Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland

Eine Studie von McKinsey & Company, Inc., erstellt im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“

Sektorperspektive Industrie

Wirtschaft für Klimaschutz
BDI initiativ

McKinsey&Company

Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland

Eine Studie von McKinsey & Company, Inc.,
erstellt im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“

Sektorperspektive Industrie

Wirtschaft für Klimaschutz
BDI initiativ

McKinsey&Company

Vorwort

Die vorliegende Sektorperspektive Industrie ist Teil der übergreifenden Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“, die McKinsey & Company, Inc., im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“ erstellt hat. Die Ergebnisse der Studie werden separat in einem Gesamtbericht veröffentlicht. Die Sektorperspektive enthält ergänzend eine detaillierte Darstellung der Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen der deutschen Industrie. Dem Bereich Industrie wurden weder der tertiäre Sektor noch die industrielle Strom- und Fernwärmeerzeugung zugerechnet.

Insgesamt waren mehr als 70 Unternehmen und Verbände an der Bewertung von über 300 Hebeln zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland beteiligt. In der Arbeitsgruppe Industrie waren dies insbesondere die BASF AG, der Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI), die Wirtschaftsvereinigung Stahl (WV Stahl), der Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), der Mineralölwirtschaftsverband e.V. (MWV), der Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP), die WirtschaftsVereinigung Metalle (WVM) sowie der Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V. (ZVEI). Zudem wurden die Annahmen und Ergebnisse mit zahlreichen unabhängigen Experten diskutiert. Wir danken den Unternehmen, Verbänden und unabhängigen Experten, die an der Ableitung der Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen mitgearbeitet haben, für die konstruktive Zusammenarbeit und den unermüdlichen Einsatz über die vergangenen Monate. Die breite Unterstützung von allen Beteiligten war eine zentrale Voraussetzung für das Gelingen der vorliegenden Studie.

Der BDI dankt den folgenden Sponsoren herzlich für ihre finanzielle Beteiligung:

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 3

Glossar 9

Zusammenfassung der Studienergebnisse für den Industriesektor 13

Herkunft der Treibhausgasemissionen im Industriesektor 19

Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Industriesektor seit 1990 23

Zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Industriesektor mit heutigem Stand der Technik („Stand der Technik"-Projektion) 27

„Stand der Technik"-Projektion: Methodik 27
„Stand der Technik"-Projektion: Annahmen und Ergebnisse für den Industriesektor 28

Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Industriesektor 33

Bewertung von Hebeln zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen: Methodik 33
Hebel zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen im Industriesektor bis 2020 37
Effizienzsteigerung von Antriebssystemen *39*
Effizienz von Gebäuden *41*
Kraft-Wärme-Kopplung *42*
Carbon Capture and Storage *42*
Branchenspezifische Potenziale *43*
Weitere Entwicklung nach 2020 – Vermeidungspotenziale und -kosten 2030 44

Voraussetzungen für die Umsetzung und Implikationen 47

Branchenperspektiven 57

Chemische Industrie 57
Stahlindustrie 63
Zementindustrie 68
Mineralölindustrie 72
Papierindustrie 75
Nichteisen-Metalle 77

Anhang: Detailzahlen Vermeidungskostenkurve 83

Glossar

Basisjahr	Basisjahr zur Messung der erreichten Reduzierung von Treibhausgasemissionen im Sinne des Kyoto-Protokolls (1990 für CO_2-Emissionen; 1995 für eine Reihe weiterer Treibhausgase); vgl. Nationaler Inventarbericht des UBA (Dessau, März 2007) für Details
BF/BOF–Verfahren	*Blast Furnace/Blast Oxygen Furnace* – Integrierte Route zur Stahlerzeugung über das Hochofen- und Oxygenstahlkonverter-Verfahren
CCS	*Carbon Capture and Storage* – Technologien zur Abscheidung und Speicherung von CO_2
CO_2	Kohlendioxid
CO_2e	Kohlendioxid-Äquivalent, d.h. Kennzahl für die Intensität eines Treibhausgases, gemessen an der Treibhauswirkung von Kohlendioxid, z.B. 21 für CH_4 (Methan), 310 für N_2O (Lachgas)
DRI	*Direct Reduced Iron* – Einsatzstoff in der Stahlerzeugung im EAF-Verfahren, alternativ zu Stahlschrott; erzeugt aus mit Erdgas reduziertem Eisenerz
EAF-Verfahren	Stahlherstellung im *Electric Arc Furnace* (Elektrolichtbogenofen) im Gegensatz zur integrierten Route Hochofen-Oxygenstahlkonverter
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
Entscheider	Derjenige, der über die Durchführung einer Investition entscheidet, d.h. für die Industrie das Unternehmen (z.B. für Industrieanlagen)
EU ETS	*EU Emissions Trading Scheme* – Europäisches Emissionshandelssystem
EUR	Euro
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
Gt	Gigatonne(n), d.h. eine Milliarde [10^9] Tonnen
(Vermeidungs-) Hebel	Technischer Ansatzpunkt zur Verminderung von Treibhausgasemissionen, z.B. Verwendung effizienterer Prozesse oder Materialien
kWh	Kilowattstunde(n)

KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
Mt	Megatonne(n), d.h. eine Million [1.000.000] Tonnen
MWh	Megawattstunde(n), d.h. Tausend [1.000] kWh
Referenztechnologie	Technologie auf dem Stand der Technik, mit der eine treibhausgaseffiziente Lösung im Hinblick auf Vermeidungspotenzial und -kosten verglichen wird
Sektor	Im Rahmen dieser Studie vorgenommene Gruppierung von Wirtschaftszweigen[1], und zwar **Energie:** Emissionen aus zentraler, industrieller und dezentraler Stromerzeugung sowie aus der Erzeugung von Nah- und Fernwärme **Industrie:** Direkte und indirekte Emissionen aller Industriezweige mit Ausnahme der Stromerzeugung und des Transportsektors; inklusive industrieller Wärmeerzeugung **Gebäude:** Direkte und indirekte Emissionen aus privaten Haushalten und dem tertiären Sektor (GHD, öffentliche Gebäude, Gebäude in der Landwirtschaft) **Transport:** Emissionen aus dem *Straßenverkehr* (Personenverkehr: kleine, mittlere und große Personenkraftwagen (PKW), Güterverkehr: leichte Nutzfahrzeuge („Sprinterklasse"), mittlere und schwere Lastkraftwagen (LKW), Busse), dem *Schienenverkehr* (Personennah- und -fernverkehr, Güter), dem innerdeutschen *Luftverkehr* (ziviler Personen- und Frachtverkehr), inklusive Effekte durch Veränderungen im Kraftstoffmix (Mineralölindustrie) **Entsorgungswirtschaft:** Emissionen aus der Deponierung von Abfällen und aus der Behandlung von Abwasser **Landwirtschaft:** Emissionen aus Viehhaltung und Bewirtschaftung von Böden
Stand der Technik	Durchschnittliche Energie- bzw. Treibhausgaseffizienz im heutigen (2006) Verkaufs- bzw. Investitionsmix

1 Die Sektoren Energie, Industrie, Gebäude und Transport wurden im Rahmen der Studie jeweils in dedizierten Arbeitsgruppen bearbeitet, an denen Vertreter von Unternehmen und Verbänden teilnahmen, die in den Sektoren als Akteure und/oder Zulieferer aktiv sind. Die Entsorgungswirtschaft und die Landwirtschaft wurden jeweils in einer Reihe von Einzelinterviews mit Experten und Vertretern von Unternehmen und Verbänden diskutiert, jedoch nicht durch eigene Arbeitsgruppen abgedeckt.

„Stand der Technik"-Projektion	Projektion der Entwicklung von Treibhausgasemissionen in Deutschland auf Basis des heute erwarteten Wirtschaftswachstums und bei allmählicher Durchdringung des Bestands mit dem Stand der Technik (für Details vgl. unten Seite 27ff.)
t	Tonne(n)
Treibhausgas	Treibhausgas im Sinne des Kyoto-Protokolls, d.h. CO_2 (Kohlendioxid), CH_4 (Methan), N_2O (Lachgas), HFC/PFC (Fluorkohlenwasserstoffe) und SF_6 (Schwefelhexafluorid)
TWh	Terawattstunde(n), d.h. eine Milliarde [10^9] kWh
Vermeidungshebel	S. „Hebel"
Vermeidungskosten (in EUR/t CO_2e)	Zusätzliche Kosten (bzw. Ersparnisse), die sich durch den Einsatz einer Technologie mit geringerer Treibhausgasintensität gegenüber dem jeweils vorherrschenden Stand der Technik ergeben (ohne Berücksichtigung von Sekundäreffekten aus volkswirtschaftlicher Sicht), in der vorliegenden Studie aus Sicht des jeweiligen Entscheiders bewertet, d.h. unter Berücksichtigung der jeweils spezifischen Diskontierungsraten und Amortisierungszeiträume
Vermeidungskostenkurve	Zusammenstellung von Vermeidungspotenzialen und -kosten für einen Sektor
Vermeidungspotenzial (in Mt CO_2e)	Potenzial zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen, das sich durch die ambitionierte, aber in der Praxis realisierbare Umsetzung eines Vermeidungshebels ergibt
(Aus Entscheidersicht) Wirtschaftlicher Vermeidungshebel	Vermeidungshebel, bei dessen Umsetzung für den Entscheider unter Berücksichtigung der jeweiligen Amortisierungszeiträume und Diskontierungsraten Einsparungen entstehen

Zusammenfassung der Studienergebnisse für den Industriesektor

In der Industrie wird bis 2020 mit einem Produktionswachstum von ca. 2 Prozent pro Jahr gerechnet. Durch Maßnahmen mit Vermeidungskosten bis zu 20 EUR/t CO_2e können die Emissionen gegenüber 2004 dennoch leicht reduziert werden. Der wichtigste Hebel ist die Verbesserung der Energieeffizienz um 1,6 Prozent pro Jahr, insbesondere durch effizientere Antriebssysteme. Daneben gibt es eine ganze Reihe von industriespezifischen Maßnahmen zur Verminderung der Treibhausgasemissionen, wie z.B. das gezielte Abfangen von Lachgas in der Chemie. Insgesamt erschließt sich ein Vermeidungspotenzial von ca. 30 Mt CO_2e durch technische Hebel, deren Einsatz auch ohne weitere Anreizsysteme wirtschaftlich ist; weitere Hebel mit einem Vermeidungspotenzial von 11 Mt CO_2e kosten bis zu 20 EUR/t CO_2e.

Im Jahr 2004 stammten 23 Prozent (240 Mt CO_2e) der Treibhausgasemissionen in Deutschland aus direkten Emissionen der Industrie. Darüber hinaus verbrauchte der Sektor 258 TWh Strom und Fernwärme[2], bei deren Erzeugung weitere 136 Mt CO_2e Emissionen entstanden. Damit war die Industrie im Erhebungszeitraum für insgesamt 36 Prozent der Emissionen in Deutschland verantwortlich.

In den Industriesektoren fand zwischen 1990 und 1995 eine erhebliche Reduzierung der Emissionen statt. Die direkten Emissionen alleine sanken in diesem Zeitraum um 62 Mt CO_2e. Von 1995 bis 2004 konnte die Industrie ihre direkten Emissionen um weitere 31 Mt CO_2e senken, während gleichzeitig die Produktion um jährlich mehr als 2 Prozent anstieg. Der industrielle Stromverbrauch sank von 1990 bis 1995 um 13 TWh, stieg dann aber bis 2004 wieder auf 249 TWh an; die entsprechenden Emissionen gingen auf Grund der gesunkenen CO_2-Intensität der Stromerzeugung zurück. Der größte Teil des Rückgangs der Gesamtemissionen bis 1995 ist auf Folgeeffekte der Wiedervereinigung zurückzuführen[3]. Die weiter gehende Senkung der Emissionen nach 1995 wurde zum einen durch die Steigerung der Energieeffizienz in allen Industriezweigen bewirkt; zum anderen konnten viele Industrien ihre spezifischen Prozessemissionen durch gezielte Maßnahmen erheblich senken.

Für die Industriesektoren wird über alle Wirtschaftszweige hinweg eine Steigerung im Produktionsindex von heute bis 2020/2030 um 1,9 Prozent pro Jahr prognostiziert[4]. Insbesondere die Maschinenbau- und Elektroindustrie sowie andere weiterverarbeitende Industrien wachsen in Deutschland nach derzeitigen Prognosen überdurchschnittlich stark. Andere Industrien – z.B. Stahl, Zement – erwarten in etwa eine gleich bleibende Produktion im Vergleich zum heutigen Stand. Gleichzeitig kommt es durch Bestandserneuerung zu Verbesserungen in der Energie- und Treibhausgaseffizienz, und innerhalb einzelner Branchen findet eine Verlagerung zu weniger treibhausgasintensiven Produkten und Prozessen statt. Auf Grund beider Effekte steigen die Treib-

2 249 TWh Strom, 9 TWh Fernwärme.
3 Vgl. „Ursachen der CO_2-Entwicklung in Deutschland in den Jahren 1990 -1995“, DIW/Fraunhofer Institut 1998.
4 Vgl. Global Insight [2006].

hausgasemissionen in der „Stand der Technik"-Projektion[5] über alle Wirtschaftszweige von 2004 bis 2020/2030 nur um ca. 0,6 Prozent pro Jahr. Die direkten Emissionen der Industriesektoren erhöhen sich von 240 Mt CO_2e (2004) auf 247 Mt CO_2e im Jahr 2020 und auf 260 Mt CO_2e (2030). Der Anstieg bei Emissionen aus dem Verbrauch von Primärenergieträgern sowie aus Prozessemissionen ist etwas geringer als der Anstieg der Gesamtemissionen, die – wesentlich bedingt durch die steigende CO_2-Intensität in der Stromerzeugung[6] – von 376 Mt CO_2e (2004) auf 412 Mt CO_2e (2020) bzw. auf 436 Mt CO_2e (2030) anwachsen.

In den Industriesektoren wurden insgesamt Vermeidungshebel für direkte und indirekte Emissionen mit einem Gesamtpotenzial von 49 Mt CO_2e (2020) betrachtet. Etwa 60 Prozent der Vermeidungshebel (knapp 30 Mt CO_2e) sind – bei Berücksichtigung der regulären Investitionszyklen – auch ohne einen expliziten Preis für Treibhausgasemissionen wirtschaftlich. Der zunehmende Einsatz effizienterer Antriebssysteme inklusive mechanischer Systemoptimierung leistet dabei bis 2020 den größten Beitrag zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen (2020: 21 Mt CO_2e). Die historische Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie deutet darauf hin, dass ein erheblicher Teil dieser Maßnahmen in den normalen Investitionszyklen auch ohne zusätzliche Anreize umgesetzt werden wird. Einige Hebel erfordern allerdings die Bereitschaft der Entscheider, Eingriffe in etablierte Prozesse vorzunehmen. Auch die Optimierung der Energieeffizienz von Gebäuden im Industriesektor leistet einen Beitrag zur Reduzierung von Treibhausgasen zu wirtschaftlichen Bedingungen; durch entsprechende Maßnahmen können etwa 6 Mt CO_2e eingespart werden[7].

Die Potenziale und die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahmen für einzelne Industriezweige hängen stark von den individuellen Gegebenheiten der jeweiligen Industrien ab. Ein Teil der Potenziale kann voraussichtlich in weniger energieintensiven Industriezweigen realisiert werden; diese sind allerdings sehr fragmentiert, so dass eine eindeutige Zuordnung der Potenziale aus der Verbesserung von Antriebssystemen und der Energieeffizienz von Gebäuden zu Einzelindustrien im Rahmen dieser Studie nicht geleistet werden konnte.

Weitere aus Entscheidersicht wirtschaftliche Hebel mit einem Potenzial von knapp 3 Mt CO_2e ergeben sich aus prozessspezifischen Maßnahmen in einzelnen Industrien, z.B. der weiteren Prozessoptimierung und der Verbesserung von Katalysatoren in der Chemischen Industrie.

Zusätzliche Hebel mit Vermeidungskosten von 0 bis 20 EUR/t CO_2e tragen knapp 11 Mt CO_2e zum Vermeidungspotenzial bei. Hierbei handelt es sich zum überwiegenden Teil um industriespezifische Einzelmaßnahmen[8]:

5 Diese Fortschreibung der Emissionsentwicklung je Sektor unterstellt, dass bei derzeit prognostiziertem Mengenwachstum alle neu angeschafften Güter jeweils auf dem durchschnittlichen Stand der Technik sind, der im heutigen Verkaufs- bzw. Investitionsmix erreicht ist.
6 Der Stromverbrauch der Industriesektoren steigt gleichzeitig von 249 TWh (2004) auf 272 TWh (2020) bzw. 295 TWh (2030).
7 Die Ansatzpunkte zur Treibhausgasvermeidung sind in der Sektorperspektive Gebäude detailliert beschrieben.
8 Der Anteil der Industrien an den Maßnahmen zur Effizienzsteigerung von Antriebssystemen und Gebäuden wird hier nicht erneut ausgewiesen, um Doppelzählungen zu vermeiden.

- Chemie (ca. 6 Mt CO_2e): Weitere Reduzierung von Lachgasemissionen aus Adipinsäure- und Salpetersäuresynthese
- Stahl (ca. 2 Mt CO_2e): Ausbau und Optimierung des EAF-Verfahrens
- Mineralöl (ca. 2 Mt CO_2e): Diverse Effizienzverbesserungen je nach Anlage (z.B. Effizienzverbesserung von Öfen an einzelnen Standorten)
- Zement (ca. 1 Mt CO_2e): Klinkersubstitution

In energieintensiven Industrien wurden für 2020 darüber hinaus insgesamt Vermeidungspotenziale von 8 Mt CO_2e identifiziert, die mit Vermeidungskosten von mehr als 20 EUR/t CO_2e verbunden sind. Da Kosten in dieser Höhe für zahlreiche Industrien im globalen Markt eine erhebliche Beeinträchtigung der Wettbewerbsfähigkeit nach sich ziehen würden, werden diese Potenziale gesondert ausgewiesen. Im Einzelnen handelt es sich um folgende Vermeidungshebel:

- Chemie: Brennstoffsubstitution (0,8 Mt CO_2e zu Vermeidungskosten von 35 EUR/t CO_2e)
- Stahl: Abmessungsnahes Gießen (1,2 Mt CO_2e zu Vermeidungskosten von 157 EUR/t CO_2e); erste Anlagen mit CCS (1,4 Mt CO_2e zu Vermeidungskosten von 57 EUR/t CO_2e)[9]
- Mineralöl: Diverse Effizienz-/Prozessverbesserungen je nach Anlage (0,9 Mt CO_2e zu Vermeidungskosten von 52 bzw. 75 EUR/t CO_2e)
- Zement: Effizienzverbesserung in der Klinkerproduktion, Brennstoffsubstitution (0,6 Mt CO_2e zu Vermeidungskosten von > 50 EUR/t CO_2e); erste Anlagen mit CCS (0,7 Mt CO_2e zu Vermeidungskosten von 55 EUR/t CO_2e)[9]
- Papier: Weitere Effizienzverbesserung, z.B. durch vermehrten Einsatz von Schuhpressen (1,2 Mt CO_2e zu Vermeidungskosten von 54 EUR/t CO_2e)
- Nichteisen-Metalle: Effizienzverbesserungen in der Elektrolyse und Wärmebehandlung, z.B. durch bessere Wärmeintegration (insgesamt 1,2 Mt CO_2e zu Vermeidungskosten von 106 bzw. 38 EUR/t CO_2e)

Insgesamt können die Industriesektoren in Deutschland ihre Treibhausgasemissionen bis 2020 gegenüber der „Stand der Technik"-Projektion durch Umsetzung der Vermeidungshebel mit Vermeidungskosten bis 20 EUR/t CO_2e um 41 Mt CO_2e senken. Mit 372 Mt CO_2e liegen die Gesamtemissionen des Sektors nach Umsetzung der Vermeidungshebel leicht unter dem Niveau von 2004 (376 Mt CO_2e) – und um fast 25 Prozent unter dem Niveau des Basisjahrs (488 Mt CO_2e)[10]. Mit der Umsetzung der Maßnah-

9 Die spezifischen Kosten für die frühe Einführung von CCS liegen in der Industrie höher als bei Kraftwerken, da hier mit gleichem Infrastrukturaufwand jeweils kleinere Mengen abgefangen und abtransportiert werden müssen. Hinzu kommen nicht technologische, politische und ökonomische Unsicherheiten bezüglich der Umsetzbarkeit von CCS.

10 Bei Berücksichtigung der Vermeidungsmaßnahmen im Energiesektor ergeben sich Emissionenim Jahr 2020 von 351 Mt CO_2e, was einer Senkung gegenüber 2004 um 7 Prozent entspricht (gegenüber Basisjahr 28 Prozent).

men kann die produzierende Industrie die Energieeffizienz gegenüber heute um durchschnittlich 1,6 Prozent pro Jahr steigern[11].

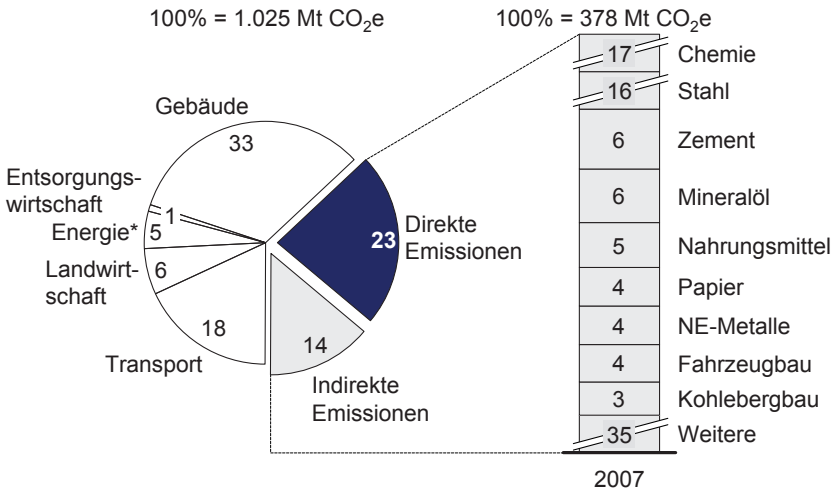
Neben den Kosten, die sich unmittelbar aus der Umsetzung der geschilderten Vermeidungshebel ergeben, ist insbesondere für die energieintensiven Industrien von hoher Bedeutung, welche zusätzlichen Kosten durch das geltende CO_2-Regime sowie durch Veränderungen in den Preisen für Brennstoff und Strom entstehen. Schon CO_2-Preise unter 20 EUR/t CO_2 im Rahmen des EU ETS können die globale Wettbewerbsfähigkeit vieler Industrien – in Abhängigkeit von den Allokationsregeln – erheblich belasten[12].

11 Energieeffizienz bezieht sich hier auf die Entwicklung des Verbrauchs von Strom und Primärenergie im Vergleich zum Produktionsindex.
12 Vgl. „EU ETS Review. Report on International Competitiveness“, European Commission/McKinsey/Ecofys, Dezember 2006.

Herkunft der Treibhausgasemissionen im Industriesektor

Im Jahr 2004 stammten 23 Prozent (240 Mt CO_2e) der Treibhausgasemissionen in Deutschland aus direkten Emissionen der Industrie. Darüber hinaus verbrauchte der Sektor 258 TWh Strom und Fremdwärme[13], bei deren Erzeugung weitere 136 Mt CO_2e Emissionen entstanden. Damit war die Industrie im Erhebungszeitraum für insgesamt 36 Prozent der Emissionen in Deutschland verantwortlich. Den größten Teil der industriellen Emissionen verursachte 2004 die Chemische Industrie (16,6 Prozent), knapp gefolgt von der Stahlindustrie (16,4 Prozent). Industrieübergreifend entstanden etwa 80 Mt CO_2e aus der Nutzung von stromgetriebenen Antriebssystemen.

Industriesektor: Anteil an Treibhausgasemissionen – Deutschland 2004
in Prozent



* Nur Eigenverbrauch der Kraftwerke und Netzverluste; andere Emissionen (313 Mt CO_2e) sind den Stromabnehmern zugeordnet

Quelle: UBA, Statistisches Bundesamt, Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland" von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz" – AG Industrie

Schaubild 1

Die deutsche Industrie verursachte 2004 inklusive der Emissionen aus dem Stromverbrauch 376 Mt CO_2e. Davon stammte insgesamt ein Drittel aus der Chemischen Industrie und aus der Stahlindustrie, ein weiteres Drittel aus sieben weiteren Industrien. Das letzte Drittel, 130 Mt CO_2e, verursachten diverse Industrien mit kleineren absoluten Emissionsvolumina. Unter den neun Industrien mit den höchsten Emissionen finden sich sieben mit einem hohen Anteil von Prozessemissionen bzw. Primärenergieemissionen:

13 249 TWh Strom, 9 TWh Fernwärme.

- Die *Chemische Industrie* verursachte 2004 Emissionen in Höhe von 62 Mt CO_2e[14]. Hiervon wurden 21 Mt CO_2e als Prozessemissionen frei, also als Nebenprodukt von chemischen Reaktionen, 41 Mt CO_2e entfielen auf direkte energieseitige Emissionen und indirekte energieseitige Emissionen (Strombezug).

- Aus der *Stahlindustrie* stammten 2004 61 Mt CO_2e. Davon enstanden 8 Mt CO_2e als indirekte Emissionen und 53 Mt CO_2e als direkte Emissionen, vor allem in Form von Prozessemissionen durch den Einsatz von Koks als Reduktionsmittel in Hochöfen.

- In der *Zementindustrie* entstanden 2004 Emissionen in Höhe von 23 Mt CO_2e. Davon waren 2 Mt CO_2e indirekte Emissionen und 21 Mt CO_2e direkte Emissionen, von denen ein Großteil in der Klinkerproduktion anfiel.

- Die *Mineralölindustrie* verursachte 2004 21 Mt CO_2e. Davon entstanden 2 Mt CO_2e als indirekte Emissionen und 19 Mt CO_2e als direkte Emissionen in Raffinerieprozessen.

- Die *Papierindustrie* hat 2004 15 Mt CO_2e zum Gesamtemissionsvolumen beigetragen. Davon waren 9 Mt CO_2e indirekte Emissionen und 6 Mt CO_2e direkte Emissionen aus der Nutzung von Primärenergie.

- Die *Nichteisen-Metall-Industrie* (NE-Metalle) hat 2004 Emissionen in Höhe von 15 Mt CO_2e verursacht. Davon entstanden 10 Mt CO_2e als indirekte Emissionen und 5 Mt CO_2e als direkte Emissionen.

- Aus dem *Kohlebergbau* stammten 2004 Emissionen in Höhe von 13 Mt CO_2e, von denen etwa zwei Drittel als Prozessemissionen in Form von Grubengas[15] (vor allem Methan) aus dem Steinkohlebergbau anfielen. Etwa ein Drittel waren indirekte Emissionen aus dem Stromverbrauch, davon etwa je die Hälfte im Braunkohle- bzw. Steinkohlebergbau.

Unter den neun größten industriellen Einzelemittenten finden sich darüber hinaus die Nahrungsmittelindustrie mit 17 Mt CO_2e sowie der Fahrzeugbau mit 14 Mt CO_2e. Die verbleibenden Emissionen wurden von einer Vielzahl kleinerer Industrien verursacht. Über die spezifischen Emissionen dieser einzelnen Industrien liegen nur bruchstückhaft Daten vor.

Die deutsche Industrie hat im Jahr 2004 insgesamt 249 TWh Strom verbraucht. 60 Prozent des industriellen Stromverbrauchs werden nach Schätzung der IEA[16] im Durchschnitt über alle Industrien durch Antriebssysteme verbraucht, weitere 10 Prozent wurden durch Elektrolyseanlagen, insbesondere in der Chemischen Industrie und der Nichteisen-Metall-Industrie, verbraucht. Die verbleibenden 30 Prozent wurden zum

14 Die berichteten Emissionen der Chemischen Industrie wurden um 8 Mt CO_2e aus stofflicher Nutzung von Erdgas, 3,6 Mt CO_2e aus Korrektur der Produktionsmenge von Salpetersäure sowie 2 Mt CO_2e aus stofflicher Verwertung von CO_2 aus der Ammoniaksynthese korrigiert. Diese 14 Mt CO_2e Emissionen werden 2004 als separater Posten unter „Weitere“ geführt.

15 Im Jahr 2004 wurden Grubengase noch nicht im Selbstverpflichtungs-Monitoring der Steinkohle aufgeführt. Das hier zu Grunde gelegte Volumen in Grubengasen beinhaltet nicht die letzte Anpassung im Nationalen Inventarbericht (NIR) für 2004 hinsichtlich Grubengasen um -1,4 Mt CO_2e.

16 Vgl. „Energy Technology Perspectives 2006“, IEA, 2006.

Großteil im Rahmen von Schmelzprozessen, zur Kühlung von Gasen und zur Klimatisierung und Beleuchtung von Gebäuden und Produktionsanlagen eingesetzt.

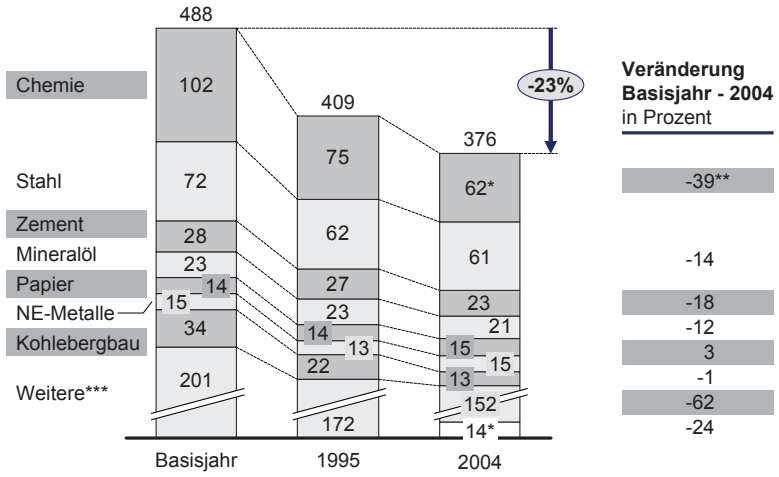
Die deutsche Industrie betreibt insbesondere in der Chemischen Industrie eigene Kraftwerke und deckt somit zum Teil ihren Strombedarf aus eigener Erzeugung. Insgesamt wurden im Jahr 2004 41 TWh Strom in industriellen Kraftwerken erzeugt, davon 29 TWh in KWK-Anlagen. Die Emissionen aus industrieller Stromerzeugung sind nicht in diesem Bericht aufgeführt, sondern werden in der Sektorperspektive Energie behandelt.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Industriesektor seit 1990

In den Industriesektoren fand zwischen 1990 und 1995 eine erhebliche Reduzierung der Emissionen statt. Die direkten Emissionen allein sanken in diesem Zeitraum um 62 Mt CO_2e. Von 1995 bis 2004 konnte die Industrie ihre direkten Emissionen um weitere 31 Mt CO_2e senken, während gleichzeitig die Produktion um jährlich mehr als 2 Prozent anstieg. Der industrielle Stromverbrauch sank von 1990 bis 1995 um 13 TWh, stieg dann aber bis 2004 wieder auf 249 TWh an; die entsprechenden Emissionen gingen auf Grund der gesunkenen CO_2-Intensität der Stromerzeugung zurück. Der größte Teil des Rückgangs der Gesamtemissionen bis 1995 ist auf Folgeeffekte der Wiedervereinigung zurückzuführen[17]. Die weiter gehende Senkung der Emissionen nach 1995 wurde zum einen durch die Steigerung der Energieeffizienz in allen Industriezweigen bewirkt; zum anderen konnten viele Industrien ihre spezifischen Prozessemissionen durch gezielte Maßnahmen erheblich senken.

Industriesektor: Historische Entwicklung Treibhausgasemissionen – Deutschland Basisjahr - 2004

in Mt CO_2e



* Korrektur Emissionen Chemische Industrie um 8 Mt CO_2 aus stofflicher Nutzung von Erdgas; 3,6 Mt CO_2 aus Korrektur Produktionsmenge Salpetersäureproduktion, 2 Mt CO_2 aus stofflicher Verwertung von Mt CO_2 aus Ammoniaksynthese; letztere beiden Korrekturen noch nicht in VCI-Berichten für 2004 (68 Mt CO_2) enthalten
** Rund 33%, soweit auf Basis der VCI-Angaben für 2004 vor Korrektur berechnet
*** Inklusive Nahrungsmittelindustrie und Fahrzeugbau

Quelle: UNFCCC, Statistisches Bundesamt, RWI, VDZ, Global Insight, Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland" von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz" – AG Industrie

Schaubild 2

Die deutsche Wiedervereinigung und der im Wesentlichen in den Jahren von 1990 bis 1995 stattfindende Umbau der deutschen Industrielandschaft haben zu einem signifikanten Rückgang der Emissionen geführt. Nach Auswertung des DIW wurden zwischen 1990 und 1993 die Emissionen der gesamtdeutschen Industrie allein als Folge der Wiedervereinigung um 61 Mt CO_2e reduziert; bis 1995 auf Grund des gleichen Ef-

17 Vgl. „Ursachen der CO_2-Entwicklung in Deutschland in den Jahren 1990 -1995", DIW/Fraunhofer Institut, 1998.

fekts nochmals um 9 Mt CO_2e. Der größte Teil des Rückgangs der Gesamtemissionen bis 1995 ist somit auf Folgeeffekte der Wiedervereinigung zurückzuführen[18].

Zwischen 1995 und 2004 konnten die Emissionen trotz eines Produktionswachstums von durchschnittlich ca. 2 Prozent pro Jahr von 409 Mt CO_2e auf 376 Mt CO_2e vermindert werden, was einer jährlichen Reduzierung von 0,9 Prozent entspricht. In diesem Rückgang der Emissionen spiegeln sich diverse Maßnahmen wider, die in diesen Jahren von den verschiedenen Industrien umgesetzt wurden, so beispielsweise die Verminderung des Klinkeranteils im Zement, der Mehreinsatz von Altpapier in der Papierproduktion oder auch die ersten Schritte in der Lachgaszersetzung in der Adipin- und Salpetersäureproduktion.

Durch die diversen Maßnahmen konnten insbesondere die direkten Emissionen adressiert werden, die im Durchschnitt stärker reduziert werden konnten als die indirekten Emissionen. Sie sanken von 333 Mt CO_2e im Basisjahr auf 240 Mt CO_2e (2004). Der Anteil der direkten Emissionen ist historisch leicht gesunken. 1990 betrugen die direkten Emissionen noch 68 Prozent der Gesamtemissionen, 1995 nur noch 66 Prozent und 2004 etwa 64 Prozent.

Eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Sektoren findet sich in den Branchenperspektiven ab Seite 57.

18 Vgl. „Ursachen der CO_2-Entwicklung in Deutschland in den Jahren 1990 -1995“, DIW/Fraunhofer Institut,1998.

Zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Industriesektor mit heutigem Stand der Technik („Stand der Technik“-Projektion)

Für die Industriesektoren wird eine Steigerung im Produktionsindex über alle Wirtschaftszweige hinweg von heute bis 2020/2030 um 1,9 Prozent pro Jahr prognostiziert[19]. Insbesondere die Maschinenbau- und Elektroindustrie sowie andere weiterverarbeitende Industrien in Deutschland wachsen nach derzeitigen Prognosen überdurchschnittlich stark. Andere Industrien – z.B. Stahl, Zement – erwarten in etwa eine gleich bleibende Produktion im Vergleich zum heutigen Stand. Gleichzeitig kommt es durch Bestandserneuerung zu Verbesserungen in der Energie- und Treibhausgaseffizienz, und innerhalb einzelner Branchen findet eine Verlagerung zu weniger treibhausgasintensiven Produkten und Prozessen statt. Auf Grund beider Effekte steigen die Treibhausgasemissionen in der „Stand der Technik“-Projektion über alle Wirtschaftszweige von 2004 bis 2020/2030 nur um ca. 0,6 Prozent pro Jahr. Die direkten Emissionen der Industriesektoren erhöhen sich von 240 Mt CO_2e (2004) auf 247 Mt CO_2e im Jahr 2020 und auf 260 Mt CO_2e (2030). Der Anstieg bei Emissionen aus dem Verbrauch von Primärenergieträgern sowie aus Prozessemissionen ist etwas geringer als der Anstieg der Gesamtemissionen, die – wesentlich bedingt durch die steigende CO_2-Intensität in der Stromerzeugung[20] – von 376 Mt CO_2e (2004) auf 412 Mt CO_2e (2020) bzw. auf 436 Mt CO_2e (2030) anwachsen.

„Stand der Technik“-Projektion: Methodik

Als Aufsetzpunkt für die Bewertung von technischen Hebeln zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen in Deutschland wurde in der vorliegenden Studie eine „Stand der Technik“-Projektion erstellt. Diese Fortschreibung der Emissionsentwicklung je Sektor beruht auf zwei Prinzipien:

- Das derzeit prognostizierte Mengenwachstum (z.B. Produktionswachstum der verschiedenen Industriesektoren) wird als gegeben vorausgesetzt. In Summe entspricht das hier angenommene Wachstum einem Wachstum des Bruttosozialprodukts um 1,6 Prozent pro Jahr und einem Wachstum des Produktionsindex um 1,9 Prozent.

- Angenommen wird, dass alle neu angeschafften Güter jeweils auf dem durchschnittlichen Stand der Technik sind, der im heutigen Verkaufs- bzw. Investitionsmix erreicht ist. Dabei werden für die verschiedenen Wirtschaftszweige jeweils spezifische Lebensdauern für verschiedene Güter berücksichtigt.

In dieser „Stand der Technik“-Projektion durchdringt der heutige Verkaufs- bzw. Investitionsmix über Zeit den Bestand, bis nach komplettem Austausch aller Güter bzw. An-

19 Vgl. Global Insight [2006].
20 Der Stromverbrauch der Industriesektoren steigt gleichzeitig von 249 TWh (2004) auf 272 TWh (2020) bzw. 295 TWh (2030).

lagen für den gesamten Bestand die Effizienz dieses heutigen Verkaufs- bzw. Investitionsmix erreicht ist. Diese „Stand der Technik"-Projektion erlaubt eine Bewertung von technischen Vermeidungshebeln, bei der Doppelzählungen vermieden werden. Damit unterscheidet sich die „Stand der Technik"-Projektion von einem *Business as usual*-Szenario, das üblicherweise implizit sowohl eine zu erwartende Weiterentwicklung von Technologien als auch eine über den heutigen Verkaufs- bzw. Investitionsmix hinausgehende Durchdringung des Bestands mit der effizientesten Technik annimmt.

Bei der Ableitung der „Stand der Technik"-Projektion blieben politische Zielsetzungen und Selbstverpflichtungen einzelner Industrien unberücksichtigt. Gleiches gilt für staatliche Förderprogramme wie den Ausbau erneuerbarer Energien auf Basis des EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz). Hier wurden lediglich Projekte berücksichtigt, die sich bereits heute im Bau oder in Planung befinden. Der Ausstieg aus der Kernenergie für die Stromerzeugung in Deutschland wurde als geltendes Recht im Basisszenario als gesetzt angenommen.

Die „Stand der Technik"-Projektion unterstellt für alle Sektoren bereits ambitionierte Investitionsentwicklungen. Durch den angenommenen Austausch des Bestands im regulären Investitionszyklus und das Vordringen des heutigen Stands der Technik werden damit in vielen Wirtschaftszweigen im Vergleich zur Effizienz im heutigen Bestand deutliche Effizienzgewinne erzielt.

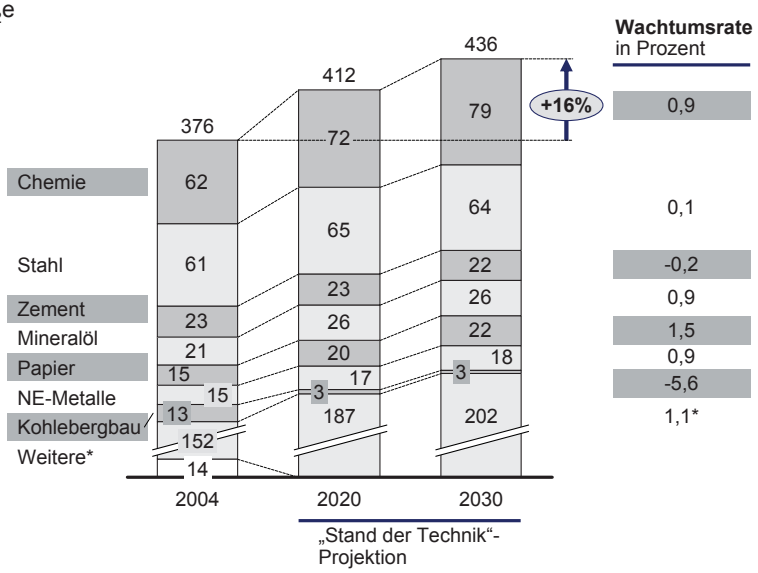
„Stand der Technik"-Projektion: Annahmen und Ergebnisse für den Industriesektor

Die „Stand der Technik"-Projektion des Industriesektors ergibt sich aus den jeweiligen Projektionen der einzelnen Branchen. Im Allgemeinen wurden die Emissionen auf Basis des erwarteten Produktionswachstums der Branchen (bzw. spezifischer Produktgruppen) und einer Annahme bez. des Effizienzgewinns bei Ausbreitung des Stands der Technik 2004 im Markt prognostiziert. Das spezifische Vorgehen wird in den Branchenperspektiven erläutert (vgl. Seite 57).

In der „Stand der Technik"-Projektion steigen die Emissionen der Industrie vor dem Hintergrund eines durchschnittlichen Wachstums des Produktionsindex von ca. 1,9 Prozent von 2004 bis 2030 um ca. 16 Prozent. Die Veränderungen der Emissionen je Sektor entwickeln sich sehr unterschiedlich und sind stark vom prognostizierten Wachstum der jeweiligen Industrie abhängig. In der „Stand der Technik"-Projektion der Chemischen Industrie beispielsweise steigen die Emissionen um 27 Prozent auf 79 Mt CO_2e im Jahr 2030 (72 Mt CO_2e im Jahr 2020). Der Ausstieg aus dem Kohlebergbau wiederum wird die Emissionen dieser Branche um 10 Mt CO_2e gegenüber 2004 vermindern.

Industriesektor: „Stand der Technik"-Projektion Treibhausgasemissionen – Deutschland 2004 - 2030

in Mt CO_2e



* Inklusive Nahrungsmittelindustrie und Fahrzeugbau

Quelle: UNFCCC, Statistisches Bundesamt, RWI, VDZ, Global Insight, Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland" von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz", AG Industrie

Schaubild 3

Während die direkten Emissionen bis 2020 von 240 Mt CO_2e im Jahr 2004 nur um 3 Prozent auf 247 Mt CO_2e ansteigen, wachsen die indirekten Emissionen im gleichen Zeitraum von 136 auf 165 Mt CO_2e um mehr als 20 Prozent. In der starken Erhöhung der indirekten Emissionen spiegelt sich zum einen das überproportionale Wachstum der stromintensiven Industrien wider, zum anderen wirkt sich die Erhöhung der CO_2-Intensität des verbrauchten Stroms aus.

Im Durchschnitt über alle Industrien steigen die Emissionen jährlich um 0,6 Prozent und bleiben somit bereits in der „Stand der Technik"-Projektion um 1,3 Prozentpunkte hinter dem Produktionswachstum zurück. Diese teilweise Entkopplung des wirtschaftlichen Wachstums von den emittierten Treibhausgasen ergibt sich im Wesentlichen aus drei Effekten:

- Der Stand der Technik 2004 breitet sich im Markt aus. Die weitere Ausbreitung von Vorwärmertechnologie in der Klinkerproduktion der Zementindustrie ist ein Beispiel für die Ausbreitung des Stands der Technik.

- In der gesamten Industrie findet eine Verschiebung von energie- und emissionsintensiven hin zu emissionsärmeren Industrien statt. Dies spiegelt sich in den niedrigen Wachstumsraten der Industrien mit hohen Emissionen (Beispiel: Stahl 0,2 Prozent, Zement 0,2 Prozent) gegenüber den emissionsärmeren Industrien wider (Maschinenbau 2,5 Prozent, Elektroindustrie 4 Prozent).

- Innerhalb einiger Industrien ist mit einer weiteren Verlagerung hin zu emissionsärmeren Produkten zu rechnen (z.B. Chemische Industrie und weitere Industrien).

Die „Stand der Technik“-Projektion berücksichtigt, dass sich die CO_2-Intensität des verbrauchten Stroms erhöht. Dies resultiert aus einem veränderten Erzeugermix im Basisszenario als Folge des Ausstiegs aus der Kernenergie. Dies erklärt einen Anteil des Anstiegs der Emissionen im Jahr 2020 um 17 Mt CO_2e und im Jahr 2030 um 14 Mt CO_2e.

Der Posten „Abweichungen“ aus der Korrektur des Reportings für die Chemische Industrie für das Jahr 2004[21] wird in den Jahren 2010 bis 2030 nicht mehr in der „Stand der Technik“-Projektion aufgeführt.

Eine detaillierte Darstellung der „Stand der Technik“-Projektion der einzelnen Branchen findet sich in den Branchenperspektiven ab Seite 57.

21 Vgl. oben Fußnote 13.

Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Industriesektor

In der vorliegenden Studie wurden insgesamt über 300 technische Vermeidungshebel bewertet, davon rund 60 im Industriesektor. Damit sind nach Einschätzung der beteiligten Unternehmen und Verbände alle derzeit diskutierten technischen Ansatzpunkte mit mittlerer bis hoher Realisierungswahrscheinlichkeit abgedeckt. Vermeidungshebel, die zu einer Beeinträchtigung der Lebensqualität führen oder die Industriestruktur fundamental verändern, wurden nicht bewertet.

Bewertung von Hebeln zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen: Methodik

Bei der Bewertung der Vermeidungshebel wurde als Aufsetzpunkt die „Stand der Technik"-Projektion verwendet, die oben (Seite 27) im Detail beschrieben ist. Die Bewertung der Vermeidungspotenziale und -kosten betrachtet neben dem Jahr 2020 auch das Jahr 2030, da im Zeitraum zwischen 2020 und 2030 erhebliche technologische Weiterentwicklungen vor allem im Bereich der Abscheidung und Speicherung von CO_2 (*Carbon Capture and Storage* – CCS) zu erwarten sind. Auf eine weitere Ausweitung des Zeithorizonts wurde verzichtet, da die Einschätzung weitergehender technologischer Entwicklungen für die Jahre nach 2030 aus heutiger Perspektive mit zu hohen Unsicherheiten behaftet ist. Allerdings ist davon auszugehen, dass im Zeitraum bis 2030 weitere innovative Technologien auf den Markt kommen können, die gegenüber heute eine weitere Steigerung der Energieeffizienz bzw. eine weitere Senkung von Emissionen bewirken können.

Jede Maßnahme wurde hinsichtlich ihres Vermeidungspotenzials für Treibhausgasemissionen und ihrer Nettokosten im Vergleich zur Referenztechnologie in der „Stand der Technik"-Projektion bewertet.

Die *Bewertung des Vermeidungspotenzials* erfolgte in drei Schritten:

1. Ermittlung des maximalen technischen Vermeidungspotenzials unter Berücksichtigung von externen Limitationen (z.B. technische Realisierbarkeit, Ressourcenknappheit oder Zyklen der Bestandserneuerung).

2. Festlegung der erwarteten Durchdringungsraten unter der hypothetischen Annahme, dass der Entscheider für die Mehrkosten der jeweiligen Maßnahme kompensiert wird. Die Durchdringung wurde so im Vergleich zum maximalen technischen Potenzial verringert, um beispielsweise nicht ökonomisch motivierten Präferenzen der Entscheider Rechnung zu tragen. In der Industrie wurde im Allgemeinen von rationalen ökonomisch motivierten Entscheidern ausgegangen, so dass die Durchdringungsraten weitestgehend nur durch technische Faktoren begrenzt sind. Grundsätzlich reflektieren die Annahmen über die Durchdringungsraten ambitionierte und trotzdem in der Praxis realisierbare Umsetzungsvolumina.

3. Berücksichtigung von Interdependenzen mit anderen Vermeidungshebeln. So verringert z.B. eine Substitution von Klinker in der Zementproduktion auf 65 Prozent die Prozessemissionen in der Zementproduktion und in Konsequenz das Potenzial aus der Anwendung von CCS in Zementwerken.

Bei der *Berechnung der Vermeidungskosten* wurde jeweils die Differenz zwischen den Kosten des Vermeidungshebels und den Kosten der jeweiligen Referenztechnologie bestimmt. Es wurde eine Vollkostenrechnung durchgeführt, die sowohl Kapitalkosten der Investitionen als auch Betriebskosten umfasst. Dabei wurden für neue Technologien jeweils technologiespezifische Lernraten unterstellt, die zu einer allmählichen Kostendegression bis 2020 bzw. bis 2030 führen. Die Berechnung kann an dem Beispiel einer sekundären Einheit zur Zersetzung von Lachgas in der Adipinsäureproduktion illustriert werden. Um die deutschen Adipinsäureproduktionsanlagen vollständig mit sekundären Zersetzungseinheiten auszurüsten sind Investitionen von etwa 30 Millionen EUR notwendig. Eine Abschreibung über 4 Jahre bei 9,5 Prozent Zinsen führt zu einer jährlichen Belastung von 9,4 Millionen EUR. Zusätzlich müssen die Katalysatoren dieser Anlagen alle drei Jahre ausgetauscht werden. Der Austausch der Katalysatoren ist mit Kosten von 5,5 Millionen EUR veranschlagt, dies entspricht einer jährlichen Belastung von 1,8 Millionen EUR. Die Gesamtkosten belaufen sich somit in den ersten vier Jahren auf 11,2 Millionen EUR, für die folgenden Jahre auf 1,8 Millionen EUR. Durch sekundäre Zersetzungseinheiten können insgesamt 4,6 Mt CO_2e vermieden werden, somit ergeben sich Vermeidungskosten von 2,4 EUR/t CO_2e in den ersten vier Jahren, in den folgenden Jahren von rund 0,5 EUR/t CO_2e. In der Kostenkurve dargestellt werden immer die Kosten, die der jeweilige Entscheider während der Abschreibungsdauer aufbringen muss, also in diesem Beispiel 2,4 EUR/t CO_2e. Das gilt auch, wenn in den Jahren 2020 oder 2030 die Abschreibungsdauer für Teile des Bestands bereits lange überschritten ist. Für Maßnahmen, bei denen die Vermeidungskosten intrinsischen Veränderungen unterliegen (z.B. Lernkurve für CCS), wird für die Jahre 2020 bzw. 2030 das gewichtete Mittel der Kosten über den gesamten Bestand ausgewiesen.

Die Berechnung der Vermeidungskosten erfolgte zum einen aus Perspektive des jeweiligen Entscheiders, zum anderen aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive.

- Bei der Bewertung der Vermeidungshebel aus der *Entscheiderperspektive* wurde insbesondere mit den jeweils spezifischen Amortisierungszeiträumen gerechnet (4 Jahre für Nachrüstungen, 20 Jahre für Erneuerung/Umbau kompletter Anlagen, z.B. CCS). Darüber hinaus wurden die jeweiligen Zinssätze der Entscheider berücksichtigt (im Durchschnitt 9,5 Prozent real für die Industrie). Schließlich wurden Industrie- bzw. Endverbraucherpreise für Energie ebenso in die Bewertung einbezogen wie relevante Steuern, Förderprogramme (z.B. EEG) und bestehende Zölle (z.B. für Ethanolimport). Veränderungen in der Kaufbereitschaft, die sich aus der Umsetzung einzelner Vermeidungshebel ergeben können, wurden hingegen nicht abgebildet. Im vorliegenden Bericht werden – sofern nicht ausdrücklich anders angegeben – Vermeidungskosten aus der Entscheiderperspektive angeführt.

- Bei der Bewertung aus *gesamtwirtschaftlicher Perspektive* wurden gesamtwirtschaftliche Amortisierungszeiträume und Kapitalkosten (7 Prozent) veranschlagt. Kosteneinsparungen, z.B. durch reduzierte Energiekosten, wurden zu Herstellkosten der eingesparten Güter eingerechnet. Förderprogramme, Steuern und Transaktionskosten blieben bei der gesamtwirtschaftlichen Perspektive unberück-

sichtigt. Auf eine separate Darstellung der gesamtwirtschaftlichen Perspektive wurde hier verzichtet, da für die Umsetzung der einzelnen Vermeidungshebel vor allem relevant ist, wie attraktiv diese für die jeweiligen Investoren sind.

Den erhöhten Anforderungen an die Amortisierung in der Entscheiderperspektive im Vergleich zur Gesamtperspektive stehen somit bei Energieeffizienzmaßnahmen höhere Einsparungen aus dem eingesparten Brennstoff oder Strom gegenüber, da der durchschnittliche Endkundenpreis in der Entscheiderperspektive inkl. Steuern und Abgaben höher ist als der volkswirtschaftliche Preis. Die tatsächlich von den Unternehmen gezahlten Strompreise variieren allerdings erheblich. Insofern sind die Kostenberechnungen an dieser Stelle als indikativ anzusehen.

Vermeidungspotenziale und -kosten wurden für jeden Sektor in einer Vermeidungskostenkurve zusammengestellt. Diese Kurve zeigt auf der X-Achse, welchen Beitrag jeder einzelne Vermeidungshebel zur Treibhausgasvermeidung liefert. Auf der Y-Achse sind die Vermeidungskosten pro Tonne CO_2e für den jeweiligen Vermeidungshebel abgetragen, und zwar jeweils für ein bestimmtes Jahr. Die Vermeidungshebel, die sich links in der Vermeidungskurve (auf oder unterhalb der Nulllinie) befinden, sind aus Entscheidersicht über die Amortisierungsdauer der Maßnahme wirtschaftlich, d.h. entweder kostenneutral oder sogar mit einer Ersparnis verbunden. Von links nach rechts sind die Maßnahmen in aufsteigender Reihenfolge nach der Höhe der jeweiligen Vermeidungskosten sortiert. Dabei sind die Vermeidungshebel jeweils überschneidungsfrei (auch für sich gegenseitig ausschließende Hebel), so dass das Vermeidungspotenzial aller Hebel über die Kurve addiert werden kann. Die Reihenfolge impliziert allerdings nicht, dass die Vermeidungshebel in der dargestellten Abfolge umgesetzt werden sollen. Eine Addition der kumulierten Vermeidungskosten über die verschiedenen Sektoren hinweg ist nicht möglich, da es hierbei – auf Grund der gewählten Entscheiderperspektive – zu Überschneidungen kommt.

Für die Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Stromeffizienz in den Bereichen Industrie, Gebäude und Transport wurde die durchschnittliche CO_2-Intensität der Stromerzeugung der zugebauten Kapazität aus der „Stand der Technik"-Projektion zu Grunde gelegt[22]. Maßnahmen zur Reduzierung der CO_2-Intensität in der Stromerzeugung wurden dem Energiesektor zugerechnet. Entsprechende Effekte aus der Stromerzeugung in industriellen KWK-Anlagen wurden ebenfalls im Energiesektor berücksichtigt, auch wenn der verstärkte Einsatz entsprechender Anlagen durch die Industrie veranlasst wird. Das entsprechende Vermeidungspotenzial in der industriellen Wärmeerzeugung wurde hingegen dem Industriesektor zugerechnet.

Im Vergleich mit dem Basisszenario wurde auch ein Öl-Hochpreisszenario bewertet. In diesem sinken die Vermeidungskosten der meisten Maßnahmen im Vergleich zur jeweiligen Referenztechnologie um 10 EUR/t CO_2e bis zu 50 EUR/t CO_2e, da insbesondere durch Energieeffizienzmaßnahmen bei höheren Ölpreisen höhere monetäre Einsparungen entstehen. Lediglich die verstärkte Nutzung von Erdgas (an Stelle von Stein- oder Braunkohle) wäre durch die gestiegenen Gaspreise in einem solchen Szenario mit höheren Vermeidungskosten verbunden.

22 Die durchschnittliche CO_2-Intensität des Zubaumix aus Kohle und Erdgas nach Eigenverbrauch der Kraftwerke und nach Netzverlusten sinkt in der „Stand der Technik"-Projektion von 0,72 t CO_2e/MWh (2004) auf 0,64 t CO_2e/MWh (2020) und steigt dann auf 0,68 t CO_2e/MWh (2030).

Wesentliche makroökonomische Grundannahmen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Sektorübergreifende Grundannahmen

		Annahmen 2010	2020	2030	Quelle
Allgemeine Grundannahmen	• Jährliches Wachstum BIP	1,6%	1,6%	1,6%	Global Insight
	• Bevölkerungsentwicklung in Mio.	82,0	80,7	78,5	DESTATIS
	• Diskontierungsraten (real)				
	– Energiesektor	7%	7%	7%	Arbeitsgruppen
	– Industriesektor	9,5%	9,5%	9,5%	
	– Gewerbe	9%	9%	9%	
	– Privatpersonen	4%	4%	4%	
Energiepreise, real (2005)	• Rohöl in USD pro Barrel*	57	52	59	Annual Energy Outlook 2007 (EIA)
	– Hochpreisszenario	63	66	75	EWI/EEFA**
	• Steinkohle in EUR/MWh	7,2	7,6	8,1	EWI/EEFA**
	• Braunkohle in EUR/MWh	4,3	4,3	4,3	EWI/EEFA**
	• Erdgas*** in EUR/MWh	20,1	18,8	20,3	EWI/EEFA**
	– Hochpreisszenario	22,0	23,0	25,0	EWI/EEFA**

* Umrechnung: 1 EUR = 1,2 USD
** Energiewirtschaftliches Gesamtkonzept 2030
*** Frei Kraftwerk; berechnet auf Basis EIA Ölpreis

Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland" von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz"

Schaubild 4

Im Untersuchungsumfang sind alle Treibhausgasemissionen enthalten, die Deutschland im Sinne der Kyoto-Berichterstattung zugerechnet werden. Eingeschlossen sind damit Emissionen, die bei der Produktion von Gütern und Waren an deutschen Standorten entstehen, auch wenn die Produkte anschließend im Ausland genutzt bzw. konsumiert werden. Ausgeschlossen sind dagegen Emissionen, die bei der Herstellung von importierten Produkten, Vorprodukten oder Rohstoffen entstehen.

Die weitere Entwicklung der Gesamtemissionen aus der Produktion der deutschen Industrie ist von drei Faktoren abhängig: den spezifischen Emissionen der Produktion, Umfang und Art der Nachfrage sowie der Höhe des nationalen Produktionsvolumens.

- Die Minderung der spezifischen Emissionen durch technische Maßnahmen kann durch die Industrie direkt beeinflusst werden und stellt insofern den Fokus dieses Kapitels dar.

- Den Umfang und die Art der nachgefragten Produkte bestimmt im Wesentlichen der Markt. Maßnahmen, die auf einem veränderten Nachfrageverhalten beruhen, wurden nicht betrachtet. Bei der Bewertung der Maßnahmen wurde ein unverändertes Nachfrageverhalten unterstellt[23].

23 Es wurde nicht bewertet, wie durch Umsetzung von Vermeidungshebeln in den anderen Sektoren die Nachfrage nach bestimmten Industrieprodukten – beispielsweise Vormaterialien für bestimmte technische Lösungen – steigen könnte.

- Die Reduzierung von Emissionen in Deutschland durch eine Verminderung des nationalen Produktionsvolumens, etwa durch eine geduldete oder initiierte Abwanderung emissionsintensiverer Industrien, ist keine geeignete Maßnahme zur globalen Reduzierung von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die Verlagerung von emissionsintensiven Produktionsprozessen ins Ausland würde bei einer unverminderten Nachfrage auf Grund der erhöhten Transportkosten und potenziell höheren spezifischen Emissionen im Ausland die globale Bilanz sogar verschlechtern.

Die Studie bewertet prinzipiell alle verfügbaren technischen Hebel zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen. Gleichzeitig wurde davon ausgegangen, dass die Sektoren der deutschen Wirtschaft so weiterwachsen werden, wie derzeit prognostiziert wird. Das bedeutet insbesondere, dass für die Verlagerung von CO_2-intensiven Produktionsprozessen ins Ausland keine Entwicklungen angenommen wurden, die über bestehende Trends hinausgehen.

Aus dieser Annahme ist umgekehrt nicht abzuleiten, dass das Wachstum unabhängig von gegebenenfalls umzusetzenden (nicht wirtschaftlichen) Maßnahmen oder von CO_2 Regulierung und entsprechenden Preisen ist. Die Wettbewerbsfähigkeit betroffener Industrien kann bereits bei CO_2-Preisen von EUR 20/t CO_2e stark eingeschränkt werden[24]; je nach Anteil versteigerter Lizenzen im EU ETS auch schon bei deutlich geringeren Preisen. Umgekehrt ist ein verstärktes Wachstum von bestimmten Bereichen der Industrie infolge verstärkter Nachfrage im Zuge der Klimadiskussion möglich. So ist z.B. eine zusätzliche Nachfrage in der Kunststoffchemie aus der intensivierten Verwendung von Dämmstoffen möglich, die bei geeigneten Wettbewerbsparametern auch in Deutschland zu einem inländischen Wachstumsschub in dieser Branche führen könnte.

Die tatsächlichen Wachstumsauswirkungen hängen vom jeweiligen Industriekontext sowie von Art und Höhe politischer oder regulatorischer Vorgaben ab. Eine Abschätzung der möglichen Auswirkung auf die Wettbewerbsfähigkeit findet sich im Kapitel *Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen* (Seite 48) sowie in den jeweiligen Branchenkapiteln. Die deutsche Industrie leistet durch die Entwicklung von „emissionsvermindernden“ Produkten einen Beitrag zur Senkung der Emissionen in anderen Sektoren. Dieser Beitrag wird allerdings nicht in diesem Kapitel, sondern in den jeweiligen Nutzersektoren erläutert.

Hebel zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen im Industriesektor bis 2020

In den Industriesektoren können die Treibhausgasemissionen sowohl durch fortgesetzte Steigerung der Energieeffizienz (z.B. durch effizientere Antriebssysteme und industriespezifische Einzelmaßnahmen) als auch durch das gezielte Abfangen von Treibhausgasen (z.B. Lachgas in der Chemie) gesenkt werden. Knapp zwei Drittel der bewerteten Maßnahmen (30 Mt CO_2e) sind aus Entscheidersicht wirtschaftlich; weitere Hebel mit einem Vermeidungspotenzial von 11 Mt CO_2e kosten bis zu 20 EUR/t CO_2e. Im Durchschnitt steigt nach Umsetzung der Maßnahmen die

24 Vgl. EU ETS Review. Report on International Competitiveness. European Commission/McKinsey/Ecofys, Dezember 2006.

Energieeffizienz der Produktion bis 2020 jährlich um 1,6 Prozent[25]. Das industrielle Produktionsvolumen wächst im selben Zeitraum um knapp 2 Prozent pro Jahr; dennoch bleiben die absoluten Treibhausgasemissionen auf Grund der gleichzeitigen Verminderung der Prozessemissionen im Vergleich zum heutigen Stand bis 2020 in etwa konstant. Darüber hinausgehende Vermeidungshebel mit Kosten von mehr als 20 EUR/t CO_2e wären in der Industrie nur in einem adäquaten globalen Kontext umsetzbar, wenn Verzerrungen der Wettbewerbsfähigkeit verhindert werden sollen.

Insgesamt wurden im Industriesektor Vermeidungshebel mit einem Potenzial von 49 Mt CO_2e (2020) bzw. 96 Mt CO_2e (2030) bewertet. Davon sind bis 2020 etwa zwei Drittel (30 Mt CO_2e) für den Entscheider wirtschaftlich; weitere 11 Mt CO_2e (2020) sind mit Vermeidungskosten von bis zu 20 EUR/t CO_2e verbunden. Darüber hinausgehende Potenziale von weiteren 8 Mt CO_2e (2020) haben teilweise deutlich höhere Vermeidungskosten.

Die Potenziale der Industrie ergeben sich zum einen aus den vier Querschnittsthemen Effizienzsteigerung Antriebssysteme, Effizienzmaßnahmen an Gebäuden, CCS sowie Ausbau KWK[26]. Zum anderen kommen weitere 25 industriespezifische Maßnahmen hinzu.

- 21 Mt CO_2e können bis 2020 (2030: 26 Mt CO_2e) industrieübergreifend durch eine Ausbreitung von effizienteren Antriebssystemen erreicht werden, die auch ohne expliziten CO_2-Preis wirtschaftlich sind.

- Die Erhöhung der Effizienz in der Klimatisierung und Beleuchtung von Gebäuden der Industrie ist ebenfalls wirtschaftlich und hat im Jahr 2020 ein Potenzial von 6 Mt CO_2e (2030: 8 Mt CO_2e).

- Über einen Ausbau der Nutzung von KWK kann die Industrie bis 2020 zu Kosten von 20 EUR/t CO_2e zur Vermeidung von ~ 1 Mt CO_2e beitragen (2030: 1 Mt CO_2e).

- Das größte langfristige Potenzial mit etwa 38 Mt CO_2e (2030; für 2020 lediglich 2 Mt CO_2e) käme aus dem Einsatz von CCS-Technologien in der Stahl-, Zement- und der Chemischen Industrie zu Kosten von 40 bis 55 EUR/t CO_2e. Dieses Potenzial ist jedoch mit erheblichen technischen und ökonomischen Unsicherheiten verbunden.

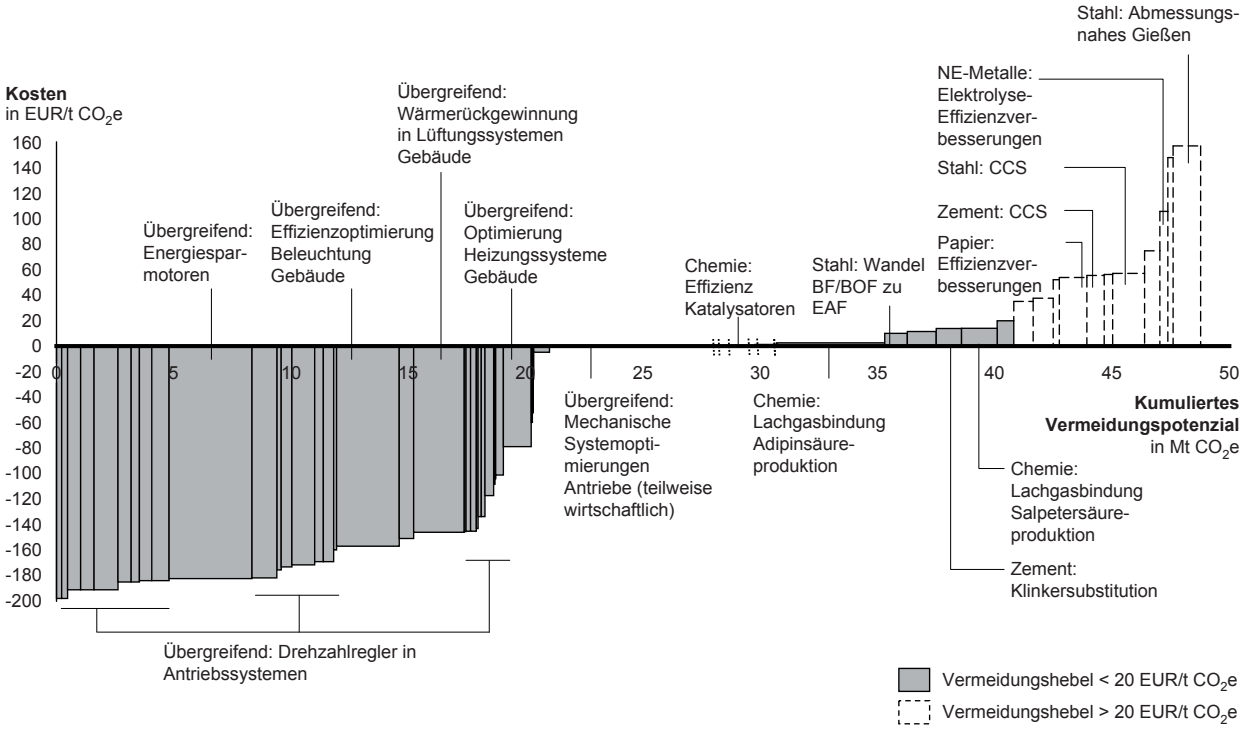
- Weitere ca. 19 Mt CO_2e Potenzial im Jahr 2020 (2030: 24 Mt CO_2e) lassen sich aus Einzelmaßnahmen aus der Chemischen, Stahl-, Zement-, Papier-, Mineralöl- und Nichteisen-Metall-Industrie ableiten. Hiervon sind 11 Mt CO_2e (2020) für den jeweiligen Entscheider mit Vermeidungskosten von bis zu 20 EUR/t CO_2e verbunden; die übrigen 8 Mt CO_2e kosten teilweise deutlich mehr.

25 Energieeffizienz bezieht sich hier auf die Entwicklung des Verbrauchs von Strom und Primärenergie im Vergleich zum Produktionsindex.

26 Das Querschnittsthema Effizienzsteigerung Antriebssysteme wurde in Zusammenarbeit mit führenden Anlagenbauern sowie dem ZVEI ausgearbeitet; das Querschnittsthema Effizienzmaßnahmen an Gebäuden wurde im Wesentlichen durch die Arbeitsgruppe „Gebäude“ erarbeitet, die Potenziale aus CCS und KWK wurden mit Vertretern der jeweiligen Industrien bestimmt.

Industriesektor: Vermeidungskostenkurve – Deutschland 2020

ENTSCHEIDER-PERSPEKTIVE



Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Industrie

Schaubild 5

Ein großes Potenzial im Industriesektor stammt aus den vier beschriebenen Querschnittsthemen: dem verstärkten Einsatz von effizienteren Antriebssystemen, der effizienteren Klimatisierung und Beleuchtung von Gebäuden und Produktionshallen, dem Ausbau der KWK zur Stromerzeugung und dem Abfangen von CO_2 mit Hilfe von CCS-Technologien.

Effizienzsteigerung von Antriebssystemen

Durchschnittlich etwa 60 Prozent des in der Industrie genutzten Stroms werden durch Antriebssysteme verbraucht. Elektrische Antriebssysteme finden sich insbesondere in Pumpen, Kompressoren und Ventilatoren, aber z.B. auch in Förderbändern und Fertigungsrobotern sowie diversen weiteren industriellen Anlagen. Die Effizienzsteigerung der eingesetzten Antriebssysteme wird in vielen Unternehmen bereits kontinuierlich adressiert. Eine Bestandsanalyse sowie der technologische Mix der im Jahr 2004 verkauften Motoren deuten allerdings auf ein zusätzliches Potenzial hin. Bis 2020 können durch diese Maßnahmen gegenüber der „Stand der Technik“-Projektion ca. 21 Mt CO_2e eingespart werden (2030: 26 Mt CO_2e). Dieses Potenzial beruht allein auf einem vermehrten Einsatz von Technologien, die bereits am Markt erhältlich sind, im Rahmen der normalen Investitionszyklen. Es handelt sich um das Potenzial, das durch Ausbreitung dieser Technologien jenseits der im „Stand der Technik“-Projektion prognostizierten

Ausbreitung erreichbar ist. Die hier betrachteten Hebel sind der vermehrte Einsatz von Frequenzumrichtern (Drehzahlregler) sowie der Einsatz von Energiesparmotoren mit verbessertem Wirkungsgrad. Darüber hinaus ergeben sich weitere Einsparpotenziale aus mechanischer Systemoptimierung, die im Rahmen des Austauschs von Anlagen vorgenommen werden kann. Diese Maßnahmen wirken sich direkt auf den Stromverbrauch und somit auf die CO_2-Emissionen aus.

- Aus dem breiteren Einsatz von *Drehzahlreglern* ist bis 2020 ein Potenzial von ca. 10 Mt CO_2e (2030: 13 Mt CO_2e) zu erwarten. In vielen Fertigungsprozessen wird variable Motorleistung nachgefragt, welche z.B. durch Drosselung eines konstant laufenden Motors erreicht wird. Über Drehzahlregler kann Strom gespart werden, da sie die Leistung des Motors an die aktuelle Nachfrage flexibel anpassen. Das Einsparpotenzial durch Einsatz eines Drehzahlreglers liegt bei Pumpen und Ventilatoren durchschnittlich bei 35 Prozent des Stromverbrauchs, bei Luftkompressoren bei 15 Prozent und bei anderen Anlagen bei ~ 25 Prozent[27]. Derzeit beträgt die Durchdringungsrate von Frequenzumrichtern bei neu verkauften Motoren etwa 32 Prozent, im Bestand 2004 sind in ca. 12 Prozent der Motoren Frequenzumrichter eingebaut. Es wird geschätzt, dass je nach Anwendung ein Einsatz in 30 bis 60 Prozent aller Antriebe technisch möglich ist und die dargestellten Potenziale hat. Auf Basis der spezifischen Annahmen pro Anwendung ist bis 2020 ein Potenzial von ca. 10 Mt CO_2e (2030: 13 Mt CO_2e) zu erwarten. Die Kosten für Drehzahlregler und Installation liegen zwischen 60 und 400 EUR/KW, je nach Leistungsklasse der Anlage. Die jährlichen Kosten sind abhängig von den Betriebsstunden pro Jahr. In allen betrachteten Leistungsklassen sind die jährlichen Kosten auf Basis der durchschnittlich zu Grunde gelegten Laufzeiten geringer als die Ersparnisse durch den Stromverbrauch[28].

- Durch Einsatz von *Energiesparmotoren* (Motoren der Effizienzklasse 1) in allen verkauften Motoren besteht bis 2020 ein über die „Stand der Technik"-Projektion hinausgehendes Potenzial von 4 Mt CO_2e (2030: 4 Mt CO_2e). Im Durchschnitt sind Wirkungsgrade der Motoren der Effizienzklasse 1 um 3 Prozent höher als die Wirkungsgrade von Motoren der Effizienzklasse 2 (6 Prozent gegenüber Motoren der Klasse 3). Bereits in der „Stand der Technik"-Projektion wird von einer weiteren Ausbreitung von Motoren der Effizienzklasse 1 ausgegangen. Die weitere Marktpenetration wird hierbei auf Basis des Anteils dieser Effizienzklasse an den verkauften Motoren im Jahr 2004 berechnet. Der Bestand aller Motoren im Jahr 2004 setzt sich zusammen aus 79 Prozent Motoren der Effizienzklasse 3, 19 Prozent der Klasse 2 und 2 Prozent der Klasse 1. Gleichzeitig waren 7 Prozent der verkauften Motoren im Jahr 2004 Motoren der Effizienzklasse 1, so dass bereits in der „Stand der Technik"-Projektion der Anteil dieser Motoren bis 2020 auf 7 Prozent ansteigt. Durch Einsatz von Motoren der Effizienzklasse 1 in allen verkauften Motoren besteht bis 2020 ein über die „Stand der Technik"-Projektion hinausgehendes Potenzial von 3,6 Mt CO_2e (2030: 4,2 Mt CO_2e). Das dargestellte Potenzial berücksichtigt bereits die Interdependenz mit dem Einsatz von Drehzahlreglern. Die zusätzlichen Investitionen werden bereits innerhalb von vier Jahren durch die eingesparten Kosten

27 Die Effizienzpotenziale beruhen auf der Studie „Improving the Penetration of Energy Efficient Motors and Drives", Europäische Kommission, 2000.

28 In der Chemischen Industrie ergeben sich durch redundante Systeme teilweise sehr geringe Betriebsstunden pro Motor, die bei den zwei kleinsten Motorenklassen zu positiven Vermeidungskosten führen.

für Strom überkompensiert, so dass der Einsatz von Motoren der Effizienzklasse 1 durchweg zu negativen Vermeidungskosten führt.

- Durch *mechanische Systemoptimierung* können bis 2020 ca. 7 Mt CO_2e (2030: 9 Mt CO_2e) eingespart werden. Mechanische Systemoptimierung beinhaltet integrative Anpassungen – insbesondere Kraftübertragung, Leitungen und Rohre, Wartung und Reparatur, Abstimmung der getriebenen Anwendungen auf Motor und Antrieb etc. –, welche sehr von den Beschaffenheiten einzelner Anlagen abhängen. Eine systematische Abschätzung des Potenzials und der Kosten ist vor diesem Hintergrund nicht möglich. Es wird jedoch generell angenommen, dass die mechanische Systemoptimierung bis zu 50 Prozent der Einsparungen aus Drehzahlreglern und Energiesparmotoren entspricht. Zur Bewertung des Vermeidungspotenzials wird davon ausgegangen, dass mechanische Systemoptimierung (insbesondere der kostenintensive Austausch von Rohren, Infrastruktur, etc.) nur beim kompletten Austausch einer Anlage vorgenommen wird, also im Durchschnitt alle 40 Jahre. Eine detaillierte Analyse der Vermeidungskosten der mechanischen Systemoptimierung wurde im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt. Vielmehr wurde hier davon ausgegangen, dass eine mechanische Systemoptimierung wirtschaftlich ist[29].

Das Gesamtpotenzial der Maßnahmen wurde als Querschnittsfunktion über die verschiedenen Branchen quantifiziert. Die Zuteilung der Potenziale aus elektrischen Antrieben auf einzelne Branchen wurde in einem zweiten Schritt vorgenommen. Hierbei wurde vereinfachend zu Grunde gelegt, wie hoch der gesamte Stromeinsatz in der jeweiligen Branche ist und welcher Anteil davon auf elektrische Antriebe entfällt.

Effizienz von Gebäuden

In Industriegebäuden können im Jahr 2020 durch Optimierung von Heizungen und Beleuchtung wirtschaftliche Vermeidungspotenziale in Höhe von 6 Mt CO_2e realisiert werden (2030: 8 Mt CO_2e):

- In industriellen Gebäuden kann im Jahr 2020 durch Raumwärmeeinsparungen durch effizientere Lüftungssysteme ein Potenzial von 2 Mt CO_2e mit Einsparungen von 137 EUR/t CO_2e realisiert werden (2030: 4 Mt CO_2e mit Einsparungen von 147 EUR/t CO_2e). Die Technologie beruht auf Wärmetauschern, welche die Frischluft der Belüftungssysteme durch eine Wärmerückgewinnung vorwärmen. Diese werden bereits in der „Stand der Technik"-Projektion eingesetzt. Die angenommene durchschnittliche Effizienz der Rückgewinnung von 25 Prozent lässt sich allerdings durch die Installation effizientester Technik auf 75 Prozent steigern.

- Die Optimierung der Heizungssysteme im Rahmen von systematischem Monitoring und durch Einsatz intelligenter Regelungssysteme birgt ein weiteres Potenzial im Jahr 2020 in Gebäudebeheizung von 1 Mt CO_2e – mit Einsparungen von 70 EUR/t CO_2e (2030: 1 Mt CO_2e). Denkbar sind hier auch Energiespar-Contracting-Modelle mit externen Anbietern.

29 Die Kosten wurden mit 0 EUR/t CO_2e dargestellt; die tatsächlichen Kosten dürften niedriger liegen.

- Durch den Einsatz effizienterer Leuchten können in Industriegebäuden (Verwaltung und Produktion) im Jahr 2020 Potenziale von 3 Mt CO_2e mit Einsparungen von 150 EUR/t CO_2e realisiert werden (2030: 3 Mt CO_2e). Hierbei werden komplette Leuchtstoffröhrensysteme betrachtet, einzelne Lampentypen sind in der Regel nicht gegeneinander austauschbar. Der Effizienzunterschied zwischen installierten Systemen und hocheffizienten Systemen beträgt bis zu 40 Prozent. Der Austausch der Leuchten wird im Zuge einer Innenrenovierung der Gebäude durchgeführt, die im Durchschnitt alle 15 Jahre stattfindet.

Bei Zuteilung der Potenziale aus Gebäuden auf einzelne Branchen wurde vereinfachend die Anzahl der Mitarbeiter in der jeweiligen Branche als Gewichtungsfaktor zu Grunde gelegt.

Kraft-Wärme-Kopplung

Die Erzeugung von Strom in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen wurde in den vergangenen Jahren in der Industrie bereits in erheblichem Ausmaß ausgebaut. Aus bisher nicht genutzten Wärmesenken besteht in der Industrie ein zusätzliches Potenzial zur Erzeugung von 11 TWh Strom aus KWK-Anlagen, davon je 40 Prozent in der Chemischen Industrie und der Papierindustrie sowie 20 Prozent in der Mineralölindustrie. Insgesamt besteht im Jahr 2030 ein rechnerisches Potenzial von 5 Mt CO_2e aus der Erzeugung dieser 11 TWh aus KWK-Anlagen. Die Kosten wurden aus Entscheiderperspektive mit 20 EUR/t CO_2e berechnet. Aus der Erzeugung von Strom aus industriellen KWK-Anlagen ergibt sich aus dem höheren Wirkungsgrad der Energieerzeugung in der KWK-Anlage eine Verminderung der CO_2-Emissionen um 0,7 Mt CO_2e. Neben der Verminderung der Emissionen aus dem erhöhten Wirkungsgrad der KWK-Anlagen gegenüber der isolierten Erzeugung von Wärme und Strom ergibt sich eine erhebliche rechnerische Verminderung von etwa 4 Mt CO_2e daraus, dass der Strom aus industriellen gasbetriebenen KWK-Anlagen eine günstigere CO_2-Intensität hat als zugekaufter Strom. Obwohl beide Effekte natürlich durch den Einsatz von KWK in der Industrie zu realisieren sind, findet sich der Effekt aus dem Wechsel des Brennstoffs im Energieerzeugungssektor, wohingegen die Erhöhung der Effizienz dem Industriesektor zugerechnet wurde.

Carbon Capture and Storage

Aus der Nutzung von *Carbon Capture and Storage*-Technologie könnten in der Stahl-, in der Zement- sowie in der Chemischen Industrie vor allem langfristig erhebliche Vermeidungspotenziale entstehen (2020: 2 Mt CO_2e; 2030: 38 Mt CO_2e). CCS in der Industrie könnte theoretisch bei solchen Prozessen angewendet werden, in denen größere Mengen an CO_2 als Prozessemissionen entstehen, also in der Stahlindustrie am Hochofen, in der Zementindustrie im Rahmen der Klinkerproduktion und in der Chemischen Industrie bei der Ammoniaksynthese. Ob und in welchem Umfang CCS-Technologien in der Industrie zum Einsatz kommen können, ist allerdings mit erheblicher technologischer und ökonomischer Unsicherheit behaftet. Zudem sind insbesondere Transport und Speicherung von CO_2 derzeit öffentlich nicht im notwendigen Umfang akzeptiert[30]. Die Kostenberechnung basiert auf einer Studie von

30 Vgl. auch unten Seite 50.

Ecofys[31], die im Bereich der Chemischen Industrie auf Basis von Industrieinterviews ergänzt wurde. Bei der Berechnung der Kosten wurden die drei Prozessschritte der CCS-Technologie getrennt voneinander bewertet, also die Isolierung, der Transport und die Speicherung des CO_2. Den größten Kostenblock stellen die Kosten zur Abtrennung und Komprimierung des CO_2 dar, die mit 30 bis 35 EUR/t CO_2e abgeschätzt wurden. Selbst wenn reines CO_2 entsteht, wie z.B. bei der Ammoniaksynthese, liegen die Kosten dieses Prozessschritts in derselben Größenordnung, da durch geringe Volumen negative Skaleneffekte die Kosten erhöhen[32]. Die Kosten für Transport und Speicherung sind für die verschiedenen Sektoren mit ca. 10 EUR/t CO_2e konstant angenommen. Diese Kosten basieren auf einem Szenario, in dem eine Pipelineinfrastruktur mit hoher Auslastung besteht, an die sich die einzelnen Anwender ankoppeln können.

Branchenspezifische Potenziale

Zusätzlich zu den Potenzialen aus den Querschnittsthemen[33] finden sich 2020 in den einzelnen Industrien 25 Einzelmaßnahmen mit einem Gesamtpotenzial von 19 Mt CO_2e (2030: 24 Mt CO_2e).

- In der *Chemischen Industrie* besteht über industriespezifische Einzelmaßnahmen im Jahr 2020 ein Potenzial in Höhe von maximal 9 Mt CO_2e (2030: 12 Mt CO_2e) gegenüber der „Stand der Technik"-Projektion. Ein Großteil dieses Potenzials resultiert aus der weiter gehenden Zersetzung von Lachgas aus der Adipin- und Salpetersäureproduktion; die Vermeidungskosten liegen hier unterhalb von 10 EUR/t CO_2e. Darüber hinaus existiert ein wirtschaftliches Potenzial aus der Optimierung von Katalysatoren und der Intensivierung von Prozessen.

- In der *Stahlindustrie* besteht im Jahr 2020 ein zusätzliches Potenzial in Höhe von maximal 3 Mt CO_2e (2030: 3 Mt CO_2e). Die Potenziale wurden ohne Berücksichtigung weiterer Luftreinhaltungsmaßgaben berechnet. Die Ausdehnung der Produktion durch Aufbau weiterer Elektrolichtbogen-Anlagen sowie eine Verkürzung der Tap-to-Tap-Zeiten im Elektrolichtbogen-Verfahren bergen ein Potenzial von 2 Mt CO_2e zu Kosten von unter 10 EUR/t CO_2e. Zu Kosten von mehr als 150 EUR/t CO_2e bestehen Potenziale von 1 Mt CO_2e aus Energieeffizienzverbesserungen durch umfassende Ausweitung von endabmessungsnahem Gießen.

- Die *Zementindustrie* kann im Jahr 2020 maximal zusätzliche 2 Mt CO_2e Emissionen vermeiden (2030: 2 Mt CO_2e). Der größte Teil des Potenzials kann zu Kosten von 10 bis 20 EUR/t CO_2e durch Klinkersubstitution realisiert werden. Darüber hinaus besteht ein Potenzial in der Klinkerproduktion sowie aus Brennstoffsubstitution zu Kosten von mehr als 50 EUR/t CO_2e.

31 „Global Carbon Dioxide Storage Potential and Costs", Ecofys, 2004.

32 Die im Rahmen der Ecofys-Studie beschriebenen Kosten von 3 bis 4 EUR/t CO_2e für die Abtrennung und Komprimierung von CO_2 in der Ammoniaksynthese konnten im Rahmen von Industrieinterviews nicht bestätigt werden; sie liegen auch deutlich unter den Kosten, die im Rahmen dieser Studie in der Arbeitsgruppe Energie betrachtet wurden.

33 Für die energieintensiven Industrien wurde eine grobe Zuschlüsselung der Potenziale aus effizienteren Antriebssystemen sowie der Potenziale aus Steigerung der Energieeffizienz in Gebäuden auf Basis des Stromverbrauchs (Antriebssysteme) bzw. der Zahl der Beschäftigten (Gebäude) vorgenommen. Daraus ergibt sich im Einzelnen folgende Zuteilung: Chemische Industrie: 3,4 Mt CO_2e; Papierindustrie: 1,8 Mt CO_2e; Stahlindustrie: 1,3 Mt CO_2e; Mineralölindustrie: 0,6 Mt CO_2e; Zementindustrie: 0,4 Mt CO_2e; Nichteisen-Metalle: 0,2 Mt CO_2e. Die übrigen knapp 20 Mt CO_2e wurden nach gleichem Prinzip den weiteren, nicht explizit identifizierten Industrien zugeordnet.

- Im Jahr 2020 können Raffinerien der *Mineralölindustrie* zusätzlich maximal 3 Mt CO_2e Emissionen vermeiden (2030: 3 Mt CO_2e). Kostenberechnungen variieren je nach Anlagetyp. Im Durchschnitt ist etwa ein Viertel des Potenzials wirtschaftlich, die knappe Hälfte ist mit Vermeidungskosten um 10 EUR/t CO_2e verbunden, und der Rest kostet mehr als 50 EUR/t CO_2e. Mögliche Maßnahmen sind Effizienzverbesserungen an Öfen (< 1 Mt CO_2e), Erhöhung der Wärmeintegration (1 Mt CO_2e), intelligente Prozesssteuerungen (*Advanced Control*) sowie spezifische Modifizierungen der Prozessführung bez. von Anlagenkomponenten (zusammen ebenfalls ca. 1 Mt CO_2e).

- Die *Papierindustrie* hat im Jahr 2020 ein Vermeidungspotenzial von maximal 1 Mt CO_2e (2030: 2 Mt CO_2e). Insbesondere kann zu Kosten von 50 EUR/t CO_2e die Effizienz in der Papierproduktion verbessert werden, z.B. durch vermehrten Einsatz von Schuhpressen.

- In der *Nichteisen-Metall-Industrie* können im Jahr 2020 Potenziale in Höhe von maximal 1 Mt CO_2e erzielt werden (2030: 2 Mt CO_2e); zwei Drittel davon durch Effizienzverbesserungen in der Wärmebehandlung zu Kosten von weniger als 50 EUR/t CO_2e. Die Energieeffizienz in der Elektrolyse kann nur zu Kosten von deutlich über 50 EUR/t CO_2e systematisch verbessert werden.

- In den *weiteren Industrien* wurden über die Querschnittsfunktionen hinaus keine spezifischen Maßnahmen betrachtet.

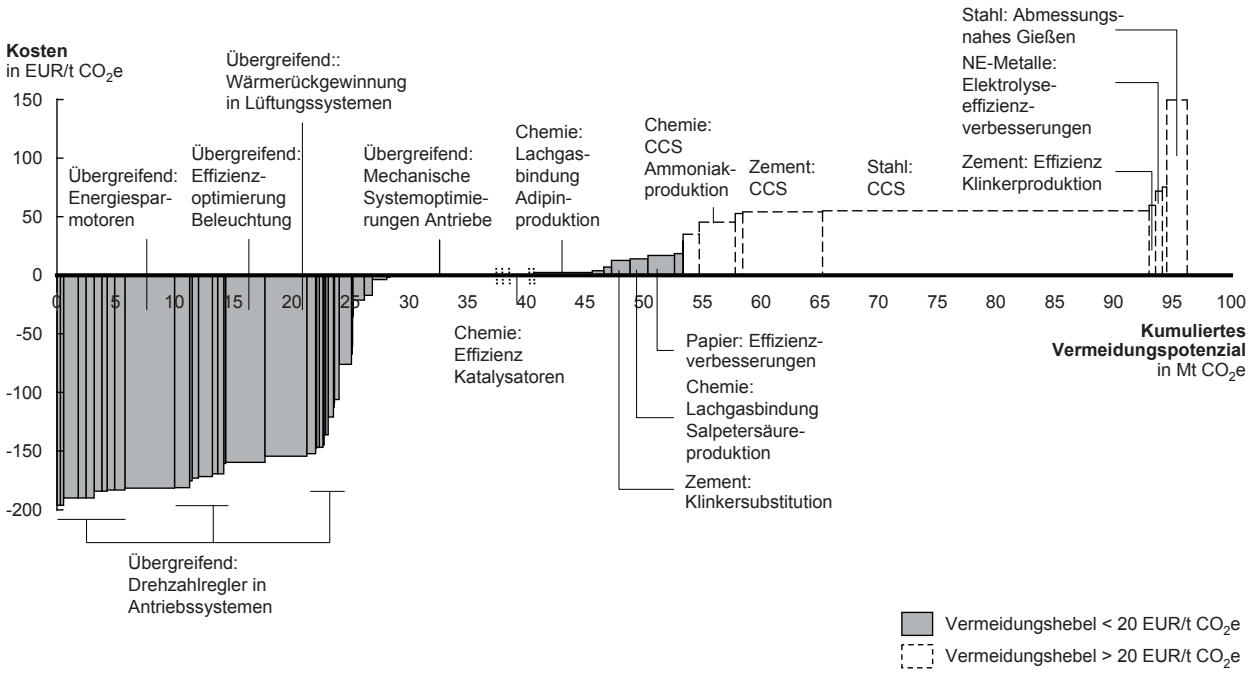
Weitere Entwicklung nach 2020 – Vermeidungspotenziale und -kosten 2030

Bis 2030 können die jährlichen Treibhausgasemissionen der Industrie in Deutschland gegenüber dem Niveau von 1990 durch weitere Umsetzung von Vermeidungshebeln mit Vermeidungskosten von bis zu 20 EUR/t CO_2e um insgesamt 22 Prozent gesenkt werden. Darin sind gegenüber 2020 12 Mt CO_2e zusätzliches Vermeidungspotenzial zu Kosten von maximal 20 EUR/t CO_2e enthalten. Diese 12 Mt CO_2e zusätzliches Vermeidungspotenzial bestehen hauptsächlich aus der Erhöhung der Durchdringungsraten von Maßnahmen, die bereits 2020 bewertet wurden. Darunter sind insbesondere die Potenziale aus den Querschnittsfunktionen der Effizienzsteigerungen in Gebäuden (zusätzliche 2 Mt CO_2e) und elektrischen Antrieben (zusätzliche 5 Mt CO_2e) zu nennen.

Die Einführung von Techniken zur Abscheidung und Speicherung von CO_2 (CCS) könnten die Emissionen zusätzlich um 38 Mt CO_2e (weitere 8 Prozentpunkte gegenüber 1990) verringern, sofern die technische Realisierung, rechtliche Absicherung und kommerzielle Verbreitung dieser Technologien gelängen und sie in der Öffentlichkeit Akzeptanz fänden. Dabei ist festzuhalten, dass heute noch keine Prototypen für industrielle CCS in Deutschland existieren. Nur wenn diese Umsetzungshürden überwunden werden können, würden sich überhaupt Potenziale im Industriesektor ergeben. Unter dem Vorbehalt dieser Einschränkungen wurden diese Potenziale für die Stahlindustrie (ca. 28 Mt CO_2e), die Zementindustrie (ca. 7 Mt CO_2e) und die Ammoniakproduktion der Chemischen Industrie (ca. 3 Mt CO_2e) berechnet. Allerdings entstehen bei der Einführung von CCS in der Industrie Vermeidungskosten von bis zu 55 EUR/t CO_2e. Eine Umsetzung dieser Maßnahmen würde zu einer Verzerrung der Wettbewerbsfähigkeit der betroffenen Industrien führen, sofern sie nicht im globalen Kontext erfolgt.

Industriesektor: Vermeidungskostenkurve – Deutschland 2030

ENTSCHEIDER-PERSPEKTIVE



Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Industrie

Schaubild 6

Darüber hinaus ist zu erwarten, dass in den Jahren bis 2030 weitere, neue und innovative Technologien auf den Markt kommen, die ebenfalls einen Beitrag zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen leisten können. Auf eine Abschätzung von Potenzialen aus solchen Technologien wurde jedoch bewusst verzichtet.

Voraussetzungen für die Umsetzung und Implikationen

Die Umsetzung der beschriebenen Vermeidungshebel zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen in Deutschland stellt Politik, Gesellschaft und Wirtschaft vor große Herausforderungen. Um die Umsetzung der beschriebenen Vermeidungshebel zu erreichen, müssen klare Rahmenbedingungen für die notwendigen Investitionen geschaffen werden. Darüber hinaus muss für jeden Industriezweig bedacht werden, wie sich die Umsetzung einzelner Vermeidungshebel bzw. deren Einbettung in politische Steuerungssysteme auf die jeweilige Wettbewerbsfähigkeit auswirkt. Schließlich müssen die Voraussetzungen für kritische neue Technologien geschaffen werden (insbesondere für CCS).

Transparente Rahmenbedingungen für Investitionen

Die beschriebenen Vermeidungshebel bedeuten für die Entscheider in allen Sektoren, dass über ohnehin anstehende Investitionen hinaus kurzfristig weitere Kosten entstehen – selbst wenn sich die zusätzlichen Investitionen über einen mittel- bis langfristigen Zeitraum rechnen. Umso mehr hängt die Bereitschaft, zusätzliche Investitionen zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen zu tätigen, für viele Entscheider davon ab, wie transparent und wie verlässlich die Renditeerwartungen für die jeweilige Investition sind.

Einige wesentliche Rahmenbedingungen wie Brennstoffpreise oder allgemeine Konjunkturentwicklungen entziehen sich dem Zugriff und können lediglich durch geeignete Risikostrategien abgefedert werden. Zwei zentrale Rahmenbedingungen sind hingegen beeinflussbar – ihre Ausgestaltung ist maßgeblich dafür, ob die notwendigen Investitionen tatsächlich zeitgleich mit der Bestandserneuerung getätigt werden.

- *Transparenz der Kosten für Treibhausgasemissionen:* Insbesondere für die energieintensiven Sektoren mit hohen Emissionen ist Klarheit über die entstehenden Kosten für Treibhausgasemissionen unerlässlich. Dies betrifft freie Allokationen ebenso wie die Möglichkeiten, CO_2-Zertifikate aus anderen Regionen anrechnen zu lassen (z.B. CDM-Projekte).

- *Abgleich von Investitionsanreizen mit den Investitionskriterien der Entscheider:* Anreizprogramme zur Unterstützung der Vermeidung von Treibhausgasemissionen müssen so angelegt sein, dass die Dauer der Förderung ebenso wie die Höhe der gezahlten Gelder mit den Investitionskriterien der Entscheider zusammenfallen. Laufzeiten von wenigen Jahren stellen für große Industrieanlagen nur einen geringen Investitionsanreiz dar.

Damit die Vermeidungshebel im hier beschriebenen Umfang umgesetzt werden können, ist es notwendig, dass die entsprechenden Investitionsentscheidungen rasch gefällt werden – auch wenn sie sich erst in einigen Jahren oder Jahrzehnten rechnen. Je schneller entsprechend verlässliche Rahmenbedingungen geschaffen werden, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass das mögliche Vermeidungspotenzial tatsächlich bis 2020 bzw. 2030 realisiert werden kann.

Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen

Die oben beschriebenen Vermeidungshebel können zu den angeführten Vermeidungskosten nur dann ohne Beeinträchtigung von Wohlstand und Wirtschaftswachstum in Deutschland umgesetzt werden, wenn die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie im internationalen Vergleich nicht beeinträchtigt wird[34].

Sollte es gelingen, für die Reduzierung von Treibhausgasen einen globalen Rahmen zu schaffen, innerhalb dessen für Emissionen weltweit die gleichen Kosten anfallen, würde sich die Beeinträchtigung der Wettbewerbsfähigkeit auf die Details der nationalen Umsetzung beschränken. So sind beispielsweise innerhalb des europäischen Emissionshandelssystems EU ETS die Beeinträchtigungen einzelner Industrien bzw. Unternehmen nicht abhängig vom CO_2-Preis, sondern werden durch die Ausgestaltung der nationalen Allokationspläne bestimmt[35].

Solange allerdings die Reduzierung von Treibhausgasen nicht in globalem Rahmen vorangetrieben wird, entstehen deutliche Wettbewerbsverzerrungen. Insgesamt hat eine Untersuchung für die Europäische Kommission ergeben, dass es selbst bei einer weitgehend freien Allokation (90 bis 95 Prozent) von Emissionszertifikaten bereits bei einem CO_2-Preis von rund 20 bis 25 EUR/t CO_2e zu einer deutlichen Beeinflussung der Wettbewerbsfähigkeit kommt[36]. Maßnahmen mit höheren Vermeidungskosten sind deshalb außerhalb von Sektoren, in denen sie umgelegt werden können (wie in manchen Bereichen der Gebäudewirtschaft), nur in einem entsprechenden globalen oder zumindest überregionalen Kontext umsetzbar[37]. Dabei sind die konkreten Auswirkungen für einzelne Industrien unterschiedlich zu beurteilen:

- *Industrien mit hohen prozessbedingten Emissionen* (z.B. Zement oder Stahl) sind auch nach Erreichen von Benchmarkniveau bei der CO_2-Effizienz ihrer Prozesse davon abhängig, für die verbleibenden Emissionen nicht belastet zu werden. Bereits bei einem Preis von 20 EUR/t CO_2e wären in logistisch leicht zugänglichen Regionen Europas weitgehend freie Allokationen erforderlich, um die Wettbewerbsfähigkeit der betroffenen Industrien im internationalen Vergleich zu erhalten. Bei Einführung weiter gehender bzw. sogar voller Auktionierung im Rahmen des Emissionshandels bis 2020 wären diese Industrien dagegen gegenüber internationalen Wettbewerbern nicht mehr kompetitiv. Bei einem Preisniveau von bis zu 55 EUR/t CO_2e wäre die Einführung von CCS für die Prozessemissionen dieser Industrien daher im europäischen Alleingang nicht tragbar, sondern könnte nur im Rahmen eines globalen Systems realisiert werden.

- *Industrien mit hohen indirekten Emissionen* (z.B. Aluminium sowie andere Nicht-eisen-Metalle) sind in ihrer Wettbewerbsfähigkeit abhängig vom günstigen Zugang zu Rohstoffen und Energie. Bei Annahme einer Strompreissteigerung um 10 EUR/MWh (entsprechend einem CO_2-Preis von 20 EUR/t CO_2e) steigen die Kos-

34 Neben den Vermeidungskosten für Treibhausgase beeinflusst eine Vielzahl weiterer Faktoren die Wettbewerbsfähigkeit einzelner Industrien. Die folgenden Ausführungen sind daher ceteris paribus zu verstehen.
35 Indirekte Kosteneffekte in Branchen mit signifikantem Stromverbrauch sind bei steigendem CO_2-Preis in keinem Allokationsszenario auszuschließen.
36 Vgl. „EU ETS Review. Report on International Competitiveness“, European Commission/McKinsey/Ecofys, Dezember 2006.
37 Dies gilt auch für den Transportsektor, wo international einheitliche Regularien zum Kraftstoffverbrauch einen wichtigen Beitrag zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen leisten könnten.

ten einer durchschnittlichen Aluminiumproduktion um mehr als 10 Prozent. Derartige Kostensteigerungen sind über den Konjunkturzyklus hinweg nicht tragbar, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass sie nachhaltig an die Verbraucher weitergegeben werden können. Die betroffenen Industrien sind daher in hohem Maße auf eine Stützung ihrer Wettbewerbsfähigkeit angewiesen, solange die Regelungen zur Treibhausgasvermeidung nicht in ein globales System eingebettet sind.

Der Einfluss der Treibhausgasvermeidung auf die Kostenstrukturen der verschiedenen Branchen im Jahr 2020 lässt sich vereinfachend anhand dreier Kostenkomponenten berechnen.

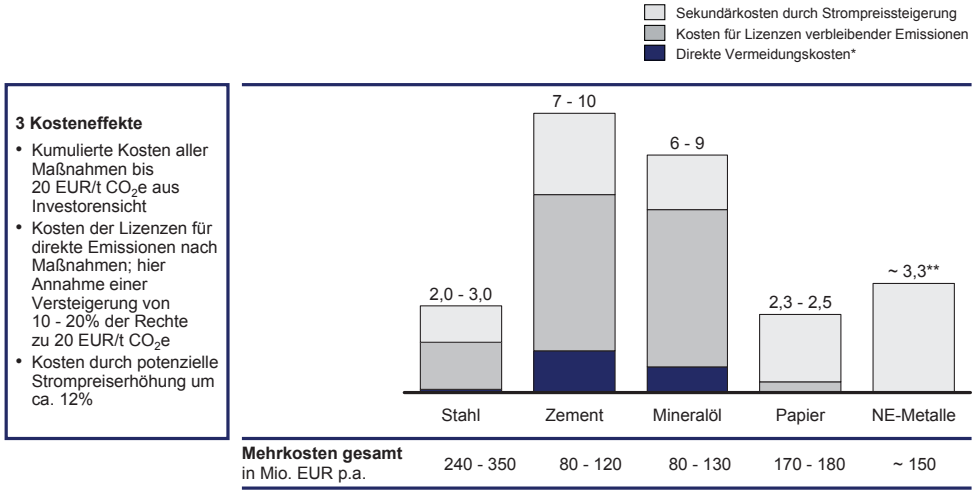
1. Kosten der umgesetzten Maßnahmen: In der Berechnung wird davon ausgegangen, dass alle Maßnahmen umgesetzt werden, deren Kosten pro vermiedener Tonne CO_2 geringer sind als der CO_2-Marktpreis. Die daraus entstehenden Kosten werden als „Direkte Vermeidungskosten“ bezeichnet. Negative Kosten werden als neutral behandelt und nicht saldiert.

2. Kosten verbleibender Emissionen: Die nach Umsetzung aller Maßnahmen verbleibenden direkten Emissionen sind zum Teil zu Marktpreisen der Emissionslizenzen im EU ETS zu begleichen. Der Umfang dieser Kosten hängt vom Anteil der versteigerten Lizenzen ab; in der Rechnung wurden beispielhaft 10 bis 20 Prozent Versteigerungsanteil unterstellt. Als Preisszenario wurden 20 EUR/t CO_2e zu Grunde gelegt.

3. Anstieg Strompreise: Der Lizenzpreis wirkt sich darüber hinaus indirekt durch einen Anstieg der Strompreise aus. So ist bei einem Emissionslizenzpreis von 20 EUR/t CO_2e eine Strompreissteigerung von etwa 10 EUR/MWh (Großhandelspreis) anzunehmen, die sich in den Energiekosten niederschlägt.

Industriesektor: Wettbewerbsrelevante Kostenerhöhungen durch Emissionsvermeidung, Emissionslizenzen und Strompreise

in Prozent der Produktionskosten, Deutschland 2020



* Nur positive Vermeidungskosten, d.h. ohne Berücksichtigung der Einsparungen aus wirtschaftlichen Maßnahmen
** Gerechnet für gesamte NE-Metallproduktion (primär und sekundär, exkl. Halbzeug) auf Basis von Produktionskosten je Tonne Aluminium; deutlich höhere Kostensteigerung fällt an, falls für Aluminiumproduktion isoliert berechnet; keine Kosten für Lizenzen, da NE-Metallindustrie nicht in ETS geführt

Quelle: EU ETS Competitiveness Review, Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“

Schaubild 7

In Schaubild 7 sind die Kostensteigerungen als Anteile der Gesamtkosten dargestellt. Es zeigt sich beispielsweise, dass in der Stahlindustrie die Produktionskosten im angenommenen Szenario mit einem CO_2-Preis von 20 EUR/t CO_2e zwischen 2 und 3 Prozent steigen können, in der Zementindustrie sogar in der Größenordnung von 7 bis 10 Prozent.

Die höchste absolute Kostensteigerung im angenommenen Szenario von 20 EUR/t CO_2e würde mit 530 bis 600 Millionen EUR in der Chemischen Industrie anfallen. Die berechneten Kosten verteilen sich allerdings innerhalb der Chemischen Industrie auf Grund der Heterogenität der Produkte höchst ungleich, eine durchschnittliche Mehrkostenberechnung ist von daher nur sehr begrenzt aussagekräftig. Einzelne Geschäftsbereiche der Chemischen Industrie würden in dem dargestellten Szenario in jedem Fall starke Kostensteigerungen erwarten. So würden die Kosten der Chloralkali-Elektrolyse erheblich mit einem erhöhten Strompreis steigen. Damit stiegen die Produktionskosten von Grundstoffen wie Chlor und Natronlauge, die zum Teil in Folgeprodukten wie PVC eingesetzt werden.

Exemplarisch lässt sich die Rechnung am Beispiel Stahl illustrieren. Die direkten Kosten der Treibhausgasvermeidung in der Stahlindustrie durch untersuchte Maßnahmen zu Kosten von weniger als 20 EUR/t CO_2e (bzw. aller untersuchten Maßnahmen) summieren sich auf jährlich 10 Millionen EUR im Jahr 2020; bei Berücksichtigung aller untersuchten Maßnahmen ergeben sich jährlich 270 Millionen EUR im Jahr 2020[38]. Dazu kämen die Kosten der verbleibenden Treibhausgasemissionen. In einem Handelssystem mit einer angenommenen Versteigerung von beispielsweise 10 bis 20 Prozent der Emissionsrechte würden bei einem CO_2-Preis von 20 EUR/t CO_2e Zusatzkosten von 110 bis 220 Millionen EUR anfallen; bei einem Preis von 50 EUR/t CO_2e wären es 260 bis 520 Millionen EUR. Dabei wird zunächst ein inelastisches Marktverhalten unterstellt. Zusätzlich würde die Stahlindustrie durch eine Verteuerung des Stroms belastet werden. In Summe könnte der Strompreis bei einem Preis von 20 EUR/t CO_2e zu weiteren Mehrkosten von rund 120 Millionen EUR führen; bei einem Preis von 50 EUR/t CO_2e wären es 300 Millionen EUR. Insgesamt würde sich die Stahlproduktion in Deutschland bei einem CO_2-Preis von 20 EUR/t CO_2e um bis zu 10 EUR pro Tonne Stahl und bei einem CO_2-Preis von 50 EUR/t CO_2e um bis zu 20 EUR pro Tonne Stahl verteuern. Solche Kostenerhöhungen können in vielen Produktbereichen nicht an die Endkunden weitergegeben werden und verringern in jedem Fall die relative Wirtschaftlichkeit inländischer Unternehmen. Selbstverständlich ist diese Rechnung grob vereinfacht und lässt Folgeeffekte unberücksichtigt, wie z.B. Nachfrageelastizität auf der Abnehmer- oder der Emissionsseite. Dennoch ist der zu erwartende Effekt eindeutig: Die Kostenposition der deutschen Stahlindustrie – und in Folge auch der stahlverarbeitenden Industrien – wäre unter diesen Annahmen bei einem deutschen oder europäischen Alleingang auf Dauer nicht mehr wettbewerbsfähig.

38 Inklusive erster Anlagen mit CCS (1,4 Mt CO_2e mit Kosten von 78 EUR/t CO_2e) und abmessungsnahes Gießen (1,2 Mt CO_2e mit Kosten von 184 EUR/t CO_2e).

Voraussetzungen für neue Technologien

Der größte Teil der in der vorliegenden Studie bewerteten Vermeidungspotenziale lässt sich allein durch den Einsatz heute bereits bekannter und erprobter Technologien realisieren. Insbesondere nach 2020 werden jedoch aus jetziger Sicht einige Technologien relevant, die sich heute noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinden. Hierzu gehören im Industriesektor insbesondere die Technologien zur Abscheidung und Speicherung von CO_2 (*Carbon Capture and Storage* – CCS), die zwischen 2020 und 2030 einen erheblichen Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in Deutschland leisten. Dieser Beitrag wird nicht im erwarteten Umfang realisiert werden können, wenn nicht eine Reihe kritischer Voraussetzungen geschaffen wird. CCS-Technologien sind heute weltweit noch in einem frühen Entwicklungsstadium. In Deutschland sind mehrere Pilot- und Demonstrationsanlagen in der Planung bzw. im Bau. Bereits diese Anlagen stehen vor erheblichen Herausforderungen, vor allem hinsichtlich der rechtlichen Rahmenbedingungen und der öffentlichen Akzeptanz (z.B. fehlende gesetzliche Regelungen zum Transport von CO_2 bzw. zur langfristigen Speicherung). Bei Umsetzung der oben bewerteten Vermeidungshebel müssten im Jahr 2030 in Deutschland jährlich gut 100 Mt CO_2 nicht nur aufgefangen, sondern auch zu den geeigneten Speichern transportiert und dort dauerhaft fachgerecht aufbewahrt werden. Dies stellt hohe Anforderungen an die notwendigen Regelungssysteme und an den Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur, und aus heutiger Sicht ist noch unklar, ob alle Hürden bei der Umsetzung überwunden werden können. Neben den rechtlichen Rahmenbedingungen wird für den Erfolg der CCS-Technologien auch in hohem Maße entscheidend sein, wie schnell sie zu akzeptablen Kosten in industriellem Umfang einsetzbar sein werden. Eine gezielte Förderung der vielversprechendsten technologischen Ansätze kann hierzu einen wichtigen Beitrag leisten und steile Lernkurven für die neu zu entwickelnden Prozesse ermöglichen.

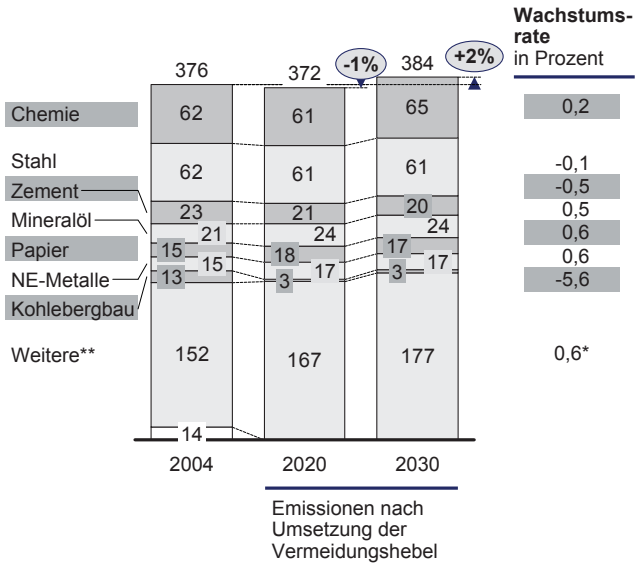
Implikationen: Emissionen nach Umsetzung der Maßnahmen

Bei erfolgreicher Überwindung der dargestellten Hürden sowie einer für die deutsche Industrie wettbewerbsneutralen Umsetzung aller Maßnahmen bis 20 EUR/t CO_2e ergibt sich im Jahr 2020 eine Senkung von 1 Prozent gegenüber 2004, bis 2030 ergibt sich ohne CCS eine leichte Steigerung der Emissionen um 2 Prozent[39].

39 Bei Berücksichtigung der Vermeidungsmaßnahmen im Energiesektor ergeben sich Emissionenim Jahr 2020 von 351 Mt CO_2e, was einer Senkung gegenüber 2004 um 7 Prozent entspricht (gegenüber Basisjahr 28 Prozent).

Industriesektor: Emissionen nach Umsetzung der Vermeidungshebel 20 EUR/t CO_2e – Deutschland 2004 - 2030*

in Mt CO_2e



* Hebel mit Vermeidungskosten bis zu 20 EUR/t CO_2e
** Inklusive Nahrungsmittelindustrie und Fahrzeugbau

Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland" von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz" – AG Industrie

Schaubild 8

Chancen für deutsche Unternehmen

Viele Hebel zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen beruhen auf Technologien, Produkten und Dienstleistungen, für die deutsche Unternehmen schon heute innovative Lösungen anbieten. Sowohl die Umsetzung dieser Vermeidungshebel in Deutschland als auch der Export der entsprechenden Technologien, Produkte und Dienstleistungen können sich auf Wirtschaft und Beschäftigung in Deutschland spürbar positiv auswirken. Allerdings werden diese Effekte nur dann in vollem Umfang eintreten, wenn negative Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen gleichzeitig verhindert werden können.

Die Umsetzung von Vermeidungshebeln bedeutet nicht nur eine Verringerung der Treibhausgasemissionen in Deutschland und – im Falle von vielen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz (z.B. im Gebäudebereich) – wirtschaftliche Vorteile für den Entscheider, sondern hat oft auch positive Auswirkungen auf Wirtschaft und Beschäftigung in Deutschland insgesamt. Zusätzliche Produkte ebenso wie zusätzliche Dienstleistungen können einen Beitrag zur Verbesserung der Konjunktur leisten.

In einer Reihe von Industrien, die technische Lösungen zum Klimaschutz beisteuern, gehören deutsche Unternehmen zu den Markt- und Technologieführern, etwa im Anlagenbau, in der Elektrotechnik, in der Chemie oder bei alternativen Energien. Wenn Deutschland als Vorreiter im Klimaschutz dazu beiträgt, die Entwicklung internationaler Märkte für deutsche Produkte voranzutreiben, können diese Unternehmen ihre globale Position in der Vermarktung von Produkten und Dienstleistungen zur Treibhausgasvermeidung festigen und ausbauen. Allerdings hängt die Bewertung von Exportpoten-

zialen naturgemäß stark von der Entwicklung der Energie- und Klimapolitik anderer Staaten ab.

Über die gesamte Bandbreite von Sektoren hinweg wird es voraussichtlich Branchen geben, die überproportional von der erwarteten Marktdynamik profitieren. Zu nennen sind hier:

- *Bauwirtschaft:* Besonders bei der Sanierung des Altbestands entstehen zusätzliche Umsätze durch die Installation effizienter Wärmedämmsysteme an Fassaden, Kellerdecken und im Dachbereich sowie durch den Einbau höherwertiger Fenster und Außentüren. Auch der Kraftwerksneu- und -rückbau sowie die Instandhaltung und der mögliche Ausbau der Verkehrsinfrastruktur bieten Chancen für die Bauwirtschaft.

- *Gebäudetechnik:* Der Einsatz effizienter Heizungs-, Lüftungs-, Klima-, Beleuchtungs- und Regelungstechnik ermöglicht den Technologielieferanten einen langfristigen Ausbau ihres Geschäfts. Auch Anbieter geeigneter IT-Systeme zur Steuerung solcher Technologien können hiervon profitieren.

- *Elektrotechnik:* Besseres Energiemanagement erfordert oft komplexere Mess- und Steuersysteme. Dies gilt sowohl für Gebäude als auch für Fahrzeuge und industrielle Anlagen. Die technischen Maßnahmen bei PKW und LKW beispielsweise setzen eine zunehmende Elektronisierung voraus, vor allem für die Motorsteuerung, für ein umfassendes Energiemanagement und für die verschiedenen Ausbaustufen der Hybridantriebe. Auch bei der Steigerung der Energieeffizienz bei Haushaltsgeräten und elektrischen Antrieben kommen Innovationen in der Elektrotechnik zum Einsatz.

- *Maschinen- und Anlagenbau:* Substanzielle Umstellungen in Energiegewinnung (vor allem ein höherer Anteil von Windenergie, Gas und Biokraftstoffen) und -transport (Netzerweiterungen) erfordern Investitionen in neue Anlagen in Höhe von mehreren Hundert Milliarden Euro. Dazu kommen Investitionen in die Optimierung von industriellen Prozessen.

- *Transportmittelhersteller und Zuliefererindustrie:* Für die Hersteller von Automobilen, Zügen und Flugzeugen sowie für die entsprechenden Zuliefererindustrien ergeben sich Innovationschancen, z.B. bei der Entwicklung innovativer Antriebssysteme, bei Weiterentwicklungen im Fahrzeugbau (z.B. Optimierung der Antriebssysteme und des Gesamtfahrzeugs, Leichtbau) oder im Verkehrsmanagement (z.B. Vernetzung von Fahrzeugen untereinander und von Fahrzeugen mit der Infrastruktur).

- *Chemische Industrie:* Chemische Produkte sind an vielen Lösungen zur Treibhausgasvermeidung signifikant beteiligt. Beispiele sind: Dämmmaterialien für Gebäude, neue organische Substanzen für sparsame Beleuchtung (OLEDs), Pflanzenbiotechnologie für effizientere Energiepflanzen, Enzyme für die Herstellung von Biokraftstoffen, organische Sensoren für hocheffiziente Photovoltaik, Nanotechnologie als Schlüsseltechnologie für viele Anwendungen im Energie- und Materialbereich, Materialien für Brennstoffzellen und andere Energiespeichersysteme, Katalysatoren für Prozess- und Emissionsoptimierungen oder Hochleistungspolymere für die Gewichtsreduzierung in Transportmitteln.

- *Nichteisen-Metalle:* Höhere Energieeffizienz in der Energieumwandlung und -verteilung sowie in den Sektoren Transport und Gebäude eröffnet einen wachsenden Markt für Nichteisen-Metalle. Beispielsweise leistet die hohe elektrische Leitfähigkeit von Kupfer einen essenziellen Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz von elektrischen Antrieben, das geringe spezifische Gewicht von Aluminium senkt den Kraftstoffverbrauch im Transportsektor und die hohe Wertbeständigkeit von Kupfer, Zink und Aluminium verlängert die Lebensdauer von energetisch sanierten Gebäuden. Der Werkstoff Zink erhöht darüber hinaus die Effizienz solarthermischer Anlagen.

- *Stahl:* Bei der Entwicklung von Produkten für den Endanwender trägt Stahl dazu bei, Energie, Rohstoffe und Emissionen einzusparen. Die verschiedenen Anforderungsbereiche an die Stahlwerkstoffe der Zukunft reichen von der Erhöhung der Temperatur- und Druckfestigkeit, z. B. zur Effizienzverbesserung in Kraftwerken, über die Anhebung der Dauer und Zeitstandfestigkeit bis zu Anforderungen an die Korrosions- und Verschleißbeständigkeit. Im Automobilbau sind durch die Anwendung von Tailored-Rolled-Produkten z. B. Verbindungsträger mit verbesserten Crash-Eigenschaften und Gewichtsreduzierungen im Vergleich zu herkömmlicher Bauweise möglich. Für elektrische Systeme wurden Stähle entwickelt, die die Effizienz steigern und Verluste minimieren, so z. B. bei der Stromverteilung mittels Überlandleitungen. Auch unter Gesundheits-, Sicherheits- und Umweltgesichtspunkten erfüllt der moderne Werkstoff Stahl immer wieder neue Anforderungen. Die Stahlverwender können von der hohen Innovationskraft der Stahlhersteller profitieren.

- *Entsorgungswirtschaft:* Bei insgesamt effizienter Organisation der unterliegenden Stoffflüsse kann durch eine Steigerung der Recyclingquote und der daraus resultierenden Erhöhung des Anteils der Sekundärrohstoffe in diversen Materialien in vielen Wirtschaftsbereichen eine Erhöhung der Energieeffizienz erreicht werden.

- *Land- und Forstwirtschaft:* Die deutsche Land- und Forstwirtschaft profitiert von der erhöhten Nachfrage nach Biomasse zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie zur Herstellung von Biokraftstoffen. Die in der vorliegenden Studie angenommene Nachfrage übersteigt das mögliche Angebot der deutschen Land- und Forstwirtschaft deutlich, selbst wenn Anbauflächen ausgeweitet werden. Bereits heute ist zu beobachten, wie eine erhöhte Nachfrage die Preise für Holz und landwirtschaftliche Produkte steigen lässt.

Die beschriebenen Chancen, die sich für deutsche Unternehmen aus der Umsetzung von Hebeln zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland und international ergeben können, sind hier lediglich beispielhaft aufgeführt. Im Einzelnen muss für jeden Vermeidungshebel betrachtet werden, welche deutschen Unternehmen durch welche Produkte und Dienstleistungen von den entsprechenden Entwicklungen profitieren können – bzw. welche zusätzlichen Voraussetzungen dafür geschaffen werden müssen.

Branchenperspektiven

Chemische Industrie

Die Treibhausgasemissionen in der Chemischen Industrie

Die Chemische Industrie verursachte im Jahr 2004 insgesamt Emissionen in Höhe von etwa 62 Mt CO_2e. 21 Mt CO_2e wurden als Prozessemissionen freigesetzt, 41 Mt CO_2e als direkte und indirekte Emissionen aus Nutzung von Energie. Emissionen aus der Stromerzeugung in industriellen Kraftwerken der Chemischen Industrie werden nicht hier, sondern in der Sektorperspektive Energie dargestellt. Der mit 39 Prozent größte Anteil der Prozessemissionen wurde in Form von Lachgas emittiert, das im Rahmen der Adipin- und Salpetersäureproduktion entsteht. Weitere 15 Prozent der Prozessemissionen wurden direkt als CO_2 im Rahmen der Ammoniaksynthese erzeugt[40].

Die energieseitigen Emissionen werden im Rahmen der Studie folgendermaßen aufgeteilt: Für den Stromverbrauch (rund 53 TWh) und Fremdwärmeeinsatz (rund 2 TWh) in der Chemischen Industrie werden 29 Mt CO_2e angesetzt, die bei der Erzeugung im durchschnittlichen Erzeugungsmix emittiert würden. Die verbleibenden 12 Mt CO_2e werden im Rahmen dieser Studie den direkt zur Wärmeerzeugung genutzten Primärenergieträgern zugeordnet[41].

Zu betonen ist hier, dass die Chemische Industrie zur eigenen Stromerzeugung überwiegend CO_2-effiziente Gaskraftwerke einsetzt. Diese leisten einen wichtigen Beitrag zu einer Verringerung der durchschnittlichen CO_2-Intensität der Stromerzeugung in Deutschland, die insgesamt durch den hohen Anteil von Stein- und Braunkohlekraftwerken im Verhältnis relativ hoch ist.

87 Prozent der energiebedingten Emissionen entstehen bei der Erzeugung von chemischen Grundstoffen, im Wesentlichen anorganische Grundstoffe, Petrochemikalien sowie Polymere. Weitere 11 Prozent stammen aus der Herstellung anderer chemischer Produkte wie Chemiefasern, Anstriche, Druckfarben und Schädlingsbekämpfungsmittel. 2 Prozent der Emissionen entstehen aus der Herstellung von Pharmazeutika und Kosmetika, die gemäß der in dieser Studie gebrauchten Definition der Chemischen Industrie zugerechnet werden.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Chemischen Industrie seit 1990

Von 1990 bis 2004 sind die Treibhausgasemissionen der Chemischen Industrie in Deutschland von 101 auf 62 Mt CO_2e zurückgegangen[42]. Im gleichen Zeitraum ist die Produktion der Chemischen Industrie in Deutschland um 2 Prozent pro Jahr gewachsen.

40 Von den 5,1 Mt CO_2e, die im Rahmen der Ammoniaksynthese entstanden sind, wurden 2004 bereits 2 Mt CO_2e abgetrennt und in der Harnstoffsynthese genutzt. Tatsächlich emittiert wurden somit nur 3,1 Mt CO_2e.

41 Die Emissionen aus den direkt genutzten Primärenergien wurden dabei um den Anteil Emissionen, die zur eigenen Stromerzeugung eingesetzt wurden, korrigiert. Emissionen aus industrieller Stromerzeugung wurden dem Energiesektor zugeordnet. Bei Einbeziehung der Eigenproduktion wären die tatsächlichen CO_2-Emissionen aus dem Stromverbrauch der Chemischen Industrie geringer.

42 Die berichteten Emissionen der Chemischen Industrie wurden um 8 Mt CO_2e aus stofflicher Nutzung von Erdgas, 3,6 Mt CO_2e aus Korrektur der Produktionsmenge von Salpetersäure sowie 2 Mt CO_2e aus stofflicher Verwertung von CO_2 aus der Ammoniaksynthese korrigiert. Diese 14 Mt CO_2e Emissionen werden 2004 als separater Posten unter „Weitere“ geführt.

Der Rückgang der Emissionen ist dabei vor allem auf den Umbau der ostdeutschen Industrie zurückzuführen, wobei durch verbesserte Produktionsanlagen – insbesondere durch effizientere Energienutzung – erhebliche Einsparungen erzielt wurden. Zudem wurden große Teile der ostdeutschen Produktion durch westeuropäische Produktion mit in der Regel geringeren spezifischen Energieverbräuchen ersetzt. Insbesondere bei energieintensiven Produkten wie z.B. Chlor/Natronlauge, synthetischem Kautschuk oder Farben brach die ostdeutsche Produktion nach der Wiedervereinigung erheblich ein und wurde durch westdeutsche Produktion ersetzt.

Industrieübergreifend reduzierte sich in den neuen Bundesländern der Anteil der Braunkohle als Brennstoff um fast 50 Prozent auf knapp 14 Prozent. Als Ersatz wurde überwiegend Gas verwendet. Auch dies trug in der Chemischen Industrie zur Reduzierung der Emissionen bei[43].

Neben der Umstrukturierung der ostdeutschen Produktion wurden seit 1990 in der Chemischen Industrie diverse Maßnahmen ergriffen, die dazu beigetragen haben, die Emissionen insgesamt zu senken. Beispielhaft zu erwähnen sind der Ausbau der Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung sowie der Einstieg in die Lachgaszersetzung.

Zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Chemischen Industrie mit heutigem Stand der Technik

Basierend auf den Emissionen aus dem Jahr 2004 wurde eine „Stand der Technik"-Projektion für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen bis 2030 berechnet.

Für die „Stand der Technik"-Projektion ergeben sich im Jahr 2020 Emissionen von 72 Mt CO_2e, im Jahr 2030 von 79 Mt CO_2e. Das entspricht einem Anstieg der Emissionen gegenüber 2004 um 27 Prozent oder 0,9 Prozent pro Jahr bis 2030. Während die Prozessemissionen auf nahezu gleichem Stand bleiben, wachsen die energieseitigen Emissionen um 37 Prozent bzw. 1,3 Prozent pro Jahr. Der Stromverbrauch der Chemischen Industrie im Jahr 2020 steigt in der „Stand der Technik"-Projektion von 53 TWh im Jahr 2004 auf 58 TWh im Jahr 2020, bzw. 64 TWh im Jahr 2030, eine Zunahme um ca. 0,7 Prozent pro Jahr. Die Emissionen aus dem Stromverbrauch steigen im gleichen Zeitraum von 29 Mt CO_2e im Jahr 2004 um ca. 1 Prozent pro Jahr auf 34 Mt CO_2e im Jahr 2020 bzw. 37 Mt CO_2e im Jahr 2030. 4 Mt CO_2e dieses Anstiegs resultieren aus der Erhöhung der CO_2-Intensität der zentralen Stromerzeugung.

Ausgangsbasis für die Berechnung der „Stand der Technik"-Projektion ist das erwartete Produktionswachstum der Chemischen Industrie von 1,8 Prozent pro Jahr. Das Wachstum der Emissionen bleibt in der „Stand der Technik"-Projektion mit 0,8 Prozent pro Jahr deutlich hinter dem Produktionswachstum zurück; die spezifischen Emissionen sinken somit um etwa 1,1 Prozent pro Jahr. Diese Verminderung ergibt sich zum größten Teil aus einer Verschiebung des Produktportfolios hin zu weniger energieintensiven Produkten; dazu kommen Skaleneffekte beim Produktionswachstum innerhalb eines Produktionskomplexes sowie einer Ausbreitung des technologischen Anlagenstandards des Jahres 2004 im Markt im Zuge regulärer Neuinvestitionen oder Nachrüstungen. Im Speziellen wurde die „Stand der Technik"-Projektion für die energieseitigen Emissionen in drei Schritten berechnet.

43 Vgl. „Ursachen der CO_2-Entwicklung in Deutschland in den Jahren 1990-1995", DIW/Fraunhofer Institut, 1998.

- Die individuellen Wachstumsraten der Subsektoren der Chemischen Industrie wurden bis 2030 prognostiziert. Da das prognostizierte Wachstum insbesondere in den weniger energieintensiven Subsektoren besonders hoch ist, sinken die durchschnittlichen spezifischen Produktionsemissionen. Der Effekt der Verschiebung hin zu energieärmeren Produkten innerhalb des Segments der Grundstoffchemikalien wurde darüber hinaus mit 3 Mt CO_2e abgeschätzt.

- Für die Verbesserung der Energieeffizienz durch Skaleneffekte und die reguläre Modernisierung des Anlagenbestands auf den Stand der Technik 2004 wurden für die Subsektoren jeweils spezifische Annahmen getroffen.

- Durch eine weitere Effizienzsteigerung, z.B. in der Abhitzenutzung, wird bis 2030 eine Emissionsreduzierung um 1,2 Mt CO_2e erwartet. Gleichzeitig erhöhen sich die Emissionen aus dem verbrauchten Strom durch die Erhöhung der CO_2-Intensität der öffentlichen Stromversorger um 9 Prozent bzw. 1,5 Mt CO_2e gegenüber 2004.

Die Prozessemissionen wurden im Wesentlichen auf Basis der Wachstumsraten der zu Grunde liegenden Produktionsprozesse berechnet. Darüber hinaus wurde bei der Lachgasemission aus der Salpetersäureproduktion die Emissionsminderung aus Erfüllung der *Technischen Anleitung Luft* bis 2010 einbezogen, wodurch bereits ein Rückgang dieser Emissionen um 50 Prozent (3,8 Mt) gegenüber 2004 erreicht wird[44]. Darüber hinaus ist in der „Stand der Technik"-Projektion bereits eine Emissionsreduzierung aus der Effizienzsteigerung in der Nutzung von Abhitze in Höhe von 0,5 Mt CO_2e im Jahr 2030 berücksichtigt.

Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Chemischen Industrie

Die Chemische Industrie spielt als Produzent von treibhausgasvermeidenden Lösungen eine signifikante Rolle bei der Reduzierung von Emissionen in vielen Bereichen der Gesellschaft. Chemische Produkte sind an vielen Lösungen zur Treibhausgasvermeidung maßgeblich beteiligt. Beispiele sind Dämmmaterialien für Gebäude, Enzyme für die Herstellung von Biokraftstoffen, Materialien für Energiespeichersysteme, Katalysatoren für Prozess- und Emissionsoptimierungen oder Hochleistungspolymere für die Gewichtsreduzierung in Transportmitteln. Die Bewertung des Potenzials aus diesen Maßnahmen findet implizit in den jeweiligen Sektoren statt und kann insofern nicht der Chemischen Industrie „gutgeschrieben" werden, auch wenn diese oftmals kritische Beiträge für die Umsetzung leistet. Gemäß der Logik der Emissionsberichterstattung liegt der Fokus dieses Berichts auf Maßnahmen der Produktion der Chemischen Industrie.

Insgesamt wurde im Jahr 2020 ein Reduzierungspotenzial bis 20 EUR/t CO_2e von 11 Mt CO_2e identifiziert (2030: 14 Mt CO_2e). Zu Kosten zwischen 20 und 50 EUR/t CO_2e besteht im Jahr 2020 darüber hinaus ein Potenzial von 1 Mt CO_2e (2030: 4 Mt CO2e) Im Jahr 2020 resultiert ein Potenzial von 9 Mt CO_2e aus industriespezifischen Maßnahmen; 3 Mt CO_2e kommen aus Querschnittsthemen. Dies entspricht einer Reduzierung um 17 Prozent gegenüber der „Stand der Technik"-Projektion 2020 und einer Reduzierung um etwa 4 Prozent gegenüber den Emissionen im Jahr 2004.

44 Die Adipinsäurehersteller haben sich mit einer Selbstverpflichtung auch zu einer weiteren Reduzierung der Lachgasemissionen aus der Adipinsäureproduktion verpflichtet, die noch nicht in die „Stand der Technik"-Projektion eingerechnet ist.

Ein großer Anteil des Reduzierungspotenzials 2020/2030 kommt aus der Zersetzung von Lachgas aus der Adipin- bzw. Salpetersäureproduktion. Im Jahr 2030 stammen weitere 20 Prozent aus CCS in der Ammoniaksynthese, die, wie einleitend dargestellt, erst realisierbar werden, wenn die notwendige Infrastruktur für CCS geschaffen ist. Ein großer Teil des Potenzials der Chemischen Industrie kann somit durch die Adressierung von drei Prozessen in einer begrenzten Anzahl von Produktionsanlagen realisiert werden.

Im Folgenden sind die Maßnahmen im Einzelnen beschrieben. Potenziale werden, soweit nicht anders angeführt, für 2020 dargestellt. Vermeidungskosten werden als durchschnittliche Entscheiderkosten angegeben[45]. In der Entscheiderperspektive sind üblicherweise Diskontraten von 9,5 Prozent zu Grunde gelegt; Abschreibungsfristen entsprechen nicht notwendigerweise den Lebenszyklen der Anlagen. Das Potenzial der Chemischen Industrie resultiert aus acht Maßnahmen, die sich zum Teil auf Prozessemissionen, zum Teil auf die energieseitigen Emissionen auswirken. Sieben der Maßnahmen haben Vermeidungskosten von bis zu 20 EUR/t CO_2e:

- *Lachgaszersetzung bei der Adipinsäureherstellung:* Lachgas ist auf Grund seines hohen CO_2-Äquivalentwerts Quelle eines beträchtlichen Teils der Prozessemissionen in der Chemischen Industrie. Bei der Adipinsäureherstellung lässt es sich nicht vermeiden, dass aus der Reaktion eine große Menge Lachgas als Nebenprodukt entsteht (ca. 300 kg pro Tonne Adipinsäure). Dieses Lachgas wird bereits größtenteils (je nach Anlage 85 bis 90 Prozent) in einem nachgelagerten Reaktionsschritt zersetzt. Durch diese Maßnahmen werden schon heute ca. 26 Mt CO_2e Emissionen vermieden. Durch eine zweite, parallel geschaltete Zersetzungseinheit kann der Zersetzungsgrad auf ca. 98 Prozent erhöht werden. Die zusätzliche Lachgaszersetzung entspricht einem Potenzial im Jahr 2020 von 4,6 Mt CO_2e. Das Potenzial kann deutlich vor 2020 gehoben werden, da die Technik bereits vorhanden ist. Die Vermeidungskosten betragen ca. 2 EUR/t CO_2e.

- *Lachgaszersetzung bei der Salpetersäureherstellung:* Salpetersäure ist mit einer Produktionsmenge von 2,3 Mt im Jahr 2004 eines der Hauptprodukte der Chemischen Industrie. Die Lachgasemissionen aus der Salpetersäureherstellung summierten sich im Jahr 2004 auf 12,6 kt N_2O (3,9 Mt CO_2e). Bis zum Inkrafttreten der *Technischen Anleitung Luft* Regelungen im Jahr 2010 wird dieser Wert auf ca. 3,4 Mt CO_2e gesenkt. Dies geschieht in der Regel durch den Einbau einer sekundären Zersetzungseinheit (Katalysatorschichtbett) in den eigentlichen Reaktionsreaktorraum. Als zusätzliche technische Maßnahme kann eine tertiäre Zersetzungseinheit in die Produktionseinheit eingebaut werden. Diese Zersetzungseinheit reduziert die N_2O-Emissionen (inklusive CO_2-Emissionen durch zusätzlichen Wärmebedarf zur Zersetzung) auf 6,8 Prozent des ursprünglichen Wertes. Die Höhe des Vermeidungspotenzials liegt somit bei 1,5 Mt CO_2e. Diese Maßnahme kann voraussichtlich bis 2020 zu Kosten von 14 EUR/t CO_2e vollständig eingeführt werden.

- *Katalysatoroptimierung:* Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung von Katalysatoren ist darüber hinaus eine weitere Verminderung der CO_2-Emissionen zu erwarten. Durch Anwendung einer jährlichen Verbesserungsrate von 0,1 Prozent pro

45 Gewichtete durchschnittliche Vermeidungskosten zum gegebenen Zeitpunkt, die der Entscheider im Zeitraum der Abschreibung aufbringen muss.

Jahr[46] auf die relevanten Prozesse wurde ein Einsparpotenzial von 1,2 Mt CO_2e im Jahr 2020 (2030: 2,1 Mt CO_2e) ermittelt. Die Optimierung der Katalysatoren erhöht die Prozessausbeute und vermindert somit die spezifischen Kosten der Produktion. Die Verminderung der Emission ist insofern wirtschaftlich und wird bereits ohne zusätzliche Anreizsysteme von der Industrie vorangetrieben.

- *Prozessintensivierung:* Die Chemische Industrie ist kontinuierlich darum bemüht, ihre Prozesse zu intensivieren. Die Investitionen, die in die Weiterentwicklung der Prozesse fließen, rechnen sich durch Einsparungen in den Herstellungskosten, so dass die Vermeidung von Emissionen wirtschaftlich ist. Es wurde abgeschätzt, dass durch diverse Maßnahmen eine durchschnittliche jährliche Verbesserung in der Chemische Industrie von 0,1 Prozent pro Jahr erreicht werden kann. Dabei ist zu beachten, dass die Verbesserung in Einzelverfahren deutlich höher ausfällt, spezielle Maßnahmen aber jeweils nur für einen relativ geringen Teil der Prozesse wirtschaftlich durchgeführt werden können. Somit ergibt sich für die Chemische Industrie bis 2020 ein Potenzial von 0,6 Mt CO_2e (2030: 1 Mt CO_2e).

- *Effizienzsteigerungen aus Antriebssystemen:* In der Chemischen Industrie werden im Jahr 2004 ca. 28 TWh durch Antriebssysteme verbraucht. Aus der verstärkten Nutzung von Frequenzumrichtern, der Nutzung von Motoren der höchsten Effizienzklassen sowie der mechanischen Systemoptimierung ergeben sich weitere Einsparpotenziale. In der Chemischen Industrie besteht bis 2020 ein wirtschaftliches Potenzial von 2,9 Mt CO_2e (2030: 3,6 Mt CO_2e) aus einer Effizienzsteigerung in Antriebssystemen[47]. Die Vermeidung der entsprechenden Emissionen zu den dargestellten wirtschaftlichen Bedingungen ist nur bei Realisierung im Rahmen der regulären Investitionszyklen nach Ablauf der Lebensdauer der entsprechenden Antriebssysteme möglich und wird zum Teil bereits ohne zusätzliche Anreizsysteme von der Industrie vorangetrieben.

- *Effizienzsteigerung in der Beleuchtung und Klimatisierung von Gebäuden:* Durch den Einsatz von Technologien zur Rückgewinnung von Wärme in Lüftungssystemen, die Optimierung der Nutzung von Heizungsanlagen durch Monitoring sowie durch die Nutzung von optimierten Beleuchtungssystemen können in der Chemischen Industrie ca. 0,3 Mt CO_2e (2020) eingespart werden.

- *Nutzung zusätzlicher Kraft-Wärme-Kopplungs-Potenziale:* In der Chemischen Industrie können 600 MW zusätzliche elektrische Leistung aus Kraft-Wärme-Kopplung installiert werden. Bei einer Laufzeit von 8.000 Stunden im Jahr könnten dadurch 4,8 TWh Strom produziert werden. Dieser Wert lässt sich im Zuge konkreter Anlagenmodernisierung zur Erhöhung der Stromkennzahl bis 2030 erreichen. Aus der Erzeugung von Strom aus industriellen KWK-Anlagen ergibt sich aus dem höheren Wirkungsgrad der Energieerzeugung in der KWK-Anlage eine Verminderung der CO_2e-Emissionen um 0,4 Mt CO_2e zu Kosten von 20 EUR/t CO_2e. Neben der Verminderung der Emissionen durch den erhöhten Wirkungsgrad der KWK-Anlagen gegenüber der isolierten Erzeugung von Wärme und Strom ergibt sich eine erhebliche rechnerische Verminderung von 2 Mt CO_2 daraus, dass der Strom aus industriellen gasbetriebenen KWK-Anlagen eine günstigere CO_2-Intensität hat als

46 Entspricht der Entwicklung der letzten zehn Jahre.
47 Hierbei werden für die Chemische Industrie Strompreise in der Größenordnung von 7 ct/kWh unterstellt.

zugekaufter Strom. Obwohl beide Effekte durch den Einsatz von KWK in der Industrie zu realisieren sind, findet sich der Effekt aus dem Wechsel des Brennstoffs im Energieerzeugungssektor, wohingegen die Erhöhung der Effizienz dem Industriesektor zugerechnet wird.

Zu Kosten von mehr als 20 EUR/t CO_2e besteht in der Chemischen Industrie darüber hinaus ein Potenzial von rund 1 Mt CO_2e im Jahr 2020 (2030: 4 Mt CO_2e):

- *Brennstoffsubstitution:* Die Chemische Industrie setzt bereits heute zur Erzeugung von Primärenergie überwiegend auf die Nutzung von Erdgas. Ein weiteres CO_2-Vermeidungspotenzial ergibt sich, wenn man den noch verbliebenen Verbrauch von Kohle und Öl durch Erdgas ersetzt. Insgesamt ist bis 2020 eine Einsparung von 0,8 Mt CO_2e möglich (2030: 1,4 Mt CO_2e). Die Kosten sind auf Grund der extremen technischen Varianz der Anlagen, in denen noch mit Kohle und Öl befeuert wird, sehr schwer abzuschätzen, dürften aber in der Größenordnung von 30 bis 40 EUR/t CO_2e liegen.

- *CSS von CO_2 bei der Ammoniakherstellung:* Im Rahmen der Ammoniaksynthese entsteht prozessbedingtes, hochkonzentriertes CO_2. Ein Teil des entstandenen Kohlendioxidgases wird stofflich genutzt, vor allem zur Synthese von Harnstoffen und weiteren Folgeprodukten und wird somit nicht direkt emittiert. Die verbleibenden Emissionen lagen im Jahr 2004 bei 3,1 Mt CO_2e. Das Potenzial aus der Nutzung der CCS-Technologie im Rahmen der Ammoniaksynthese liegt somit bei 3,1 Mt CO_2e (2030). Wie bereits einleitend geschildert, ist die Umsetzung der CCS-Technologie in der Chemischen Industrie abhängig von ihrer Umsetzung in der Energieindustrie. Diese hat die Aufgabe, die Technologie zu entwickeln und den Aufbau einer entsprechenden Infrastruktur voranzutreiben. Es ist von einer langen Anlaufphase für CCS in Deutschland auszugehen, so dass mit Potenzialen frühestens nach 2020 gerechnet werden kann. Die Kosten für die Vermeidung sind stark abhängig von den Rahmenbedingungen. Die hier dargestellten Kosten beruhen auf der Annahme eines bestehenden Pipelinenetzes, an das die entsprechenden Einheiten in der Chemischen Industrie angeschlossen werden könnten. Die Kosten pro vermiedene Tonne CO_2 wurden mit 45 EUR/t CO_2e abgeschätzt.

Wettbewerbseffekte aus der Umsetzung der Maßnahmen

Die direkten Kosten der Treibhausgasvermeidung in der Chemischen Industrie durch untersuchte Maßnahmen zu Kosten unter 20 EUR/t CO_2e summieren sich auf jährlich 30 Millionen EUR im Jahr 2020 auf. Dabei werden negative Vermeidungskosten als neutral behandelt und nicht mit positiven Vermeidungskosten saldiert. Bei Umsetzung aller untersuchten Maßnahmen wären die direkten Kosten der Treibhausgasvermeidung 60 Millionen EUR. Bei einer teilweisen Versteigerung von Emissionslizenzen kämen die Kosten der verbleibenden Treibhausgasemissionen dazu. In einem Handelssystem mit einer angenommenen Versteigerung von beispielsweise 10 bis 20 Prozent der Emissionsrechte würden bei einem CO_2-Preis von 20 EUR/t CO_2e Zusatzkosten von 70 bis 140 Millionen EUR anfallen; bei einem Preis von 50 EUR/t CO_2e wären es 170 bis 340 Millionen EUR. Dabei wird ein inelastisches Marktverhalten unterstellt, d.h., Effekte der Kosten von Lizenzen auf die Produktion werden hier im ersten Schritt nicht berücksichtigt. Zusätzlich würde die Chemische Industrie durch eine Verteuerung des Stroms belastet werden. Diese resultiert zum einen aus der direkten Verteuerung der

Erzeugung zum anderen aus den Kosten der verbleibenden Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung. Insgesamt könnte der Strompreis bei einem CO_2-Preis von 20 EUR/t CO_2e zu weiteren Mehrkosten von 430 Millionen EUR führen; bei einem CO_2-Preis von 50 EUR/t CO_2e zu weiteren Mehrkosten von 1.060 Millionen EUR. In Summe aller oben genannten Kosteneffekte würden bei einem CO_2-Preis von 20 EUR/t CO_2e zusätzliche Kosten von 530 bis 600 Millionen EUR in der Chemischen Industrie anfallen. Bei 50 EUR/t CO_2e wären es 1.300 bis 1.460 Millionen EUR.

Auf Grund der Heterogenität der Produkte in der Chemischen Industrie und der stark variierenden Wettbewerbseffekte von Treibhausgasvermeidung auf die verschiedenen Produkte wäre eine relative Mehrkostenberechnung auf Kostenbasis der gesamten Branche allerdings nur sehr begrenzt aussagekräftig. Einzelne Geschäftsbereiche der Chemischen Industrie würden aber starke Kostensteigerungen in dem erwähnten Szenario erwarten. So würden die Kosten der Chloralkali-Elektrolyse erheblich mit einem erhöhten Strompreis steigen. Damit stiegen die Produktionskosten von Grundstoffen wie Chlor und Natronlauge, die zum Teil in Folgeprodukten wie PVC eingesetzt werden.

Stahlindustrie

Die Treibhausgasemissionen in der Stahlindustrie

Die Stahlindustrie hat im Jahr 2004 etwa 61 Mt CO_2e emittiert, bei einer Produktionsmenge von 46 Mt Rohstahl. Etwas mehr als 85 Prozent dieser Emissionen gehen auf direkte Emissionen durch Eisenreduktion (Prozessemissionen) und Unterfeuerungsenergie zurück, weniger als 15 Prozent auf indirekte Emissionen aus Stromeinsatz. Dies erklärt sich weitgehend durch die Struktur der Erzeugungsverfahren.

Die Stahlproduktion in Deutschland wird von zwei Verfahren bestimmt. Die integrierte Route (auch *Blast Furnace/Blast Oxygen Furnace* – BF/BOF) liefert zwei Drittel der Produktionstonnage in Rohstahl. Hier entstehen relativ hohe Produktionsmengen je Standort. Die restliche Produktion entsteht durch das Elektrolichtbogenverfahren (*Electric Arc Furnace* – EAF), das an kleineren Standorten dominiert. Im EAF-Verfahren werden bevorzugt Betonstähle oder Edelbaustähle erzeugt.

Im BF-/BOF-Verfahren entstehen große Mengen an Prozessemissionen durch die Reduktion von oxydischem Erz im Hochofen mit Kohlenstoffträgern; die Erzeugung des Rohstahls erfordert zudem den Einsatz von Primärenergie und von Strom. Der Einsatz von Primärenergieträgern und Strom ist mit entsprechenden CO_2-Emissionen verbunden. Das EAF-Verfahren besteht in Deutschland hauptsächlich aus dem Einschmelzen von Schrott mittels Strom über Graphitelektroden. Alternativ kann auch DRI (*Direct Reduced Iron*) als Rohstoff im EAF-Verfahren eingesetzt werden. Allerdings entstehen beim Einsatz von DRI indirekte Emissionen aus der vorausgehenden DRI-Herstellung. Auch beim EAF-Verfahren wird zum Einschmelzen des Schrottes Primärenergie eingesetzt. Da im EAF-Verfahren lediglich Schrott eingeschmolzen und kein Erz reduziert wird, betragen die spezifischen Emissionen dieses Verfahrens insgesamt nur ein gutes Drittel der Emissionen des BF-/BOF-Verfahrens. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass nicht alle Produktqualitäten mit Hilfe *des EAF-Verfahrens auf Basis von Schrott erzeugt werden können*.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Stahlindustrie seit 1990

Die Emissionen der Stahlindustrie sind von 1990 bis 2004 von rund 72 auf etwa 61 Mt CO_2e pro Jahr (um 15 Prozent) gesunken, trotz einer um 0,2 Prozent pro Jahr gestiegenen Stahlerzeugung. Hintergründe hierfür sind die kontinuierliche Modernisierung der Anlagen zur Roheisen- und Stahlherstellung sowie zur Weiterverarbeitung, die Konzentration von Standorten, aber auch der Ersatz kleinerer Hochöfen durch EAF-Anlagen, verbunden mit dem Ausbau der Elektrostahlerzeugung um etwa 10 Prozentpunkte im betrachteten Zeitraum. Bei leicht gestiegener Gesamtstahlproduktion erfolgte somit gleichzeitig eine Reduktion der spezifischen und absoluten CO_2-Emissionen.

Zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Stahlindustrie mit heutigem Stand der Technik

Sollte sich die bestehende Technologie nicht ändern, wären quasi stabile Emissionen in der Stahlindustrie bis 2030 zu erwarten. Zusätzlich etwa 2 Mt CO_2e ließen die Gesamtemissionen auf jährlich 63 Mt CO_2e steigen. Dies geschieht auf Grund einer leicht ansteigenden Produktion um ca. 0,2 Prozent pro Jahr bei stabiler Technologie und stagnierenden spezifischen Emissionen. Die Langlebigkeit der heutigen Anlagen macht dabei den Effizienzeffekt aus Anlagenmodernisierung vernachlässigbar.

Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Stahlindustrie

Stahlspezifische Reduzierungsmaßnahmen und Maßnahmen aus Querschnittsfunktionen zu weniger als 20 EUR/t CO_2e (aus Entscheiderperspektive) können bis 2020 gegenüber der „Stand der Technik"- Projektion Reduzierungen in Höhe von 3 Mt CO_2e herbeiführen. Der Rest der Maßnahmen (2,5 Mt CO_2e) verlangt kostenintensivere Prozessänderungen zu mehr als 50 EUR/t CO_2e. Hierzu gehören unter anderem CCS mit entsprechend hohen technologischen und ökonomischen Realisierungsrisiken. Nach Umsetzung aller anderen Maßnahmen beträgt dieses Potenzial im Jahr 2030 maximal 28 Mt CO_2e aus Vermeidung von Hochofenemissionen.

Zu Kosten unter 20 EUR/t CO_2e kann die Stahlindustrie ihre spezifischen Emissionen um 0,2 Prozent pro Jahr in dem Zeitraum 2004 bis 2020 senken (0,1 Prozent Minderung von 2004 bis 2030). Unter Einberechnung aller Maßnahmen betragen diese Minderungsraten etwa 0,5 Prozent bis 2020 und 2,7 Prozent bis 2030[48].

Im Folgenden sind die Maßnahmen im Einzelnen beschrieben. Potenziale werden, soweit nicht anders angeführt, für 2020 dargestellt. Vermeidungskosten werden als durchschnittliche Entscheiderkosten angegeben[49]. In der Entscheiderperspektive sind üblicherweise Diskontraten von 9,5 Prozent zu Grunde gelegt; Abschreibungsfristen entsprechen nicht notwendigerweise den Lebenszyklen der Anlagen. Die ersten drei der folgenden Maßnahmen sind im Jahr 2020 zu weniger als 20 EUR/t CO_2e abbildbar.

48 Berechnet auf Basis der prognostizierten Produktionsmengen in Rohstahl und der zukünftigen Emissionen nach Maßnahmen.
49 Gewichtete durchschnittliche Vermeidungskosten zum gegebenen Zeitpunkt, die der Entscheider im Zeitraum der Abschreibung aufbringen muss.

- *Strukturwandel zu EAF:* Die erwartete Ausweitung der Produktion um knapp 2 Mt Rohstahl könnte potenziell ausschließlich durch EAF-Anlagen generiert werden. Entsprechend würde sich der Anteil der EAF-Anlagen an der Gesamtproduktion ausweiten und somit die spezifischen Emissionen senken. Für 2020 und 2030 kann auf diese Weise ein Vermeidungspotenzial von knapp 1 Mt CO_2e identifiziert werden. Dieser Hebel wird limitiert durch drei Faktoren:

  - Die derzeit existierenden BF-/BOF-Produktionsanlagen können nicht ohne Weiteres in EAF-Produktion umgewandelt werden, da sie weit vor dem Überschreiten ihrer Lebensdauer stehen und deutlich größere bzw. andere Anlagenstrukturen haben.

  - Die Verfügbarkeit von Stahlschrott am Weltmarkt verknappt zunehmend. Zusätzliche oder aus der BF-/BOF-Route umgewandelte EAF-Erzeugungskapazitäten laufen Gefahr, die benötigten Schrottmengen nicht beziehen zu können.

  - Es lassen sich durch EAF- und BF-/BOF-Route nicht die gleichen Produktqualitäten erstellen. Der hohe Anteil in Deutschland hergestellter hochwertiger Stähle ist der Grund für den heutigen hohen Anteil der BF-/BOF-Route am Erzeugungsmix.

  Für diesen Hebel fallen im Jahr 2020 Vermeidungskosten von ca. 10 EUR/t CO_2e an (2030: 7 EUR/t CO_2e). Diese enthalten nötige Investitionen von 145 EUR je Jahrestonne Produktion, die hier über 20 Jahre abgeschrieben werden; es ergeben sich umgerechnet Investitionskosten von 16 EUR/t CO_2e. Dem stehen saldierte Energiekostenersparnisse von 7 EUR/t CO_2e (36 EUR/t CO_2e zusätzliche Kosten aus Primärenergie abzüglich 44 EUR/t CO_2e ersparter Kosten aus Strom) gegenüber. Der Hochlauf der Potenziale ist an die prognostizierte absolute Produktionskapazitätssteigerung gekoppelt, da BF-/BOF-Produktionskapazität nicht durch EAF-Kapazität ersetzt werden kann.

- *Effizienzsteigerungen im Bereich EAF:* Die EAF-Produktion kann auf ein noch höheres durchschnittliches Effizienzniveau gehoben werden. Dabei ist eine Reihe von Effizienzmaßnahmen denkbar, um die *Tap-to-Tap*-Zeit zu verkürzen. Die größten Hebel sind ein vermehrter Einsatz von Primärenergie und die Schrottvorwärmung. Bei Ersteren wird der Stromeinsatz beim Einschmelzen des Schrottes durch den Einsatz von Sauerstoff-/Erdgasbrennern (Oxyfuel) verringert. Hierdurch wird im Nettoeffekt eine Emissionsminderung erreicht. Eine Schrottvorwärmung durch vorhandene Abgaswärme oder Primärenergieeinsatz reduziert ebenfalls den Stromeinsatz. Im Saldo aus Energieersparnis durch Prozessverkürzung und Energiemehreinsatz im Oxyfueling ergäbe sich eine Energieeffizienzverbesserung im Schmelzvorgang von ca. 15 bis 20 Prozent. Zum jetzigen Zeitpunkt gibt es jedoch aus technischen und emissionsrechtlichen Gründen keine in Deutschland genehmigungsfähige Einrichtung zur Schrottvorwärmung an einem EAF. Die Potenziale im Jahr 2020 summieren sich auf knapp 1 Mt CO_2e zu Kosten von ca. 2 EUR/t CO_2e (2030: -5 EUR/t CO_2e). Hierbei wurden nötige Investitionen in Höhe von insgesamt ca. 400 Millionen EUR angenommen, die über vier Jahre abgeschrieben werden. Die entsprechenden Kapitalkosten wurden mit der Energieersparnis saldiert.

- *Elektrische Antriebssysteme:* Die Effizienzverbesserungen elektrischer Antriebssysteme haben ein Reduzierungspotenzial von unter 1 Mt CO_2e in der Stahlindustrie. Ein signifikanter Teil des Stromeinsatzes in der Stahlindustrie entfällt auf die betroffenen Anwendungen (bis zu zwei Drittel des Stromeinsatzes laut der EU-Studie „SAVE II“[50]; deutlich niedrigere Anteile an vielen Standorten), der Rest des Stromeinsatzes fließt, abgesehen von EAF-Produktion, hauptsächlich in spezifische Anwendungen der Wärmebehandlung mit weitgehend optimierter Energieeffizienz. Industrieübergreifend betragen die Einsparungen durch Umsetzung dieses Hebels durchschnittlich 63 EUR/t CO_2e.

- *Wärme- und Energierückgewinnung:* Hochöfen, die noch nicht über eine Gichtgasentspannungsturbine verfügen, können unter bestimmten Voraussetzungen mit einer solchen Turbine ausgestattet werden. Auf diese Weise kann der in (fast allen) Hochöfen herrschende Überdruck durch gezielte Entspannung energetisch genutzt werden. Eine CO_2-Einsparung passiert damit indirekt im Bereich der Energieversorgungsunternehmen, deren Stromerzeugung um die gestiegene Eigenstromerzeugung am Hochofen zurückgeht. Das Potenzial für Gichtgasentspannungsturbinen betrifft etwa ein Drittel der Produktion, gerechnet in Tonnen Flüssigeisen. Das Potenzial umfasst bis zu 0,2 Mt CO_2e (entsprechend 0,3 TWh Strom) zu Kosten von 65 EUR/t CO_2e. Dem zu Grunde liegt die Annahme, dass Investitionen in Höhe von insgesamt 90 Millionen EUR getätigt werden müssen, die über vier Jahre abgeschrieben werden. Die beschriebene Maßnahme fällt unter industrielle Stromerzeugung und wurde somit in der Potenzialsummierung dem Energiesektor zugeordnet.

- *Prozessverkürzung durch endabmessungsnahes Gießen:* In beiden Routen, BF/BOF und EAF, können Energieeffizienzpotenziale durch Vermeidung von Abkühlen und Wiedererhitzen vor dem Warmwalzen identifiziert werden. Als Beispiel kann für den Bereich Flachprodukte der Einsatz der Dünnbrammen-Stranggießanlage statt einer konventionellen Stranggießanlage zum so genannten endabmessungsnahen Gießen genutzt werden. Diese Möglichkeit ist allerdings dadurch begrenzt, dass die Produktqualitätssicherheit in der konventionellen Anlage höher ist; gewisse Marktsegmente können daher nicht durch Dünnbrammenanlagen bedient werden. Bei diesen Anlagen besteht zusätzlich die Schwierigkeit einer verringerten Wirtschaftlichkeit bei kleinlosigem Produktionsportfolio.

  Das Potenzial wächst stetig bis auf insgesamt 1,2 Mt CO_2e im Jahr 2020 (2030: 1,7 Mt CO_2e). Es wird angenommen, dass zu diesem Zeitpunkt 20 Prozent der Produktionskapazität entsprechend umgerüstet sein könnten. Auf Grund dieser hohen Investition von angenommenen 230 EUR je Jahrestonne betroffener Produktionskapazität liegen die Vermeidungskosten jedoch auch bei einer Abschreibungsfrist von 20 Jahren bei bis zu 160 EUR/t CO_2e (2030: 150 EUR/t CO_2e).

- *CCS:* Abspaltung und Einlagerung von in Hochöfen entstehendem CO_2 könnte langfristig realisierbar sein, sofern die im industrieübergreifenden Teil dieses Berichts beschriebenen technischen und genehmigungsrechtlichen Hürden überwunden werden können. Potenziell relevant wäre CCS für Emissionen aus BF-/BOF-Anlagen jenseits einer kritischen Emissionsmenge je Standort; dieses Potenzial

50 „Improving the Penetration of Energy-Efficient Motors and Drives“, Europäische Kommission, 2000.

umfasst etwa 90 Prozent der Oxygen-Produktionskapazität. Es handelt sich hierbei nicht um den Bau komplett neuer Anlagen (wie sie z.B. im Rahmen von „Ulcos“ untersucht werden), sondern um Retrofit-Maßnahmen an bestehenden Anlagen. Etwa zwei Drittel der Gesamtemissionen in der BF-/BOF-Route entstehen im Hochofen und summieren sich entsprechend auf ein Vermeidungspotenzial von 28 Mt CO_2e im Jahr 2030; im Jahr 2020 könnten dagegen maximal Pilotprojekte installiert sein (ca. 1 Mt CO_2e). Aufbauend auf Berechnungen von Ecofys[51] würden sich die Vermeidungskosten auf ca. 57 EUR/t CO_2e belaufen – bei einer jährlichen Kostensenkung durch technischen Fortschritt von 1 Prozent. Dabei entfallen ca. drei Viertel der Kosten auf Abspaltung und Kompression. Grundsätzlich ist CCS in der Stahlindustrie mit deutlich höheren technologischen Unsicherheiten verbunden als CCS bei Kraftwerken.

Wettbewerbseffekte aus der Umsetzung der Maßnahmen

Die deutsche Stahlindustrie befindet sich im Wettbewerb mit der internationalen Stahlproduktion. Durch CO_2-Vermeidung potenziell entstehende Netto-Kostenerhöhungen, die sich nicht zeitgleich in vergleichbarer Höhe im internationalen Wettbewerb darstellen, resultieren in einem Wettbewerbsnachteil. Vor diesem Hintergrund ist das Investitionsverhalten der Industrie zu bewerten. Im Folgenden wird der Kosteneffekt beispielhaft berechnet.

Die direkten Kosten der Treibhausgasvermeidung in der Stahlindustrie durch untersuchte Maßnahmen zu Kosten unter 20 EUR/t CO_2e (bzw. aller untersuchten Maßnahmen[52]) summieren sich auf jährlich 10 Millionen EUR (bzw. 270 Millionen EUR) im Jahr 2020. Dabei werden negative Vermeidungskosten als neutral behandelt und nicht mit positiven Vermeidungskosten saldiert. Dazu kämen die Kosten der verbleibenden Treibhausgasemissionen. In einem Handelssystem mit einer angenommenen Versteigerung von beispielsweise 10 bis 20 Prozent der Emissionsrechte würden bei einem CO_2-Preis von 20 EUR/t CO_2e Zusatzkosten von 110 bis 220 Millionen EUR anfallen; bei einem Preis von 50 EUR/t CO_2e wären es 260 bis 520 Millionen EUR. Dabei wird zunächst ein inelastisches Marktverhalten unterstellt. Zusätzlich würde die Stahlindustrie durch eine Verteuerung des Stroms belastet werden. In Summe könnte der Strompreis bei einem Preis von 20 EUR/t CO_2e zu weiteren Mehrkosten von rund 120 Millionen EUR führen; bei einem Preis von 50 EUR/t CO_2e wären es 300 Millionen EUR. Insgesamt würde sich die Stahlproduktion in Deutschland bei einem CO_2-Preis von 20 EUR/t CO_2e um bis zu 10 EUR pro Tonne Stahl und bei einem CO_2-Preis von 50 EUR/t CO_2e um bis zu 20 EUR pro Tonne Stahl verteuern. Solche Kostenerhöhungen können in vielen Produktbereichen nicht an die Endkunden weitergegeben werden und verringern in jedem Fall die relative Wirtschaftlichkeit inländischer Unternehmen. Selbstverständlich ist diese Rechnung grob vereinfacht und lässt Folgeeffekte unberücksichtigt, wie z.B. Nachfrageelastizität auf der Abnehmer- oder der Emissionsseite. Dennoch ist der zu erwartende Effekt eindeutig: Die Kostenposition der deutschen Stahlindustrie – und in Folge auch der stahlverarbeitenden Industrien – wäre unter diesen Annahmen bei einem deutschen oder europäischen Alleingang auf Dauer nicht mehr wettbewerbsfähig.

51 „Global Carbon Dioxide Storage Potential and Costs“, Ecofys, 2004; Kosten für Vermeidung und Abspaltung wurden hier für verschiedene Industrien berechnet. Kostenberechnungen für die Industrie sind hier aber mit höherer Unsicherheit behaftet als bei Kraftwerken.

52 Inklusive erster Anlagen mit CCS und abmessungsnahem Gießen.

Die diskutierten Kostenerhöhungen können im europäischen Durchschnitt laut EU ETS Review[53] nur zu einem geringen Teil an den Endkunden weitergegeben werden. Die Kostenerhöhungen werden somit die Stahlerzeuger und die weiterverarbeitende Industrie treffen.

Neben dem Wettbewerb im Absatzmarkt ist, wie oben erwähnt, auch in der Stahlschrottbeschaffung der internationale Wettbewerb ein begrenzender Faktor. Steigende Schrottpreise und Volumenengpässe sind insbesondere das Ergebnis der Nachfrage durch Produzenten in Wachstumsmärkten.

Zementindustrie

Die Treibhausgasemissionen in der Zementindustrie

Im Jahr 2004 verursachte die Zementindustrie in Deutschland bei einer Produktionsmenge von 32 Mt Zement etwa 23 Mt CO_2e Emissionen. Etwa 90 Prozent dieser Emissionen sind direkte Emissionen. Davon wiederum entstehen zwei Drittel als Prozessemissionen in der Klinkerproduktion aus der Entsäuerung des Zementrohstoffs Kalkstein, also aus der Erzeugung des wichtigsten Einsatzstoffs in der Zementproduktion. Ein Drittel der direkten Emissionen entsteht durch Primärenergieeinsatz in den Drehöfen der Klinkerproduktion. Die verbleibenden 10 Prozent der Gesamtemissionen werden indirekt durch Stromeinsatz verursacht.

Der durchschnittliche Klinkeranteil im Zement beträgt in Deutschland 71 Prozent. Er ist damit im europäischen Vergleich relativ niedrig. Eine weitere Verminderung des Klinkeranteils ist einerseits begrenzt durch die Verfügbarkeit von Stoffen, die als sonstige Zementhauptbestandteile verwendet werden (z.B. Hüttensand), sowie andererseits durch die Auswirkungen des Klinkerersatzes auf die Zementeigenschaften. Die deutsche Zementindustrie hat in den vergangenen Jahren den durchschnittlichen Klinkeranteil von über 80 auf 71 Prozent reduziert. Eine deutliche weitere Verminderung ist auch durch die Nachfrage begrenzt.

Auch die Substitution fossiler Regelbrennstoffe durch Sekundärbrennstoffe hat in der Zementindustrie mit ca. 50 Prozent im europäischen Vergleich bereits ein sehr hohes Niveau erreicht. Langfristig verbleibt noch ein begrenztes Optimierungspotenzial. Allerdings sind hierbei auch technische Hemmnisse zu überwinden.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Zementindustrie seit 1990

Historisch sind die Emissionen der Zementproduktion seit 1990 von 38 Mt CO_2e auf 23 Mt CO_2e in 2004 gesunken, also um 18 Prozent. Die gesunkene Produktionsmenge (insgesamt 9 Prozent) ist dabei ein treibender Faktor. Darüberhinaus hat die bisherige Senkung des Klinkeranteils im Zement sowie die Optimierung des Primärenergieeinsatzes durch Neubau- und Modernisierungsmaßnahmen in der Klinkerproduktion und der Zementmahlung zur Reduktion beigetragen. Auch der Sekundärbrennstoffeinsatz, d.h. der Einsatz von Abfällen etc. als Brennstoff in Drehöfen, hat sich auf die CO_2-Bilanz der Öfen ausgewirkt.

53 Vgl. „EU ETS Review. Report on International Competitiveness“, European Commission/McKinsey/Ecofys, Dezember 2006.

Zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Zementindustrie mit heutigem Stand der Technik

In der „Stand der Technik"-Projektion ist eine geringe Senkung der Emissionen um 1 Mt CO_2e bis 2030 zu erwarten. Dabei wiegen sich ein erweiterter leichter Anstieg der Produktion um 6 Prozent auf 34 Mt Zement und verbesserte spezifische Emissionen durch zyklische Anlagenmodernisierung auf den Stand der Technik von 2004 in etwa auf. Diese Verbesserung in den spezifischen Emissionen ist vor allem zu erklären durch den Ersatz alter Klinkerproduktionsanlagen durch Anlagen mit verbesserter Klinkerproduktionseffizienz, z.B. durch Ersatz der verbliebenen Rostwärmeranlagen durch moderne Vorcalcinieranlagen.

Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Zementindustrie

In der Zementindustrie können im Jahr 2020 (inklusive CCS) insgesamt knapp 3 Mt CO_2e gegenüber der „Stand der Technik"-Projektion vermieden werden. Etwa die Hälfte davon besteht aus Maßnahmen zu weniger als 20 EUR/CO_2e. Insbesondere gesteigerte Klinkerproduktionseffizienz und Brennstoffsubstitution verlangen allerdings kostenintensivere Prozessänderungen, so dass hier Vermeidungskosten jenseits von 50 EUR/t CO_2e entstehen. Im Jahr 2030 geht der Großteil des Reduzierungspotenzials analog zur Stahlindustrie auf CCS zurück. Das Potenzial beträgt im Jahr 2020 weniger als 1 Mt CO_2e, im Jahr 2030 aber bis zu 7 Mt CO_2e[54]. Es ist hierbei festzuhalten, dass CCS für den Zementherstellungsprozess heute technisch noch nicht verfügbar ist und erhebliche Entwicklungsanstrengungen erforderlich wären.

Die Zementindustrie kann bei Durchführung der Maßnahmen bis 20 EUR/t CO_2e ihre historische Senkung (1995 bis 2004) in spezifischen Emissionen von 0,5 Prozent pro Jahr auf 1,4 Prozent (2004 bis 2020) verbessern[55]. Bei Durchführung aller Maßnahmen (inklusive CCS) kann diese Entwicklung weiter gesteigert werden auf eine jährliche Verbesserung der spezifischen Emissionen von über 2 Prozent von 2004 bis 2030[56].

Im Folgenden sind die Maßnahmen im Einzelnen beschrieben. Potenziale werden, soweit nicht anders angeführt, für 2020 angegeben. Kosten werden als durchschnittliche Entscheiderkosten angegeben[57]. In der Entscheiderperspektive sind üblicherweise Diskontraten von 9,5 Prozent zu Grunde gelegt, Abschreibungsfristen entsprechen nicht notwendigerweise den Lebenszyklen der Anlagen. Die ersten drei der folgenden Maßnahmen sind im Jahr 2020 zu weniger als 20 EUR/t CO_2e abbildbar.

- *Verringerung des Klinkeranteils im Zement von heute 71 Prozent auf 65 Prozent:* Es wird davon ausgegangen, dass der Einsatz von Klinker langfristig um weitere ca. 6 Prozentpunkte gesenkt werden kann, ohne die nachgefragte kritische Qualität des Zements zu unterschreiten. Substitute des Klinkers können verschiedene Stoffe sein, z.B. Puzzolan oder Flugasche. Realistisch ist jedoch in größerem Umfang nur der Einsatz von Hüttensand, weiterverarbeiteter Schlacke, aus der Stahlproduktion.

54 CCS-Potenzial aus Abspaltung des CO_2 aus der Klinkerproduktion nach Umsetzung aller anderen Maßnahmen.
55 Wachstumsraten hier als CAGR (Compound Annual Growth Rate) gerechnet, d.h. nicht als durchschnittliche Änderung im Sinne der prozentualen Gesamtänderung geteilt durch die Anzahl der Perioden.
56 Berechnet auf Basis der prognostizierten Produktionsmengen in Zement und der zukünftigen Emissionen nach Maßnahmen.
57 Gewichtete durchschnittliche Vermeidungskosten zum gegebenen Zeitpunkt, die der Entscheider im Zeitraum der Abschreibung aufbringen muss.

Hierzu ist allerdings eine Umstellung des Produktionsprozesses notwendig, inklusive der Installation von Mahlanlagen, Silos etc. Diese Maßnahme hat ein Potenzial von 1,1 Mt CO_2e im Jahr 2020 (2030: 1,6 Mt CO_2e) zu Vermeidungskosten von ca. 14 EUR/t CO_2e (2030: 13 EUR/t CO_2e), u.a. auf Grund der nötigen Investitionen in die Anlagenanpassungen.

- *Systematische Abwärmenutzung an größeren Ofenanlagen:* Ein geringes Potenzial kann noch durch Wiedernutzung von 4 Prozent ungenutzter Abwärme in etwa 30 Prozent der Klinkeranlagen (nach Produktionsvolumen) realisiert werden. Da diese Nutzung allerdings einen sehr geringen Wirkungsgrad in der Stromerzeugung mit sich bringt, verbleibt ein marginales, aber wirtschaftliches Residualpotenzial von 0,04 Mt (ab 2020, gleich bleibend im Jahr 2030) zu 12 EUR t/CO_2 Vermeidungskosten. Die beschriebene Maßnahme fällt unter industrielle Stromerzeugung und wurde somit in der Potenzialsummierung dem Energiesektor zugeordnet.

- *Elektrische Antriebssysteme:* Die Effizienzverbesserungen elektrischer Antriebssysteme haben ein zusätzliches geringes Reduzierungspotenzial in der Zementindustrie in der Größenordnung von 0,1 Mt CO_2e. Ein Großteil des Stromeinsatzes in der Zementindustrie entfällt laut der EU-Studie SAVE II[58] auf diese Anwendungen; davon allerdings besteht ein großer Anteil aus großen, in vielen Standorten spezifisch optimierten Komponenten. Die industrieübergreifend berechneten Einsparungen betragen durchschnittlich 63 EUR/t CO_2e in den Jahren 2020 und 2030.

- *Brennstoffsubstitution – Steigerung des Anteils der Sekundärbrennstoffe von 50 Prozent auf 60 Prozent:* In Drehrohröfen der Zementindustrie werden heute ca. 50 Prozent Sekundärbrennstoffe eingesetzt. Die Sekundärbrennstoffe sind zum Teil biogenen Ursprungs (z.B. Klärschlamm). Andere Sekundärbrennstoffe, wie z.B. aufbereitete Industrie- und Siedlungsabfälle, enthalten biogene Anteile oder auch eine geringere CO_2-Intensität im Vergleich zu fossilen Brennstoffen. Es wird davon ausgegangen, dass der Anteil der Sekundärbrennstoffe bis 2030 auf 60 Prozent angehoben werden kann, mit einer einhergehenden Reduzierung der Emissionen in Höhe von ca. 0,2 Mt CO_2e bis 2020 (2030: 0,4 Mt CO_2e). Dies impliziert Vermeidungskosten in Höhe von deutlich über 50 EUR/t CO_2e im Jahr 2020/2030, die eine hohe Anfangsinvestition in eine Anpassung der Öfen enthalten.

- *Effizienzverbesserung in der Klinkerproduktion um weitere 5 Prozent:* Durch zeitlich vorgezogene Modernisierung von Anlagenkomponenten in der Klinkerproduktion könnten Effizienzsteigerungen über das Maß der zyklischen Anlagenmodernisierung hinaus erzielt werden. Es ergäbe sich ein Vermeidungseffekt von 0,4 Mt CO_2e im Jahr 2020 (2030: 0,5 Mt CO_2e), zu Kosten von 56 EUR t/CO_2e (2030: 60 EUR t/CO_2e).

- *CCS:* Ähnlich wie in der Stahlindustrie birgt CCS auf lange Sicht das größte, technisch jedoch unsicherste Potenzial in Höhe von knapp 7 Mt CO_2e im Jahr 2030 (rechnerisch nach allen anderen Maßnahmen). Im Jahr 2020 könnte dabei maximal ein Teilpotenzial auf Pilotprojekt-Niveau erzielt werden (unter 1 Mt CO_2e). Das errechnete Potenzial für 2030 basiert auf der Annahme, dass 20 Prozent der Produktionskapazität mit Oxyfuel-Technologie neu installiert wird und dass in diesen Anlagen

58 Europäische Kommission, „Improving the Penetration of Energy-Efficient Motors and Drives“, 1998.

eine CO_2-Minderung von 80 Prozent erreicht wird. Weiter wird angenommen, dass 30 Prozent Reduzierung von CO_2-Emissionen in den verbleibenden 80 Prozent der Produktion aus alten Anlagen erreicht wird durch Retrofit von Abspaltungsanlagen für CO_2 (so genannte *Post-Combustion Technology*). Dieser Anteil von 30 Prozent betroffenem CO_2 berücksichtigt, dass ein großer Teil der bestehenden Anlagen deutlich abseits sonstiger industrieller Infrastruktur liegt und somit auch bis 2030 keinen Anschluss an ein CO_2-Pipelinenetz erlangen würde. Die Kosten für die Anwendung von CCS in der Zementindustrie sind heute noch mit einer sehr großen Unsicherheit behaftet. Aufbauend auf Berechnungen von Ecofys würden sich die Vermeidungskosten auf ca. 55 EUR/t CO_2e im Jahr 2020 (54 EUR/t CO_2e im Jahr 2030) belaufen. Dabei entfallen ca. drei Viertel der Kosten auf CO_2-Abscheidung und -kompression.

Wettbewerbseffekte aus der Umsetzung der Maßnahmen

Die direkten Kosten der Treibhausgasvermeidung in der Zementindustrie durch untersuchte Maßnahmen zu Kosten unter 20 EUR/t CO_2e summieren sich auf jährlich 15 Millionen EUR im Jahr 2020. Dabei werden negative Vermeidungskosten als neutral behandelt und nicht mit positiven Vermeidungskosten saldiert. Bei Umsetzung aller untersuchten Maßnahmen wären die direkten Kosten der Treibhausgasvermeidung 110 Millionen EUR. Bei einer teilweisen Versteigerung von Emissionslizenzen kämen die Kosten der verbleibenden Treibhausgasemissionen dazu. In einem Handelssystem mit einer angenommenen Versteigerung von beispielsweise 10 bis 20 Prozent der Emissionsrechte würden bei einem CO_2-Preis von 20 EUR/t CO_2e Zusatzkosten von 40 bis 80 Millionen EUR anfallen; bei einem Preis von 50 EUR/t CO_2e wären es 90 bis 180 Millionen EUR. Dabei wird ein inelastisches Marktverhalten unterstellt, d.h., Effekte der resultierenden Preissteigerungen auf die Zementnachfrage werden hier im ersten Schritt nicht berücksichtigt. Zusätzlich würde die Zementindustrie durch eine Verteuerung des Stroms belastet. Diese resultiert zum einen aus der direkten Verteuerung der Erzeugung, zum anderen aus den Kosten der verbleibenden Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung. Insgesamt könnte der Strompreis bei einem CO_2-Preis von 20 EUR/t CO_2e zu weiteren Mehrkosten von 30 Millionen EUR führen; bei einem CO_2-Preis von 50 EUR/t CO_2e zu weiteren Mehrkosten von 70 Millionen EUR. In Summe aller oben genannten Kosteneffekte würde sich die Zementproduktion in Deutschland bei einem CO_2-Preis von 20 EUR/t CO_2e im Durchschnitt um 2 bis 3 EUR pro Tonne Zement verteuern. Bei einem CO_2-Preis von 50 EUR/t CO_2e läge die Kostenzunahme bei 8 bis 10 EUR pro Tonne Zement. Solche Kostenerhöhungen können in vielen Produktbereichen nicht an die Endkunden weitergegeben werden und verringern in jedem Fall die relative Wirtschaftlichkeit inländischer Unternehmen. Selbstverständlich ist diese Rechnung vereinfacht und lässt Folgeeffekte unberücksichtigt, wie z.B. Nachfrageänderungen auf der Abnehmer- oder der Emissionsseite. Die beschriebenen Effekte betrachten keine etwaige Umverteilung der Einnahmen aus dem Emissionshandel.

Mineralölindustrie

Die Treibhausgasemissionen in der Mineralölindustrie

In der Mineralölindustrie beschränkt sich der Betrachtungsrahmen auf die Emissionen der deutschen Raffinerien aus der Mineralölverarbeitung. Emissionen aus der Petrochemie sind nicht inbegriffen und werden im Bereich der Chemischen Industrie behandelt. Für die Mineralölverarbeitung waren 2004 Emissionen in Höhe von ca. 21 Mt CO_2e zu verzeichnen. Diese stammen zu 90 Prozent (19 Mt CO_2e) aus direkten Unterfeuerungen von Prozessöfen. Ein geringer Teil entfällt auf Prozessemissionen, z.B. aus dem regenerativen Abbrennen von Katalysatoren, unter anderem aus FCC-Anlagen. Etwa 2 Mt CO_2e Emissionen entstehen indirekt durch Stromverbrauch für elektrische Antriebe etc.

Die Raffinerienlandschaft in Deutschland umfasst 14 Standorte. Die Verarbeitungsstandorte unterscheiden sich sehr stark in ihrer Verarbeitungsstruktur. Dementsprechend sind Reduzierungsmaßnahmen und insbesondere die Kosten für die Installation selten direkt zwischen verschiedenen Standorten übertragbar. Daher gelten die unten ausgewiesenen Maßnahmenpotenziale für den Durchschnitt der Industrie, nicht aber für eine Einzelanlage.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Mineralölindustrie seit 1990

Die Produktion der deutschen Raffinerien ist von 1990 bis 2004 um etwa 13 Prozent gestiegen. Trotzdem haben sich die Emissionen nicht erhöht, sondern sind um knapp 3 Prozent gesunken. Dabei sind der Anteil an Destillaten an der Gesamtproduktion und die Anforderungen an die Kraftstoffqualitäten im gleichen Zeitraum angestiegen. Diese fortlaufende Anpassung an Markterfordernisse (steigende Nachfrage nach Destillaten zu Lasten von schwerem Heizöl) und gesetzliche Vorgaben (Auto-Öl-Programm) erforderten nach wie vor zusätzliche energie- und CO_2-intensive Verarbeitungsschritte (Konversion und Entschwefelung). Diesen wirken Energieeffizienzmaßnahmen und Maßnahmen zur Verbesserung der spezifischen Emissionen pro Tonne verarbeitetes Rohöl bzw. Tonne Destillat entgegen.

Zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Mineralölindustrie mit heutigem Stand der Technik

In der „Stand der Technik“-Projektion, ohne Vermeidungsmaßnahmen jenseits der Technologie von 2004, ist ein geringer Anstieg der Emissionen um 3 bis 4 Mt bis 2030 zu erwarten. Er ergibt sich auf Basis einer stabilen Produktion bei zeitgleicher Verschiebung des Produktionsportfolios z.B. hin zu mehr Diesel (das Verhältnis von Diesel zu Ottokraftstoff entwickelt sich von 1:1,1 zu etwa 1:1,7 bis 2020). Diese Verschiebung verlangt vermehrt Destillation in nachgelagerten Produktionsschritten mit zusätzlichem Primärenergieeinsatz. Insgesamt wird so vor Maßnahmen eine Steigerung in den spezifischen und absoluten Emissionen von etwa 17 Prozent erwartet. Der Stromeinsatz bleibt dabei weitgehend stabil.

Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Mineralölindustrie

Die Maßnahmen zur CO_2-Reduzierung in Raffinerien können potenziell den Anstieg der Emissionen gerade kompensieren. Sie summieren sich inklusive der Potenziale aus elektrischen Antrieben und inklusive der Maßnahmen aus der Kraft-Wärme-Kopplung auf etwa 15 Prozent der Emissionen in der „Stand der Technik"-Projektion im Jahr 2020 bzw. 2030; das entspricht ca. 3 Mt CO_2e.

Die Maßnahmen beruhen weitgehend auf bestehenden Technologien. Dazu kommen prozessspezifische Maßnahmen wie z.B. Modifizierung/Ersatz von Kolonnen und Reaktoren sowie Verbesserung der Katalysatoren. Wegen der eingangs erwähnten stark unterschiedlichen Verarbeitungsstrukturen der Raffinerien bewirken die im Folgenden beschriebenen Maßnahmen in den einzelnen Raffinerien sehr unterschiedliche Emissionsreduktionspotenziale. Deshalb variieren auch die Investitionskosten für gleichartige Maßnahmen von Standort zu Standort sehr stark, was wiederum die Bandbreite der Vermeidungskosten für technisch gleichartige Maßnahmen stark ausweitet.

Dies führt dazu, dass sich die Vermeidungskosten nicht auf Maßnahmenebene aggregieren lassen, sondern allenfalls einem bestimmten Prozentsatz an Emissionsminderung zugeordnet werden können. D.h., eine Reduzierung der Raffinerieemissionen um einen bestimmten Anteil wird nicht dadurch am kostengünstigsten erreicht, dass alle Raffinerien die Maßnahme ergreifen, die im Durchschnitt für alle Raffinerien mit den niedrigsten Kosten belegt ist, sondern indem jede einzelne Raffinerie jeweils die für sie kostengünstigste Maßnahme umsetzt. Die teuersten Maßnahmen (d.h. das letzte Drittel des Reduzierungspotenzials) verlangen eine Investition von etwa 200 EUR/t CO_2e. Bei stabilen Energiepreisen ergeben sich daraus aus Entscheiderperspektive unter Einbezug der Energiekosteneinsparungen im Jahr 2020 Vermeidungskosten von 50 bis 75 EUR/t CO_2e. Dazu kommen Einsparungen aus Querschnittsfunktionen mit vergleichsweise geringem Reduktionspotenzial. Das erste Drittel der Reduzierung ergibt Einsparungen von 5 EUR/t CO_2e. Für das nächste Drittel des Potenzials betragen die Vermeidungskosten ca. 10 EUR/t CO_2e[59]. Kosten wurden hier als durchschnittliche Entscheiderkosten angegeben[60]. In der Entscheiderperspektive sind üblicherweise Diskontraten von 9,5 Prozent zu Grunde gelegt; Abschreibungsfristen entsprechen nicht notwendigerweise den Lebenszyklen der Anlagen.

Unter Ausnutzung aller Potenziale kann die Mineralölindustrie ihre historische Verbesserung in spezifischen Emissionen für den Zeitraum 1995 bis 2004 auch im Zeitraum 2004 bis 2030 fortsetzen.

Im Folgenden sind die Maßnahmen im Einzelnen beschrieben. Potenziale werden, soweit nicht anders angeführt, für 2020 angegeben.

- *Effizienzverbesserung an Öfen:* Durch Verbesserung der bestehenden Ofenanlagen können bis zu 0,7 Mt CO_2e Potenzial realisiert werden. Hebel der Reduzierung sind Erneuerung von Brennersystemen, Luftvorwärmung sowie systematischere Wartung.

59 Es sei hier darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse auf stark verdichteten Daten für die Kosten aus verschiedenen früheren Studien basieren. Sie sind nur für die Raffinerien insgesamt, nicht aber für individuelle Standorte repräsentativ.
60 Gewichtete durchschnittliche Vermeidungskosten zum gegebenen Zeitpunkt, die der Entscheider im Zeitraum der Abschreibung aufbringen muss.

- *Erhöhung Wärmeintegration:* Durch Optimierung der bestehenden Wärmeintegrationssysteme ist maximal ein weiteres Potenzial von 1,4 Mt CO_2e realisierbar. Insbesondere können Dampfsysteme kontinuierlich verbessert werden. Zudem kann Prozesswärme noch systematischer genutzt werden.

- *Verbesserung der Prozessführung:* Das Erneuern und Modifizieren zentraler Anlagenkomponenten auf einen technischen Stand jenseits des Jahres 2004 birgt Potenziale von weiteren 0,6 Mt CO_2e. Beispiele sind der Ersatz von Kolonnen und Reaktoren sowie die Verbesserung der Katalysatoren.

- *Intelligente Steuerungen (Advanced Control):* Durch automatisierte Regelung der Prozesse können weitere 0,3 Mt CO_2e eingespart werden. Solche Steuerungen betreffen z.B. die Temperaturregelung der Einsatzstoffe.

- *Kraft-Wärme-Kopplung:* Das weitere Ausdehnen der Stromproduktion in Raffinerien durch Kraft-Wärme-Kopplung ist mit einem Vermeidungspotenzial von bis zu 0,6 Mt CO_2e verbunden. Der Effizienzgewinn kommt zum Teil durch die Kopplung der Wärme- und Stromerzeugung und zum Teil durch die Verschiebung der Stromproduktion gegenüber dem Energiemix des Erzeugungssektors. Letzterer Teil des Effizienzgewinns ist also der industriellen Stromerzeugung zuzurechnen. Für die Unterfeuerung in Raffineriekraftwerken kommen in erster Linie die aus Eigenerzeugung verfügbaren Energien in Frage.

- *Elektrische Antriebssysteme:* Die Effizienzverbesserungen elektrischer Antriebssysteme haben in Raffinerien ein Reduzierungspotenzial von unter 0,1 Mt CO2e.

Wettbewerbseffekte aus der Umsetzung der Maßnahmen

Die direkten Kosten der Treibhausgasvermeidung in der Mineralölindustrie durch untersuchte Maßnahmen zu Kosten unter 20 EUR/t CO_2e summieren sich auf jährlich 10 Millionen EUR im Jahr 2020. Dabei werden negative Vermeidungskosten als neutral behandelt und nicht mit positiven Vermeidungskosten saldiert. Bei Umsetzung aller untersuchten Maßnahmen wären die direkten Kosten der Treibhausgasvermeidung 75 Millionen EUR. Dazu kämen die Kosten der verbleibenden Treibhausgasemissionen. In einem Handelssystem mit einer angenommenen Versteigerung von beispielsweise 10 bis 20 Prozent der Emissionsrechte würden bei einem CO_2-Preis von 20 EUR/t CO_2e Zusatzkosten von 45 bis 90 Millionen EUR anfallen; bei einem Preis von 50 EUR/t CO_2e wären es 110 bis 220 Millionen EUR. Dabei wird zunächst ein inelastisches Marktverhalten unterstellt. Zusätzlich würde die Mineralölindustrie durch eine Verteuerung des Stroms belastet. Diese resultiert zum einen aus der direkten Verteuerung der Erzeugung, zum anderen aus den Kosten der verbleibenden Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung. Insgesamt könnte der Strompreis bei einem CO_2-Preis von 20 (bzw. 50) EUR/t CO_2e zu weiteren Mehrkosten von 25 (bzw. 60) Millionen EUR führen. Insgesamt würde sich die Produktion in Raffinerien in Deutschland bei einem CO_2-Preis von 20 (bzw. 50) EUR/t CO_2e im Durchschnitt um 0,7 bis 1,0 (bzw. 2 bis 3) EUR pro Tonne verteuern. Selbstverständlich ist diese Rechnung vereinfacht und lässt Folgeeffekte unberücksichtigt, wie z.B. Nachfrageänderungen auf der Abnehmer- oder der Emissionsseite.

Papierindustrie

Die Treibhausgasemissionen in der Papierindustrie

Die Emissionen der Papierindustrie im Jahr 2004 betrugen ca. 15 Mt CO_2e. Die Produktionsmenge belief sich auf 20 Mt Papier, 1,1 Mt Papierzellstoff und 1,4 Mt Holzstoff. Diese Emissionen setzen sich zusammen aus mehr als 40 Prozent direkten Emissionen, die hauptsächlich aus der Erzeugung von Dampf (und Strom durch KWK) in der Papierherstellung stammen. Mehr als 50 Prozent der Emissionen entstehen durch Stromeinsatz bei der Zellstoff- und Papierherstellung. Der Strom wird hauptsächlich zum Einsatz von elektrischen Antriebssystemen (ca. 75 Prozent allen Stroms), inklusive Pumpen, aber z.B. auch Schuhpressen, verwendet. Zudem fordert die (thermo-) mechanische Erzeugung von Holzstoff aus Holz Stromeinsatz.

Der Einsatz von Rohstoffen (Faserstoffen) in der deutschen Papierproduktion besteht zu ca. 64 Prozent aus Altpapier, dessen Verarbeitung deutlich geringere spezifische Emissionen freisetzt als der Einsatz des primären Einsatzstoffes Holz. Dieser Anteil von 64 Prozent ist auf Grund von Qualitätsanforderungen und der begrenzten Nachfrage nach entsprechenden Produkten jedoch nicht ohne Weiteres zu steigern. Gleichzeitig werden bereits drei Viertel des eingesetzten Papierzellstoffs (4,8 Mt) importiert.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Papierindustrie seit 1990

Seit 1990 sind die absoluten Emissionen der Papierindustrie nahezu stabil auf einem Niveau von 14 bis 15 Mt CO_2e. Da die Produktion zeitgleich um ca. 60 Prozent gestiegen ist, haben sich die spezifischen Emissionen um mehr als 3 Prozent pro Jahr verringert. Diese Verringerung geht zu einem großen Teil auf den vermehrten Einsatz von Altpapier zurück. Hinzu kommen Energieeffizienzverbesserungen in der Papierherstellung. Die entsprechenden Prozessverbesserungen setzen sich z.T. auch in den unten beschriebenen Teilmaßnahmen fort.

Zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Papierindustrie mit heutigem Stand der Technik

Die CO_2-Emissionen der Papierindustrie in der „Stand der Technik"-Projektion betragen im Jahr 2030 knapp 21 Mt CO_2e. Dies entspricht einem jährlichen Wachstum von 1,3 Prozent seit 2004. Das zu Grunde gelegte Wachstum der Produktion beträgt 1,9 Prozent pro Jahr und liegt damit im Durchschnitt des verarbeitenden Gewerbes. Gleichzeitig wird ein gegenläufiger zyklischer Anlagenmodernisierungs-Effekt angenommen (20 Prozent Effizienzverbesserung je Anlagengeneration bei 30 Jahren Laufzeit implizieren eine Reduktion der jährlichen Wachstumsrate um -0,6 Prozentpunkte).

Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Papierindustrie

Die identifizierten Maßnahmen der Papierindustrie summieren sich auf ein Reduzierungspotenzial von 3 Mt CO_2e im Jahr 2020 exklusive Maßnahmen der industriellen Stromerzeugung (2030: 5 Mt CO_2e). Dieses Potenzial besteht zu rund 2 Mt CO_2e aus Maßnahmen in den Querschnittsfunktionen elektrische Antriebe und KWK, der Rest besteht aus industriespezifischen Effizienzmaßnahmen mit Vermeidungskosten von mehr als 50 EUR/t CO_2e im Jahr 2020.

Die Papierindustrie hat historisch ihre spezifischen Emissionen von 1995 bis 2004 um jährlich 3,1 Prozent gesenkt. Inklusive aller unten genannten Potenziale kann die Papierindustrie 2004 bis 2020 (2004 bis 2030) eine jährliche Verbesserungsrate von 1,2 Prozent (1,3 Prozent) erzielen.

Im Folgenden sind die Maßnahmen im Einzelnen beschrieben. Potenziale werden, soweit nicht anders angeführt, für 2020 angegeben. Kosten werden als durchschnittliche Entscheiderkosten angegeben[61]. In der Entscheiderperspektive sind üblicherweise Diskontraten von 9,5 Prozent zu Grunde gelegt, Abschreibungsfristen entsprechen nicht notwendigerweise den Lebenszyklen der Anlagen. Lediglich die erste der folgenden Maßnahmen ist im Jahr 2020 zu weniger als 20 EUR/t CO_2e abbildbar.

- *Elektrische Antriebssysteme:* Die Effizienzverbesserungen elektrischer Antriebssysteme haben ein Reduzierungspotenzial von ca. 1,5 Mt CO_2e in der Papierindustrie im Jahr 2020. Etwa 75 Prozent des Stromeinsatzes in der Papierindustrie entfallen auf diese Anwendungen. Die industrieübergreifend berechneten Einsparungen betragen 63 EUR/t CO_2e.

- *Effizienzverbesserungen in Papiermaschinen:* Für 2020 kann ein Vermeidungspotenzial durch Effizienzverbesserungen in Papiermaschinen von knapp 1 Mt CO_2e (2030: 2 Mt CO_2e) zu Kosten von ca. 54 EUR/t CO_2e (2030: 17 EUR/t CO_2e) identifiziert werden. Dieses Potenzial kann durch inkrementelle Verbesserungen in den Anlagen erzielt werden. Insbesondere sind hier der flächendeckende Einsatz von Schuhpressen vor der so genannten Trockenpartie sowie Wärmerückgewinnung zu nennen. Es gibt dabei nur wenige Anlagen, in denen diese Maßnahmen noch völlig unausgeschöpft sind. Allerdings kann durch graduelles Anheben des Effizienzniveaus auf das Niveau der besten Anlagen noch Potenzial gesichert werden. Da die Kosten für die diversen Energiesparmaßnahmen nicht eindeutig identifizierbar sind, wurden die Kosten für den Einbau von Schuhpressen kalkuliert, dem wichtigsten Einzelhebel der Energieeffizienzverbesserung. Hier wurde eine Investition in der Größenordnung von 100 Millionen EUR angenommen, mit einer Amortisationsfrist von vier Jahren. Schuhpressen vermindern den Bedarf an thermischer Trocknung in der Papierherstellung und vermindern so den Primärenergieaufwand. Das Potenzial aus Wärmerückgewinnung in der Trockenpartie ist als limitiert zu betrachten, da Wärmetauscher in den deutschen Papieranlagen bereits zur Standardausstattung gehören.

- *Ausweitung KWK:* Bis zu 1 Mt CO_2e-Vemeidungspotenzial im Jahr 2020 (2030: 1,2 Mt CO_2e) können in der Papierindustrie durch Ausweitung der eigenen Stromerzeugung – durch Ersatz/Ergänzung bisheriger KWK-Anlagen durch GuD-Industriekraftwerke – erzielt werden. Der Effekt könnte eine Steigerung zur Deckung des Strombedarfs in der Papierindustrie von 30 Prozent 2004 auf maximal 45 Prozent bedeuten. Auf diese Weise würden der Industrie Kosten in Höhe von ca. 51 EUR/t CO_2e entstehen (auf Grund von Investitionen in neue Turbinen in Höhe von 0,8 Millionen EUR je MW, die über vier Jahre abgeschrieben werden). In der Zurechnungslogik der sektorübergreifenden Perspektive bedeutet diese Maßnahme, dass in der gesamten Industrieerzeugung (im Energiesektor geführt) mehr Strom

61 Gewichtete durchschnittliche Vermeidungskosten zum gegebenen Zeitpunkt, die der Entscheider im Zeitraum der Abschreibung aufbringen muss.

durch Gaseinsatz erzeugt wird. Zudem bedeutet die Erhöhung der KWK einen effizienteren Umgang mit dem eingesetzten Gas; dieser Kerneffekt der KWK beläuft sich auf ca. 0,2 Mt CO_2e.

Wettbewerbseffekte aus der Umsetzung der Maßnahmen

Im Jahr 2020 gibt es in der Papierindustrie jenseits der wirtschaftlichen Maßnahmen aus Querschnittsfunktion keine Maßnahmen zu Kosten unter 20 EUR/t CO_2e; somit ergäben sich hier zunächst auch keine direkten Vermeidungskosten. Bei Umsetzung aller untersuchten Maßnahmen beliefen sich die direkten Vermeidungskosten im Jahr 2020 allerdings auf 60 Millionen EUR. Dazu kämen die Kosten der verbleibenden Treibhausgasemmissionen. In einem Handelssystem mit einer angenommenen Versteigerung von beispielsweise 10 bis 20 Prozent der Emissionsrechte würden bei einem CO_2-Preis von 20 EUR/t CO_2e Zusatzkosten von 15 bis 30 Millionen EUR anfallen; bei einem Preis von 50 EUR/t CO_2e wären es 35 bis 70 Millionen EUR. Dabei wird zunächst ein inelastisches Marktverhalten unterstellt. Zusätzlich würde die Papierindustrie durch eine Verteuerung des Stroms belastet. Diese resultiert zum einen aus der direkten Verteuerung der Erzeugung, zum anderen aus den Kosten der verbleibenden Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung. Insgesamt könnte der Strompreis bei einem CO_2-Preis von 20 (bzw. 50) EUR/t CO_2e zu weiteren Mehrkosten von 150 (bzw. 380) Millionen EUR führen. Insgesamt würde sich die Papierproduktion in Deutschland bei einem CO_2-Preis von 20 (bzw. 50) EUR/t CO_2e im Durchschnitt um 6 bis 7 (bzw. 17 bis 18) EUR pro Tonne Papier verteuern. Solche Kostenerhöhungen können in vielen Produktbereichen nicht an die Endkunden weitergegeben werden und verringern in jedem Fall die relative Wirtschaftlichkeit inländischer Unternehmen. Selbstverständlich ist diese Rechnung vereinfacht und lässt Folgeeffekte unberücksichtigt, wie z.B. Nachfrageänderungen auf der Abnehmer- oder der Emissionsseite. Die beschriebenen Effekte betrachten keine etwaige Umverteilung der Einnahmen aus dem Emissionshandel.

Nichteisen-Metalle

Die Treibhausgasemissionen in der NE-Metall-Industrie

Die NE-Metall-Industrie erzeugt und bearbeitet in Deutschland vor allem Aluminium, Kupfer, Zink und Blei. Insgesamt haben diese Industriebereiche im Jahr 2004 knapp 15 Mt CO_2e Emissionen verursacht. 70 Prozent der Emissionen resultieren aus dem Stromeinsatz, der zum größten Teil auf den Elektrolyseprozess entfällt. Die restlichen 30 Prozent der Emissionen entstehen als direkte Emissionen, vor allem aus Primärenergieeinsatz bei der Wärmebehandlung der Metalle.

Die gesamte Erzeugung der NE-Metalle von 2,8 Millionen Tonnen setzt sich zusammen aus je etwa 0,7 Millionen Tonnen Primär- und Sekundäraluminium, 0,7 Millionen Tonnen raffiniertem Kupfer und Kupfergusslegierungen, 0,35 Millionen Tonnen raffiniertem Blei und 0,4 Millionen Tonnen Primär- und Sekundärzink. Im Durchschnitt über alle NE-Metalle beläuft sich der Anteil der Primärerzeugung (in Produktionsvolumen) auf etwa 47 Prozent der Gesamtproduktion. Zudem wurden 4,2 Millionen Tonnen Halbzeuge aus Metallen und Legierungen produziert.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der NE-Metall-Industrie seit 1990

Die historische Entwicklung der Emissionen war in absoluten Werten stabil auf dem Niveau von 14,6 Mt CO_2e im Jahr 1990 und 14,5 Mt CO_2e im Jahr 2004. Gleichzeitig ist allerdings die Tonnage der Gesamtproduktion um 6 Prozent gestiegen (25 Prozent inklusive Halbzeug).

Auf Grund der leichten Verschiebung der Anteile der einzelnen Metalle in der Gesamtproduktion im selben Zeitraum ist die Einheit der spezifischen Emissionen allerdings nicht so klar interpretierbar wie in anderen Industrien. Es ist aber unstrittig, dass Effizienzsteigerungen in der Elektrolyse und (nachrangig) in der Wärmebehandlung Haupttreiber des Rückgangs in spezifischen Emissionen waren.

Zukünftige Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der NE-Metall-Industrie mit heutigem Stand der Technik

In der „Stand der Technik"-Projektion steigen die Emissionen in der Produktion von NE-Metallen um knapp 3 Mt CO_2e (mit einer jährlichen Wachstumsrate von 0,7 Prozent) bis 2030. Dieser Prognose liegt ein erwartetes Produktionswachstum von 1 Prozent pro Jahr bis 2030 zu Grunde, bei einem gegenläufigen Anlagenmodernisierungs-Effekt von -0,3 Prozentpunkten. Dies entspricht der vereinfachenden Annahme, dass Anlagen der NE-Metallerzeugung im Schnitt einen 30-jährigen Lebenszyklus durchlaufen; eine Generation der Anlagen auf dem Stand von 2004 wird als 10 Prozent effizienter als die vorherige Generation angenommen.

Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der NE-Metall-Industrie

Mögliche Vermeidungsmaßnahmen der NE-Metall-Industrie summieren sich zu einem Reduzierungspotenzial von rund 1 Mt CO_2e im Jahr 2020 (2030: 2 Mt CO_2e). All diese Maßnahmen sind Energieeffizienzmaßnahmen, wobei nur der Anteil der Maßnahmen in Querschnittsfunktionen im Jahr 2020 wirtschaftlich wäre. Effizienzmaßnahmen im Bereich der Elektrolyse und der Wärmebehandlung sind im Jahr 2020 mit positiven Kosten von deutlich mehr als 20 EUR/t CO_2e verbunden.

Die NE-Metall-Industrie hat historisch ihre spezifischen Emissionen von 1995 bis 2004 um jährlich knapp 1 Prozent gesenkt; im Maximum aller genannten Potenziale liegt die Verringerung bei ca. 0,4 Prozent von 2004 bis 2020 (analog 2004 bis 2030).

Im Folgenden sind die einzelnen Maßnahmen beschrieben. Potenziale werden, soweit nicht anders angeführt, für 2020 angegeben. Kosten werden als durchschnittliche Entscheiderkosten angegeben[62]. In der Entscheiderperspektive sind üblicherweise Diskontraten von 9,5 Prozent zu Grunde gelegt, Abschreibungsfristen entsprechen nicht notwendigerweise den Lebenszyklen der Anlagen. Bei allen Kostenangaben ist die hohe Sensitivität gegenüber Energiepreisänderungen zu berücksichtigen, die in der unten stehenden Wettbewerbsanalyse aufgegriffen wird. Die erste der folgenden Maßnahmen ist im Jahr 2020 zu weniger als 20 EUR/t CO_2e abbildbar.

62 Gewichtete durchschnittliche Vermeidungskosten zum gegebenen Zeitpunkt, die der Entscheider im Zeitraum der Abschreibung aufbringen muss.

- *Elektrische Antriebssysteme:* Die Effizienzverbesserungen elektrischer Antriebssysteme haben ein Reduzierungspotenzial von ca. 0,1 Mt CO_2e in der NE-Metall-Industrie im Jahr 2020. Etwa 7 Prozent des Stromeinsatzes in der NE-Metall-Industrie entfallen auf diese Anwendungen. Die industrieübergreifend berechneten Einsparungen betragen 63 EUR/t CO_2e in den Jahren 2020 bzw. 2030.

- *Elektrolyse – Graduelle Effizienzverbesserung:* Der Stromeinsatz im Elektrolyseverfahren kann graduell noch weiter optimiert werden. Hierbei ist wie schon in der Vergangenheit kein einzelnes Prozesselement als Treiber herauszustellen, sondern eine Sammlung verschiedener Prozessverbesserungen. Hierin liegt ein Potenzial von 0,3 Mt CO_2e Reduzierung im Jahr 2020 (2030: 0,5 Mt CO_2e). Die entsprechenden Kosten variieren stark mit dem Strompreis. Unter derzeitigen industriellen Strompreiserwartungen lägen die Vermeidungskosten bei 106 EUR/t CO_2e (2030: 71 EUR/t CO_2e).

- *Effizienzverbesserungen in Schmelzaggregaten/Wärmebehandlung:* Etwa 1 Mt CO_2e Vermeidungspotenzial liegt in Effizienzmaßnahmen im Bereich der Schmelzaggregate und Wärmebehandlung im Jahr 2020 bzw. 2030. So können noch etwa 20 Prozent Effizienzpotenziale in Gasöfen sowie 10 Prozent in elektrischen Öfen realisiert werden. Teil dieser Maßnahmen sind unter anderem Optimierungen von Heizsystemen und die Wärmeintegration. Etwa 20 Prozent des Energieverbrauchs entfallen zudem auf Homogenisierungsöfen, bei denen die Energieeffizienz auch noch leicht verbessert werden kann. Hebel sind hier automatische Regelungen, aber auch Personalschulung. Die Vermeidungskosten betragen etwa 37 EUR/t CO_2e im Jahr 2020 (2030: 3 EUR/t CO_2e).

Wettbewerbseffekte aus der Umsetzung der Maßnahmen

Im Jahr 2020 gibt es in der NE-Metall-Industrie jenseits der wirtschaftlichen Maßnahmen aus Querschnittsfunktion keine Maßnahmen zu Kosten unter 20 EUR/t CO_2e; somit ergäben sich hier zunächst auch keine direkten Vermeidungskosten. Bei Umsetzung aller untersuchten Maßnahmen beliefen sich die direkten Vermeidungskosten im Jahr 2020 allerdings auf 70 Millionen EUR[63]. Zusätzlich würde die NE-Metall-Industrie durch eine Verteuerung des Stroms belastet. Diese resultiert zum einen aus der direkten Verteuerung der Erzeugung, zum anderen aus den Kosten der verbleibenden Treibhausgasemissionen der Stromerzeugung. Insgesamt könnte der Strompreis bei einem CO_2-Preis von 20 (bzw. 50) EUR/t CO_2e zu weiteren Mehrkosten von 150 (bzw. 380) Millionen EUR führen. Insgesamt würde sich dadurch die NE-Metallproduktion in Deutschland bei einem CO_2-Preis von 20 (bzw. 50) EUR/t CO_2e um durchschnittlich 45 (bzw. 135) EUR pro produzierte Tonne verteuern. Für NE-Metalle mit besonders hohem Stromeinsatz in der Elektrolyse, z.B. Aluminium, wären diese Kosten erheblich höher; bei anderen NE-Metallen entsprechend niedriger. Selbstverständlich ist diese Rechnung vereinfacht und berücksichtigt nicht Feedbackeffekte, wie z.B. Nachfrageelastizität auf der Abnehmer- oder der Emissionsseite.

Die NE-Metall-Industrie befindet sich in starkem globalem Wettbewerb. Transportkosten sind hierbei keine Eintrittsbarriere. Wettbewerber aus China mit neuen Produktionsanlagen z.B. könnten schon heute europäische Marktpreise unterbieten und dabei

63 Die-NE-Metall-Industrie ist nicht Teil des ETS; daher wurden keine Lizenzkosten berücksichtigt.

noch die vollen Transportkosten decken. Daraus folgt auch, dass Kostenerhöhungen in der nationalen Produktion nicht auf den Endkunden übertragen werden können[64].

Die Rentabilität der deutschen NE-Metall-Industrie wird also unmittelbar durch die nationalen Energiepreise determiniert, welche wiederum durch CO_2-Preise mitbestimmt werden. Dies könnte als Sekundäreffekt ein stark eingeschränktes Investitionsverhalten bei hohen Energiepreisen nach sich ziehen – also genau dann, wenn Investitionen in Effizienzmaßnahmen isoliert betrachtet am rentabelsten sind.

64 Vgl. „EU ETS Review. Report on International Competitiveness", European Commission/McKinsey/Ecofys, Dezember 2006.

Anhang

Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen Industrie 2020[65]

	Vermeidungspotenzial Mt CO_2e	*Vermeidungskosten EUR/t CO_2e*	*Abschreibungsdauer (Jahre)*
Übergreifend: Drehzahlregler in Antriebssystemen (verschiedene Anwendungen und Leistungsklassen)	Σ = 4,8	von -198 bis -184	4
Übergreifend: Energiesparmotoren	3,5	-183	4
Übergreifend: Drehzahlregler in Antriebssystemen (verschiedene Anwendungen und Leistungsklassen)	3,6	von -182 bis -160	4
Übergreifend: Effizienzoptimierung Beleuchtung	2,7	-157	15*
Übergreifend: Drehzahlregler in Antriebssystemen (verschiedene Anwendungen und Leistungsklassen)	0,6	-151	4
Übergreifend: Wärmerückgewinnung in Lüftungssystemen	2,2	-146	20*
Übergreifend: Drehzahlregler in Antriebssystemen (verschiedene Anwendungen und Leistungsklassen)	Σ = 1,7	von -146 bis -101	4
Übergreifend: Optimierung Heizungssysteme	1,2	-79	10*
Übergreifend: Drehzahlregler in Antriebssystemen (verschiedene Anwendungen und Leistungsklassen)	Σ = 0,1	von -60 bis -26	4
Mineralöl: Diverse Effizienzverbesserungen Raffinerien	0,7	-5	4
Übergreifend: Mechanische Systemoptimierungen Antriebe	7,0	0	4
Chemie: Prozessintensivierung	0,6	0	4
Chemie: Effizienz Katalysatoren	1,2	0	4
Stahl: Effizienzsteigerung EAF-Verfahren	0,9	2	4
Chemie: Lachgasbindung Adipinproduktion	4,6	2	4
Stahl: Wandel BF/BOF zu EAF	1,0	10	20
Mineralöl: Diverse Effizienzverbesserungen Raffinerien	1,2	~ 11	4
Zement: Klinkersubstitution	1,1	14	20
Chemie: Lachgasbindung Salpetersäureproduktion	1,5	14	4
Übergreifend: KWK (exkl. Brennstoffmix-Effekt)	0,7	20	10**
Chemie: Brennstoffsubstitution	0,8	30 bis 40	4
NE-Metalle: Effizienzsteigerung Wärmebehandlung	0,9	37	4
Übergreifend: Drehzahlregler in Antriebssystemen (verschiedene Anwendungen und Leistungsklassen)	0,0	43	4
Zement: Brennstoffsubstitution	0,2	> 50	4
Mineralöl: Diverse Effizienzverbesserungen Raffinerien	0,3	~ 52	4
Papier: Effizienzverbesserungen	1,0	54	4
Zement: CCS	0,7	55	20
Zement: Effizienz Klinkerproduktion	0,4	56	20
Stahl: CCS	1,4	57	20
Mineralöl: Diverse Effizienzverbesserungen Raffinerien	0,6	75	4
NE-Metalle: Effizienz Elektrolyse	0,3	106	4
Stahl: Endabmessungsnahes Gießen	1,2	157	20
Gesamt	*48,6*		

* Analog zu Annahmen im tertiären Sektor
** Analog zu Annahmen im Energiesektor

65 Hinweis: Potenziale der Hebel können addiert werden, spezifische Vermeidungskosten und Gesamtkosten der Hebel nicht.

Hebel zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen Industrie 2030[66]

	Vermeidungspotenzial *Mt CO_2e*	*Vermeidungskosten* *EUR/t CO_2e*	*Abschreibungsdauer* *(Jahre)*
Übergreifend: Drehzahlregler in Antriebssystemen (verschiedene Anwendungen und Leistungsklassen)	Σ = 5,8	von -196 bis -183	4
Übergreifend: Energiesparmotoren	4,2	-182	4
Übergreifend: Drehzahlregler in Antriebssystemen (verschiedene Anwendungen und Leistungsklassen)	Σ = 4,4	von -181 bis -161	4
Übergreifend: Effizienzoptimierung Beleuchtung	3,4	-160	15*
Übergreifend: Wärmerückgewinnung in Lüftungssystemen	3,6	-154	20*
Übergreifend: Drehzahlregler in Antriebssystemen (verschiedene Anwendungen und Leistungsklassen)	2,8	von -152 bis -106	4
Übergreifend: Optimierung Heizungssysteme	1,0	-76	10*
Übergreifend: Drehzahlregler in Antriebssystemen (verschiedene Anwendungen und Leistungsklassen)	Σ = 0,1	von -67 bis -35	4
Mineralöl: Diverse Effizienzverbesserungen Raffinerien	0,7	-17	4
Stahl: Effizienzsteigerung EAF-Verfahren	1,0	-5	4
Mineralöl: Diverse Effizienzverbesserungen Raffinerien	1,2	-4	4
Mineralöl: Diverse Effizienzverbesserungen Raffinerien	0,3	-2	4
Übergreifend: Mechanische Systemoptimierungen Antriebe	9,1	0	4
Chemie: Prozessintensivierung	1,0	0	4
Chemie: Effizienz Katalysatoren	2,1	0	4
Chemie: Lachgasbindung Adipinproduktion	4,9	2	4
NE-Metalle: Effizienzsteigerung Wärmebehandlung	1,0	3	4
Stahl: Wandel BF/BOF zu EAF	0,7	7	20
Zement: Klinkersubstitution	1,6	13	20
Chemie: Lachgasbindung Salpetersäureproduktion	1,5	14	4
Papier: Effizienzverbesserungen	2,3	17	4
Übergreifend: KWK (exkl. Brennstoffmix-Effekt)	1,0	19	10**
Übergreifend: Drehzahlregler in Antriebssystemen (verschiedene Anwendungen und Leistungsklassen)	0,0	29	4
Chemie: Brennstoffsubstitution	1,4	30 bis 40	4
Chemie: CCS Ammoniakproduktion	3,1	45	20
Zement: Brennstoffsubstitution	0,4	> 50	4
Mineralöl: Diverse Effizienzverbesserungen Raffinerien	0,6	53	4
Zement: CCS	6,8	54	20
Stahl: CCS	27,8	55	20
Zement: Effizienz Klinkerproduktion	0,5	60	20
NE-Metalle: Effizienz Elektrolyse	0,6	71	4
Stahl: Endabmessungsnahes Gießen	1,7	150	20
Gesamt	*95,6*		

* Analog zu Annahmen im tertiären Sektor
** Analog zu Annahmen im Energiesektor

66 Hinweis: Potenziale der Hebel können addiert werden, spezifische Vermeidungskosten und Gesamtkosten der Hebel nicht.

Ansprechpartner

BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz

Joachim Hein
j.hein@bdi.eu

Klaus Mittelbach
k.mittelbach@bdi.eu

Martin Schröder
m.schroeder@bdi.eu

Internet:
www.wirtschaftfuerklimaschutz.eu

McKinsey & Company, Inc.

Leo Birnbaum
leo_birnbaum@mckinsey.com

Anja Hartmann
anja_hartmann@mckinsey.com

Kalle Greven
kalle_greven@mckinsey.com

Christian Malorny
christian_malorny@mckinsey.com

Jens Riese
jens_riese@mckinsey.com

Thomas Vahlenkamp
thomas_vahlenkamp@mckinsey.com

Impressum

Herausgeber: McKinsey & Company, Inc.

Verantwortlich für den Inhalt: Thomas Vahlenkamp

Redaktion: Philipp Beckmann, Leonhard Birnbaum, Philipp Carlsson-Szlezak, Kalle Greven, Anja Hartmann, Jens Riese, Thomas Vahlenkamp, Stephan Weyers

Alle Rechte vorbehalten. Copyright 2007 by McKinsey & Company, Inc. Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung von McKinsey & Company, Inc., unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Wirtschaft
für Klimaschutz
BDI initiativ

McKinsey&Company

McKinsey&Company

Wirtschaft
für Klimaschutz
BDI initiativ

Copyright © 2007 McKinsey & Company, Inc.