

massiverFOKUS



KLIMAPFAD
MASSIV
UMFORMUNG
2045



fka GmbH
Strategy & Consulting

Abschlussbericht Klimapfad Massivumformung 2045

Projektnummer 247900

Auftraggeber
Industrieverband Massivumformung
IMU

Projektleiter*in
Christian Harter M.Sc.
Alexander Busse M.Sc.

Projektingenieur*in
Christian Harter M.Sc.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced
and/or published without the previous written consent of fka GmbH.

INHALT

1 Die Vision einer emissionsneutralen Massivumformung	6
2 Was und wieviel? Mengengerüst der Produkte und Prozesse der Schmiedeindustrie in Deutschland	7
3 Wie grün ist die Schmiedeindustrie heute? Der aktuelle Product Carbon Footprint als Referenzpunkt für die weitere Dekarbonisierung	8
3.1 Definitionen und Methodik.....	8
3.2 Modellierung der Prozessketten	9
3.3 Ergebnisse für das Basisjahr 2021	11
4 Wie entwickeln sich die Rahmenbedingungen zur Dekarbonisierung der Schmiedeindustrie? Zielsetzungen, Energieträger und Vormaterialien.....	13
4.1 Szenarienbildung	13
4.2 Wichtige Eingangsgrößen	14
5 Welche Nachhaltigkeitsinnovationen entwickelt die Schmiedeindustrie? Ansätze zur Dekarbonisierung der Prozesse	17
6 Wie grün kann die Schmiedeindustrie werden? Aggregation der Szenarien zum Klimapfad 2045	20
7 Welche Mehrkosten kommen auf die Unternehmen der Branche zu? Eine indikative Abschätzung der Implikationen	23
7.1 Mehrkosten für Energie.....	23
7.2 Mehrkosten für Vormaterialien.....	25
7.3 Mehrkosten für Wasserstoff-Anlagentechnik.....	26
8 Schlussfolgerungen	28

EMMA

EMISSIONSNEUTRALE MASSIVUMFORMUNG

EMMA – DAS INNOVATIONSNETZWERK FÜR EINE CO₂-NEUTRALE MASSIVUMFORMUNG

Die Prozesse der Massivumformung sind energieintensiv. Klimaneutralität bis 2050 ist daher für die Branche eine der größten Herausforderungen.

Das ZIM-Innovationsnetzwerk EMMA, bestehend aus 27 Partnern aus der Industrie und 18 Partnern seitens der Wissenschaft, analysierte, durch welche Maßnahmen und bis wann dieses Ziel zu realisieren ist.

Von Best-Practice-Ansätzen über ZIM-Projekte bis hin zu grundlegenden Forschungsprojekten reichen die möglichen Ansätze, die den Klimapfad für die Massivumformung aufzeigen.

Die Studie Klimapfad Massivumformung 2045 wurde im Rahmen des EMMA-Projektes erarbeitet.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

VORWORT

Die Transformation hin zu einer klimaneutralen Industrie ist keine ferne Vision mehr, sondern ein Weg, den wir mit aller Konsequenz und Leidenschaft beschreiten. Für die Massivumformung bedeutet das: Wir denken nicht nur in Prozessen, sondern in Verantwortung – für Werkstoffe, für Energie, für Generationen. Der Klimapfad Massivumformung beschreibt diesen Weg und zeigt, wie die Branche die Herausforderungen der Zeit als Chance begreift, um Innovation, Effizienz und Nachhaltigkeit miteinander zu verbinden.

Die Unternehmen unserer Branche stehen an einem entscheidenden Punkt. Sie sichern mit ihren Bauteilen die Mobilität, Energieversorgung und industrielle Wertschöpfung weltweit – und sie tun dies zunehmend klimafreundlich. Vom Einsatz CO₂-armer Werkstoffe über die Nutzung erneuerbarer Energien bis hin zur intelligenten Prozessoptimierung: Überall zeigen sich Pioniergeist und Ingenieurskunst in ihrer besten Form.

Diese Ausgabe des massiverFOKUS beleuchtet, wie der Industrieverband Massivumformung gemeinsam mit seinen Mitgliedern, Partnern und Forschungseinrichtungen an Lösungen arbeitet, die den CO₂-Fußabdruck der Technologie Schritt für Schritt verringern. Dabei geht es nicht um theoretische Ansätze, sondern um praxisnahe, umsetzbare Maßnahmen – entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Klar ist: Der Klimapfad ist anspruchsvoll. Aber er eröffnet auch neue Perspektiven für Wettbewerbsfähigkeit, Innovationskraft und Zukunftssicherheit. Mit Mut, Know-how und Teamgeist gestalten wir eine Industrie, die Effizienz und Verantwortung verbindet.

Massivumformung – das bedeutet heute mehr denn je: Technologische Stärke, unternehmerische Weitsicht und die Bereitschaft, immer einen Schritt weiterzugehen – für eine nachhaltige Zukunft aus Metall.

Thomas Hüttenhein

Vorsitzender des Vorstandes Industrieverband Massivumformung e. V.
58093 Hagen, Januar 2026.

1

Die Vision einer emissionsneutralen Massivumformung

Die Massivumformung zählt zu den tragenden Säulen der industriellen Wertschöpfung in Deutschland. Als Zulieferer essenzieller Komponenten für Schlüsselbranchen wie den Automobilbau, den Maschinen- und Anlagenbau sowie den Energiesektor ist die deutsche Schmiedeindustrie Bestandteil einer leistungsfähigen industriellen Infrastruktur. Charakteristisch ist ihre mittelständische Struktur, die mit hoher technologischer Spezialisierung und langjähriger Werkstoff- und Verfahrenskompetenz einhergeht. In einer engeren Abgrenzung umfasst die Branche rund 230 Unternehmen, die unterschiedliche Schmiedeverfahren beherrschen – darunter Gesenkschmieden, Kaltfließpressen, Freiformschmieden sowie Ringwalzen.¹

Die für Schmiedeerzeugnisse charakteristischen Eigenschaften einer hohen Dauerfestigkeit und Belastbarkeit erlauben es, hochbelastete Komponenten besonders leicht auszulegen. Im Kontext anspruchsvoller Leichtbauziele, insbesondere in der Fahrzeugtechnik, leisten Schmiedeteile damit einen signifikanten Beitrag zur Effizienzsteigerung und Emissionsminderung. Mit Blick auf den zunehmenden Einsatz elektrifizierter Antriebe gewinnen diese Potenziale zusätzlich an Relevanz.²

Angesichts ihres hohen Energiebedarfs steht die Branche jedoch zugleich im Zentrum der klimapolitischen Debatte. Die Transformation hin zu emissionsarmen Produktionsweisen ist nicht nur klimapolitisch geboten, sondern auch wettbewerbsstrategisch relevant. Nachhaltigkeit entwickelt sich zunehmend zu einem differenzierenden Faktor in der Kundenbeziehung. So operationalisieren OEMs der Automobilindustrie konkrete Nachhaltigkeitsziele über ihre Lieferketten hinweg und lassen dies in ihre Lieferantenbewertungen mit einfließen.

Vor diesem Hintergrund hat der Industrieverband Massivumformung die Vision einer emissionsneutralen Massivumformung (EMMA) formuliert. Im Rahmen des gleichnamigen, vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten, ZIM-Innovationsnetzwerks wurden technologische und wirtschaftliche Handlungsoptionen untersucht, um dieses Ziel im Einklang mit übergeordneten politischen Zielsetzungen zu erreichen. Die vorliegende Studie leistet hierzu einen Beitrag, indem sie den spezifischen CO₂eq-Fußabdruck der Schmiedeprodukte, den Product Carbon Footprint (PCF), im Zeitverlauf bis zum Jahr 2045 unter Berücksichtigung plausibler Entwicklungspfade quantifiziert und hinsichtlich ihrer Auswirkungen bewertet.

Im Fokus stehen dabei sowohl brancheninterne Innovationspotenziale als auch exogene Faktoren wie die Dekarbonisierung des Strommixes oder die Transformation der Vormaterialbereitstellung. Die Analyse erfolgt in konsistenten Szenarien und schließt auch eine indikative Abschätzung der mit dem jeweiligen Klimapfad verbundenen Mehrkosten ein. Auf dieser Basis entsteht ein differenziertes Bild der Herausforderungen, aber auch der strategischen Chancen, die sich aus der industriellen Transformation hin zur Klimaneutralität ergeben.

2

Was und wieviel? Mengengerüst der Produkte und Prozesse der Schmiedeindustrie in Deutschland

Für eine belastbare Bestimmung des aktuellen CO₂eq-Fußabdrucks der Schmiedeindustrie bildet das Jahr 2021 den Referenzpunkt der vorliegenden Analyse. Die Wahl dieses Basisjahres beruht auf der vollständigen Datenverfügbarkeit der amtlichen Produktionsstatistik des Statistischen Bundesamtes, welche sowohl Mengen- als auch Wertdaten der in Deutschland gefertigten Schmiedeprodukte umfasst.³

Zur systematischen Untersuchung der Dekarbonisierungspotenziale wurde die Vielzahl an unterschiedlichen Schmiedeprodukten auf Grundlage typischer Produktionsprozesse in neun homogene Cluster überführt. Diese Clusterung erlaubt es, CO₂eq-relevante Einflussgrößen wie Energieeinsatz, Vormaterialien und Prozessabfolgen konsistent und differenziert zu bewerten. Die Clusterbildung berücksichtigt sowohl die am häufigsten eingesetzten Werkstoffe (Stahl, Aluminium) als auch die Verfahrensart (z. B. Gesenkschmieden, Kaltfließpressen oder Freiformschmieden). Sie gliedert sich wie folgt:

Gesenkschmieden	Kaltfließpressen	Freiformschmieden
Stahl – nicht rostfrei	Stahl aus Stangenmaterial	Stahl – nicht rostfrei
Stahl – rostfrei	Stahl aus Draht	Stahl – rostfrei
Aluminium (repräsentiert vereinfachend alle Nichteisenmetalle)	Aluminium (repräsentiert vereinfachend alle Nichteisenmetalle)	Ringe

Für das Jahr 2021 ergibt sich insgesamt ein Produktionsvolumen von rund zwei Millionen Tonnen Schmiedeprodukten mit einem Gesamtwert von etwa 6,4 Milliarden Euro. Diese Menge bezieht sich auf die Tonnage und den Wert der Endprodukte „am Werkstor der Schmiedeunternehmen“, d. h. einschließlich eventuell durchgeführter betriebsinterner Nachbearbeitungen wie Zerspanung oder Wärmebehandlung, aber vor der eventuellen Systemintegration durch nachgelagerte Zulieferer oder Produzenten.

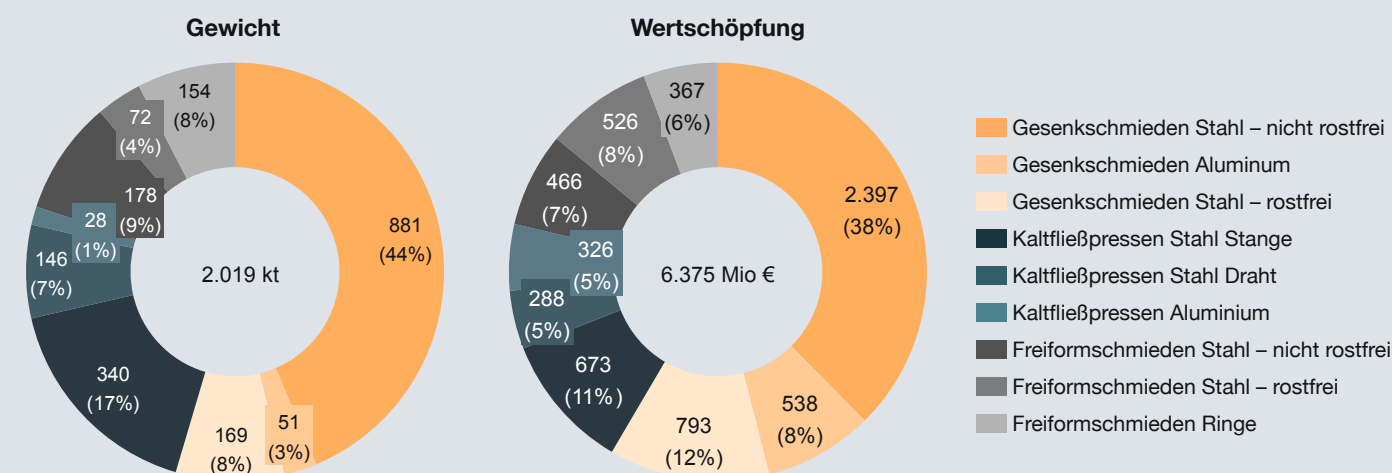


Abbildung 1: Clusterung der Produkte der Schmiedeindustrie mit Tonnagen und Wertschöpfung 2021 in Deutschland

3

Wie grün ist die Schmiedeindustrie heute? Der aktuelle Product Carbon Footprint als Referenzpunkt für die weitere Dekarbonisierung

3.1 Definitionen und Methodik

Der CO₂eq-Fußabdruck (Product Carbon Footprint, PCF) der Produkte der deutschen Schmiedeindustrie bildet grundsätzlich die Summe über alle CO₂eq -Emissionen, welche bei Produktion, Nutzung und Verwertung der Produkte anfallen – also über den gesamten Produktlebenszyklus. Während der Produktionsphase resultieren sie im Wesentlichen aus der eingesetzten Prozessenergie sowie aus den Vormaterialien, die bereits vor ihrer Weiterverarbeitung in der Massivumformung einen signifikanten ökologischen Fußabdruck aufweisen.

Im Rahmen dieser Studie erfolgt die Ermittlung des PCF gemäß des international anerkannten Bilanzierungsansatzes „Cradle-to-Gate“. Das bedeutet, dass sämtliche Emissionen von der Rohstoffgewinnung über die Vorproduktstufen bis zur Auslieferung des fertigen Schmiedeteils ab Werkstor Berücksichtigung finden. Nicht enthalten sind hingegen Emissionen aus der Nutzungsphase oder dem Lebensende des Produkts. Die Ergebnisse werden in CO₂-Äquivalenten (CO₂eq) angegeben. Dieser Indikator erlaubt es, die Klimawirkung unterschiedlicher Treibhausgase (z. B. CO₂, Methan etc.) vergleichbar zu machen, indem ihre Klimawirkung auf die Wirkung von CO₂ in einem hundertjährigen Referenzzeitraum umgerechnet wird. In der der Massivumformung dominieren jedoch grundsätzlich die CO₂-Emissionen selbst. Sie werden gemäß dem Greenhouse Gas Protocol in drei Kategorien („Scopes“) eingeordnet:⁴

- **Scope 1:** Direkte Emissionen aus eigenen Produktionsanlagen, z.B. aus gasbefeuerten Industrieöfen
- **Scope 2:** Indirekte Emissionen aus dem Bezug von Energie, insbesondere Strom, Wärme oder Dampf.
- **Scope 3:** Alle übrigen indirekten Emissionen entlang der vor- und nachgelagerten Wertschöpfungskette, vor allem solche aus der Herstellung der eingesetzten Vormaterialien sowie aus den Vorketten der Energieproduktion.

Die vorliegende Studie beschränkt sich im Einklang mit der Cradle-to-Gate-Betrachtung in Bezug auf Scope 3 ausschließlich auf vorgelagerte (upstream) Prozesse. Die spätere Nutzung des Produkts in der Anwendung (z. B. im Fahrzeug) bleibt ebenso unberücksichtigt wie mögliche Effekte des Recyclings.

Darüber hinaus wird auf unternehmensbezogene Emissionen wie Infrastruktur, Gebäudewirtschaftung, Verwaltung, F&E oder Logistik verzichtet. Diese werden angesichts des Fokus auf den Fußabdruck des Produktes als nachrangig eingestuft und sind laut der für die Berechnung des PCF maßgeblichen ISO 14067 daher nicht zu berücksichtigen. Ebenfalls außen vor bleiben Hilfs- und Betriebsstoffe. Eine signifikante Verzerrung der Gesamtergebnisse ist aus Sicht der Autoren dadurch nicht zu erwarten. Zur Berechnung des PCF kommt das CO₂eq-Branchentool „FRED“ zum Einsatz.⁵

3.2 Modellierung der Prozessketten

Typische Prozessketten in der Schmiedebranche umfassen Verfahren des Trennens, der Erwärmung von Werkstücken, der (Massiv-)Umformung, der Wärmebehandlung, der Oberflächenbehandlung und des Zerspanens. Begleitend dazu können auch das Verpacken und Maßnahmen zur Qualitätssicherung zu den erweiterten Kernprozessen gezählt werden. Während sich die grundlegenden Prozesstypen demnach gleichen, bestehen doch bei der genauen Wahl und Ausgestaltung der Prozesse im Detail große Unterschiede, um den jeweils verwendeten Vormaterialien und den Anforderungen an die angestrebten Endprodukte gerecht zu werden. Die Folge daraus sind signifikante Unterschiede in der Wahl der Energieträger, in den Energieintensitäten, den Verlusten usw., welche sich auf den spezifischen PCF niederschlagen. Die neun gebildeten Cluster bündeln jeweils sehr ähnliche Prozessketten und ermöglichen damit eine genaue Abbildung der Emissionen der Schmiedebranche bei gleichzeitiger Beherrschbarkeit der Komplexität.

Innerhalb der neun Cluster wird die Prozessabfolge jeweils vereinheitlicht und mit Annahmen zu Energieintensitäten etc. hinterlegt. Diese Annahmen stammen direkt aus der Branche, aus früheren Projekten des Industrieverbandes oder aus Expertenabschätzungen und wurden extern validiert.

Die nachstehend beschriebenen Cluster stellen jeweils exemplarisch die typischen produktions- und emissionsrelevanten Merkmale dar. Die detaillierte Abbildung der Produktion jeweils eines konkreten, einzelnen Produktes war hingegen keine Zielsetzung. Nichteisenmetalle abseits von Aluminium wurden der Einfachheit halber den Aluminiumclustern zugeordnet, da Aluminium hinsichtlich Tonnage und Wertschöpfung den dominanten Anteil innerhalb dieser Gruppe ausmacht.

Cluster 1: Gesenkschmieden Stahl – nicht rostfrei

Die Fertigung basiert auf einem Mix aus Elektrostahl und Primärstahl (LD-Verfahren), wobei in der Modellierung Elektrostahl mit 1,15 kg CO₂ / kg unterstellt wird. Die Prozesskette umfasst das Trennen, Erwärmen (bevorzugt induktiv), das eigentliche Gesenkschmieden sowie anschließende Abkühlung, Wärmebehandlung, Strahlen und Zerspanung. Etwa 25 % des Vormaterials gelten als Abgrat, rund die Hälfte der Teile wird wärmebehandelt. Typische Produkte: Achsschenkel, Kurbelwellen, Pleuelstangen, Zahnräder.

Cluster 2: Gesenkschmieden Aluminium

Verwendet werden in der Modellierung Aluminiumlegierungen der 6000er-Serie. Die Prozessfolge beginnt mit dem Sägen und Erwärmen (überwiegend im Gasofen), gefolgt vom Schmieden, Lösungsglühen, Oberflächenbehandlung und Zerspanen. Für Aluminium wird ein CO₂eq-Footprint von 6.800 g CO₂eq/kg angenommen. Typische Produkte: Fahrwerkskomponenten, Elektromotorgehäuse, Strukturbauteile für die Luftfahrt.

Cluster 3: Gesenkschmieden Stahl – rostfrei

Ausgangsmaterial ist in der Regel Elektrostahl, z. B. X5CrNi18-10. Die Prozessschritte: Trennen, induktives Erwärmen, Schmieden, Abkühlen, Strahlen, Zerspanung. Annahmen: 25 % Abgrat, 50 % Zerspanung. Typische Produkte: Ventilgehäuse, Flansche, Rohrleitungsumformstücke.

Cluster 4: Kaltfließpressen Stahl – Stange

Ausgangsmaterial ist zumeist Elektro Stahl (z. B. 16MnCr5). Die Prozessfolge reicht vom Trennen über das Vorbeschichten und Mehrstufen-Umformen bis zum Waschen, Glühen, Strahlen und Zerspanen. Massebezogen werden rund 30 % der Produkte zerspanen, der zerspanungsbedingte Materialverlust im gesamten Cluster beträgt in der Modellierung 12 %. Typische Erzeugnisse: Getriebewellen, Antriebswellen.

Cluster 5: Kaltfließpressen Stahl – Draht

Verwendet wird gezogener Draht (Primärstahl, CO₂eq-Footprint in den Berechnungen: 2.930 g CO₂eq/kg). Prozessfolge: Umformen, Pressen, Walzen (nur 10 % der Menge), Wärmebehandlung, Zerspanung. Abfallquote: 7 % Fließpressabfall, aggregiert 10 % Materialverlust durch Zerspanung. Typische Produkte: Präzisionsteile für Elektrotechnik.

Cluster 6: Kaltfließpressen Aluminium

Eingesetzt wird Aluminium in einer 6000er-Legierung, CO₂eq-Footprint in der Modellierung: 6.920 g CO₂eq/kg). Nach dem Umformen und eventuellem Lösungsglühen erfolgt die Zerspanung. 7 % Fließpressabfall, 50 % Zerspanung. Typische Produkte: Leichtbauteile für Luftfahrt, Gehäuse für Elektronik.

Cluster 7: Freiformschmieden Stahl – nicht rostfrei

Ausgangspunkt ist Elektro Stahl, der im Gasofen erwärmt und auf Presse oder Hammer umgeformt wird. Nach dem Zwischenwärmen erfolgt eine weitere Umformung, gefolgt von Wärmebehandlung und Zerspanung. Annahmen: je 20 % Schmiede- und Zerspanungsverluste. Typische Erzeugnisse: Großwellen, Achsen, Maschinenbauteile.

Cluster 8: Freiformschmieden Stahl – rostfrei

Prozess wie bei Cluster 7, jedoch mit rostfreiem Elektro Stahl (z. B. X5CrNi18-10). Typische Produkte: Hochdruckventile, Komponenten für Stromerzeugung und Petrochemie.

Cluster 9: Freiformschmieden Ringe

Verwendet wird Elektro Stahl, der nach Erwärmung zu einem Ring vorgeformt und anschließend gewalzt wird. Danach erfolgt die Zerspanung. Materialverluste: je 20 %. Typische Produkte: Nahtlos gewalzte Ringe, Lagergehäuse, Flansche.

3.3 Ergebnisse für das Basisjahr 2021

Emissionsintensität pro Produktcluster

Am oberen Ende der Emissionsskala befinden sich Schmiedeteile aus Aluminium, insbesondere im Gesenkschmiedeverfahren. Die spezifischen CO₂eq-Emissionen liegen hier im Mittel bei ca. 12 kg CO₂eq/kg Produkt. Ursache hierfür sind vor allem der CO₂eq-Fußabdruck des eingesetzten Primäraluminiums. Das Material allein kann, inklusive der auftretenden Materialverluste während der Umformung und Zerspanung, bereits 11 kg CO₂eq pro kg Endprodukt ausmachen. Ebenfalls relativ emissionsintensiv sind Produkte, die durch Kaltfließpressen von Aluminium hergestellt werden.

Unter den stahlverwendenden Clustern sticht das Kaltfließpressen von Stahldraht hervor. Auch hier spielt das Vormaterial die dominante Rolle, da aufgrund hoher mechanischer Anforderungen häufig Primärlegierungen mit entsprechend großem CO₂eq-Fußabdruck zum Einsatz kommen. Der Umformprozess selbst trägt nur in geringem Maße zur Emissionsbilanz bei. Auf der anderen Seite der Skala finden sich Verfahren wie das Kaltfließpressen aus Stahlstangen. Hier sind die spezifischen Emissionen mit knapp über 2 kg CO₂eq/kg vergleichsweise gering.

Vormaterial, Wärmebehandlungs- und Erwärmungsprozesse sind die Hotspots in der CO₂-Bilanz massiv umgeformter Produkte

Dr.-Ing. Hans-Willi Raedt, FRED GmbH und prosimalys GmbH

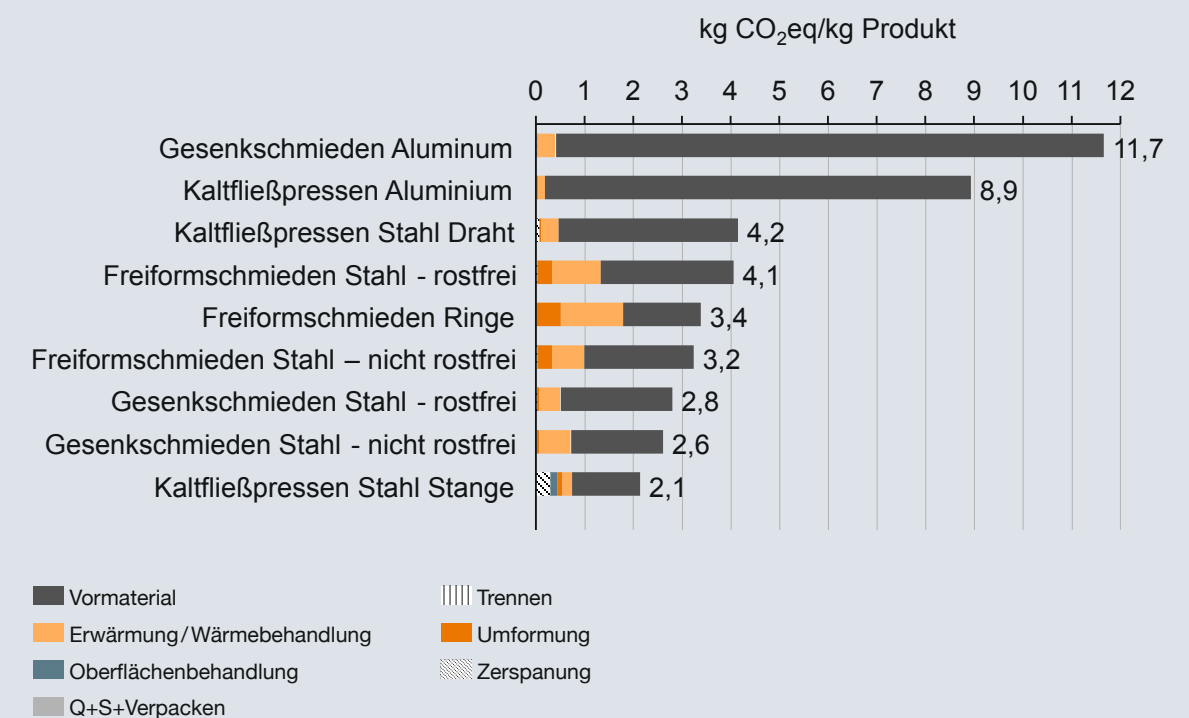


Abbildung 2: Spezifischer PCF (kg CO₂eq pro kg Endprodukt) nach Clustern

Anteil der Emissionsquellen

Über nahezu alle Cluster hinweg ergibt sich ein konsistentes Bild hinsichtlich der Emissionsverteilung auf die verschiedenen Prozessabschnitte:

- **Vormaterialien:** mit Abstand größte Emissionsquelle, in vielen Fällen über 70 % der Gesamtemissionen eines Produkts.
- **Thermische Prozesse:** etwa Erwärmung und Wärmebehandlung, typischerweise zwischen 15 und 20 % des Fußabdrucks.
- **Umformprozesse:** CO₂eq-Emissionen im Bereich von unter 0,5 kg CO₂eq/kg Produkt.
- **Materialverluste in den Einzelprozessen:** Obwohl Prozessen wie der Zerspanung selbst nur geringe CO₂eq-Emissionen zuzurechnen sind, erhöhen sie durch Materialverluste die Menge der initial benötigten Vormaterialien. In Kombination mit deren hoher CO₂eq-Intensität entsteht ein bedeutender Beitrag zum PCF.

Diese Ergebnisse unterstreichen die zentrale Rolle der Vormaterialwahl für die CO₂eq-Bilanz eines Schmiedeprodukts. Selbst hoch optimierte Fertigungsprozesse können die Emissionen eines CO₂eq-intensiven Vormaterials nicht vollständig kompensieren.

Gesamtemissionen der deutschen Schmiedeindustrie

Auf Basis der spezifischen Emissionskennwerte und der Produktionsmengen pro Cluster im Jahr 2021 wurde der gesamtsektorale CO₂eq-Fußabdruck der deutschen Massivumformung berechnet. Die hochgerechneten Gesamtemissionen belaufen sich auf rund 6.500 Kilotonnen CO₂eq (kt CO₂eq).

Besonders hervorzuheben ist hierbei das Cluster „Gesensschmiedeten Stahl – nicht rostfrei“, das mit einer Emission von 2.300 kt CO₂eq den größten Einzelanteil am Gesamtausstoß aufweist. Dies liegt jedoch nicht an einer besonders hohen Emissionsintensität pro Kilogramm, sondern vielmehr an der vergleichsweise hohen Produktionsmenge in diesem Cluster. Insgesamt machen die Prozesse des Gesensschmiedens etwas mehr als die Hälfte des Gesamtausstoßes aus. Kaltfließpressen und Freiformschmieden repräsentieren jeweils knapp ein Viertel der Emissionen.

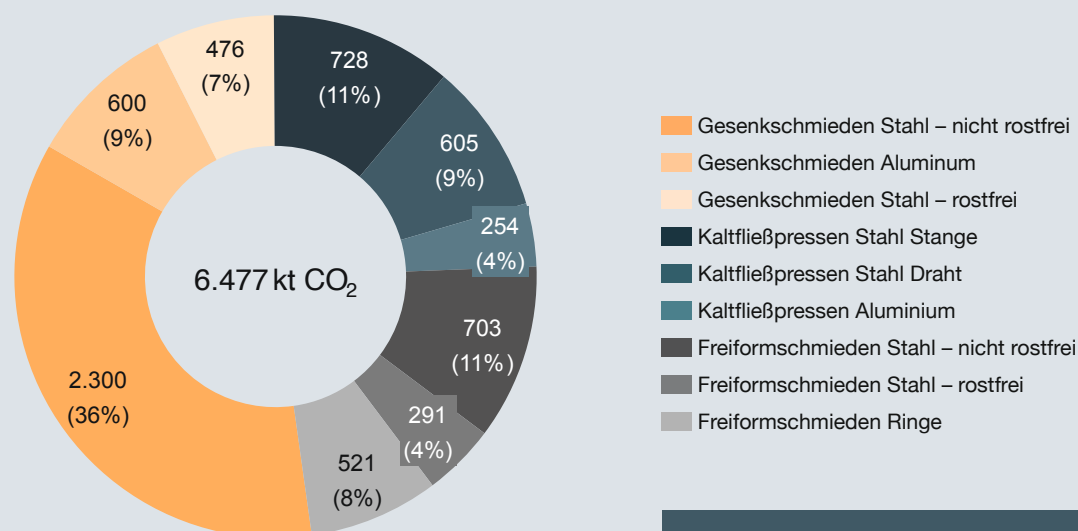


Abbildung 3: Gesamter CO₂eq-Footprint deutsche Massivumformung 2021 nach Cluster

4

Wie entwickeln sich die Rahmenbedingungen zur Dekarbonisierung der Schmiedeindustrie? Zielsetzungen, Energieträger und Vormaterialien

4.1 Szenarienbildung

Der weltweite klimapolitische Rahmen wurde in den letzten Jahren durch ambitionierte Ziele zur Treibhausgasreduktion erheblich verschärft. Die Europäische Union strebt im Rahmen des „European Green Deal“ an, ihre Netto-Emissionen bis zum Jahr 2030 um 55 % gegenüber 1990 zu senken und bis 2050 bilanziell vollständig klimaneutral zu wirtschaften.⁶ Diese Ziele finden in flankierenden Programmen wie dem „Clean Industrial Deal“ ihre industriepolitische Präzisierung.⁷ Auf nationaler Ebene geht das deutsche Klimaschutzgesetz noch darüber hinaus: Es verpflichtet zur Emissionsreduktion um 65 % bis 2030 und schreibt Klimaneutralität bis 2045 verbindlich fest.⁸ Die Stromversorgung soll bis dahin zu mindestens 80 % auf erneuerbaren Energien beruhen.⁹

Wie bereits die Status-Quo-Analysen des CO₂eq-Fußabdrucks der Schmiedeindustrie gezeigt haben, ist eine signifikante Reduktion der produktspezifischen Emissionen bis hin zur Klimaneutralität nur durch eine parallele Dekarbonisierung auf zwei Ebenen erreichbar: sowohl auf Seiten der eingesetzten Vormaterialien als auch bei den zur Verfügung stehenden Energieträgern. Die Entwicklung in beiden Bereichen liegt jedoch zu großen Teilen außerhalb des unmittelbaren Einflussbereichs der Unternehmen der Schmiedeindustrie. Entsprechend werden diese Faktoren im Rahmen dieser Studie als exogene Szenarioparameter modelliert.

Für die Projektion möglicher Dekarbonisierungspfade der Massivumformung werden zwei unterschiedliche Szenarien betrachtet, die sich in der Entwicklung der genannten exogenen Parameter unterscheiden:

- **Referenzszenario:** Die Dekarbonisierung der Vormaterialien und der Energieträger erfolgt im Einklang mit den Zielen des deutschen Klimaschutzgesetzes und orientiert sich daher größtenteils an den Annahmen und Ergebnissen der Studie „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“, die vom Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI) im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) in den Jahren 2021 bis 2024 erstellt wurde.
- **Szenario „Limitierte Ressourcenverfügbarkeit“:** Exogene Entwicklungen verlaufen verlangsamt. Die Transformation von Energieinfrastruktur und Vormaterialbereitstellung hinkt dem Referenzpfad um rund zehn Jahre hinterher.

Das Referenzszenario bildet die derzeitigen Zielsetzungen ab und dient als technologisch und politisch ambitionierter Zielpfad bei einem idealen Zusammenspiel von Energiesystem und Wertschöpfungsketten. Das Szenario „Limitierte Ressourcenverfügbarkeit“ ist wiederum als Robustheitstest der entwickelten Projektionen zu verstehen und wird zumindest im kurzfristigen Zeithorizont bis 2030 für realistischer gehalten.

Innerhalb beider Szenarien werden, beginnend mit dem Jahr 2030, in Fünffahresschritten die Entwicklung der CO₂eq-Emissionen der Produkte der deutschen Schmiedeindustrie bis 2045 berechnet. Für alle Projektionen wird die Ausbringungsmenge der Schmiede-

industrie als konstant angenommen. Lediglich konservativ abgeschätzte Leichtbaupotenziale einzelner Komponenten führen zu einer leichten Reduktion der jährlichen Tonnage an Schmiedeprodukten.

Die Szenarien dienen dazu, die Bandbreite des technisch Machbaren im Hinblick auf eine weitgehende Dekarbonisierung der Branche auszuloten. Dabei werden bewusst auch Technologien berücksichtigt, deren unternehmensindividuelle Wirtschaftlichkeit im internationalen Wettbewerb potenziell eingeschränkt ist.

Während Maßnahmen der Schmiedeindustrie zur Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz sowie zur Prozessoptimierung als diskrete, innerbetriebliche Variablen einzeln abgebildet und modelliert werden, gelten zentrale Einflussgrößen wie:

- die zukünftige CO₂eq-Intensität des Strommixes,
- die CO₂eq-Intensität von Stahl und Aluminium,
- sowie die industrielle Verfügbarkeit von Wasserstoff

als exogene Szenariovariablen.

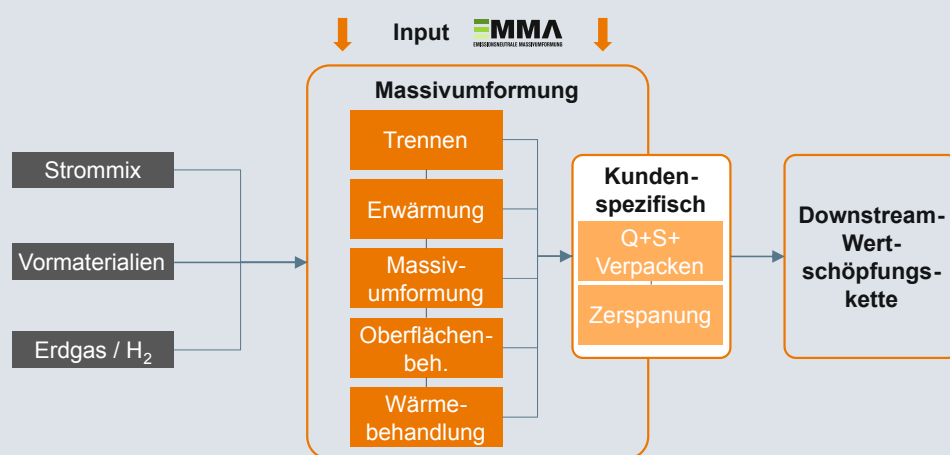


Abbildung 4: Potenzialbereiche zur Dekarbonisierung der Massivumformung

4.2 Wichtige Eingangsgrößen

Die CO₂eq-Intensität des Stroms

Die CO₂eq-Intensität des elektrischen Stroms stellt einen der entscheidenden Hebel für die industrielle Dekarbonisierung dar. Dies gilt in besonderem Maße für die Branche der Massivumformung, in der elektrische Energie in einer Vielzahl von Prozessstufen eine zentrale Rolle spielt. Die Bedeutung dieser Einflussgröße resultiert aus zwei Wirkungszusammenhängen: Zum einen beeinflusst die CO₂eq-Intensität der Stromerzeugung direkt die Scope-2-Emissionen der Unternehmen. Da die Produktionsprozesse zur Herstellung der Vormaterialien wie Sekundärstahl und Aluminium indes in hohem Maße strombasiert sind, wirkt sie sich zudem indirekt auf die Scope-3-Emissionen aus. Weil elektrische Energie des Weiteren zur Erzeugung von Wasserstoff in Elektrolyseanlagen gebraucht wird, bestimmt die Verfügbarkeit von Strom aus Erneuerbaren Energien auch die Verfügbarkeit grünen Wasserstoffs zur Substitution von Erdgas in entsprechenden Prozessen.

Im Rahmen dieser Studie wurde die Entwicklung der CO₂eq-Intensität der Stromerzeugung auf Grundlage der zitierten „Langfristszenarien“ abgeleitet. Diese Szenarien unterstellen, dass die Stromerzeugung bis spätestens 2045 weitgehend dekarbonisiert ist, d. h. nahezu vollständig aus Erneuerbaren Energien realisiert wird. Im Referenzszenario dieser Studie wird analog davon ausgegangen, dass die Strombereitstellung in Deutschland im genannten Zeithorizont nahezu vollständig klimaneutral erfolgt. Der spezifische Emissionsfaktor sinkt bis 2030 deutlich unter die Marke von 100 g CO₂eq/kWh, während er im Jahr 2045 nur noch wenige Gramm beträgt, etwa durch verbleibende Emissionen aus Vorketten wie dem Bau und Unterhalt von Windkraftanlagen, Solarfeldern oder Netzstrukturen. Durch diese Entwicklung lassen sich nicht nur die elektrischen Prozessschritte in der Massivumformung weitgehend klimaneutral betreiben, sondern auch vormaterialseitig signifikante Effekte erzielen, z.B. bei der Stahlerzeugung im Lichtbogenofen sowie bei der Aluminiumherstellung im Schmelzprozess.

Im Szenario „Limitierte Ressourcenverfügbarkeit“ hingegen wird unterstellt, dass der Umbau des Energiesystems deutlich langsamer voranschreitet. Die CO₂eq-Intensität des Stroms sinkt auch hier über die Zeit hinweg, bleibt aber durchgehend oberhalb der Kurve des Referenzszenarios mit einem Rückstand von etwa zehn Jahren. So liegt der Emissionsfaktor im Jahr 2030 beispielsweise noch bei rund 200 g CO₂eq/kWh, während er 2045 zwar niedrig, aber nicht vollständig emissionsfrei ist. Für stromintensive Prozesse wie beim Kaltfließpressen oder der induktiven Erwärmung bedeutet dies, dass deren Dekarbonisierungspotenzial deutlich eingeschränkt bleibt.

Aus Branchensicht ist insbesondere relevant, dass sich die Dekarbonisierung durch Elektrifizierung nur dann voll entfalten kann, wenn der eingesetzte Strom tatsächlich CO₂eq-arm ist. Die Umstellung auf elektrische Verfahren wirkt andernfalls zwar möglicherweise energieeffizienzsteigernd, aber nicht emissionsmindernd. Daher ist der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung eine systemisch unverzichtbare Voraussetzung für den klimaneutralen Betrieb der Massivumformung.

Einsatz von Wasserstoff

Grüner Wasserstoff gilt als zentrale Zukunftstechnologie für die Dekarbonisierung energieintensiver Industrien. Insbesondere in Anwendungsbereichen, in welchen hohe Temperaturen benötigt werden und die direkte Elektrifizierung an technische oder wirtschaftliche Grenzen stößt, wird ihr eine große Bedeutung beigemessen. Für die Massivumformung ist dies insbesondere bei Prozessen der Erwärmung und Wärmebehandlung der Fall, bei denen bisher überwiegend Erdgas zum Einsatz kommen.

Der Einsatz von Wasserstoff zur CO₂eq-Reduktion entfaltet seine Wirkung auf zweifache Weise: Zum einen innerbetrieblich, durch die Substitution gasförmiger Brennstoffe in Wärmeprozessen (Scope 1), und zum anderen vorgelagert, etwa in der Primärstahlerzeugung, wo das herkömmliche Hochofenverfahren durch das sogenannte H₂-DRI-Verfahren (Direct Reduced Iron) ersetzt werden kann.

Im Referenzszenario der Studie wird unterstellt, dass der Markthochlauf grünen Wasserstoffs in Deutschland in dem Maße gelingt, wie es in der Nationalen Wasserstoffstrategie vorgesehen ist. Das bedeutet, dass ab den frühen 2030er Jahren Wasserstoff in ausreichender Menge und zu vertretbaren Kosten für industrielle Anwendungen zur Verfügung steht. Damit wird es technisch und wirtschaftlich möglich, bestehende gasbetriebene Wärmeöfen durch H₂-basierte Technologien zu ersetzen bzw. Neuanlagen H₂-ready auszuführen. Für den Wasserstoff im Mix aus inländischer Erzeugung und Import wird ein Emissionsfaktor von 45 g CO₂eq/kWh unterstellt, der vor allem auf Produktionsvorketten beruht.

Im Szenario „Limitierte Ressourcenverfügbarkeit“ hingegen verzögert sich der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur deutlich. Die Gründe hierfür können vielfältig sein: technische Unsicherheiten, Engpässe in der Erzeugungskapazität, hohe Kosten oder fehlende Pipelineanbindung in industriell geprägten Regionen. In der Folge bleibt Erdgas länger im Einsatz, mit entsprechenden Auswirkungen auf Scope-1-Emissionen und den CO₂eq-Fußabdruck der Produkte. Auch die Dekarbonisierung des Vormaterials Stahl wird gebremst, da das H₂-DRI-Verfahren nicht flächendeckend implementiert werden kann.

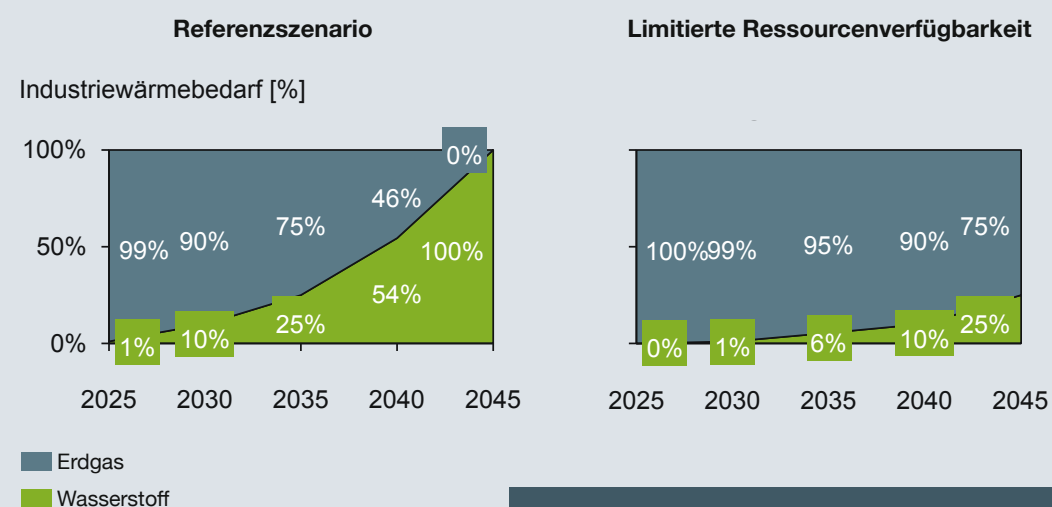


Abbildung 5: Wasserstoff-Szenarien für die Schmiedeindustrie

Dekarbonisierung der Vormaterialien der Schmiedeindustrie

Die Vormaterialien verursachen heute den größten Anteil am CO₂eq-Fußabdruck von Schmiedeprodukten. Je nach Produktgruppe und Verfahren entfallen – abhängig von der Prozesskette – bis zu 90 % der gesamten Cradle-to-Gate-Emissionen auf das eingesetzte Vormaterial. Entsprechend groß ist das Potenzial, das in einer konsequenten Dekarbonisierung dieser vorgelagerten Wertschöpfungsstufen liegt.

Zugleich handelt es sich bei der Vormaterialherstellung um einen exogenen Faktor für die Unternehmen der Massivumformung: Schmiedebetriebe beeinflussen die Emissionen der eingesetzten Halbzeuge (z. B. Stangen, Ringe, Rohlinge) nur mittelbar, etwa durch Lieferantenauswahl oder gemeinsame Werkstoffentwicklung. Die grundlegenden Emissionspfade sind jedoch durch die Produktionsverfahren der Stahl- und Aluminiumhersteller determiniert.

Wie beschrieben hängen die weiteren Möglichkeiten zur Dekarbonisierung des Vormaterials Stahl von der Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff (Primärstahl) bzw. von Strom aus erneuerbaren Energien (Sekundärstahl) ab. Im Referenzszenario wird angenommen, dass bis 2045 sowohl die Primär- als auch die Sekundärstahlerzeugung vollständig dekarbonisiert ist. Für H₂-DRI-Stahl ergibt sich ein Emissionsniveau von rund 15 % des heutigen Werts, bei Sekundärstahl etwa 30 bis 35 %.¹¹ In der Realität hängt dies allerdings stark von der Verfügbarkeit grüner Energie, der Qualität des Schrotts und der regionalen Infrastruktur ab.

Aluminium weist durch den stromintensiven Schmelzprozess der Primäraluminiumherstellung ebenfalls eine hohe CO₂eq-Intensität auf. Die Emissionsbilanz verbessert sich erheblich, wenn Primäraluminium in Ländern mit nahezu CO₂eq-freiem Strommix erzeugt wird oder wenn Recyclingaluminium (Sekundäraluminium) eingesetzt wird.

5

Welche Nachhaltigkeitsinnovationen entwickelt die Schmiedeindustrie? Ansätze zur Dekarbonisierung der Prozesse

Identifikation relevanter Innovationen

Die Unternehmen der deutschen Schmiedeindustrie zeichnen sich, nicht zuletzt in Bezug auf Energie- und Materialeffizienz, durch einen hohen Innovationsgrad aus, welcher in entsprechenden Veröffentlichungen und Patentschriften dokumentiert ist. Aktivitäten zur Emissionsreduktion erfolgen dabei sowohl auf Ebene der Einzelunternehmen als auch branchenweit durch den Industrieverband Massivumformung. Der Verband schafft mit verschiedenen Initiativen und Netzwerken eine Plattform, um Innovationen branchenweit verfügbar zu machen und ihre Implementierung zu beschleunigen. Im Rahmen dieser Studie werden insbesondere die folgenden Programme und Aktivitäten als Bezugspunkt für die Innovationsanalyse herangezogen:

- **ZIM-Innovationsnetzwerk EMMA** („EMissionsneutrale MAssivumformung“): Ziel ist die Entwicklung und Implementierung von Maßnahmen zur vollständigen Dekarbonisierung der Branche bis 2045.¹²
- **Projekt NOCARBforging 2050**: Eine Initiative zur CO₂eq-freien Massivumformung, aus der unter anderem das CO₂eq-Berechnungstool „FRED“ hervorgegangen ist.¹³
- **Initiative Massiver Leichtbau**: Ein Kooperationsprojekt zwischen Stahlherstellern und Schmiedeunternehmen mit dem Ziel, Leichtbaupotenziale in Antriebs- und Fahrwerkskomponenten konsequent zu erschließen.¹⁴
- **Fachveröffentlichungen in der Branchenzeitschrift massiverFOKUS**: Hier werden Studienergebnisse, Best Practices und neue technische Entwicklungen der Branche konsolidiert dargestellt.¹⁵

Innovationsfelder im Überblick

Die Analyse der branchenspezifischen Dekarbonisierungspotenziale lässt sich in sechs übergeordnete Innovationsfelder gliedern, denen jeweils spezifische technische Ansätze zugeordnet sind:

Reduktion der CO₂eq-Intensität der eingesetzten Werkstoffe

Ziel ist es, durch alternative Vormaterialien (z. B. Sekundärstahl) oder neue Werkstoffkonzepte (z. B. durch tolerierte Legierungsverunreinigungen) den durchschnittlichen CO₂eq-Footprint der bezogenen Werkstoffe deutlich zu senken. Die Schmiedeindustrie kann durch gemeinsame Entwicklungsvorhaben die Verfügbarkeit und Anwendbarkeit aktiv fördern.

- Aluminium, Primär- und Sekundärstahl mit reduzierter CO₂eq-Intensität (externer Faktor)
- Erhöhter Einsatz von Sekundärmaterialien, inkl. der aktiven Nutzung von Verunreinigungselementen
- Werkstoffseitige Substitution von CO₂eq-intensiven Legierungen (z. B. Cu, Messing)

Reduktion der CO₂eq-Intensität der Energieträger

Die Umstellung von fossilen auf emissionsarme Energiequellen kann die Emissionen in energieintensiven Prozessschritten erheblich reduzieren. Besonders relevant sind hier Erwärmungs- und Wärmebehandlungsprozesse.

- Substitution von Erdgas durch Biogas oder Wasserstoff in Wärmeprozessen
- Aufbau von DC-Mikrogrids zur direkten Nutzung lokal erzeugten Stroms aus Erneuerbaren Energien unter Umgehung von Umwandlungsverlusten
- Flexibler Energieträgerwechsel in Abhängigkeit von Preis und Verfügbarkeit, ggfs. (teil-) automatisiert

Steigerung der Energieeffizienz

Durch gezielte Prozessoptimierung, moderne Anlagentechnik und Rückgewinnungssysteme lässt sich der Energieeinsatz signifikant verringern. Dies ist unabhängig von der CO₂eq-Intensität der verwendeten Energie und somit universell wirksam.

- Stand-by-fähige Anlagentechnik (z. B. bei Induktionsöfen)
- Wärmeenergie-Rückgewinnung durch alternative Abkühlverfahren
- Prozessnahe In-Line-Vorbeschichtung beim Kaltfließpressen
- Effiziente Rohteilerwärmung (konduktiv oder induktiv mit Haltebetrieb)

Steigerung der Materialeffizienz

Materialverluste entlang der Prozesskette (z. B. durch Abgrat oder Aufmaß) können durch konstruktive und verfahrenstechnische Maßnahmen minimiert werden. Auch eine gewichtsoptimierte Bauteilauslegung leistet hierzu einen Beitrag.

- Feststrahlen und Festwalzen zur Nutzung umforminduzierter Eigenschaften
- Minimierung von Aufmaßen auf Bauteilen durch optimierte Prozessführung

Verschlinkung der Prozessabfolge

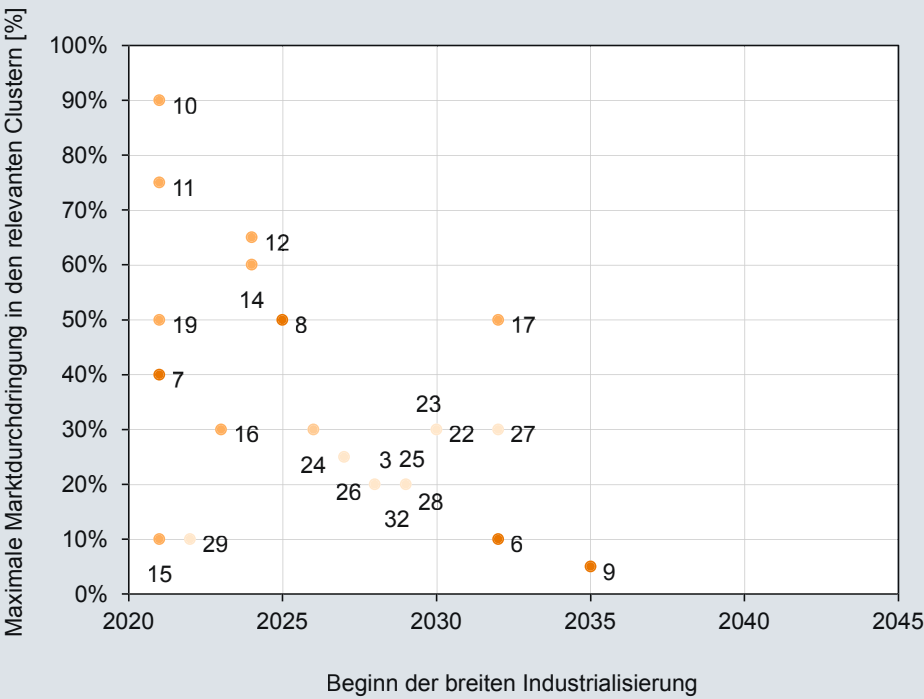
Durch Reduktion, Kombination oder Substitution einzelner Prozessschritte lassen sich Energieaufwand und Emissionen senken.

- Reduktion von Glüh- und Vergütungsprozessen durch alternative Werkstoffe, die beispielsweise ohne Wärmebehandlung auskommen und Prozesskombinationen
- Verfahrenskombinationen beim Aluminium-Gesenkschmieden

Querschnittsthemen und Digitalisierung

Der Einsatz digitaler Werkzeuge, vernetzter Anlagensteuerung (Industrie 4.0) und KI-gestützter Prozessführung kann sowohl zur Effizienzsteigerung als auch zur besseren Planbarkeit emissionsarmer Produktionsrouten beitragen.

- Industrie-4.0-basierte Prozessüberwachung und Datenintegration
- Simulation und KI-basierte Prozessregelung zur Reduktion von Energie- und Materialeinsatz
- Netzbildung zur Effizienzsteigerung in der Downstream-Wertschöpfung



1	Nutzung von recyclebaren Materialien	17	Abkühlung von Schmiedeteilen in Granulat
2	Nutzung von Verunreinigungselementen	18	Geb. Werkzeuge mit teilw. formlosen Stoffen
3	ZEP statt Cu/Messing	19	Effiziente Nachbeh durch innov. Strahlen
4	Nutzung CO ₂ -Negativer Kohlenstoffe	20	Konduktive Werkzeugenerwärmung
5	Prozessauslegung bei der Anw. neuer Werkst	21	Gegossene Hammer-Segmente
6	DC-Mikrogrid	22	Feststrahlen und Festwalzen berechenbar
7	Ersatz von Erdgasbrenner durch Lufterhitzers	23	Berücksichtigung umformind. Eigenschaften
8	Flexibler Energieträgerwechsel	24	Optimale Aufmaße auf Massivumformteilen
9	Weitere Dekarbonisierung durch biogenen H ₂	25	Weichglühen statt GKZ-Glühen
10	Energieeffiziente Wärmebehandlungssysteme	26	Drahtzug mit unterkritischem Umformgrad
11	Anlagenabschaltung	27	Definierte Eigenspann. durch Reibkoeffizienten
12	Intelligente In-Line-Lösungen	28	Thermomechanisch gewalzter Draht
13	Reduktion Schmierstoffbel. beim Ausstoßen	29	Verfahrenskombin. beim Alu-Gesenkschmieden
14	Autonome Schmiedeprozessauslegung	30	Integration von Eigenschaftsbeeinfl. in Umform.
15	Konduktiven (statt induktiver) Erwärmung	31	Shotpeening statt Wärmebehandlung
16	Induktive Rohteilerwärmung mit Haltebetrieb	32	Beschleunigte nanobainitische Umwandlung

Abbildung 6: Überblick über zeitliche Verfügbarkeit und Marktpotential einzelner Innovationen

Wie Abbildung 6 verdeutlicht, können nicht alle Innovationen sofort und in allen Fällen Anwendung finden. Vielmehr befinden sie sich teilweise noch im frühen Entwicklungsstadium und bedürfen weiterer Entwicklung hin zur Marktreife. Zudem sind viele Innovationen nicht in allen Clustern technologisch relevant – so kann etwa eine Innovation zur Wärmebehandlung nur dort Wirkung entfalten, wo zuvor tatsächlich eine Wärmebehandlung eingesetzt wurde. Selbst innerhalb der Cluster mit technologischer Relevanz kann die praktische Umsetzung aus spezifischen Gründen eingeschränkt sein, z.B. weil sie Zielkonflikte mit anderen Anforderungen erzeugt oder nur auf eine kleine Gruppe der Schmiedeunternehmen anwendbar ist. Diese Einschränkungen werden in der Modellierung angemessen berücksichtigt, um die Dekarbonisierungspotenziale der Schmiedeindustrie nicht zu überschätzen.

6

Wie „grün“ kann die Schmiedeindustrie werden? Aggregation der Szenarien zum Klimapfad 2045

Ausgehend von den zuvor beschriebenen technologischen Innovationen, deren zeitlicher Diffusion und den szenariospezifischen Rahmenbedingungen ergeben die Projektionen einen signifikanten Rückgang des CO₂eq-Fußabdrucks der Schmiedeerzeugnisse. Die Ergebnisse zeigen, dass bei erfolgreicher Umsetzung der Maßnahmen und unter günstigen externen Bedingungen eine weitgehende Dekarbonisierung der produktspezifischen Emissionen technisch möglich ist.

Im Referenzszenario sinken die produktbezogenen CO₂eq-Emissionen der deutschen Schmiedeindustrie von rund 6.500 kt im Basisjahr 2021 auf etwa 1.500 kt im Jahr 2045, konkret um 76 %. Ein mit 39 Prozentpunkten erheblicher Teil dieses Rückgangs entfällt bereits auf den Zeitraum bis 2030. Hier wird deutlich, dass insbesondere kurz- bis mittelfristig umsetzbare Maßnahmen, wie etwa Energieeffizienzsteigerungen und Prozessoptimierungen, frühzeitig Wirkung entfalten.

Alle neun Produktionscluster der Studie tragen zur Emissionsminderung bei, allerdings mit unterschiedlicher Dynamik. Cluster wie das Kaltfließpressen mit Stahldraht, deren CO₂eq-Fußabdruck primär durch das Vormaterial geprägt ist schreiten in der Dekarbonisierung langsamer voran. Hier macht sich bemerkbar, dass die Dekarbonisierung der Vormaterialien zeitlich hinter jener der Prozessenergien zurückbleibt und auch langfristig höhere nicht vermeidbare Emissionen zu erwarten sind. Dagegen zeigen sich Cluster mit einem hohen Anteil strombasierter Prozesse, z.B. das Kaltfließpressen aus Stahlstangen, durch die schnellere Transformation des Strommixes besonders responsiv.

Trotz dieser signifikanten Reduktion verbleiben auch im Jahr 2045 noch ungefähr ein Viertel der Emissionen des Basisjahres. Diese entfallen fast ausschließlich auf Scope-3-Emissionen, insbesondere aus vorgelagerten Prozessen der Vormaterialherstellung sowie den Vorketten der Energieerzeugung. Scope 1 und Scope 2 hingegen lassen sich bei vollständiger Umstellung auf grünen Strom und Wasserstoff nahezu vollständig dekarbonisieren. Im Scope 3 entstehen jedoch auch weiterhin Emissionen, überwiegend bei der Produktion von Vormaterialien sowie in geringerem Umfang in der Vorkette der Erzeugung der elektrischen Energie, z.B. beim Bau von Windkraftanlagen.

Im Szenario „Limitierte Ressourcenverfügbarkeit“ zeigt sich ein deutlich verlangsamer Dekarbonisierungspfad. Aufgrund der verzögerten Bereitstellung von CO₂eq-armem Strom und Wasserstoff sowie dekarbonisierten Vormaterialien sinken die Emissionen bis 2045 lediglich auf rund 3.000 kt, was einem Rückgang von 54 % entspricht. Insbesondere die Zeiträume bis 2030 und 2035 zeigen deutlich schwächere Fortschritte – mit Reduktionen von lediglich 19 % bzw. 30 %. Auch in Scope 1 verbleiben hier nennenswerte Emissionen, da fossile Energieträger länger im Einsatz bleiben müssen.

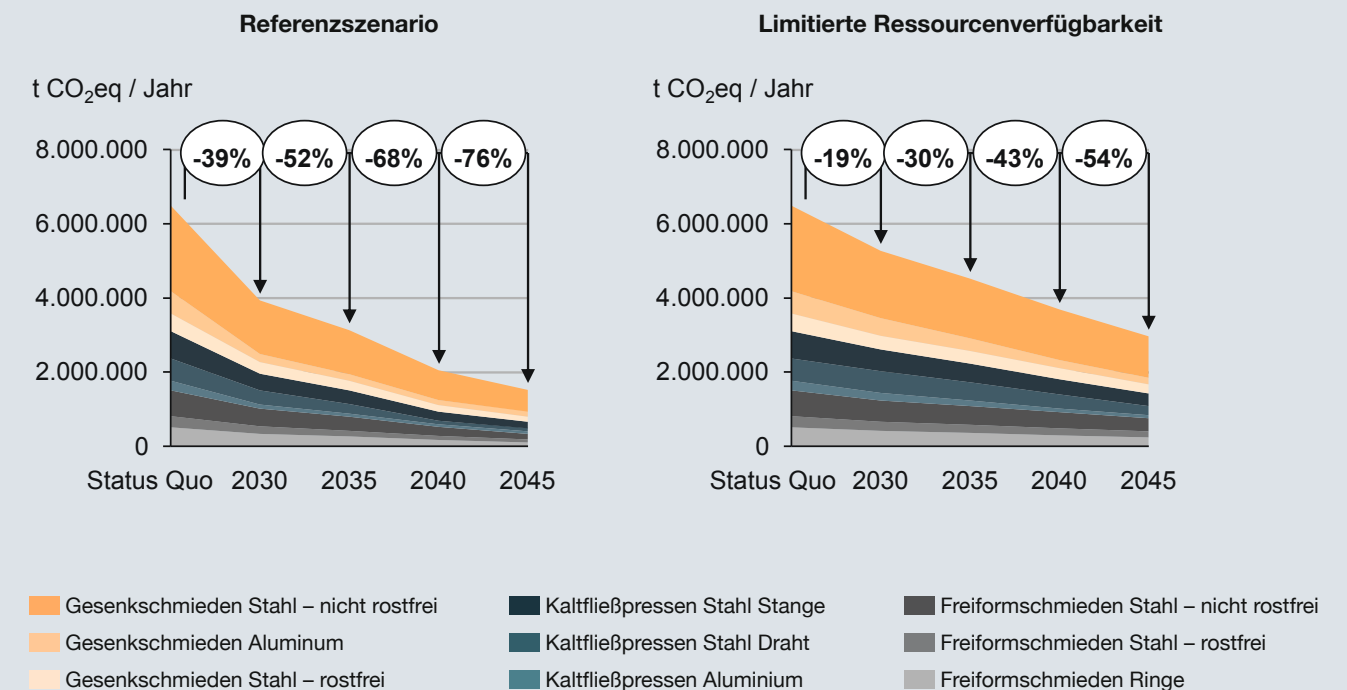


Abbildung 7: Dekarbonisierungspfad nach Schmiedecustern

Begleitend zur CO₂eq-Minderung erfolgt im Referenzszenario eine Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz. So sinkt der spezifische Energiebedarf um rund 25 %, wobei sich langfristig ein Verhältnis von etwa 52 % Strom und 48 % Wasserstoff als Energiemix der Branche einstellt. Parallel dazu wird der Materialeinsatz bei gleichbleibender Produktionsmenge um etwa 6 % reduziert. Diese Entwicklung ist primär auf konstruktive Optimierungen sowie auf die Reduktion von Aufmaßen und Materialverlusten zurückzuführen.

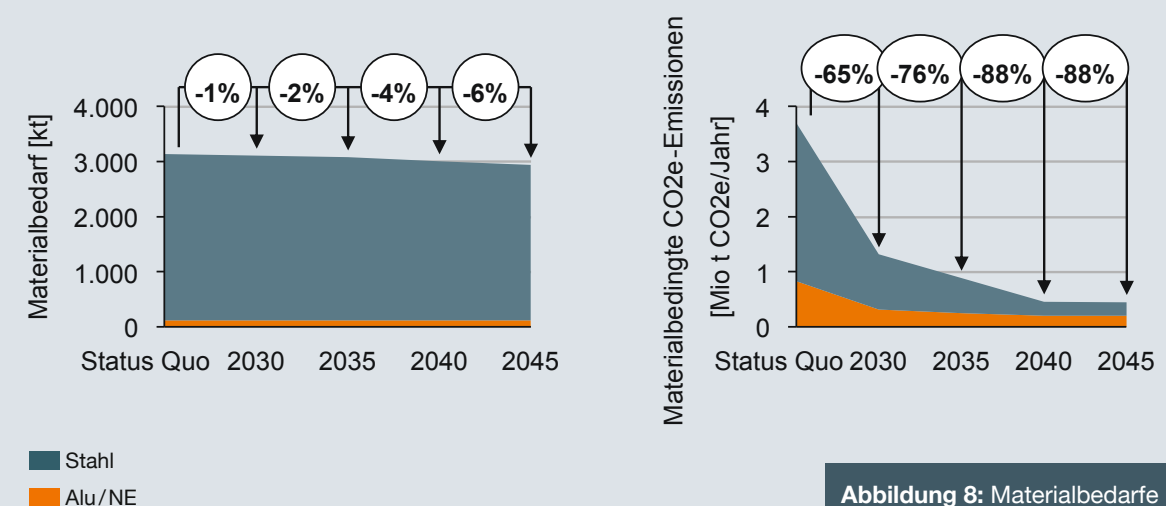


Abbildung 8: Materialbedarfe und entsprechende CO₂eq-Emissionen im Referenzszenario

Bei weiterer Auflösung der Beiträge zur Dekarbonisierung wird deutlich, wie sehr für eine funktionierende Dekarbonisierung sowohl brancheninterne Hebel genutzt werden müssen, aber auch entsprechende externe Enabler (Verfügbarkeit Wasserstoff etc.) gegeben sein müssen: Würde die Schmiedeindustrie ihre Energieeffizienz auf Basis der beschriebenen Einzelmaßnahmen optimieren, sich aber an den weiteren Rahmenbedingungen sonst nichts ändern, würde lediglich eine Dekarbonisierung von 4% bis zum Jahr 2045 erzielt. Werden weiterhin die Potentiale zur Steigerung der Materialeffizienz genutzt, ergeben sich weitere 6% CO₂eq-Emissionsminderung. Erst durch den Energieträgerwechsel hin zu Strom und Wasserstoff sowie der entsprechenden Verfügbarkeit CO₂eq-armen Stroms und Wasserstoffs werden im Referenzszenario weitere 20% CO₂eq-Einsparungen ermöglicht. Den insgesamt größten Beitrag liefert aber die Dekarbonisierung des Vormaterials. Bleiben alle anderen Faktoren gleich, wird hierdurch das durchschnittliche Schmiedeprodukt im Referenzszenario um 47% CO₂eq-ärmer.

Im Szenario zur limitierten Ressourcenverfügbarkeit können durch die rein brancheninterne Steigerung der Energie- und Materialeffizienz äquivalente Einsparungen zum Referenzszenario erzielt werden. Im Weiteren hat aber die Umstellung des Energieträgers einen geringeren Dekarbonisierungseffekt, weil der eingesetzte Strom eine höhere CO₂eq-Intensität besitzt. Da ferner weniger stark dekarbonisiertes Vormaterial zur Verfügung steht, ist insgesamt nur die beschriebene Senkung auf ca. 3.000 kt CO₂eq möglich.

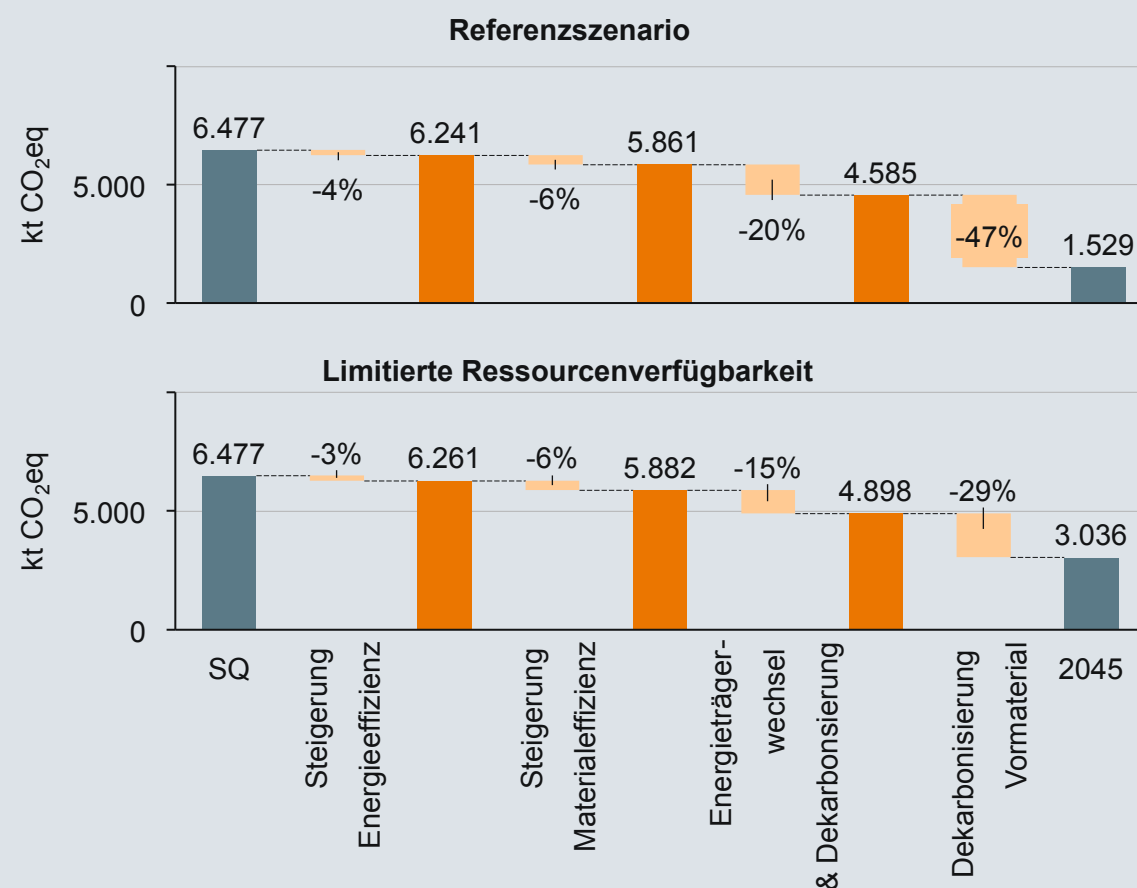


Abbildung 9: CO₂eq-Emissionstreppe zwischen Status Quo und Projektionsjahr 2045 im Referenzszenario (oben) und im Szenario „Limitierte Ressourcenverfügbarkeit“ (unten)

7

Welche Mehrkosten kommen auf die Unternehmen der Branche zu? Eine indikative Abschätzung der Implikationen

Die Schmiedeindustrie operiert in einem internationalen Wettbewerbsumfeld mit hoher Preissensitivität. Vor diesem Hintergrund sind die mit der Dekarbonisierung verbundenen Kostenentwicklungen von besonderer Relevanz. Im Rahmen der Studie werden daher indikative Kosteneffekte in den Bereichen Energieträger, Vormaterialien sowie Wasserstoff-Anlagentechnik abgeschätzt. Die dahinterliegenden Annahmen beruhen auf verfügbaren Literaturquellen und Expertenabschätzungen und werden an den Szenarien dieser Studie gespiegelt.

7.1 Mehrkosten für Energie

Annahmen

Gemäß den Langfristszenarien des BMWK wird für die kommenden Jahrzehnte im Referenzszenario von einem tendenziell stabilen Strompreisniveau ausgegangen. Der zunehmende Ausbau erneuerbarer Energien mit geringen Stromgestehungskosten wirkt dabei preisdämpfend. Mittel- bis langfristig wird auf Basis der in den Langfristszenarien prognostizierten Stromgestehungskosten ein Rückgang der Industriestrompreise auf etwa 20 ct/kWh erwartet, wenn die sonstigen Steuern, Zuschläge und Umlagen konstant bleiben. Allerdings bleibt der spezifische Einsatz von Strom in Hochtemperaturprozessen auch weiterhin kostenintensiver als fossiles Erdgas, auch unter den Effekten der CO₂-Bepreisung.

Der Gaspreis hingegen zeigt im Referenzszenario zunächst nur moderate Anstiege und erfährt erst ab Mitte der 2030er Jahre deutliche Zuwächse – ausgelöst durch eine zunehmende Verknappung von CO₂-Zertifikaten. Diese führt zu einem entsprechenden Preisdruck über das europäische Emissionshandelssystem.

Konkrete Wasserstoffpreise für eine breite Masse an industriellen Abnehmern im Bereich Wärmeprozesse müssen sich erst noch herausbilden. Vor dem Hintergrund einer flexiblen Wasserstofferzeugung zu Zeiten eines Überschusses von Strom aus Erneuerbaren Energien sowie potenzieller internationaler Transportrouten kann sich bestenfalls ein Wasserstoffpreis einstellen, der – bezogen auf den Energieinhalt – zwischen Erdgas- und Strompreis liegt. Auch hier bildet sich der Marktpreis durch den Aufschlag von Steuern, Umlagen und Abgaben aus den Gestehungskosten. Abgesehen von den CO₂-Preisen wurden diese, analog zu den Strompreisprojektionen, im Betrachtungszeitraum konstant gehalten. Aktuelle Entwicklungen bei Gasnetzentgelten und Gaspesicherungumlagen finden deshalb keine Berücksichtigung.

Der Markt zahlt heute keinen
Aufpreis für CO₂-reduzierte Produkte

Tobias Hain, Industrieverband Massivumformung e.V.

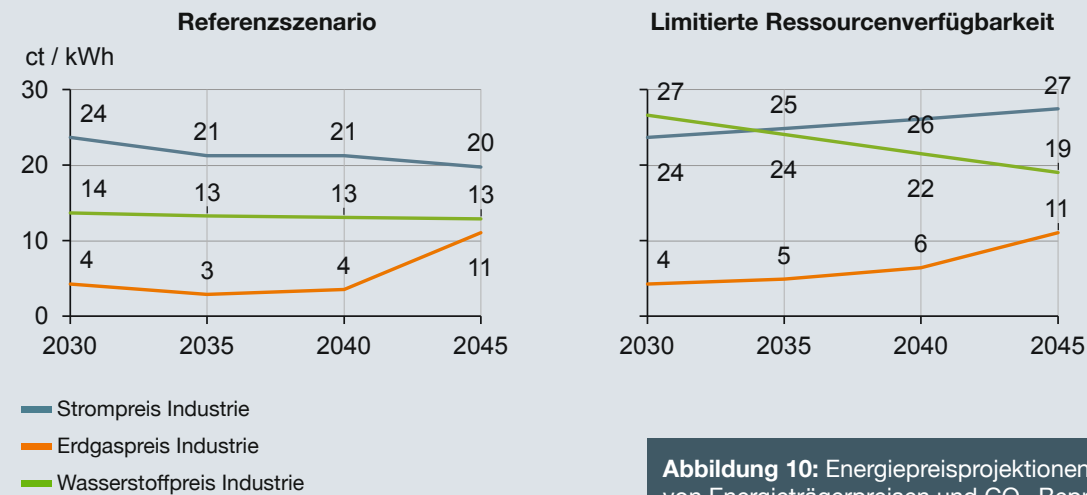


Abbildung 10: Energiepreisprojektionen auf Basis von Energieträgerpreisen und CO₂-Bepreisungen

Implikationen

Im Referenzszenario steigen die Mehrkosten für Energie im Vergleich zum Basisjahr zunächst bis zum Jahr 2030 deutlich an und erreichen ein Niveau von etwa 148 Millionen Euro jährlich. Hauptursache ist der Wechsel des Energieträgers – weg vom fossilen Erdgas hin zu elektrischer Energie und in geringem Umfang zu Wasserstoff. Diese alternativen Energieträger sind durch den zunehmenden Ausbau erneuerbarer Energien zwar zunehmend CO₂eq-arm, jedoch auf Energieeinheit betrachtet absehbar noch deutlich teurer als Erdgas.

Im weiteren Zeitverlauf wirken vor allem zwei Faktoren kostendämpfend: zum einen die Effizienzsteigerungen innerhalb der Schmiedeindustrie, zum anderen die erwartete Preisdegression bei elektrischer Energie und Wasserstoff. Dennoch steigen die jährlichen Mehrkosten durch die weitere Marktdurchdringung perspektivisch weiter an und erreichen bis 2045 etwa 220 Millionen Euro pro Jahr.

Im Szenario einer begrenzten Ressourcenverfügbarkeit, in dem insbesondere ein deutlicher Preistrückgang bei Strom und Wasserstoff ausbleibt, erhöhen sich die Mehrkosten erheblich und steigen auf bis zu eine halbe Milliarde Euro jährlich an.

Isoliert betrachtet erscheint der Wechsel auf Strom und Wasserstoff unter den gegebenen Rahmenbedingungen dennoch auch wirtschaftlich sinnvoll. Der Erdgaspreis kann infolge weiter steigender CO₂-Preise so stark anziehen, dass ein Festhalten am bisherigen Energieträgermix noch teurer wäre. Im internationalen Wettbewerb entsteht allerdings ein potenzieller Nachteil, sofern sich auf globalen Märkten keine vergleichbaren Energiepreisleistungen durchsetzen.

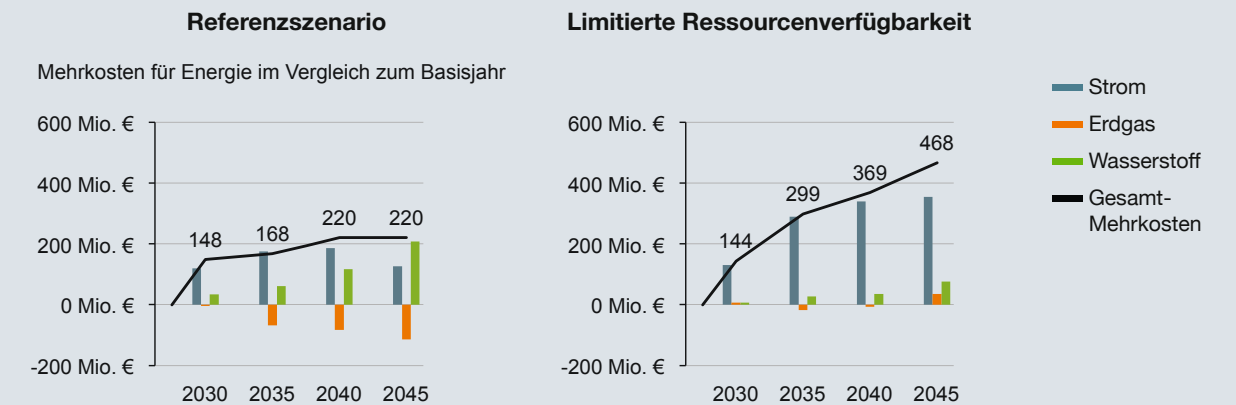


Abbildung 11: Mehrkosten für Energie bis 2045

7.2 Mehrkosten für Vormaterialien

Annahmen

Bei der weitgehenden Minimierung der CO₂eq-Intensität des Primärstahls ist grundsätzlich mit Mehrkosten zu rechnen, die voraussichtlich von den Stahlherzeugern an die Kunden weitergegeben werden müssen. Im Bereich der Primärstahlproduktion ergeben sich die Mehrkosten insbesondere durch die Investition in neue Technologien wie der Direktreduktion mit Wasserstoff (DRI) mit entsprechend hohen Anfangsinvestitionen, welche von der Stahlindustrie mit rund 1.000 € pro Tonne Erzeugungskapazität angegeben werden.¹⁶ Hinzu kommen Mehrkosten für grünen Wasserstoff, welcher absehbar teurer bleibt als fossile Brennstoffe und Reduktionsmittel. Die Kosten für den Transport von grünem Wasserstoff tragen erheblich zu den Mehrkosten bei. Die Mehrkosten für grünen Primärstahl sind heute – aufgrund fehlender Verfügbarkeit in der Fläche – noch nicht empirisch zu erheben. Angelehnt an den projizierten Wasserstoffpreis und die Investitionskosten mit typischer Anlagenlebensdauer werden Mehrkosten von ca. 450 € pro Tonne im Status Quo angenommen. Bedingt durch den Rückgang des Wasserstoffpreises können langfristig Mehrkosten von 250 €/t gegenüber dem heutigen Preisniveau angenommen werden, was einen Aufschlag zwischen einem Viertel und einem Drittel bedeutet. Allerdings ist, bedingt durch den projizierten Preisanstieg von CO₂-Emissionszertifikaten, bereits zwischen 2035 und 2040 damit zu rechnen, dass Stahl aus der Wasserstoffroute gegenüber konventionell erzeugtem Primärstahl einen relativen Kostenvorteil besitzen kann – während aus heutiger Sicht und im internationalen Vergleich eine absolute Kostensteigerung aus Abnehmersicht bestehen bleiben wird.¹⁷

Die Mehrkosten für die Dekarbonisierung des Sekundärstahls hängen im Wesentlichen vom Preis für Strom aus Erneuerbaren Energien ab. Sofern der Strompreis für die Industrie – wie im Referenzszenario angenommen – nicht wesentlich steigt, ist von einer weitgehenden Kostenkonstanz des Elektrostahls auszugehen. Geringere Kosten für CO₂-Zertifikate bei Dekarbonisierung der Stahlerzeugung wirken zudem kostendämpfend.

Implikationen

Für die Schmiedeindustrie entstehen Mehrkosten somit vorrangig durch den teureren Primärstahl. Dieser kommt hauptsächlich im Cluster Kaltfließpressen Stahl (Draht) zur Anwendung, weshalb sich daraus auch die im Referenzszenario vergleichsweise moderaten Mehrkosten für CO₂eq-arme Vormaterialien ergeben. Diese liegen im betrachteten Zeitraum bei rund 55 Millionen Euro pro Jahr im Vergleich zu den heutigen Vormaterialkosten.

Im Szenario zur begrenzten Ressourcenverfügbarkeit, insbesondere bei höheren Wasserstoffpreisen, steigen die Mehrkosten auf etwa 130 Millionen Euro jährlich an. Auch wenn damit deutliche Kostensteigerungen im Vergleich zum Basisjahr verbunden sind, erweisen sich diese dennoch als betriebswirtschaftlich alternativlos: Selbst bei Verwendung konventionellen Stahls ist infolge steigender CO₂-Preise mit erheblichen Preisaufschlägen zu rechnen. Ein dauerhafter Einsatz von Stahl oder Aluminium mit unveränderter CO₂eq-Intensität ist somit wirtschaftlich nicht tragfähig. Es verbleibt aber – analog zu den Effekten der Energiepreisentwicklung – die Frage nach der Wettbewerbssituation insbesondere im Vergleich zu außereuropäischen Märkten.

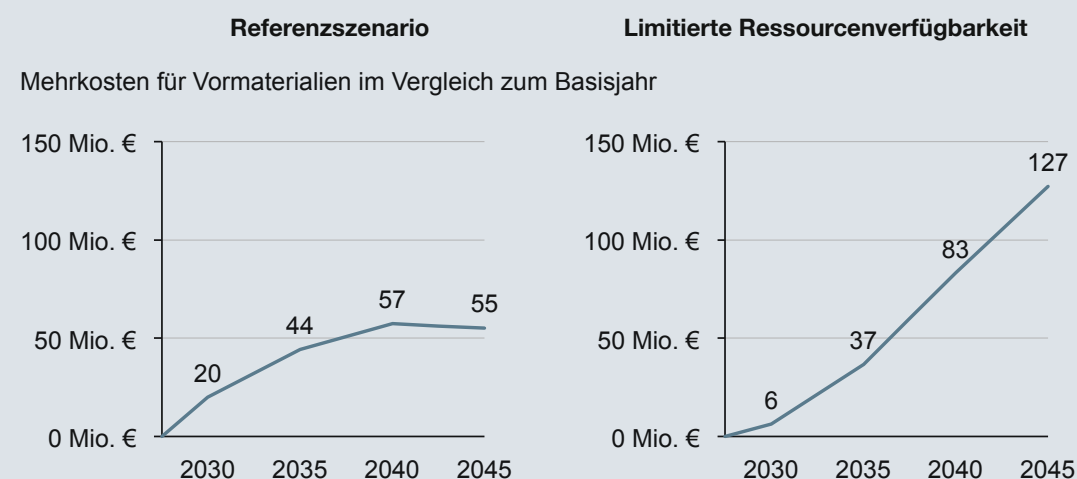


Abbildung 12: Mehrkosten für Vormaterial bis 2045

7.3 Mehrkosten für Wasserstoff-Anlagentechnik

Annahmen

Die Nutzung von Wasserstoff zur Substitution fossiler Brennstoffe in Wärmeprozessen stellt eine zentrale Maßnahme zur Emissionsreduktion dar – erfordert jedoch auch in den Betrieben erhebliche Investitionen in Infrastruktur und Anlagentechnik. So müssen beispielsweise bestehende gasbefeuerte Öfen auf den Betrieb mit H₂ umgerüstet oder vollständig ersetzt werden. Darüber hinaus sind Versorgungsleitungen, Sicherheitsvorkehrungen und gegebenenfalls Zwischenspeicher bereitzustellen.

Die Umrüstung eines Erdgasofens auf Wasserstoff im Industrieofenbau bringt mehrere technische Herausforderungen mit sich, insbesondere im Bereich der Materialkompatibilität, der Verbrennungsführung sowie der Sicherheitstechnik. Aufgrund der generellen Ähnlichkeit der Brenntechnik rangieren die Investitionskosten im Bereich Erdgas- und Wasserstofftechnik jedoch in ähnlichen Größenordnungen. Kann die Umstellung auf Wasserstoff in den Betrieben der Schmiedeindustrie frei mit den jeweiligen spezifischen Anlagenlebensdauern synchronisiert werden, entstehen anlagenseitig nur geringfügige Mehrkosten. Wird der Umstieg auf Wasserstoff jedoch, z.B. aufgrund politischer Zielsetzungen, vorzeitig erzwungen, fallen für die Unternehmen entsprechende Kosten für vorzeitige Ersatzinvestitionen an.

Vor dem Hintergrund typischer Anlagenlebensdauern von ca. 30 Jahren ist davon auszugehen, dass insbesondere zwischen 2035 und 2045 vorzeitige Ersatzinvestitionen zunehmen müssen, um die schnelle Marktdiffusion von Wasserstoff (von 25% auf 100% der HT-Wärmeprozesse in 10 Jahren) zu ermöglichen.

Die jeweiligen Modernisierungskosten werden angelehnt an Untersuchungen im Auftrag des Umweltbundesamtes wie folgt veranschlagt

- 15 €/t jährliche Anlagenkapazität für Öfen zur kontinuierlichen Erwärmung
- 27 €/t jährliche Anlagenkapazität für Öfen zur diskontinuierlichen Erwärmung
- 19 €/t jährliche Anlagenkapazität für Öfen zur kontinuierlichen Wärmebehandlung
- 33 €/t jährliche Anlagenkapazität für Öfen zur diskontinuierlichen Wärmebehandlung.¹⁸

Implikationen

Insbesondere im Referenzszenario werden aufgrund der Geschwindigkeit des Umstiegs auf Wasserstoff vorzeitige Ersatzinvestitionen eigentlich noch funktionstüchtiger Öfen nötig. Diese summieren sich im betrachteten Zeitraum auf bis zu 90 Millionen Euro. Besonders betroffen sind dabei Freiformschmieden mit hohem Anteil an gasbetriebenen Hochtemperaturöfen. Im Szenario zur begrenzten Ressourcenverfügbarkeit fallen die vorzeitigen Investitionen geringer aus, da sich der Umstieg auf Wasserstoff verzögert und weniger Anlagen innerhalb des betrachteten Zeitraums ausgetauscht werden müssen.

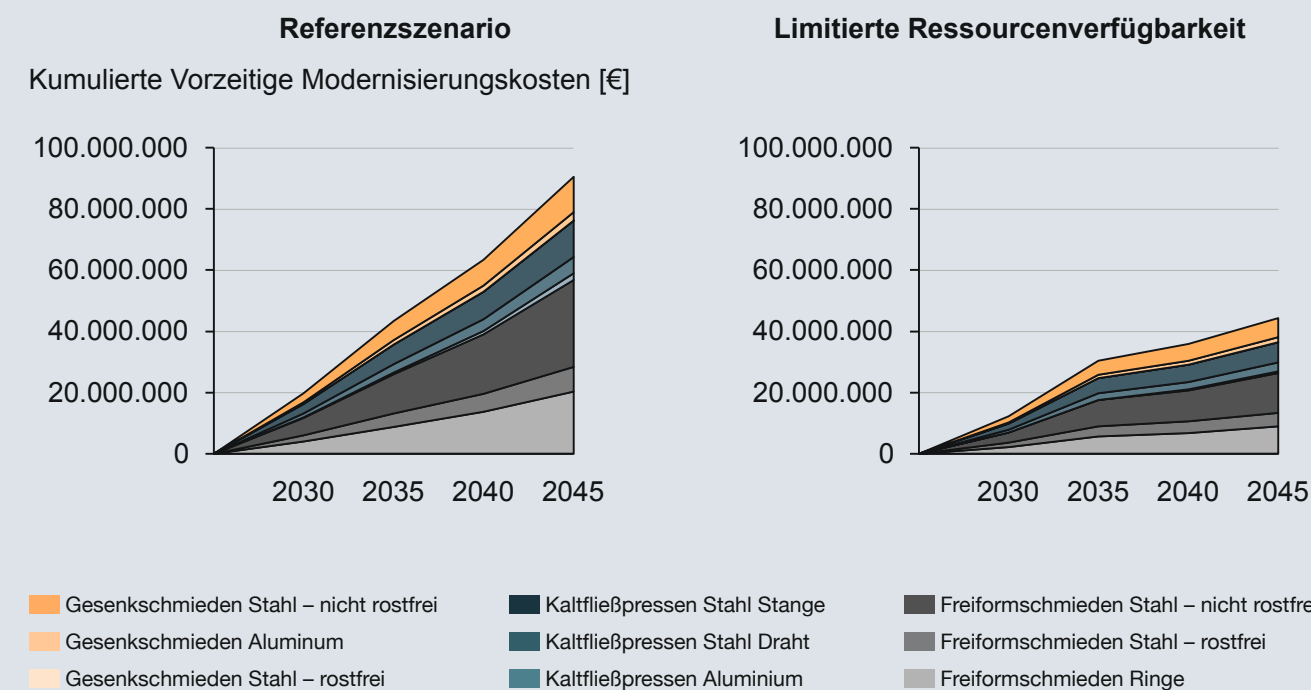


Abbildung 13: Kumulierte vorzeitige Modernisierungskosten bis 2045

8

Schlussfolgerungen

Die Schmiedeindustrie kann durch eigene technologische Initiativen zur Steigerung der Material- und Energieeffizienz bereits heute einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung leisten und somit aktiv die Erreichung der nationalen Klimaschutzziele unterstützen. Getragen von zahlreichen Innovationen und deren perspektivisch möglicher Marktdurchdringung in der Branche in Deutschland lässt sich der durchschnittliche Product Carbon Footprint (PCF) von Schmiedeprodukten deutlich reduzieren.

Die Elektrifizierung vormals gasbetriebener Prozesse sowie die Umstellung auf die Verbrennung von Wasserstoff sind – je nach Temperaturanforderung der jeweiligen Prozesse – technisch bereits heute mit einem hohen Reifegrad umsetzbar. Eine vollständige Reduktion der direkten CO₂eq-Emissionen (Scope 1) der Schmiedeprodukte auf null erscheint somit grundsätzlich möglich. Voraussetzung hierfür ist allerdings die zuverlässige und standortspezifisch gesicherte Verfügbarkeit der jeweiligen Energieträger – Strom und Wasserstoff – in ausreichender Menge und mit hoher Versorgungssicherheit.

Für eine weitgehende Dekarbonisierung im Scope 2 und Scope 3 der Schmiedeprodukte genügt jedoch eine zuverlässige Versorgung mit Strom und Wasserstoff alleine nicht aus. Hierfür bildet vielmehr die Dekarbonisierung dieser Energieträger selbst die notwendige Voraussetzung. Ein vollständiger Umstieg des gesamten Energiesystems auf Energieträger mit minimaler CO₂eq-Intensität (Strom aus Erneuerbaren Energien und grüner Wasserstoff) ist nötig. Sobald hier Engpässe entstehen, kann es zu Konkurrenzsituationen mit preisstärkender Wirkung kommen – einerseits innerhalb der Branche, aber auch mit benachbarten Branchen mit ähnlichen Dekarbonisierungszielsetzungen und -vorgaben. Angesichts des hohen Anteils von Stahl und Aluminium an den Gesamtemissionen der Schmiedeprodukte liegt ein weiterer bedeutender Hebel in der Nutzung dekarbonisierter Vormaterialien. Auch hierbei liegt die Herausforderung weniger in der technischen Umsetzbarkeit auf Seiten der Schmiedeunternehmen, sondern primär in der tatsächlichen Verfügbarkeit dieser Materialien mit deutlich reduzierter CO₂eq-Intensität. Wasserstoff spielt in diesem Zusammenhang eine Schlüsselrolle, sowohl als Energieträger zur Erzeugung von Prozesswärme durch Verbrennung als auch als strategischer Rohstoff für die Herstellung CO₂eq-armen Stahls. Entsprechend hoch ist die Bedeutung eines koordinierten Ausbaus der Wasserstofferzeugungs- und Verteilinfrastruktur.

Die Berechnungen deuten darauf hin, dass eine kostenneutrale Dekarbonisierung der deutschen Schmiedeindustrie selbst unter optimistischen Rahmenbedingungen – wie etwa günstigen Strompreisen – nicht erreichbar ist. Hauptursache dafür ist der notwendige Ausstieg aus Erdgas als bisherigem, kostengünstigen, jedoch CO₂eq-intensiven Energieträger sowie der verstärkte Einsatz von Strom und Wasserstoff. Im Referenzszenario wird mit jährlichen Mehrkosten für Energie von rund 220 Millionen Euro gerechnet.

Hinzu kommen Mehrkosten beim Vormaterialeinsatz, insbesondere beim CO₂eq-armen Primärstahl, der aufgrund der wasserstoffbasierten Herstellungsverfahren zunächst teurer ist. Hier entstehen zusätzliche Kosten in Höhe von etwa 60 Millionen Euro jährlich. Darüber hinaus fallen Investitionen für die Umrüstung der Industrieöfen auf wasserstoffbasierte Prozesse an. Deren Höhe ist stark individuell geprägt, da sie maßgeblich von der

Synchronisierung mit ohnehin anstehenden Modernisierungsmaßnahmen abhängt. Bei einem schnellen Umstieg auf Wasserstoff ist mit vorgezogenen Investitionen in Höhe von bis zu 90 Millionen Euro kumuliert zu rechnen.

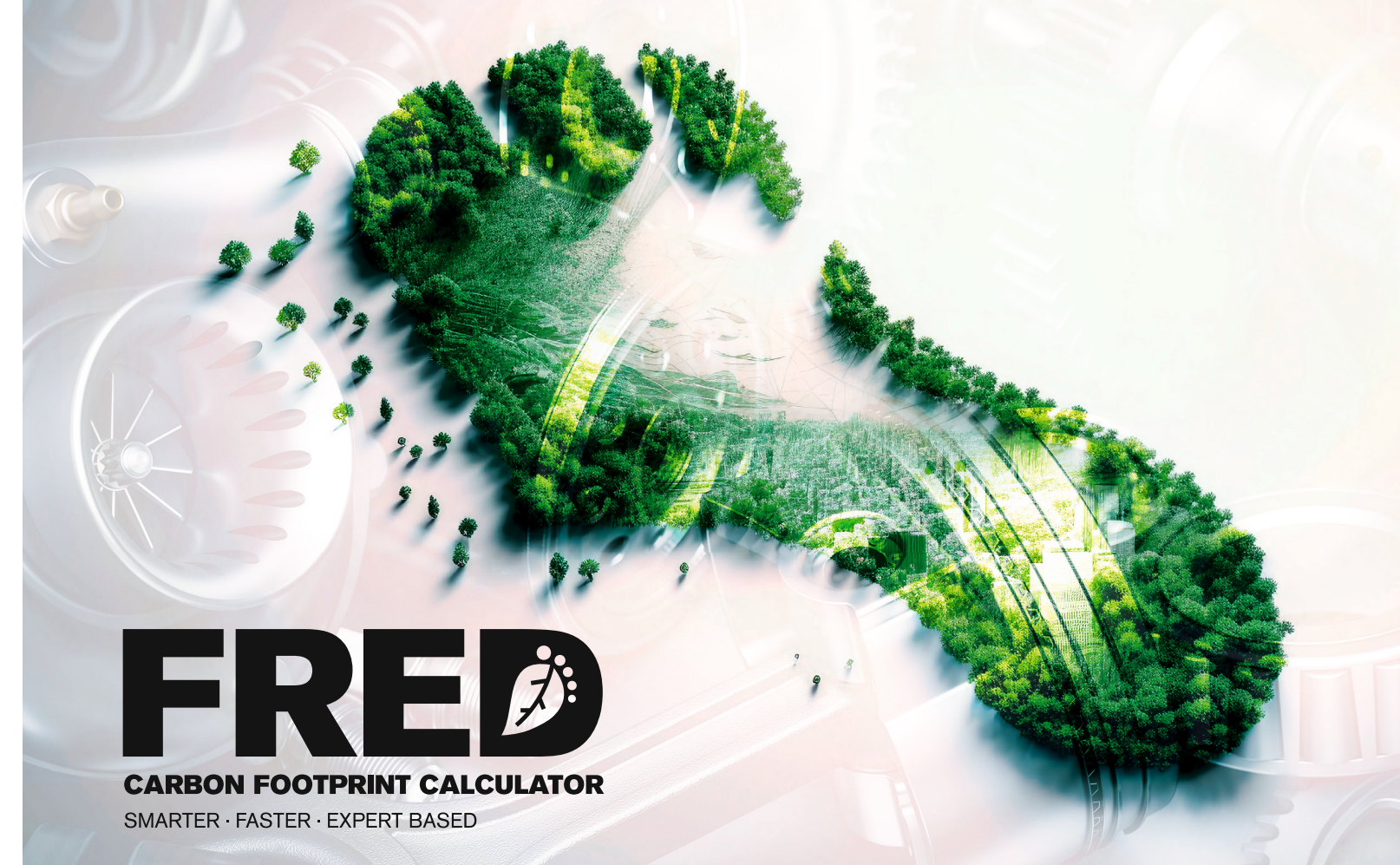
Die gesamten Mehrkosten für Energie und Material – im Referenzszenario etwa 275 Mio – sind beträglich. Anteilig betragen sie zwischen vier und fünf Prozent der jährlichen Wertschöpfung der Branche von 6,4 Milliarden Euro. Entsprechend spürbar kann sich die Marge der Unternehmen verringern. Es ist wichtig zu betonen, dass die genannten Kosten auf den günstigen Annahmen des Referenzszenarios basieren, welches von einer idealtypischen Entwicklung externer Faktoren im Energiesystem ausgeht. Investitionen in weitere Maßnahmen zur Effizienzsteigerung sind in diesen Zahlen noch nicht enthalten. Sollte sich die Transformation des Energiesystems hin zu erneuerbaren Energien verzögern, und damit auch die Dekarbonisierung der Vormaterialien, können die kumulierten Mehrkosten signifikant ansteigen. Im Szenario „Limitierte Ressourcenverfügbarkeit“ verdoppeln sich die jährlichen Mehrkosten für Energie und Vormaterialien gegenüber dem Referenzszenario und steigen auf bis zu 595 Millionen Euro pro Jahr – das entspricht nahezu 10 Prozent der heutigen Branchenwertschöpfung.

Zum heutigen Zeitpunkt lässt sich noch keine belastbare Aussage über die langfristige Eintrittswahrscheinlichkeit der beiden Szenarien treffen. Ein Vergleich des aktuellen Status quo des Energiesystems – etwa hinsichtlich des Anteils erneuerbarer Energien und der verfügbaren Erzeugungs- und Speicherkapazitäten für grünen Wasserstoff – mit den Annahmen des Referenzszenarios für die Jahre 2030 und 2035 deutet jedoch darauf hin, dass es zumindest im kurz- bis mittelfristigen Zeitraum zu Engpässen kommen könnte. Sollte sich die notwendige Dynamik in diesen Bereichen nicht zeitnah einstellen, besteht das Risiko, dass sich die tatsächliche Kostenentwicklung stärker an das Szenario „Limitierte Ressourcenverfügbarkeit“ annähert.

Wenn sich diese deutlichen Mehrkosten nicht für alle international im Wettbewerb stehende Unternehmen der Branche gleichermaßen ergeben, kann sich die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Massivumformung drastisch verschlechtern. Konkurrenzfähige Angebotspreise bei einem gleichzeitig langfristig tragfähigem Geschäftsmodell könnten damit nicht mehr zu erreichen sein. Die durchschnittlichen EBIT-Margen der europäischen Automobilzulieferer betrugen 2024 bereits lediglich 3,4 Prozent und ermöglichen nur geringen Spielraum, die der Schmiedeindustrie liegen tendenziell darunter. Angesichts der Bedeutung der Massivumformung – wirtschaftlich, technologisch, aber auch im Hinblick auf resiliente europäische Wertschöpfungsketten – sind politische Rahmenbedingungen unerlässlich, die sowohl einen fairen Wettbewerb gewährleisten als auch sicherstellen, dass die grüne Transformation der Schmiedeindustrie durch eine verlässliche Verfügbarkeit potenzieller Engpassressourcen flankiert wird.

Literaturverzeichnis

- 1 Industrieverband Massivumformung (IMU), <https://www.massivumformung.de/home>
- 2 Hans Böckler Stiftung: Branchenanalyse Schmiedeindustrie, https://www.boeckler.de/fpdf/HBS-008706/p_fofoe_WP_306_2023.pdf
- 3 Statistisches Bundesamt: Produktion im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Quartale, Güterverzeichnis (9-Steller), <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/42131/table/42131-0002>
- 4 Greenhouse Gas Protocol, <https://ghgprotocol.org/>
- 5 FRED GmbH: FRED Carbon Footprint Calculator, <https://www.fred-footprint.de/>
- 6 Europäische Kommission: European Green Deal, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de
- 7 Europäische Kommission: Clean Industrial Deal, https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/clean-industrial-deal_de
- 8 Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG), <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/>
- 9 Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG), https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/
- 10 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland, <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php>
- 11 Quelle: Projektinterne Informationen
- 12 Industrieverband Massivumformung (IMU): EMMA – Das Innovationsnetzwerk für eine CO₂-neutrale Massivumformung, <https://www.massivumformung.de/themen/trends-strategie/nocarbforing-2050/emma-das-innovationsnetzwerk-fuer-eine-co2-neutrale-massivumformung>
- 13 Industrieverband Massivumformung (IMU): NOCARBforing 2050, <https://www.massivumformung.de/themen/trends-strategie/nocarbforing-2050>
- 14 Industrieverband Massivumformung (IMU): massiver Leichtbau, <https://www.massiverleichtbau.de/startseite/>
- 15 Industrieverband Massivumformung (IMU): massiver FOKUS, Eine energieintensive energieeffiziente Branche, https://www.massivumformung.de/fileadmin/user_upload/6_Presse_und_Medien/massiverfokus/massiver FOKUS-12-2017-D_Web.pdf
- 16 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Handlungskonzept Stahl https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/handlungskonzept-stahl.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- 17 Roland Berger: What will it take to decarbonize the steel industry? <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Green-steel-The-race-is-on.html>
- 18 Umweltbundesamt (UBA): CO₂-neutrale Prozesswärmeerzeugung, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-neutrale-prozesswaermeerzeugung>
- 19 <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Global-Automotive-Supplier-Study-2025.html>



FÜR EIN GEMEINSAMES ZIEL: DIE KLIMANEUTRALE ZUKUNFT BIS 2045.

FRED LIVE ERLEBEN.

Sicherer Fortschritt geht nur mit starken Bauteilen.
So trägt die Zulieferindustrie Verantwortung –
wachsende Verantwortung.

FRED ermittelt den exakten CO₂-Abdruck Ihrer
Produkte und Ihres Unternehmens. Und das mit
wenigen Klicks.

Die Basis bilden Daten aus echten Industriebetrie-
ben. Validiert nach ISO 14067, ISO 14064-1 und
Greenhouse Gas Protocol.

Übersichtliche Analysen zeigen direkte
Reduzierungspotenziale auf.

JETZT DEMO-TERMIN BUCHEN

www.fred-footprint.de



ONLINE BESTELLUNG

Fordern Sie online Ihr Angebot
an und bestellen Sie direkt:

app.fred-footprint.de/login



IHRE BENEFITS.

SMARTER

- Product- und Corporate Carbon Footprint
aus einer Hand (CBAM-erweiterbar)
- Flexible Abbildung spezifischer Prozessrouten
- Datenbank mit Referenzdaten nutzbar

FASTER

- Schnelle und einfache Bedienung
- Webbasiert – keine gesonderte Installation nötig
- In- und Out-Schnittstellen in andere Systeme möglich

EXPERT BASED

- Prozess-Knowhow aus Industriebranchen
- Starkes Verbände-/ Expertennetzwerk
- DIN ISO EN 14067 / 14064 und Greenhouse Gas
Protokoll konform



WWW.FRED-FOOTPRINT.DE



Industrieverband Massivumformung e.V.
Goldene Pforte 1
58093 Hagen, Deutschland
E-Mail: info@massivumformung.de
www.massivumformung.de