Energiewende in der Industrie: Methodik zur Identifikation und Quantifizierung von Dekarbonisierungsmaßnahmen

Andrej Guminski, Manuel Wiener und Serafin von Roon

Die Dekarbonisierung des deutschen Energiesystems erfordert die Umsetzung treibhausgasvermindernder Maßnahmen sowohl in der Energiewirtschaft als auch in den Endenergiesektoren. Während die Emissionsminderungsziele sowie deren Zeithorizont unter anderem auch durch den EU ETS festgeschrieben werden, ist darüber hinaus die Quantifizierung konkreter Maßnahmen zur Zielerreichung notwendig. Die Steigerung von Energieeffizienz wurde u. a. im Energiekonzept von 2010 sowie zuletzt im „Grünbuch Energieeffizienz" unter dem Leitmotiv „Efficiency First" als zentrales Element einer erfolgreichen Energiewende beschrieben. Nachfolgend wird eine Methodik zur Identifikation und Quantifizierung des technischen Potenzials inkrementeller CO_2-Verminderungsmaßnahmen in der Industrie aufgezeigt. Die Analyse beschränkt sich auf energiebedingte CO_2-Emissionen und Effizienzmaßnahmen zu Prozesstechniken.

Hebel zur Senkung energiebedingter CO_2-Emissionen

Durch den Klimaschutzplan 2050 wird die Industrie als maßgeblicher Emittent von Treibhausgasen (ca. 36 % der energiebedingten CO_2-Emissionen im Jahr 2014 – nach verursachungsgerechter Zuteilung der Emissionen) mittels gesetzlicher Vorgaben zur Treibhausgas-Reduktion verpflichtet [1]. Laut dem Zielszenario „Treibhausgasneutrales Deutschland 2050" sollen die energiebedingten Emissionen der Industrie bis 2050 komplett entfallen [2].

Die Möglichkeiten energiebedingte CO_2-Emissionen [3] zu vermindern ergeben sich verallgemeinert aus dem betrieblichen Input-Output-Modell der Produktion [4]. Wie in Abb. 1 dargestellt, sind hierfür der Energieinput, der Produktoutput sowie die Emissionen die relevanten Elemente. Der Zusammenhang zwischen den gesamten energiebedingten CO_2-Emissionen eines Prozesses lässt sich vereinfachend durch die daraus abgeleitete Gleichung abbilden. Demnach hängen die CO_2-Emissionen des Prozesses u vom spezifischen Endenergieverbrauch $eevb_{u,y}$ des Energieträgers y sowie dessen Emissionsfaktor $EF_{u,}$ ab. Durch Multiplikation der spezifischen CO_2-Emissionen mit der jährlichen Produktionsmenge (Tonnage) des jeweiligen Prozesses PR_u ergeben sich die gesamten energiebedingten CO_2-Emissionen eines Jahres für den betrachteten Prozess.

Anhand dieses Zusammenhangs lassen sich die Hebel bzw. Handlungsfelder zur CO_2-Verminderung ableiten. Grundsätzlich kann

Eine vollständige Dekarbonisierung kann ausschließlich durch ein Zusammenspiel verschiedener Hebel und Maßnahmen gelingen — alphaspirit | Fotolia.com

eine Reduktion der Emissionen durch zwei verschiedene Ansätze erreicht werden. Es können einerseits die entstandenen Emissionen abgeschieden und somit deren Entweichen in die Atmosphäre verhindert werden. Dies kann mittels CO_2-Abscheidung und Speicherung oder Nutzung erreicht werden (A). Andererseits kann die Entstehung der Emissionen verhindert werden. Durch Energieträgersubstitution (B) wird die Senkung des jeweiligen Emissionsfaktors realisiert. Die Steigerung von Energieeffizienz bedeutet, dass der spezifische Endenergieverbrauch sinkt (C). Der letzte Hebel ergibt sich aus der Produktionsmenge: Eine Senkung der Tonnage (hier als Suffizienz bezeichnet) führt zu einer Verminderung der Emissionen (D).

Letztere scheint im Industriesektor allerdings nur schwer umsetzbar, da die Produktion an Marktgegebenheiten gebunden ist. Hierzu scheint ein Paradigmenwechsel des Konsumverhaltens auf Ebene der Endkonsumenten und im B2B-Bereich (engl. Business-to-business, Geschäftsbeziehungen zwischen Unternehmen) notwendig. Der Beitrag von CO_2-Abscheidung (A) zur Dekarbonisierung ist neben den gesetzlichen Regelungen stark vom öffentlichen Meinungsbild abhängig. [5] Ob und inwieweit CO_2-Abscheidung in Zukunft einen Beitrag zur CO_2-Verminderung leisten kann, ist derzeit nicht abschließend beurteilbar. Für eine vollständige Dekarbonisierung bildet die CO_2-Abscheidung vor allem eine

Perspektive zur Vermeidung prozessbedingter Emissionen. Für die Substitution des verwendeten Energieträgers durch einen emissionsärmeren (B) bieten sich für industrielle Anwendungen grundsätzlich drei unterschiedliche Ansätze. Die Substitution von fossilem Endenergieverbrauch durch erneuerbare Energien (biomasse- und strombasierte Brennstoffe sowie die direkte Nutzung von EE), die als direkte Elektrifizierung [6] bezeichnete Substitution fossilen Endenergieverbrauchs durch den Energieträger Strom sowie die Substitution fossiler Energieträger durch emissionsärmere (fossile) Energieträger. [7]

Im Detail werden in der vorliegenden Untersuchung Maßnahmen zur Steigerung von Energieeffizienz (C) untersucht und quantifiziert. Hierbei wird die Verbesserung heutiger Verfahren berücksichtigt, d. h. es werden lediglich inkrementelle Maßnahmen und keine disruptiven Technologien (Technologiesprünge) oder Verfahrensroutenwechsel einbezogen. Außerdem werden ausschließlich Maßnahmen betrachtet, welche bereits kommerziellen Entwicklungsstand erreicht haben. Ziel der Analyse ist es neben der wissenschaftlichen Methodenentwicklung eine gewisse Relevanz der Ergebnisse für die Praxis zu gewährleisten. Als Betrachtungsjahr wird das Jahr 2014 gewählt, da dieses das letzte Jahr mit einer ausreichenden Datengrundlage darstellt.

Methodik

Zur Quantifizierung des Potenzials von CO_2-Verminderungsmaßnahmen wurden zwei aufeinanderfolgende Runden von Experteninterviews durchgeführt (vgl. Abb. 2). Dadurch werden die theoretischen Untersuchungen durch praktischen Input bereichert. Das Ziel der ersten Gesprächsrunde bestand darin, die Relevanz sowie das Potenzial einzelner CO_2-Verminderungsmaßnahmen aus Industriesicht zu taxieren. Den Experten wurde eine vorpriorisierte Maßnahmenliste vorgelegt und diese im Laufe des Gesprächs validiert und entsprechend angepasst. Die Experten sollten hierbei die bezüglich des technischen Potenzials relevantesten CO_2-Verminderungsmaßnahmen auswählen und fehlende Maßnahmen ergänzen. Für die validierte Maßnahmenliste wurde im Anschluss eine detaillierte Literaturrecherche bezüglich des Potenzials der identifizierten Verminderungsmaßnahmen durchgeführt.

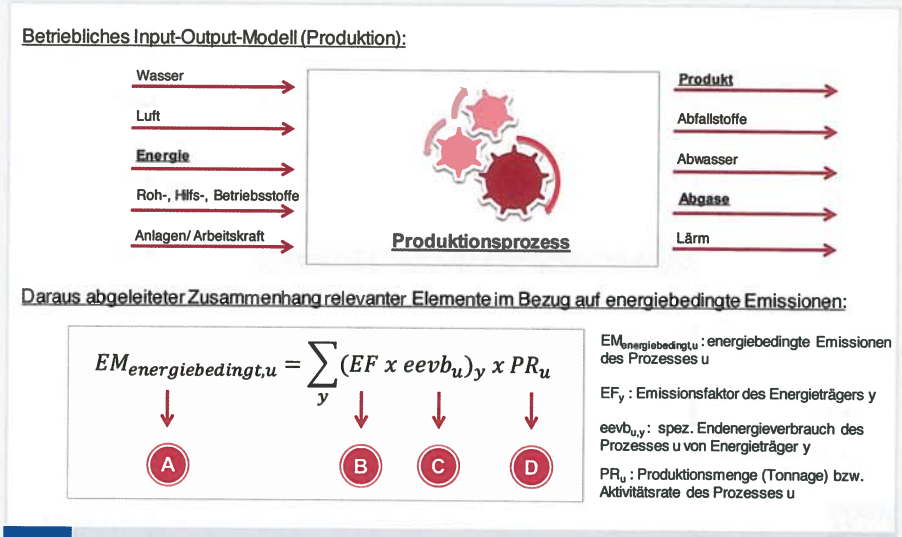

Abb. 1 Ableitung der Handlungsfelder zur CO_2-Verminderung

Im Rahmen der zweiten Expertenbefragung wurden die aus der Recherche resultierenden Maßnahmenpotenziale validiert und gegebenenfalls angepasst. Auch hierbei wurde stets das technische Verminderungspotenzial betrachtet, sodass weitere Umsetzungshemmnisse (wie z. B. Wirtschaftlichkeit) bei der Ausweisung des Potenzials keine Einschränkung darstellen. Externe Limitationen wie die Marktpenetration und die damit bestehende Ausstattung der Produktionskapazitäten in der Industrie wurden über einen Anwendungsfaktor (AWF) berücksichtigt. Letzterer wurde aus der Literatur übernommen und/ oder von den Industrieexperten abgeschätzt bzw. validiert. Im Ergebnis liegt für jeden Prozess eine Auswahl an CO_2-Verminderungsmaßnahmen mit quantifizierten Verminderungspotenzialen vor. Ein weiterer Teil der Interviews thematisierte Wechselwirkungen von Dekarbonisierungsmaßnahmen, welche ebenfalls nachfolgend diskutiert werden.

Ergebnisse der Analysen am Beispiel der Zementherstellung

Voraussetzung für eine optimale Maßnahmenumsetzung in der Industrie ist eine hohe Granularität bei der Maßnahmenidentifikation. Die Betrachtung einzelner Prozesse auf Prozessschrittebene dient als Basis für die Quantifizierung von Verminderungspotenzialen. Der Produktionsablauf wird hierzu in mehrere Prozessschritte unterteilt und der spezifische Endenergieverbrauch bzw. die Emissionen entsprechend allokiert. Zur Emissionserfassung wird die Methode der Prozesskettenanalyse angewandt und prozessspezifische Emissionsfaktoren verwendet. Nachfolgend werden die durchgeführten Analysen exemplarisch anhand der Zementherstellung erläutert und die Ergebnisse beschrieben.

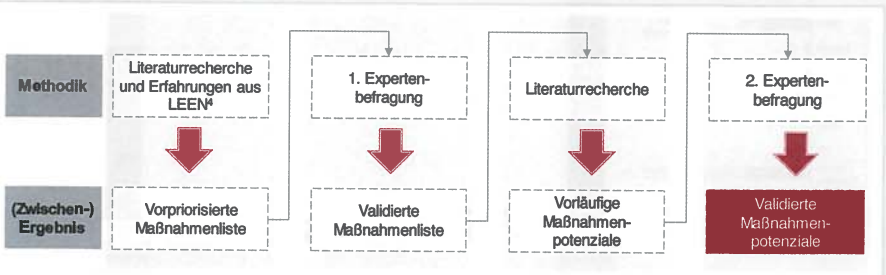

Abb. 2 Methodik zur Identifizierung der Potenziale von CO_2-Verminderungsmaßnahmen

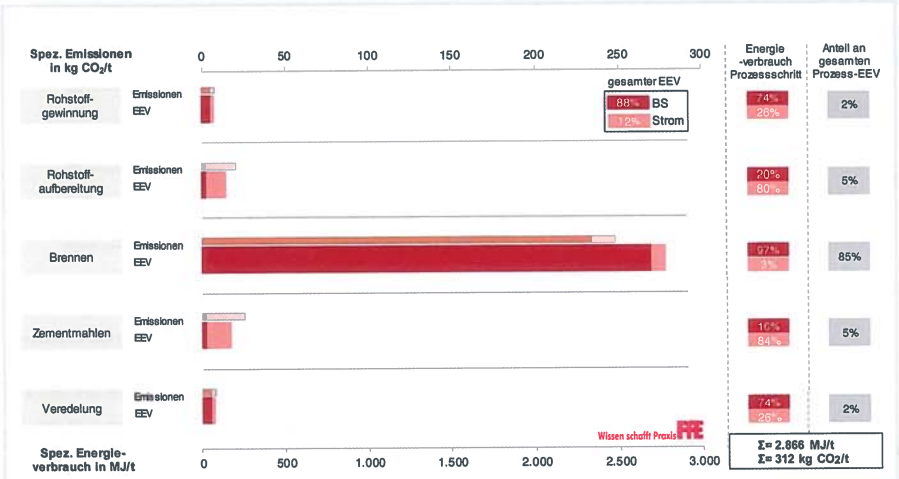

Abb. 3 Spezifischer Energieverbrauch in MJ/t und spezifische CO_2-Emissionen in kg CO_2/t der Zementherstellung

Wie aus Abb. 3 hervorgeht, kann die Zementherstellung in fünf Prozessschritte unterteilt werden. Die Rohstoffaufbereitung dient primär der Homogenisierung und Zerkleinerung des gewonnenen Rohmaterials. Dieses wird in Mühlen gemahlen und unter Zugabe von Heißgas, welches hauptsächlich aus den Ofenabgasen besteht, getrocknet. Im nachfolgenden Brennprozess entsteht der sog. Zementklinker. Der hierzu verwendete Drehrohrofen wird im Gegenstromverfahren mit Rohmaterial beschickt, welches auf eine Temperatur von bis zu 1.450° C erhitzt wird. Anschließend an den Brennprozess im Drehrohrofen findet die Klinkerkühlung statt. In einem weiteren Prozessschritt wird der Klinker allein oder je nach Zementart mit weiteren Zusatzstoffen wie bspw. Hüttensand feingemahlen. Der entstandene Zement wird in Silos gelagert und anschließend als Sack- oder Siloware versandt (Veredelung) [8].

Für die Produktion von Zement in Deutschland im Jahr 2014 lag der durchschnittliche Energieverbrauch bei 3.262 MJ/t Zement. Dieser wurde durchschnittlich zu 88 % durch Brennstoffe und zu 12 % mittels Strom gedeckt (vgl. Abb. 3). Mehr als 63 % der Brennstoffe stellten alternative Brennstoffe dar. Alternative Brennstoffe „stammen oft aus Materialien, die für andere Verwendungszwecke produziert oder verwendet wurden und am Ende ihrer Nutzungsdauer auf einem thermischen Weg weiterverwertet werden" [9]. In der Zementindustrie werden hierbei u. a. Altreifen, Tiermehle, Siedlungsabfälle und Klärschlamm eingesetzt. Bei den konventionellen fossilen Brennstoffen kommen vor allem Braun- und Steinkohle zum Einsatz (84 % des fossilen Energieverbrauchs) [10].

Hierdurch ergibt sich ein prozessspezifischer Emissionsfaktor für fossile Energieträger bei der Zementherstellung von 91,4 t CO_2/TJ [11]. Das Brennen des Zementklinkers stellt mit über 85 % des gesamten Energieverbrauchs den energieintensivsten Prozessschritt dar. Zur Deckung des Energiebedarfs werden überwiegend Brennstoffe eingesetzt. Strom wird vor allem bei der Rohmaterialaufbereitung sowie der Zementmahlung für elektrische Antriebe benötigt. Die Herstellung von Zement ist durchschnittlich mit energiebedingten Emissionen von 310 kg CO_2/t Zement verbunden (250 kg CO_2 direkte Emissionen und 60 kg CO_2 indirekte Emissionen). Analog zum Energieverbrauch wird der bedeutendste Anteil der Emissionen im Brennprozess verursacht. Neben den energiebedingten Emissionen entstehen beim Klinkerbrennen auch prozessbedingte Emissionen in Höhe von ca. 390 kg CO_2/t Zement [10].

Die Quantifizierung des CO_2-Verminderungspotenzials der identifizierten Maßnahmen basiert auf den ausgewiesenen Energieverbräuchen und Emissionen. Zur Bewertung der quantifizierten Maßnahmen ist als Referenzwert die Berechnung der gesamten energiebedingten Emissionen der jeweiligen Prozesse sinnvoll. Diese ergeben sich, wie bereits beschrieben, durch den Zusammenhang in Abb. 1. Für die Zementherstellung liegen die energiebedingten Emissionen im Jahr 2014 bei ca. 10 Mt CO_2. Diese setzen sich zu rund 80 % aus direkten und zu 20 % aus indirekten Emissionen zusammen. Der gesamte Energieverbrauch zur Herstellung der rund 32 Mio. t Zement beläuft sich auf 105 PJ.

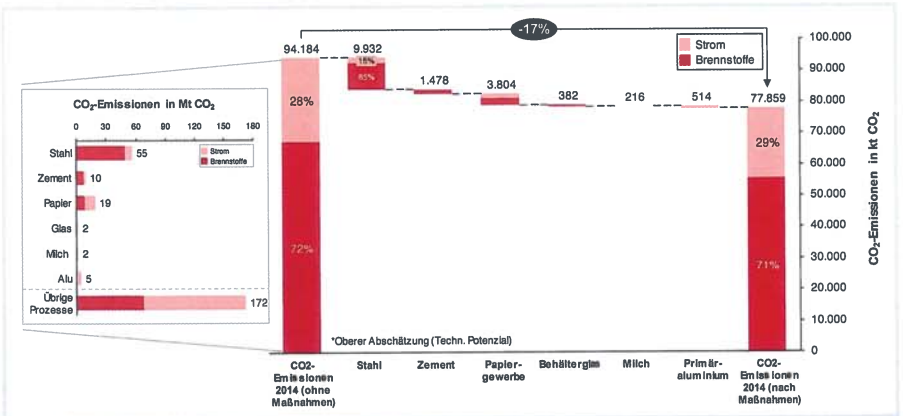

Abb. 4 Auswirkungen der quantifizierten Effizienzmaßnahmen auf den Energieverbrauch und die CO_2-Emissionen der betrachteten Prozesse

Bestimmung des Verminderungspotenzials einzelner CO_2-Verminderungsmaßnahmen

Grundsätzlich lassen sich die energiebedingten CO_2-Einsparungen einer Maßnahme durch den Zusammenhang in der Formel (1) beschreiben. Demnach ergibt sich die spezifische Emissionsminderung der Maßnahme v durch die mit der Maßnahme verbundene Senkung des spezifischen Endenergieverbrauchs des Prozesses u ($\Delta eev_{u,v}$), gewichtet mit dem jeweiligen Emissionsfaktor (prozessspezifischer Emissionsfaktor für fossilen Energieverbrauch, Generalfaktor für Deutschland für Stromverbrauch) des eingesparten Energieträgers y. Multipliziert

mit der Produktionsmenge (Tonnage) des Prozesses u (PR_u) und dem Anwendungsfaktor (AWF) ergibt sich die gesamte Emissionsminderung im Prozess.

Der AWF stellt einen Faktor zwischen 0 und 100 % dar, welcher festlegt, für welchen Anteil der gesamten Produktionsmenge bzw. -kapazität die Maßnahme angewendet werden kann. Hierbei ist die heutige Penetration, d. h. wie häufig die Maßnahme in Deutschland bereits umgesetzt wurde, maßgeblich. Damit werden die Ausstattung bzw. Eigenschaften bestehender Produktionskapazitäten berücksichtigt. Es wird stets das technische Potenzial der Maßnahmen quantifiziert und damit bleiben weitere Aspekte (wirtschaftliche Überlegungen oder zeitliche Umsetzung der Maßnahmen) unberücksichtigt.

$$EM_{Mind,u,v} = \sum_{y} \left(EF \; x \; \Delta eevb_{u,v}\right)_y \; x \; PR_u \; x \; AWF \quad (1)$$

Bestimmung des CO_2-Verminderungspotenzials einer Maßnahme

Nachfolgend wird exemplarisch anhand der Maßnahme „Ersatz von Kugelmühlen" bei der Rohmehlherstellung in der Zementproduktion die Quantifizierung einzelner Maßnahmen veranschaulicht. In der Literatur wird hierfür ein Einsparpotenzial an elektrischer Energie von 40 MJ/t angegeben. [14, 15] Für den AWF wird ein Wert von 58 % angenommen. Dieser ergibt sich nach [12] dadurch, dass von der gesamten installierten Klinkerkapazität in Deutschland (rund 26 kt/Jahr), die Maßnahme noch für ca. 15 kt umgesetzt werden kann. Daraus lässt sich für die Maßnahme ein CO_2-Verminderungspotenzial von 87 kt CO_2 pro Jahr ableiten. Der verwendete AWF konnte in Expertengesprächen validiert werden. Der AWF stellt einen entscheidenden Input-Parameter dar, da die Ergebnisse sehr sensitiv in Bezug auf den AWF reagieren. Um eine hohe Güte der Ergebnisse gewährleisten zu können war der Einbezug von Branchenexperten für die Untersuchungen von entscheidender Bedeutung.

Insgesamt wurden im Zuge der Untersuchungen 51 Energieeffizienzmaßnahmen in sechs energieintensiven Prozessen untersucht. Eine Auswahl der bedeutendsten Maßnahmen in den behandelten Prozessen ist in der Tabelle dargestellt. Die Analysen beziehen sich auf die Stahlherstellung (Primär- und Sekundärroute), die Zementherstellung, das Papiergewerbe, die Behälterglasherstellung, die Milchverarbeitung sowie die Primäraluminiumerzeugung. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in aggregierter Form in Abb. 4 dargestellt. In Summe können durch die Maßnahmen die energiebedingten CO_2-Emissionen im Jahr 2014 um ca. 17 % gesenkt werden. Dabei liegt in der Stahlherstellung mit ca. 10 Mt CO_2 der größte Teil des Potenzials. Bei allen ausgewiesenen Einsparungen handelt es sich um eine obere Abschätzung des technischen Potenzials (Detaillierte Ergebnisse für alle betrachteten Prozesse sind auf www.ffegmbh.de zu finden). Hierbei sind auch die einzelnen Einsparpotenziale aller quantifizierten Effizienzmaßnahmen sowie der Energieverbrauch und die Emissionen je Prozessschritt dargestellt.

Tab.: Quantifizierte Maßnahmen mit dem größten CO_2-Verminderungspotenzial je Prozess (Auswahl)

Prozess	Bezeichnung der Energieeffizienzmaßnahme
Zementherstellung	■ Ersatz von Kugelmühlen ■ Retrofit Vorcalcinatoren ■ Ersatz Lepol-Öfen
Stahlherstellung	■ Gichtgasrückführung ■ Optimierung Sinter-Pellet-Verhältnis ■ Einblasung von wasserstoffreichen Reduktionsmitteln ■ Schrottvorwärmung (Sekundärstahl)
Papiergewerbe	■ Chemische Fasermodifikation ■ Effizientere Refiner ■ Neue Trocknungsverfahren
Hohlglas	■ Gemenge-und Scherbenvorwärmung ■ Optimiertes Brennerdesign (Oxyfuel)
Milch	■ Mikrowellen- und UV-Behandlung zur Wärmebehandlung ■ UHT-Prozess ohne Zwischenpasteurisierung
Primäralu	■ Magnetische Kompensation ■ Optimierte Prozesssteuerung (durch Messtechnik)

Wechselwirkungen von CO_2-Verminderungsmaßnahmen

Aufgrund komplexer, ineinander verflochtene Produktionsverfahren können sich CO_2-Verminderungsmaßnahmen innerhalb eines Prozesses gegenseitig beeinflussen, weshalb sich in der Praxis bei einem kombinierten Einsatz die Potenziale der einzelnen Maßnahmen nicht ohne Weiteres addieren lassen. Da in der Literatur bisher nur wenig auf Wechselwirkungen von CO_2-Verminderungsmaßnah-men eingegangen wurde, wird nachfolgend eine Kategorisierung identifizierter Wechselwirkungen vorgenommen.

Experteninterviews können u. a. ein explorati-ves Erkenntnisziel verfolgen, was bedeutet, dass aufgrund einzelner Beobachtungen auf generelle Aussagen geschlossen wird. [13] Nach diesem Ansatz wurden aus konkreten Wechselwirkungen, welche im Rahmen der Experteninterviews und aus der Literatur identifiziert werden konnten, grundlegende Aussagen zu einer allgemeinen Kategorisierung von Wechselwirkungen abgeleitet.

Nachfolgend wird auf Wechselwirkungen zwischen CO_2-Verminderungsmaßnahmen innerhalb eines Prozesses (prozessintern) eingegangen (vgl. Abb. 5). Daneben existieren auch prozessübergreifende Wechselwirkungen von Maßnahmen mit den Emissionen des Gesamtprozesses, der Industriebranche oder anderer Endenergiesektoren (z. B. Industrie und Haushalte):

■ *Konkurrierend:* Konkurrierende Wechselwirkungen bestehen, wenn sich die CO_2-Verminderungspotenziale der Maßnahmen gegenseitig negativ beeinflussen. Durch die Umsetzung einer Maßnahme sinkt das CO_2-Verminderungspotenzial der zweiten Maßnahme. Dies kann mitunter zu einem Zielkonflikt bezüglich der Umsetzung bei-

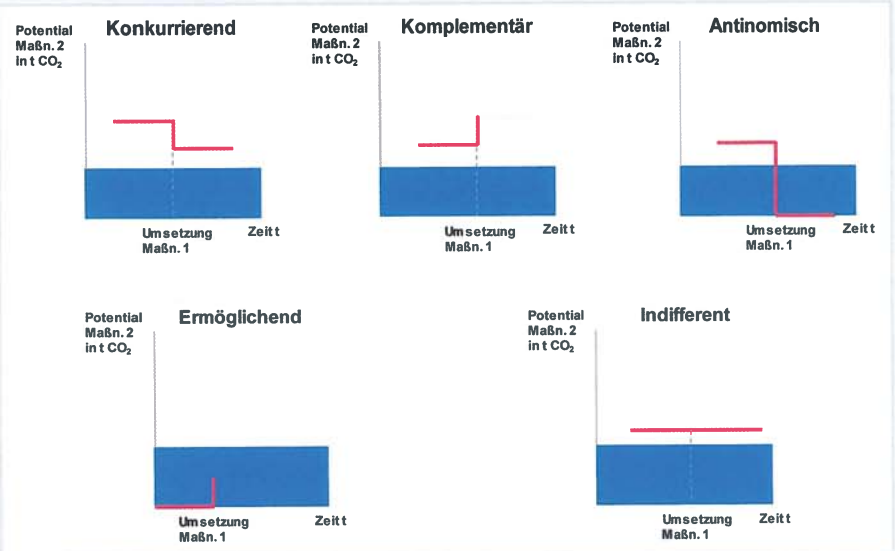

Abb. 5 Schematische Darstellung von Wechselwirkungen zwischen CO_2-Verminderungsmaßnahmen

der Maßnahmen führen. Eine konkurrierende Wechselwirkung ergibt sich bspw. durch die Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme in Bezug auf die Energieträgersubstitution. Nimmt durch die Umsetzung einer Energieeffizienzmaßnahme der Energieverbrauch ab, so sinkt damit implizit die durch den Energieträgerwechsel substituierbare Energiemenge. Hierdurch wird das Potenzial, welches durch die Energieträgersubstitution realisiert werden kann, reduziert.

- *Komplementär:* Komplementäre Wechselwirkungen ergeben sich dadurch, dass sich durch die Umsetzung einer Maßnahme das CO_2-Verminderungspotenzial einer zweiten Maßnahme erhöht. Für den Prozess der Zementherstellung wurde kein Beispiel für eine komplementäre Wechselwirkung identifiziert.
- *Antinomisch (total konkurrierend):* Den Extremfall konkurrierender Wechselwirkungen stellen antinomische Maßnahmen dar. Diese schließen sich gegenseitig vollständig aus, sodass entweder die eine oder die andere Maßnahme umgesetzt werden kann. Das Potenzial der zweiten Maßnahme sinkt durch Umsetzung der Ersten auf null. In [12] wird dieser Zusammenhang als „competing measures" (engl. in Konkurrenz stehende Maßnahmen) bezeichnet. Als Beispiel wird das „Ersetzen der Kugelmühlen durch vertikale Walzenmühlen" sowie die „Verbesserung des Mahl-Mediums für die Kugelmühlen" bei der Zementherstellung angeführt.
- *Ermöglichend:* Im Falle sich gegenseitig ermöglichender Maßnahmen wird die Umsetzung einer zweiten Maßnahme erst möglich, nachdem eine erste Maßnahme umgesetzt wurde. Ein Beispiel hierfür findet sich in der Zementindustrie. Der „Einsatz von Vorcalciniertechnik mit Zyklonvorwärmern", welcher heutzutage als Stand der Technik angesehen werden kann, ermöglicht den Einsatz von Brennstoffen mit niedrigeren Brennwerten als fossile Energieträger im Drehrohrofen. [14]
- *Indifferent (keine Wechselwirkung):* Zwischen CO_2-Verminderungsmaßnahmen, die sich in Bezug auf das Verminderungspotenzial nicht gegenseitig beeinflussen, besteht eine indifferente Wechselwirkung. Beide Maßnahmen können unabhängig voneinander umgesetzt und die Potenziale aller Maßnahmen mit indifferenten Wechselwirkungen aggregiert werden. Ein Beispiel in der Zementherstellung ist der Zusammenhang zwischen der „Homogenisierung mittels Schwerkraft" und dem „Ersatz Kugelmühlen zur Zementmahlung" [12].

Zusammenspiel verschiedener Hebel und Maßnahmen notwendig

Die Analysen haben gezeigt, dass die geplante vollständige Dekarbonisierung nur bedingt mittels Energieeffizienzmaßnahmen erreicht werden kann. Für die betrachteten Prozesse wurden 51 Energieeffizienzmaßnahmen quantifiziert, durch welche die energiebedingten CO_2-Emissionen der untersuchten Prozesse im Jahr 2014 in Summe um ca. 17 % gesenkt werden können.

Die untersuchten Prozesse waren 2014 für ca. 35 % der gesamten energiebedingten Emissionen der Industrie in Deutschland verantwortlich. Durch die Ausweitung des in die Untersuchungen einbezogenen Endenergieverbrauchs könnte die Aussagekraft bezüglich des gesamten CO_2-Verminderungspotenzials in der Industrie erhöht werden. Aufgrund der hohen Bedeutung des Anwendungsfaktors sind um die Güte der Ergebnisse weiter erhöhen und validieren zu können, zusätzliche Expertenbefragungen zweckdienlich. Forschungsbedarf besteht darüber hinaus vor allem in der Berücksichtigung weiterer Treibhausgase, der Erfassung von Kosten mit dem Ziel CO_2-Verminderungskosten zu bestimmen sowie der Untersuchung des zeitlichen Horizonts der Maßnahmenumsetzung.

Eine vollständige Dekarbonisierung kann ausschließlich durch ein Zusammenspiel verschiedener Hebel und Maßnahmen gelingen. In erster Linie scheint hierbei die Substitution des fossilen Endenergieverbrauchs durch emissionsfreie Energieträger notwendig, da sich hierdurch die bedeutendsten CO_2-Verminderungspotenziale realisieren lassen. Des Weiteren können Emissionen durch Suffizienz und CO_2-Abscheidung und -Nutzung weiter gesenkt werden. Für letztere ergeben sich vor allem signifikante Potenziale durch die wachsende Bedeutung von Green Fuels. Diese kommen im Energiesystem der Zukunft überall dort zum Einsatz, wo der Einsatz von Strom technisch oder wirtschaftlich nicht sinnvoll ist. Das für die Herstellung strombasierter erneuerbarer Brennstoffe benötigte CO_2 kann mittel- bis langfristig aus der Industrie kommen [15].

Bei der Potenzialbestimmung von CO_2-Verminderungsmaßnahmen wurden Wechselwirkungen identifiziert, durch welche sich das Potenzial einzelner Maßnahmen im Gegensatz zu ihrer Einzelbewertung verändert. Bei der Gesamtpotenzialbestimmung müssen diese Effekte berücksichtigt und wenn möglich quantifiziert werden. Dies wirkt einer Überschätzung der Maßnah-

menpotenziale entgegen und ermöglicht ein realistisches Bild des Dekarbonisierungspfades der Industrie darzustellen.

Anmerkungen

[1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU): Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Berlin 2016.

[2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau 2013.

[3] Energiebedingte Emissionen können in direkte und indirekte energiebedingte Emissionen gegliedert werden. Direkte (energiebedingte) Emissionen entstehen durch die energetische Nutzung (z. B. Verbrennung) fossiler Energieträger im Rahmen des Produktionsprozesses meist zur Erzeugung thermischer Energie. Indirekte (energiebedingte) Emissionen werden vom Akteur lediglich mittelbar verursacht. Die häufigste Form indirekter Emissionen stellt der Bezug von Strom dar. .

[4] Dangelmaier, W.: Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Berlin 2009; Burschel, C. J.; Losen, D.; Wiendl, A.: Betriebswirtschaftslehre der Nachhaltigen Unternehmung. In: Lehr- und Handbücher der ökologischen Unternehmensführung und Umweltökonomie. Berlin 2004.

[5] Fischedick, M.; Görner, K.; Thomeczek, M.: CO_2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung – Ganzheitliche Bewertung im Bereich von Energiewirtschaft und Industrie. Berlin 2015.

[6] Elektrifizierung ist lediglich unter der Voraussetzung einer emissionsneutralen Erzeugung von Strom mit einer CO_2-Reduktion verbunden. Unter der Annahme, dass bis zum Jahr 2050 der Anteil erneuerbarer Energien auf mindestens 80 % ansteigen soll, wird Strom in Zukunft einen nahezu emissionsfreien Energieträger darstellen.

[7] Memmler, M.; Schrempf, L.; Hermann, S.; Schneider, S.; Pabst, J.; Dreher, M.: Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger – Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013. Dessau-Roßlau 2014; Beer, M.; Corradini, R.; Gobmaier, T.; Köll, L.; Podhajsky, R.; Vogler, G.; Zotz, M.: CO_2-Verminderung in Deutschland. München 2009; Guminski, A.; Roon, S. von: Transition Towards an „All-electric World" – Developing a Merit-Order of Electrification for the German Energy System. In: 10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien. Wien 2017; Williams, J.; De Benedictis, A.; Moore, J.; Mahone, A.; Ghanadan, R.; Morrow III, W.; Price, S.; Torn, M.: The Technology Path to Deep Greenhouse Gas Emissions Cuts by 2050 – The Pivotal Role of Electricity. In: Science 335 (6064) 2012, p. 53-59. New York 2012; Köckhuber, C.; Guminski, A.; Roon, S. von: Die Grenzen der Elektrifizierung – Analyse und Bewertung von Green Fuels als Ergänzung zu Strom im dekarbonisierten Energiesystem. In: et – Energiewirtschaftliche Tagesfragen 67. Jg. (2017) Heft 8. Essen 2017.

[8] Bosold, D.; Pickhardt, R.: Zemente und ihre Herstellung – Zement-Merkblatt Betontechnik. Düsseldorf 2014; Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Zement-Taschenbuch. 51. Ausgabe. Düsseldorf 2008.

[9] Schneider, M.: Tätigkeitsbericht 2009 – 2012. Düsseldorf 2012.

[10] Schneider, M.: Zementindustrie im Überblick 2016/2017. Düsseldorf 2016.

[11] Juhrich, K.: CO_2-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. Dessau-Roßlau 2016.

[12] Brunke, J.-C.; Blesl, M.: Energy conservation measures for the German cement industry and their ability to compensate for rising energy-related production costs. In: Journal of Cleaner Production. Amsterdam 2014.

[13] Bogner, A.; Littig, B.; Menz, W.: Interviews mit Experten: Eine praxisorientierte Einführung. Wiesbaden 2014; Bogner, A.: Das Experteninterview: Theorie, Methode, Anwendung. Opladen 2002.

[14] Anoynmer Manager im Bereich Umweltschutz eines weltweit führenden Zementherstellers (Standort Deutschland): Experteninterview am 18.04.2017 – CO_2-Verminderung in der Zementherstellung. München 2017; Thienel, K.-Ch.: Bauchemie und Werkstoffe des Bauwesens – Chemie und Eigenschaften mineralischer Baustoffe und Bindemittel. München 2008.

[15] Grimm, N.; Uhlig, J.; Weber, A.; Zoch, I.: Systemlösung Power to Gas – Chancen, Herausforderungen und Stellschrauben auf dem Weg zur Marktreife. Berlin 2015.

A. Guminski, M. Sc., M. Wiener, M.Sc., Dr.-Ing. S. von Roon, Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München
aguminski@ffe.de