

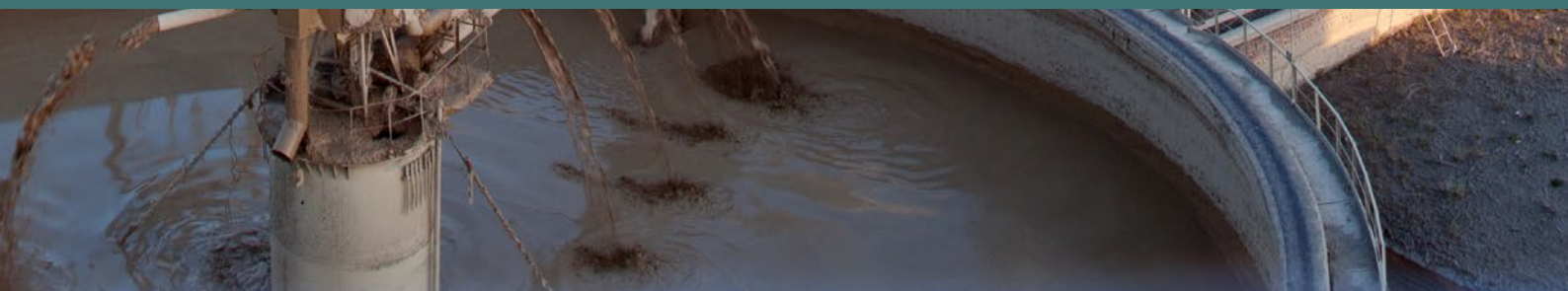


WASSERSTOFF
KOMPASS



INDUSTRIEZWEIGE






Zementindustrie








WASSERSTOFF KOMPASS



ÜBERGREIFENDE ASPEKTE

-  Regulatorischer Rahmen
-  Zielgerichteter H₂-Einsatz
-  Fachkräftesicherung
-  Akzeptanz und Sicherheit
-  Klima und Ressourcen

BEREITSTELLUNG

-  H₂-Erzeugung
-  H₂-Import
-  Infrastruktur




INDUSTRIEZWEIGE

-  Stahlindustrie
-  Chemische Industrie
-  Raffinerien
-  **Zementindustrie**
-  Glasindustrie

MOBILITÄT UND TRANSPORT

-  Kraftfahrzeuge
-  Schifffahrt
-  Luftverkehr
-  Schienenverkehr

ENERGIEVERSORGUNG

-  Gebäudewärme
-  Prozesswärme
-  Stromsystem

GLOSSAR

1 Generelle Aspekte der Zementindustrie

- 2 Brennstoffe für die Zementindustrie
- 2 Die Zementindustrie als Kohlenstoff-Punktquelle
- 2 Wirtschaftliche Bedeutung der Zementindustrie
- 3 Versorgungssicherheit
- 3 Endenergiebedarf
- 3 Treibhausgasemissionen

5 Handlungsoptionen

- 5 Wasserstoff als alternativer Brennstoff
- 8 CO₂-Abscheidung aus dem Klinkerbrennprozess

15 Literatur

Zement

- › Zement ist ein langfristig elementarer Baustoff, dessen Herstellung aufgrund seines hohen Transportgewichts nahe der Nutzung, also vor Ort in Deutschland, erfolgen muss.
- › Knapp die Hälfte der bei der Produktion anfallenden CO₂-Emissionen ist prozessbedingt und lässt sich durch den Einsatz von Wasserstoff nicht vermeiden.
- › Um die Zementherstellung klimaneutral zu gestalten, müssen die prozessbedingten CO₂-Emissionen abgeschieden werden. Diese könnten wiederum der Chemieindustrie als wichtige Kohlenstoffquelle dienen.
- › Der Einsatz von Wasserstoff als Brennmaterial wäre vermutlich bis zu vierzig Prozent möglich. Aber einfacher und kostengünstiger lassen sich die abzuscheidenden CO₂-Mengen reduzieren, indem der biogene Anteil des derzeit genutzten Brennmaterials (Abfälle) noch weiter vergrößert wird.

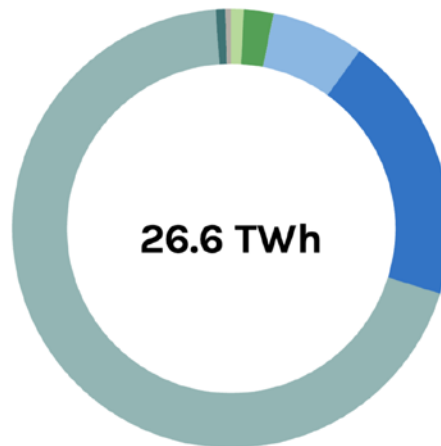
Generelle Aspekte der Zementindustrie

Als essenzieller Bestandteil von konventionellem Beton spielt Zementklinker in der Baubranche eine herausragende Rolle. Zementklinker ist ein Hauptbestandteil von Zement und wird aus gebranntem Kalkstein mit verschiedenen Zuschlägen wie Eisenoxid, Hüttensand und Steinkohleflugasche hergestellt. Durch das Brennen des Kalksteins gast CO₂ aus dem Gestein aus ($\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$). Diese unvermeidlichen prozessbedingten Emissionen machen knapp die Hälfte der Gesamtemissionen aus.^[3]

Brennstoffe für die Zementindustrie

Ein großer Teil der für die Zementherstellung benötigten Energie ist Prozesswärme. Für die Zementherstellung werden Materialtemperaturen von 1.450 Grad Celsius benötigt. Derzeit wird diese Prozesswärme bereits zu siebzig Prozent aus alternativen Brennstoffen wie Tiermehlen, Klärschlamm und Siedlungsabfällen bereitgestellt,^[1] die Zementindustrie möchte den Anteil alternativer Brennstoffe aber noch weiter steigern.^[3]

Brennstoffe
die 2020 für den Klinkerbrennprozess eingesetzt wurden.^[1]



■ Heizöl
 ■ Petrolkoks
 ■ Steinkohle
 ■ Braunkohle
 ■ Alternative Brennstoffe
 ■ Erdgas und andere Gase
 ■ sonstige fossile Brennstoffe

Die Zementindustrie als Kohlenstoff-Punktquelle

Die Zementindustrie wird aufgrund ihrer unvermeidlichen Emissionen als sogenannte CO₂-Punktquelle diskutiert.^{[2][3]} Beim Klinkerbrennprozess anfallendes CO₂ kann zum Beispiel als Kohlenstoffquelle in der chemischen Industrie eingesetzt werden (siehe Reallabor »Westküste100« <https://www.westkueste100.de/>). CO₂-Mengen, die die Kapazitäten für CCU übersteigen, können mittels CCS im geologischen Untergrund verpresst werden.

Wirtschaftliche Bedeutung der Zementindustrie

Im Jahr 2020 betrug der Gesamtumsatz der deutschen Zementindustrie circa drei Milliarden Euro. Die Branche zählt knapp 8.000 Beschäftigte. Es wurden circa 35 Millionen Tonnen Zement im selben Jahr in Deutschland produziert.^[1]



Versorgungssicherheit

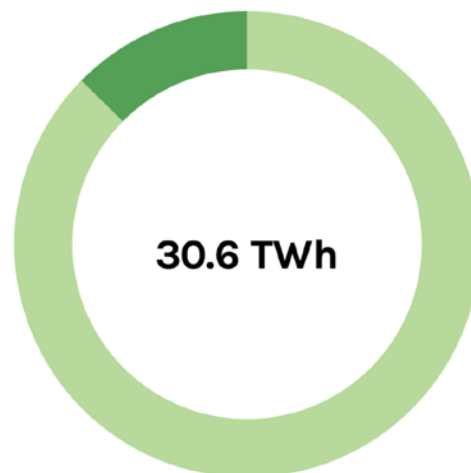
Auch wenn der Klinkeranteil in Zement in Zukunft reduziert wird und alternative Baumaterialien wie zum Beispiel Holz vermehrt eingesetzt werden, wird in Zukunft nicht vollständig auf Zement(klinker) verzichtet werden können. Beispielsweise werden für den Ausbau von Erneuerbare-Energie-Anlagen große Mengen Zement benötigt.

Endenergiebedarf

Der Energiebedarf der Zementherstellung beträgt derzeit circa 882 Kilowattstunden pro Tonne Zement. Davon sind circa 112 Kilowattstunden pro Tonne Zement elektrische Energie. Die verbleibenden 770 Kilowattstunden pro Tonne Zement entsprechen dem thermischen Energiebedarf.^[3]

Endenergiebedarf

Bezogen auf die deutschlandweite Zementproduktion ergibt sich ein jährlicher Energiebedarf von ca. 30,6 TWh. Davon entfallen etwa 3,85 TWh auf den elektrischen Energiebedarf und 26,7 TWh auf die Wärmebereitstellung.^[1]



thermisch elektrisch

Treibhausgasemissionen

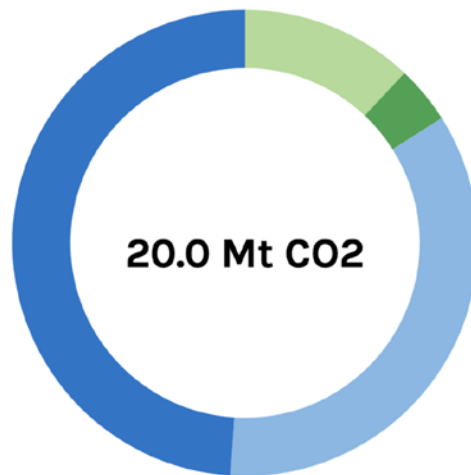
Derzeit verursacht die deutsche Zementindustrie zwanzig Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr in Deutschland.^[7] Dies entspricht circa 3 Prozent der deutschen Gesamtemissionen und 11 Prozent der deutschen Industrieemissionen.^[2]

Der Prozessschritt, der die meisten Emissionen verursacht, ist der Klinkerbrennprozess. Hierbei entstehen insgesamt 84 Prozent der Emissionen, wovon wiederum zwei Drittel der CO₂-Emissionen prozessbedingt aus der Entsäuerung des Kalksteins und ein Drittel aus den Brennstoffen stammen.^[3]



Emissionen

die jährlich bei der Zementherstellung entstehen^[2]



■ Mahlen ■ Transport ■ Brennstoffe ■ aus Kalkstein (unvermeidbar)

AUSWAHL ÖFFENTLICH GEFÖRDERTER PROJEKTE

> Westküste100

<https://www.westkueste100.de/>

> Concrete Chemicals

<https://www.concrete-chemicals.eu/project?!lang=de>



Handlungsoptionen

Wasserstoff als alternativer Brennstoff

Prinzipiell ließen sich die brennstoffbedingten Emissionen bei der Zementherstellung durch den Einsatz von Wasserstoff reduzieren. Die bisherigen Erkenntnisse hierfür basieren auf einem ersten Kurztest von wenigen Stunden in einem Zementwerk in Großbritannien. Hierbei wurden vierzig Prozent der thermischen Energie durch H₂ bereitgestellt. H₂ als Gas weist deutlich andere Brenneigenschaften hinsichtlich seiner Wärmeübertragung und des resultierenden Temperaturprofils im Ofen auf. Der Kurztest konnte allerdings zeigen, dass diese technische Hürde überwunden werden kann. Bedingt durch die Versuchsdauer von wenigen Stunden (Drehrohröfen in Zementwerken laufen in der Regel fast das ganze Jahr ohne Unterbrechung) konnten keine Rückschlüsse auf Auswirkungen auf die Klinkerqualität oder Materialschäden durch Korrosion an der Anlage gezogen werden.^[5] Gegenstand aktueller Diskussionen ist ein H₂-Einsatz von zehn Prozent bezogen auf die thermische Energie.^{[3][5]}

Voraussetzungen

- › Langzeitverträglichkeit des H₂-Einsatzes als Brennstoff hinsichtlich der Zementqualität muss gewährleistet sein.
- › Es müssen entsprechende Mengen klimaneutralen Wasserstoffs zur Verfügung stehen: Drehrohröfen, wie sie bei der Zementherstellung zum Einsatz kommen, werden rund um die Uhr betrieben. Nutzungsunterbrechungen führen zur Beschädigung der Anlage, was erhebliche Kosten verursachen kann. Für eine Beimischung von zehn Prozent H₂ als Brennstoff (bezogen auf die thermische Energie) geht die European Cement Research Academy (ECRA) von einem Bedarf von 0,7 Tonnen H₂ pro Stunde in einem Zementwerk aus.^[5]
- › Wird der H₂ nicht vor Ort erzeugt, werden H₂-Transport und -Speicherinfrastrukturen benötigt. Speicher sind insbesondere nötig, damit der Ofen unterbrechungsfrei betrieben werden kann und somit nicht beschädigt wird.^[5]

Vorteile

- › Die brennstoffbedingten Treibhausgas-Emissionen können reduziert werden.
- › Wird der Wasserstoff vor Ort im Zementwerk mittels Elektrolyse erzeugt, kann der dabei als Nebenprodukt anfallende Sauerstoff für den Brennprozess in Form eines Oxyfuelverfahrens eingesetzt werden.

Nachteile

- › H₂ wird vermutlich auch in Zukunft deutlich teurer als alternative Brennstoffe wie etwa Klärschlamm, Altreifen, Tiermehl und andere Abfallprodukte sein.
- › Zwar ist es technisch möglich, bis zu zehn Prozent der notwendigen Energie durch H₂ zu decken, ohne die Produktqualität zu beeinträchtigen.^[3] Da die Brennstoffe aber nur zu 30 Prozent zu den Emissionen beitragen, sind die Emissionseinsparungen durch Wasserstoffeinsatz relativ gering.

- › Durch die prozessbedingten Emissionen muss zwangsläufig CO₂ abgeschieden werden, um Klimaneutralität zu erzielen. Der Einsatz von H₂ ist mit hohen Kosten und erheblichem Aufwand verbunden, die lediglich zu einer geringfügig verminderten abzuscheidenden CO₂-Menge führen würden.

Folgen

- › Da die bei der Verbrennung der derzeitig verwendeten Brennmaterialien anfallenden Aschen ein notwendiger Bestandteil des Zements sind und H₂ ohne Asche verbrennt, muss diese anderweitig erzeugt/zugesetzt werden. Auch durch die Defossilisierung der Stahlindustrie werden weniger Flugasche und Hüttensand anfallen, welche heute ebenfalls zu großen Teilen für die Klinkerherstellung verwendet werden.

Ökonomische Aspekte

Die ECRA (European Cement Research Academy) schätzt die Kosten für eine Umrüstung eines Drehrohrofens zur Herstellung von 6.000 Tonnen Klinker pro Tag auf eine H₂-Beimischung von 10 Prozent wie folgt ein:

- › 2,3 bis 4,5 Millionen Euro Investitionskosten
- › Die Betriebskosten hängen hierbei stark vom H₂-Preis ab. Bei einem H₂-Einkaufspreis von 3,20 Euro pro Kilogramm würde sich die Tonne Zement um 5,40 Euro verteuern.^[5] Dies entspräche einem Preisanstieg von knapp 10 Prozent für eine Emissionseinsparung von circa 3 Prozent.
- › Sollten die H₂-Preise allerdings auf 1,50 Euro pro Kilogramm sinken, würde die Tonne Zement nur noch um 1,90 Euro teurer,^[5] was einem Preisanstieg von weniger als 5 Prozent entspräche.

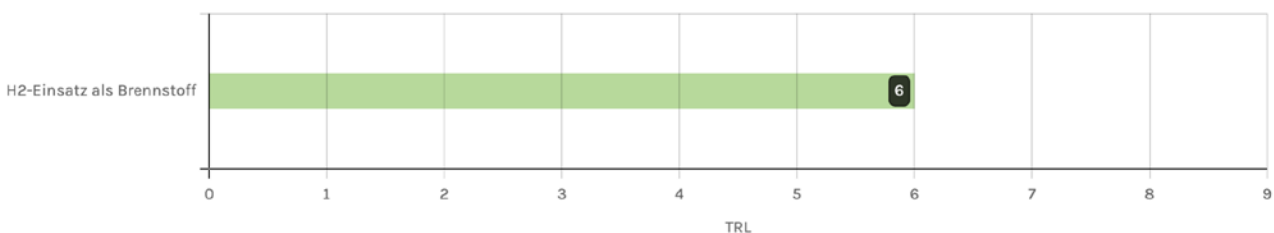
Akteur*innen

- › Zementindustrie

Technologiereifegrad

Der Technologiereifegrad für die Nutzung von Wasserstoff als alternativer Brennstoff beträgt 6.^[5]

Technologiereifegrad





Endenergiebedarf

Der Endenergiebedarf bleibt unverändert, da einfach nur ein Teil der Brennstoffenergie in Form von H₂ zur Verfügung gestellt wird. Wenn die Wasserstoffherzeugung vor Ort im Zementwerk erfolgt, erhöht sich der Energiebedarf des Werks allerdings, da bei der Elektrolyse nicht aller eingesetzte Strom zu H₂ umgesetzt werden kann. Der zusätzlich entstehende Sauerstoff kann hier aber wiederum in einem Oxyfuelverfahren zur CO₂-Abscheidung genutzt werden.^[5]

Treibhausgasemissionen

Durch den Einsatz von H₂ als alternativem Brennstoff können lediglich die brennstoffbedingten, nicht aber die prozessbedingten Emissionen beeinflusst werden. Es würden also trotz H₂-Einsatzes alleine für den Brennprozess CO₂-Emissionen in Höhe von mindestens 400 Kilogramm CO₂ pro Tonne Portlandzement^[3] anfallen.

Wasserstoffbedarfe

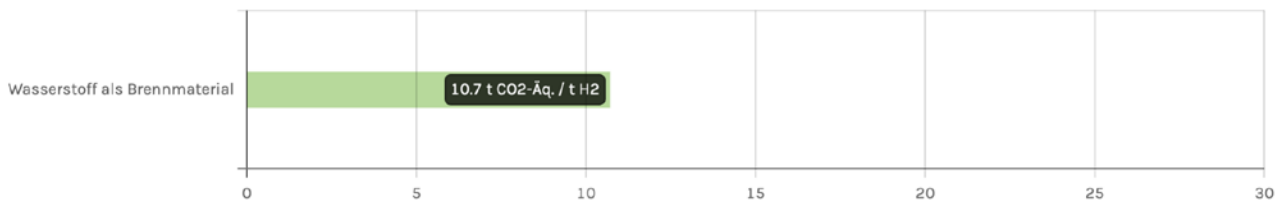
28 Kilogramm H₂/Tonne Klinker bei einem Anteil von 10 Prozent H₂ an der Brennstoffenergie.^[5]

Minderungspotential

Beim Einsatz von 10 Prozent H₂ als Brennmaterial können 30 Kilogramm CO₂ pro Tonne Klinker eingespart werden.^[5] Klinker ist ein Bestandteil von Zement. Portlandzement, die derzeit gebräuchlichste Sorte, besteht zu zwei Dritteln aus Klinker.^[6] Daraus ergibt sich also ein maximales Minderungspotenzial von 10,7 Tonnen CO₂ pro Tonne H₂ für Portlandzement bei einem Einsatz von 10 Prozent H₂ im Brennprozess.

Treibhausgaseinsparpotenzial

durch Beimischung von Wasserstoff als Brennmaterial könnten 10,7 Tonnen CO₂ pro Tonne H₂ eingespart werden.





CO₂-Abscheidung aus dem Klinkerbrennprozess

Vor allem der EU ETS und der CBAM werden automatisch Anreize schaffen, CO₂-Emissionen zu vermeiden.^[9] Allerdings wird die deutsche Zementindustrie auch nach Ausschöpfen aller Maßnahmen zur CO₂-Vermeidung weiterhin circa zehn Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr materialbedingt verursachen, welche aus dem Prozess abgeschieden werden müssen.^[3] Die Verfahren hierfür sind sehr energieintensiv und werden somit den Preis von Zement und Beton beeinflussen, allerdings wird eine klimaneutrale Zementindustrie ohne CO₂-Abscheidung nicht realisierbar sein.^{[2][3][5]}

Für die Zementindustrie relevante CO₂-Abscheidungstechnologien sind das Oxyfuel-Verfahren, die Abscheidung mittels Monoethanolamin (MEA), das Tail-end Calcium-Looping-Verfahren, das integrierte Calcium-Looping-Verfahren, die indirekte Kalzinierung, membranbasierte Verfahren, mineralische Karbonatisierung, Temperaturwechseladsorption und Kryogenverfahren in Kombination mit Druckwechseladsorption.^[5]

Voraussetzungen

- › Einer Abscheidung von CO₂ aus dem Klinkerbrennprozess muss in der Regel ein Umbau der Ofenanlage vorausgehen.
- › Die CO₂-Abscheidung erfordert große Mengen an CO₂-armer Energie und grünem Strom.
- › Die Abscheidung großer CO₂-Mengen, wie sie in der Zementindustrie anfallen, erfordern eine CO₂-Infrastruktur.
- › Soll aus dem Prozess abgeschiedenes CO₂ in Deutschland

in geologischen Formationen gespeichert werden (siehe auch Speicherung von CO₂), muss die Rechtslage hierfür geschaffen werden, da dies derzeit faktisch verboten ist.

Vorteile

- › Die Zementherstellung kann nur mithilfe von CO₂-Abscheidung klimaneutral werden.^{[2][3]}
- › CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung werden nahezu vollständig vermieden.^[5]
- › CO₂ kann für weitere Wertschöpfung genutzt werden.

Nachteile

- › CO₂-Abscheidung ist energieintensiv und daher teuer.^[5]

Folgen

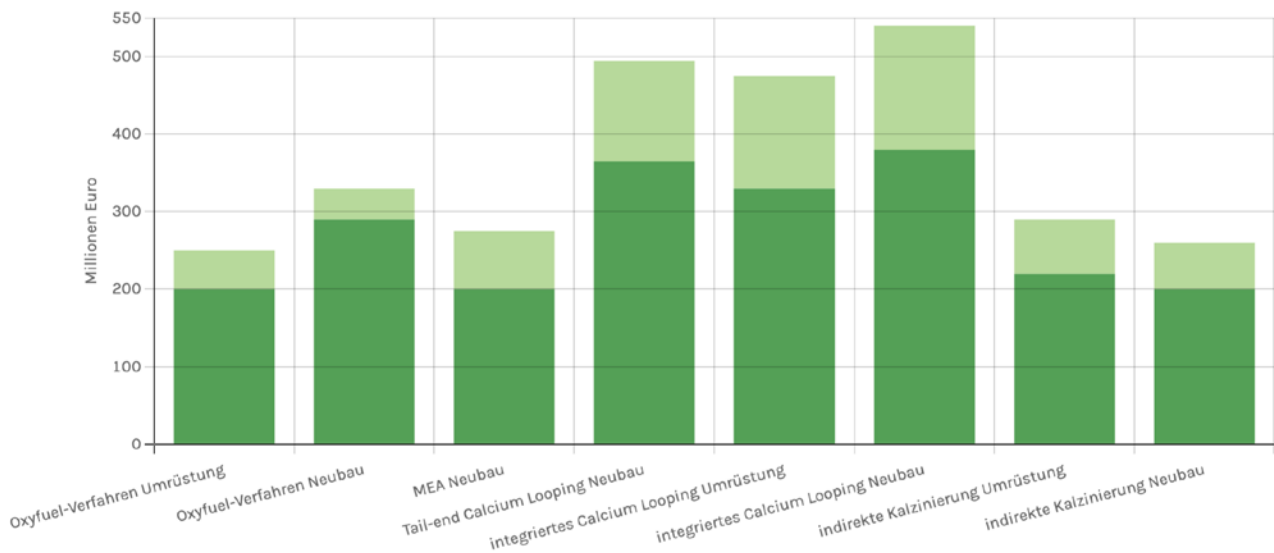
- › Zementherstellung wird signifikant mehr Energie benötigen.^[5]
- › Zement und damit auch Beton werden dementsprechend teurer.^{[4][5]}

Ökonomische Aspekte

Bei CO₂-Abscheidung kann sich je nach Technologie der elektrische Energiebedarf der Zementherstellung mehr als verdoppeln.^[3] Hinzu kommen in der Regel Investitionen für Neubau von Abscheidervorrichtungen oder Umrüstungen an den Ofenanlagen.^[5] Hierdurch werden Zement und damit auch Beton teurer. Dies wirkt sich wiederum auf den Ausbau von Infrastruktur etc. aus.

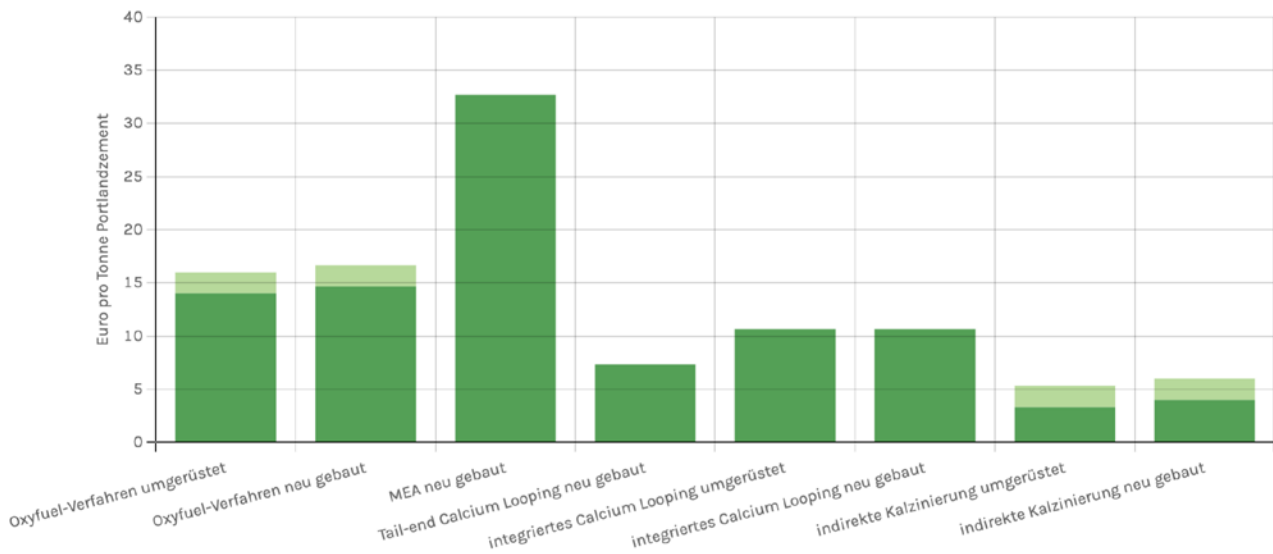
Umrüstungs- und Neubaukosten (CAPEX) für CO₂-Abscheidungsanlagen in Millionen Euro

Die aufgeführten Investitionskosten beinhalten lediglich die Abscheidungsanlage. Weitere gegebenenfalls notwendige Investitionen wie temporäre CO₂-Speicher etc. sind nicht enthalten und können die Investitionskosten um bis zu 100 Prozent erhöhen. Es werden nur derzeit bereits technisch verfügbare Verfahren verglichen. Prognosen zu den zukünftigen Kosten der anderen Verfahren (Membranverfahren, Kryogenverfahren in Kombination mit Druckwechseladsorption, Temperaturwechseladsorption und mineralische Karbonatisierung) können in ^[5] gefunden werden. Bei MEA und Tail-end Calcium-Looping handelt es sich als "end of pipe"-Maßnahmen immer um Neubauten. Angaben zu Umrüstungen fehlen daher.^[5]



Zusätzliche Betriebskosten (OPEX) für CO₂-Abscheidungsanlagen bei Umrüstung oder Neubau in Euro pro Tonne Zement

Die aufgeführten zusätzlichen Betriebskosten beziehen sich lediglich auf für die CO₂-Abscheidung benötigte Energie und Materialien, Bezugsjahr der Kosten ist 2020. Es werden nur derzeit bereits technisch verfügbare Verfahren verglichen. Prognosen zu den zukünftigen Betriebskosten der anderen Verfahren (Membranverfahren, Kryogenverfahren in Kombination mit Druckwechseladsorption, Temperaturwechseladsorption und mineralische Karbonatisierung) können in ^[5] gefunden werden. Bei MEA und Tail-end Calcium-Looping handelt es sich als "end of pipe"-Maßnahmen immer um Neubauten. Angaben zu Umrüstungen fehlen daher.^[5]

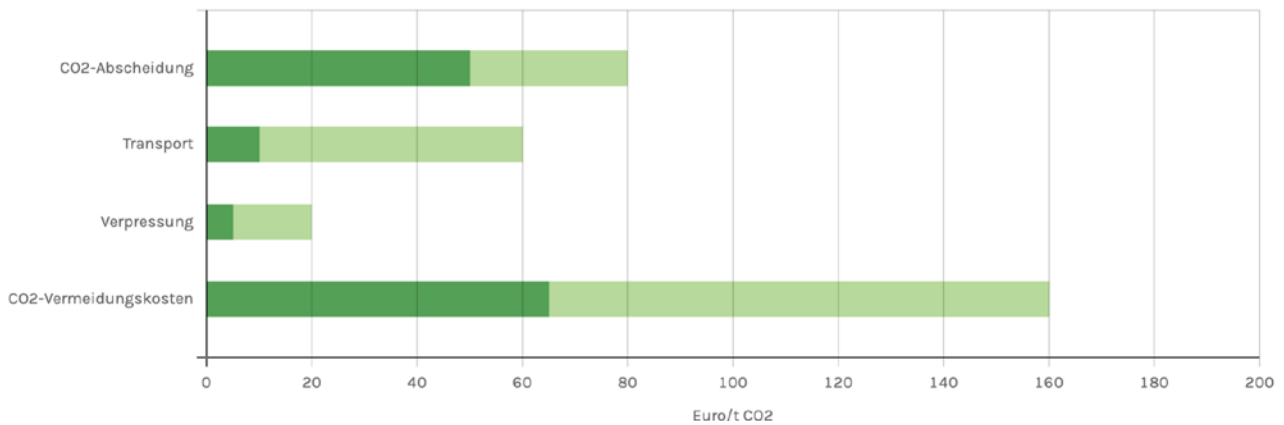


Schätzungen der ECRA belaufen sich auf eine Preissteigerung um 40 bis 95 Euro pro Tonne Zement bei CO₂-Abscheidung und Verpressung im Untergrund ^[4] (zum Vergleich: Warenwert entspricht 64 Euro pro Tonne Zement, ^[2] der Preis für Zement würde sich also ungefähr verdoppeln). Die Kosten für die Abscheidung des CO₂ belaufen sich hierbei voraussichtlich auf 50 bis 80 Euro pro Tonne CO₂ (pro Tonne Zement entstehen circa 600 Kilogramm CO₂). Die Transportkosten werden auf 10 bis 60 Euro pro Tonne CO₂ geschätzt und die Verpressung im geologischen Untergrund wird mit 5 bis 20 Euro pro Tonne CO₂ veranschlagt. Somit ergeben sich also CO₂-Vermeidungskosten von 65 bis 160 Euro pro Tonne CO₂.^[4]

Versorgungssicherheit

CO₂-Vermeidungskosten in Euro / Tonne CO₂

Kosten für die CO₂-Abscheidung, den Transport und die Verpressung des CO₂ sowie kumulierte CO₂-Vermeidungskosten.^[4]



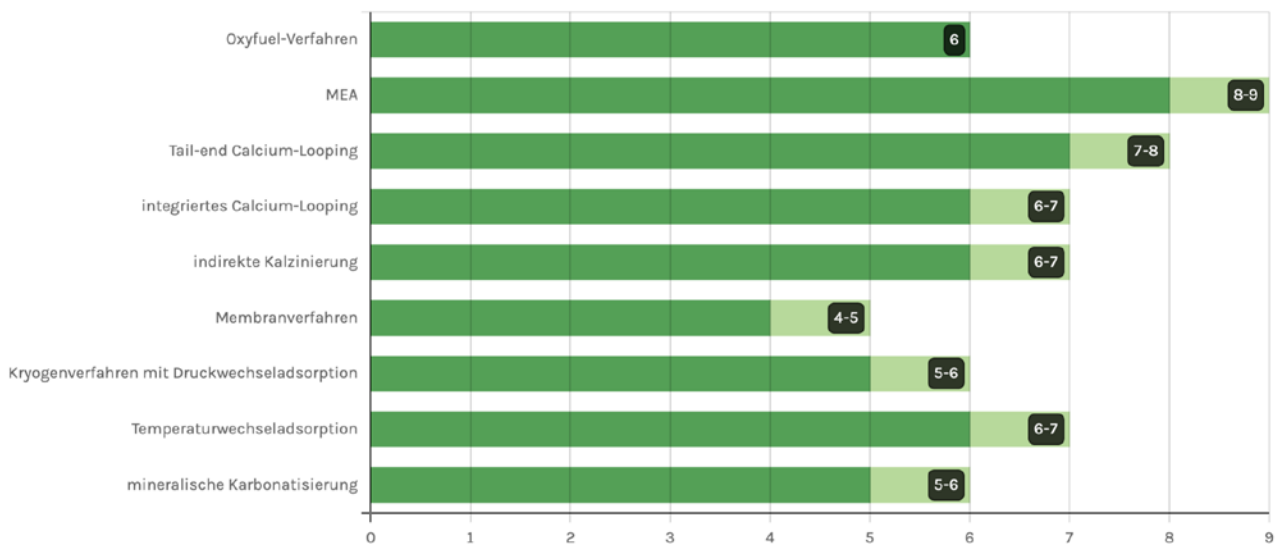
Akteur*innen

> Zementwerke

Technologiereifegrad

TRL

der aktuell technisch bereits zur Verfügung stehenden Abscheidungstechnologien laut ECRA^[5]

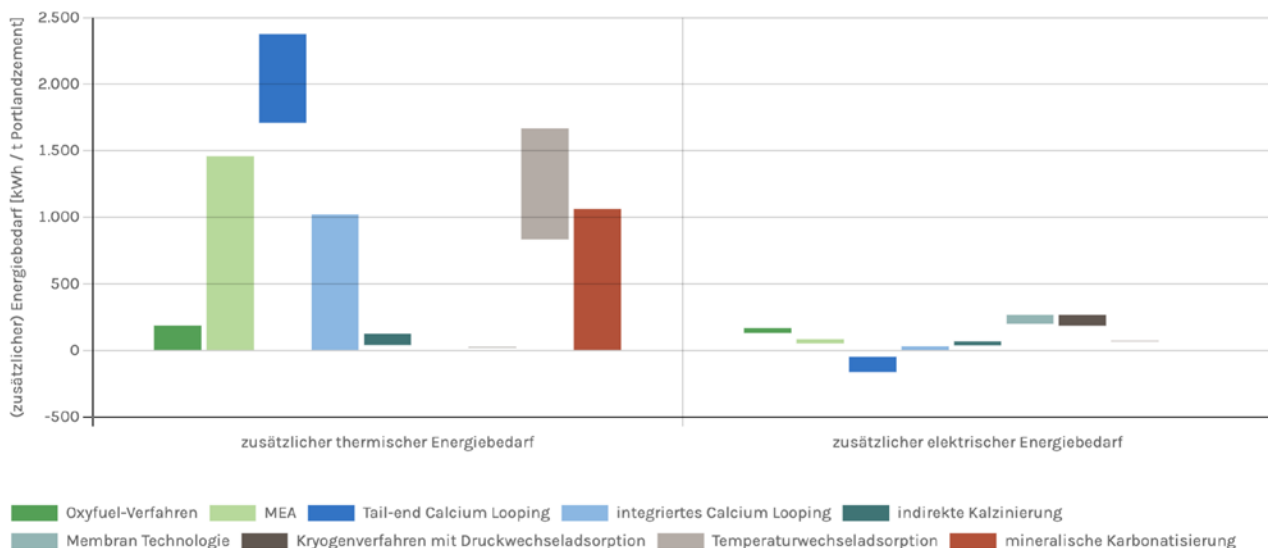


Endenergiebedarf

CO₂-Abscheidung ist energieintensiv und benötigt, je nach Verfahren, unterschiedliche Mengen an thermischer oder elektrischer Energie. Bei CO₂-Abscheidung kann sich der elektrische Energiebedarf der Zementherstellung mehr als verdoppeln.^[3] Eine Aufstellung für derzeit bereits verfügbare Verfahren ist in der folgenden Grafik dargestellt.

(Zusätzlicher) Energiebedarf in Kilowattstunden pro Tonne Portlandzement

für unterschiedliche CO₂-Abscheidungstechnologien im Vergleich zum Energiebedarf der Klinkerherstellung ohne CO₂-Abscheidung. Daten aus Referenz^[5]. Zum Vergleich: Der Energiebedarf der Zementherstellung beträgt derzeit circa 882 kWh / t Zement. Davon sind circa 112 kWh / t Zement elektrische Energie und 770 kWh / t Zement thermischer Energiebedarf.^[3] Die negativen elektrischen Energiebedarfe im Falle von Tail-end Calcium-Looping ergeben sich aus dem stark erhöhten thermischen Energiebedarf. Hierdurch kann Abwärme verstromt werden und mehr elektrische Energie erzeugt als verbraucht werden. Bei der mineralischen Karbonatisierung ist von einem Anstieg des elektrischen Energiebedarfs auszugehen, allerdings kann dieser derzeit nicht näher quantifiziert werden.



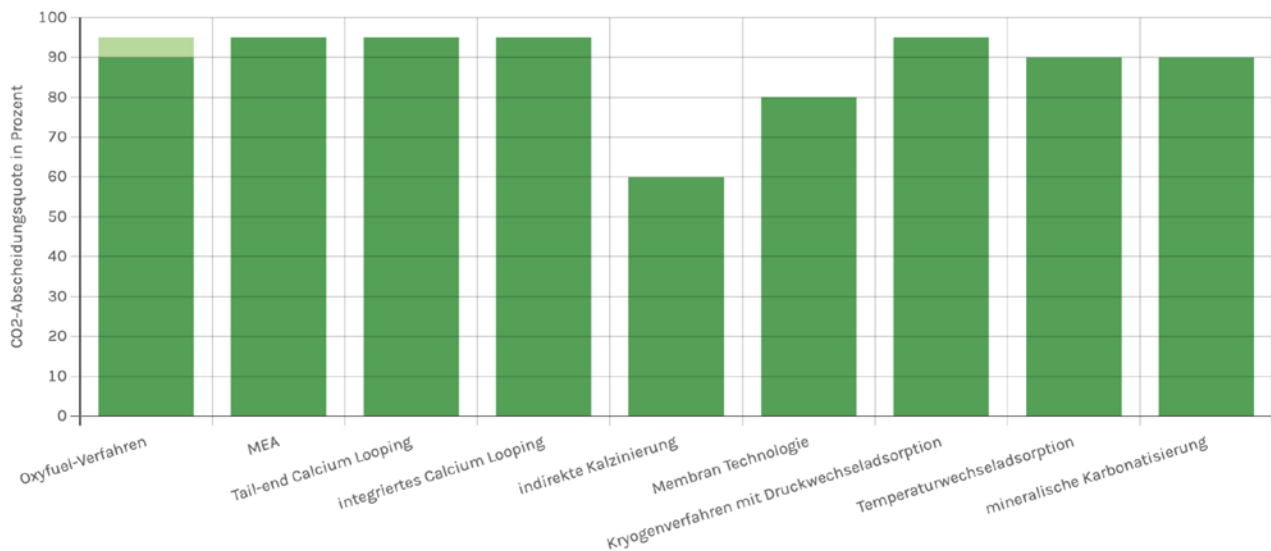
AUSWAHL RELEVANTER PROJEKTE

- > CEMCAP-project
<https://www.sintef.no/projectweb/cemcap/>
- > CLEANKER
<http://www.cleanker.eu/>
- > Westküste100
<https://www.westkueste100.de/en/>
- > Carbon2Business
<https://perspektiven.holcim.de/innovation/carbon2business-eu-foerdergelder-fuer-zementwende/>
- > Leilac-1
<https://www.leilac.com/project-leilac-1/>
- > Leilac-2
https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Projekte/CO2Speicherung/Laufend/LEILAC2.html

Minderungspotential

CO₂-Abscheidungsquoten in Prozent nach Technologie

Der vergleichsweise niedrige Wert bei der indirekten Kalzinierung liegt daran, dass hier nur prozessbedingtes CO₂ abgeschieden werden kann. Für brennstoffbedingte Emissionen müssen andere Technologien ergänzt werden oder aber der Brennstoff-Mix dekarbonisiert werden.^[5]



Um eine Tonne CO₂ abzutrennen, sind 450 bis 2.000 Kilowattstunden je nach Abscheidungstechnologie erforderlich.^[8]

MASSNAHMEN

MASSNAHME

> Anpassung des Rechtsrahmens für CCU und CCS in Deutschland

Da Zementherstellung mit großen Mengen sogenannter prozessbedingter oder unvermeidbarer Emissionen einhergeht, wird die Umstellung auf eine klimaneutrale Produktion neben CO₂-Abscheidung auch auf Wege angewiesen sein, das CO₂ entweder langfristig zu speichern (CCS) oder aber zu verwerten.

- > Derzeit ist noch nicht geklärt, wem entlang einer CCU-Kette die CO₂-Minderung angerechnet werden kann.^[2] Um CO₂-Abscheidung attraktiv zu machen, sollte es hier einen einheitlichen, transparenten Rechtsrahmen geben.
- > Soll CO₂ in Deutschland in geologischen Formationen gespeichert werden (siehe auch CCS), muss die Rechtslage hierfür geschaffen werden, da dies derzeit faktisch verboten ist.^{[10][11]} Um CO₂ über das Meer beispielsweise nach Norwegen transportieren zu können, muss die Öffnungsklausel im London-Protokoll von Deutschland ratifiziert werden.

**INITIATOREN**

- › Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
- › Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

MASSNAHME**› Gesetzesinitiativen zum Anreizen von CO₂-Vermeidung**

Durch einen steigenden CO₂-Preis im ETS wird CO₂-Abscheidung in der Zementherstellung angereizt. Die Kosten für Zement werden allerdings infolge der Umbauten der Anlagen und des erhöhten Energiebedarfs durch die CO₂-Abscheidung deutlich ansteigen. Um die Wettbewerbsfähigkeit von klimaschonender Zementherstellung noch weiter zu steigern, können zusätzliche Mechanismen wie der CBAM oder Klimaschutzverträge (CCfDs) gewählt werden.

Literatur

- [1] **Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg:** Zementindustrie im Überblick 2021/2022, Berlin, 2021. <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/zementindustrie-im-ueberblick-2021-2022>
- [2] **WWF Deutschland, Hrsg.:** Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie – Hintergrund und Handlungsoptionen, Berlin, 2019. https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf
- [3] **Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg:** Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2020. <https://vdz.info/dekarbonisierung>
- [4] **ECRA:** Newsletter 2/2020. https://ecra-online.org/fileadmin/ecra/newsletter/ECRA_Newsletter_2_2020.pdf
- [5] **ECRA:** The ECRA Technology Papers, Düsseldorf, 2022. https://ecra-online.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/ECRA_Technology_Papers_2022.pdf
- [6] **Energie-Experten, Portlandzement:** Rohstoffe, Eigenschaften und Anwendung, zuletzt aufgerufen am: 07.08.2023. <https://www.energie-experten.org/bauen-und-sanieren/baustoffe/beton/portlandzement>
- [7] **Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg:** Zementindustrie im Überblick 2020/2021, Berlin, 2020. <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/zementindustrie-im-ueberblick-2020-2021>
- [8] **D4.6 CEMCAP:** comparative techno-economic analysis of CO₂ capture in cement plants, 2018. <https://zenodo.org/record/2597091#.ZBmGynbMJ3g>
- [9] **Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt):** Schutz vor Carbon Leakage, zuletzt aufgerufen am: 28.08.2023. https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/Reform-Perspektiven/Carbon-Leakage-Schutz/carbon-leakage-schutz_node.html
- [10] **Sprenger, T. (2022):** CO₂-Infrastrukturen sind wichtig für ein klimaneutrales Deutschland. EWI Policy Brief. https://www.ewi.uni-koeln.de/cms/wp-content/uploads/2022/07/Policy_Brief_CO2-Infrastrukturen.pdf
- [11] **acatech (2018):** CCU und CCS – Bausteine für den Klimaschutz in der Industrie (acatech POSITION), München: Herbert Utz Verlag. https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/09/acatech_POSITION_CCU_CCS_WEB-002_final.pdf



Beteiligte Institutionen

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

www.acatech.de

Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Die DECHEMA ist das kompetente Netzwerk für chemische Technik und Biotechnologie in Deutschland. Sie vertritt als gemeinnützige Fachgesellschaft diese Gebiete in Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. Die DECHEMA fördert den technisch-wissenschaftlichen Austausch von Fachleuten unterschiedlicher Disziplinen, Organisationen und Generationen und bündelt das Know-how von über 5.500 Einzel- und Fördermitgliedern. Sie engagiert sich in (inter-)nationalen technischen Expertengremien und ist in öffentlich geförderten F&E-Projekten sowie der Auftragsforschung aktiv. Dabei koordiniert sie große Forschungsverbände und ist in verschiedenen Fördermaßnahmen für die Begleitforschung verantwortlich.

www.dechema.de

Autor*innen

- > **Dr. Jens Artz**
Teamleiter DECHEMA
- > **Dr. Benjamin Baur**
Referent Stakeholder-Dialog acatech
- > **Marie Biegel**
Studentische Hilfskraft acatech
- > **Dr. Dominik Blaumeiser**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Jasper Eitze**
Teamleiter acatech
- > **Dr. Alexandra Göbel**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Tamara Hanstein**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Dr. Christopher Hecht**
Wissenschaftlicher Referent ISEA RWTH Aachen University / acatech
- > **Thomas Hild**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Florian Hölting**
Wissenschaftlicher Referent ISEA RWTH Aachen University / acatech
- > **David Knichel**
Wissenschaftlicher Referent acatech
- > **Valerie Kwan**
Referentin Stakeholder-Dialog acatech
- > **Jördis Lemke**
Teamassistentin acatech
- > **Dr. Michaela Löffler**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Dr. Andrea Lübcke**
Teamleiterin acatech
- > **Alena Müller**
Referentin Stakeholder-Dialog acatech
- > **Lars Ole Reimer**
Redakteur Multimedia acatech
- > **Dr. Damien Rolland**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Anna Runkel**
Studentische Hilfskraft acatech
- > **Emre Yildirim**
Studentische Hilfskraft acatech

Ansprechpartner*innen acatech

- > **Jasper Eitze**
eitze@acatech.de
- > **Dr. Andrea Lübcke**
luebcke@acatech.de

Ansprechpartner*innen DECHEMA

- > **Dr. Jens Artz**
jens.artz@dechema.de
- > **Dr. Michaela Löffler**
michaela.loeffler@dechema.de



WASSERSTOFF KOMPASS

IMPRESSUM

Wasserstoff-Kompass
- Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft

Herausgebende

**acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften e.V.**

Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München
T +49 (0) 89 / 52 03 09-0
F +49 (0) 89 / 52 03 09-900
info@acatech.de
www.acatech.de

**DECHEMA Gesellschaft für
Chemische Technik und Biotechnologie e.V.**

Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main
T +49 (0) 69 / 75 64-0
info@dechema.de
www.dechema.de

Geschäftsführendes Gremium des Präsidiums / acatech

Prof. Dr. Ann-Kristin Achleitner, Prof. Dr. Ursula Gather,
Dr. Stefan Oschmann, Manfred Rauhmeier,
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber,
Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner
Vorstand i.S.v. § 26 BGB:
Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner,
Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier

Verantwortlicher im Sinne des Presserechts

Dr. Jens Artz, DECHEMA

Redaktion

Jasper Eitze, Dr. Andrea Lübcke / acatech
Dr. Jens Artz, Dr. Michaela Löffler / DECHEMA

Gestaltung und Satz

Lindner & Steffen GmbH, www.lindner-steffen.de

Bildnachweis

AdobeStock: dmitrykobets

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium
für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) sowie dem
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens
(FKZ 03EWT002).

Betreut wurde das Projekt durch den Projektträger Jülich.

Erschienen im März 2024 in Frankfurt am Main

1. Auflage

ISBN 978-3-89746-245-8

www.wasserstoff-kompass.de

Empfohlene Zitierweise

acatech, DECHEMA (Hrsg.): Wasserstoff-Kompass
- Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft,
Frankfurt am Main 2023, ISBN: 978-3-89746-245-8
<https://www.wasserstoff-kompass.de/handlungsfelder#>



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages