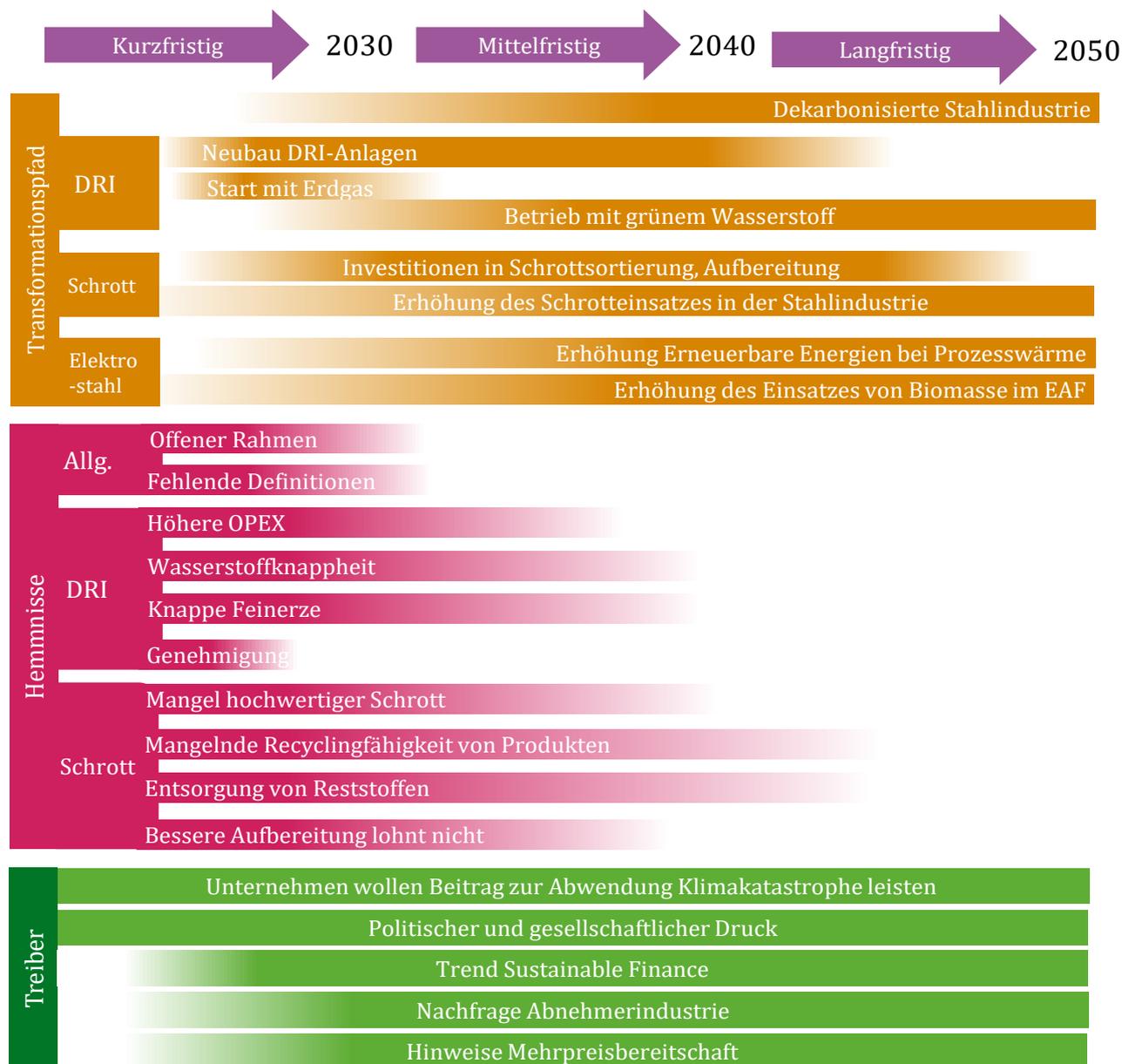
Die deutsche Stahlindustrie wird bis zum Jahr 2050 dekarbonisiert, bleibt dabei global wettbewerbsfähig und genießt ein hohes gesellschaftliches Ansehen.

Diese Vision bildete den ersten „Eckpunkt“; an ihr orientierte sich die anschließende Erarbeitung des Transformationspfades. Als zentrale Elemente des Transformationspfades wurden, wie in Abbildung 1 verdeutlicht, drei Aspekte herausgestellt:

1. die Umstellung der Eisenerzreduktion: weg vom Hochofen hin zur Direktreduktion mit grünem Wasserstoff;
2. die Erhöhung des Schrotteinsatzes in der Stahlproduktion;
3. die Dekarbonisierung der Elektrostahlproduktion.

Das nachfolgende Diagramm veranschaulicht die Ausgangssituation und den gewünschten Transformationspfad, einschließlich der Treiber und Hemmnisse. Zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie liegt das Hauptaugenmerk auf dem Bau neuer DRI-Anlagen. Langfristig sollen diese mit grünem Wasserstoff betrieben werden. Darüber hinaus wird die Verwendung von Schrott erhöht. Haupthindernisse für diesen Wandel sind derzeit der noch offene regulatorische Rahmen (z. B. die teilweise Unklarheit des „Fit für 55“-Pakets) und das Fehlen einer handelsüblichen Definition für „grünen“ Stahl. Darüber hinaus sind insbesondere für DRI-Anlagen höhere Betriebskosten sowie Ressourcenknappheit (Wasserstoff und Erze) wichtige Hemmnisse, die es zu überwinden gilt. Außerdem können Genehmigungsverfahren die Transformation verzögern. Im Hinblick auf die Verwendung von mehr Schrott ist der Mangel an hochwertigem Schrott das größte Hemmnis. Dies liegt vor allem an fehlenden Geschäftsmodellen für ein besseres Recycling und an der schlechten Recycelbarkeit von Endprodukten.

Abbildung 1: Transformationspfad, Hemmnisse und Treiber



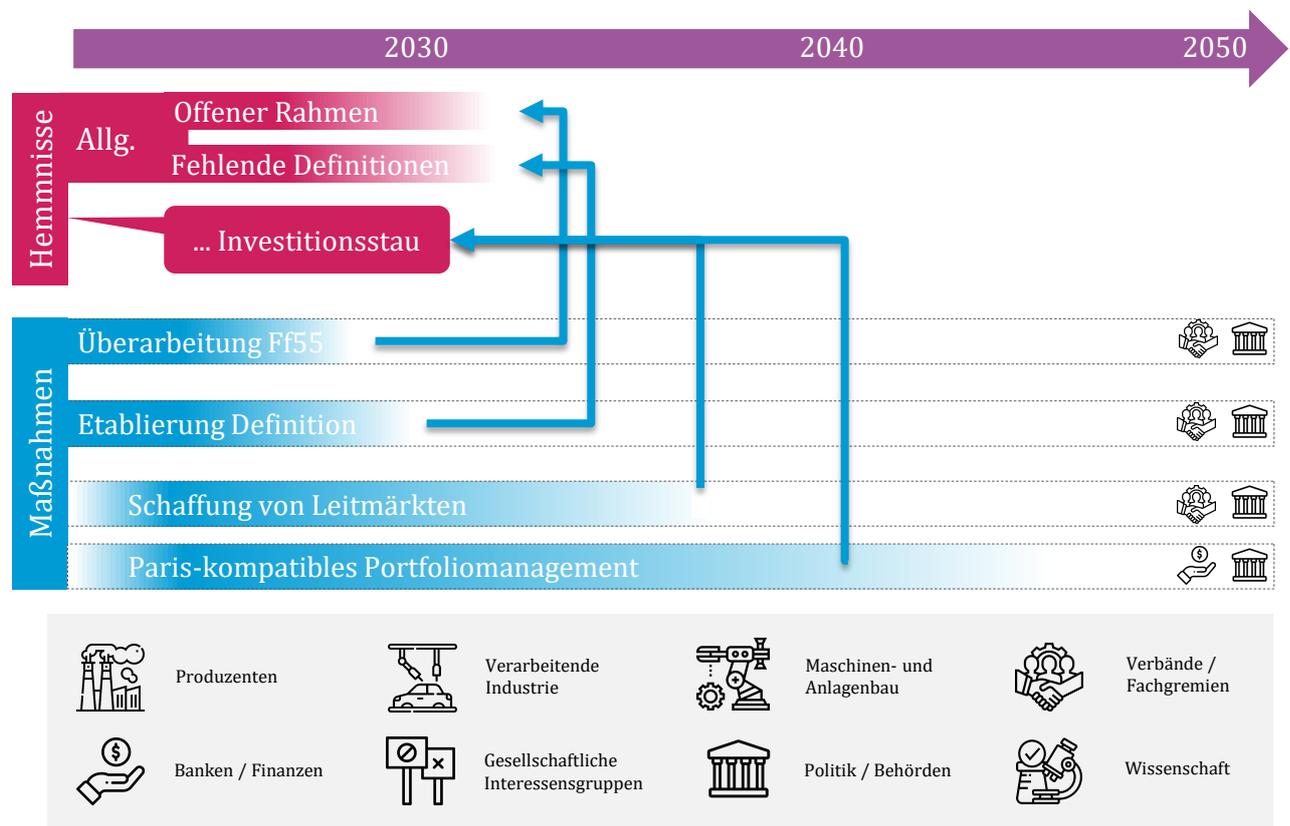
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI auf Basis von DekarbInd Stakeholderdiskussionen

Im Rahmen des DekarbInd Projektes wurden Maßnahmen erarbeitet, um die Hemmnisse zu überwinden und Treiber zu stärken. Zudem wurden Einschätzungen zur Wirksamkeit schon bestehender Maßnahmen diskutiert. Dabei wurde nicht immer Einigkeit erzielt und auch einige Spannungsfelder wurden aufgezeigt. Nachfolgende Maßnahmen konnten jedoch als zentrale Eckpunkte zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie festgehalten werden.

Eckpunkte für übergreifende Maßnahmen

- ▶ Eine **Überarbeitung oder Konkretisierung des „Fit für 55“-Pakets** ist dringend notwendig, da die aktuellen Vorschläge an zahlreichen Stellen ungeklärten Interpretationsspielraum zulassen.
- ▶ Für die rasche Markteinführung von kohlenstoffarmen Produktionsprozessen ist eine **Etablierung von Definitionen für grünen Stahl** hilfreich. Dabei geht es vor allem darum, einheitliche Standards für die Bilanzierung der CO₂-Intensität von Stahlprodukten zu schaffen, die vom Markt akzeptiert werden.
- ▶ Es sollte **Leitmärkte für grünen Stahl** geschaffen werden, um eine schnelle Diffusion in den Markt zu erreichen. Geeignete Wege dazu sind Quoten in Schwerpunktbranchen, Aufnahme in die Kriterien der öffentlichen Beschaffung sowie Förderung von Intermediären, die den Wandel beschleunigen und Akteure vernetzen.
- ▶ Banken können dazu beitragen, den Investitionsstau abzubauen, indem sie die Stahlindustrie bei der Finanzierung Paris-kompatibler Produktionsanlagen unterstützen.

Abbildung 2: Übergreifende Maßnahmen

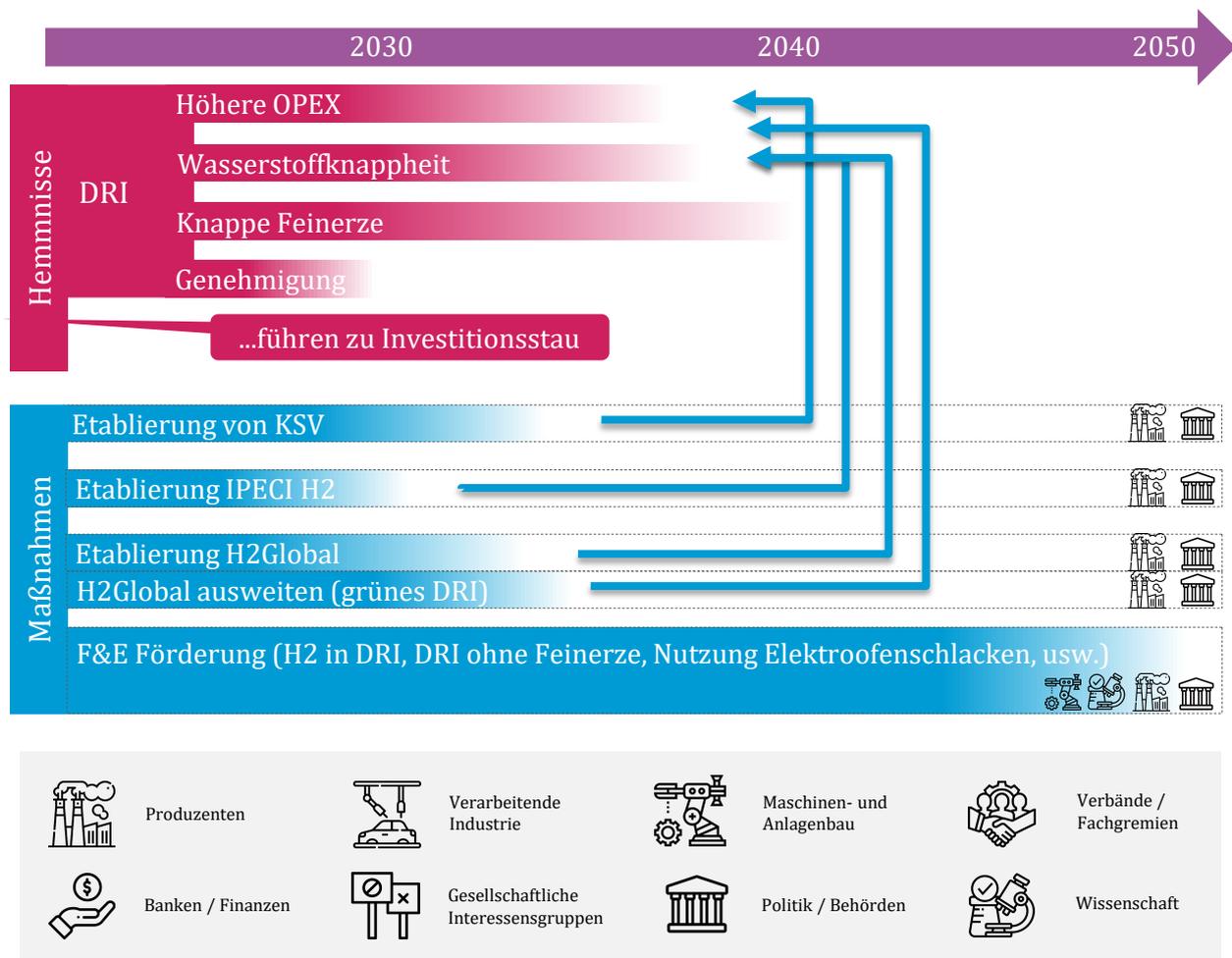


Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI auf Basis von DekarbInd Stakeholderdiskussionen

Eckpunkte für Maßnahmen für die DRI Route

- ▶ **Klimaschutzverträge** werden als wirksames Instrument gesehen, um in einer Übergangsphase dem Hemmnis höherer Betriebskosten (OPEX) zu begegnen.
- ▶ **IPCEI Hydrogen** wird als ein wichtiges Instrument angesehen, um den Hochlauf der Wasserstoffproduktion und -infrastruktur in Stahlwerken zu fördern.
- ▶ Eine zusätzliche **Versorgung mit grünem Wasserstoff** über internationale Märkte wird als notwendig erachtet. Die H2Global Initiative des BMWK ist hier ein Ansatzpunkt.
- ▶ Bei der Umstellung auf die DRI-Route besteht an zahlreichen Stellen **Forschungs- und Entwicklungsbedarf**. Während DRI-Prozesse mit Erdgas Stand der Technik sind, ist der reine Betrieb mit Wasserstoff Neuland. Außerdem ergeben sich zahlreiche weitere Fragestellungen, wie zum Beispiel der Betrieb von DRI-Anlagen mit weniger Feinerze oder die Erforschung der Verwendung von Elektroofenschlacke.

Abbildung 3: Maßnahmen für DRI Anlagen

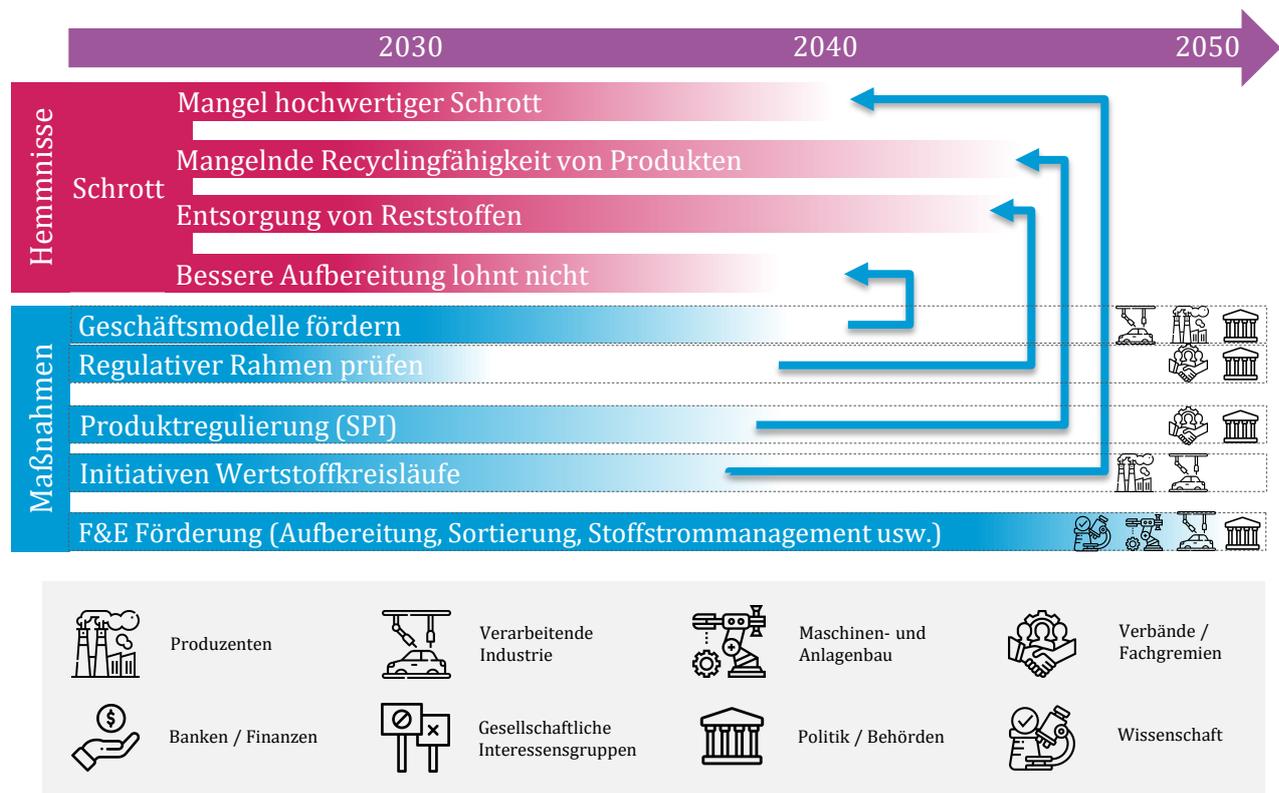


Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI auf Basis von Dekarblind Stakeholderdiskussionen

Eckpunkte für Maßnahmen für mehr Schrotteinsatz

- ▶ Die **Förderung von Geschäftsmodellen zur besseren Aufbereitung von Schrott** sollte **intensiviert** werden. Hierbei sollte geprüft werden, inwieweit es sinnvoll ist, die Förderung von Investitionen auszuweiten, ggf. auch höhere Betriebskosten zu fördern und ob eine Anpassung des regulatorischen Rahmens helfen kann.
- ▶ **Produktregulierung für bessere Recyclebarkeit** kann dem Mangel an hochwertigem Schrott entgegenwirken. Hier sollten die Interessen der Stahlindustrie und der Schrottwirtschaft bei der Sustainable Products Initiative (SPI) eingebracht werden.
- ▶ **F&E-Förderung** kann in zahlreichen Bereichen helfen, etwa bei der Erforschung von Aufbereitungs- und Sortiertechnologien oder einem intelligenten Stoffstrommanagement.

Abbildung 4: Maßnahmen zur Erhöhung des Schrotteinsatzes



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI auf Basis von Dekarblind Stakeholderdiskussionen

Summary

To achieve Paris climate goals, urgent action is needed to drastically reduce greenhouse gas emissions in the steel industry. Goal of the DekarbInd project was to develop key steps for a roadmap to decarbonise steel industry in Germany. For this, stakeholders were involved participatively.

For the roadmapping, initially a stakeholder group (the so-called core group) was formed. This group consisted of representatives from business, politics, society and science. Among the business representatives five steel producers and several plant manufacturers were involved. Together with this group, knowledge was gathered over a period of two years for the development of the key steps. Six workshops were carried out for this purpose, whose results were summarised and commented in thesis papers. In addition, certain topics were elaborated through interviews and in-depth workshops. The insights gained were finally used to develop a transformation pathway containing drivers, barriers and measures, which were reviewed for controversies and gaps in a final seventh workshop. On this basis, the key steps for the roadmap for decarbonisation of the steel industry were finally compiled. Starting point for the roadmapping was a jointly developed vision at the beginning:

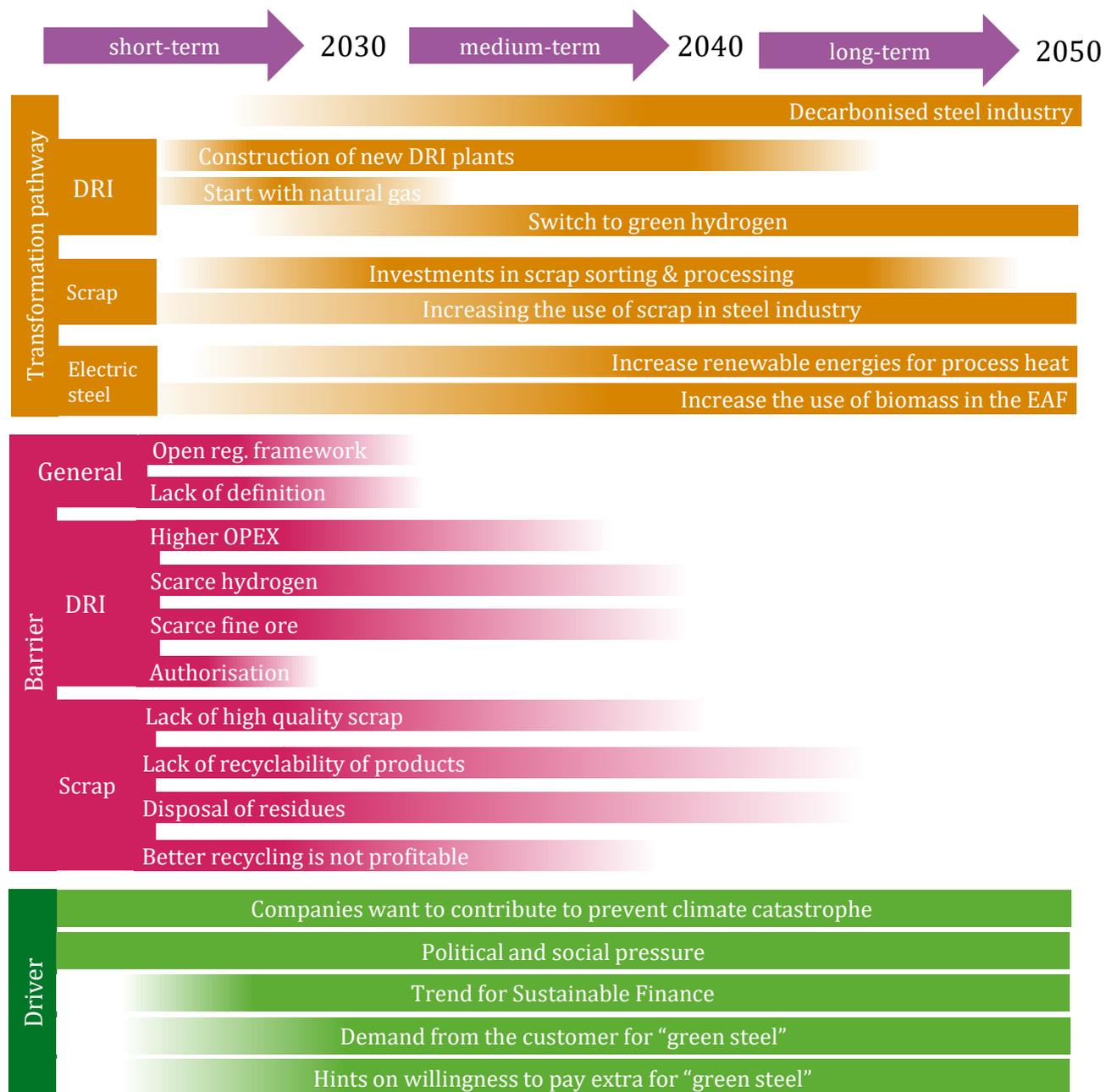
German steel industry will be decarbonised by 2050, while remaining globally competitive and enjoying society's reputation.

This vision formed the first "cornerstone" and was the basis for the subsequent development of the transformation Pathway. Three aspects were identified as central elements for the transformation Pathway, as illustrated in Figure 1:

1. the switch in iron ore reduction: moving away from the blast furnace towards direct reduction with green hydrogen;
2. increasing the use of scrap in steel production;
3. decarbonising electric steel production.

The following figure illustrates the initial situation and the desired transformation pathway, including drivers and barriers. To decarbonise the German steel industry, the main focus is on building new DRI plants. In the long term, these shall be fueled with green hydrogen. In addition, the use of scrap will be increased. Main obstacles to this change are currently the still open regulatory framework (e.g. the Fit for 55 package) and the lack of a commercially available definition for "green" steel. In addition, especially for DRI plants, higher operating costs and resource scarcity (hydrogen and ores) are important barriers that need to be overcome. Moreover, authorisation procedures can delay the change required. For using more scrap, the lack of high quality scrap is the main barrier. This is mainly due to the lack of business models for better recycling and the poor recyclability of end products.

Abbildung 5: Transformation Pathway, Barriers and Drivers



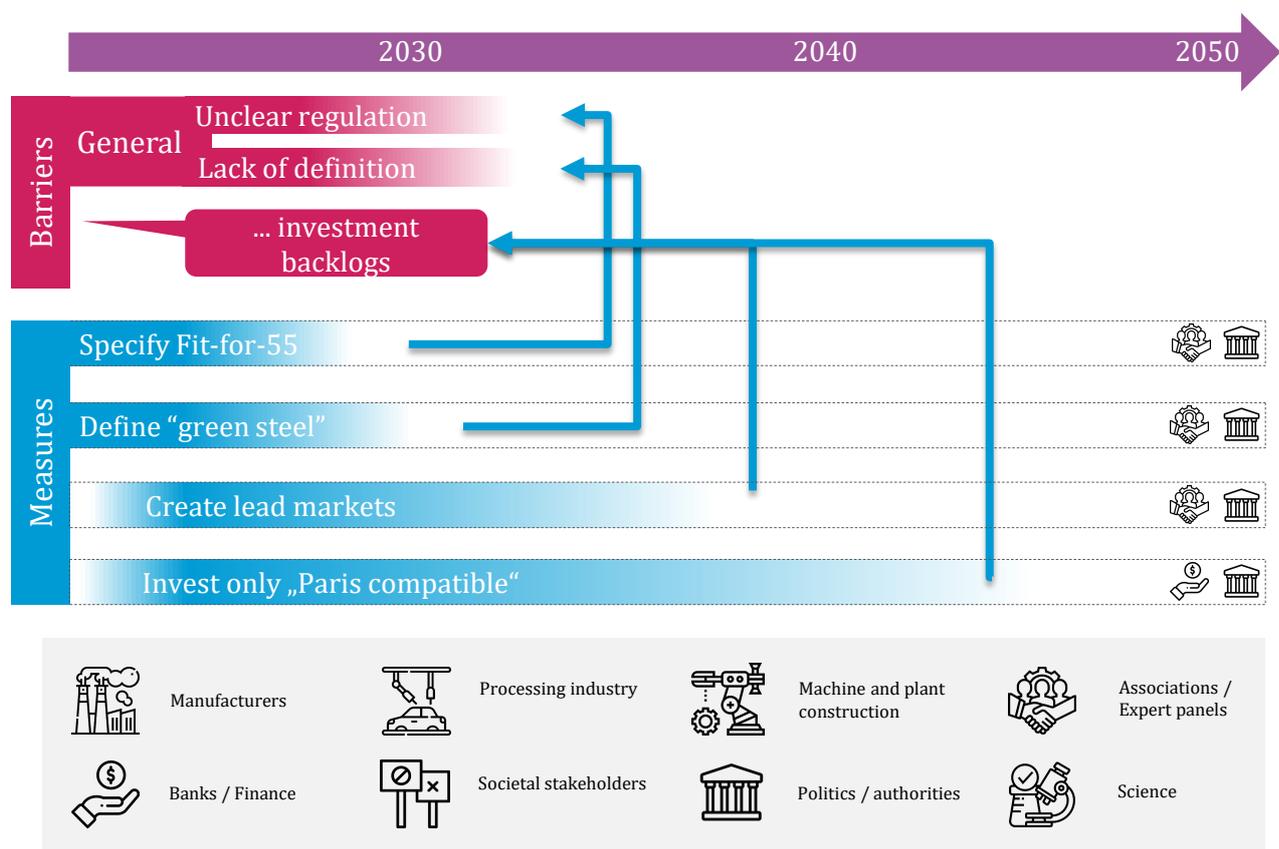
Source: own illustration, Fraunhofer ISI

Within the DekarbInd project, measures were developed to overcome barriers and to strengthen drivers. In addition, opinions on the effectiveness of existing measures were discussed. Here, consensus was not always found and some areas of tension were also identified. However, the following measures were identified as central key steps for the decarbonisation of the steel industry in Germany.

Key steps for general measures

- ▶ A **more detailed specification of the "Fit for 55"-package** is urgently needed, as the current proposals leave room for unclarified interpretation in numerous places.
- ▶ **Establishing definitions for green steel** is helpful for the rapid market introduction of low-carbon production processes. The main issue here is to create consistent standards for accounting the CO₂ intensity of steel products that are accepted by the market. A coordination process along the value chain would be a suitable approach to achieve this.
- ▶ **Lead markets for green steel** should be created in order to achieve rapid diffusion into the market. Appropriate ways to do this are quotas in key sectors, inclusion in public procurement criteria, and support of intermediaries that accelerate the change and link actors.
- ▶ Banks can contribute to reduce the investment backlog by supporting the steel industry in financing Paris-compatible production facilities

Abbildung 6: General measures

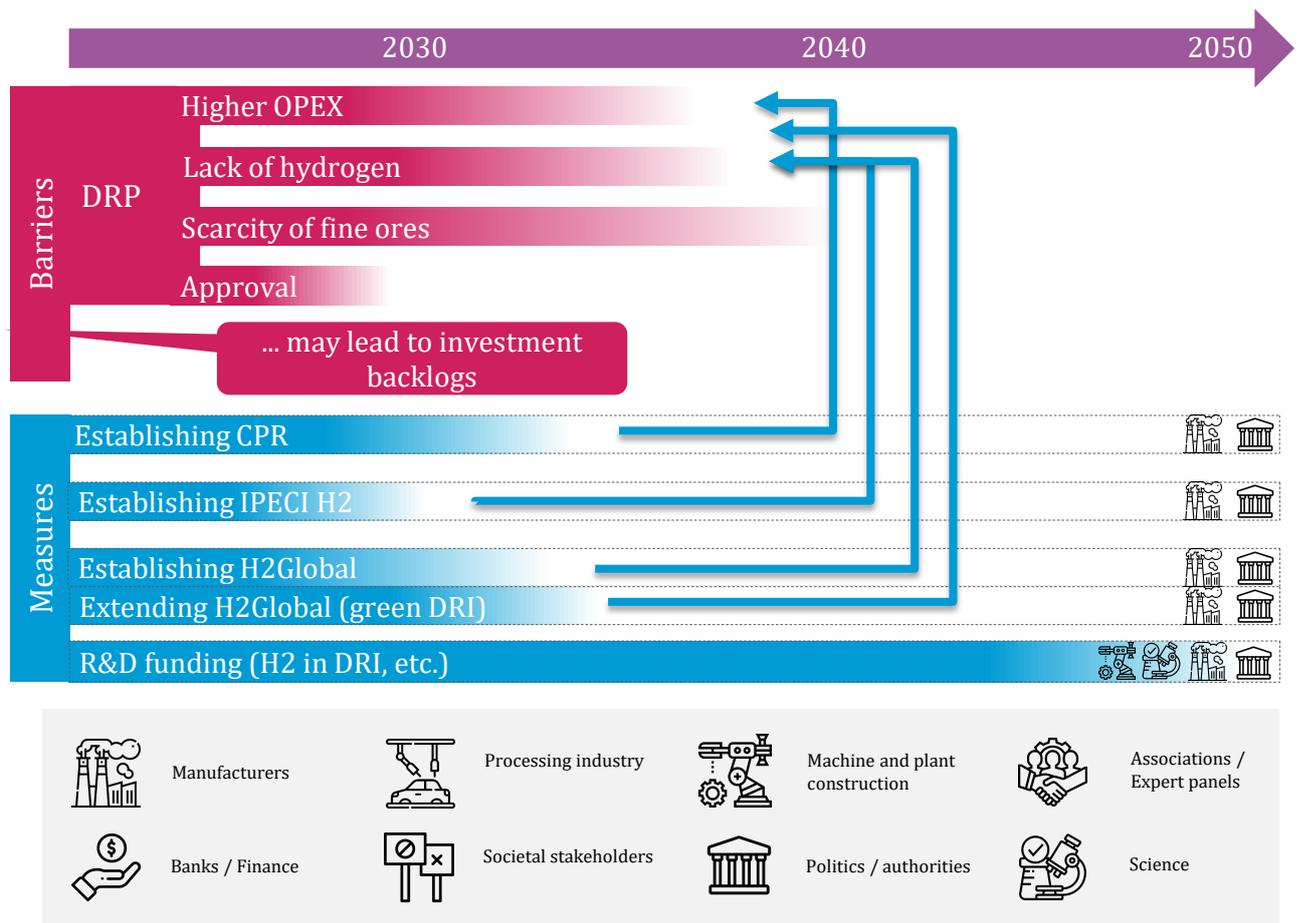


Source: own illustration, Fraunhofer ISI

Key steps for DRI measures

- ▶ **Carbon Contracts for Difference** are seen as an effective instrument to overcome the barrier of higher operating costs (OPEX) during a transitional period.
- ▶ **IPCEI Hydrogen** is seen as an **important** instrument to promote the ramp-up of hydrogen production and infrastructure in steel plants.
- ▶ Additional supply of **green hydrogen via international markets** is seen as necessary. The H2Global funding project initiated by the BMWK is a starting point here.
- ▶ There is a **need for research and development** when switching to the DRI route. While DRI processes with natural gas are state of the art, pure operation with hydrogen is new territory. In addition, numerous other questions arise, such as the operation of DRI plants with less fine ore or exploring the use of electric furnace slag.

Abbildung 7: Measures for DRI plants

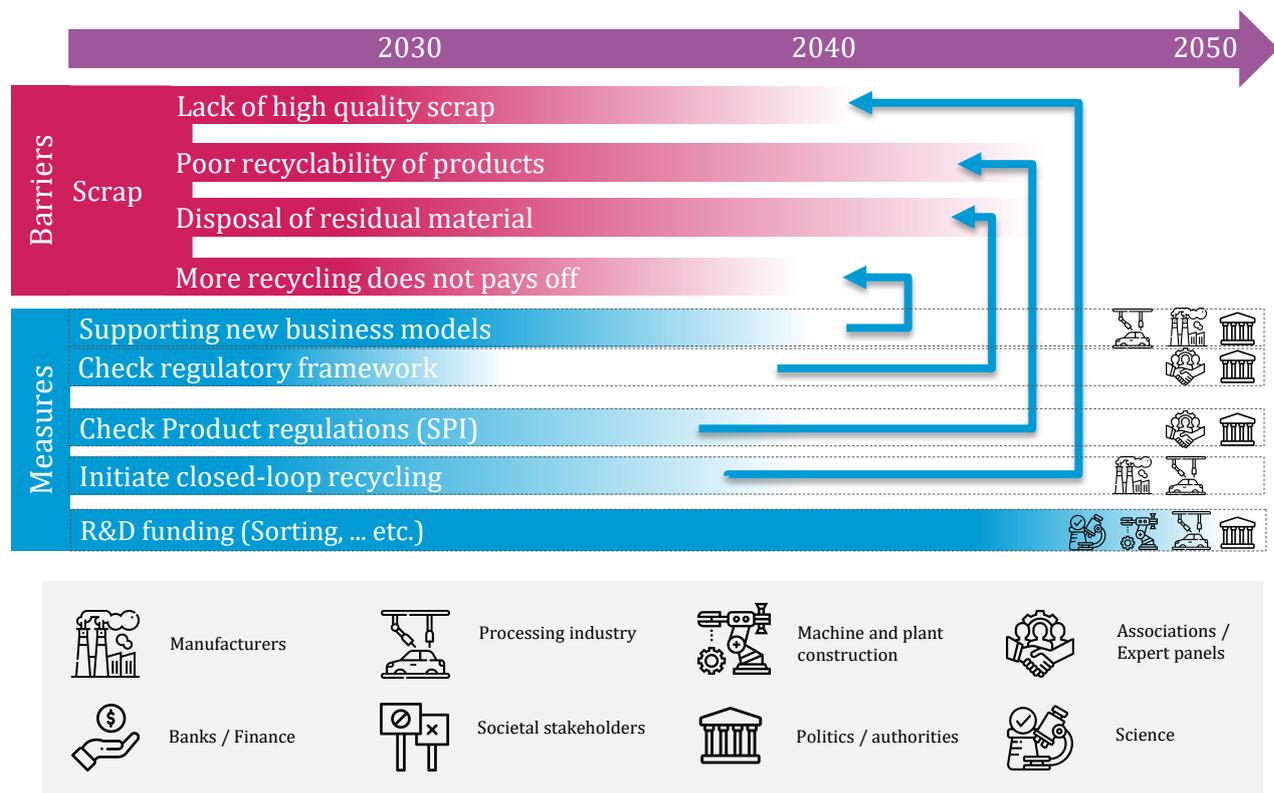


Source: own illustration, Fraunhofer ISI

Key steps for measures for more scrap use

- ▶ **Support of business models for better processing of scrap** should be intensified. Here it should be evaluated to what extent it makes sense to expand funding for investments, perhaps also to fund higher operating costs, and whether an adjustment of the regulatory framework might help.
- ▶ **Product regulation for better recycling** can address shortages of high quality scrap. Here, interests of the steel and scrap industries should be incorporated into the Sustainable Products Initiative (SPI).
- ▶ Steel producers can join forces with steel processors (e.g. car manufacturers) and try to tap recycling potentials through **closed-loop material cycles**.
- ▶ **R&D funding** can help in many areas, for example research on processing and sorting technologies or intelligent material flow management.

Abbildung 8: Measures for the use of scrap



Source: own illustration, Fraunhofer ISI

1 Einleitung

Das Pariser Klimaabkommen zielt darauf ab, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu begrenzen. Die Europäische Union hat sich daher zum Ziel gesetzt, ihre Treibhausgasemissionen bis 2050 auf netto null zu reduzieren. Um dieses Ziel zu erreichen, hat sie den EU Green Deal verabschiedet, der einen Aktionsplan und einen Vorschlag für ein europäisches Klimaschutzgesetz umfasst. Auf nationaler Ebene ist im Klimaschutzgesetz¹ der Bundesregierung das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 mit einem Zwischenziel von 65 % Reduktion bis 2030 im Vergleich zu 1990 verankert.

Die deutsche Stahlindustrie ist für etwa 5 % der nationalen Treibhausgasemissionen verantwortlich (eigene Berechnung auf Basis Destatis (2021)). Zur Erreichung der Klimaziele ist es daher notwendig, diese Emissionen drastisch zu reduzieren. Hierfür gilt es, die bestehende treibhausgasintensive Produktionsroute durch CO₂-arme Alternativen zu ersetzen.

Hintergrund: Die deutsche Stahlindustrie

Die deutsche Stahlindustrie produzierte 2019 rund 40 Millionen Tonnen Rohstahl und liegt damit im weltweiten Vergleich an siebter Stelle (vgl. WV Stahl 2020). Wichtige Abnehmerbranchen sind die Bau- und Automobilindustrie sowie der Maschinenbau.

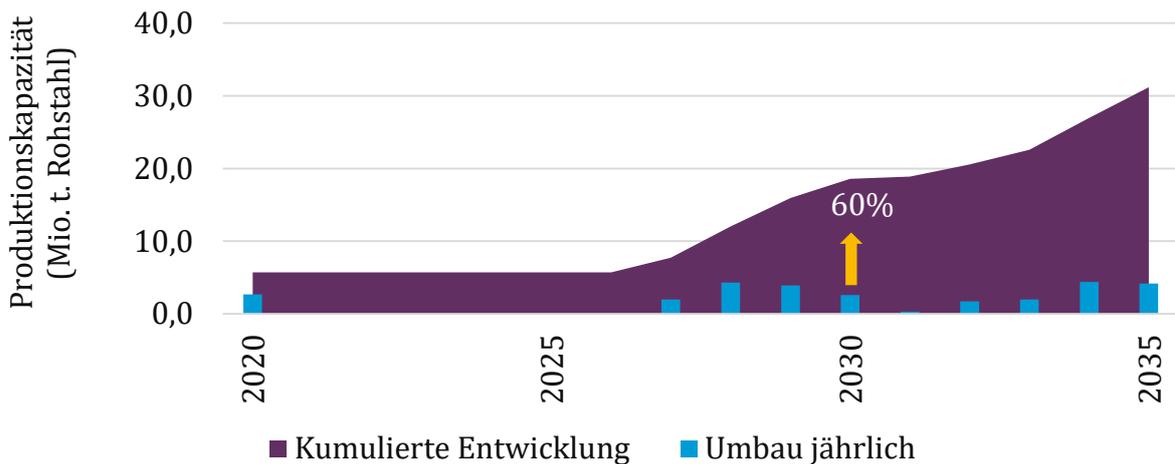
Etwa zwei Drittel der Produktion entfallen auf die Hochofenroute (gelegentlich auch Primärroute genannt), etwa ein Drittel des Stahls wird durch den Einsatz von Schrott in Elektrolichtbogenöfen erzeugt (u. a. auch Sekundärroute genannt). Rohstahlerzeugnisse werden in die Gruppen Langstahl und Flachstahl unterteilt. Flachstahlerzeugnisse sind z. B. Weißblech, das für Verpackungen verwendet wird, oder warmgewalzte Coils, die in der Automobilindustrie eingesetzt werden. Langstahlerzeugnisse sind z. B. Bewehrungsstähle, die im Bausektor verwendet werden. Rohstahl für Flachstahlerzeugnisse wird hauptsächlich in der Primärroute hergestellt, Stahl für Langstahlerzeugnisse hauptsächlich in der Sekundärroute.

Die Stahlindustrie ist für etwa 5 % der gesamten und über 20 % der industriellen Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich. Dies ist vor allem auf die treibhausgasintensive Hochofenroute zurückzuführen.

Hoher Reinvestitionsbedarf erfordert schnelles Handeln.

Fraunhofer CINES (2021) schätzt, dass etwa 60 % der Hochöfen bis 2030 neu zugestellt werden müssen, was wiederum erhebliche Reinvestitionen erfordert. Aus Klimaperspektive ist es nicht wünschenswert, diese kohlebasierten Hochöfen neu zuzustellen, sondern stattdessen in alternative CO₂-arme Produktionswege zu investieren. Deshalb ist schnelles Handeln von Politik und Industrie gefragt, um Fehlinvestitionen und Lock-in-Effekte zu vermeiden.

¹ Gesetzesnovelle vom 31.8.2021

Abbildung 9: Theoretischer Reinvestitionsbedarf für Hochöfen bis 2030

Bei Annahme eines Modernisierungszeitraumes von 20 Jahren.

Quelle: eigene Darstellung angelehnt an CINES (2021), Fraunhofer ISI.

Technisch ist die Transformation machbar.

Technisch ist die Transformation zu einer treibhausgasneutralen Stahlindustrie machbar. Zum Beispiel mit Wasserstoff in sogenannten Direktreduktionsanlagen, die Treibhausgas-einsparungen von über 95 % ermöglichen. Übergangsweise können diese Anlagen auch mit Erdgas betrieben werden. Zentrale Hindernisse für diesen Weg sind die derzeit noch höheren Betriebskosten im Vergleich zur bisherigen Hochofenroute und die fehlende Wasserstoffverfügbarkeit.

Zudem gibt es noch ungenutztes Potenzial bei der Steigerung des Schrotteinsatzes in der Stahlproduktion. Zwar standen in der Vergangenheit immer wieder qualitäts- und anlagenbedingte Limitierungen einem höheren Schrotteinsatz im Weg, doch der technologische Fortschritt eröffnet hier neue Möglichkeiten. In Minimills werden mit Elektroöfen (EAF) bereits jetzt hochwertige Bleche und Bänder aus Schrott und Eisenschwamm hergestellt. So erwartet McKinsey (2019), dass die EAF-basierte Stahlproduktion nicht nur bei Langprodukten und Spezialstahl, sondern auch bei hochwertigen Blechen und Bändern zunehmend wettbewerbsfähig wird.

Die Stahlhersteller machen sich auf dem Weg.

Während Investoren seit Jahren nach attraktiven Investitionsmöglichkeiten suchen, kam der Umbau der Stahlindustrie in Richtung Treibhausgasneutralität in den letzten Dekaden nur schleppend voran. Das schwierige Marktumfeld, aber auch das Fehlen regulatorischer Anreize waren hier Hindernisse. In den letzten Jahren hat sich die Stahlindustrie jedoch auf den Weg zur Treibhausgasneutralität gemacht. So haben alle vier großen Hochofenbetreiber in Deutschland Transformationspläne aufgestellt und erste Versuche auf dem Weg dorthin durchgeführt (Hartbrich 2022). Eine erste Pilotanlage für die wasserstoffbasierte Stahlproduktion wird derzeit in Salzgitter gebaut. Außerdem hat die Salzgitter AG erst kürzlich erhebliche Eigenmittel (723 Millionen Euro) für die Umsetzung ihres Transformationsplans freigegeben (Salzgitter AG 2022). Auch in anderen europäischen Ländern sind Projektkonsortien im Gange. In Schweden gibt es bereits zwei Projekte, die ab 2025 die ersten mit Wasserstoff hergestellten Stahlmengen

liefern wollen². Außerdem hat ein Zusammenschluss erst kürzlich Pläne für den Bau einer wasserstoffbasierten DRI-Anlage in Südfrankreich bekannt gegeben.³

Die Politik versucht zu helfen.

Die Politik ist bemüht, die Stahlindustrie auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität zu unterstützen. Auf europäischer Ebene geben die „Fit for 55“-Vorschläge den Rahmen vor. Insbesondere die geplante Überarbeitung des europäischen Emissionshandelssystems (EU-ETS) und die geplante Einrichtung eines europäischen CO₂-Grenzausgleichsmechanismus (CBAM) sind Instrumente, die den Wandel hin zu einer treibhausgasneutralen Wirtschaft vorantreiben sollen. Die Bundesregierung setzt auf Unterstützung. Beginnend mit dem Handlungskonzept Stahl wurden Prozesse eingeleitet, um die Stahlindustrie auf ihrem Weg zur Treibhausgasneutralität zu unterstützen. Erstens entwickelt die Bundesregierung unter Federführung des BMWK ein Pilotprogramm für Klimaschutzverträge. Dies soll dazu beitragen, die Hürde der höheren Produktionskosten zu beseitigen. Zweitens sieht das „Klimaschutz-Sofortprogramm 2022“ der Bundesregierung vor, einen Leitmarkt für grünen Stahl zu schaffen, z. B. in der Automobilindustrie. Das soll den Markt ankurbeln. Drittens wurden im Rahmen des IPCEI Hydrogen zahlreiche Projekte zur Förderung ausgewählt, an denen die Stahlindustrie beteiligt ist. Dies soll dazu beitragen, die notwendige Wasserstoffproduktion und -infrastruktur aufzubauen.

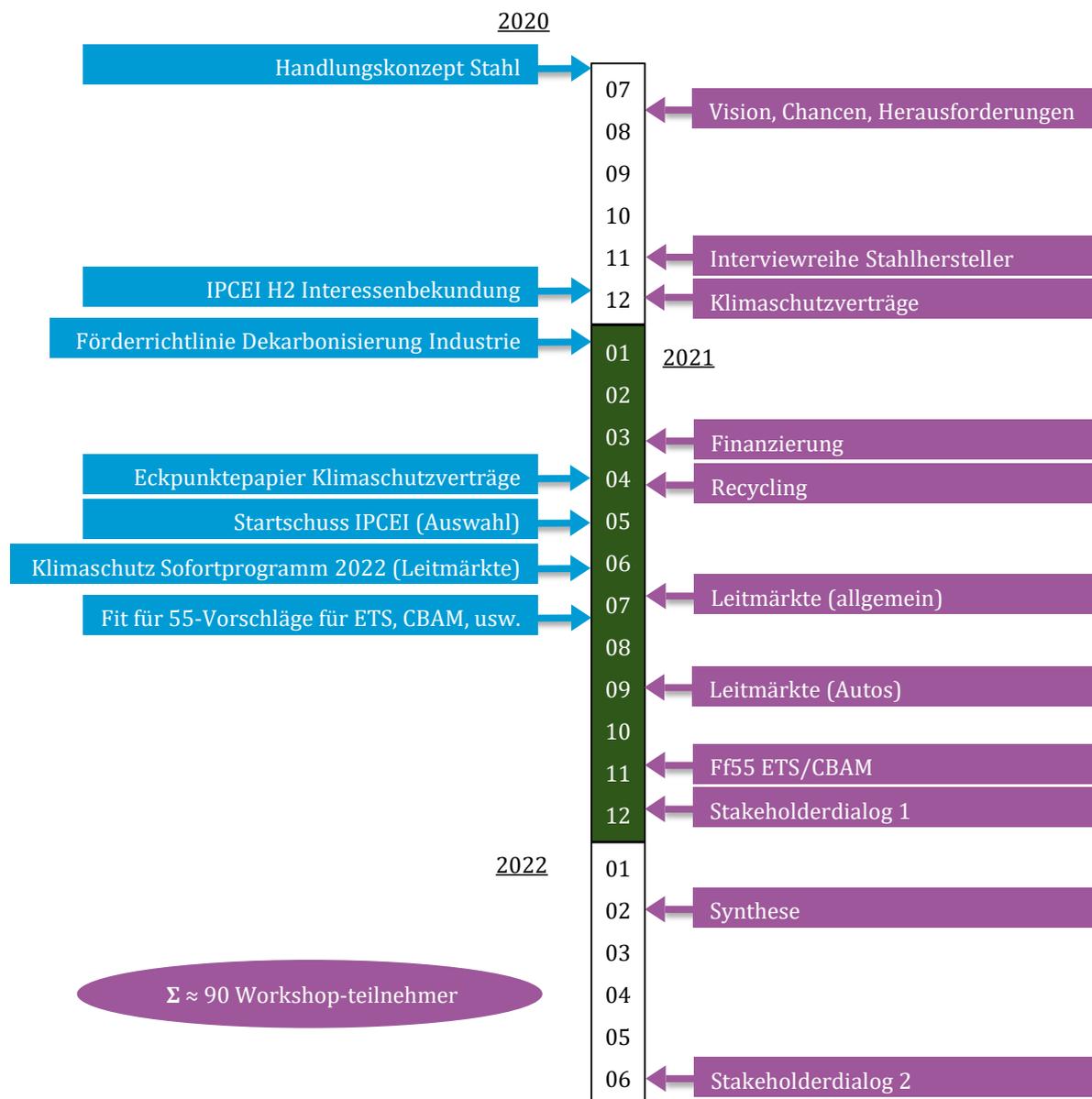
DekarbInd: Roadmapping und Netzwerken für die Dekarbonisierung.

DekarbInd setzte an den vorangegangenen Themen an. In den letzten zwei Jahren wurden in einem partizipativen Prozess Eckpunkte für eine Roadmap zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie erarbeitet. Dies soll Stakeholdern helfen zu erkennen, woran sie arbeiten können und müssen, um den Wandel hin zu einer treibhausgasneutralen Stahlindustrie zu unterstützen. Abschließend kann die Zusammenstellung nicht sein. Schließlich haben sich in den letzten Jahren viele Meilensteine ereignet, die das Thema, aber auch die Randbedingungen ständig verändert haben, und das wird wohl auch so bleiben. Das Motto des Roadmappings war daher stets: Der Weg ist das Ziel. Hierbei wurden die Stakeholder vernetzt und bekamen die Möglichkeit, ihre Ansichten auszutauschen, damit sie auch in Zukunft konstruktiv an dem Thema arbeiten können. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über durchgeführte Veranstaltungen im Kontext politischer Meilensteine.

² H2Green Steel <https://www.h2greensteel.com/about-us>. HYBRIT <https://www.ssab.com/de-de/fossil-free-steel>

³ GRAVITYH2: <https://gravithy.eu/wp-content/uploads/2022/06/220630-Gravithy-PR-vFINAL-launch-day-updated-Pan-EU.pdf>

Abbildung 10: Dekarblnd-Veranstaltungen



In der Mitte befindet sich die Zeitachse in Monaten. Meilensteine und Veranstaltungen sind entlang der Zeitachse aufgereiht.

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI.

2 Grundlagen, Ziele und Vorgehen

2.1 Grundlagen zu Roadmaps

Roadmaps liefern Entscheiderinnen und Entscheidern aus Wirtschaft und Politik eine Übersicht über Zusammenhänge, Bedingungen und Möglichkeiten eines Veränderungsprozesses im Zeitverlauf. Durch eine intensive Auseinandersetzung mit zukünftigen Chancen und Risiken können die Akteure in Politik und Wirtschaft kommende Entwicklungsschritte und Verantwortlichkeiten spezifizieren. Somit dient der Roadmap-Prozess nicht nur der Strukturierung und Strategiefindung, sondern auch der Kommunikation über Entwicklungsziele und deren Rahmenbedingungen.

Roadmap: Darstellung einer vielschichtigen Veränderung im Zeitverlauf

Für eine Roadmap existieren verschiedene Definitionen. Grundsätzlich bildet eine Roadmap eine grafische Repräsentation von Veränderungsprozessen über die Zeit. Gemeinsam ist ihnen (i) ein Zukunftsbezug (aber keine Vorhersage), (ii) die zeitliche Verknüpfung der dargestellten Aspekte und (iii) die Arbeit in Richtung auf eine Vision oder ein Ziel hin. Zudem haben Roadmaps in der Regel mehrere Ebenen (auch „Layer“ genannt). Im Unternehmenskontext sind dies häufig Technologie, Markt und Produkte, politisch-strategische Roadmaps bilden dagegen oft Treiber und Hindernisse für die Veränderung sowie Maßnahmen zur Steuerung der Veränderung auf das Ziel hin ab. Je nach Ausrichtung werden die Veränderungsdimensionen noch feiner unterteilt (z. B. Treiber Gesellschaft, Treiber Wirtschaft, Treiber Technologie etc.).

Roadmapping: Interaktiver Stakeholder Prozess

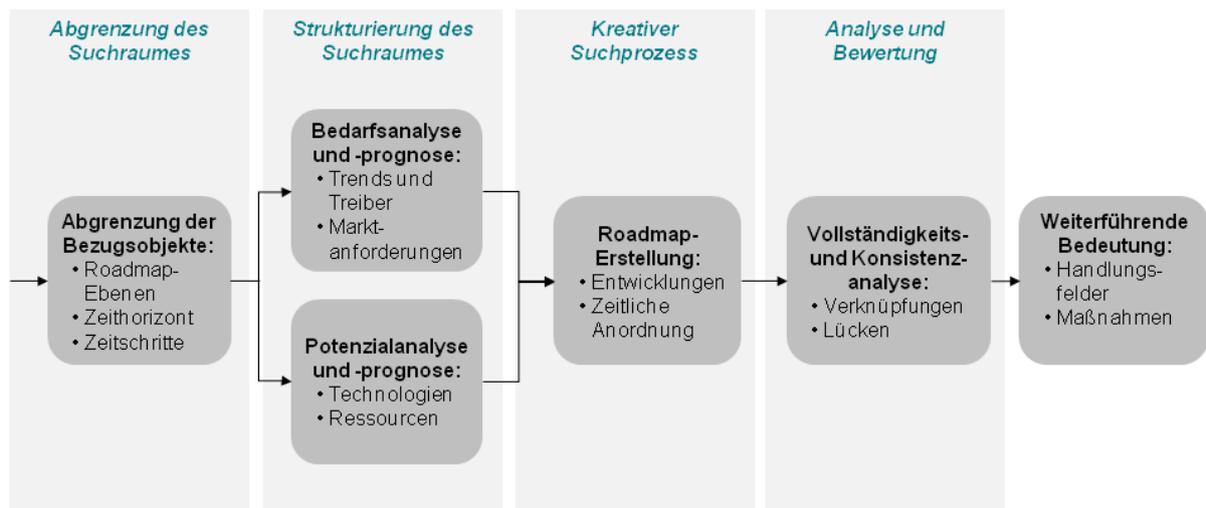
Die Tätigkeiten, die zum Erstellen und Aktualisieren einer solchen Roadmap anfallen, werden als Roadmapping bezeichnet (Möhrle, Isenmann 2008). In der Regel ist der Kern des Roadmappings ein interaktiver Prozess mit Akteuren der betroffenen Bereiche. Ein entscheidender Mehrwert des Roadmappings – im Vergleich zur reinen Planerstellung – ist die Verknüpfung verschiedener Aspekte, die sonst im Zeitverlauf oft nicht zusammen betrachtet werden. Auf diese Weise können Widersprüche, Konflikte und Leerstellen identifiziert werden. Zudem werden die Akteure der verschiedenen Bereiche für diese Spannungen sensibilisiert und können ihre Strategien entsprechend anpassen.

In einem Roadmapping-Prozess werden die Umfeld- und die Innenperspektive verknüpft. Dazu werden typischerweise folgende **Leitfragen** diskutiert:

- ▶ Warum müssen wir handeln? Interne und externe Treiber (z. B. Klimaschutzziele)
- ▶ Welche Rahmenbedingungen sind zu erwarten? (z. B. gesellschaftliche Bedarfe)
- ▶ Wo stehen wir jetzt? – gegenwärtige Situation
- ▶ Wohin wollen wir? – Vision/Alternative Szenarien/Strategische Ziele
- ▶ Wie kommen wir dahin? – Handlungsfelder – Regulierung, Investition, Kommunikation
- ▶ Wie sollten wir es angehen? – Ressourcen, Technologien, Akteure
- ▶ Wann soll was getan werden? – Zeitfenster und Abhängigkeiten

Die Antworten auf diese Fragen werden in einer Roadmap in einem interaktiven Prozess gemeinsam mit den Akteuren der verschiedenen Bereiche zusammengestellt und verortet.

Die nachfolgende Abbildung stellt einen typischen Roadmapping-Prozess in fünf Stufen dar. In der Regel ist der Prozess genauso wichtig wie die visuelle Darstellung als Ergebnis.

Abbildung 11: Schritte beim Roadmapping

Quelle: eigene Darstellung angelehnt an Specht/Behrens 2008, Fraunhofer ISI.

2.2 Vorgehen und Ziele

Das Ziel von Dekarblnd war es, Eckpunkte für eine Roadmap zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie herauszuarbeiten. Als Methode hierfür wurde Roadmapping verwendet, bei dem die Stakeholder partizipativ einbezogen wurden. Dabei wurde nicht angestrebt, eine vollständige Einigung auf eine gemeinsame Roadmap zu erzielen, sondern vielmehr alle wesentlichen Aspekte zusammenzutragen und die zentralen Spannungsfelder und Handlungsbedarfe zu identifizieren.

Für das Roadmapping wurde zunächst eine zentrale Stakeholder-Gruppe (die sogenannte Kerngruppe) gebildet. In insgesamt sechs Workshops wurde mit dieser Gruppe Wissen für die Ausarbeitung wesentlicher Themen entlang der oben dargestellten Schritte und Leitfragen des Roadmappings erarbeitet. Für einige Themen wurde dieses Wissen durch Interviews und vertiefende Workshops angereichert. Schließlich wurde das Wissen genutzt, um eine chronologische Darstellung eines möglichen Transformationspfads mit Treibern, Hemmnissen und Maßnahmen zu erstellen. Diese Darstellung wurde in einem abschließenden siebten Workshop auf Kontroversen und Lücken untersucht.

2.2.1 Stakeholder

Kerngruppe

Für die Einbeziehung von Interessengruppen wurde eine sogenannte Kerngruppe gebildet. Die Mitglieder der Kerngruppe (je nach Thema 10 bis 15 Personen) setzten sich aus Vertretern und Vertreterinnen aus Wirtschaft, Politik, gesellschaftlichen Interessengruppen und Wissenschaft zusammen.

Die primäre Aufgabe der Kerngruppen war es, Maßnahmen und Handlungsempfehlungen zu entwickeln sowie die Ergebnisse der Arbeitsschritte zu reflektieren, zu diskutieren und mit eigenem Wissen zu ergänzen. Um die Kerngruppen zusammenzustellen, wurden zunächst Stakeholder-Gruppen definiert. Für jede dieser Gruppen wurden Institutionen angefragt. Die Zusammensetzung der Kerngruppe für die Stahlindustrie differenziert nach Gruppe und Institution zeigt nachfolgende Tabelle.

Tabelle 1: Zusammensetzung der Kerngruppe

Stakeholdergruppe	Institution
Produzenten	ArcelorMittal, Dillinger Hütte Saarstahl, Hüttenwerke Krupp Mannesmann, Thyssenkrupp Steel, Salzgitter AG
Maschinen- und Anlagenbau	Tenova LOI, Primetals Technologies, SMS Siemag
Verbände	Wirtschaftsvereinigung Stahl (WV Stahl)
Gesellschaftliche Interessengruppen	World Wide Fund For Nature (WWF)
Politik	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit (BMU), Umweltbundesamt (UBA)
Wissenschaft	Universität Duisburg-Essen (Lehrstuhl Metallurgie der Eisen- und Stahlerzeugung)

Weitere Stakeholder

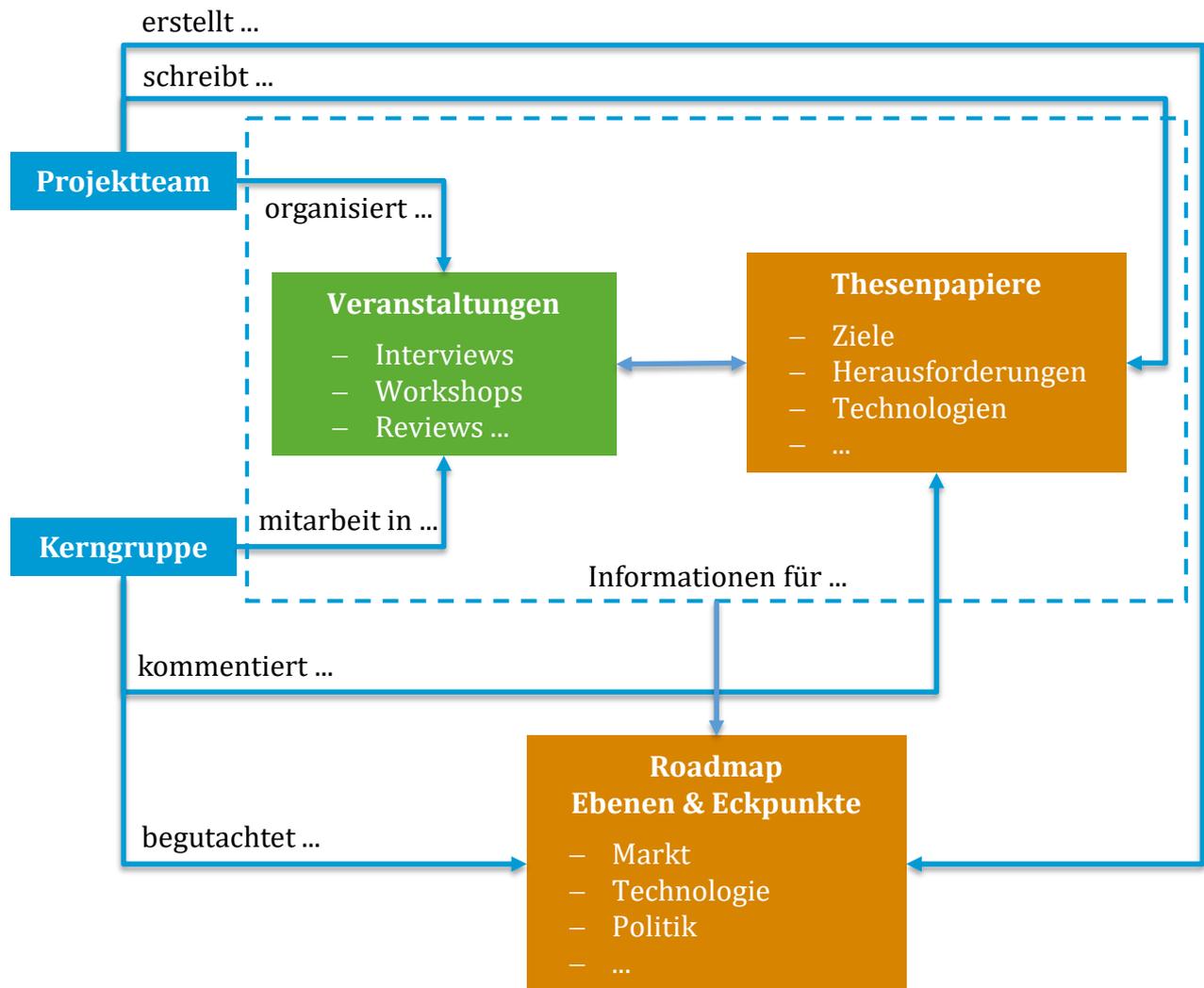
Die Kerngruppe wurde flankiert von zusätzlichen themenspezifischen Expertinnen-/Expertenrunden, in denen branchenspezifische Themen vertieft wurden. Dabei handelte es sich nicht unbedingt um feste Gruppen, die sich regelmäßig treffen, sondern vielmehr um Stakeholder, die aufgrund einer bestimmten Expertise zeitweise mit der Kerngruppe, dem Projektteam oder anderweitig im Rahmen des Projekts mitarbeiteten. Dies sind z. B. Personen aus dem Finanzbereich, die in Workshops mit der Kerngruppe ihre Sicht auf das Thema diskutieren.

2.2.2 Roadmapping

Zur Umsetzung des Roadmappings wurden hauptsächlich zwei Elemente verwendet. Zunächst wurden halb- bis ganztägige Workshops mit der Kerngruppe durchgeführt. Diese führten zu Thesenpapieren, die wiederum kommentiert werden konnten. Zweitens wurden zwei- bis vierstündige Interviews und vertiefende Workshops durchgeführt. Das diesbezügliche Zusammenspiel zwischen Kerngruppe und Projektteam stellt Abbildung 12 dar.

Darüber hinaus wurden zwei Stakeholderdialoge durchgeführt. Diese dienten erstens dazu, die Zwischenergebnisse einem größeren Teilnehmerkreis vorzustellen und sie dadurch zu verbreitern. Zweitens, um zusätzliche Perspektiven auf die Ergebnisse zu erhalten und drittens, um den Interessenvertretern die Möglichkeit zu geben, sich zu vernetzen. Tabelle 2 stellt die genutzten Elemente im Kontext der fünf Schritte des Roadmappings dar.

Abbildung 12: Zusammenspiel Kerngruppe und Projektteam



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

Tabelle 2: Veranstaltungen im Roadmappingkontext

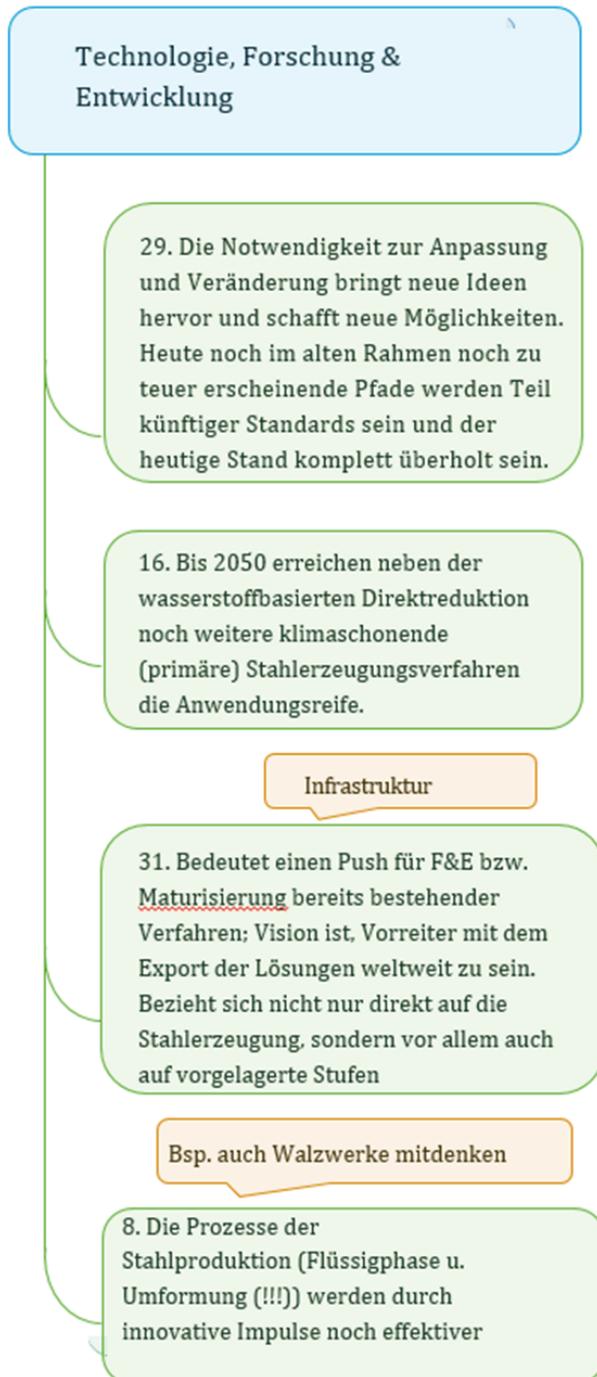
	Datum	Thema	
<i>Abgrenzung des Suchraumes</i>			
KGT 1	16.07.2020	Vision, Chancen, Herausforderungen	(1) Abgrenzung der Bezugsobjekte: Roadmap-Ebenen, Zeithorizont, Ziele
<i>Strukturierung des Suchraumes</i>			
Interview 1	18.11.2020	Interview mit Stahlhersteller	(2) Bedarfsanalyse und -prognose • Trends und Treiber • Barrieren (3) Potenzialanalyse und -prognose • Technologien • Ressourcen
Interview 2	25.11.2020		
Interview 3	02.12.2020		
Interview 4	09.12.2020		
KGT 2	08.12.2020	Klimaschutzverträge	(4) Erstellung der „Eckpunkte“ für Roadmap • Zeitliche Anordnungen • Hemmnisse, Treiber, Maßnahmen
SD 1	16.12.2021	Stakeholderdialog 1	
KGT 3	24.03.2021	Finanzierung	
WS 1	09.04.2020	Recycling	
KGT 4	01.07.2021	Leitmärkte allgemein	
KGT 5	16.09.2021	Leitmärkte Autos	
KGT 6	16.11.2021	ETS/Fit for 55	
<i>Kreativer Suchprozess</i>			
Synthese durch Projektteam			
<i>Analyse und Bewertung</i>			
KGT 7	24.02.2022	Synthese	(5) Vollständigkeits- und Konsistenzanalyse • Verknüpfungen • Lücken • Stakeholder-Einschätzungen
SD 2	14.06.2022	Stakeholderdialog 2	
<i>Sonstige Verbreiterung der Ergebnisse/Vorträge</i>			
Vortrag	05.04.2022	Vortrag auf dem Forum Immissionsschutzrecht	

Zentrale Erkenntnisse des Roadmappings werden in Kapitel 3 für fünf verschiedene Themen erläutert. Nachfolgende Abschnitte zeigen, wie diese Erkenntnisse entstanden sind und wie sie zusammengeführt wurden.

2.2.2.1 Vision

Die Vision für das Roadmapping wurde während des ersten Kerngruppentreffens (KGT 1, Vision, Chancen, Herausforderungen, Juli 2020) im Workshop-Format entwickelt. Hierfür wurden Live-Umfragen, Gruppenarbeit und moderierte Diskussionen genutzt. Ein Auszug aus der Gruppenarbeit ist unten zu sehen.

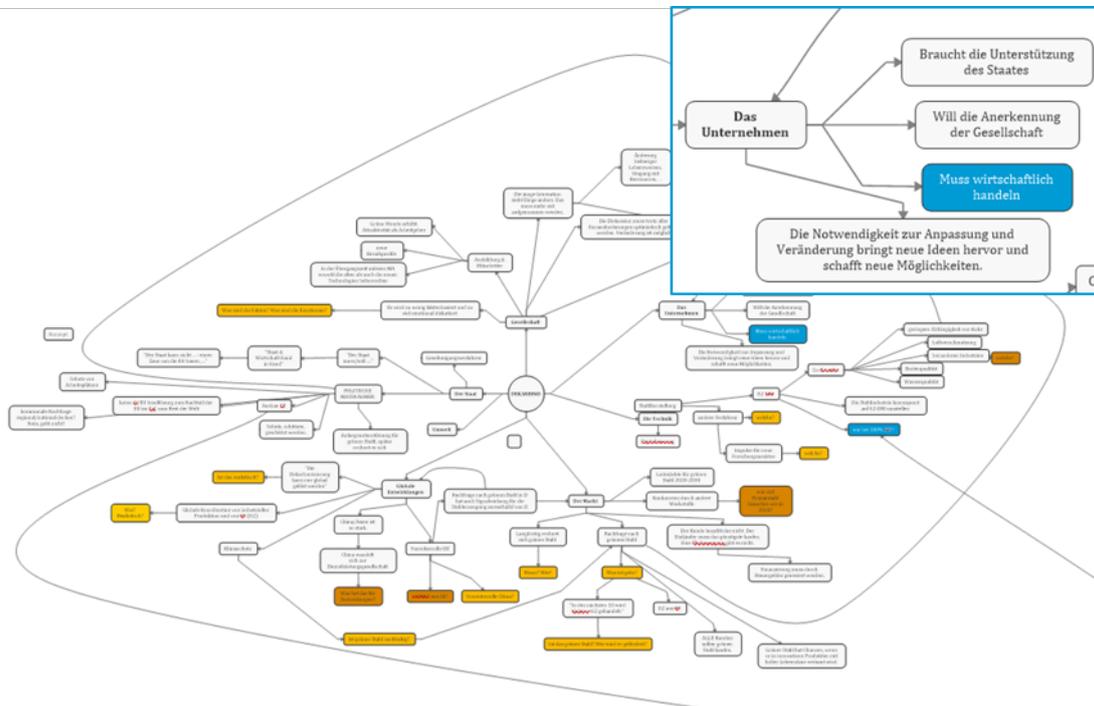
Abbildung 13: Gruppenarbeit Visionsworkshop



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI.

Nach dem Workshop wurden die Ergebnisse der Gruppenarbeit in einer Mindmap strukturiert (unten exemplarisch dargestellt). Auf dieser Grundlage wurde ein Thesenpapier erstellt und den Teilnehmenden zur Kommentierung zugesandt, um feststellen zu können, ob die relevanten Themen abgedeckt wurden. Außerdem wurde auf dieser Grundlage ein erster Entwurf der Roadmap-Ebenen erstellt, der als Basis für den weiteren Suchprozess diente.

Abbildung 14: Mindmap Visionsworkshop



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI.

2.2.2.2 Technologien und Transformationspfad

Für die Erarbeitung des technologischen Transformationspfads wurden im Roadmapping drei Informationsquellen kombiniert. Erste Quelle, und zugleich Hauptquelle waren Interviews mit Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Primärstahlproduzenten Thyssenkrupp Steel Europe, DHS - Dillinger Hütte Saarstahl, ArcelorMittal und Salzgitter. In diesen Interviews wurden insbesondere die Themen Technologien und Infrastruktur zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie angesprochen. Zweite Quelle war eine Recherche von Pressemeldungen. Dritte Quelle sind die Roadmapping-Workshops in denen immer wieder Aspekte des Transformationspfads beleuchtet wurden. Insbesondere der Workshop zum Thema Recycling fokussierte auf technologische Aspekte.

Interviews: Vorbereitung, Durchführung und Auswertung

Den Unternehmen wurde eine Leitfrage zugesandt, die den Rahmen für das Interview vorgab. Die Frage wurde bewusst offengehalten, um den Teilnehmern die Möglichkeit zu geben, die vielen Facetten der jeweiligen Themen entsprechend ihrer Expertise anzusprechen. Zusätzlich wurden bestimmte Themen als Stichpunkte/Fragen hinzugefügt, um erste, mögliche (relevante) Gesprächsthemen vorzuschlagen. Die Leitfragen und Stichpunkte/Fragen sind im Folgenden aufgeführt.

Leitfrage: Welche Herausforderungen werden sich in den Unternehmensbereichen

- (i) Einkauf

- (ii) Strategie & Politik/Mitarbeiter
- (iii) Anlagen/Technologie/Infrastruktur
- (iv) Vertrieb/Controlling/Finanzen

in den Jahren 2020-2024, 2025-2029 und 2030-2050 ergeben, wenn die kohlebasierte Stahlproduktion auf eine CO₂-arme Stahlproduktion umgestellt wird?

Die Interviews wurden anhand von Notizen zusammengefasst und den Teilnehmern zur Kommentierung zur Verfügung gestellt. Die überarbeiteten Zusammenfassungen wurden schließlich genutzt, um aus der gemeinsamen Betrachtung der Interviews Thesen abzuleiten.

Recherche Pressemeldungen

Zur Anreicherung der Interviewergebnisse wurden öffentliche Pressemitteilungen der Stahlunternehmen und von Branchenportalen recherchiert und zusammengefasst. Die zusammenfassende Infobox befindet sich im Abschnitt zu den Thesen zu Technologien (Abschnitt 3.2.2).

Workshop für Kreislaufwirtschaft

In einem rund halbtägigen Workshop wurde das Thema der Kreislaufwirtschaft beleuchtet. Eines der Hauptthemen war es zu klären, was getan werden muss, um den Einsatz von Schrott in der Stahlindustrie weiter zu erhöhen. Am Workshop nahmen Stakeholder der Georgsmarienhütte (Elektrostahlwerk), der Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen (BDSV e.V.) und der Universität Duisburg-Essen (Lehrstuhl Metallurgie) teil.

Thesen und Transformationspfad

Die technologiebezogenen Informationen aus den durchgeführten Interviews, Recherchen und Workshops wurden schließlich in Form von Thesen zusammengefasst. Diese finden sich in Kapitel 3. Darüber hinaus wurden diese Informationen genutzt, um einen generischen Transformationspfad zu entwickeln. Dieser bildete eine Grundlage für den Syntheseworkshop (KGT 7, Februar 2022).

Abbildung 15: Synthese Technologien



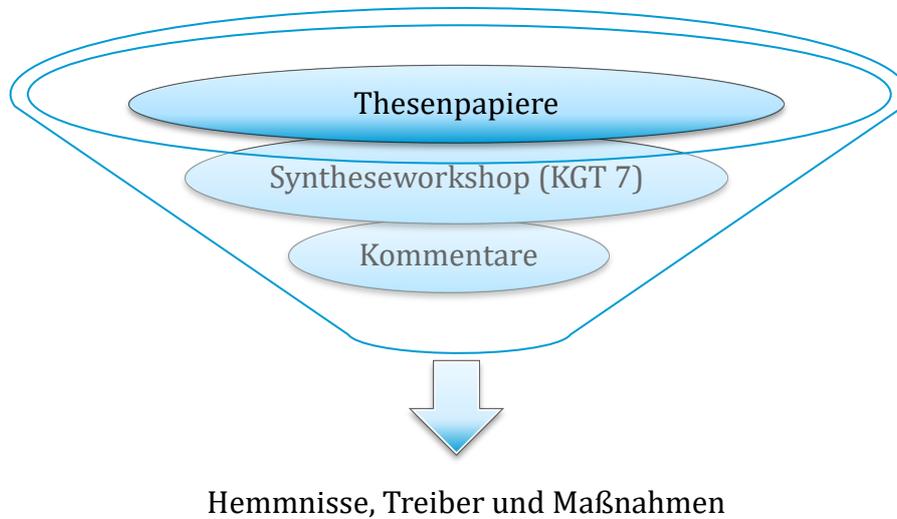
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI.

2.2.2.3 Hemmnisse und Treiber und Maßnahmen

Für das Roadmapping im Bereich der Hemmnisse, Treiber und Maßnahmen dienten die auf Basis der Workshops erstellten Thesepapiere als Informationsquelle (sämtliche KGT und

Workshops). Diese wurden ausgewertet und dienten als Grundlage für die grafische Darstellung der Treiber, Hemmnisse und Maßnahmen im Syntheseworkshop (KGT 7, Februar 2022). Diese wurden dort diskutiert und anschließend gab es die Möglichkeit, die Darstellungen zu kommentieren.

Abbildung 16: Synthese Hemmnisse, Treiber und Maßnahmen



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI.

3 Erkenntnisse aus dem Roadmapping

Nachfolgend werden die während des Roadmappings gewonnenen Erkenntnisse für fünf verschiedene Themen dargestellt. Zunächst wird die Ableitung der ursprünglich entwickelten Vision erörtert. Danach werden Themen erläutert, die zur Strukturierung des Suchraums (Technologien und Transformationspfad) und zur Erstellung der Eckpunkte für die Roadmap (Hemmnisse, Treiber und Maßnahmen) gehören.

3.1 Vision

Ausgangspunkt des Roadmappings war die Entwicklung einer gemeinsamen Vision, die alle Beteiligten anstreben. Zudem wurden relevante Themenbereiche sowie Chancen und Herausforderungen identifiziert, um auf dieser Basis die Roadmap und damit die nächsten Schritte zu strukturieren.

Die gemeinsame Vision wurde während des ersten Kerngruppentreffens (KGT 1, Vision, Chancen, Herausforderungen, Juli 2020) im Workshop-Format entwickelt. Hierfür wurden Live-Umfragen, Gruppenarbeit und moderierte Diskussionen genutzt. Die übergreifende Vision, die aus dem Workshop hervorging, lautet wie folgt:

Die deutsche Stahlindustrie wird bis zum Jahr 2050 dekarbonisiert, bleibt dabei global wettbewerbsfähig und genießt ein hohes gesellschaftliches Ansehen.

Zudem ergab der Workshop erste Erkenntnisse, die zur Strukturierung des Roadmappings beitrugen. Zunächst einmal wurde festgehalten, dass es bereits einen vielversprechenden Technologiepfad zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie gibt, nämlich die Wasserstoff-Direktreduktion in Kombination mit einer Elektroschmelze (z. B. EAF). Dabei kristallisierte sich zum einen heraus, dass das Thema Wasserstoffbereitstellung von zentraler Bedeutung ist. Andererseits wurde deutlich, dass die Dekarbonisierung der Stahlindustrie in erster Linie kein technologisches Problem ist. Vielmehr besteht die große Herausforderung darin, den regulatorischen Rahmen so zu gestalten, dass die Unternehmen in Dekarbonisierungstechnologien investieren. Hierbei wurden vor allem die Aspekte der steigenden Produktionskosten, die Unklarheit darüber, wer diese zusätzlichen Kosten trägt, und der internationale Wettbewerb diskutiert. Darüber hinaus wurde deutlich, dass die Diskussion über die Dekarbonisierung der Stahlindustrie trotz der technisch-wirtschaftlichen Dimension auch in hohem Maße eine emotionale Komponente hat. Der Wunsch nach gesellschaftlicher Anerkennung der Stahlindustrie, ihrer Herausforderungen bei der Transformation, aber auch ihrer Leistungen wurde mehrfach geäußert. Daraus folgt, dass die Dekarbonisierung der Stahlindustrie nicht nur technisch umgesetzt, sondern auch gesellschaftlich kommuniziert werden muss.

3.2 Technologien

Das zweite Thema des Roadmappings bezog sich auf Technologien, für die Wissen über aktuelle Entwicklungen und Einschätzungen zusammengetragen wurde. Der Fokus lag hierbei insbesondere auf den direkt betroffenen Stakeholdern, d.h. denjenigen, die die Technologien umsetzen müssen. Dies diente zum einen dazu, den aktuellen Stand in Bezug auf die technologische Transformation darzustellen und zum anderen, die Meinungen der Stakeholder zu bestimmten Technologien zusammenzufassen.

3.2.1 Hintergrund

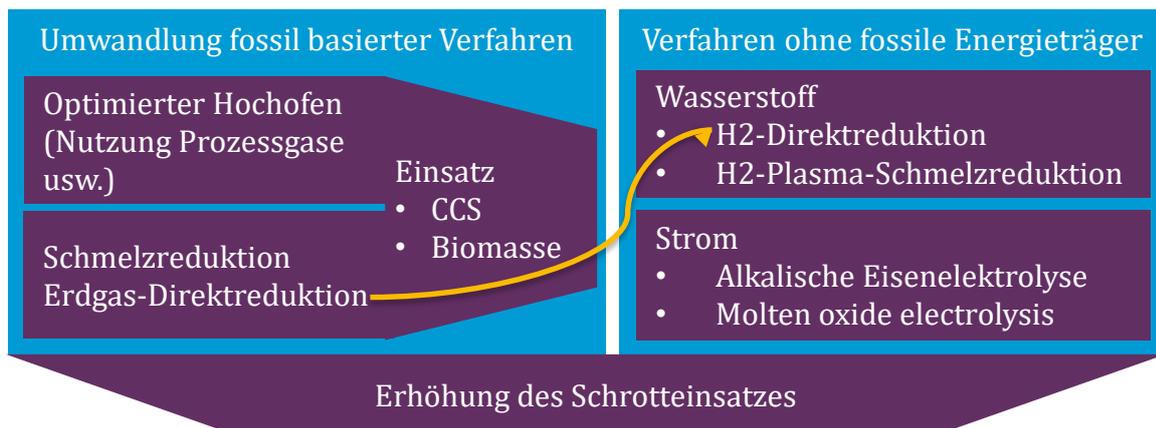
Um CO₂-Emissionen in der Stahlindustrie zu vermeiden, müssen konventionelle Produktionsverfahren durch CO₂-arme Technologien ersetzt werden, denn für die Hochofenroute ist das Potenzial an CO₂-Reduktionsmöglichkeiten in Deutschland weitgehend ausgeschöpft. Vor zehn Jahren ruhten die Hoffnungen auf Carbon Capture and Storage (CCS). So wurden im europäischen Forschungsprojekt Ultra-Low CO₂ steelmaking (ULCOS, 2004-2010) nach einem breiten Screening vier Verfahren ausgewählt, um in die Pilotphase zu gehen: die verbesserte Hochofenroute, die Direktreduktion auf Erdgasbasis und das HIsarna®-Verfahren, alle drei mit CCS, sowie die Eisenelektrolyse (Jahanshahi et al. (2016)). Keines dieser Verfahren hat bisher eine breite Anwendung gefunden.

Im neueren europäischen Forschungsprojekt Green Steel for Europe (2020-2021) ist die Bandbreite technologischer Optionen größer. Die dort durchgeführte Technologieanalyse identifiziert vier Routen. Erstens eine optimierte Hochofenroute mit CCS und Biomasse. Zweitens die Schmelzreduktionsroute, die entweder CCS und Biomasse oder Wasserstoff nutzt. Drittens die Eisenelektrolyse und viertens die Direktreduktion mit Wasserstoff.

In Deutschland setzen Studien zur Transformation des Energiesystems auf die Direktreduktion mit Wasserstoff (vgl. Agora et al. (2021), Fraunhofer ISI et al. (2021)). Im Prinzip handelt es sich dabei um das gleiche Verfahren wie die Direktreduktion mit Erdgas, mit dem Unterschied, dass zuvor erzeugter Wasserstoff, im besten Fall aus erneuerbaren Energien, direkt als Reduktionsmittel eingesetzt wird. Dadurch ist es möglich, Stahl nahezu CO₂-neutral herzustellen. Nachfolgende Abbildung fasst die Dekarbonisierungsansätze zusammen.

Abbildung 17: Technologien zur Dekarbonisierung der Eisenproduktion

Auf der linken Seite sind Verfahren auf Basis von Kohle (Hochofen, Schmelzreduktion) oder Erdgas (Erdgas-DRI) zu sehen.



Diese erreichen Emissionsminderungen durch Einsatz von CCS und/oder Biomasse. Bei Erdgas-DRI kann zudem auf Wasserstoff umgestiegen werden. Auf der rechten Seite sind Verfahren, bei denen keine fossilen Energieträger als Reduktionsmittel eingesetzt werden. Sie sind daher nahezu CO₂-frei. Ein höherer Schrotteinsatz reduziert in beiden Gruppen Emissionen. Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI.

3.2.2 Thesen zu Dekarbonisierungstechnologien

Nachfolgend werden verallgemeinerte Thesen beschrieben, die sich beim Roadmapping zum Thema Technologien ergaben.

- Alle befragten Primärstahlproduzenten haben bereits erste Konzepte skizziert, die technologische Pfade zur Dekarbonisierung ihrer Hüttenwerke darstellen. Allen Skizzen ist

gemeinsam, dass mittel- bis langfristig Direktreduktionsanlagen für die Eisenschwammproduktion eingesetzt werden sollen. Darüber hinaus verfolgt ein Hersteller die Hochofenroute in Kombination mit Carbon2Chem als Teil seiner Dekarbonisierungsstrategie.

- ▶ Das HIsarna®-Verfahren und die Eisenelektrolyse sind in den derzeit bekannten Konzepten nicht vorhanden; die Technologien werden eher beobachtet und, wenn überhaupt, nur langfristig als Option gesehen.
- ▶ Es gibt (Detail-)Unterschiede in der Art und Weise, wie die zukünftige Produktion auf Direktreduktionsanlagen umgestellt werden soll. Im Folgenden werden einige Aspekte, in denen Abweichungen erkennbar waren, als Frage aufgeführt.
 - Wie viel Schrott wird in Zukunft eingesetzt?
 - Welches Schmelzaggregat wird verwendet: (üblicher) Elektrolichtbogenofen (Electric Arc Furnace EAF), Submerged Arc Furnace (SAF) oder andere Varianten?
 - Welche Rolle wird der Konverter in Zukunft spielen, bzw. wird er überhaupt benötigt?
- ▶ Die primären Stahlproduzenten haben bereits erste Pilotprojekte zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie gestartet (siehe nachfolgende Auswertung von Pressemeldungen).
- ▶ Mehrere Hochöfen müssten in den nächsten 10 Jahren neu zugestellt werden. Das sind Zeitfenster, um große Teile der Produktion umzustellen.
- ▶ Der Einsatz von Erdgas in Direktreduktionsanlagen ist solange notwendig, wie Wasserstoff noch nicht in ausreichenden Mengen verfügbar ist. Damit kann bereits vor der Verfügbarkeit von Wasserstoff die Transformation der Stahlindustrie angestoßen werden.
 - Der Einsatz von Erdgas in Direktreduktionsanlagen (in Kombination mit einer Erhöhung des Schrottanteils) ermöglicht eine signifikante Reduktion der Scope1-THG-Emissionen im Vergleich zur üblichen Hochofenroute von bis zu 60 %.
 - Der Übergang von Kohle zu Erdgas ermöglicht den Übergang zu Wasserstoff, da dieselbe Eisenerzreduktionsanlage verwendet werden kann, unabhängig davon, ob Erdgas oder Wasserstoff verwendet wird. Ein technologischer Lock-in ist bei einem Start mit Erdgas daher nicht gegeben.
- ▶ Erdgas ist kostengünstiger als Wasserstoff. Der Bedarf an Förderung (falls vorhanden) ist daher ebenfalls geringer.

Auswertung der Presse: Aktuelle Aktivitäten deutscher Stahlhersteller

Die **Salzgitter AG** strebt bis zum Jahr 2035 eine nahezu kohlenstofffreie (-95 %) Stahlproduktion an. Dazu wurde bereits 2015 das Konzept „SALCOS®“ (Salzgitter Low CO₂-Steelmaking) gestartet, das eine schrittweise Umstellung der Stahlproduktion von Kohle auf Wasserstoff mittels DRI und EAF vorsieht (Salzgitter 2022). Zu diesem Zweck wurde bereits mit dem Bau einer DRI-Pilotanlage begonnen. Darüber hinaus sind die weltweit größte Hochtemperatur-Elektrolyse (GrInHy2.0, 720 kWel) und zwei PEM-Elektrolyse-Anlagen (2x 1,25 MWel) bereits in Betrieb (Salzgitter 2021, sunfire 2019). Außerdem wurde ein 30 MW Windpark in Betrieb genommen. SALCOS sieht 3 Ausbaustufen vor: 2025 (-30 % CO₂): Inbetriebnahme der ersten DRI-Anlage, Stilllegung des ersten Hochofens (2 Mio t.). 2030 (-50 % CO₂): Inbetriebnahme der zweiten DRI-Anlage, Stilllegung des zweiten Hochofens. 2033 (-95 % CO₂): Weitere Reduzierung der Emissionen, z. B. durch mehr H₂-Nutzung.

Thyssenkrupp hat sich das Ziel gesetzt, seine CO₂-Emissionen bis 2030 um 30 Prozent zu reduzieren und bis 2050 klimaneutral zu produzieren. Im Jahr 2019 hat das Unternehmen damit begonnen, Wasserstoff in einen Hochofen zu injizieren (erste praktische Erfahrungen). Das Unternehmen plant bis 2025 400.000 Tonnen und bis 2030 3 Millionen Tonnen CO₂-armen Stahl zu produzieren. Ein skizzierter Meilenstein auf dem Weg dorthin ist der Bau einer DRI-Anlage mit einer jährlichen Produktionskapazität von 1,2 Millionen Tonnen bis 2025. Die Anlage ist mit einer integrierten Schmelzeinheit konzipiert; das bestehende Produktportfolio bleibt erhalten, da die vorhandenen Stahlwerke und Prozesse weiter genutzt werden können. (Thyssenkrupp 2020). Zudem wurde gemeinsam mit HKM ein Recyclingprodukt entwickelt (TSR40), für dessen Produktion die Remonditochter TSR eine neue Schrottaufbereitungsanlage baut.

ArcelorMittal hat sich das Ziel gesetzt, die CO₂-Emissionen in Europa bis 2030 um 30 Prozent zu reduzieren und bis 2050 klimaneutral zu produzieren. Erster Schritt auf dem Weg zu diesem Ziel ist der Bau einer DRI-Pilotanlage in Hamburg (0,1 Mio. t.) durch Midrex (ArcelorMittal 2019). In Bremen ist der Bau einer DRI-Anlage inkl. EAF (2,4 Mio. t) bis 2026 geplant. Zudem ist die Stilllegung beider Hochöfen sowie der Bau einer weiteren DRI-Anlage bis 2030 geplant. Der Wasserstoff soll im Rahmen eines regionalen norddeutschen Verbundes mittels Elektrolyse hergestellt und den Stahlwerken zur Verfügung gestellt werden (Stahleisen (2021)). In Eisenhüttenstadt soll der Hochofen vor 2030 stillgelegt werden und stattdessen werden zwei EAF bis 2027 errichtet. Eisenschwamm für die EAF soll dann zunächst aus Bremen kommen. Zudem ist eine DRI-Pilotanlage (0,15 Mio. t) in Eisenhüttenstadt (Hyfor) geplant.

Dillinger und Saarstahl planen bis 2050 Stahl CO₂-neutral zu produzieren und bereits bis 2030 55 % weniger CO₂ auszustoßen. Hierfür plant das Unternehmen, zwischen 2027 und 2030 zwei neue EAF zu installieren, um einen ersten Hochofen zu ersetzen. Mittelfristig sollen dann auch die anderen Hochöfen ersetzt werden, wobei noch unklar ist, ob dies durch unternehmenseigene DRI-Kapazitäten oder den Import von Eisenschwamm/HBI geschehen wird (Hartbrich 2022). SHS-Stahl-Holding-Saar hat zusammen mit LIBERTY Steel und Paul Wurth eine Absichtserklärung zur Entwicklung eines großen wasserstoffbasierten Stahlwerks in Frankreich unterzeichnet. Hier wird die Entwicklung einer Elektrolyse (1 GW) und einer DRI-Anlage (2 Mio. t.) in Dünkirchen geprüft. Darüber hinaus hat die SHS Group eine Absichtserklärung mit Rio Tinto (einem globalen Bergbauunternehmen) und Paul Wurth unterzeichnet, um gemeinsam eine Machbarkeitsstudie über die mögliche Produktion von kohlenstoffarmem Eisenschwamm im industriellen Maßstab in Kanada durchzuführen. (Saarstahl 2021 a,b).

- ▶ Erze für Direktreduktionspellets müssen gewisse Anforderungen erfüllen. Somit können nicht alle Erzsorten verwendet werden. Bei der Versorgung mit entsprechenden Erzen für Direktreduktionsanlagen könnte es daher langfristig zu Engpässen kommen. Deshalb wäre es sinnvoll, wenn auch Erze zum Einsatz kommen können, die nicht als Pellets vorliegen, sondern als Feinerze. Dies ist noch nicht erprobt, Forschungsarbeiten sind an der Stelle notwendig. Die Verfügbarkeit von Eisenerzpellets wird jedoch nicht als kritisches Hemmnis angesehen.
- ▶ Alternativen zur Direktreduktion mit Wasserstoff und/oder Erdgas werden bei den langen Laufzeiten der Produktionsanlagen und dem Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2050 nicht gesehen. Alternative CO₂-arme Verfahren befinden sich zwar in der Forschung und Entwicklung, aber bei keinem (Elektrolyse von Eisenerz, Plasmaschmelzverfahren) ist eine zeitgerechte Verfügbarkeit absehbar.
- ▶ Der Wechsel von Kohle hin zu Erdgas und/oder Wasserstoff führt zum weitgehenden Aufbrechen des bisherigen Energieverbundes der integrierten Hüttenwerke. Die Umstellung hat demnach systemische Auswirkungen.
- ▶ Die Menge an Schrott wird bis 2050 weltweit um ca. 70 % ansteigen. Dies ist eine Rohstoffquelle, die genutzt werden sollte, um den Anteil von Schrott in der Primärroute in den kommenden Jahren schrittweise zu erhöhen. In den USA produziert z. B. die Firma Nucor Produkte mit hohem Schrottanteil (Minimill-Konzepte). Inwieweit diese Produkte mit denen der deutschen Primärstahlproduzenten vergleichbar sind, ist zu prüfen.
- ▶ Der Schrotteinsatz kann in der deutschen Stahlindustrie weiter erhöht werden. Dazu muss der Schrott aber besser sortiert werden. Verunreinigungen wie Bauschutt oder unerwünschte Legierungselemente wie Kupfer oder Zinn, deren Anteil bei der zu produzierenden Stahlgüte nicht überschritten werden darf, dürfen nicht in die Stahlschmelzen gelangen.
- ▶ Für mehr Recycling müsste in Zukunft Design for Recycling stärker in den Vordergrund treten und in der Ökodesign-Richtlinie berücksichtigt werden. Auch digitale Zwillinge können einen Beitrag für mehr Recycling leisten.
- ▶ Die politische Diskussion orientiert sich derzeit eher am Thema Wasserstoff-Direktreduktion, wobei die Transformation von koksbasierten Hochöfen in Wasserstoff-Direktreduktionsanlagen nur ein Teil der Lösung zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie ist. Ein anderer Teil ist die Erhöhung des Schrottanteils. Beide Teile sind wichtig und sollten eher komplementär zueinander betrachtet werden, insbesondere auch in der politischen Diskussion und bei der Vergabe von Forschungsgeldern.
- ▶ Steigende CO₂-Preise können die Kreislaufwirtschaft und damit die Nachfrage nach Schrott ankurbeln. Dies setzt jedoch voraus, dass potenzielle Schrottnehmer auch bei steigenden CO₂-Preisen wirtschaftlich arbeiten können. Es setzt auch voraus, dass die Geschäftsmodelle in der Schrottwirtschaft so gestaltet sind, dass ein Anreiz für besseres Sortieren besteht. Es ist daher zu prüfen, wie es gefördert werden kann, dass sich die Geschäftsmodelle in der Schrottwirtschaft in diese Richtung entwickeln.

3.3 Transformationspfad

Das dritte Thema des Roadmappings bezog sich auf Transformationspfade. Hier war es Ziel einen Transformationspfad zu entwickeln, der die Grundlage für die Diskussion im Syntheseworkshop (KGT 7, Synthese, Februar 2022) bildet.

Das Hauptaugenmerk lag auf einer grafischen Darstellung der gewünschten Entwicklung, die dazu diente, mit den Teilnehmerinnen und Teilnehmern Hemmnisse und Treiber für diese Entwicklung zu diskutieren. Dazu wurden die Erkenntnisse aus dem Bereich der Technologien genutzt. Die dort skizzierten Ansätze wurden in eine Zeitleiste übertragen und mit ersten Vorschlägen für konkrete Ziele versehen. Der Transformationspfad stützt sich auf drei Hauptelemente.

Erstens geht es um den **Aufbau von Produktionskapazitäten für Eisenschwamm durch Direktreduktionsanlagen**. Diese können in der Anfangsphase mit Erdgas betrieben werden. Mittel- bis langfristig ist es jedoch das Ziel, sie mit grünem Wasserstoff zu betreiben, um eine nahezu treibhausgasneutrale Stahlproduktion zu erreichen. Der Bau der DRI-Anlagen geht Hand in Hand mit dem Abbau von kohlebetriebenen Hochöfen, die Hauptverursacher von CO₂-Emissionen im Stahlsektor sind. Im Rahmen der Workshops konnten keine quantitativen Ziele erarbeitet werden, da insbesondere die Stahlhersteller sich wegen der unsicheren Finanzierungsbedingungen nicht in der Lage sahen feste Zusagen zu machen. Die seitdem veröffentlichten Pressemitteilungen (siehe Box oben) lassen jedoch vermuten, dass bis 2025 mindestens DRI Kapazitäten von 5,6 Mio. t/a installiert sein könnten und die vollständige Dekarbonisierung bis 2045 realistisch ist.

Eine zentrale Frage ist dabei die Lokalisierung der Produktion von Eisenschwamm in Direktreduktionsanlagen. Die verschiedenen Varianten haben Vor- und Nachteile, die es abzuwägen gilt.

- ▶ Ein Argument für die zentrale Produktion in Deutschland ist, dass der Standort dort gewählt werden kann, wo er aus Sicht des Energiesystems vorteilhaft ist. Zum Beispiel dort, wo es viel Strom aus erneuerbaren Energien gibt und Wasserstoff daher vergleichsweise günstig und auch mit einer Funktion im Energiesystem (Lastmanagement) produziert werden kann.
- ▶ Ein Argument für die Vor-Ort-Produktion direkt bei den Hüttenwerken ist, dass die Energieeffizienz in den Hüttenwerken höher ist als bei importiertem (kaltem) Eisenschwamm. Hauptgrund ist, dass der Eisenschwamm heiß eingesetzt werden kann, was den Schmelzaufwand reduziert.
- ▶ Eisenschwamm könnte zudem in Ländern mit besserer Verfügbarkeit von erneuerbarer Energie produziert und zur Weiterverarbeitung nach Deutschland importiert werden. Technisch ist dies prinzipiell möglich. Allerdings müssen in den Herkunftsländern zunächst geeignete Infrastrukturen aufgebaut werden, was Vorlaufzeiten erfordert. Darüber hinaus müssen wirtschaftliche Aspekte abgewogen werden (Verfügbarkeit, Einkaufspreise, Abhängigkeiten etc.). Zudem müsste gewährleistet werden, dass der Eisenschwamm in diesen Ländern tatsächlich mit Erneuerbaren Energien und nicht mit fossilen Energieträgern hergestellt wird.

Grundsätzlich schließen sich die Optionen (i) Produktion von Eisenschwamm vor Ort in den Hütten, (ii) zentrale Produktion von Eisenschwamm in Deutschland und (iii) Import von Eisenschwamm vom Weltmarkt technologisch nicht gegenseitig aus. Ein Mix aus diesen Elementen kann daher eine Option zur Risikostreuung für die deutsche Stahlindustrie sein. Allerdings wurde insbesondere die dritte Option im Roadmappingprozess auch kritisch gesehen,

da sie zu einer Abwanderung der Stahlproduktion und möglicherweise auch einiger Kunden aus Deutschland führen könnte.

Zweitens geht es um die **verstärkte Verwendung von Schrott in der Stahlindustrie**. Dies ist wichtig, weil dadurch nicht nur Ressourcen, sondern auch erhebliche Mengen an Energie eingespart werden. Zum Beispiel kann die verstärkte Verwendung von Schrott den Bedarf an Eisenschwamm verringern. Dies wiederum reduziert mittel- bis langfristig den Bedarf an Reduktionsmitteln, also Wasserstoff, der sonst besonders energieintensiv hergestellt werden müsste. Deutschland exportiert derzeit jährlich etwa vier bis fünf Millionen Tonnen Stahlschrott. Darüber hinaus deuten Prognosen darauf hin, dass das Angebot an Schrott bis 2050 deutlich zunehmen wird, wobei diese Entwicklung vor allem auf das steigende Angebot in China und anderen Entwicklungsländern im Rest der Welt zurückzuführen ist.

Drittens geht es um die **Dekarbonisierung des Elektrostahlverfahrens**. Das Elektrostahlverfahren ist aufgrund des hohen Schrotteinsatzes und der geringeren Energieintensität deutlich weniger treibhausgasintensiv als das Hochofenverfahren. Außerdem wird der Elektrostahlprozess überwiegend mit elektrischer Energie betrieben. Das von der Bundesregierung übergeordnete Ziel der Dekarbonisierung der Stromerzeugung greift hier also indirekt. Dennoch entstehen auch beim Elektrostahlverfahren CO₂-Emissionen, die reduziert werden müssen. Ziel ist es hier, möglichst treibhausgasneutrale Kohlenstoffträger für den Elektrolichtbogenofen zu verwenden (z. B. Biomasse), aber vor allem fossile Brennstoffe (z. B. Erdgas) für die sonstige Prozesswärme zu ersetzen.

Folgende Grafik skizziert den generischen Transformationspfad. Quantitative Ziele für einzelne Entwicklungen (z. B. DRI-Ausbau) sind nicht dargestellt (daher mit einem Blitz versehen). Das liegt daran, dass quantitative Ziele im Syntheseworkshop (KGT7, Februar 2022) und im Stakeholderdialog 2 (SD 2, Juni 2022) besonders kontrovers diskutiert wurden. Erstens wurde bei einigen Zielen in Frage gestellt, ob nationale Ziele überhaupt notwendig sind (z. B. nationale Ausbauziele für DRI). Zweitens wurde in Frage gestellt, ob bestimmte Ziele zuverlässig quantifiziert werden können (z. B. die erreichbare Schrottverwendung in der Stahlindustrie). Drittens wurde besonders kontrovers über die Höhe möglicher Ziele diskutiert.

Abbildung 18: Transformationspfad



Quantitative Ziele wurden nicht hinterlegt, da diese kontrovers diskutiert worden sind.

Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

3.4 Hemmnisse und Treiber

Das vierte Thema des Roadmappings waren die Hemmnisse und Treiber. Ziel war es, Aspekte zu identifizieren, die die Verwirklichung des skizzierten Transformationspfads hemmen (Hemmnisse) oder vorantreiben (Treiber).

Der Fokus lag hierbei insbesondere auf den direkt betroffenen Stakeholdern, d. h. denjenigen, die die Verwirklichung des Pfades umsetzen müssen. Im Fokus lagen der Bau von DRI-Anlagen und die Zunahme der Verwendung von Schrott in der Stahlindustrie.

3.4.1 Allgemeine Hemmnisse

Nachfolgende allgemeine Hemmnisse kristallisierten sich in den Workshops heraus.

- ▶ Offener regulatorischer Rahmen und internationaler Wettbewerb
- ▶ Fehlende Definitionen und Standards bei der Bilanzierung von grünem Stahl

3.4.1.1 Der regulatorische Rahmen ist noch nicht vollständig geklärt.

Die Umstellung der Stahlindustrie weg von Hochöfen hin zur wasserstoffbasierten Direktreduktion ist kein Vorgang, der einmalig in besonders kurzer Zeit durchgeführt wird. Vielmehr ist es eine schrittweise Transformation, der Planungsprozesse vorausgehen und in deren Rahmen zahlreiche substanzielle Investitionen erforderlich sind. Aus Sicht der Stahlindustrie bzw. existierender Stahlherstellungsunternehmen bedeutet diese Situation, dass Investitionen in neue Anlagen nur dann möglich sind, wenn die wirtschaftliche Lebensfähigkeit des gesamten Unternehmens gewährleistet werden kann. Es geht also darum, die Wirtschaftlichkeit der bestehenden Hochöfen und der dazukommenden Anlagen (z. B. DRI-Anlagen) so auszutarieren, dass das Unternehmen als Ganzes wettbewerbsfähig bleibt. Hierbei sind das europäische Emissionshandelssystem und die dafür geplanten Novellierungen zentral. Zum einen ist noch nicht klar, wie die angekündigten Novellen im Hinblick auf die Stahlindustrie im Detail umgesetzt werden. Zum anderen werden bestimmte Aspekte der geplanten Novellierung von der Stahlindustrie kritisiert. Dies wurde auch in mehreren Workshops diskutiert, wobei öfter der Umstand angeführt wurde, dass sich die Stahlindustrie im internationalen Wettbewerb befindet. Meinungen aus den Workshops zu Vorschlägen finden sich im Abschnitt „Maßnahmen“, dort beziehungsweise auf die „Fit-für-55“-Vorschläge.

3.4.1.2 Es fehlen Definitionen für grünen Stahl.

Für die Weitergabe von Mehrkosten für CO₂-ärmer hergestellte Stähle sind Nachweise erforderlich. Diese werden dann von Abnehmerindustrien genutzt. Zum Beispiel erstellen Automobilhersteller bereits Ökobilanzen für Fahrzeuge, die sie entwickeln und herstellen. Für viele Materialien werden Standarddaten aus Ökobilanzdatenbanken verwendet. Für mengenmäßig relevante Materialien wie Stahl werden neuerdings aber auch Daten zum Treibhausgasfußabdruck des verwendeten Stahls von den Lieferanten verlangt. Wenn ein Stahlhersteller nun höhere Preise für Stähle mit einem geringeren Treibhausgas-Fußabdruck erzielen will, muss er dies auch nachweisen können.

- ▶ Eine marktgängige Definition für grünen Stahl gibt es bisher nicht.

Obwohl es zahlreiche Standards (z. B. ökobilanzieller Art, siehe Infobox) gibt, die einen Nachweis des Treibhausgas-Fußabdrucks ermöglichen, scheint der Teufel im Detail zu stecken. In Workshops zum Thema Leitmärkte (KGT 4/5, September und Juli 2021) wurde das Thema daher wiederholt angesprochen. Als zu überwindende Hürde wurde formuliert, dass der

Treibhausgas-Fußabdruck in einer einheitlichen und vom Markt akzeptierten Weise durch die Wertschöpfungskette getragen werden muss. Außerdem wurde darauf hingewiesen, dass der Begriff „grüner Stahl“ zwar bereits intensiv in den Medien verwendet wird, es aber auf politischer Ebene eigentlich keine Definition dafür gibt.

Hintergrund: Anknüpfungspunkte für die Berechnung der CO₂-Intensität von Stahlprodukten

Treibhausgasinventar ETS (DEHSt): § 5-Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG). Bilanzierung der jährlichen Treibhausgasemissionen auf Standortebene.

EU-Taxonomie: C(2021) 2800 final, Kontext des delegierten Rechtsaktes: Verweise auf Empfehlung 2013/179/EU, ISO 14067 oder ISO 14064-1.

Normen/Standards: ISO 14404-1:2013-03: Berechnungsmethode für die Intensität von Kohlendioxidemissionen in der Stahl- und Eisenherstellung - Teil 1: Stahlwerk mit Hochofen

ISO 14404-2:2013-03: Berechnungsmethode für die Intensität von Kohlendioxidemissionen in der Stahl- und Eisenherstellung - Teil 2: Stahlwerk mit Elektrolichtbogenofen

ISO 20915:2018-11: Berechnungsmethodik zur Lebenszyklusbestandsaufnahme für Stahlerzeugnisse

Konformitätserklärungen/Zertifizierungen: Responsible Steel Initiative, VERIsteel©-Verfahren

3.4.2 Hemmnisse für den Bau neuer DRI-Anlagen

Nachfolgende Hemmnisse kristallisierten sich in den Workshops für den Bau neuer DRI-Anlagen heraus.

- ▶ Höhere Betriebskosten (OPEX) von DRI-Anlagen
- ▶ Notwendiger Kapitalbedarf für Investitionen (CAPEX)
- ▶ Fehlende Wasserstoffverfügbarkeit
- ▶ Knappheit hochreiner Pellets
- ▶ Genehmigungsverfahren

3.4.2.1 Höhere Betriebskosten (OPEX) hemmen die Marktdurchdringung von DRI.

Die Umstellung auf Direktreduktionsanlagen und die schrittweise Integration von Wasserstoff in die Produktionsprozesse erhöhen unter den derzeitigen Bedingungen die Betriebskosten.

Laut Agora Energiewende (2021) liegen die Produktionskosten pro Tonne Rohstahl bei 505 €/t für Erdgas-DRI und 725 €/t für Wasserstoff-DRI, verglichen mit 390 €/t für die Hochofenroute (CAPEX & OPEX, ohne Kosten für CO₂-Emissionszertifikate). Zwar sind diese Kosten stark von der Entwicklung der Rohstoffpreise abhängig (d. h. Erdgas, Kohle, Strom und Wasserstoff, aber auch Erze und Schrott), doch zeigt der Vergleich, dass die Betriebskosten der Stahlproduktion mit Wasserstoff-DRI absehbar deutlich höher sein werden als die der Hochofenroute. Diese Einschätzung wurde in der Interviewreihe mit Stahlproduzenten mehrfach geäußert (Interviews, November 2021).

- ▶ Mehrkosten für CO₂-ärmere Stähle können bisher nur bedingt weitergegeben werden.

Die Stahlindustrie steht im internationalen Wettbewerb, da auch die Abnehmer von Stahlprodukten im internationalen Wettbewerb stehen (z. B. die Automobilhersteller). In der Interviewreihe mit Stahlproduzenten (November 2021) wurde daher ebenso wie in den Workshops geäußert, dass die Mehrkosten für treibhausgasärmere Stähle bisher nur eingeschränkt an Kunden weitergegeben werden können. Dies hemmt somit zunächst die Investition in neue DRI Anlagen.

3.4.2.2 Die notwendigen Investitionen (CAPEX) erzeugen Kapitalbedarf.

Der Bau einer Stahlherstellungsanlage, die in der Zukunft CO₂-arm Stahl erzeugen kann, liegt bei etwa einer Milliarde Euro je einer Million Tonnen jährliche Erzeugungskapazität. Für die Erneuerung des aktuellen Anlagenbestandes von 30 Millionen Tonnen Stahlerzeugungskapazität wären demnach rund 30 Milliarden Euro erforderlich.

- Die Stahlhersteller sind auf externe Finanzierung angewiesen.

Auf einem Workshop zur Finanzierung der Transformation (KGT3, März 2021) stellte eine Bank einen Auszug aus ihrer Analyse für die Stahlindustrie vor. Diese zeigte, dass selbst die profitabelsten Stahlproduzenten in Europa nur die Hälfte der notwendigen Kapitalkosten aus eigenen Mitteln tragen können. Die bereits hohen Verschuldungsquoten einiger Produzenten begrenzen die weitere Kreditaufnahme. Das für die Umstellung benötigte Kapital wird daher vermutlich nicht allein durch die Innenfinanzierung der Stahlproduzenten aufgebracht werden können. Außerdem können hohe Geschäftsrisiken, die in der Stahlindustrie durchaus vorkommen können, die Kreditvergabe hemmen.

3.4.2.3 Die Wasserstoffverfügbarkeit ist noch nicht ausreichend.

Bis 2030 plant die Bundesregierung eine grüne Wasserstoffproduktion von 0,42 Millionen Tonnen pro Jahr. Es werden jedoch 0,66 Millionen Tonnen Wasserstoff pro Jahr benötigt, um etwa ein Drittel der deutschen Stahlproduktion auf Wasserstoff umzustellen (WV Stahlfakten 2020).

- Die Verfügbarkeit von Wasserstoff ist ein wesentlicher Flaschenhals.

In der Interviewreihe mit Stahlproduzenten (November 2021) wurde daher immer wieder die Befürchtung geäußert, dass nicht genug Wasserstoff beschafft oder produziert werden kann, um im notwendigen Umfang auf Wasserstoff-DRI umzustellen.

3.4.2.4 Hochreine Erze könnten knapp werden.

In der Interviewreihe mit Stahlproduzenten (November 2021) wurde darauf hingewiesen, dass für die Herstellung von Eisenschwamm über die DRI-Route hochreine Erze benötigt werden, die in Zukunft knapp sein könnten. Dies kann daher ein hemmender Faktor für die Investition in neue DRI-Anlagen sein (hier wird jedoch bereits an Lösungen geforscht).

3.4.2.5 Genehmigungsverfahren stellen Hürden dar.

Für die Umsetzung der Dekarbonisierung der Stahlindustrie haben Genehmigungsverfahren eine besondere Bedeutung. In einer Kommentierung zu einem Begleitdokument zum Syntheseworkshop (KGT 7, Februar 2022) wird folgendes Hemmnisse aufgeführt: „Die nationale Rechtslage und die Interpretation des EU-Rechts führen im Vergleich zu anderen EU-Mitgliedsstaaten zu erheblichen Verzögerungen in den Genehmigungsverfahren. Darüber hinaus besteht erhebliche Rechtsunsicherheit.“

3.4.3 Hemmnisse für die Steigerung des Schrotteinsatzes

Nachfolgende Hemmnisse kristallisierten sich in den Workshops für den Bau neuer DRI-Anlagen heraus.

- ▶ Mangel an Schrotten in geeigneter Qualität, z. B. durch folgende Gründe.
 - Mangelnde Recyclingfähigkeit von Produkten
 - Bessere Aufbereitung lohnt sich nicht immer.

3.4.3.1 Mangel an Schrotten in geeigneter Qualität.

Ein Haupthindernis für die Erhöhung des Schrottanteils in der Stahlindustrie ist der Mangel an Schrott von geeigneter Qualität. In einem Fachworkshop zum Thema (WS1, April 2021) wurden Grenzen in Bezug auf höhere Schrottanteile in der Stahlindustrie vor allem auf hohe Anforderungen an Spurenelemente zurückgeführt. Stahlbleche werden zum Beispiel nicht direkt wieder zu Stahlblechen recycelt. Kupfer und Zinn zum Beispiel sind Elemente, die beim Recycling von Altschrott Probleme bereiten, weil sie nicht mehr aus einer flüssigen Stahlschmelze entfernt werden können.

3.4.3.2 Mangel an Deponiekapazitäten für Reststoffe.

Im Fachworkshop zum Thema Recycling (WS1, April 2021) wurde darauf hingewiesen, dass in den letzten Jahren zahlreiche Schredderanlagen in Deutschland geschlossen wurden. Ein Grund dafür wird darin vermutet, dass die Entsorgung der Reststoffe (Schredderleichtfraktion) ein Hindernis für den wirtschaftlichen Betrieb dieser Anlagen war. Hierfür wird vermutet, dass ein Mangel an Deponiekapazitäten in der EU die Ursache sein könnte.

3.4.3.3 Mangelnde Recyclingfähigkeit von Produkten.

Produkte bestehen zunehmend aus immer mehr Materialien, bei denen die Trennbarkeit der Materialien, z. B. durch Verklebung, immer mehr zu einer Herausforderung für die Recyclingindustrie wird. Produkte mit unzureichender Recycelbarkeit stellen daher ein Hemmnis für die verstärkte Nutzung von Schrott dar, da es schwieriger wird, „möglichst reinen“ oder gut charakterisierten Schrott zu produzieren, der dann in der Stahlindustrie wiederverwendet werden kann (abgeleitet aus WS1, April 2021).

3.4.3.4 Bessere Aufbereitung lohnt sich nicht immer.

Trotz der oben genannten Hemmnisse sehen Branchenvertreter Potenzial, um die Verwendung von Schrott in der Stahlindustrie weiter zu steigern (aus WS1, April 2021). Um dies zu erreichen, muss der Schrott jedoch besser sortiert werden. Verunreinigungen wie Bauschutt oder unerwünschte Legierungselemente wie Kupfer oder Zinn, deren Anteil bei der zu produzierenden Stahlgüte nicht überschritten werden darf, dürfen nicht in die Stahlschmelzen gelangen. Das erfordert u. a. neue Technologien, die in neuen Geschäftsmodellen münden. Nach Ansicht der Teilnehmer des Fachworkshops zum Thema Recycling (WS1, April 2021) sind die Rahmenbedingungen dafür noch nicht ausreichend, da sich eine bessere Aufbereitung für die Betreiber nicht immer lohnt.

3.4.4 Treiber für die Dekarbonisierung der Stahlindustrie

Nachfolgende Treiber kristallisierten sich in den Workshops für die Transformation der Stahlindustrie heraus.

- ▶ Politik und Gesellschaft fordern einen Wandel.

- ▶ Unternehmen wollen einen Beitrag zur Abwendung der Klimakatastrophe leisten.
- ▶ Es besteht Nachfrage nach CO₂-armen Stählen.

3.4.4.1 Der politische Rahmen erfordert eine drastische Reduktion

Die Stahlindustrie ist für 5 % der nationalen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Die nationalen Klimaschutzziele können daher kaum erreicht werden, ohne dass die Stahlindustrie ihre Emissionen drastisch reduziert. Folglich entsteht politischer und gesellschaftlicher Druck, der sich z. B. in Form von geänderten Regelungen (siehe z. B. Fit für 55-Vorschläge), aber auch in Projekten wie z. B. dem hier vorliegenden äußert (Dekarblnd), in denen nächste Schritte zur Dekarbonisierung vorangetrieben werden sollen.

3.4.4.2 Unternehmen wollen Beitrag zur Abwendung der Klimakatastrophe leisten

Die Analyse der Technologien hat gezeigt, dass die Unternehmen bereits Wege zur Treibhausgasneutralität skizzieren. Die Notwendigkeit, diese Wege einzuschlagen, ist also vermutlich erkannt worden. Es besteht jedoch ein Bedarf an Unterstützung auf dem Weg dorthin. Im Workshop zum Thema Visionen (KGT 1, Visionen, Juli 2020) wurde mehrfach der Wunsch nach gesellschaftlicher Anerkennung der Stahlindustrie geäußert. Die Dekarbonisierung der Stahlindustrie muss daher nicht nur technisch umgesetzt, sondern auch gesellschaftlich vermittelt werden.

3.4.4.3 Es besteht bereits Nachfrage nach treibhausgasarmen Stählen

In beiden Workshops zum Thema Leitmärkte (KGT4, KT5, Juli & September 2021) erläuterten Vertreter stahlverarbeitender Industrien, dass sie bereits jetzt nach Möglichkeiten suchen, die vorgelagerten Emissionen ihrer Produkte zu reduzieren, was letztlich auch eine Nachfrage nach treibhausgasarmen Stählen erzeugt.

- ▶ Ein Windkraftanlagenhersteller gab an, dass er bereits jetzt nach Stahlherstellern mit einem geringen Fußabdruck sucht, da sich das Unternehmen das Ziel gesetzt hat, langfristig CO₂-neutral zu werden, auch im Hinblick auf die vorgelagerten Emissionen.
- ▶ Für die Verpackungsindustrie wurde von einem Trend zu nachhaltigen Verpackungen berichtet, der eine Nachfrage nach treibhausgasarmen Stählen im Bereich der Metallverpackungen schafft.
- ▶ Für die Automobilindustrie wurde berichtet, dass sich zahlreiche Hersteller Klimaschutzziele gesetzt haben, die zum Teil bereits von der Science-Based Targets Initiative auf ihre Paris-Kompatibilität geprüft wurden. Vor dem Hintergrund des Wandels zur Elektromobilität rückt daher die Treibhausgasbilanz der vorgelagerten Emissionen immer mehr in den Vordergrund. Deshalb fragen die Autohersteller ihre Zulieferer bereits jetzt nach der CO₂-Intensität der von ihnen gekauften Stähle und suchen nach Möglichkeiten, diese zu reduzieren.

3.4.4.4 Hinweise für Mehrpreisbereitschaft von Endkunden

Im ersten Stakeholder-Dialog (SD1, November 2021) wurde eine Analyse zum Thema Mehrpreisbereitschaft für grünen Stahl vorgestellt (aus dem BeWiSe-Projekt, Förderkennzeichen 03EW0002D). In der Analyse wurde eine repräsentative Umfrage von einem Marktforschungsinstitut zur Zahlungsbereitschaft von Endkunden für grünen Stahl für drei Produkte (Konservendose, Auto, Waschmaschine) durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit einer Conjoint-Analyse ausgewertet. Für alle drei Produkte wurde eine Zahlungsbereitschaft ermittelt, die höher war als die zusätzlichen Kosten für grünen Stahl. Dies deutet darauf hin, dass

die zusätzlichen Kosten für die Umstellung der Produktion zumindest teilweise durch höhere Endkundenpreise gedeckt werden könnten.

3.5 Maßnahmen

Der fünfte Themenblock des Roadmappings umfasste Maßnahmen zur Unterstützung des Transformationspfades. Ziel war es, Maßnahmen zu identifizieren, die Hemmnisse abbauen können und/oder Treiber verstärken. Dabei ging es nicht nur darum, neue Maßnahmen zu identifizieren, sondern auch darum, Meinungen zu bestehenden oder geplanten Maßnahmen einzuholen. Nachfolgend werden Maßnahmen erläutert, die während des Roadmappings besprochen worden sind.

3.5.1 Allgemeine Maßnahmen

Allgemeine Maßnahmen adressieren Aspekte, die sich (im Schwerpunkt) nicht auf ein einzelnes Hemmnis beziehen. Nachfolgende Abschnitte adressieren folgende Aspekte:

- ▶ Der regulatorische Rahmen (Fit für 55-Vorschläge) ist offen und befindet sich in der Findungsphase (Hemmnis). Nachfolgend wird erläutert, welche Probleme gesehen werden und dass daraus ein Überarbeitungsbedarf abgeleitet wird (Maßnahme).
- ▶ Für den Markthochlauf von treibhausgasarmem Stahl sind eine einheitliche Terminologie und Bilanzierungsmethoden hilfreich. Hier gibt es Handlungsbedarf (Hemmnis). Im Folgenden wird erläutert, dass ein koordinierter Ansatz hier helfen könnte (Maßnahme).
- ▶ Treibhausgasarmer Stahl ist wegen der höheren Produktionskosten teurer (Hemmnis). Um die Diffusion dennoch zu beschleunigen, können gezielt Leitmärkte gefördert werden, in denen günstige Rahmenbedingungen die Akzeptanz des Mehrpreises fördern (Maßnahme).

3.5.1.1 Eine Konkretisierung der „Fit für 55“-Vorschläge ist notwendig.

Das europäische Emissionshandelssystem ist das zentrale europäische klimapolitische Instrument und hat damit einen entscheidenden Einfluss auf die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Stahlhersteller in Europa. Im Rahmen des Fit-für-55-Pakets der Europäischen Kommission sind zahlreiche Überarbeitungen geplant, mit denen die Dekarbonisierung der Wirtschaft vorangetrieben werden soll. Die folgende Textbox fasst die Reformvorschläge zusammen, die für die Stahlindustrie besonders wichtig sind.

Hintergrund: Ff55 Vorschlag für CBAM und EU ETS⁴

Drei Punkte des Reformvorschlages sind von zentraler Bedeutung für die Stahlindustrie:

1. Die Verknappung der verfügbaren Zertifikate aufgrund der Verschärfung des Minderungsziels des EU ETS von 43 % auf 61 % im Jahr 2030 gegenüber 2005 und der Reformen der Marktstabilitätsreserve.
2. Die Ankündigung von technologieneutralen Benchmarks. Dies könnte im Zusammenhang mit der Stahlindustrie beispielsweise so interpretiert werden, dass für die Berechnung der freien Zuteilungen künftig Hochofenanlagen und DRI-Anlagen unter ein gemeinsames EU-ETS-Benchmark zusammengefasst werden.

⁴ Für EU ETS: <https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/revision-eu-ets-with-annex-en-0.pdf>
Für CBAM: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0564>

3. Der Rückgang an freien Zuteilungen durch die schrittweise Einführung des Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). Dieser soll ab 2026 um jährlich 10 Prozentpunkte eingeführt werden und erreicht somit im Jahr 2035 seine volle Wirkung. Die freien Allokationen werden vice versa in 10 Prozentpunktschritten in diesem Zeitraum zurückgefahren.

Während Punkt 1 hauptsächlich positiv auf den CO₂-Preis im Allgemeinen wirkt und somit im gesamten System zu höheren CO₂-Kosten führt, führen die Punkte 2 und 3 dazu, dass regulierte Stahlerzeugungsanlagen künftig signifikant weniger freie Zuteilungen erhalten könnten als dies in der dritten Handelsperiode des EU ETS der Fall war.

Geht man von einem gemeinsamen Benchmark für DRI und Hochöfen aus und bezieht eine DRI-Anlage in die Berechnung des Benchmarks für den Zeitraum 2026-2030 ein, so könnte die dadurch zustande kommende Absenkung des Benchmarks zu einer Verringerung der freien Zuteilungen im Zeitraum 2026-2030 von mehr als 30 % im Vergleich zur dritten Handelsperiode kommen. Sollten mehr als zwei DRI-Anlagen in die Berechnung einfließen dürfte die Verringerung 50 % im Vergleich zur dritten Handelsperiode betragen. Berücksichtigt man die gleichzeitige Einführung von CBAM, die ebenfalls eine Reduktion der freien Zuteilungen zur Folge hat (CBAM reduziert in diesem Zeitraum die freie Zuteilung im Durchschnitt um 30 %), könnte dies für die Stahlindustrie für den Zeitraum 2026-2030 einen Rückgang der freien Allokation im Durchschnitt von 50 %-65 % bedeuten. Für das Jahr 2030 wären es 65 %-75 %. Ob die zentrale Aufgabe der freien Allokation und des CBAM, der Carbon Leakage Schutz, damit sichergestellt werden kann, ist fraglich.

Die „Fit für 55“-Vorschläge zur Novellierung des Emissionshandels und zum Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) wurden mit der Kerngruppe in einem speziellen Workshop dazu (KGT 6, November 2021) und im Syntheseworkshop (KGT 7, November 2022) moderiert besprochen.

Ff55 Vorschläge für das EU ETS werden in der jetzigen Form als nicht hilfreich wahrgenommen.

In beiden Workshops gingen die Diskussionen in die Richtung, dass die geplanten Reformvorschläge eher als Hemmnis und weniger als hilfreiche Maßnahme für die Dekarbonisierung der Stahlindustrie gesehen wurden. Das Hauptargument war, dass die aktuellen Reformvorschläge die Wirtschaftlichkeit der bestehenden Anlagen (Hochöfen) zu schnell gefährden würden und dass dies dazu führen würde, dass die Wirtschaftlichkeit der Unternehmen insgesamt in Gefahr geriete. Unter anderem wurde auch der internationale Wettbewerb als Hemmnis angeführt. Insgesamt führe dies dazu, dass die Unternehmen derzeit vor zusätzlichen Großinvestitionen zögerten, die für Investitionen in DRI-Anlagen zur Umwandlung erforderlich sind. Unter dem Gesichtspunkt dieser Argumentation ermöglichen die Reformvorschläge in ihrer jetzigen Form also keine schrittweise Transformation, sondern hemmen sie eher. Hierbei wurde auch auf andere Studien verwiesen (vgl. WV Stahl (2022), Prognos et al. (2022), WV Stahl (2022)). Nachfolgend werden Kritikpunkte für spezielle Bereiche nochmal ausführlicher dargestellt.

- ▶ Es fehlt ein verlässlicher EU ETS-Rahmen.

Gegenwärtig ist kein ETS-Rahmen vorgesehen, der über den Zeithorizont von 2030 hinausgeht (z. B. keine Minderungsziele, kein Cap nach 2030) und eine Perspektive bis 2050 bietet. Dies hemmt möglicherweise Investitionen.

- ▶ Gemeinsame Benchmarks für DRI-Anlagen und Hochöfen werden kritisch gesehen.

Eine Überarbeitung der produktbezogenen Benchmarks für die Stahlindustrie hin zu gemeinsamen Benchmarks für Produkte aus DRI-Anlagen (Eisenschwamm) und Hochöfen

(Roheisen) wird kritisch gesehen. Einerseits werden hier zwar Vorteile für die DRI-Anlagen gesehen. Andererseits werden jedoch die Nachteile für die Wettbewerbsfähigkeit der Hochöfen und damit für die Wirtschaftlichkeit der Stahlunternehmen insgesamt als besonders kritisch betrachtet. Vor allem die außereuropäische Konkurrenz wird hierbei als großes Problem angesehen (Carbon Leakage Schutz). Sie würde von steigenden Produktionskosten europäischer Wettbewerber profitieren.

CBAM wird kritisch gesehen.

Um dem Problem des internationalen Wettbewerbs Rechnung zu tragen, hat die EU-Kommission den CBAM-Vorschlag entwickelt. Mittelfristig soll der CBAM das Hauptinstrument zum Schutz vor Carbon Leakage sein und die freien Zuteilungen zumindest in den Hauptbranchen des EU ETS ersetzen.

- ▶ CBAM kann zu unausgewogenen CO₂-Kosten führen.

Die ETS-Benchmarks folgen der Logik, dass sie sich an den besten Anlagen orientieren. Das bedeutet, dass die Architektur bei vielen Anlagen absichtlich eine gewisse Unterdeckung bei den kostenlosen Zuteilungen erreicht. Bei CBAM hingegen bezieht sich die Bemessungsgrundlage auf die tatsächlichen CO₂-Emissionen. Sofern CBAM also keinen Mechanismus zur Unterdeckung an der Grenze vorsieht (z. B. via Definitionen der „tatsächlichen“ Emissionen), kann ein Ungleichgewicht entstehen. In dem oben für die europäische Stahlindustrie skizzierten ungünstigen Fall beträgt der Rückgang der freien Allokationen für die europäischen Hochofenbetreiber im Zeitraum 2026-2030 maximal etwa 65 %, d. h. europäische Hochofenbetreiber müssten 100 minus 65 % der Zertifikate auf Auktionen oder dem Sekundärmarkt erwerben. An der Außengrenze der EU müssten die Importeure des außereuropäisch hergestellten Hochofenstahls im gleichen Zeitraum jedoch nur für durchschnittlich 30 % der in ihren Produkten enthaltenen Treibhausgas Zertifikate erwerben.

- ▶ CBAM führt zu Problemen bei Exporten.

Die Einführung von CBAM bei gleichzeitiger Reduzierung der freien Zuteilungen führt zu höheren Produktionskosten für europäische Stahlproduzenten und europäische Stahlverbraucher, d. h. Unternehmen, die Stahl zur Herstellung ihrer Produkte verwenden. Außereuropäische Wettbewerber haben diese Kosten nicht, was auf außereuropäischen Märkten ein Vorteil ist. Diese Tatsache bei den Exporten zu kompensieren ist WTO-rechtlich vermutlich nicht möglich. Es droht daher eine Abschottung und Gefährdung stahlbezogener Wertschöpfungsketten, möglicherweise auch eine Verlagerung von Carbon und Invest Leakage.

Aufgrund der oben genannten Probleme wurde auf dem Expertenworkshop zu „Fit für 55“ (KGT 6, November 2021) vorgeschlagen, für CBAM eine längere Vorlaufzeit mit einer längeren Testphase bis mindestens 2030 vorzusehen.

Insgesamt ergibt sich aus den Einschätzungen ein Bedarf an einer Konkretisierung und möglichen Überarbeitung der „Fit für 55“-Vorschläge.

3.5.1.2 Die Etablierung von Definitionen für grünen Stahl hilft dem Markthochlauf.

Als ein zentrales Hemmnis in den Workshops zu Leitmärkten (KGT4, KGT5, Juli & September 2021) kristallisierte sich heraus, dass es zwar Standards für die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen von Stahlwerken und Stahlprodukten gibt, allerdings ist unklar, ob diese auf dem Markt harmonisiert sind, d. h. ob es eine Vergleichbarkeit gibt. Darüber hinaus gibt es keine allgemein vereinbarte Definition von grünem Stahl. Dieses Hemmnis könnte durch die Einrichtung eines Koordinierungsprozesses beseitigt werden. In diesem Prozess sollten die

Akteure entlang der Wertschöpfungskette Informationen über die Grundlagen der Berechnung der Treibhausgasemissionen austauschen und sich auf gemeinsame Regeln einigen (z. B. in einer Art „Rule Book“). Ein weiteres Ergebnis eines solchen Prozesses könnte eine Definition von grünem Stahl sein. Wichtig dabei ist, dass ein solcher Koordinierungsprozess eine Schnittstelle mit der Initiative für nachhaltige Produkte (SPI) der Europäischen Kommission hat (vgl. Infobox). Denn die Entwicklung von Regeln für die Bilanzierung der Umweltauswirkungen von Produkten ist ein zentrales Element dieser Initiative. Die Berücksichtigung von SPI ist daher unerlässlich.

Hintergrund: Initiative für nachhaltige Produkte (Sustainable Products Initiative, SPI)

Im Rahmen der SPI-Initiative wird die Ökodesign-Richtlinie überarbeitet. Sie zielt darauf ab, die auf dem EU-Markt angebotenen Produkte nachhaltiger zu machen. Dabei wird ein Ökobilanz-Ansatz verwendet. Die Entwicklung von Methoden zur Bilanzierung der Umweltauswirkungen von Produkten ist daher ebenfalls im Fokus. Darüber hinaus spielt auch die Frage der Recyclingfähigkeit eine Rolle. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12567-Initiative-fur-nachhaltige-Produkte_de

3.5.1.3 Die koordinierte Schaffung von Leitmärkten hilft dem Markthochlauf.

Das „Klimaschutz Sofortprogramm 2022“ der Bundesregierung sieht die Schaffung eines Leitmarktes für grünen Stahl vor, z. B. in der Automobilindustrie. Im Falle der Stahl- und Automobilindustrie bestehen hier in Deutschland ideale Voraussetzungen, da in beiden Branchen schon jetzt Technologieführerschaft besteht. Es gilt jedoch diese in das neue Paradigma der dekarbonisierten Industrie 2050 mitzunehmen bzw. noch auszubauen. Der Zeitpunkt dazu ist günstig, da sich beide Branchen aktuell in einer Transformation befinden, die Automobilbranche hin zur Elektromobilität, multimodalen Mobilitätskonzepten und autonomem Fahren, die Stahlbranche hin zur Direktreduktion und anderen CO₂ reduzierenden Maßnahmen. Daher besteht berechtigte Hoffnung durch frühzeitige Lernprozesse Win-win-Konstellationen für beide Branchen und die Klimaziele zu erschließen.

Im Workshop zu Leitmärkten (KGT4, KGT5, Juli & September 2021) kristallisierte sich heraus, dass es beim Thema Leitmärkte nun darum geht den Ankündigungen zügig Taten folgen zu lassen. Hierfür muss zunächst das Hemmnis fehlender Definitionen abgebaut werden (vgl. vorheriger Abschnitt). Danach können weitere Prozesse zur Schaffung von Leitmärkten gezielt angestoßen werden. Dabei kann die Automobilbranche eine Vorreiterrolle einnehmen. Die Grundvoraussetzungen hierfür sind da. Da die Investitionsentscheidungen sowohl auf Seiten der Stahl- als auch auf Seiten der Automobilhersteller jetzt getroffen werden, sollte das „window of opportunity“ schnell genutzt werden.

Auch die öffentliche Beschaffung wird immer wieder als Ansatzpunkt für Leitmärkte genannt. Es ist jedoch unklar, an welchen Stellen die öffentliche Beschaffung einen direkten Einfluss auf den Einkauf von Stahl hat und welche Mengen betroffen wären. In einem Workshop wurde auf ein Projekt in den Niederlanden verwiesen, bei denen Nachhaltigkeitskriterien bei der Beschaffung von Stahl für Spundwände angewendet werden.

Ferner sind Entrepreneure bei der Schaffung von Leitmärkten hilfreich. Indem sie Investoren vernetzen und Produktionskapazitäten schaffen, treiben sie Leitmärkte voran. Institutionen, die Innovationen fördern (wie z. B. EIT InnoEnergy), könnten daher gezielt in die Entwicklung von Leitmärkten eingebunden werden.

Hintergrund: Leitmärkte

Leitmärkte sind ein nachfrageseitiges Instrument der Innovationspolitik. Sie bieten in frühen Phasen von Innovationsprozessen einen geschützten Raum, in dem neue Lösungen für den breiten Markt heranreifen können. Die Schaffung von Leitmärkten ist aber auch geeignet, um Transformationsprozesse zu beschleunigen. Dazu werden gezielt in bestimmten Anwendungsbereichen günstige Rahmenbedingungen für eine schnelle Diffusion nachhaltiger Produkte in die breite Anwendung geschaffen. Dies kann etwa durch Vorgabe von Abnahmequoten oder gezielte öffentliche Beschaffung geschehen. Dadurch wird für die Unternehmen Planungssicherheit für Investitionen in neue Anlagen geschaffen. Zudem werden Lernprozesse zwischen Anbietern und Abnehmern angestoßen, die eine rasche Etablierung der neuen Lösung fördern und Kosten schneller reduzieren. In Deutschland sind die Rahmenbedingungen für die Schaffung von Leitmärkten für treibhausgasarmen Stahl besonders günstig, weil sowohl auf Anbieter- als auch auf Abnehmerseite führende Unternehmen angesiedelt sind. Zudem befindet sich mit der Automobilindustrie eine maßgebliche Abnehmerbranche ebenfalls in einer Dekarbonisierungs-Transformation. Es liegt nahe diese Situation zu nutzen, um über Leitmärkte Lösungen zu fördern, die den Transformationsprozess auf beiden Seiten beschleunigen.

Typische Aspekte der Schaffung von Leitmärkten sind:

- Kostenvorteile durch hohe Nachfrage nach innovativen Produkten/Dienstleistungen (z. B. Abnahmequoten)
- Lernprozesse zwischen Vorreitern aus Anbieter/Kundenseite (z. B. in Reallaboren)
- Günstige Rahmenbedingungen durch frühe Regulation oder Normung
- Gezielte öffentliche Beschaffung und Investitionen z. B. im Rahmen von „Missionen“

3.5.2 Maßnahmen für den Bau neuer DRI-Anlagen

Der Bau neuer DRI-Anlagen, die mittel- bis langfristig mit Wasserstoff betrieben werden, ist ein wichtiger Hebel für die Dekarbonisierung der Stahlindustrie. Nachfolgend werden Maßnahmen erläutert, die dazu beitragen können, den Bau neuer DRI-Anlagen voranzutreiben.

- ▶ Klimaschutzverträge werden als wirksames Instrument gesehen, um in einer Übergangsphase dem Hemmnis höherer Betriebskosten (OPEX) zu begegnen.
- ▶ IPCEI-Projekte gehen das Problem der mangelnden Verfügbarkeit von Wasserstoff an, indem sie nationale Produktionskapazitäten und Infrastrukturen aufbauen. Die H2Global Initiative ergänzt dies durch die Beschaffung von grünem Wasserstoff auf internationalen Märkten.
- ▶ F&E-Förderung fördert die Umstellung auf die DRI-Route durch den Abbau technischer Hemmnisse.

3.5.2.1 Klimaschutzverträge werden als hilfreich und notwendig angesehen.

Ein zentrales Problem bei der Transformation der Stahlindustrie sind die deutlich höheren Betriebskosten der CO₂-armen Produktionsverfahren im Vergleich zu den derzeitigen, fossil basierten Verfahren. Klimaschutzverträge können hier helfen, indem sie diese zusätzlichen Kosten ausgleichen (siehe Infobox unten). Diese Tatsache wurde von der Politik erkannt. Deshalb wird unter der Federführung des BMWK gegenwärtig ein Pilotprogramm für Klimaschutzverträge entwickelt.

Hintergrund: Klimaschutzverträge

Klimaschutzverträge nutzen das Prinzip der Differenzkontrakte. Diese kommen aus der Finanzwelt. Sie werden verwendet, um sich gegen schwankende Preise abzusichern, z. B. bei Aktien oder Rohstoffen. Verkäufer und Käufer einigen sich auf einen Ausübungspreis für ein Produkt zu einem bestimmten Zeitpunkt. Liegt der Basispreis (strike price) unter dem aktuellen Marktpreis zu diesem Zeitpunkt, muss der Käufer die Differenz zwischen dem Basispreis und dem Marktpreis an den Verkäufer zahlen. Liegt der Marktpreis über dem Basispreis, muss der Verkäufer die Differenz an den Käufer zahlen. Klimaschutzverträge nutzen diesen Ansatz, um klimafreundliche Investitionen zu fördern, bei denen das Produkt im Prinzip vermiedene CO₂-Emissionen sind. Zu diesem Zweck werden die CO₂-Vermeidungskosten (in €/Tonne CO₂) für ein bestimmtes Projekt berechnet. Solange der CO₂-Preis niedriger ist als die Vermeidungskosten, erhält das Unternehmen einen Zuschuss, der die Differenz zwischen den Vermeidungskosten und dem CO₂-Preis abdeckt. Der Hintergrund ist, dass sich manche Investitionen nur lohnen, wenn der CO₂-Preis in der Zukunft hoch ist. Klimaschutzverträge verringern diese Unsicherheit und können somit Investitionen in neue Produktionsverfahren massiv unterstützen, zum Beispiel in der energieintensiven Industrie (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2021a).

Adressiertes Hemmnis: Höhere Betriebskosten (OPEX) hemmen die Marktdurchdringung von DRI.

Innerhalb des Projekts wurde die Maßnahme Klimaschutzverträge in einem besonders frühen Stadium diskutiert (KGT 2, Dezember 2020). Grundsätzlich war die Stimmung gegenüber dieser Maßnahme positiv, d.h. es herrschte Einigkeit in der Gruppe, dass diese Maßnahme hilfreich ist. Es wurde jedoch darauf hingewiesen, dass der Teufel im Detail steckt. Nachfolgend sind die Kommentare und Wünsche zur Gestaltung von Klimaschutzverträgen aufgeführt, die im Workshop erarbeitet wurden.

- ▶ Klimaschutzverträge könnten im Prinzip alle zusätzlichen Betriebskosten für die Produktion von CO₂-armem Stahl im Vergleich zur konventionellen Referenzroute abdecken.
 - Neben den volatilen CO₂-Preisen könnten z. B. auch die Preisunterschiede der Erze im Klimaschutzvertrag berücksichtigt werden, da in Direktreduktionsanlagen andere Erze eingesetzt werden als in der Hochofenroute.
 - Für die Betriebskosten der Referenzroute muss nicht auf wissenschaftliche Studien oder ein einziges typisches Werk zurückgegriffen werden. Die Betriebskosten der Referenzroute könnten werksspezifisch, ex-post und monatlich ermittelt werden, ggf. mit Unterstützung von Wirtschaftsprüfern.
- ▶ Klimaschutzverträge sollten (aus der Sicht der Stahlindustrie) langfristige Planungssicherheit geben, etwa 15-20 Jahre.
- ▶ Klimaschutzverträge sollten technologieoffen sein und das klare Ziel der CO₂-Reduktion verfolgen.

3.5.2.2 Der IPCEI für Wasserstoff ist zentral für den Aufbau der Infrastruktur

Ein wesentlicher Teil des Transformationspfads zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie besteht darin, Hochöfen mittelfristig durch Direktreduktionsanlagen zu ersetzen, die auf lange Sicht mit Wasserstoff betrieben werden sollen. Eine Voraussetzung dafür ist die Schaffung von Wasserstoffproduktionskapazitäten und der entsprechenden Infrastruktur. IPCEI sind ein Ansatzpunkt dafür.

Hintergrund: IPCEI

Die Important Projects of Common European Interest (IPCEI) sind strategische Förderprojekte der Europäischen Kommission unter dem Dach der Generaldirektion Binnenmarkt, Industrie, Unternehmertum und KMU für Innovationen. IPCEI sollen ein Marktversagen oder andere wichtige Systemfehler in einem europäischen Kontext auf der Grundlage gemeinsamer europäischer Interessen beheben. IPCEI sollen vor allem i) einen wesentlichen Beitrag zu strategischen EU-Zielen leisten, ii) mehrere EU-Länder einbeziehen, iii) eine private Finanzierung durch die Begünstigten beinhalten und positive Spillover-Effekte in der gesamten EU erzeugen. Im Falle von Innovationsprojekten müssen sie einen bedeutenden innovativen Charakter haben und über den Stand der Technik in dem betreffenden Sektor hinausgehen (vgl. EC (2021)).

Seit 2021 befindet sich IPCEI zum Thema Wasserstoff in der Realisierungsphase. Deutschland hat bereits 62 Projekte ausgewählt, wobei Primärstahlhersteller in zahlreichen Projekten beteiligt sind (BMWK 2021).

Adressiertes Hemmnis: Die Wasserstoffverfügbarkeit ist noch nicht ausreichend.

Anmerkungen zum IPCEI wurden vor allem während des Syntheseworkshops (KGT 7, Februar 2022) vorgebracht. Es werden viele Hoffnungen in die IPCEI-Projekte gesetzt. Für die Stahlindustrie geht der Prozess jedoch teilweise zu langsam voran (z. B. das Thema Notifizierung) vor allem, weil viele Anlagen bis 2030 umgerüstet werden müssen.

3.5.2.3 Der Import von günstigem Wasserstoffimporte senkt Einstiegshürde.

Die Verfügbarkeit von (möglichst grünem) Wasserstoff ist eine Einstiegshürde für die DRI-Technologie (Interviews mit Stahlproduzenten, November 2021). Dem kann entgegengewirkt werden, indem zusätzlich zu den nationalen Bezugsquellen auch internationale Bezugsquellen erschlossen werden (siehe Abschnitt über IPCEI). Zu diesem Zweck wurde bereits die Initiative H2Global entwickelt.

Hintergrund: H2Global

Grüner Wasserstoff wird eine zentrale Rolle bei der Transformation der Wirtschaft in Richtung Treibhausgasneutralität spielen. Neben der eigenen Produktion wird Deutschland voraussichtlich auch auf Importe angewiesen sein. Hier kommt H2Global ins Spiel, das den internationalen Hochlauf der Wasserstoffwissenschaft beschleunigen soll. Das Herzstück von H2Global ist das Doppelauktionsmodell. Zu diesem Zweck wurde HINT.CO, eine Tochtergesellschaft der H2Global Stiftung, gegründet. Über HINT.CO werden Wasserstoff oder Wasserstoffderivate aus Nicht-EU-Ländern mit 10-Jahres-Verträgen (über Auktionen) zum niedrigstmöglichen Preis gekauft. Die gekauften Mengen werden wiederum über Auktionen deutschen und europäischen Unternehmen angeboten. HINT.CO startet mit einem zweckgebundenen Zuschuss von 900 Millionen Euro, den es vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz erhalten hat.

(<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2021/12/20211223-900-millionen-euro-fuer-wasserstoffprojekt-h2global.html>)

3.5.2.4 F&E ist an zahlreichen Stellen notwendig.

Die erdgasbetriebene Direktreduktion ist Stand der Technik. Obwohl die wasserstoffbetriebene Direktreduktion mit der erdgasbetriebenen Direktreduktion vergleichbar ist, gibt es Unterschiede, z. B. beim Reaktionsverhalten. Deshalb müssen nach Ansicht der Stahlproduzenten F&E-Mittel zur Verfügung gestellt werden, um den Betrieb der Direktreduktion mit Wasserstoff zu erforschen (Interviewreihe mit Stahlproduzenten,

November 2021). Darüber hinaus ergeben sich aus der Umstellung auf Direktreduktionsanlagen weitere Themen, die erforscht werden müssen. Einige Forschungsthemen sind unten nochmal exemplarisch aufgeführt

- ▶ Betrieb von Direktreduktionsöfen mit Wasserstoff.
- ▶ Erforschung des Betriebs von Direktreduktionsöfen ohne hochreine Erze.
- ▶ Erforschung der Nutzung von Schlacken aus Elektroöfen
- ▶ usw...

3.5.3 Maßnahmen zur Erhöhung des Schrotteinsatzes

Die Erhöhung des Schrotteinsatzes ist ein wichtiger Hebel zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie. Maßnahmen, die zu einer Erhöhung beitragen können, werden nachfolgend erläutert.

3.5.3.1 Forschung im Bereich Schrottaufbereitung hilft Engpässe zu verkleinern.

Die mangelnde Verfügbarkeit von Schrott in geeigneten Qualitäten wurde als einer der größten Engpässe für die Steigerung des Schrottrecyclings genannt (WS 1, April 2021). Folglich ist die Erforschung technologischer, prozessbezogener aber auch regulativer Verbesserungspotenziale eine Maßnahme, um Engpässe zu verringern.

Adressiertes Hemmnis: Mangel an Schrotten in geeigneter Qualität.

- ▶ Im Bereich der Technologie liegt der Schwerpunkt beispielsweise auf neuen Schrottverarbeitungs Konzepten. Ein Beispiel dafür ist das Projekt „REDERS“ (Reduzierte CO₂-Emissionen durch Erhöhung der Recyclingquote bei der Stahlherstellung).
- ▶ Im Bereich der Prozessverbesserungen liegt der Schwerpunkt auf der möglichst bedarfsgerechten Steuerung der Schrottstoffströme, z. B. indem hochwertiger Schrott dort eingesetzt wird, wo er tatsächlich gebraucht wird (intelligentes Stoffstrommanagement).

3.5.3.2 Überprüfung des regulativen Rahmens hilft Geschäftsmodelle zu etablieren.

Als weitere Hemmnisse für eine stärkere Nutzung von Schrott wurden möglicherweise fehlende Deponiekapazitäten und die Tatsache genannt, dass sich eine bessere Aufbereitung nicht immer lohnt (WS 1, April 2021). Hier bietet es sich an den Rahmen zu überprüfen. Was könnte z. B. konkret geändert werden, damit sich eine bessere Aufbereitung für die Betreiber von Schredderanlagen lohnt? Bedarf es Förderung? Sind Anpassungen am regulativen Rahmen notwendig? Usw.

3.5.3.3 Produktregulierung kann helfen die Sortierbarkeit zu verbessern.

Mangelnde Recyclingfähigkeit von Produkten ist ein Hemmnis, das sich letztlich indirekt auf die Verfügbarkeit von Schrott in geeigneten Qualitäten auswirkt. Dem kann durch Produktregulierung entgegengewirkt werden.

Ein Ansatzpunkt ist hier die Sustainable Products Initiative (SPI) der Europäischen Kommission. Hier gilt es, die Anliegen der Schrottindustrie aktiv zu kommunizieren, damit diese in der Initiative berücksichtigt werden können.

3.5.4 Flankierende Maßnahmen

Die Diskussion zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie fokussiert sich stark auf den Ersatz von Hochöfen durch treibhausgasärmere Verfahren, wie z. B. die Wasserstoffdirektreduktion. Das Thema der Dekarbonisierung des Elektrostahlverfahrens rückt dabei mitunter in den Hintergrund (KGT7, Februar 2022). Dies kommt daher, dass das Elektrostahlverfahren aufgrund des hohen Schrotteinsatzes und der geringeren Energieintensität deutlich weniger treibhausgasintensiv ist als das Hochofenverfahren. Außerdem wird im Elektrolichtbogenofen überwiegend elektrische Energie verwendet. Das übergreifende Ziel der Bundesregierung, die Stromerzeugung langfristig zu dekarbonisieren, greift hier also indirekt.

3.5.4.1 Entwicklungshilfe im Bereich Schrottwirtschaft als Ressourcenquelle.

Prognosen deuten darauf hin, dass vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern ein massiver Anstieg der verfügbaren Schrottmengen zu erwarten ist. Proaktive Entwicklungszusammenarbeit könnte sinnvoll sein, um den Aufbau einer hochwertigen Schrottwirtschaft in diesen Ländern zu unterstützen (z. B. über GIZ-Projekte). Dies könnte die weltweite Verfügbarkeit von hochwertigem Schrott erhöhen und möglicherweise indirekt den nationalen Transformationszielen dienen.

3.5.4.2 H2Global ausweiten auf Import von grünem Eisenschwamm.

Für die Produktion von grünem Wasserstoff können die Standortbedingungen (Fläche, Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien usw.) in anderen Ländern deutlich besser sein als in Deutschland. H2Global versucht, dies auszunutzen, um grünen Wasserstoff so günstig wie möglich zu beschaffen.

Grundsätzlich wäre es denkbar, den Mechanismus von H2Global nicht nur für den Import von grünem Wasserstoff, sondern auch für den Import von grünem Eisenschwamm zu nutzen. In dieser Konstellation würde sich der inländische Wasserstoffbedarf verringern. Die Stahlunternehmen könnten den Eisenschwamm direkt verarbeiten. Hierbei ist zu beachten, dass die Stahlunternehmen ohnehin große Mengen an Rohstoffen aus dem Ausland importieren (Erze, Kohle, etc.).

Im Syntheseworkshop (KGT 7, Februar 2022) und im Stakeholderdialog II (SD II, Juni 2022) wurden diese Optionen jedoch sehr kontrovers diskutiert. Einerseits wurde auf die Chancen aus der Systemperspektive hingewiesen, z. B. die Nutzung günstiger Bedingungen im Ausland, mögliche Risikodiversifizierung durch mehr Lieferanten usw. Andererseits wurde auf die Gefahren für die Stahlindustrie hingewiesen, da diese Option dazu führen könnte, dass die deutsche Stahlindustrie insgesamt überflüssig wird. Zudem könnten auch die Kunden Ihre Produktion dann aus Deutschland verlagern.

3.5.5 Synthese zu Politikinstrumenten

Viele der in den vorherigen Abschnitten aufgeführten Maßnahmen zielen auf Politikinstrumente ab. Das folgende Schaubild strukturiert diese Instrumente und fasst die Kommentare und Einschätzungen zusammen, die sich aus dem Roadmapping ergeben haben. Die Struktur basiert auf Vogl et al. (2020), die Instrumente zur Unterstützung der Markteinführung von grünem Stahl in drei Kategorien unterteilen.

Die erste Kategorie bezieht sich auf **regulatorische Maßnahmen**. Diese können zum einen auf der **Angebotsseite** (d.h. bei den Stahlproduzenten) ansetzen. Dies umfasst auch Maßnahmen, die den Zugriff der Stahlproduzenten auf CO₂-arme Rohstoffe, Energie und die notwendigen Infrastrukturen beeinflussen. Andere regulatorische Maßnahmen greifen auf der

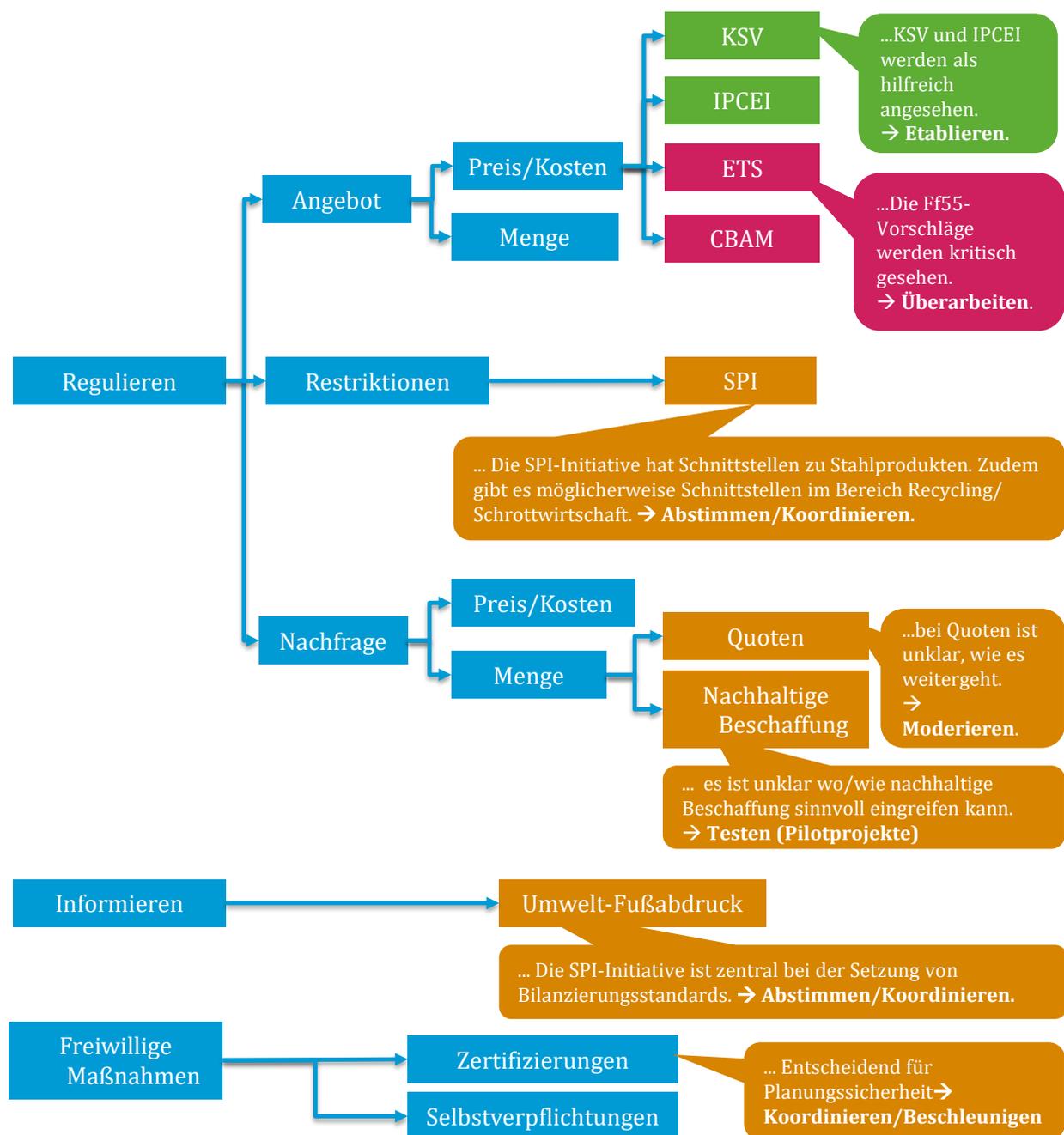
Nachfrageseite d. h. bei den Abnehmern von Stahl, z. B. der Automobilindustrie. Auf der Angebots- und/oder Nachfrageseite können wiederum Instrumente eingesetzt werden, die den **Preis oder die Kosten** beeinflussen. Zum Beispiel können die Herstellungskosten für grünen Stahl bei den Stahlproduzenten gesenkt werden. Darüber hinaus können Instrumente eingesetzt werden, um die **Menge** zu beeinflussen. Zum Beispiel kann ein Stahlproduzent verpflichtet werden, eine bestimmte Menge Grünstahl auf den Markt zu bringen, oder ein Nachfrager muss eine bestimmte Menge an grünem Stahl abnehmen.

- ▶ Auf der Angebotsseite befassen sich die wichtigsten derzeit politisch diskutierten Instrumente mit den Kosten. Dazu zählen die „Fit für 55“ (Ff55)-Vorschläge zur Überarbeitung des ETS und zum CBAM, das vom BMWK geplante Pilotprogramm für Klimaschutzverträge und das IPCEI Hydrogen. Auch die in diesen Regulierungen genutzten Zertifizierungssysteme, sowohl für grünen Wasserstoff als auch für Stahl, gehören in diesen Kontext.
- ▶ Als regulatorische Maßnahme, die auf die Menge zielt, ist die Sustainable Products Initiative (SPI) zu nennen, die zahlreiche Schnittstellen mit der Stahlindustrie haben könnte, indem sie den Zugang zu dem wichtigen Rohstoffschrott verbessert.
- ▶ Auf der Nachfrageseite konzentriert sich die politische Diskussion derzeit auf Maßnahmen, die die Menge adressieren. Das Klimaschutzprogramm der Bundesregierung schlägt zum Beispiel vor, einen Leitmarkt für grünen Stahl zu schaffen. Quoten sind eine Möglichkeit dafür. Auch das öffentliche Beschaffungswesen wird als mögliches Handlungsfeld für einen Leitmarkt diskutiert. Indirekt werden durch solche Maßnahmen auch die Kosten gesenkt, da Lernprozesse beschleunigt werden.

Die zweite Kategorie bezieht sich auf **informative Instrumente**. Das können Instrumente sein, die dazu verpflichten, Informationen über Produkte zu kommunizieren (z. B. Energieeffizienzkennzeichnungen). Im Fall der Stahlindustrie ist auch hier die SPI-Initiative ein Ansatzpunkt, denn in diesem Rahmen werden Methoden zur Bilanzierung der Umweltauswirkungen von Produkten entwickelt.

Die dritte Kategorie bezieht sich auf **freiwillige Instrumente**. Das sind z. B. solche Maßnahmen, bei denen Unternehmen ihre Produkte freiwillig kennzeichnen (z. B. durch Zertifizierung) oder sich freiwillig zu bestimmten Zielen verpflichten.

Abbildung 19: Politikinstrumente

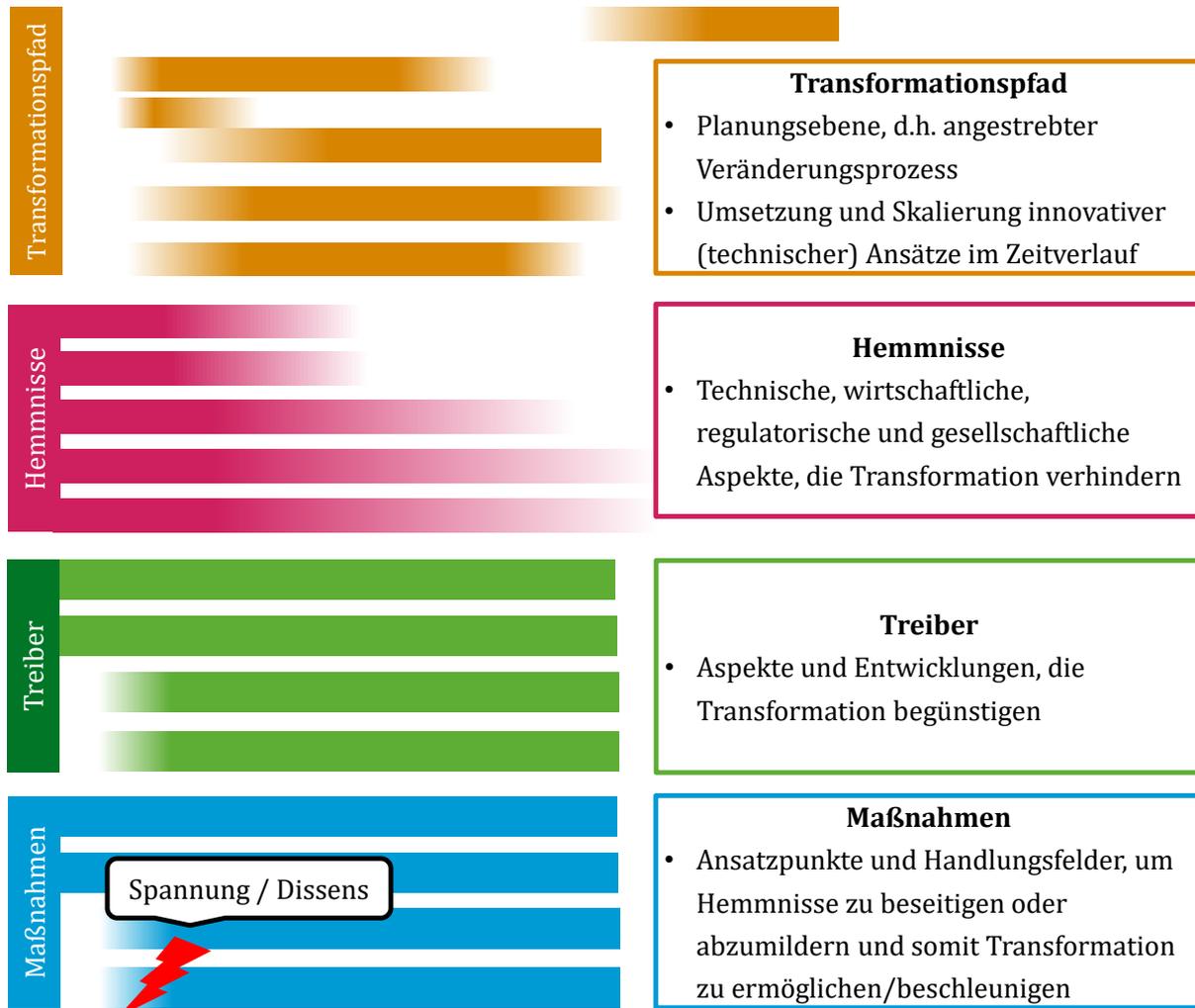


Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

4 Eckpunkte für die Roadmap

Nachfolgend wird der in Kapitel 3 entwickelte generische Transformationspfad (d. h. die gewünschte Entwicklung) in Kontext mit den erarbeiteten Hemmnissen, Treibern und Maßnahmen gestellt. Hierbei werden den Maßnahmen Akteursgruppen zugewiesen, die diese umsetzen könnten. Die Darstellungen erfolgen differenziert nach verschiedenen Themen in einer Zeitleiste. Dafür wird das nachfolgend dargestellte Farbschema verwendet. Die Quintessenz der Darstellungen wird abschließend kurz und prägnant in Stichpunkten erläutert.

Abbildung 20: Roadmap Eckpunkte Legende



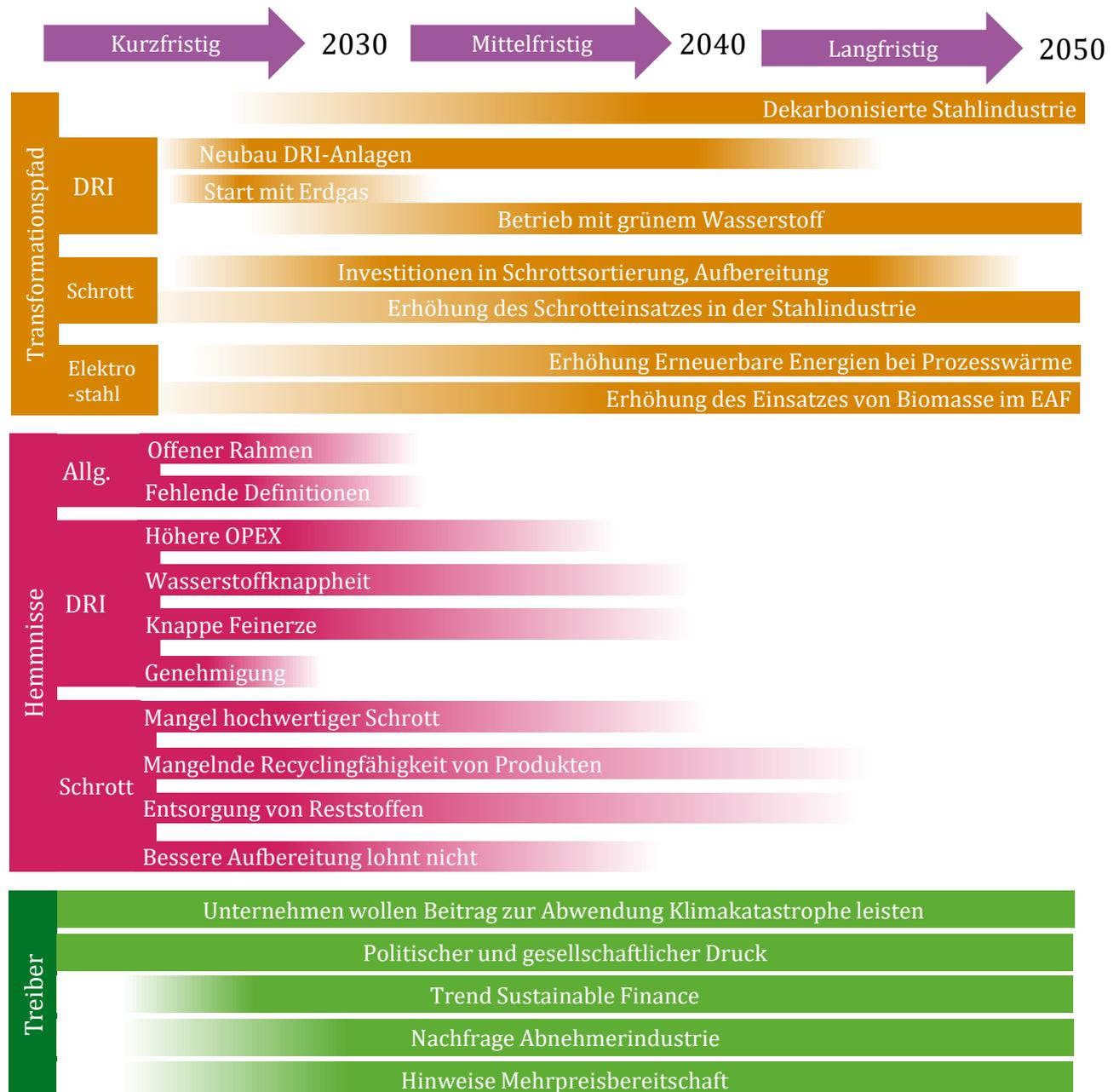
Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI.

4.1 Ausgangssituation

Nachfolgende Grafik zeigt die Ausgangssituation. Zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie wird vor allem auf den Neubau von DRI-Anlagen gesetzt. Diese werden langfristig mit grünem Wasserstoff betrieben. Außerdem wird der Einsatz von Schrott erhöht. Der noch offene Rahmen (z. B. „Fit für 55“...) und das Fehlen von Definitionen für „grünen“ Stahl hemmen den Wandel zur Treibhausgasneutralität. Insbesondere für DRI-Anlagen sind höhere Betriebskosten ein entscheidendes Hemmnis, das es zu überwinden gilt, ebenso wie die Ressourcenknappheit (Wasserstoff und Erze). Darüber hinaus können Genehmigungsverfahren eine verzögernde Wirkung haben. Daher wurden keine quantitativen Ziele für den Ausbau vorgesehen. Im

Hinblick auf den höheren Einsatz von Schrott ist der Mangel an hochwertigem Schrott das Haupthemmnis. Das liegt unter anderem an fehlenden Geschäftsmodellen für eine bessere Aufbereitung und an der mangelnden Recyclbarkeit von Produkten. Angetrieben wird die Dekarbonisierung der Stahlindustrie von den Unternehmen selbst, aber vor allem durch politischen und gesellschaftlichen Druck. Flankiert wird dies durch einen Trend zur nachhaltigen Finanzierung im Finanzsektor und eine steigende Nachfrage auf Kundenseite nach „grünem“ Stahl. Auch die Endkunden können ein treibender Faktor sein. Eine erste Studie deutet darauf hin, dass sie bereit sind, mehr für „grünen Stahl“ zu bezahlen.

Abbildung 21: Roadmap Eckpunkte Ausgangssituation

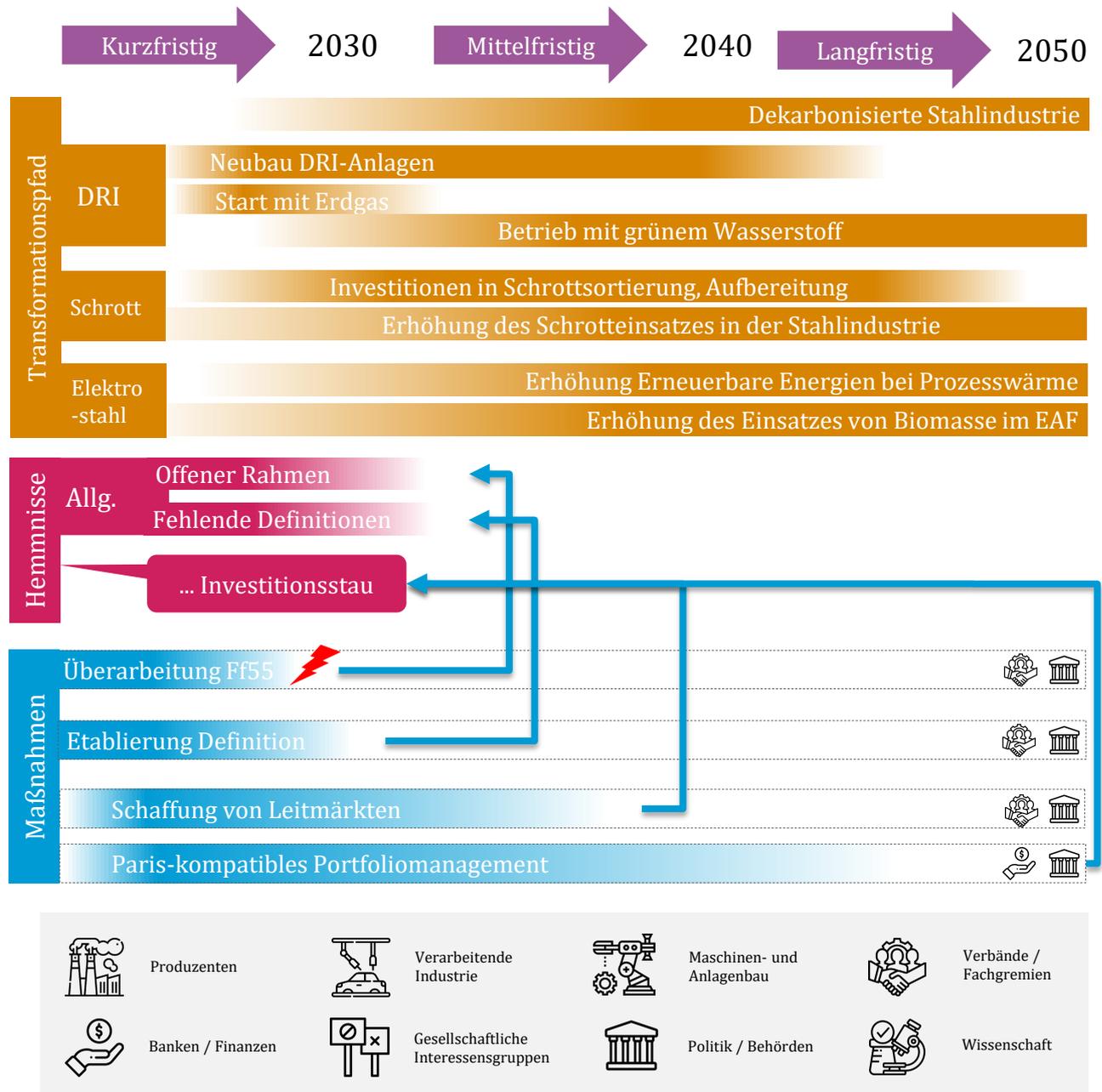


Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

4.2 Eckpunkte für allgemeine Maßnahmen

Folgende Grafik hebt allgemeine Maßnahmen hervor, die sich aus dem Roadmapping ergeben.

Abbildung 22: Roadmap Eckpunkte übergreifend



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

1. Eine Überarbeitung oder Konkretisierung der „Fit für 55“-Vorschläge ist notwendig. Die gegenwärtigen Vorschläge lassen an zahlreichen Stellen Interpretationsspielraum zu. Dazu kann es unterschiedliche Meinungen und Sichtweisen geben. Deshalb ist dieser Punkt mit einem Blitz markiert.
2. Die Etablierung von Definitionen für grünen Stahl ist hilfreich für die Dekarbonisierung. Hierbei geht es vor allem darum, einheitliche Standards für die Bilanzierung der CO₂-Intensität von Stahlprodukten zu schaffen, die vom Markt akzeptiert werden. Ein

Koordinierungsprozess entlang der Wertschöpfungskette wäre ein geeigneter Ansatz, um dies zu erreichen.

3. Es werden große Hoffnungen in die Schaffung von Leitmärkten gesetzt, die helfen, notwendige Investitionen in neue treibhausgasarme Produktionsanlagen zu erleichtern. Hierauf wird in einem späteren Abschnitt näher eingegangen.
4. Der Finanzsektor, insbesondere Banken, spielen eine zentrale Rolle bei der Dekarbonisierung. Ein aktives Portfoliomanagement mit Blick auf Paris-Kompatibilität kann bei der Transformation der Stahlindustrie helfen.

Nachfolgende Tabelle zeigt wichtige Akteure für allgemeine Maßnahmen und erläutert deren Rolle.

Tabelle 3: Akteure für allgemeine Maßnahmen

	 Politik	 Verbände	 Banken	Maßnahme
„Fit für 55“-Vorschläge	Überarbeiten	Aktiv einbringen		Die Politik konkretisiert die „Fit für 55“-Vorschläge, Verbände bringen sich konstruktiv in den Prozess ein.
Definition	Entwerfen	Entwerfen		Fachverbände und Politik arbeiten gemeinsam eine Definition für grünen Stahl aus.
Leitmärkte	Konkretes Konzept skizzieren	Analyse: welche Märkte?		Die Politik skizziert einen konkreten Plan für Leitmärkte. Hierbei werden Verbände und Abnehmer eingebunden.
Banken/Portfolio	Setzt Rahmen		Invest-Verhalten ändern	Banken verändern ihr Investitionsverhalten und helfen so beim Umbau, indem Sie Marktsignale setzen.

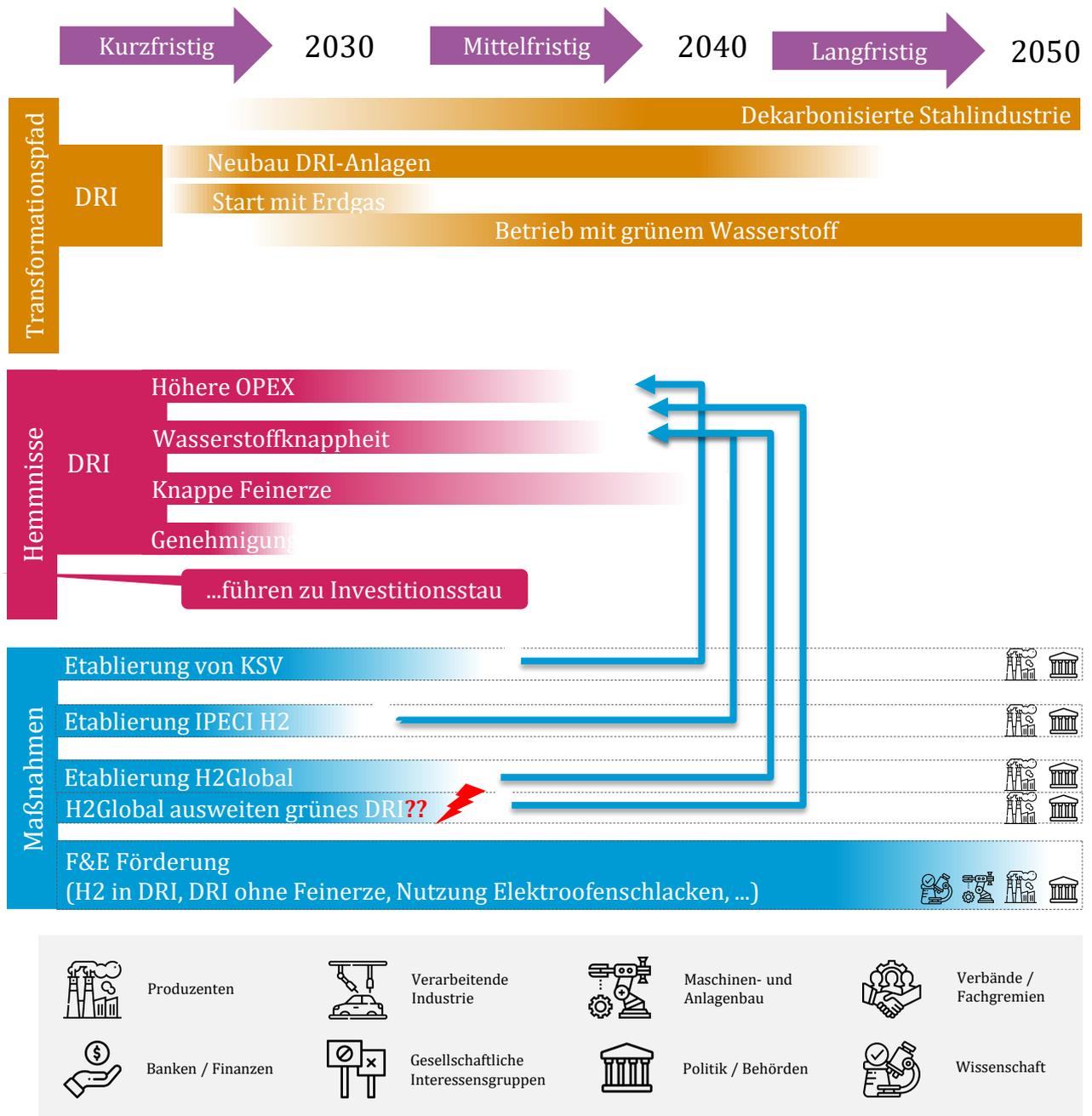
4.3 Eckpunkte für einen Ausbau der DRI-Route

Abbildung 23 hebt DRI-bezogene Maßnahmen hervor. Nachfolgendes ist zu sehen:

1. Klimaschutzverträge werden als wirksames Instrument gesehen, um dem Hindernis höherer Betriebskosten (OPEX) zu begegnen. Eine entsprechende Förderrichtlinie ist vom BMWK geplant.
2. IPCEI Hydrogen wird als ein wichtiges Instrument angesehen, um den Hochlauf der Wasserstoffproduktion und -infrastruktur in Stahlwerken zu fördern. Projektvorschläge mit Bezug zur Stahlindustrie wurden bereits vom BMWK ausgewählt. Der nächste Schritt ist die Prüfung der Projekte durch die Europäische Kommission (Notifizierung).
3. Die Versorgung mit grünem Wasserstoff über internationale Märkte wird als notwendig erachtet. Die vom BMWK geförderte ist hier ein Ansatzpunkt. In diesem Zusammenhang könnte auch geprüft werden, ob die Initiative auf den Import von „grünem“ Eisenschwamm ausgeweitet werden könnte. Dies könnte die Transformation der Stahlindustrie beschleunigen. Allerdings werden hier auch große Gefahren für den Erhalt der deutschen Stahlindustrie gesehen, weswegen dies sehr kontrovers diskutiert wurde.
4. Bei der Umstellung auf die DRI-Route besteht an zahlreichen Stellen Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Während DRI-Prozesse mit Erdgas Stand der Technik sind, ist der reine Betrieb mit Wasserstoff Neuland. Außerdem stellen sich zahlreiche weitere Fragestellungen,

wie zum Beispiel der Betrieb von DRI-Anlagen mit weniger Feinerze oder die Erforschung der Verwendung von Elektroofenschlacken.

Abbildung 23: Roadmap Eckpunkte DRI-Route



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

Nachfolgende Tabelle zeigt wichtige Akteure für Maßnahmen für die DRI-Route und erläutert deren Rolle.

Tabelle 4: Akteure für den DRI-Ausbau

	 Politik	 Produzenten	 Wissenschaft  Anlagenbau	Maßnahme
Klima-schutz-verträge	Einführen	Bewerben/ mitbieten		Ein Entwurf für eine Förderrichtlinie liegt vor, die Veröffentlichung ist 2023 anvisiert.
IPCEI H2	Einführen	Projektskizze einreichen		Projekte wurden ausgewählt und sind nun in der Notifizierung der Europäischen Kommission. ¹
H2Global	Einführen	Grünes H2 kaufen		Die Initiative wurde bereits mit Kapital ausgestattet und gestartet. Lieferungen werden 2024 erwartet. ²
F&E Förderung	F&E Fördern	Forschen	Forschen	F&E zur Umstellung auf Direktreduktion durch anwendungsbezogene Auftragsforschung und/oder auch in gemeinsam finanzierten Projekten. ³

¹ Ein Projekt aus dem Stahlsektor ist bereits notifiziert (SALCOS® - Salzgitter Low CO2Steelmaking).

² Offen ist, ob H2Global auch auf den Import von „grünem Eisenschwamm“ ausgeweitet werden könnte/sollte. Dies sollte geprüft werden.

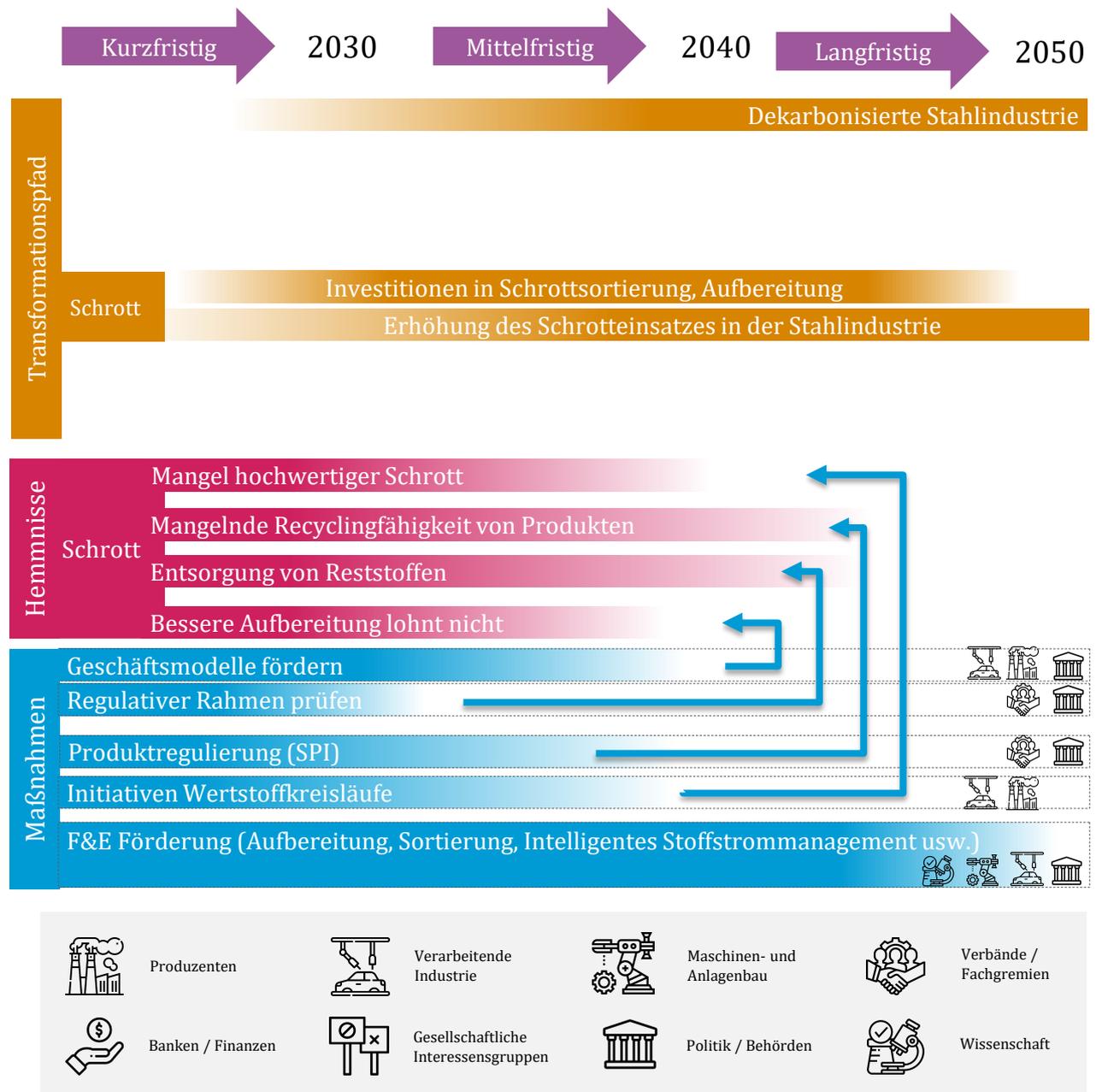
³ Z. B. durch das Programm „Dekarbonisierung in der Industrie“.

4.4 Eckpunkte für einen höheren Schrotteinsatz

Abbildung 24 zeigt Maßnahmen zur Steigerung des Schrotteinsatzes. Nachfolgende Quintessenzen sind dort dargestellt.

1. Das zentrale Hemmnis für die verstärkte Nutzung von Schrott in der Stahlindustrie ist ein Mangel an Schrotten geeigneter Qualität. Das liegt zum Teil daran, dass eine bessere Schrottaufbereitung nicht immer rentabel ist. Dem kann entgegengewirkt werden, indem Geschäftsmodelle für eine bessere Aufbereitung gefördert werden (z. B. mit Ansätzen, die mit Klimaschutzverträgen vergleichbar sind). Außerdem kann der regulative Rahmen geprüft werden, um herauszufinden, ob weitere Hemmnisse beseitigt werden können.
2. Dem Mangel an hochwertigem Schrott könnte teilweise durch Produktregulierung entgegengewirkt werden. Hier müssen die Belange der Stahlindustrie und der Schrottwirtschaft an geeigneter Stelle eingebracht werden, z. B. im Rahmen der Sustainable Products Initiative (SPI).
3. F&E-Förderung hilft in zahlreichen Bereichen. Zum Beispiel bei der Erforschung von Aufbereitungs- und Sortiertechnologien oder einem intelligenten Stoffstrommanagement.

Abbildung 24: Roadmap Eckpunkte Schrotteinsatz



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

Nachfolgende Tabelle zeigt wichtige Akteure für Maßnahmen für die Erhöhung des Schrottanteils und erläutert deren Rolle.

Tabelle 5: Akteure für einen höheren Schrotteinsatz

	Politik 	Produzenten  Abnehmer 	Verbände 	Wissenschaft  Anlagenbau 	Maßnahme
Geschäftsmodelle	Fördern	Mit Recyclern zusammenarbeiten			Stahlverarbeiter, Produzenten und Recycler suchen nach Geschäftsmodellen mit mehr Recycling ¹ ; die Politik unterstützt dies.
Regulativer Rahmen	Prüfen		Beobachten & Beraten		Die Politik prüft ob und wie der regulative Rahmen für mehr Recycling angepasst werden kann. ²
Produktregulierung	Prüfen		Beobachten & Beraten		Die Politik prüft, ob und wie Produktregulierung zu mehr Stahlrecycling führen können. ³
Initiativen für Wertstoffkreisläufe		Zusammenschließen			Stahlhersteller und Stahlabnehmer schließen sich zusammen, um Wertstoffkreisläufe zu schließen. ⁴
F&E Förderung	F&E Fördern	Forschen		Forschen	F&E zu Anlagen im Bereich Schrottsortierung und -aufbereitung sowie intelligentem Stoffstrommanagement

¹ Z. B. das Projekt REDERS, in dessen Rahmen eine neue Stahlschrottaufbereitungsanlage entsteht, die den Recyclinganteil bei der Stahlproduktion erhöhen soll.

² Z. B. wurde in mehreren Workshops ein Mangel an Deponiekapazitäten als ein mögliches Hemmnis für mehr Recycling genannt. Solche Dinge gilt es zu prüfen.

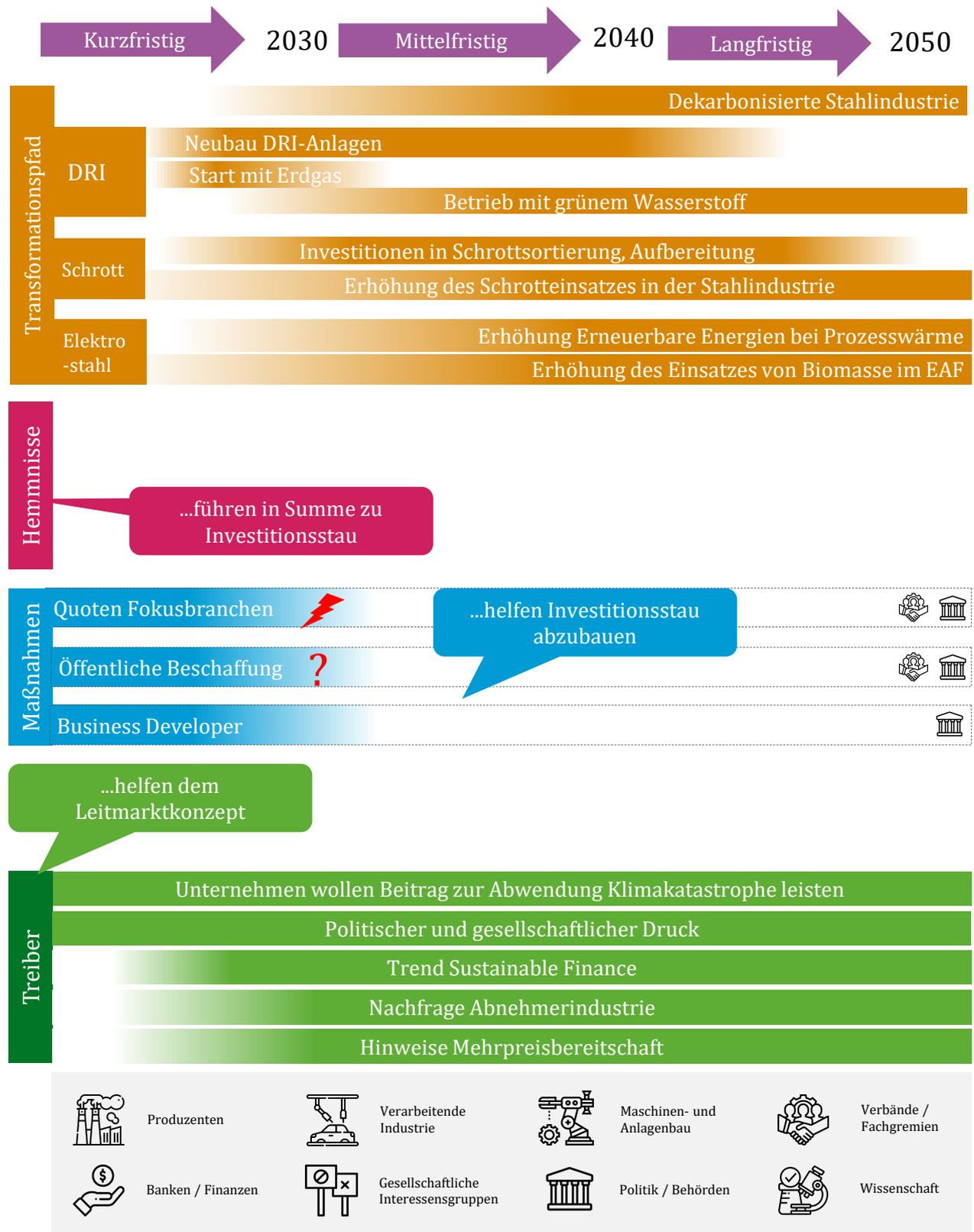
³ Z. B. im Rahmen der geplanten Überarbeitung der Ökodesignrichtlinie (Sustainable Products Initiative) der Europäischen Kommission.

⁴ Z. B. haben sich VW und Salzgitter zusammengeschlossen, um Wertstoffkreisläufe zu schließen.

4.5 Eckpunkte für die Schaffung von Leitmärkten

Nachfolgende Abbildung zeigt Maßnahmen zur Schaffung von Leitmärkten.

Abbildung 25: Roadmap Eckpunkte Leitmärkte



Quelle: eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

1. Quoten in Schwerpunktbranchen, wie z. B. der Automobilindustrie sind ein Ansatzpunkt, um Leitmärkte für „grünen“ Stahl zu schaffen. Allerdings werden Quotenregelungen kontrovers gesehen, da die Abnehmerindustrien eine andere Sichtweise auf das Thema haben können. Hier gilt es, die Interessen anzugleichen.
2. Die öffentliche Beschaffung wird immer wieder als Ansatzpunkt für Leitmärkte genannt. Es ist jedoch unklar, in welcher Form die öffentliche Beschaffung einen direkten Einfluss auf die Stahlbeschaffung haben kann. Pilotprojekte können hier helfen.
3. Der Aufbau von Organisationen, deren Aufgabe es ist, Innovation und Investitionen für die Transformation zu fördern, kann den Wandel beschleunigen. Sie vernetzen zum Beispiel Investoren und treiben so den Markt voran. Beispiele sind die Bundesagentur für Sprunginnovationen oder das EIT InnoEnergy.

Nachfolgende Tabelle zeigt wichtige Akteure für Maßnahmen für die Erhöhung des Schrottanteils und erläutert deren Rolle.

Tabelle 6: Akteure für Leitmärkte

	 Politik	 Verbände	Maßnahme
Instrumente für Leitmärkte?	Entwickeln	Beraten	Bislang ist unklar, in welcher Form Leitmärkte für grünen Stahl geschaffen werden sollen. Mitunter werden Quoten vorgeschlagen, die jedoch auch Gegenstand kontroverser Diskussionen sind. Politik und Verbände sind aufgerufen, Lösungen zu entwickeln.
Öffentliche Beschaffung	Pilotprojekte konzipieren	Beraten	Die öffentliche Beschaffung wird immer wieder als Ansatzpunkt für Leitmärkte genannt. Es ist jedoch unklar, wie dies umgesetzt werden kann. Pilotprojekte können hier helfen.
Business Developer	Ausbauen/ Unterstützen		Die Politik könnte verstärkt Organisationen gründen und/oder erweitern, dessen Ziel es ist Innovationen in den Markt zu bringen und Investitionen anzuregen. ¹

¹ Beispiele sind die Bundesagentur für Sprunginnovationen oder das EIT InnoEnergy.

5 Quellenverzeichnis

- ArcelorMittal (2019): ArcelorMittal beauftragt Midrex mit der Planung einer Demonstrationsanlage für die Wasserstoff-Stahlproduktion in Hamburg. Internet: <https://hamburg.arcelormittal.com/icc/arcelor-hamburg-de/broker.jsp?uMen=f0e10ffc-365a-0e51-a18f-7ff407d7b2f2&uCon=3a860d3f-5001-3d61-ca98-3d0632940ec7&uTem=aaaaaaaa-aaaa-aaaa-aaaa-000000000042>
- Agora Energiewende, FutureCamp, Wuppertal Institut und Ecologic Institut (2021): Klimaschutzverträge für die Industrietransformation. Internet: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_10_DE_KIT/AEW_230_Klimaschutzvertraege-Industrietransformation-Stahl_WEB.pdf
- BIR (2020): WORLD STEEL RECYCLING IN FIGURES 2015 – 2019. Internet: <https://www.bir.org/publications/facts-figures/download/643/175/36?method=view>
- BMWK (2022): IPCEI Wasserstoff: Gemeinsam einen Europäischen Wasserstoffmarkt schaffen. Internet: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/ipcei-wasserstoff.html>.
- Fraunhofer CINES (2021): 7 Empfehlungen zum Gelingen der Energiewende. Internet: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2021/Fraunhofer_CINES_7-Empfehlungen-zum-Gelingen-der-Energiewende.pdf
- Destatis (2021): Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Artikelnummer: 5851103197005. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/energiefluesse-emissionen/Publikationen/Downloads/anthropogene-luftemissionen-5851103197005.html>
- EC (2021): IPCEIs on hydrogen. Internet: https://ec.europa.eu/growth/industry/strategy/hydrogen/ipceis-hydrogen_en.
- Europäisches Parlament (2014): CO2-Emissionen von Autos: Zahlen und Fakten (Infografik). Internet: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissionen-von-autos-zahlen-und-fakten-infografik>
- Essig, M.; Schaupp, M. (2016): Ermittlung des innovationsrelevanten Beschaffungsvolumens des öffentlichen Sektors als Grundlage für eine innovative öffentliche Beschaffung. Internet: https://www.koinno-bmwk.de/fileadmin/user_upload/publikationen/Ermittlung_des_innovationsrelevanten_Beschaffungsvolumens_des_oeffentlich..._3_.pdf
- Fleiter, T.; Schломann, B.; Eichhammer, W. (Hrsg.) (2013): Energieverbrauch und CO2-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Internet: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2013/Umweltforschungsplan_FKZ-370946130.pdf
- Fleiter, T.; Rehfeldt, M.; Manz, P.; Neuwirth, M.; Herbst, A. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. Treibhausgasneutrale Hauptszenarien. Modul Industrie. Internet: https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/Modul_TN_Hauptszenarien_Industrie.pdf
- Green Steel (2021): Technology Assessment and Roadmapping (Deliverable 1.2). Internet: <https://www.estep.eu/assets/Uploads/210308-D1-2-Assessment-and-roadmapping-of-technologies-Publishable-version.pdf>
- Hartbrich, I. (2022): Umbau in der Stahlindustrie. VDI nachrichten 31. Januar 2022. Internet: <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/produktion/umbau-in-der-stahlindustrie>
- hlla (2021): Neu gegründeter Wasserstoffverbund plant, Hamburg grüner zu machen. <https://hlla.de/unternehmen/news/detailansicht/neu-gegruendeter-wasserstoffverbund-plant-hamburg-gruener-zu-machen>

iea (2019): Putting CO2 to Use. https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting_CO2_to_Use.pdf.

iea (2021): Net Zero by 2050. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4719e321-6d3d-41a2-bd6b-461ad2f850a8/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector.pdf>

Jahanshahi, S., Mathieson, J.G.; Reimink, H. (2016): Low Emission Steelmaking. J. Sustain. Metall. 2, 185–190 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0065-5>

McKinsey & Company (2019) How should steelmakers adapt at the dawn of the EAF mini-mill era in China? June 2019.

<https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/metals%20and%20mining/our%20insights/how%20should%20steelmakers%20adapt%20at%20the%20dawn%20of%20the%20eaf%20mini%20mill%20era%20in%20china/how-should-steelmakers-adapt-at-the-dawn-of-the-eaf-mini-mill-era-in-china.pdf>

NRW (2021): Europas Wasserstoffwirtschaft nimmt Fahrt auf – Nordrhein-Westfalen beteiligt sich mit zehn Projekten am größten Wasserstoff-Verbundvorhaben in der EU.

<https://www.wirtschaft.nrw/pressemitteilung/europas-wasserstoffwirtschaft-nimmt-fahrt-auf-nordrhein-westfalen-beteiligt-sich>

Österreichische Energieagentur (2020): ENERGIEHANDBUCH. Internet:

https://www.energyagency.at/fileadmin/dam/pdf/publikationen/Energie-Handbuch_AEA_03-2020_view.pdf

Limbers, J.; Böhmer, M. (2022): Transformationspfade für die Stahlindustrie in Deutschland. https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/202203_WVS_TransformationspfadeStahl_Prognos.pdf

Saarstahl (2021a): Rio Tinto teams up with Paul Wurth and SHS-Stahl-Holding-Saar on low-carbon iron in Canada. Pressemeldung. Internet. <https://www.saarstahl.com/sag/en/group/media/press/rio-tinto-teams-up-with-paul-wurth-and-shs-stahl-holding-saar-on-low-carbon-iron-in-canada-96891.shtml>

Saarstahl (2021b): Stahl-Holding-Saar werden Partner bei der Entwicklung einer großen wasserstoffbasierten Direkt-Reduktions-Anlage in Frankreich. Pressemeldung. Internet.

<https://www.saarstahl.com/sag/de/konzern/medien/presse/stahl-holding-saar-werden-partner-bei-der-entwicklung-einer-grossen-wasserstoffbasierten-direkt-reduktions-anlage-in-frankreich-96937.shtml>

Salzgitter (2022) <https://salcos.salzgitter-ag.com/de/>

Salzgitter (2021): „Windwasserstoff Salzgitter – WindH2“. Internet: <https://www.salzgitter-ag.com/de/newsroom/pressemitteilungen/details/windwasserstoff-salzgitter-windh2-ein-wichtiger-schritt-auf-dem-weg-zur-dekarbonisierung-der-stahlindustrie-14823.html#:~:text=Die%20Salzgitter%20Flachstahl%20GmbH%20hat,3%20hochreinen%20Wasserstoff%20erzeugen%20werden.>

Salzgitter (2021): „Windwasserstoff Salzgitter – WindH2“. Internet: <https://www.salzgitter-ag.com/de/newsroom/pressemitteilungen/details/windwasserstoff-salzgitter-windh2-ein-wichtiger-schritt-auf-dem-weg-zur-dekarbonisierung-der-stahlindustrie-14823.html#:~:text=Die%20Salzgitter%20Flachstahl%20GmbH%20hat,3%20hochreinen%20Wasserstoff%20erzeugen%20werden.>

Stahleisen (2021): ARCELORMITTAL WILL DRI-ANLAGEN IN BREMEN UND EISENHÜTTENSTADT ERRICHTEN.

Pressebeitrag. Internet. <https://www.stahleisen.de/2021/03/08/arcelormittal-will-dri-anlagen-in-bremen-und-eisenhuettenstadt-errichten/>

Sunfire (2019): GRINHY2.0 - WASSERSTOFF FÜR EINE CO2-ARME STAHLPRODUKTION.

[https://www.sunfire.de/de/news/detail/grinhy2-0-wasserstoff-fuer-eine-co2-arme-stahlproduktion#:~:text=Mit%20GrInHy2.,\(99%20C98%20%25\)%20liefern.](https://www.sunfire.de/de/news/detail/grinhy2-0-wasserstoff-fuer-eine-co2-arme-stahlproduktion#:~:text=Mit%20GrInHy2.,(99%20C98%20%25)%20liefern.)

Thyssengas (2021): GET H2: Sieben Unternehmen wollen Basis einer europäischen Infrastruktur für grünen

Wasserstoff schaffen. Internet: <https://thyssengas.com/de/aktuell/unternehmens-nachrichten/aktuell-reader/get-h2-sieben-unternehmen-wollen-basis-einer-europaeischen-infrastruktur-fuer-gruenen-wasserstoff-schaffen.html>

Thyssenkrupp (2020): Electrical hot metal from blast furnace 2.0: thyssenkrupp presents Federal Economics Minister Altmaier and State Premier Laschet innovative concept for green transformation of Duisburg steel mill. Pressemeldung. Internet. <https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/pressdetailpage/electrical-hot-metal-from-blast-furnace-20--thyssenkrupp-presents-federal-economics-minister-altmaier-and-state-premier-laschet-innovative-concept-for-green-transformation-of-duisburg-steel-mill-86635>

Vogl, V.; Åhman, M.; Nilsson, L. J. (2021): The making of green steel in the EU: a policy evaluation for the early commercialization phase, *Climate Policy*, 21:1, 78-92, DOI: 10.1080/14693062.2020.1803040

Wasserstoff-Niedersachsen: CLEAN HYDROGEN COASTLINE. Internet: <https://www.wasserstoff-niedersachsen.de/clean-hydrogen-coastline/>

WV Stahl (2022): Studie: Pläne der EU-Kommission zu CO₂-Grenzausgleich und Emissionsrechtehandel gefährden klimaneutrale Zukunft der Stahlindustrie in Deutschland. Pressemitteilung vom, 14.03.22; https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2022_03_14_PM_Prognos-Transformationspfade.pdf

WV Stahl (2020): Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2020. WV Stahl. Internet: https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Fakten-2020_rz_neu_Web1.pdf