

# Low-Carbon-Industrie: Elektrifizierung und geschlossene Kohlenstoffkreisläufe



**Wuppertal Institut**  
Clemens Schneider  
clemens.schneider@wupperinst.org  
Prof. Dr. Stefan Lechtenböhrer  
stefan.lechtenboehmer@wupperinst.org

**DLR**  
Dr. Thomas Bauer  
thomas.bauer@dlr.de

**Fraunhofer ISE**  
Dr. Peter Nitz  
peter.nitz@ise.fraunhofer.de

**Fraunhofer ISI**  
Tim Hettesheimer  
tim.hettesheimer@isi.fraunhofer.de  
Prof. Dr. Martin Wietschel  
martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

**FZ Jülich**  
Prof. Dr. Wilhelm Meulenber  
w.a.meulenber@fz-juelich.de

**ZAE Bayern**  
Richard Gurtner  
richard.gurtner@zae-bayern.de

Stahl, Chemieprodukte, Zement und Papier werden ganz überwiegend großmaßstäblich hergestellt und sind essenzieller Bestandteil einer Vielzahl an industriellen Wertschöpfungsketten, die aus heutiger Sicht auch langfristig benötigt werden, nicht zuletzt für den Ausbau von Infrastrukturen, die den Aufbau eines CO<sub>2</sub>-armen Wirtschaftssystems ermöglichen.

In der EU wurden im Jahr 2010 170 Mio. Tonnen Stahl, 190 Mio. Tonnen Zement und 40 Mio. Tonnen Olefine (als Grundstoffe der organischen Chemie) produziert (Lechtenböhrer et al. 2015, ▶ *Abbildung 1*). Damit geht ein beträchtlicher Einsatz an Energieträgern einher: Für nur wenige ausgewählte Grundstoffe wurden 2.200 TWh fossile Energieträger eingesetzt, dazu 125 TWh Strom. Der Großteil der Energieträger wird energetisch genutzt, das heißt Kohlenwasserstoffe werden zu Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasserstoff (H<sub>2</sub>) oxydiert, und die dabei frei werdende Energie wird genutzt, z. B. zur Reduktion von Eisenerz zu Roheisen, als Reaktionsenergie für chemische Prozesse oder zum Schmelzen und Verformen von Metallen.

Knapp 700 TWh werden stofflich genutzt. Hierbei handelt es sich vor allem um Erdölprodukte, die in Plattformprodukte für die chemische Industrie (Olefine und Aromaten) umgewandelt werden. Mit der stofflichen Nutzung sind – anders als bei der energetischen Nutzung – keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden, wohl aber dann, wenn (wie heute üblich) die Produkte am Ende ihres Lebenszyklus energetisch genutzt werden.

Wenn die Raffinerien mit ihrer Umwandlung von Erdöl in Brenn- und Kraftstoffe zusätzlich zum Komplex der energieintensiven Industrie hinzugezählt werden, so ist damit ein Großteil des Eintrags von fossil gebundenem Kohlenstoff in das Wirtschaftssystem abgedeckt. Zwar fehlt hier die Stromerzeugung als heute bedeutendster Emittent an Kohlendioxid – langfristig jedoch, das zeigen zahlreiche Szenariostudien, kann diese vollständig auf regenerative Energien umgestellt werden. Welchen Beitrag erneuerbar erzeugter Strom langfristig leisten kann, um das Energiesystem insgesamt (also inklusive Verkehr und Industrie) zu dekarbonisieren, ist heute noch nicht abschließend geklärt und inzwischen Untersuchungsgegenstand zahlreicher Studien im Rahmen der sogenannten Sektorkopplung. Hier wird untersucht, inwiefern fossile Energieträger durch Strom

oder strombasierte Energieträger (wie Wasserstoff oder synthetische Kohlenwasserstoffe) ersetzt werden können.

▶ *Abbildung 2* zeigt drei prototypische Systeme einer CO<sub>2</sub>-armen Industrie für die lange Frist.

## Das System „Strom“

baut auf eine direkte Elektrifizierung des Energiesystems, Kohlenstoff wird hier nur in das System eingebracht, wo unvermeidlich, z.B. bei der Nutzung von Kalkstein für die Herstellung von Zement oder bei der stofflichen Nutzung von Kohlenstoff in Kunststoffen (Kohlenwasserstoffen). Aus Sicht der Endenergieeffizienz handelt es sich hierbei um ein sehr effizientes und obendrein buchstäblich kohlenstoffarmes System. Allerdings fehlt einem solchen System die immanente Möglichkeit der Energiespeicherung zum Ausgleich von Fluktuationen der Stromerzeugung.

## Der Systemprototyp „ICCS“ (Industrielles CCS)

baut soweit wie möglich auf heutige Infrastrukturen und Energieträger auf und setzt deshalb auf die fortgesetzte Nutzung von fossilen Kohlenwasserstoffen. Aus diesem Grund erfordert es aber eine neu aufzubauende CO<sub>2</sub>-Leistungs- und Speicherinfrastruktur. Wo keine CO<sub>2</sub>-Abscheidung technisch-ökonomisch darstellbar ist, wie im Falle der Mobilität, muss aber auch in diesem System eine direkte oder indirekte Elektrifizierung oder die Nutzung von Bio-Energieträgern in Betracht gezogen werden.

## Das System „Power-to-X-Import“

baut auf eine indirekte Elektrifizierung des Energiesystems. Hier – wie auch bei ICCS – handelt es sich nicht um ein per se kohlenstoffarmes System. Kohlenstoffarm wird dieses System erst in einer Nettobetrachtung, d. h. bei einer Bilanzierung von Entnahmen von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre und den CO<sub>2</sub>-Emissionen. Durch die hohen Umwandlungsverluste von Strom hin zu Kohlenwasserstoffen ist der Nettostrombedarf dieses Systems deutlich höher als der der anderen Systeme. Eine Studie des Umweltbundesamtes (2014) weist pro Jahr für Deutschland in einem solchen System einschließlich der gesamten Energienachfrage, also auch des Wärme- und Verkehrssektors einen Bedarf von 3.000 TWh pro aus – eine Menge, die sich nicht mehr alleine an inländischen Standorten aus erneuerbaren Energien umweltverträglich erzeugen lässt. Deshalb wären in einem solchen System Energieimporte notwendig.

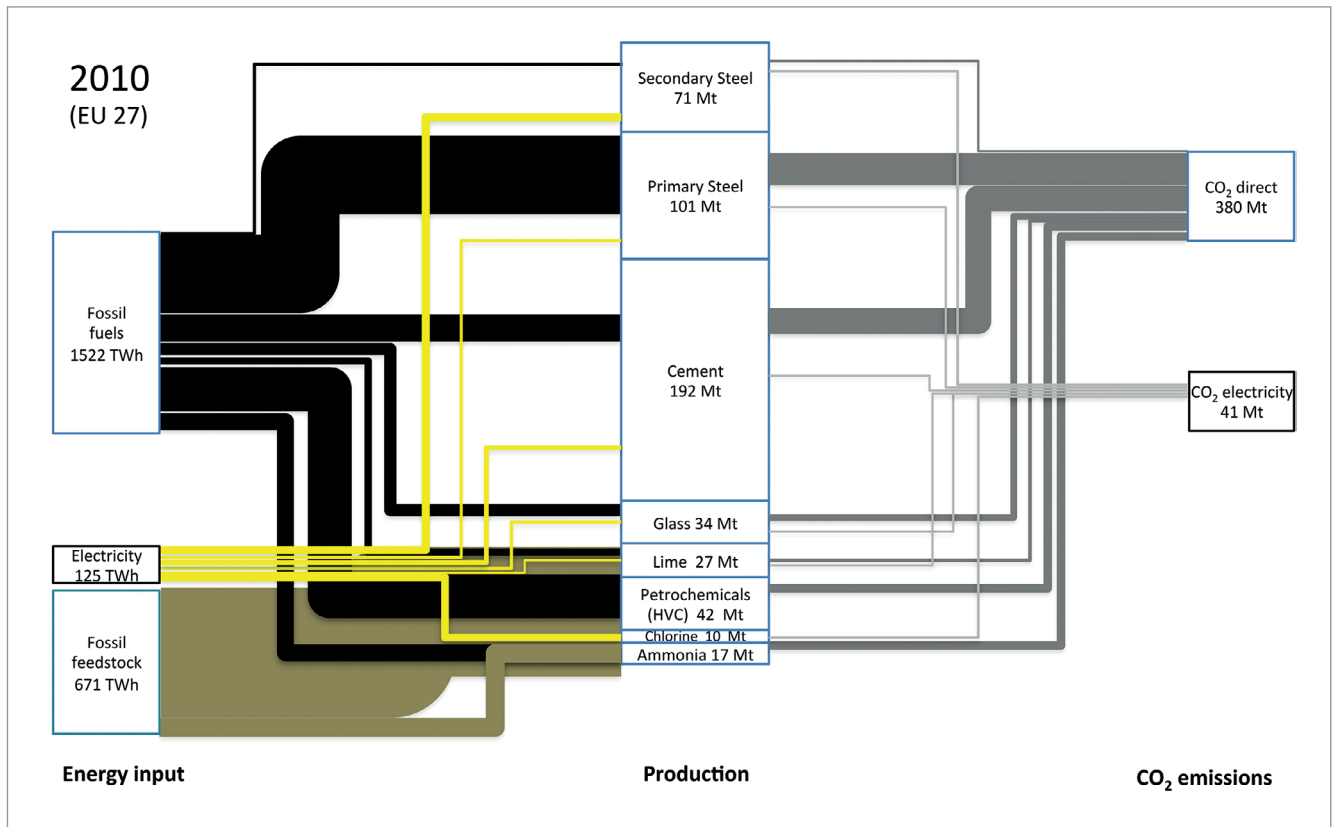


Abbildung 1  
**Große Massen-,  
 Energie- und  
 CO<sub>2</sub>-Bilanz**  
 der europäischen  
 energieintensiven  
 Industrie  
 (Quelle: Lechtenböher et al.  
 2016)

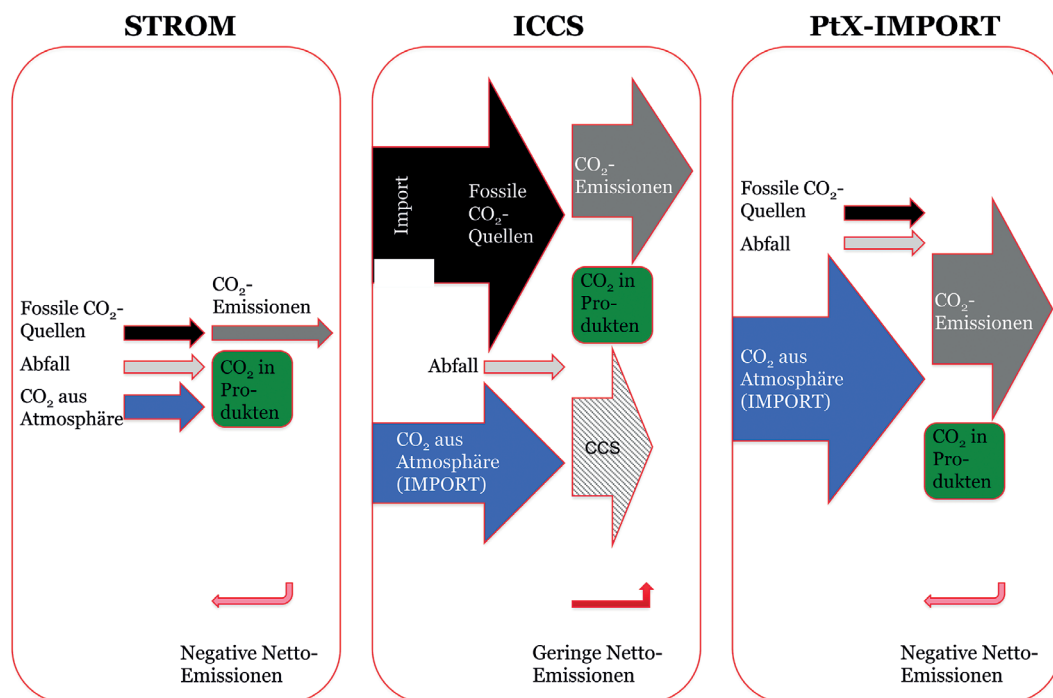


Abbildung 2  
**Prototypische Konzepte  
 einer Low-Carbon-  
 Industry**  
 (Quelle: Wuppertal Institut)

### Zentrale Technologien für eine Low-Carbon-Industrie

In dem vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekt „Technologien für die Energiewende“ wurde der mögliche Beitrag verschiedener Technologien zur Erreichung des langfristigen Ziels einer „low carbon industry“ eruiert (Schneider et al. 2017, Hettesheimer 2017). Zentrale Technologien wie Power-to-Fuels und Power-to-Chemicals wurden im Rahmen eigener Untersuchungen gewürdigt. Innerhalb des Technologieberichts „Low-Carbon- und ressourceneffiziente Industrie“ wurden darüber hinaus weitere Technologien untersucht, die eine fast vollständige Dekarbonisierung derjenigen Produktionsprozesse ermöglichen könnten, die aufgrund der Menge ihres heutigen Kohlenstoffumsatzes von großer Relevanz sind. Die Auswahl versuchte dabei unterschiedliche Ausprägungen einer zukünftigen Low-Carbon-Industrie im Rahmen des Möglichkeitsraumes der drei oben genannten Systemprototypen zu berücksichtigen.

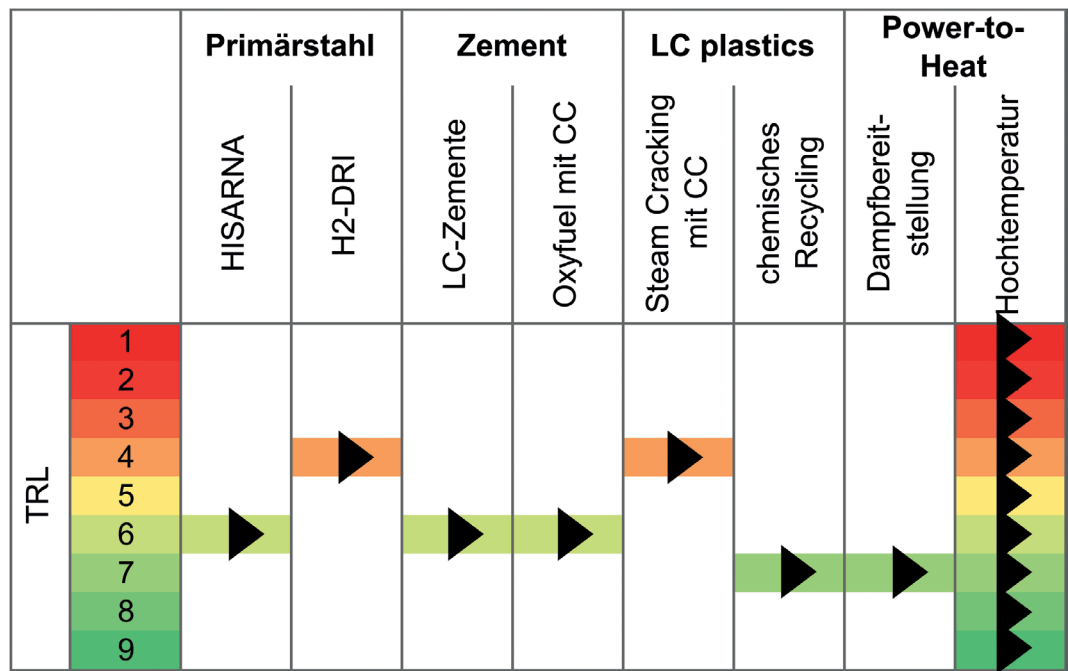
► **Abbildung 3** zeigt die von Wuppertal Institut und Fraunhofer ISI untersuchten „Low-Carbon-Technologien“ und den jeweiligen Stand von Forschung und Entwicklung (F&E) auf. Die Einschätzung nutzt den standardisierten Ansatz der technology readiness levels (TR-Level), der eine Einteilung in neun Stufen von 1 (Grundlagenforschung) bis 9 (Nachweis der Funktion im wirtschaftlichen Betrieb) vorsieht. Je höher der TR-Level, desto früher kann mit einer Markteinführung der Technologie gerechnet werden.

Zwei alternative Technologien zur zukünftigen Primärstahlerzeugung sind einmal das so genannte Hlsarna-Verfahren, ein Schmelzreduktionsverfahren mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung, das im „ULCOS“-Verbund der europäischen Stahlerzeuger entwickelt wird und dessen Machbarkeit in einem niederländischen Stahlwerk demonstriert wird und zum anderen die Direktreduktion von Eisenerz mit Wasserstoff zu Roheisen (H<sub>2</sub>-DRI), die nur Wasserstoff als Reduktionsmittel verwendet und aus diesem Grund keine direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweist.

Im Bereich der Zementherstellung wurden so genannte Low-Carbon-Zemente (LC-Zemente) untersucht, die aufgrund eines modifizierten Brennverfahrens, einer anderen Materialzusammensetzung und neuer Mahltechniken niedrigere energiebedingte und prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweisen. Oxyfuel-Zementklinkeröfen weisen einen reineren Abgasstrom gegenüber den konventionellen Drehrohröfen auf und eignen sich deshalb besser für eine CO<sub>2</sub>-Abscheidung (siehe auch unten das Projekt GREEN-CC).

Kunststoffe werden heute ganz überwiegend erdölbasiert hergestellt. Das in ihnen gebundene fossile CO<sub>2</sub> wird bei ihrer Verbrennung am Ende des (oft kurzen) Lebenszyklus freigesetzt. In Zukunft könnten auch andere Kohlenwasserstoff-Quellen (z. B. auf Basis von Elektrolysewasserstoff und CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre) eingesetzt werden. Solche PtX-Technologien wurden innerhalb des Projekts „Technologien für die Energiewende“ gesondert bewertet. Eine

Abbildung 3  
**Zentrale Technologien einer Low-Carbon-Industrie:**  
 Stand von F&E  
 (Quelle: Wuppertal Institut, basierend auf Schneider et al. 2017 und Hettesheimer 2017)



Alternative hierzu wäre eine strenge Führung von fossilem Kohlenstoff in Kreisläufen bzw. eine geologische Speicherung. Das hieße, dass CO<sub>2</sub> im Abgas der Steam Cracker abgeschieden und in Produkten genutzt oder abgeschieden würde. Andererseits entstehen am Ende des Lebenszyklus eines Kunststoffprodukts Emissionen bei der Verbrennung in Müllverbrennungsanlagen, sofern die Produkte nicht alternativ recycelt werden. Das chemische Recycling ersetzt nicht das heute übliche mechanische Recycling, wo Kunststoffe nach ggf. mehrfachem Downcycling nicht mehr wiederverwertbar sind. Am Ende eines solchen Zyklus werden beim chemischen Recycling die im Kunststoff enthaltenen Elemente Kohlenstoff und Wasserstoff genutzt, um über ein Synthesegas Plattformchemikalien wie Ethylen neu zu erzeugen, woraus wieder „neuwertige“ Kunststoffe hergestellt werden können.

Ein bedeutender Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Bereich der energieintensiven Industrie ist auf die Bereitstellung von Dampf und Hochtemperatur-Wärme (>400 °C) zurückzuführen. Elektrifizierung via Power-to-Heat könnte hier mittel- und langfristig zur Dekarbonisierung beitragen, sofern in ausreichendem Maße Strom aus erneuerbaren Energien zur Verfügung steht. Die Bereitstellung von Dampf über Elektrodenkessel und/oder Hochtemperaturwärmepumpen weist in Verbindung mit dem Einsatz von Speichern heute bereits einen TR-Level von 4 auf (s. auch Abschnitt zu „Einsatz von Power-to-Heat und thermischen Speichern zur Flexibilisierung von Wärme- und Stromerzeugung“ unten), während die Bereitstellung von Hochtemperatur-Wärme sehr unterschiedliche TR-Level aufweist: In bestimmten Nischenanwendungen ist der Einsatz von Elektroöfen aufgrund ihrer deutlich höheren Energieeffizienz und Vorteilen bei der Prozessführung bereits heute üblich (z. B. in der Glas- und Nicht-Eisen-Metall-Industrie), für andere Anwendungen (wie der Bereich der Zementklinkeröfen) gibt es bisher nur Grundlagenforschung.

Aufgrund der langen Betriebszeiten der dargestellten Industrieanlagen von üblicherweise 30 bis 50 Jahren könnte der vollständige Ersatz des Anlagenparks bei kontinuierlichen Reinvestitionszyklen ähnliche lange dauern wie bei Kraftwerken. Aufgrund der teilweise noch niedrigen TR-Level ist bei den heute üblichen Reinvestitionszyklen jedoch überwiegend nicht davon auszugehen, dass alle hier dargestellten innovativen low-carbon-Technologien bis 2050 einen vollständigen Diffusionsprozess durchlaufen haben werden. Dennoch können mit ihrem Einsatz auch bis dahin schon Treibhausgasreduzierungs-effekte erzielt werden und über 2050 hinaus können sie einen

maßgeblichen Beitrag zur dann weitestgehenden Dekarbonisierung der energieintensiven Industrie leisten.

### Ausgewählte aktuelle Forschungsprojekte

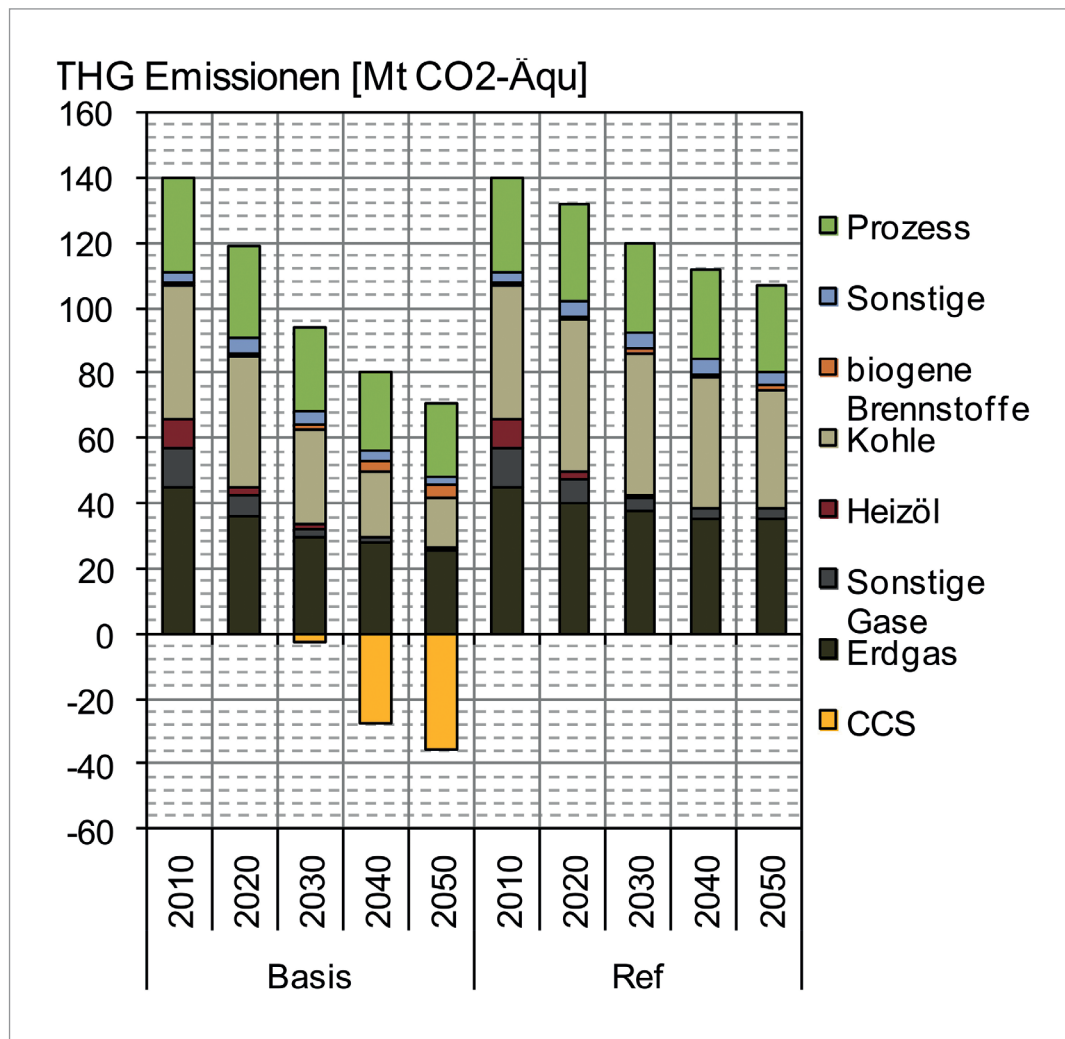
Im Folgenden werden einige ausgewählte Forschungsprojekte zum Themenkomplex einer low-carbon-industry kurz dargestellt, die aktuell von den FVEE-Mitgliedseinrichtungen sowie dem Fraunhofer ISI, das ebenfalls am Projekt „Technologien für die Energiewende“ beteiligt war, erarbeitet werden.

Neben den oben genannten Strategien der Elektrifizierung und Schließung von Kohlenstoffkreisläufen, die für eine weitestgehende Dekarbonisierung der hiesigen energieintensiven Industrie zentral sind, wird dabei auch die direkte Nutzung von solarer Prozesswärme berücksichtigt, die vor allem in sonnenreicheren Regionen eine zusätzliche Dekarbonisierungsoption mit industriepolitischer Relevanz für den deutschen Anlagenbau darstellt.

### Ausgewählte Ergebnisse aus den Langfrist- und Klimaszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland mit Fokus auf den Industriesektor

Ein Forschungsbeitrag des Fraunhofer ISI (s. auch Fleiter et al. 2016, Pfluger et al. 2017) zeigt basierend auf einer modellbasierten Szenarioanalyse, wie eine Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG) um 80% im gesamten Energiesystem bis zum Jahr 2050 erreicht werden kann und welchen Beitrag die Industrie hierzu leisten kann. Für letztere können unter den vorgenommenen Annahmen die THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 83% reduziert werden. Die Berechnung der Szenarien erfolgt mittels des Bottom-up-Modells FORECAST, das die Simulation von unterschiedlichen Politikinstrumenten und induzierten technologischen Wandel ermöglicht. Es bietet dabei eine sehr detaillierte Aufschlüsselung nach einzelnen Technologien und Produktionsprozessen. Das resultierende Minderungsszenario ([Abbildung 4](#)) zeigt dabei, dass die Nutzung von Kohle als Energieträger in allen Sektoren mit Ausnahme der Eisen- und Stahlindustrie zurückgeht. Der jährliche Einsatz von Biomasse steigt etwa auf rund 120 TWh im Jahr 2050 an. Power-to-Heat in Kombination mit Wärmespeichern gewinnt nach 2040 an Bedeutung und erreicht im Jahr 2050 etwa einen Bedarf von ca. 29 TWh. In der Eisen- und Stahlindustrie steigt der Anteil von Elektrostahl stark an. Sekundärproduktion und alternative Materialien werden zunehmend auch in der Papier-, Zement-, Glas- und Aluminiumindustrie eingesetzt. Bis 2050 vermindert die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung jährlich etwa 24 Mt

Abbildung 4  
**THG-Minderungs-**  
**szenario:**  
 ausgewählte Ergebnisse  
 aus Langfrist- und  
 Klimaszenarien für  
 die Transformation  
 des Energiesystems in  
 Deutschland  
 (Quelle: Fraunhofer ISI)



CO<sub>2</sub> aus emissionsintensiven Prozessen wie Zementklinker- und Kalkherstellung, Primärstahlerzeugung sowie den Prozessen des Steam-Cracking und der Synthesegaserzeugung (für Ammoniak und Methanol).

**Klimaschutzszenarien für das Industriecluster der Hafenregion Rotterdam**

Das Wuppertal Institut hat im Auftrag der Hafenbehörde (Port of Rotterdam Authority) langfristige Klimaschutzszenarien für die Hafenregion Rotterdam entwickelt (Samadi et al. 2016). Die Hafenregion beheimatet rund 80% der petrochemischen Industrie der Niederlande und außerdem große Stromerzeugungskapazitäten. Die Klimaschutzszenarien zeigen Möglichkeiten auf, wie die Hafenregion bis Mitte des Jahrhunderts ihre Treibhausgasemissionen in Einklang mit den Klimaschutzzielen der EU drastisch senken kann.

Zu diesem Zweck wurden modellbasiert drei verschiedene prototypische Klimaschutzszenarien für die Hafenregion entwickelt. Das angenommene und je nach Szenario variierte Ambitionsniveau beim europäischen Klimaschutz hat dabei Rückwirkungen auf das zukünftige Absatzpotenzial der im Industriecluster vertretenen Unternehmen. Rückwirkungen ergeben sich z. B. in Bezug auf die Nachfrage nach fossilen Kraftstoffen im Verkehrssektor oder nach Strom aus Kohlekraftwerken.

► *Abbildung 5* zeigt zentrale Investitionen auf der Zeitachse mit den Verzweigungspunkten für die drei strategischen Entwicklungspfade für die Hafenregion hin zu einem low-carbon-industry-cluster. Im links dargestellten Pfad wurde das Hafencenter zu einer Kreislaufwirtschaft weitergedacht, während die beiden Pfade in der Mitte und rechts dargestellt beide auf Carbon Capture and Storage (CCS) als zentrale Strategie setzen und sich deshalb auch erst zu einem späteren Zeitpunkt verzweigen.

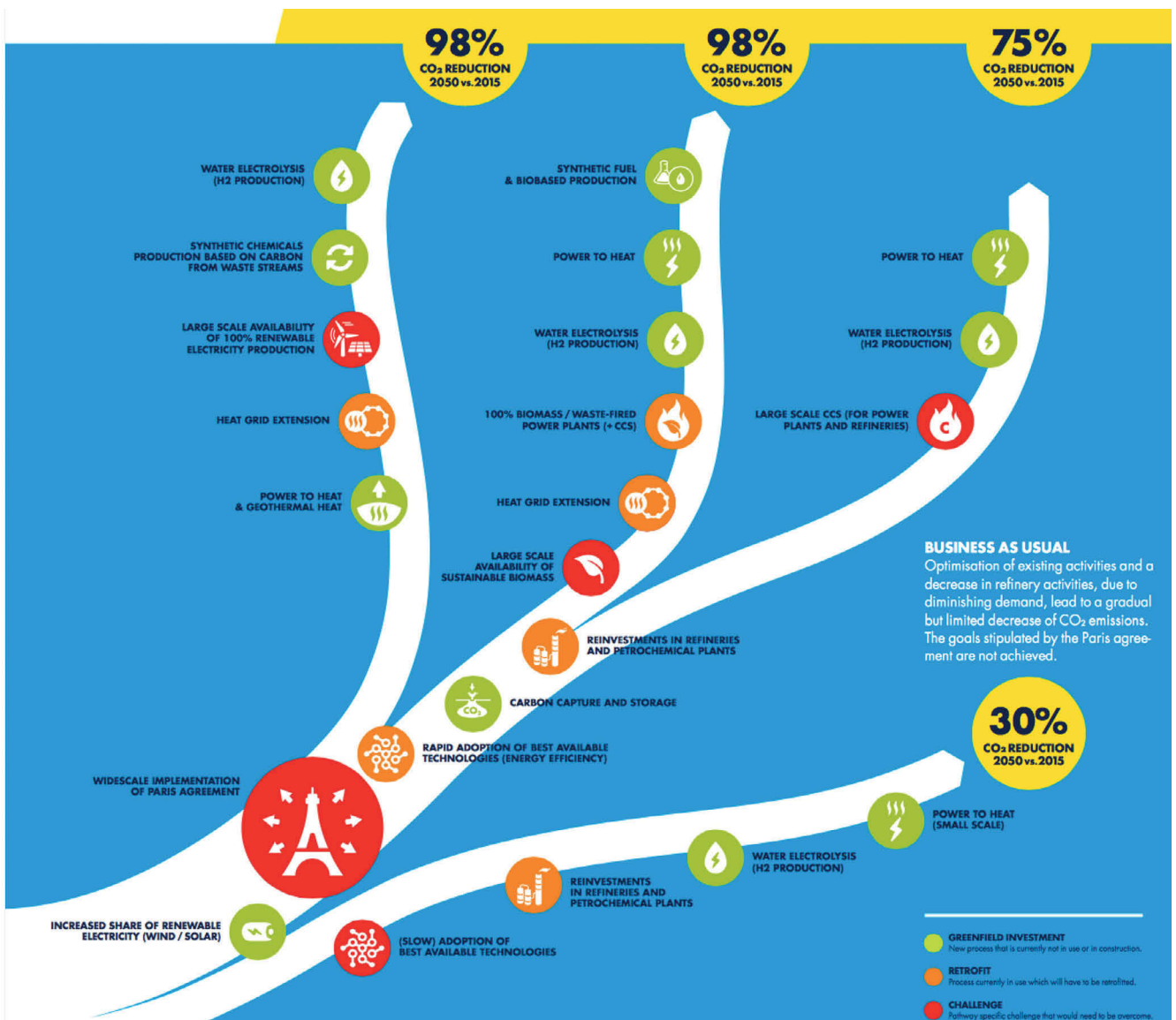


Abbildung 5

**Konzepte für Low-Carbon-Industry-Cluster:**  
 Pfade für das Petrochemie-Cluster am Rotterdammer Hafen  
 (Quelle: Port of Rotterdam Authority)

### Einsatz von Power-to-Heat und thermischen Speichern zur Flexibilisierung von Wärme- und Stromerzeugung

Das DLR untersucht Lösungsansätze für Flexibilisierungsoptionen im Bereich der Strom- und Wärmeerzeugung an integrierten Standorten der chemischen Industrie.

Die chemische Industrie hat einen relativ stetigen Bedarf an Dampf und Strom. Dieser wird heute aus zentralen KWK-Anlagen gespeist, die üblicherweise wärmegeführt betrieben werden (► *Abbildung 6*). Es sind hierbei die Bereiche der Versorgung und Netze (1), zentrale KWK-Erzeugung (2) und Endverbrauch (3) zu unterscheiden. Alle Bereiche bieten Möglichkeiten zur Flexibilisierung (► *Abbildung 6* in kursiver Schrift). Durch den volatiler werdenden Strommarkt

können wärmegeführte KWK-Anlagen nicht immer die notwendigen Erlöse erzielen. Eine Möglichkeit der gleichzeitigen Flexibilisierung von Wärmebezug und Eigenstromerzeugung bietet Power-to-Heat (P2H) in Kombination mit Wärmespeichern. Hierdurch können die Unternehmen durch den Bezug von niedrigpreisigem Strom zur Wärmeerzeugung profitieren, andererseits bleibt die Eigenstromerzeugung in KWK den Zeiten vorbehalten, in der ein Verkauf von Stromüberschüssen lukrativ ist. Die Integration von thermischen Hochtemperatur-Speichern bietet die Möglichkeit, Dampf aus dem Speicher für die Strom- und Wärmeerzeugung bereitzustellen und somit zusätzliches Flexibilisierungs- und damit Kostensenkungs- und CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial zu heben.

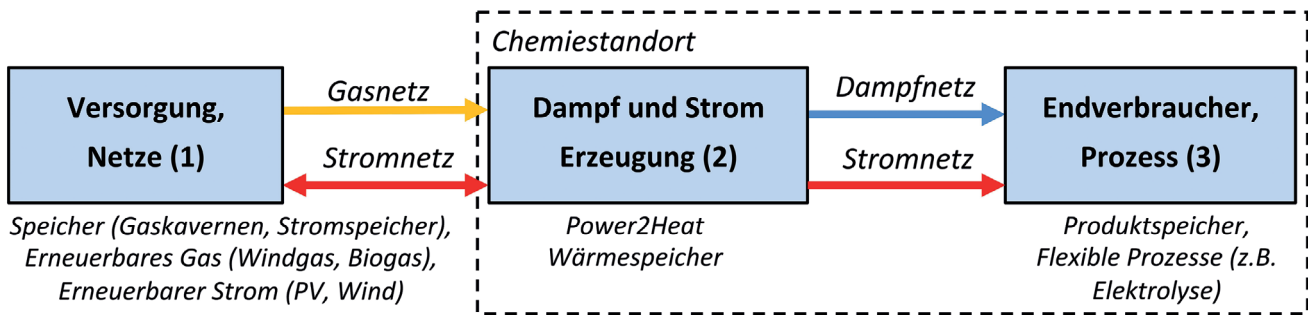


Abbildung 6  
**Einbettung der Dampferzeugung für Chemiestandorte in das Energiesystem**  
 (Quelle: DLR)

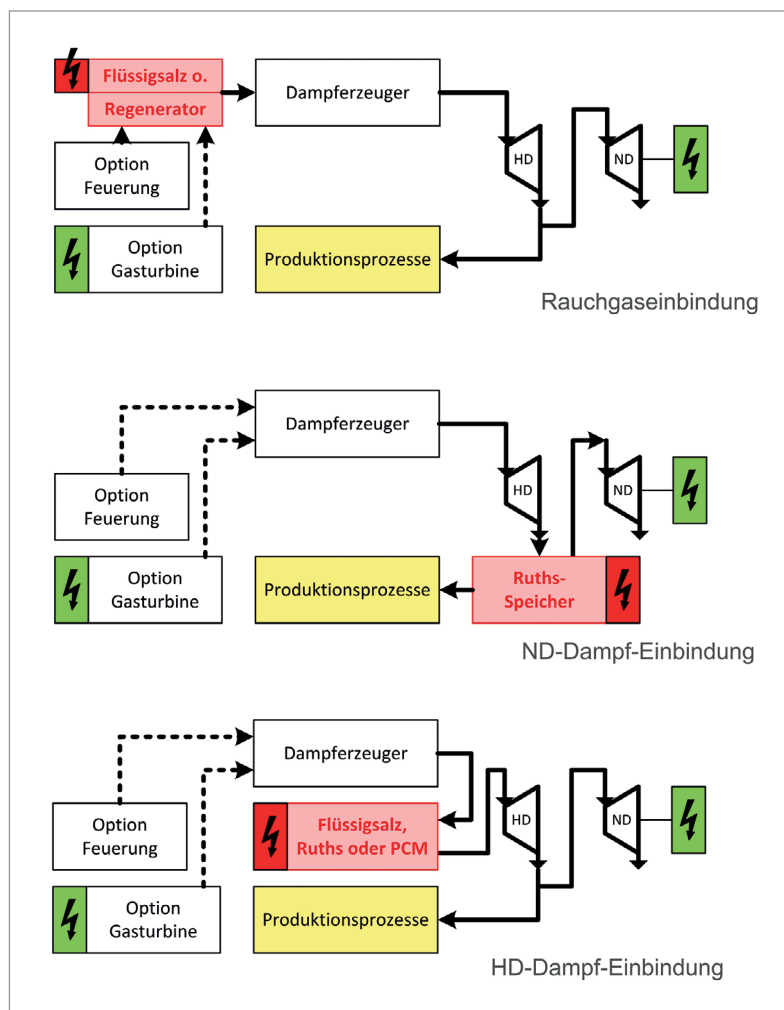
Die Bestimmung eines optimalen Integrationskonzeptes ist eine komplexe Fragestellung. ► **Abbildung 7** zeigt stark vereinfacht drei beispielhafte Optionen, wie sich thermische Speicher in zentrale KWK-Anlagen integrieren lassen. Die beispielhaft gezeigten Wärmespeichertechnologien im Hochtemperaturbereich sind Flüssigsalzspeicher (bekannt aus solarthermischen Kraftwerken), Regeneratoren bzw. Feststoffspeicher (bekannt aus der Eisen- und Stahl- sowie der Glasindustrie), Ruths-Speicher (bekannt aus der Prozessindustrie) und Latentwärmespeicher mit einem Phasenwechselspeichermaterial (engl.

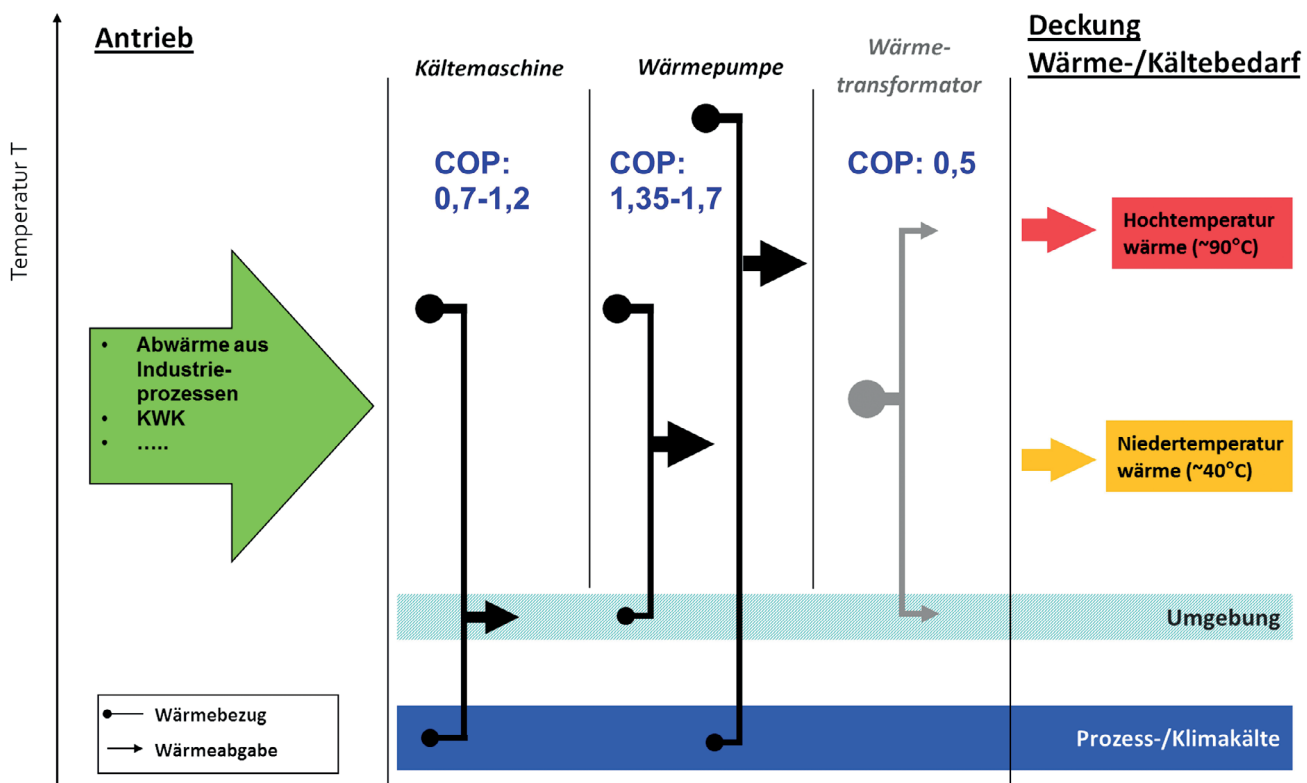
phase change material – PCM, Technologie zur Dampfspeicherung).

Flüssigsalzspeicher, Regeneratoren und Ruths-Speicher sind bereits kommerziell verfügbar. Flüssigsalzspeicher und Regeneratoren werden für den Bedarf in der Kraftwerkstechnik am DLR weiterentwickelt. PCM-Speicher befinden sich ebenfalls in der Forschung und Entwicklung, erste Prototypen wurden vom DLR in der Anwendungsumgebung getestet.

Abbildung 7  
**Integrationsoptionen für thermische Energiespeicher in KWK-Anlagen zur Strom- und Dampfversorgung von Chemieparks**  
 (Quelle: DLR)

- Stromproduktion
- Power-to-heat
- Speicher





### Konzepte für die Kopplung von Abwärmennutzung und Power-to-Heat

Am ZAE Bayern werden Anlagenkonzepte für den Einsatz von Absorptionskältemaschinen bzw. Wärmepumpen zur Steigerung der Effizienz bei der Bereitstellung von Wärme und Kälte erforscht und entwickelt (► *Abbildung 8*). Dabei soll Wärme (z.B. Abwärme aus industriellen Prozessen) nutzbar gemacht werden, um Strom oder Brennstoffe als primäre Antriebsenergie zu ersetzen.

Die klassische Ausführung einer Absorptionskältemaschine ist einstufig. Grundsätzlich gilt: Je höher die Rückkühltemperatur (Temperatur der Umgebung) umso höher muss die Antriebstemperatur sein. Die so genannte Leistungszahl (COP) im Kühlbetrieb erreicht bei einstufigen Anlagen einen Wert von bis zu 0,8. Das heißt, 80% der eingesetzten Wärmeleistung können als Kühlleistung zur Verfügung gestellt werden. Zweistufige Anlagen erreichen einen COP von 1,2, benötigen jedoch deutlich höhere Antriebstemperaturen (mindestens 150 °C).

Die Abhängigkeit der Antriebstemperatur von den Rückkühlbedingungen ist insbesondere für Wärmepumpen wichtig. Bei steigendem Temperaturniveau der Wärmesenke (z. B. Heizung, Prozesswärme) muss auch die Antriebstemperatur steigen. Der Temperaturhub der Wärmepumpe (Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke) hat im

Gegensatz zur Kompressionswärmepumpe jedoch keinen signifikanten Einfluss auf den COP. Mit einer einstufigen Wärmepumpe kann ein Temperaturhub von bis zu 40 K realisiert werden, dabei kann ein COP von bis zu 1,8 erreicht werden. Wird die Wärmepumpe zweistufig ausgeführt, können Temperaturhübe von bis zu 80 K erreicht werden. Der COP für den Heizbetrieb sinkt dadurch jedoch auf Werte im Bereich von 1,35 ab.

Eine Sonderanwendung ist der sogenannte Wärmetransformator. Dieser nutzt typischerweise Wärme auf mittleren Temperaturniveau (50-70 °C) als Antriebsenergie. Durch den Wärmetransformator können z. B. Abwärmeströme auf niedrigem Temperaturniveau ohne Einsatz von weiterer thermischer Energie aufgewertet und so auf einem Temperaturniveau von z. B. 90 °C wieder nutzbar gemacht werden. Dabei können etwa 50% der eingesetzten Abwärme als nutzbare Wärme zurückgewonnen werden.

### Membranen für eine energieeffiziente Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus Industrie und Kraftwerksprozessen (GREEN-CC)

Im Projekt GREEN-CC untersucht das IEK-1 des Forschungszentrums Jülich eine mögliche Integration von keramischen Sauerstofftransportmembranen (OTM)-Modulen in Kraftwerken und der Zementindustrie, wo an den korrespondierenden Oxyfuel-techniken für Carbon Capture geforscht wird.

*Abbildung 8*  
**Effizienzsteigerung durch Wärmetransformation mit Absorptionskältemaschinen, Wärmepumpen oder Wärmetransformator**  
(Quelle: ZAE Bayern)

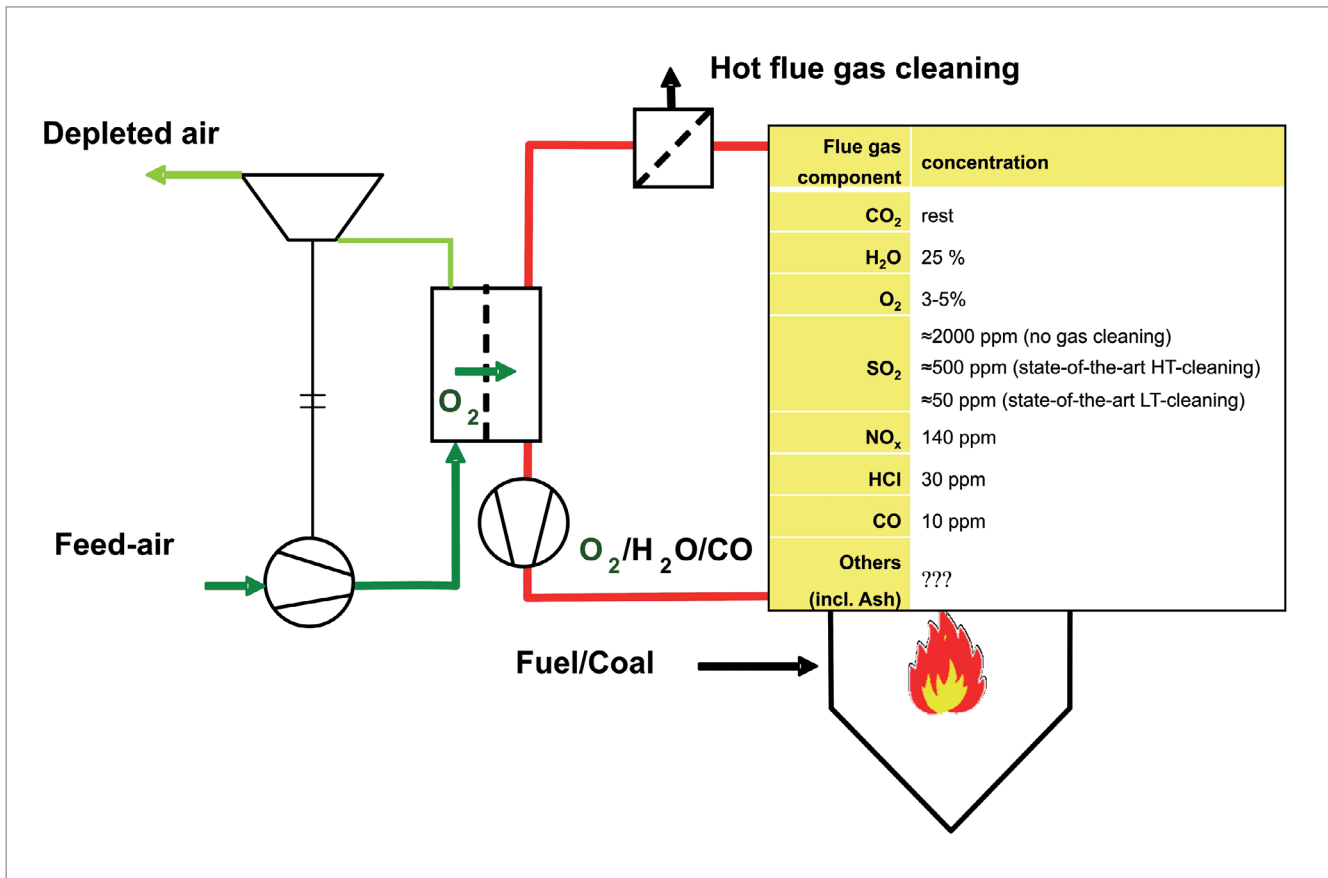


Abbildung 9  
**Beispiel der Anwendung von Sauerstofftransportmembranen (OTM) in einem Oxyfuel-Kraftwerk mit „4-end Integration“**  
 (Quelle: FZJ, IEK-1)

Oxyfuel-Konzepte bieten eine interessante Option, um relativ reine CO<sub>2</sub>-Abgasströme zu generieren, die sich dann mit relativ geringem weiterem technischen Aufwand geologisch einspeichern (CCS) oder in Produkten weiternutzen (CCU) lassen. Letzteres ist im Zuge der Energiewende eine vielversprechende Option um aus dem CO<sub>2</sub> mittels (überschüssiger) erneuerbarer Energie wieder einen Wertstoff wie z. B. Methan zu generieren. Im Oxyfuel-Prozess wird teilweise rezykliertes Abgas mit Sauerstoff angereichert und dem Brenner zugeführt, um einen kohlenstoffhaltigen Energieträger wie Kohle, Erdgas oder Biomasse zu verbrennen. Als Abgas entstehen dann in erster Linie CO<sub>2</sub> und Wasserdampf. Der zusätzliche Energieaufwand dieser Methode gegenüber herkömmlichen Verbrennungsverfahren entsteht durch die Notwendigkeit der Sauerstoffbereitstellung. Das herkömmliche Verfahren hierzu ist die Luftverflüssigung mittels Kryotechnologie, bei der der Sauerstoff bei Temperaturen unterhalb von -190 °C verflüssigt wird. Durch Verwendung von OTM-Modulen (Deibert et al. 2017) kann der Energieaufwand gegenüber der Luftverflüssigung jedoch deutlich gesenkt werden, wenn eine gute Integration in den jeweiligen Prozess gelingt.

OTM-Module können entweder im 3-End-Modus oder im 4-End-Modus betrieben werden. Im 3-End-Modus erzeugt das Membranmodul reinen Sauerstoff, der anschließend mit rezykliertem Rauchgas verdünnt wird, um den Verbrennungsprozess im Kessel zu steuern. In diesem Fall liegt auf der Permeatseite der Membran ein Unterdruck von ca. 100 mbar vor, was für solche Anwendungen energetisch ungünstig ist. Im 4-End-Modus (► [Abbildung 9](#)) wird das rezyklierte Rauchgas auf der Permeatseite der Membran als Transportgas eingesetzt, verdünnt direkt den Sauerstoff und ist somit verbrennungsbereit. Der Vorteil ist die Wärmenutzung des Rauchgases, die zur Aufheizung der Membran verwendet wird.

### Solare Prozesswärme

Das Fraunhofer ISE untersucht in mehreren Projekten eine mögliche zukünftige Rolle solarer Prozesswärme für industrielle Prozesse. Im Fokus stehen dabei die Untersuchung und Umsetzung von Demonstrationssystemen in verschiedenen industriellen Branchen, wie z. B. in Wäschereien, in der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie oder in der chemischen Industrie. Dies wird ergänzt durch Projekte zur Vereinfachung und Absicherung von Projektfinanzierungen, um den hohen Anforderungen der Industrie an Amortisierungszeiten von Maßnahmen gerecht werden zu können.

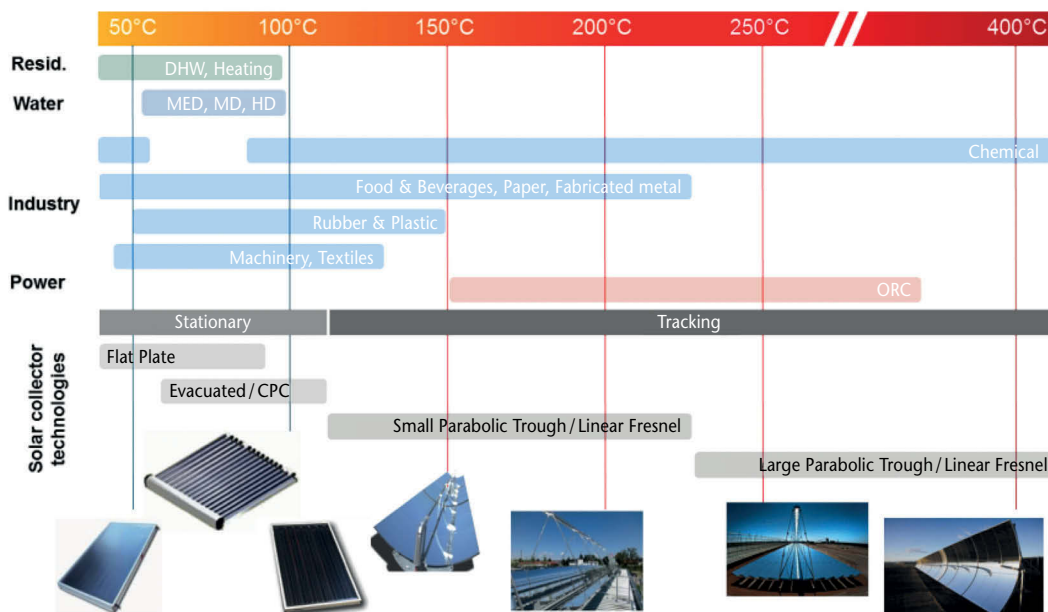


Abbildung 10

**Solare Wärme für industrielle Prozesse**

(Quelle: Fraunhofer ISE)

Die Versorgung von industriellen Prozessen bei niederen ( $T < 150\text{ °C}$ ) und mittleren Temperaturen ( $150\text{ °C} < T < 400\text{ °C}$ ), die gemeinsam etwa 50% des Wärmebedarfs in der Industrie ausmachen, kann mit existierenden Solartechnologien adressiert werden (► *Abbildung 10*). Lösungen für Hochtemperatur-Anwendungen ( $T > 400\text{ °C}$ ) sind im Vergleich dazu weniger weit entwickelt (bis zu TR-Level 5). Neben den eingesetzten Solartechnologien ist dabei auch die vom Standort abhängige, zur Verfügung stehende Solarstrahlung zu berücksichtigen. So eignen sich konzentrierende Kollektoren zur Erzeugung mittlerer und höherer Temperaturen vor allem an Standorten mit hoher Direktstrahlung.

Die Nutzung solarer Wärme für industrielle Prozesse ist immer auch gemeinsam mit weiteren Maßnahmen zu betrachten. Durch Einbindung thermischer Speicher können solare Prozesswärme und die Nutzung existierender Abwärmepotenziale sowohl auf Versorgungs- wie auch auf Prozessebene sinnvoll kombiniert werden. Thermische Speicher erhöhen das Potenzial, neben solarer Wärme und Abwärme auch weitere Quellen wie z. B. Biogas-/Biomasse, Power-to-Heat-Systeme, Wärmepumpen oder Geothermie zu einer hybriden Wärmeversorgung zu kombinieren um höhere Dekarbonisierungsgrade zu erreichen.

Das Fraunhofer ISE arbeitet in verschiedenen Projekten auch an neuen Materialien für Wärmetauscher- und Speicherlösungen.

**Quellen**

- Deibert, W., Ivanova, M.W., Baumann, S., Guillon, O., Meulenber W.A. (2017): Ion-Conducting Ceramic Membrane Reactors for High-Temperature Applications. *Journal of Membrane Science*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2017.08.016>.
- Fleiter, T., Rehfeldt, M., Pfluger, B. (2016): „A transition pathway for Germany's industry: which role for energy efficiency?“ ECEEE industrial summer study 2016.
- Hettesheimer, T. (2017): Technologiebericht 6.1 Energieeffiziente Prozesstechnologien innerhalb des Forschungsprojekts TF\_Energiewende. Technologiebericht. Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.). <https://www.energieforschung.de/energie-und-ressourceneffizienz-industrie>.
- Lechtenböhrer S., Nilsson L.J., Åhman M., Schneider C. (2016): Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification – implications for future EU electricity demand, *Energy* (2016), Volume 115, Part 3, 15 November 2016, Pages 1623–1631, doi: 10.1016/j.energy.2016.07.110

- Pfluger et al. (2017): „ Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“. Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Karlsruhe/Aachen/Heidelberg (2017)  
[https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
- Samadi, S., Lechtenböhrer, S., Schneider, C., Arnold, K., Fishedick, M., Schüwer, D., Pastowski, A. (2016): Decarbonization Pathways for the Industrial Cluster of the Port of Rotterdam. Final report on behalf of the Port of Rotterdam Authority. Wuppertal.
- Schneider, C., Schüwer, D. (2017): Technologiebericht 6.4 Low-carbon und ressourceneffiziente Industrie. Technologiebericht. Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken: Wuppertal Institut, ISI, IZES (Hrsg.).  
<https://www.energieforschung.de/energie-und-ressourceneffizienz-industrie>.
- Umweltbundesamt (Hg.) (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland. Dessau; 2014.