

Wirtschaftliche Maßnahmenroadmaps durch szenarienbasierte Emissionsvermeidungskostenkurven

Effiziente Auswahl von Dekarbonisierungsmaßnahmen

M. Rentschler, F. Budde, M. Simon, M. Stauf, J. Husmann, R. Miehe, A. Sauer

ZUSAMMENFASSUNG Effizienter Klimaschutz ist angesichts unzureichender Emissionsreduktionen und zunehmender wirtschaftlicher Herausforderungen von hoher Relevanz. Durch die Entwicklung einer Methodik zur Identifikation sowie der ökonomisch-ökologischen Bewertung und Priorisierung von Dekarbonisierungsmaßnahmen werden wirtschaftlich effiziente Klimastrategien sichergestellt. Das Vorgehen basiert auf einer Erweiterung von Emissionsvermeidungskostenkurven durch szenariengestützte Zukunftsbetrachtung.

STICHWÖRTER

Nachhaltigkeit, Energieeffizienz, Management

Efficient selection of decarbonization measures

ABSTRACT Efficient climate protection is highly relevant given insufficient emission reductions and increasing economic challenges. The development of a methodology for identifying, economically and ecologically evaluating, and prioritising decarbonization measures ensures economically efficient climate strategies. The approach is based on an extension of emission avoidance cost curves through scenario-based future projections.

1 Einleitung

Immer mehr Organisationen weltweit entwickeln ambitionierte Dekarbonisierungsstrategien. Aktuelle Zahlen zeigen, dass sich bis 2024 bereits mehr als 4000 Unternehmen wissenschaftsbasierte Klimaziele nach dem Standard der „Science Based Target initiative“ (SBTi) gesetzt haben [1]. Dieser Trend verdeutlicht die zunehmende Bedeutung von Dekarbonisierung im Unternehmensalltag und spiegelt die wachsenden Anforderungen von Investoren, Finanzierungspartnern, Kunden, Mitarbeitern und Geschäftspartnern als zentralen Treiber für Klimaschutz wider [2].

Gleichzeitig ist aktuell ein deutlicher „Environmental, Social and Governance (ESG)-Backlash“ zu beobachten, besonders in den USA und zunehmend auch in Europa [3]. Die Kritik richtet sich vor allem gegen umfangreiche Berichtspflichten und die zusätzliche wirtschaftliche Belastung. Politische Reaktionen zeigen sich beispielsweise im sogenannten „Omnibusverfahren“, mit dem Vorgaben zur ESG-Berichterstattung in der EU reduziert und vereinfacht werden [4]. Unternehmen sehen sich tatsächlich mit angespannten wirtschaftlichen und geopolitischen Rahmenbedingungen konfrontiert, die vor allem im produzierenden Gewerbe deutlich spürbar sind [5]. In dieser Situation wird die Entwicklung und Umsetzung von Klimastrategien zunehmend nicht nur als ökologische Notwendigkeit, sondern auch als wirtschaftliche Herausforderung diskutiert [6]. Die Erforderlichkeit wirtschaftlich tragfähiger Lösungen tritt klar in den Vordergrund: Unternehmen benötigen Klimastrategien, welche sich durch Effizienz, Praktikabilität und Finanzierbarkeit auszeichnen. Entscheidend wird sein, ökologische Wirksamkeit mit ökonomischer Umsetz-

barkeit so zu verknüpfen, dass mögliche Transformationskosten tragbar bleiben und Investitionsentscheidungen einen klar erkennbaren positiven Business Case schaffen [7].

Vor diesem Hintergrund verfolgt der vorliegende Beitrag das Ziel, ein übertragbares Vorgehensmodell zu entwickeln, welches die Ableitung effizienter und praxisnaher Dekarbonisierungsstrategien unterstützt. Im Zentrum steht die Verknüpfung von technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Perspektiven. Die Methodik soll eine strukturierte Entscheidungsgrundlage bereitstellen, die sowohl die Effektivität von Klimaschutzmaßnahmen als auch ihre ökonomische Tragfähigkeit berücksichtigt. Besonderes Augenmerk gilt dabei Aspekten der Wirtschaftlichkeit verschiedener Maßnahmenoptionen. Der Beitrag adressiert damit die bestehende Lücke zwischen ambitionierten Klimazielen und deren effizienter operativer Umsetzung.

2 Stand der Technik

Dekarbonisierungsstrategien sind die strategische Grundlage für sämtliche Aktivitäten und Prozesse, die zur Reduktion von Treibhausgasemissionen auf Unternehmens- oder Produktebene beitragen. Eine Studie von *BDO & Kirchhoff* [8] aus dem Jahr 2024 konnte zeigen, dass eine ganzheitliche Dekarbonisierungsstrategie eine notwendige Voraussetzung zur Reduktion von Emissionen darstellt: DACH-Unternehmen mit Klimastrategie konnten ihre Emissionsbilanz zwischen 2021 und 2023 um 9 % verringern; Unternehmen ohne Strategie mussten eine Steigerung der Emissionen um 8 % verzeichnen.

Grundsätzlich obliegt es den Unternehmen, zu entscheiden, wie eine Dekarbonisierungsstrategie entwickelt wird und welche

Elemente sie enthält. Im Rahmen der Corporate Sustainability Due Diligence Directive (CSDDD) gibt es allerdings Anforderungen, die Orientierung bieten können. Wichtige Elemente eines Klimatransformationsplans sind demnach wissenschaftsbasierte Klimaziele, eine vollständige Emissionsbilanzierung in Scope 1, 2 und 3 nach Greenhouse Gas Protocol (GHGP), Reduktionsmaßnahmen zur Zielerreichung sowie eine Beschreibung und Quantifizierung der Investitionen und Finanzierungsmittel [9, 10].

Während es für die Emissionsbilanzierung und die Festlegung von Klimazielen etablierte und offizielle Standards, Guidelines oder Frameworks gibt (etwa GHGP, SBTi), sind die Identifikation, die Auswahl und die Priorisierung von einzelnen Dekarbonisierungsmaßnahmen kaum standardisiert. *Rentschler et al.* [11] haben in einer Studie aus 2025 untersucht, welche Methoden zur Entwicklung von Reduktionsplänen bereits existieren und welche methodischen und inhaltlichen Anforderungen und Kriterien diese erfüllen. Hierbei wurden zwar mehr als 50 unterschiedliche Methoden identifiziert, welche sich auf die Umsetzung der Dekarbonisierung im Unternehmenskontext fokussieren. Die meisten Methoden können aber nur einen kleinen Teil der untersuchten Modellanforderungen (zum Beispiel Quantifizierung der Maßnahmenbewertung; dynamische und szenarienbasierte Bewertungsansätze) erfüllen und sind somit für die Entwicklung von ganzheitlichen und systematischen Dekarbonisierungsplänen nur bedingt geeignet.

Ein wichtiges Instrument zur Bewertung von Dekarbonisierungsmaßnahmen sind die Emissionsvermeidungskostenkurven (Marginal Abatement Cost Curves, MACC). Diese stellen die monetären Auswirkungen von Maßnahmen zur Reduktion einer Tonne CO₂-eq ins Verhältnis zum Gesamtreduktionspotenzial [12, 13]. Üblicherweise werden MACCs auf einer makroökonomischen Ebene für die Weltwirtschaft, Nationen und Regionen oder Branchen erstellt [14]. Die Anwendung auf einer unternehmensindividuellen Ebene geschieht seltener, ist aber in ähnlicher Art und Weise möglich. Für die Erstellung von MACCs müssen für jede zu bewertende Maßnahme Daten gesammelt werden. Grundsätzlich sind drei Variablen nötig: das Emissionsreduktionspotenzial einer Maßnahme, die absolute Menge an Emissionen, auf welche sich die Maßnahme bezieht, und die Kosten für die Implementierung der Maßnahme [15]. Das Reduktionspotenzial einer Maßnahme kann über die Differenz der Emissionsfaktoren der aktuellen Technologie oder des aktuellen Materials (Status quo) und der jeweiligen Alternative (Reduktionsmaßnahme) berechnet werden [16]. Bei der Kostenberechnung sind in der Regel die Kapitalkosten (CapEx), Betriebskosten (OpEx) und die Einsparungen über die gesamte Lebensdauer nötig. Je nach Vorgehen bei der Maßnahmenbewertung ist außerdem noch das Umsetzungs- oder Implementierungspotenzial einer Maßnahme notwendig, das beschreibt, zu welchem Grad eine tatsächliche Umsetzung der Maßnahme möglich ist [17].

Trotz der Bedeutung von MACCs im Rahmen von wirtschaftlichen Dekarbonisierungsstrategien, gibt es vereinzelte Kritikpunkte an der Methodik. *Kesicki et al.* führen beispielsweise auf, dass Unsicherheiten nicht ausreichend adressiert sind, dynamische Entwicklungen nicht oder nur ungenügend repräsentiert werden oder Wechselwirkungen zwischen Maßnahmen keine Berücksichtigung finden [18, 19]. Diese Mängel können aber durch Weiterentwicklungen der Methode behoben werden. *Gillingham* und *Stock* schlagen beispielsweise ein Framework für eine dynamische und zukunftsgerichtete Berechnung von MACCs

vor [20]. Ein wichtiges Mittel zur Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen und Unsicherheiten ist die Szenarioanalyse. *Longva et al.* berechneten beispielsweise MACCs für den Schiffsektor unter Berücksichtigung mehrerer Zukunftsszenarien [21]. Parameter, die in Zukunftsszenarien für MACC-Berechnungen variiert werden, sind Kostenentwicklungen von fossilen Brennstoffen, Kostenentwicklungen von emissionsfreien Brennstoffen, Implementierungsraten und CO₂-Bepreisungen [21–23].

In der Studie wurden die MACC-Methode mit Elementen der Szenarienmodellierung und der Dynamisierung auf einer unternehmerischen Ebene zu einem systematischen Vorgehensmodell kombiniert. Dies stellt in dieser Form eine innovative Weiterentwicklung des Instruments dar, welches so bisher nicht entwickelt und angewendet wurde. Das genaue Vorgehen und die zugrundeliegende Datenbasis werden im nächsten Kapitel konkretisiert.

3 Vorgehen

3.1 Vorarbeiten

Das Vorgehensmodell erforderte eine Reihe von Vorarbeiten. Zunächst wurde eine Wesentlichkeitsbewertung der Nachhaltigkeitsthemen im Unternehmen vorgenommen. Auf Grundlage dessen konnten Handlungsfelder abgeleitet werden. Dies trägt zur Fokussierung der Nachhaltigkeitsanstrengungen bei und dient als Basis für die Strategieentwicklung. Zur Konkretisierung der Handlungsfelder wurden Ziele für verschiedene Zeithorizonte und entsprechende Kennzahlen zur operativen Nachverfolgung festgelegt. Einen nächsten Schritt bildete die Entwicklung geeigneter Maßnahmenbereiche in den Handlungsfeldern, um eine Erreichung der vorab festgelegten Ziele zu ermöglichen.

Im betrachteten Unternehmensbeispiel zeigte die Identifizierung der Maßnahmenbereiche, dass die Dekarbonisierung ein zentrales Handlungsfeld der Nachhaltigkeitsstrategie darstellt. Die initiale Analyse der Maßnahmenbereiche im Handlungsfeld Klima verdeutlichte, dass eine vertiefte, granulare quantitative Bewertung insbesondere der Scope-3-Maßnahmen erforderlich ist, um belastbare Aussagen zu Emissionsminderungspotenzialen und den damit verbundenen Kosten treffen zu können.

3.2 Zielsetzung

Das Ziel des Vorgehens war somit die Entscheidungsunterstützung für die Festlegung von Dekarbonisierungszielen und die Identifikation von effizienten Scope-3-Maßnahmen über eine ökonomisch-ökologische Bewertung der Reduktionspotenziale und Maßnahmenkosten. Bei der Identifikation und Bewertung von Maßnahmen sollten die vorhandene Fachexpertise im Unternehmen und darüber hinaus externe Quellen genutzt werden. Schlussendlich galt es, die erhobenen Daten für verschiedene Zukunftsszenarien in Vermeidungskostenkurven zur Information des Vorstandes zusammenzufassen und diesem so eine Entscheidungsgrundlage für die Formung der weiteren Dekarbonisierungsstrategie zu liefern.

3.3 Vorgehen

Das Vorgehen umfasst mehrere aufeinander aufbauende Schritte. Zunächst erfolgte die detaillierte Analyse der zugrunde liegenden Emissionsbilanz. Darauf aufbauend wurden potenzielle Maßnahmen je Emissionsquelle identifiziert. Für diese Maßnah-

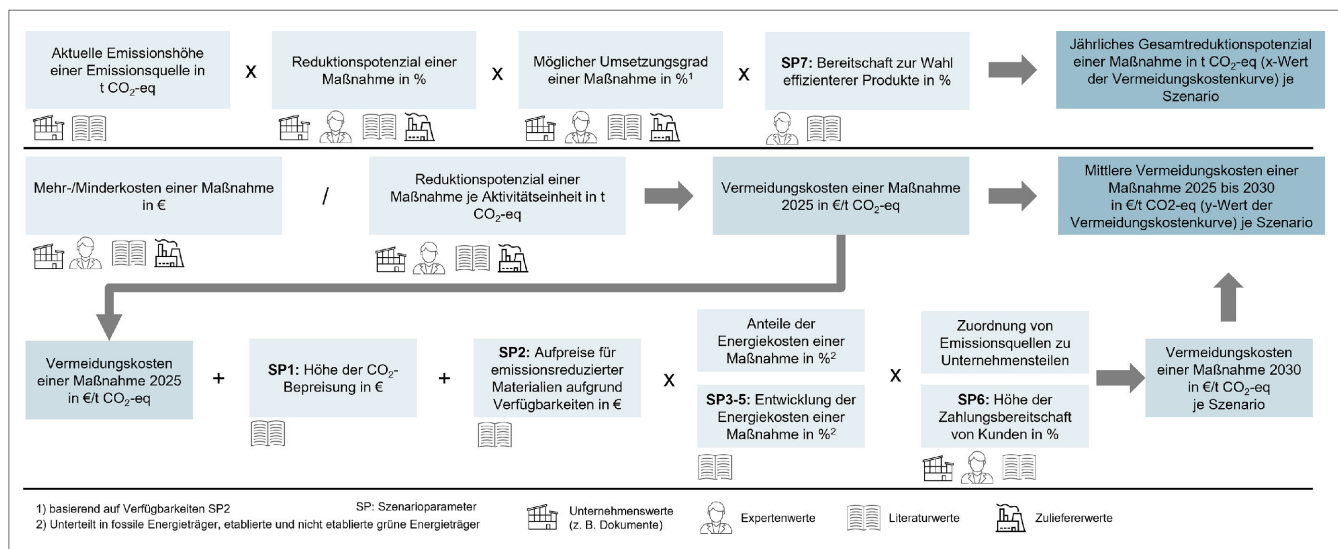


Bild 1 Vorgehensmodell für die Berechnung von Emissionsvermeidungskosten unter Berücksichtigung von Szenarioparametern. Grafik: Fraunhofer IPK

men wurden nun relevante Aktivitäts- und Emissionsdaten recherchiert sowie Informationen zu OpEx und CapEx erfasst. Zur Sicherstellung der inhaltlichen Qualität wurde frühzeitig die Einbindung von Experten organisiert. Den Auftakt bildete ein gemeinsamer Kick-off mit den unternehmensinternen Fachexperten. Die Datenerhebung erfolgte zunächst durch eine Online-Umfrage und wurde im Anschluss durch Rücksprachen mit den Antwortgebern ergänzt. Einzelinterviews dienten der Konkretisierung bestehender Maßnahmen sowie der Identifikation zusätzlicher Handlungsoptionen. Die Zwischenergebnisse wurden regelmäßig den Fachexperten vorgestellt. Parallel durchgeführt wurden eine Literaturrecherche und ergänzende Unternehmensbefragungen.

Auf dieser Basis wurden drei Szenarien abgeleitet, die sich an für das Unternehmen relevanten Megatrends orientierten. Danach wurden die wesentlichen Treiber, ihre Auswirkungen und Folgen pro Szenario identifiziert. Daraus erfolgte die Bestimmung relevanter Szenarienparameter, differenziert nach allgemeingültigen (branchenübergreifend) und unternehmensspezifischen Parametern. Das Business-as-usual-Szenario (BAU-Szenario) geht von nahezu gleichbleibenden Rahmenbedingungen für Klimaschutz aus. Im konservativen Szenario (KON-Szenario) sind externe Einflussfaktoren nachteilig für Dekarbonisierungsbemühungen, während sie im progressiven Szenario (PROG-Szenario) förderlich sind.

Für jedes Szenario wurden mittlere Emissionsvermeidungskosten und Reduktionspotenziale berechnet sowie Vermeidungskostenkurven erstellt. Daraus ließen sich Ambitionsniveaus für die Reduktionsziele und die Gesamtkosten ableiten.

Über den gesamten Prozess fanden eine enge Kommunikation und Abstimmung mit Experten, Führungskräften und dem Top-Management statt, um die Validität und Anerkennung der Ergebnisse im Unternehmen sicherzustellen.

4 Ergebnisse

4.1 Vorgehensmodell für szenarienbasierte und dynamische MACC-Entwicklung

Das Vorgehensmodell für die szenarienbasierte und dynamische MACC-Entwicklung folgt der Berechnungslogik der Emissionsvermeidungskosten (**Bild 1**).

Hierbei werden zunächst anhand der aktuellen Emissionshöhe einer Emissionsquelle, dem Reduktionspotenzial einer Maßnahme, dem möglichen Umsetzungsgrad sowie der Bereitschaft zur Wahl effizienterer Produkte das jährliche Gesamtreduktionspotenzial einer Maßnahme in t CO₂-eq je Szenario berechnet. Dies ergibt den x-Wert der Vermeidungskostenkurve.

Mithilfe der Mehr- beziehungsweise Minderkosten sowie dem Reduktionspotenzial einer Maßnahme je Aktivitätseinheit lassen sich die Vermeidungskosten für aktuelle oder vergangene Zeitpunkte bestimmen. Unter Berücksichtigung der Szenarienparameter (Höhe der CO₂-Bepreisung, Aufpreise für emissionsreduzierte Materialien aufgrund von Verfügbarkeiten, Entwicklung der Energiekosten einer Maßnahme, Höhe der Zahlungsbereitschaft von Kunden) ergeben sich die Vermeidungskosten einer Maßnahme für die Zukunft, zum Beispiel im Jahr 2030. Nicht alle Maßnahmen werden dabei durch alle Szenarienparameter gleichermaßen beeinflusst.

Somit lassen sich final die Vermeidungskosten einer Maßnahme je Szenario im Zeitraum 2025–2030 in €/t CO₂-eq berechnen. Dieser Wert stellt den y-Wert der Vermeidungskostenkurve dar.

4.2 Anwendungsbeispiel des entwickelten Vorgehensmodells

Zur Validierung des entwickelten Vorgehensmodells wurde ein Anwendungsbeispiel zusammen mit einem Unternehmen aus dem industriellen Sektor entwickelt. Der international produzierende Konzern mit Sitz in Deutschland ist vornehmlich in der Herstellung und dem Vertrieb elektrischer Geräte und diverser Rohstoffe tätig. Die hohe Diversifizierung sowie die komplexe und globale Wertschöpfungskette sind eine hohe Herausforderung für die Dekarbonisierungsbemühungen, da Emissionsquellen kleinteilig sind und einer hohen Anzahl an effektiven Maßnahmen bedürfen.

Als Grundlage der Maßnahmenbewertung diente unter anderem eine Emissionsbilanz in allen drei Scopes aus dem Jahr 2019, welche zunächst aktualisiert und detailliert wurde. Die tatsächlichen Emissionswerte des Anwendungsbeispiels sowie die daraus implizierten finanziellen Aspekte der entwickelten Emissionspläne unterliegen der Geheimhaltung. Zur besseren Veranschauli-

chung der Beispiele werden deshalb fiktive Werte für die Berechnung herangezogen (Scope 1 und 2: 100 000 t CO₂-eq; Scope 3: 10 Millionen t CO₂-eq).

4.2.1 Anwendung auf Reduktionsmaßnahmen in Scope 1 & 2

Im ersten Anwendungsbeispiel wurde ein Emissionsreduktionsplan für die Scopes 1 und 2 entwickelt. Insgesamt wurden 27 Einzelmaßnahmen für beide Scopes untersucht und in die MACC-Bewertung übernommen. Für jede Maßnahme wurden anhand der skizzierten Vorgehensweise Emissionsvermeidungskosten und Reduktionspotenziale auf Basis der individuellen Umsetzungsrate errechnet. Dabei wurden jeweils Wertebereiche identifiziert, um Unsicherheiten bei der Bewertung von Maßnahmen zu berücksichtigen. Eine zukunftsgerichtete Betrachtung über eine Szenarioanalyse wurde für die Scope-1-und-2-Analyse als erste Entwicklungsstufe des Modells noch nicht vorgenommen. Diese ist aber ebenso möglich und sinnvoll und sollte in zukünftigen Analysen nachgeholt werden. In den folgenden Abschnitten konzentriert sich die Analyse auf die jeweils mittleren Werte der Wertebereiche, da diese als am wahrscheinlichsten beziffert werden können.

Anhang Tabelle 1 zeigt eine Übersicht zur Bewertung der analysierten Maßnahmen: 18 der 27 Maßnahmen weisen negative Emissionsvermeidungskosten auf und sparen damit in der Gesamtbetrachtung sowohl Kosten als auch Emissionen ein. Die mit Abstand geringsten Emissionsvermeidungskosten liegen bei der Maßnahme "Reduktion von Dienstreisen mit eigenen Fahrzeugen" mit einem Wert von 2666,67 €/t CO₂-eq.p.a. Das Reduktionspotenzial ist jedoch gering: Nur 3,3 % der Emissionen in Scope 1 und Scope 2 können so reduziert werden. Ähnlich ist es bei der "Logistikoptimierung bei eigenen Transportfahrzeugen", wo die Emissionsvermeidungskosten bei -2321,43 €/t CO₂-eq.p.a. liegen, das Gesamtreduktionspotenzial aber nur bei 0,02 %. An dritter Stelle steht der "Neubau oder Sanierung im Passivhausstandard" mit -96,87 €/t CO₂-eq.p.a. Hier liegt das Reduktionspotenzial mit 10,2 % deutlich höher. Die am wenigsten effiziente Maßnahme ist der "Wechsel von Diesel-PKW auf FCEV-PKW", die mit grünem Wasserstoff betrieben werden (309,43 €/t CO₂-eq.p.a.). Beim "Wechsel von Diesel- zu FCEV-LKW" sind die Vermeidungskosten mit 88,12 €/t CO₂-eq deutlich geringer. Die Gesamtreduktionspotenziale sind mit 4 % und 0,08 % wiederum eher gering. Mit 57,18 €/t CO₂-eq.p.a. weist der "Wechsel von Gasheizung zu Wasserstoff-BHKWs" beim Betrieb mit grünem Wasserstoff die dritthöchsten Emissionsvermeidungskosten auf. Das Gesamtreduktionspotenzial ist mit 22,95 % allerdings sehr hoch.

Bei 19 Maßnahmen handelte es sich um Investitionsmaßnahmen, die eine Anfangsinvestition in eine neue Technologie erfordern. Bei 15 der Investitionsmaßnahmen findet eine Amortisation der Investition statt, das heißt, die laufenden Einsparungen sind höher als die laufenden Mehrkosten. Die durchschnittliche Amortisationszeit der Mehrinvestition (im Vergleich zur Status-quo-Technologie) beträgt 7,59 Jahre. Bei den reinen Energieeffizienzmaßnahmen beträgt die Amortisationszeit 4,4 Jahre, was der üblichen Dauer von drei bis fünf Jahren für diese Art der Investition entspricht [24]. Bei allen anderen investitionsintensiveren Maßnahmen liegt sie mit 9,72 Jahren deutlich höher, doch auch dies entspricht der durchschnittlichen Amortisation von Standard-Investitionen in produzierenden Unternehmen zwischen fünf und

15 Jahren [25]. Die kürzeste Amortisationszeit weist die Maßnahme "Isolierung von Anlagen, Rohren und anderer Infrastruktur" mit 0,13 Jahren auf. Bei "Einführung eines Energie-/Lastmanagement" sowie "Wechsel von Gasheizung zu Wärmepumpe" liegen ebenfalls geringe Amortisationszeiten von 1,1 und 1,84 Jahren vor. Die längste Amortisation (22,2 Jahre) hat "Neubau oder Sanierung im Passivhausstandard". Beim "Wechsel von Diesel- zu BEV-LKWs" und der "Nutzung von Gleichstromnetzen" liegen ebenfalls längere Amortisationszeiten von 14,6 und 14,71 Jahren vor.

Das höchste Gesamtreduktionspotenzial ist bei der Maßnahme "Bezug von Grünstrom beziehungsweise Green Power Purchase Agreements (PPAs)" zu finden. Die kompletten Scope-2-Emissionen (67 % von Scope 1 und Scope 2) lassen sich hierdurch (zumindest bei marktbasierter Berechnung) reduzieren. Die Vermeidungskosten liegen bei 2,42 €/t CO₂-eq p.a. und sind damit gering. Der Wechsel von Gasheizung zu Wärmepumpen beziehungsweise zu Bio-BHKW ist mit jeweils 27 % Gesamtreduktionspotenzial ebenfalls sehr effektiv bei der Emissionsreduktion. Während die Vermeidungskosten beim Wechsel zu Wärmepumpen mit -22,9 €/t CO₂-eq.p.a. negativ sind, liegen sie beim Wechsel zu Bio-BHKW mit 7,45 €/t CO₂-eq.p.a. deutlich darüber.

Neben der Betrachtung der Emissionsvermeidungskosten und Amortisationszeiten ist für viele Unternehmen auch der initiale (Mehr-)Investitionsbedarf einer Maßnahme relevant. Die geringste Investition je vermiedene Tonne CO₂-eq liegt mit 2,6 €/t CO₂-eq bei der Maßnahme "Isolierung von Anlagen, Rohren und anderer Infrastruktur" vor. Die Maßnahmen "Einführung eines Energie-/Lastmanagement" sowie "Verbesserung der Gebäudedämmung" folgen mit 17,24 €/t CO₂-eq und 23,42 €/t CO₂-eq. Die Maßnahmen mit den höchsten Investitionen sind "Neubau oder Sanierung im Passivhausstandard" (8303,34 €/t CO₂-eq), "Wechsel von Diesel- zu FCEV-PKW" (1134,68 €/t CO₂-eq) und die "Nutzung von Gleichstromnetzen" (530,79 €/t CO₂-eq).

Berücksichtigt man die Synergien und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Maßnahmen, ergibt sich eine adjustierte MACC, die in **Bild 2** zu sehen ist. Mit 15 Maßnahmen können 96,9 % der Scope-1-und-2-Emissionen eingespart werden (marktbasierter Berechnung). Die restlichen zwölf untersuchten Maßnahmen finden keine Anwendung, da es jeweils effizientere Alternativen zu ihnen gibt. Aus den spezifischen Emissionsvermeidungskosten errechnet sich eine durchschnittliche Einsparung von rund 10,51 Millionen € p.a. (CapEx, OpEx und Kosteneinsparungen durch Maßnahmen über deren gesamte Nutzungsdauer) durch den vorgeschlagenen Emissionsreduktionsplan. Die durchschnittlichen Gesamtvermeidungskosten des Reduktionsplans betragen damit -108,46 €/t CO₂-eq. Die initialen Mehrinvestitionen betragen etwa 88,54 Millionen €.

Nur zwei der 15 Maßnahmen weisen Emissionsvermeidungskosten von größer 0 €/t CO₂-eq auf ("Bezug von Grünstrom beziehungsweise Green PPAs" und "Wechsel von Diesel- zu BEV-LKW"). Bei der alternativen standortbasierten Berechnung liegt die Emissionsreduktion bei 45,59 %, da die Reduktionswirkung aus dem "Bezug von Grünstrom beziehungsweise Green PPAs" nicht einkalkuliert wird. Das Science-based Target Level von mindestens 42 % Emissionsreduktion bis 2030 kann komplett durch Maßnahmen mit positivem Business Case erreicht werden. Bei Umsetzung aller Maßnahmen mit positivem Business Case können 48 % der Emissionen vermieden werden.

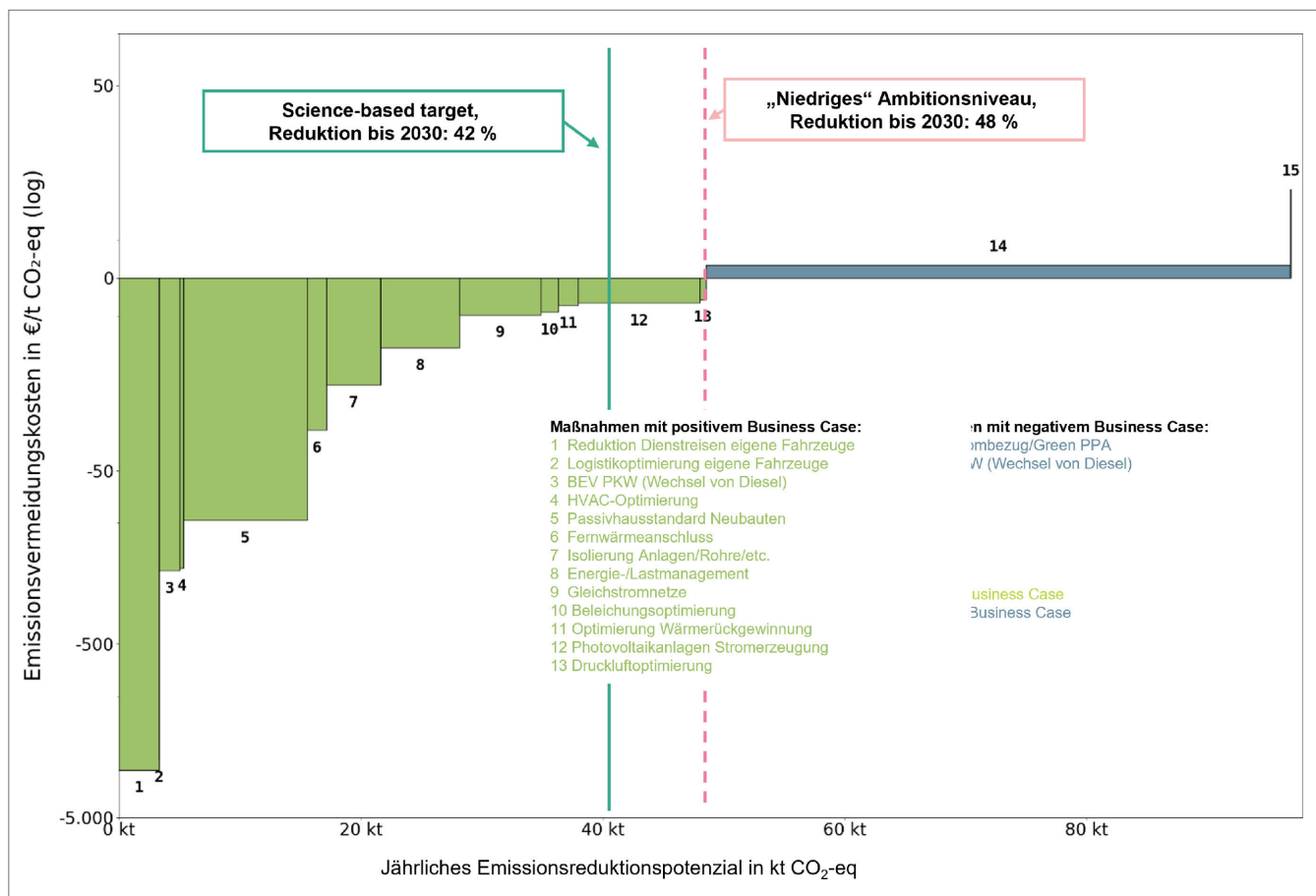


Bild 2 Adjustierte MACC (Marginal Abatement Cost Curves) für Scope-1- und Scope-2-Reduktionsmaßnahmen für mittleren Wertebereich (Ausschnitt zur besseren Lesbarkeit). Grafik: Fraunhofer IPA

Zur Berücksichtigung von Ungenauigkeit oder Unsicherheiten in der Bewertung von Maßnahmen können untere und obere Werte als Best- beziehungsweise Worst-Case-Szenario für eine zusätzliche Berechnung hinzugenommen werden. Unter Beibehaltung derselben Reduktionsleistung je Maßnahme ergibt sich im Best-Case-Szenario eine jährliche Einsparung von 14,39 Millionen € p.a., womit die durchschnittlichen Emissionsvermeidungskosten bei -148,45 €/t CO₂-eq liegen. Im Worst-Case-Szenario sind es hingegen nur 5,64 Millionen € an Einsparungen pro Jahr. Die Gesamtvermeidungskosten liegen hier bei -56,59 €/t CO₂-eq. Die Reihenfolge der Maßnahmen bleibt unverändert, sodass sich keine Änderungen an der Auswahl und Priorisierung von Emissionsreduktionsmaßnahmen ergeben.

4.2.2 Anwendungsbeispiel für Reduktionsmaßnahmen in Scope 3

Im zweiten Anwendungsbeispiel lag der Fokus auf der Entwicklung eines Dekarbonisierungsplans für Scope 3. Es wurden insgesamt 60 Maßnahmen identifiziert und bewertet. Im Anwendungsbeispiel kam die szenarienbasierte und dynamisierte MACC-Berechnung zur Abschätzung zukünftiger Emissionsvermeidungskosten und Reduktionspotenziale zum Einsatz, da externe Faktoren einen hohen Einfluss auf die Maßnahmenbewertung ausüben. **Anhang Tabelle 2** zeigt Details zur Bewertung der untersuchten Dekarbonisierungsmaßnahmen.

Bei 18 Maßnahmen liegen negative Emissionsvermeidungskosten für das Jahr 2025 vor, fünf Maßnahmen sind kostenneutral (0 €/t CO₂-eq) und 36 Maßnahmen haben positive Werte. Die effizientesten Maßnahmen sind "Reduktion des Materialeinsatzes von Stahlblech (Maßnahme #3)" (-1468,36 €/t CO₂-eq, Scope 3.1), "Reduktion des Materialeinsatzes von Oberflächenschutz (Maßnahme #1)" (-1278,16 €/t CO₂-eq, Scope 3.1) und "Reduktion von Geschäftsreisen" (-985,05 €/t CO₂-eq, Scope 3.6). Die am wenigsten effizienten Maßnahmen sind die "Regionalisierung der Produktion" (8735,91 €/t CO₂-eq, Scope 3.4 und Scope 3.9), der "Einsatz von biobasierten Kunststoffen bei Verpackungen" (4075,33 €/t CO₂-eq, Scope 3.1 und 3.5) und der "Einsatz von emissionsfreundlichen Paletten und Kisten" (3060,54 €/t CO₂-eq, Scope 3.1). Im Vergleich zu Maßnahmen in Scope 1 und 2 wird deutlich, dass die Spannweite der Vermeidungskosten zwischen -1450 bis zu knapp 8600 €/t CO₂-eq deutlich größer ist.

Im Rahmen der Szenarioanalyse ergeben sich für jede Maßnahme drei variierende Zukunftswerte für das Zieljahr 2030. Diese wurden jeweils mit den Werten aus 2025 gemittelt, um einen jährlichen Durchschnitt für den Umsetzungszeitraum 2025 bis 2030 zu erhalten. Die Abweichungen der Emissionsvermeidungskosten zwischen den drei Szenarien sind durchweg signifikant: Bei den meisten Maßnahmen liegen sie im KON-Szenario bis zu 10 % höher als im BAU-Szenario. In einzelnen Fällen liegen die Vermeidungskosten 40 % höher. Der Vergleich zwischen PROG- und BAU-Szenario ergibt ähnliche Wertabweichungen:

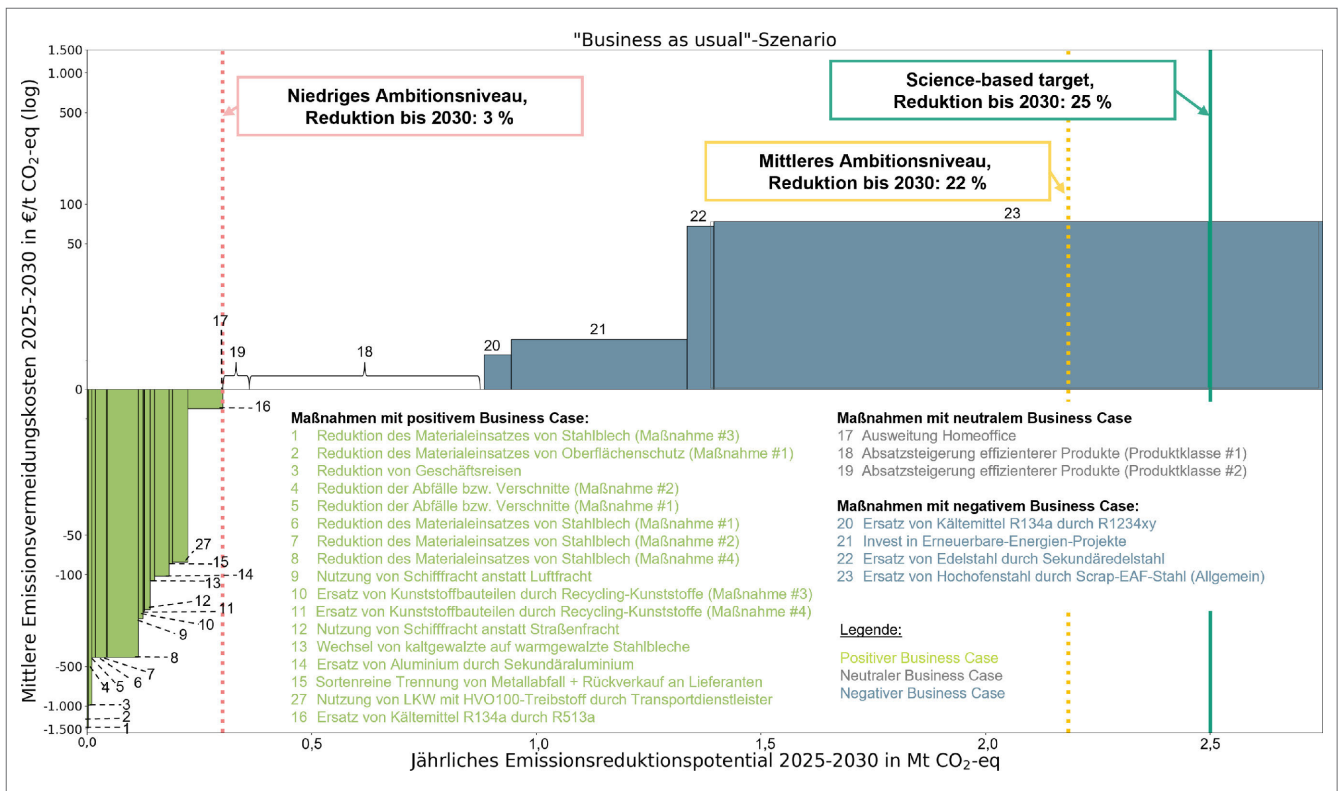


Bild 3 Adjustierte MACC im BAU (Business-as-usual)-Szenario für Scope-3-Reduktionsmaßnahmen (Ausschnitt zur besseren Lesbarkeit).
Grafik: Fraunhofer IST

Meist liegen die Emissionsvermeidungskosten zwischen 1 % und 10 % unter jenen aus dem BAU-Szenario; in Einzelfällen liegen sie bis zu 50 % darunter. In der Reihenfolge der Maßnahmen ergeben sich hierdurch nur wenige Unterschiede zwischen den drei Szenarien, sodass die MACCs in dieser Hinsicht robust sind.

Der Vergleich der Gesamt-Reduktionspotenziale der einzelnen Maßnahmen zeigt, welche Maßnahmen am effektivsten zur Emissionsreduktion beitragen. Mit bis zu 14,69 % Reduktion in Scope 3.1 im BAU-Szenario liegt beim "Ersatz von Hochofenstahl durch Scrap-EAF-Stahl" aus der EAF-Route das höchste Potenzial. Danach folgt mit 5,19 % die geplante "Absatzsteigerung effizienterer Produkte (Produktklasse #1)", welche weniger Energie in der Nutzungsphase benötigt (Scope 3.11). Mit 3,91 % folgt der "Invest in Erneuerbare-Energien-Projekte" zur Reduktion von Emissionen in der Nutzungsphase (Scope 3.11). Lediglich 13 Maßnahmen haben ein Reduktionspotenzial von mehr als 1 %. Damit gestaltet sich die Emissionsreduktion in Scope 3 deutlich kleinteiliger als in Scope 1 und 2.

In **Bild 3** ist die adjustierte MACC zur Dekarbonisierung von Scope 3 im BAU-Szenario dargestellt. 34 der 60 untersuchten Maßnahmen finden Eingang in den Reduktionsplan. Bei den restlichen Maßnahmen ist kein Potenzial vorhanden oder die Emissionsquelle ist bereits durch effizientere Maßnahmen abgedeckt. Das Gesamtreduktionspotenzial im BAU-Szenario beträgt 33,2 %, also etwa 3,32 Millionen tCO₂-eq, und ist so deutlich geringer als in Scope 1 und 2. Die Kosten belaufen sich auf 189,5 Millionen € pro Jahr. Insbesondere der Einsatz von Scrap-EAF- und DR-EAF-Stahl treibt die Kosten in die Höhe. Die durchschnittlichen Gesamtemissionsvermeidungskosten betragen 57,07 €/t CO₂-eq.

Im KON-Szenario liegt das Gesamtreduktionspotenzial nur bei 26 %. Die Kosten belaufen sich auf 168,4 Millionen €, was in

Gesamtemissionsvermeidungskosten von 64,73 €/t CO₂-eq resultiert. Im PROG-Szenario ist ein Reduktionspotenzial von 40,8 % möglich. Die Kosten liegen mit 125,9 Millionen € deutlich unter dem KON- und BAU-Szenario. Die Gesamtemissionsvermeidungskosten sind mit 30,85 €/t CO₂-eq ebenso deutlich geringer.

5 Diskussion

Mit der Erweiterung der MACC-Methode durch eine dynamisierte, robuste und szenarienbasierte Zukunftsbewertung von Dekarbonisierungsmaßnahmen werden einige der zentralen Kritikpunkte der Methode widerlegt. Das erste Anwendungsbeispiel zeigt, wie Unsicherheiten bei der Anwendung der Methode durch Wertebereiche berücksichtigt werden können. Die Abweichungen zwischen unterem und oberem Wert der Emissionsvermeidungskosten sind je nach Maßnahme unterschiedlich stark. Dementsprechend hängt die Auswahl und Priorisierung der Maßnahmen, also der auf den MACC basierende Maßnahmenplan, zumindest teilweise von den errechneten Wertebereichen ab. Es konnte dennoch gezeigt werden, dass die Reihenfolge der Maßnahmen sowie die Reduktionspotenziale und Kosten grundsätzlich robust sind.

Durch die Berücksichtigung von Unsicherheiten wird sichergestellt, dass tatsächlich die effizientesten Maßnahmen ausgewählt werden und genügend finanzielles Budget für den Maßnahmenplan zur Verfügung steht. Die Glaubwürdigkeit und Effektivität von Reduktionsstrategien werden damit erhöht. Gleichzeitig findet eine Dynamisierung der Maßnahmenbewertung statt: Abhängig von den priorisierten Maßnahmen werden Wechselwirkungen (etwa Synergien, hemmende Wirkungen) berücksichtigt, die sich auf Emissionsvermeidungskosten und Reduktionspotenziale auswirken. So werden Doppelzählungen vermieden und die Genauig-

keit von MACC-Ergebnissen deutlich erhöht. Die identifizierten Maßnahmen in Scope 1 und 2 führten im Anwendungsbeispiel insgesamt zu einer hohen Emissionsreduktion, sowohl bei der markt- als auch bei der standortbasierten Berechnungsmethode. In beiden Fällen werden die ambitionierten Zielvorgaben der SBTi von mindestens 42 % Reduktion über einen Zehnjahreszeitraum erfüllt [26]. Bei der marktbasieren Berechnung wird das Reduktionskriterium von mindestens 90 % zur Erreichung des Net-Zero-Status erreicht [27]. Lediglich einige Restemissionen im externen Bezug von Wärme verbleiben. Bei einer zukünftig zunehmenden Dekarbonisierung des Wärmenetzes könnten auch diese Restemissionen vermieden werden.

Das zweite Anwendungsbeispiel zeigt, wie eine szenarienbasierte und zukunftsgerichtete Maßnahmenbewertung durchgeführt werden kann. Vor allem der lange Zeitraum, der üblicherweise durch Klimastrategien abgedeckt wird, macht eine Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen unabdingbar. Faktoren wie die Bepreisung von CO₂-Zertifikaten, die Kostenentwicklung von fossiler und erneuerbarer Energie sowie grüner Technologien oder die Verfügbarkeit von emissionsarmen Alternativen können eine große Auswirkung auf die Emissionsvermeidungskosten und Reduktionspotenziale haben und damit auch auf eine möglichst wirtschaftliche Gestaltung des Dekarbonisierungsplans. Bei der Identifikation von Scope-3-Reduktionsmaßnahmen wurde ersichtlich, dass nur ein Teil der Emissionen im Einflussbereich des Unternehmens lag und es für viele Emissionsquellen derzeit keine validen emissionsarmen Alternativen gibt. Im Unterschied zu Scope 1 und 2 kann nur ein Teil der Emissionen eigenständig vermieden werden. Die Anforderungen der SBTi an kurzfristige Scope-3-Ziele (Emissionsreduktion von über 25 % innerhalb eines Zeitraums von zehn Jahren) können grundsätzlich erfüllt werden [26]. Darüberhinausgehende Emissionsminderungen sind jedoch nur durch das Aufkommen neuer Technologien oder Materialien, durch weitere Verbesserungen der regulatorischen und marktseitigen Rahmenbedingungen sowie durch eine fortschreitende Dekarbonisierung weiterer Akteure entlang der Lieferkette erreichbar. Für die Erreichung des Net-Zero-Status reicht der aktuelle Maßnahmenplan nicht aus [27].

Unternehmen, welche sich mit der Entwicklung einer Dekarbonisierungsstrategie beschäftigen, sollten zunächst sicherstellen, dass eine möglichst vollständige, genaue und granulare Emissionsbilanz in allen drei Scopes des GHGP vorliegt. Aus der Emissionsbilanz lassen sich die relevanten Emissionsquellen und mögliche Maßnahmen zur Dekarbonisierung ableiten. Bei der anschließenden Maßnahmenbewertung sollten, wie bei der MACC-Methode, mindestens ökonomische und ökologische Kriterien berücksichtigt werden, da nur so eine möglichst effiziente Auswahl von Maßnahmen gewährleistet werden kann. Zudem werden wichtige Daten für die Entwicklung von Transformationsplänen gesammelt (etwa die Gesamtkosten, der Investitionsbedarf, wissenschaftliche Reduktionsprognose). Zur Zusammenstellung der notwendigen Datengrundlage ist es hilfreich sowohl interne als auch externe Akteure und Quellen einzubeziehen und eine möglichst breite Datenbasis zu schaffen. Konkrete Reduktionsziele

können sowohl auf Basis der Maßnahmenbewertung (bottom up) als auch durch weitere Faktoren und Analysen (zum Beispiel Wettbewerbsperspektive) top down festgelegt werden.

Bei der Auswahl und Priorisierung sollte grundsätzlich mit den effizientesten Maßnahmen gestartet werden. Teure Maßnahmen sollten verworfen oder zurückgestellt werden, da sich Emissionsvermeidungskosten und Reduktionspotenziale durch Rahmenbedingungen zukünftig verbessern können.

6 Ausblick

Die vorgeschlagene, erweiterte MACC-Methode bietet einen effektiven und innovativen Ansatz, welcher die ökologischen und ökonomischen Dimensionen der Maßnahmenbewertung kombiniert und gleichzeitig zukünftige Entwicklungen, Unsicherheiten und Wechselwirkungen berücksichtigt. Die Entwicklung von wirtschaftlichen Maßnahmenplänen kann somit deutlich genauer und zukunftsgerichteter erfolgen. Die Beispiele zeigen, dass die Methode in der Praxis anwendbar ist und zu einer genaueren und breiteren Informationsbasis für Entscheidungsträger führt.

Dennoch ergaben sich im Laufe des Projektes und vor allem bei der Anwendung der Methode im Beispielunternehmen einige Limitationen und Herausforderungen. Eine der praktischen Schwierigkeiten lag bei der Erhebung der ökologischen und ökonomischen Daten, die zur Berechnung von Emissionsvermeidungskosten notwendig sind. Insbesondere bei Scope-3-Maßnahmen ist die Datenlage häufig nicht gut oder nur mit erheblichem Aufwand zu berechnen. Zudem lag auch auf Ebene der Weltregionen ein großes Ungleichgewicht vor. Während es für viele Prozesse in Europa häufig umfassende Datensets gibt, ist die Verfügbarkeit von Informationen in Nord- und Südamerika, Afrika und der Asia-Pacific (APAC) -Region deutlich limitierter. Die zukünftige Forschung sollte in enger Zusammenarbeit mit der Praxis an der Verbesserung der Qualität und Verfügbarkeit von ökonomischen und vor allem ökologischen Daten für Dekarbonisierungsmaßnahmen arbeiten. Insbesondere Emissionsfaktoren für neue Technologien, Materialien und Produkte sind nötig, um eine ganzheitliche Bewertung von potenziellen Maßnahmen zu ermöglichen.

Eine weitere Limitation stellt die Unsicherheit der Szenarienparameter für die Modellierung der Zukunftsszenarien dar, da diese oft auf Prognosen und Abschätzungen basieren und es in vielen Fällen kaum oder gar keine zuverlässigen Datenquellen gibt. Zukünftige Arbeiten sollten sich deshalb näher mit einer möglichst repräsentativen Bewertung von relevanten Szenarienparametern auseinandersetzen. Die vorliegende Methode fokussiert aktuell noch auf die Emissionsvermeidung in Verbindung mit ökonomischen Kennzahlen. In Zukunft sollte darüber hinaus ein Fokus auf die Integration weiterer ökologischer Aspekte und der sozialen Dimension der Dekarbonisierung auf quantitativer Basis gelegt werden. Die Bewertung und Optimierung von Dekarbonisierungsstrategien auf Ebene einzelner Produkte und Produktkategorien könnte ebenfalls zu weiteren wichtigen Erkenntnissen und Praxisanwendungen führen.

Tabelle 1 Übersicht über Scope-1- und Scope-2-Maßnahmen, inkl. Bewertungsindikatoren für mittlerer Wertebereich.

Maßnahme	Emissionsvermeidungskosten in €/t CO ₂ eq p.a. (mittlerer Wert)	Emissionsvermeidungskosten in €/t CO ₂ eq p.a. (unterer Wert)	Emissionsvermeidungskosten in €/t CO ₂ eq p.a. (oberer Wert)	Reduktionspotenzial in %	Amortisationszeit in Jahren	Investitionsmaßnahme?	CapEx in €/t CO ₂ eq	Gesamtkosten in € (mittlerer Wert)
Reduktion von Dienstreisen mit eigenen Fahrzeugen	-2.666,67 €	-2.876,31 €	-2.457,02 €	3,30%	0,00	Nein	0,00 €	-8.800.000,00 €
Transport- und Logistikoptimierung bei eigenen Fahrzeugen	-2.321,43 €	-2.500,00 €	-2.142,86 €	0,02%	0,00	Nein	0,00 €	-53.392,86 €
Neubau oder Sanierung im Passivhausstandard	-96,87 €	-124,55 €	-69,19 €	10,20%	22,22	Ja	8.303,34 €	-988.097,17 €
Wechsel von Diesel- zu BEV-PKW	-64,18 €	-78,44 €	-49,92 €	5,00%	2,46	Ja	318,03 €	-320.883,07 €
Nutzung von Fernwärme statt eigener Wärmeerzeugung	-39,48 €	-63,14 €	-15,82 €	2,60%	0,00	Nein	0,00 €	-102.790,18 €
Wechsel von Standard-Gasheizungen zu Brennwertheizungen	-26,08 €	-57,98 €	-11,91 €	2,70%	2,48	Ja	73,72 €	-70.405,22 €
Optimierung von Heating, Ventilation, Air-Conditioning (HVAC)	-24,59 €	-34,95 €	-13,38 €	2,40%	3,47	Ja	103,34 €	-59.027,78 €
Wechsel von Gasheizung zu Wärmepumpen	-22,90 €	-55,30 €	-9,80 €	27,00%	1,84	Ja	18,19 €	-618.300,00 €
Isolierung von Anlagen, Rohren und anderer Infrastruktur	-20,62 €	-41,36 €	-10,16 €	6,00%	0,13	Ja	2,60 €	-123.697,92 €
Wechsel von Gasheizung zu Gas-BHKW	-15,73 €	-34,29 €	-7,79 €	4,59%	9,43	Ja	280,74 €	-72.177,78 €
Einführung eines Energie-/ Lastmanagement	-14,77 €	-34,48 €	-5,67 €	8,00%	1,10	Ja	17,24 €	-118.121,38 €
Verbesserung der Gebäudedämmung	-11,71 €	-40,23 €	-7,54 €	9,60%	1,88	Ja	23,42 €	-112.412,18 €
Nutzung von Gleichstromnetzen	-9,55 €	-26,80 €	-3,66 €	6,70%	14,71	Ja	530,79 €	-64.012,74 €
Optimierung der Beleuchtungsinfrastruktur	-8,88 €	-15,78 €	-3,26 €	1,60%	4,00	Ja	169,93 €	-14.219,94 €
Optimierung der Druckluftbereitstellung	-6,96 €	-18,78 €	-4,52 €	0,62%	6,80	Ja	108,11 €	-4.304,46 €
Stromerzeugung durch eigene Photovoltaik-Anlagen	-6,49 €	-7,14 €	-4,32 €	10,05%	10,00	Ja	70,95 €	-65.189,19 €
Wechsel von Gasheizung zu Solarthermie-Anlagen	-4,04 €	-44,11 €	5,24 €	24,30%	10,98	Ja	98,40 €	-98.172,00 €
Optimierung der Wärmerückgewinnung	-3,68 €	-4,46 €	2,30 €	3,20%	13,45	Ja	89,68 €	-11.767,20 €
Bezug von Grünstrom bzw. Green PPAs	2,42 €	-23,04 €	25,60 €	67,00%	0,00	Nein	0,00 €	162.140,00 €

Tabelle 1 Übersicht über Scope-1- und Scope-2-Maßnahmen, inkl. Bewertungsindikatoren für mittlerer Wertebereich.

Maßnahme	Emissionsvermeidungskosten in €/t CO ₂ eq p.a. (mittlerer Wert)	Emissionsvermeidungskosten in €/t CO ₂ eq p.a. (unterer Wert)	Emissionsvermeidungskosten in €/t CO ₂ eq p.a. (oberer Wert)	Reduktionspotenzial in %	Amortisationszeit in Jahren	Investitionsmaßnahme?	CapEx in €/t CO ₂ eq	Gesamtkosten in € (mittlerer Wert)
Optimierung der Kältemittel-Nutzung	2,61 €	1,82 €	7,01 €	0,00%	0,00	Nein	0,00 €	0,00 €
Wechsel von Gasheizung zu Bio-BHKW	7,45 €	-19,52 €	12,76 €	27,00%	NA	Ja	49,45 €	201.150,00 €
Wechsel von Diesel zu BEV-LKW	18,42 €	10,23 €	43,88 €	0,10%	14,60	Ja	325,89 €	1.841,52 €
Wechsel von Diesel zu Biofuels bei PKWs	56,23 €	27,18 €	81,53 €	4,35%	0,00	Nein	0,00 €	244.584,21 €
Wechsel von Diesel zu Biofuels bei LKWs	56,23 €	27,18 €	81,53 €	0,09%	0,00	Nein	0,00 €	4.891,68 €
Wechsel von Gasheizung zu H ₂ -BHKW	57,18 €	29,45 €	85,76 €	22,95%	NA	Ja	57,76 €	1.312.170,57 €
Wechsel von Diesel zu FCEV-LKW	88,12 €	73,29 €	245,16 €	0,08%	NA	Ja	407,37 €	7.049,85 €
Wechsel von Diesel zu FCEV-PKW	309,43 €	219,87 €	615,59 €	4,00%	NA	Ja	1.134,68 €	1.237.722,56 €

Tabelle 2 Übersicht über Scope-3-Maßnahmen, inkl. Bewertungsindikatoren.

Maßnahme	Emissionsvermeidungskosten 2025 bis 2030 in €/t CO ₂ eq p.a. (BAU)	Emissionsvermeidungskosten 2025 bis 2030 in €/t CO ₂ eq p.a. (KON)	Emissionsvermeidungskosten 2025 bis 2030 in €/t CO ₂ eq p.a. (PROG)	Reduktionspotenzial in % (BAU)
Reduktion des Materialeinsatzes von Stahlblech (Maßnahme #3)	-1.468,36 €	-1.442,55 €	-1.506,18 €	0,03%
Reduktion des Materialeinsatzes von Oberflächenschutz (Maßnahme #1)	-1.278,16 €	-1.269,36 €	-1.298,96 €	0,00%
Reduktion von Geschäftsreisen	-985,05 €	-957,30 €	-1.024,80 €	0,07%
Reduktion des Materialeinsatzes von Oberflächenschutz (Maßnahme #2)	-928,79 €	-909,88 €	-959,70 €	0,00%
Reduktion des Materialeinsatzes von Oberflächenschutz (Maßnahme #3)	-911,22 €	-899,90 €	-934,53 €	0,00%
Reduktion der Abfälle bzw. Verschnitte (Maßnahme #2)	-491,34 €	-479,34 €	-515,34 €	0,01%
Reduktion der Abfälle bzw. Verschnitte (Maßnahme #1)	-428,17 €	-411,93 €	-456,41 €	0,07%
Reduktion des Materialeinsatzes von Stahlblech (Maßnahme #1)	-427,96 €	-411,93 €	-455,98 €	0,70%
Reduktion des Materialeinsatzes von Stahlblech (Maßnahme #2)	-427,96 €	-411,93 €	-455,98 €	0,25%
Reduktion des Materialeinsatzes von Stahlblech (Maßnahme #4)	-427,96 €	-411,93 €	-455,98 €	0,02%
Nutzung von Schifffracht anstatt Luftfracht	-216,20 €	-198,67 €	-245,73 €	0,11%
Ersatz von Kunststoffbauteilen durch Recycling-Kunststoffe (Maßnahme #3)	-192,57 €	-159,19 €	-233,73 €	0,01%
Ersatz von Kunststoffbauteilen durch Recycling-Kunststoffe (Maßnahme #4)	-188,04 €	-147,30 €	-234,80 €	0,01%

Tabelle 2 Übersicht über Scope-3-Maßnahmen, inkl. Bewertungsindikatoren.

Maßnahme	Emissionsvermeidungskosten 2025 bis 2030 in €/t CO ₂ eq p.a. (BAU)	Emissionsvermeidungskosten 2025 bis 2030 in €/t CO ₂ eq p.a. (KON)	Emissionsvermeidungskosten 2025 bis 2030 in €/t CO ₂ eq p.a. (PROG)	Reduktionspotenzial in % (BAU)
Nutzung von Schifffracht anstatt Straßenfracht	-184,65 €	-108,00 €	-273,30 €	0,13%
Wechsel von kaltgewalzte auf warmgewalzte Stahlbleche	-111,37 €	-100,90 €	-133,35 €	0,10%
Ersatz von Aluminium durch Sekundäraluminium	-102,93 €	-93,66 €	-123,96 €	0,32%
Sortenreine Trennung von Metallabfall + Rückverkauf an Lieferanten	-82,99 €	-70,99 €	-106,99 €	0,07%
Nutzung von LKW mit HVO100-Treibstoff durch Transportdienstleister	-80,14 €	151,88 €	-299,58 €	0,34%
Ersatz von Kältemittel R134a durch R513a	-6,60 €	-6,03 €	-6,99 €	0,78%
Absatzsteigerung effizienterer Produkte (Produktklasse #1)	0,00 €	0,00 €	0,00 €	5,19%
Absatzsteigerung effizienterer Produkte (Produktklasse #2)	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,61%
Ausweitung von Homeoffice-Regelung	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,02%
Ersatz von Kältemittel R134a durch R290	4,74 €	4,83 €	4,80 €	2,02%
Ersatz von Kältemittel R134a durch R1234xy	11,94 €	11,95 €	12,16 €	0,60%
Invest in Erneuerbare-Energien-Projekte	17,08 €	20,25 €	11,00 €	3,91%
Produkt-Energieeffizienzsteigerung durch Redesign (Maßnahme #3)	26,10 €	26,10 €	26,10 €	0,00%
Produkt-Energieeffizienzsteigerung durch Redesign (Maßnahme #4)	65,25 €	65,25 €	65,25 €	0,00%
Ersatz von Edelstahl durch Sekundäredelstahl	67,60 €	94,54 €	36,23 €	0,60%
Ersatz von Hochofenstahl durch Scrap-EAF-Stahl (Allgemein)	73,77 €	97,09 €	41,08 €	14,69%
Ersatz von Hochofenstahl durch DR-EAF Stahl (Erdgas)	82,59 €	105,97 €	50,70 €	0,58%
Ersatz von Hochofenstahl durch DR-EAF Stahl (Erdgas + CCS)	87,34 €	107,48 €	57,48 €	0,93%
Ersatz von Hochofenstahl durch Scrap-EAF-Stahl (Stahlhersteller #2)	90,86 €	116,02 €	56,53 €	12,77%
Ersatz von Aluminium durch grünes Aluminium	101,97 €	120,11 €	71,90 €	0,10%
Ersatz von Hochofenstahl durch emissionsreduzierten Stahl aus biogener Kohle	108,93 €	133,68 €	72,31 €	1,14%
Ersatz von Hochofenstahl durch DR-EAF Stahl (blauer Wasserstoff)	114,96 €	144,47 €	73,75 €	2,32%
Ersatz von Kunststoffbauteilen durch Recycling-Kunststoffe (Maßnahme #1)	124,49 €	166,26 €	80,06 €	0,44%
Ersatz von Hochofenstahl durch Scrap-EAF-Stahl (Stahlhersteller #1)	129,77 €	154,21 €	95,48 €	14,83%
Produkt-Energieeffizienzsteigerung durch Redesign (Maßnahme #5)	171,05 €	171,05 €	171,05 €	0,00%
Einsatz von Recycling-Kunststoff bei Verpackungen	219,94 €	340,39 €	117,35 €	0,02%
Ersatz von Hochofenstahl durch DR-EAF Stahl (grünem Wasserstoff)	252,19 €	291,24 €	195,61 €	2,90%
Ersatz von Kupfer durch Sekundärkupfer	305,05 €	335,31 €	265,18 €	0,38%
Produkt-Energieeffizienzsteigerung durch Redesign (Maßnahme #6)	350,64 €	350,64 €	350,64 €	0,00%
Einsatz von emissionsreduzierten Kartontage	576,22 €	720,21 €	466,83 €	0,03%
Ersatz von Kunststoffbauteilen durch Recycling-Kunststoffe (Maßnahme #2)	668,65 €	711,68 €	626,34 €	0,03%

Tabelle 2 Übersicht über Scope-3-Maßnahmen, inkl. Bewertungsindikatoren.

Maßnahme	Emissionsvermeidungskosten 2025 bis 2030 in €/t CO ₂ eq p.a. (BAU)	Emissionsvermeidungskosten 2025 bis 2030 in €/t CO ₂ eq p.a. (KON)	Emissionsvermeidungskosten 2025 bis 2030 in €/t CO ₂ eq p.a. (PROG)	Reduktionspotenzial in % (BAU)
Produkt-Energieeffizienzsteigerung durch Redesign (Maßnahme #7)	709,84 €	709,84 €	709,84 €	0,00%
Einsatz von emissionsreduzierten Leitungen und Kabel	878,75 €	974,31 €	803,50 €	0,04%
Kauf von „Book and Claim“ Zertifikaten für Transporte	878,78 €	1.047,20 €	680,22 €	0,62%
Ersatz von Kunststoffbauteilen durch biomassenbilanzierten Kunststoffe (Maßnahme #1)	906,57 €	977,80 €	841,87 €	0,02%
Nutzung von elektrischen LKW durch Transportdienstleister	947,48 €	1.193,65 €	719,35 €	0,98%
Einsatz von emissionsreduzierten Lacken	972,56 €	1.020,66 €	930,61 €	0,02%
Einsatz von emissionsreduzierter Grundierung	996,35 €	1.040,38 €	958,69 €	0,01%
Ersatz von Kunststoffbauteilen durch biomassenbilanzierten Kunststoffe (Maßnahme #2)	1.253,56 €	1.326,06 €	1.189,76 €	0,03%
Einsatz von biomassenbilanzierte Kunststoffe bei Verpackungen	2.022,52 €	2.139,61 €	1.922,93 €	0,00%
Ersatz von Kunststoffbauteilen durch biobasierte Kunststoffe	2.177,93 €	2.285,05 €	2.091,58 €	0,02%
Einsatz von emissionsfreundlichen Paletten und Kisten	3.060,54 €	3.373,28 €	2.839,06 €	0,09%
Einsatz von biobasierte Kunststoffe bei Verpackungen	4.075,33 €	4.226,10 €	3.955,29 €	0,00%
Regionalisierung der Produktion	8.735,91 €	8.608,22 €	8.851,60 €	0,37%
Produkt-Energieeffizienzsteigerung durch Redesign (Maßnahme #1)	NA	NA	NA	0,00%
Produkt-Energieeffizienzsteigerung durch Redesign (Maßnahme #2)	NA	NA	NA	0,00%
Produkt-Energieeffizienzsteigerung durch Redesign (Maßnahme #8)	NA	NA	NA	0,00%

Literatur

- [1] Pineda Perez, B.; Grijalvo, M.: Corporate Engagement with the Science Based Targets Initiative: Financial Implications and Key Motivators. ESIC Market 56 (2025) 1, e332
- [2] Littlewood, D.; Decelis, R.; Hillenbrand, C. et al.: Examining the drivers and outcomes of corporate commitment to climate change action in European high emitting industry. Business Strategy and the Environment 27 (2018) 8, pp. 1437–1449
- [3] Hilson, C.: Climate change and the politicization of ESG in the US. Frontiers in Political Science 6 (2024), #1332399, <https://doi.org/10.3389/fpos.2024.1332399>
- [4] Europäische Kommission: Omnibus package. Commission launched simplification package in February as part of increased focus on EU competitiveness. Internet: finance.ec.europa.eu/news/omnibus-package-2025-04-01_en. Zugriff am 18.03.2026
- [5] Roland Berger: Businesses need strategies to switch to low-carbon or carbon-neutral production processes. Stand: 2019. Internet: www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Climate-protection-in-the-manufacturing-sector-Challenges-and-solutions.html. Zugriff am 18.03.2026
- [6] Kiemel, S.; Schäfer, S. F.; Dokur, Y. D. et al.: Current State and Best Practices on the Way to Zero Emission in the Manufacturing Industry: An Empirical Survey in the Germany-Austria-Switzerland Region. Procedia CIRP 116 (2023), pp. 432–437
- [7] Fawzy, S.; Osman, A. I.; Doran, J. et al.: Strategies for mitigation of climate change: a review. Environmental Chemistry Letters 18 (2020) 6, pp. 2069–2094
- [8] BDO & Kirchhoff: DACH-Studie 2024. Klimaschutz – Reporting zur Dekarbonisierung, 2024. Internet: www.kirchhoff.de/fileadmin/static/pdfs/2024_news/2024_10_14_DAX160_Studie_Teil_2.pdf. Zugriff am 18.03.2026
- [9] Europäisches Parlament und Europarat: Sorgfaltspflichten von Unternehmen im Hinblick auf Nachhaltigkeit und zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und der Verordnung (EU) 2023/2859. CSDDD. Stand: 2024. Internet: eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202401760#art_22. Zugriff am 18.03.2026
- [10] WBCSD & WRI: The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard. Stand: 2015. Internet: ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf. Zugriff am 18.03.2026
- [11] Rentschler, M.; Kiemel, S.; Mieke, R.: Requirement Engineering for Effectively Assessing and Prioritizing Emission Reduction Measures to achieve Net Zero in Enterprises. Procedia CIRP 135 (2025), pp. 1009–1014
- [12] Enkvist, P.-A.; Nauclér, T.; Rosander, J.: A cost curve for greenhouse gas reduction. The McKinsey Quarterly (2007) 01/20027
- [13] Misconel, S.; Prina, M. G.; Hobbie, H. et al.: Model-based step-wise marginal CO₂ abatement cost curves to determine least-cost decarbonization pathways for sector-coupled energy systems. Journal of Cleaner Production 368 (2022), #133173
- [14] Vogt-Schilb, A.; Hallegatte, S.: Marginal abatement cost curves and the optimal timing of mitigation measures. Energy Policy 66 (2014), pp. 645–653
- [15] Eory, V.; Pellerin, S.; Carmona Garcia, G. et al.: Marginal abatement cost curves for agricultural climate policy: State-of-the art, lessons learned and future potential. Journal of Cleaner Production 182 (2018), pp. 705–716
- [16] Ibrahim, N.; Kennedy, C.: A Methodology for Constructing Marginal Abatement Cost Curves for Climate Action in Cities. Energies 9 (2016) 4, #227
- [17] Harmsen, J.; van Vuuren, D. P.; Nayak, D. R. et al.: Long-term marginal abatement cost curves of non-CO₂ greenhouse gases. Environmental Science & Policy 99 (2019), pp. 136–149

- [18] Kesicki, F.; Ekins, P.: Marginal abatement cost curves: a call for caution. *Climate Policy* 12 (2012) 2, pp. 219–236
- [19] Kesicki, F.; Strachan, N.: Marginal abatement cost (MAC) curves: confronting theory and practice. *Environmental Science & Policy* 14 (2011) 8, pp. 1195–1204
- [20] Gillingham, K.; Stock, J. H.: The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions. *Journal of Economic Perspectives* 32 (2018) 4, pp. 53–72
- [21] Longva, T.; Eide, M. S.; Endresen, Ø. et al.: Marginal abatement cost curves for CO₂ emission reduction from shipping to 2050. *Maritime Transport Research* 6 (2024), #100112
- [22] Gusti, M.; Forsell, N.; Havlik, P. et al.: The sensitivity of the costs of reducing emissions from deforestation and degradation (REDD) to future socioeconomic drivers and its implications for mitigation policy design. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 24 (2019) 6, pp. 1123–1141
- [23] Barron, A. R.; Fawcett, A. A.; Hafstead, M. A. C. et al.: Policy insights from the emf 32 study on U.S. carbon tax scenarios. *Climate change economics* 9 (2018) 1, <https://doi.org/10.1142/S2010007818400031>
- [24] Umweltbundesamt: Wirtschaftlichkeit neu denken. Investitionsentscheidungen im Dienste des Umweltschutzes. Stand: 2021. Internet: www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_179-2021_wirtschaftlichkeit_neu_denken.pdf. Zugriff am 18.03.2026
- [25] Munich Business School: Amortisation. Stand: 26.08.2025. Internet: www.munich-business-school.de/en/l/business-studies-dictionary/financial-knowledge/amortization. Zugriff am 18.03.2026
- [26] Science Based Targets Initiative: SBTi Corporate Near-Term Criteria. Stand: 2025. Internet: files.sciencebasedtargets.org/production/files/STi-criteria.pdf. Zugriff am 18.03.2026
- [27] Science Based Targets Initiative: SBTi Corporate Net-Zero Standard. Version 1.3. Stand: 2025. Internet: files.sciencebasedtargets.org/production/files/Net-Zero-Standard.pdf?dm=1757950109. Zugriff am 18.03.2026

Michael Rentschler, M.Sc. 
michael.rentschler@ipa.fraunhofer.de

PD Dr.-Ing. Robert Mieke 

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer 

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
 und Automatisierung IPA
 Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer

Institut für Energieeffizienz in der Produktion EEP
 Universität Stuttgart
 Allmandring 35, 70569 Stuttgart
www.eep.uni-stuttgart.de

Felix Budde, M.Sc. 
felix.budde@ipk.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
 und Konstruktionstechnik IPK
 Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin
www.ipk.fraunhofer.de

Marina Simon, M.Sc.

Matthias Stauß, M.Sc. 
matthias.stauss@ist.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Jana Husmann 

Fraunhofer-Institut für
 Schicht- und Oberflächentechnik IST
 Riedenkamp 2, 38108 Braunschweig
www.ist.fraunhofer.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
 Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)