

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ergänzendes Begleitdokument zur Strategie und Forschungsroadmap des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe

4. Dezember 2025



**FORSCHUNGSENTEZWERKE
ENERGIE**

1



**INDUSTRIE
UND GEWERBE**

FORSCHUNGSENTEZWERKE
ENERGIE

Das Begleitforschungsvorhaben EE4InG2

Energie- und Ressourceneffizienz leisten wichtige Beiträge zur Minderung der Treibhausgasemissionen und dämpfen die im Trend steigenden Ressourcenkosten der Unternehmen. So tragen sie dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie zu sichern. Die **Forschungsförderung zur Steigerung der Energieeffizienz** für und mit der deutschen Industrie und dem Gewerbe hat zum Ziel, Innovationen und technologischen Fortschritt voranzubringen und so neue technisch-wirtschaftliche Effizienzpotenziale zu erschließen.

Das BMWE-geförderte Verbundvorhaben EE4InG2 (Förderkennzeichen: 03EN2107A-C) wurde konzipiert als **Begleitforschungsprojekt** für das **Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe**. Ein zentrales Projektziel ist die **wissenschaftliche Querauswertung** der **angewandten Energieeffizienzforschung und -förderung** durch das Energieforschungsprogramm im Hinblick auf Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Ein weiteres Projektziel ist die **Förderung des Austausches zwischen relevanten Akteuren des Innovationssystems** (Industrie, Wissenschaft, Politik), koordiniert durch eine im Projekt zu schaffende Koordinierungsstelle für das Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe. Das Projekt knüpft an die inhaltlichen Vorarbeiten des vorausgegangenen Verbundvorhabens „EE4InG: Forschungsnetzwerk Energie in Industrie und Gewerbe – Vernetzung und Begleitung der FuE-Aktivitäten sowie Beschleunigung der Ergebnisverbreitung“ (FKZ: 03ET1630A-B) an.



ee4ing2.de

Autorinnen und Autoren

Die vorliegende Strategie wurde im Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe entwickelt. Die Erstellung wurde durch das Begleitforschungsvorhaben EE4InG2 (Förderkennzeichen: 03EN2107A-C) koordiniert.

Das vorliegende ergänzende Begleitdokument wurde durch die Begleitforschung EE4InG2 erstellt, das Kapitel „Position Deutschlands im Bereich HTS im internationalen Vergleich“ durch das Forschungsfeld Hochtemperatursupraleitung.

Autorinnen und Autoren¹

Begleitforschung EE4InG2:

Oliver Lösch (Koordinator - unabhängiger Berater im Auftrag der IREES GmbH), Michelle Antretter (IREES GmbH), Dr. Heike Brugger (IREES GmbH), Prof. Dr. Eberhard Jochem (IREES GmbH), Emil Elbæk (ETA-Solutions GmbH), Juliane Heydemann (ETA-Solutions GmbH), Daniel Moog (ETA-Solutions GmbH), Dr. Philipp Schraml (ETA-Solutions GmbH), Felix Kaiser (IOB RWTH Aachen), Dr. Robert Maertens (IREES GmbH), Katharina Rothhöft (IOB RWTH Aachen), Dr. Christian Schwotzer (IOB RWTH Aachen)

Forschungsfeld Hochtemperatursupraleitung:

Prof. Dr. Michael Bäcker (MaTech-Consult GmbH)

¹ Die Nennung der Autorinnen und Autoren erfolgt alphabetisch, mit Ausnahme der jeweils zuerst genannten, federführenden Person

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Inhaltsverzeichnis | 4 |
| 1 Zu diesem Papier | 5 |
| 2 Erfolgreiche Energieforschung trotz großer epochaler Unsicherheiten..... | 6 |
| 2.1 Auswertung aktueller Projektionen für den Energiebedarf der deutschen Industrie bis 2050 | 7 |
| 2.2 Denkbare Rahmenbedingungen für die Energieforschungsförderung für Industrie und Gewerbe bis 2050..... | 11 |
| 2.2.1 Identifikation einflussreicher Umfelder auf die Entwicklung der Transformation und den Endenergiebedarf der deutschen Industrie..... | 12 |
| 2.2.2 Zwei denkbare Szenarien..... | 13 |
| 2.3 Resultierende Fragen für die Energieforschung in Industrie und Gewerbe | 15 |
| 3 Position Deutschlands im Bereich der Hochtemperatursupraleitung im internationalen Vergleich | 17 |
| 4 Querschnittsthemen der Forschungsfelder..... | 19 |
| 5 Literaturverzeichnis | 25 |

1 Zu diesem Papier

Dieses Papier ergänzt die Strategie und Forschungsroadmap des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe (Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe 2025). Es nimmt Beiträge auf, die im Zuge der Strategieentwicklung erarbeitet wurden, aus Konsistenzgründen keinen Platz im eigentlichen Strategiepapier fanden, aber dennoch für Leserinnen und Leser der Strategie von Interesse sein können.

Das Begleitdokument enthält:

- Eine ausführlichere Darstellung möglicher divergierender Entwicklungen der globalen Rahmenbedingungen für die Energie- und Klimapolitik und möglicher Folgewirkungen für die Energieforschung für Industrie und Gewerbe: Abschnitt 2
- Eine Ausarbeitung des Forschungsfeldes Hochtemperatursupraleitung zur Position Deutschlands im Bereich HTS im internationalen Vergleich: Abschnitt 3
- Eine ausführliche Sammlung von Querschnittsthemen der Forschungsfelder des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe in Matrixform (siehe Abschnitt 5.9.2 der Strategie): Abschnitt 4

2 Erfolgreiche Energieforschung trotz großer epochaler Unsicherheiten

Die Weiterentwicklung der Energieforschungsförderung in Industrie und Gewerbe steht heute und in den kommenden Jahren vor erheblichen Unsicherheiten. Die Bandbreite künftiger Entwicklungen der Rahmenbedingungen für die Energieforschung in Industrie und Gewerbe ist in den kommenden 10 bis 20 Jahren in der EU und global sehr groß:

- Die heute global etablierten Gütermärkte könnten sich infolge von geopolitischen Machtverschiebungen deglobalisieren (vgl. die MAGA-Politik der Trump-Regierung oder die Entwicklung der BRICS-Staaten als Gegengruppe zu den G7-Staaten in den kommenden Jahren).
- Die derzeitige international zumindest im Grundsatz abgestimmte Klimaschutzpolitik im Jahre 2015 (COP20 mit dem Paris-Abkommen) könnte zugunsten einer Weiternutzung von Erdöl und Erdgas abgeschwächt werden (vgl. Ausgang der COP30 in Brasilien im November 2025, auf der man sich nicht auf eine Roadmap für die Defossilisierung einigen konnte (oe24 2025)).
- Die Produktionsmengen energieintensiver Grundstoffe könnten sich sehr unterschiedlich entwickeln, je nachdem, wie schnell und erfolgreich eine Politik der Ressourceneffizienz und Circular Economy sich entwickelt und welche Grundstoffproduktionen durch sonnenreiche Länder aufgebaut werden, um sie auch nach Europa zu importieren (Ansari et al. 2024).
- Diese Entwicklungen dürften auch Auswirkungen auf die Marktdiffusion neuer oder in der FuE-Phase befindlicher Effizienz- und Produktionstechniken in den kommenden zwei Jahrzehnten haben. Sie müssen daher in ihrer heute plausibel erscheinenden Bandbreite mitbedacht werden. Es stellen sich z. B. folgende Fragen:
 - Für welche Techniken kann man von einer erfolgreichen Marktdiffusion in der EU und weltweit ausgehen - unabhängig von den geo- und klimapolitischen Rahmenbedingungen? („Szenario-invariante Techniken“).
 - Welche Kostendegressionen sind bei den in Entwicklung befindlichen Techniken bei verkleinerten Handelsmärkten noch möglich?
 - Welche Techniken sind klar Szenario-abhängig?

Durch eine Auswertung von vorhandenen Energiebedarfsprojektionen für die Industrie bis Mitte des Jahrhunderts von verschiedenen wissenschaftlichen Konsortien sowie mittels eigener Szenarien zu möglichen geo- und klimapolitischen, demographischen und wirtschaftlichen Entwicklungen wurden denkbare Rahmenbedingungen für die Energieforschungsförderung für Industrie und Gewerbe bis 2050 skizziert.

2.1 Auswertung aktueller Projektionen für den Energiebedarf der deutschen Industrie bis 2050

Die Ergebnisse zur möglichen Entwicklung des Endenergiebedarfs der Industrie bis 2050 werden hier, im Vergleich zur Strategie, etwas detaillierter erläutert und kommentiert. Diese Analysen sollen die bestehenden Unsicherheiten in ihrer Größenordnung erläutern. Damit ermöglichen sie, dass Forscher sowie potentielle Hersteller und Anwender ein etwas klareres Bild über Wahrscheinlichkeiten, Markteintrittszeitpunkt und Marktdiffusion einer betrachteten Technik bei den jeweils definierten Annahmen des zugrunde liegenden Szenarios entwickeln können.

Aktuelle Langfristprojektionen für die deutsche Industrie bis zum Jahr 2045 verdeutlichen anhand ihrer unterschiedlichen Annahmen die mit der industriellen Transformation einhergehenden Unsicherheiten während der kommenden zwei Dekaden anhand von zwei Merkmalen der Ergebnisse (Abbildung 1):

- der Energiebedarf 2045 der Industrie insgesamt liegt zwischen 460 und 740 TWh/a (1.660 bis 2.660 PJ/a);
- und der Energiebedarfsstruktur, mit einem Stromanteil zwischen 36 % bis 68 % und einem Wasserstoffanteil zwischen 11 % bis 42 % am Endenergiebedarf der Industrie.

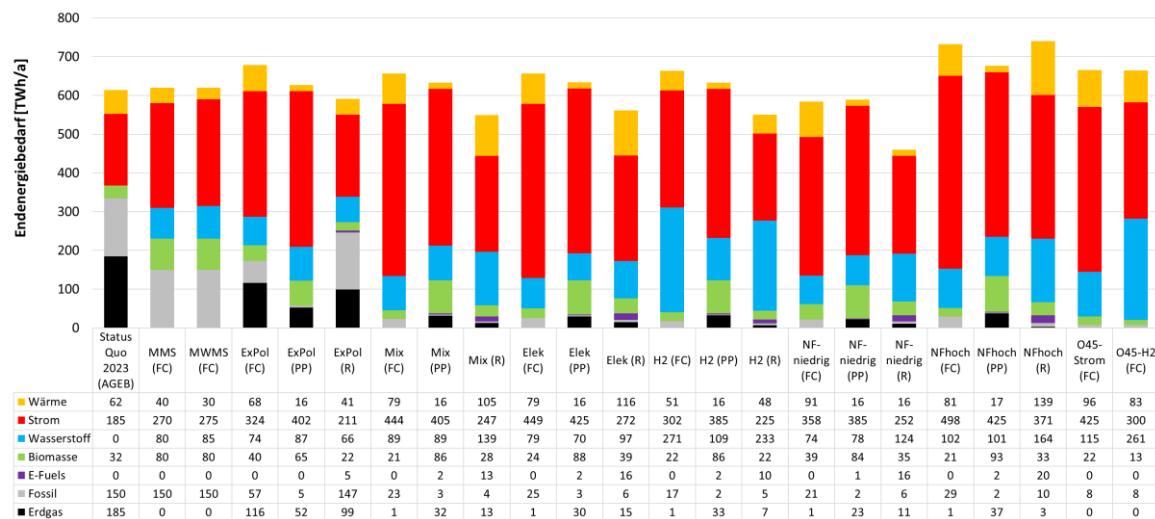


Abbildung 1: Vergleich des Enerdenergiebedarfs nach Niveau und Struktur, ohne stofflichen Energieträgereinsatz, in TWh/a für 2045 aus verschiedenen Studien (Erdgas, wo möglich separat ausgewiesen)

Quellen: Fleiter et al. 2024; Luderer et al. 2025; Harthan et al. 2025

Bei einem heutigen industriellen Endenergiebedarf von rund 2.300 PJ weisen die Langfristprojektionen für das Jahr 2045 einen ungefähr gleichbleibenden Endenergiebedarf aus, mit einer Bandbreite von etwa plus/ minus 20 %. In diesen Zahlen ist nicht der stoffliche Kohlenstoffbedarf enthalten, den die Produktion organischer Grundchemikalien benötigen wird.

Die Projektionen basieren auf quantitativen Modellen mit unterschiedlichem Fokus auf Politik-Maßnahmen und Techniken, sie sind teilweise zielorientiert für 2045 angelegt oder als orientierende Projektion mit heute bestehenden Politikmaßnahmen.

Die verschiedenen Szenarien gehen bis 2045 von einem moderaten durchschnittlichen Anstieg der industriellen Bruttowertschöpfung von rund 1 % pro Jahr aus – 1,4 % in den O45-Szenarien sowie rund 1,0 % bzw. 0,9 % in den Analysen des Ariadne-Projekts und des Projektionsberichts 2024. Die errechnete Veränderung der Endenergieintensität von 1 bis 2 % pro Jahr - je nach Szenario und Studie - erscheint gering, wenn man weiterhin einen inter- und intraindustriellen Strukturwandel sowie Anstrengungen zur effizienteren Nutzung von Energie unterstellt.

Die größte Spreizung des Endenergiebedarfs der untersuchten Szenarien ist zwischen den beiden Nachfrage-Szenarien, NFn und NFh, des Ariadne-Reports gegeben (Luderer et al. 2025), vgl. Abbildung 1)). Diese ist im Wesentlichen auf eine hohe bzw. geringe Nachfrage nach energieintensiven Grundstoffen zurückzuführen (bei NFn um etwa 30% reduziert). Hinzu kommen Annahmen über eine langsamere oder schnellere Diffusion effizienter und klimafreundlicher Techniken, über eine geringere oder höhere öffentliche Akzeptanz sowie über eine weniger oder stärker ausgeprägte Klimapolitik. Die verminderten Produktionsmengen energieintensiver Grundstoffe könnten einerseits durch eine intensive Politik der Ressourceneffizienz und Circular Economy verursacht werden, andererseits durch eine teilweise Standortverlagerung der Grundstoffproduktion zu neuen Produktionsstandorten (z.B. zu den OAPEC-Ländern oder zu günstigen Hafenstandorten in Europa). Wie diese möglichen Treiber in den Szenarien berücksichtigt wurden, wird durch die untersuchten Studien nicht weiter offen gelegt.

In den übrigen analysierten Szenarien wurde die inländische Produktion von energieintensiven Grundstoffen gegenüber heute meist nicht oder nur wenig verändert (Abbildung 2). Selbst bei den Szenarien mit niedriger Nachfrage an Grundstoffen könnte es sein, dass diese Annahmen zu den Produktionsmengen noch zu hoch sind, weil sich Produktionsstandorte nach niederländischen oder belgischen Standorten, oder zu nordafrikanischen oder insbesondere arabischen Ölstaaten verschieben. (Beispiel Stahl: Kaczmarczyk und Krebs 2025).

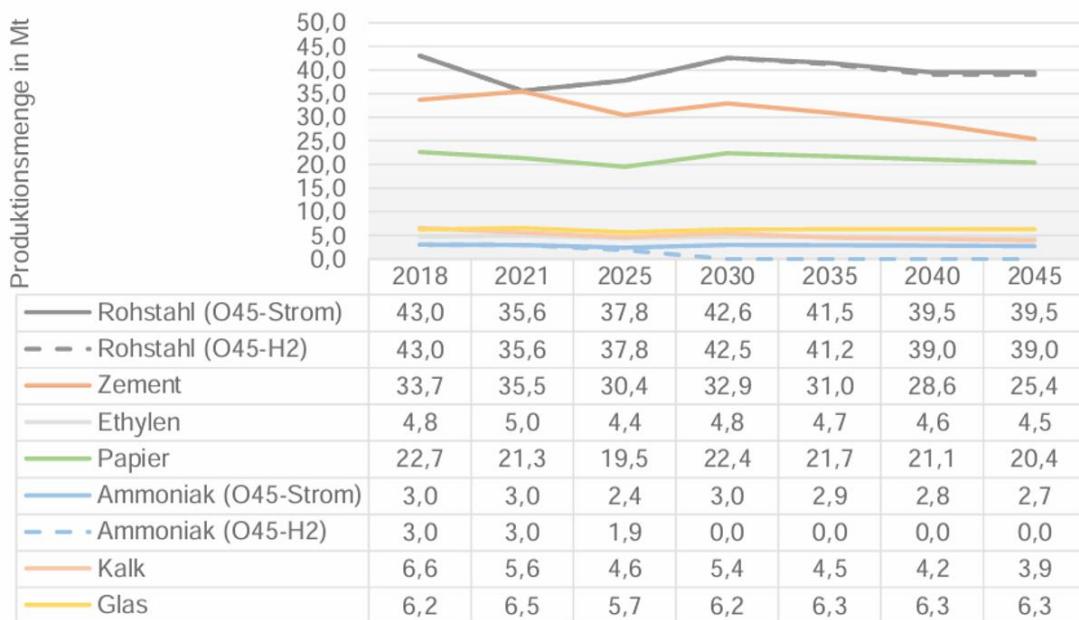


Abbildung 2: Annahmen zur Produktionsentwicklung 2021 – 2045 energieintensiver Grundstoffe

Quelle: Fleiter et al. 2024

Bei petrochemischen Produktionsanlagen gibt es derzeit in Europa Überkapazitäten. So werden einige älteren Steamcracker (z.B. in Antwerpen) im Laufe der kommenden fünf bis 10 Jahre stillgelegt. Es erfolgen Umstellungen und Umnutzungen von Standorten in Richtung Biorefining, Gasifikations- sowie Pyrolyse-Anlagen mit organischen Abfallstoffen als Input. Derartige Entscheidungen können lokale Olefin- und Aromaten-Produktion vermindern und Nachfrage nach Importen aus nordafrikanischen und arabischen Anlagen erhöhen. (Hernandez 2025)

Die beiden Orientierungsszenarien O45 der Langfristszenarien (Fleiter et al. 2024) variieren die Diffusion von Strom- und Wasserstoff-Anwendungen in der Industrie. Der Grund für die stark variierenden Ergebnisse ist, dass im O45-H2-Szenario im Temperaturbereich unter 500°C ein Wasserstoffeinsatz von gut 120 TWh zur Prozesswärmeerzeugung unterstellt wird, wenngleich technisch (und wohl auch teilweise wirtschaftlich) realisierbare Elektrifizierungsoptionen bestehen, insbesondere durch die Hochtemperatur-Wärmepumpen. Im O45-Strom-Szenario sind es gut 130 TWh für den direkten Stromeinsatz mit Elektrokesseln, Wärmepumpen oder Elektrotrocknern. Wasserstoff wird hier nur in wenigen Anwendungen mit circa 8 TWh eingesetzt, in denen eine direkte Elektrifizierung nicht oder als Hybridlösung oder nur mit hohem Aufwand möglich ist.

Die im Szenario O45-H2 unterstellte Wirtschaftlichkeit von Wasserstoff gegenüber Strom im Niedertemperaturbereich ist sehr unwahrscheinlich. Denn die zusätzlichen Investitionen und Betriebskosten der Elektrolyse sowie die zusätzlichen Kosten für Transport und Speicherung von Wasserstoff oder Wasserstoffträgern, sowie nicht zuletzt die energetischen Verluste bei der Umwandlung von Strom zu Wasserstoff und dann nochmals bei

der Umwandlung zu Derivaten, führen zu einem deutlich höheren Wasserstoffpreis gegenüber dem Strompreis (vgl. Tabelle 1 (Bühler, L., Scharf, H., Möst, D. 2024; Wietschel et al. 2024)).

Tabelle 1: Projektion der Preise für grünen Wasserstoff für Großabnehmer über der Zeit und der Schnelligkeit des Markthochlaufs.

| Markthochlauf | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---------------|------|------|------|------|------|
| Gering | 205 | 180 | 160 | 155 | 155 |
| Moderat | 140 | 125 | 105 | 95 | 95 |
| Stark | 135 | 120 | 95 | 90 | 85 |

Quellen: Bühler, L., Scharf, H., Möst, D. 2024

Die höchste veröffentlichte Auflösung nach Branchen und Endenergieträgerstruktur ist zurzeit für acht Branchen in den beiden Nachfrage-Szenarien des Ariadne-Konsortiums verfügbar (Abbildung 3).

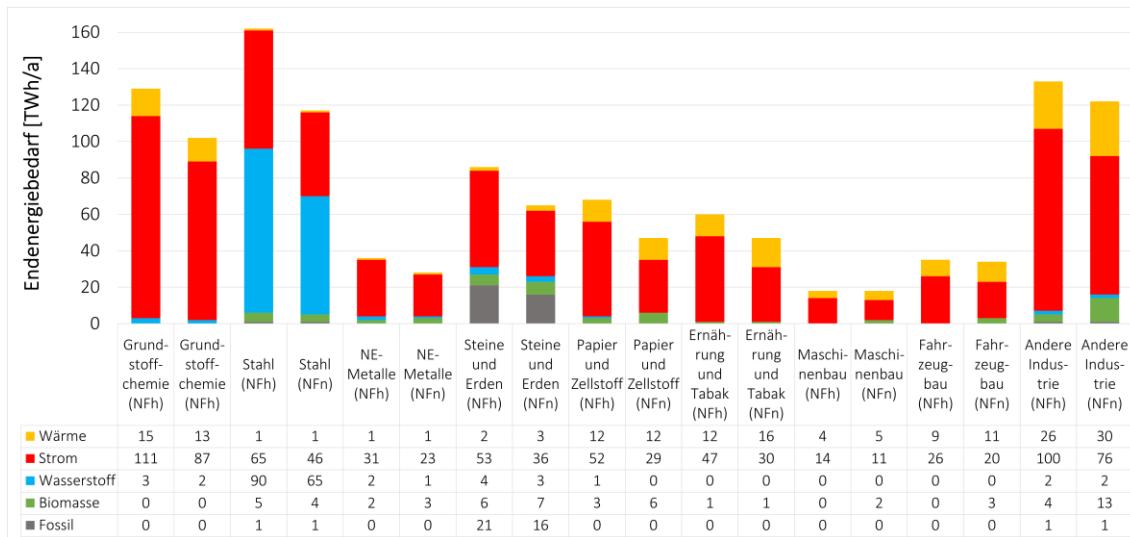


Abbildung 3: Vergleich der Endenergieträgerstruktur im Jahr 2045 für acht Branchen der Verarbeitenden Industrie für das hohe und niedrige Nachfrage-Szenario

Quellen: Fleiter et al. 2024; Luderer et al. 2025; Harthan et al. 2024

CCS/CCU, die Abtrennung von CO₂ aus Rauch- und Abgasen mit anschließender langjähriger Speicherung oder Verwendung in der organischen Chemie, spielt in allen betrachteten Szenarien eine mehr oder weniger wichtige Rolle. Am niedrigen Ende sind es diejenigen CO₂-Emissionen von Branchen und Prozessen, in denen CO₂-Emissionen nicht durch einen Wechsel des Energieträgers vermieden werden können, wie z.B. das geogene CO₂ beim Brennen des Zementklinkers und der Kalkproduktion. Es gibt kein Szenario eines Transformationspfades, in dem CCS/CCU über einen begrenzten Einsatz hinaus eine politisch gewollte Rolle spielt. Als CCS/CCU-Szenarien könnten die explorativen Projektionen angesehen werden, die das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 deutlich verfehlten und in denen fossile Energieträger auch langfristig mit 140 bis 150 TWh/a ehebliche CO₂-Emissionen verursachen würden - wie die beiden MMS- und MWMS-Szenarien des Projektionsberichts bzw. des ExPol-Szenario des Ariadne-Berichts (vgl. Abbildung 1, ganz links bzw. 3. und 5. Szenario von links).

2.2 Denkbare Rahmenbedingungen für die Energieforschungsförderung für Industrie und Gewerbe bis 2050

Die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Szenario-Ergebnisse sind in ihren Annahmen zu wesentlichen Rahmenbedingungen, d.h. den Entwicklungen beeinflussender Umfelder von Produktion und Energiebedarf wenig explizit und transparent. Die Methode der Szenariotechnik hat daher einen zweistufigen Ansatz (vgl. Abbildung 4 und Schauder et al. 1976):

1. Die Entwicklung des jeweiligen **Gegenstandsbereiches**: hier sind es die Branchen- und Produktionsstruktur der Industrie im Verlauf der Transformation in den kommenden 20 Jahren bis 2045 und die dazu angepasste FuE für energieeffiziente Lösungen für diese Branchen- und Produktionsstruktur. Der Gegenstandsbereich wird beeinflusst durch Faktoren in seinen **Umfeldbereichen** (z.B. Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum, Strategien der Erdgas- und erdölfördernden Länder und Unternehmen, die geopolitische Entwicklung mit jeweils unterschiedlichen internationalen Handelsmärkten). Diese Umfeldbereiche müssen zunächst identifiziert werden, bevor sie dann in ihren denkbaren Entwicklungsmöglichkeiten beschrieben werden, falls möglich quantitativ. Diese Beschreibungen einzelner Umfeldbereiche erfolgen unabhängig voneinander; sie werden als Prä-Szenarien bezeichnet.

2. Im zweiten Schritt werden dann jene Ausprägungen der Prä-Szenarien zu einem Szenario zusammengesetzt, die miteinander konsistent sind (z. B. führt eine strikte geopolitische Machtteilung in fünf Blöcke (Münkler 2023) zu kleineren internationalen Handelsmärkten und damit zu geringeren Exportpotentialen deutscher Hersteller), sodass jedes Szenario die in den Prä-Szenarien betrachteten Umfeldbereiche vollständig abdeckt und sich ein konsistentes Gesamtbild der zukünftigen Ausprägung dieser Umfeldbereiche für den analysierten Gegenstandsbereich ergibt. Diese Szenarien können dann auch genutzt werden, um die Treiber bzw. Aktivitätsgrößen von Energiesystem-Modellen quantitativ vorzugeben (z.B. Roheisen- und Stahlproduktion, oder von bestimmten Produktions- bzw. Energietechniken mit ihren technischen und Kostenfaktoren). Hierzu können auch Informationen zu energie- und klimapolitischen Policy-Maßnahmen mitaufgenommen werden (z.B. die Erleichterung / das Vorziehen des Markteintritts durch Klimaschutzverträge).

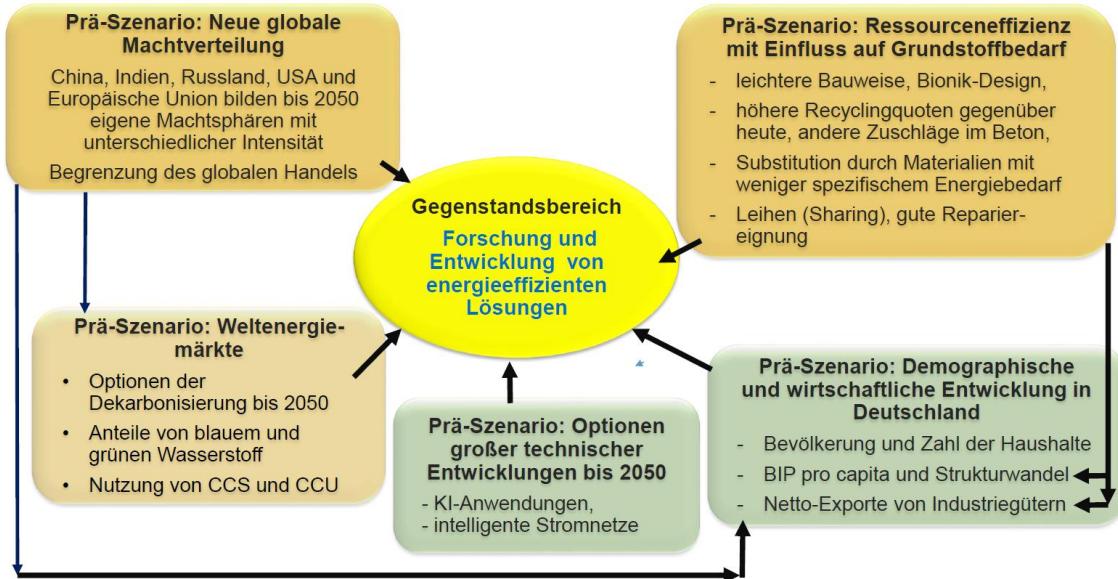


Abbildung 4: Der Gegenstandsbereich und seine Umfeldbereiche

Quelle: Jochem und Lösch 2025

Neben den Prä-Szenarien können auch *Ereignisse* angenommen werden (z.B. die gewaltsame Aneignung Taiwans durch China Ende der 2020er Jahre aufgrund dann hinreichender militärischer Stärke relativ zu den USA, ein Krieg in Europa oder eine erneute Pandemie). Derartige Ereignisse können dann einige Prä-Szenarien verändern, andere eher nicht. Sie werden hier nicht betrachtet.

2.2.1 Identifikation einflussreicher Umfelder auf die Entwicklung der Transformation und den Endenergiebedarf der deutschen Industrie

Folgende Umfelder für die Bildung der Prä-Szenarien werden als einflussreich eingeschätzt (Jochem und Lösch 2025):

- die *geopolitische Entwicklung* hin zu einer tripolaren Machtverteilung (China/Russland, USA/EU und Indien) **oder** einer pentapolaren Machtverteilung (China, EU, Indien, Russland und USA);
- ein *Bevölkerungszuwachs* auf 88 Mio. Einwohner in Deutschland, ein leichter *Pro-Kopf-BIP-Zuwachs* und ein rechtzeitiger *Strukturwandel* der deutschen Industrie **oder** ein Rückgang der Bevölkerung auf etwa 76 Mio. Einwohner sowie ein leichter Rückgang des BIP pro Kopf mit erheblicher *De-Industrialisierung*;
- eine moderate *Deglobalisierung von Rohstoff- und Gütermärkten* infolge der entstehenden polaren Machtverteilungen mit Anerkennung internationaler Institutionen und Regelungen **oder** eine deutliche Deglobalisierung von Rohstoff- und Gütermärkten mit Zerfall internationaler Institutionen und Missachtung internationaler Regeln und Verhaltensnormen;
- eine *Akzeptanz der großen Öl- und Erdgasgesellschaften sowie der öl- und erdgasbesitzenden Länder*, sich auf die drohenden Schäden des Klimawandels

einzustellen und zügig in eine dekarbonisierte Energieversorgung zu investieren oder eine am kurzfristigen Gewinn orientierte Welt, sodass in 2050 der Anteil des Öl- und Erdgasbedarfs noch bei 55 % des weltweiten Primärenergiebedarfs liegt (Cloonan 2024).

- eine *stringente Ressourceneffizienz- und Circular Economy-Politik* in Deutschland und EU vermindert Rohstoff- und Grundstoffimporte zunehmend (Resilienz) oder diese Politik wird erst spät (nach 2035) und zögerlich ergriffen.

Die *Prä-Szenarien* werden durch eine intensive Literatur- und Nachrichtenauswertung, gezielte Interviews mit den Kuratoren und Fachleuten für die jeweiligen Einflussfaktoren erstellt.

2.2.2 Zwei denkbare Szenarien

Die oben kurz beschriebenen alternativen Prä-Szenarien werden zu zwei in sich konsistenten Szenarien zusammengefügt. Es sind technologisch betrachtet zwei aus heutiger Perspektive denkbare, alternative Zukünfte mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten der weltweiten Dekarbonisierung. Sie werden im Folgenden knapp zusammengefasst beschrieben (Details vgl. Jochem und Lösch 2025).

Szenario „Zielorientierte weltweite Dekarbonisierung“

Die Rivalität zwischen den USA und China entwickelt sich ab 2025 (Trump-Regierung) zu einem bestimmenden Faktor der internationalen Beziehungen. Sie prägt zunehmend (mit Russland als Partner Chinas) die politischen, wirtschaftlichen und militärischen Dynamiken. Indien entwickelt sich ökonomisch langsam und wahrt in der tripolaren Welt seine Interessen als aufstrebendes Schwellenland, ohne große Machtansprüche zu erheben.

- Ein beschränkter Güteraustausch findet statt, aber mit beständigen Zöllen von max. 20 % und Export-/Import-Restriktionen für eine Reihe von Gütergruppen, inkl. dualityer Güter, dies führt den globalen Handel etwas zurück.
- Patentrechte werden nicht unterlaufen. Internationale Institutionen und der Dollar als Weltwährung bleiben bestehen.

Eine kluge Verknüpfung von Industrie- und Klimaschutzpolitik in der EU und China sowie in Kanada, Japan und den OAPEC-Ländern führt bis 2030 zu einer kohärenten wirtschaftlichen Entwicklung, der sich nach der Trump-Ära auch die USA anschließen. Dies führt zu:

- einem jährlichen realen Pro-Kopf-Wachstum des Bruttoinlandsprodukts zwischen 400 € (EU) und 500 € (China und später auch Indien).
- Einer klugen Einwanderungs- und Migrationspolitik sowie zu positiven Zukunftserwartungen der jüngeren Generationen in Deutschland; das Ergebnis ist ein Bevölkerungszuwachs auf 88 Mio. Menschen in Deutschland im Jahr 2050.

- Die OAPEC-Länder und die Öl-Konzerne investieren zunehmend in erneuerbare Energien und als vorteilhaft eingeschätzte Grundstoffproduktionen für den Export nach Europa und China, später auch Indien.
- Relativ hohe Produktionskosten für grüne Grundstoffe sowie Entsorgungskosten von schwer/nicht vermeidbaren CO₂-Emisionen (z. B. geogene Emissionen bei z. B. Klinker) durch CCS führen zu einer deutlich verstärkten Ressourceneffizienz- und Circular Economy-Politik. Hierdurch können sowohl der zunächst hoch eingeschätzte Bedarf an Wasserstoff als Energieträger und Rohstoff als auch von grünen Grundstoffen reduziert werden.

Insgesamt kommt in diesem Szenario die Dekarbonisierung der Energieanwendung in der EU und in Deutschland, aber auch in Ländern wie China und den USA (ab 2030) zielorientiert voran, um ein 2°C-Ziel zu erreichen. Es wird daher als Szenario „Zielorientierte weltweite Dekarbonisierung“ genannt.

Szenario „Späte weltweite Dekarbonisierung“

Die Rivalität zwischen den USA und China in der zweiten Hälfte der 2020er Jahre (mit militärischer Aneignung von Taiwan), eine Entfremdung zwischen China und Russland, eine bewusste Machtentwicklung von Indien sowie eine Veränderung der EU zu einem Bundesstaat verändern die geopolitische Lage (Münkler 2023). Diese pentapolare Machtverteilung festigt sich zusehends in den 2030er und 2040er Jahren und führt zu:

- Einer Deglobalisierung der internationalen Rohstoff- und Gütermärkte.
- Skaleneffekte bei Großserienproduktionen können wegen der kleineren Handelsmärkte teilweise nicht realisiert werden.
- Patentrechte werden unterlaufen, internationale Institutionen abgebaut. Eine zweite Währung wird im chinesischen Machteinflussbereich eingeführt.
- Die Priorität für kurzfristige Gewinnmaximierung führt in den USA und der EU zur Erschließung neuer Öl- und Erdgasvorkommen und zu geringeren Investitionen in erneuerbare Energien und grüne Grundstoffe.
- Eine global abgestimmte Klimapolitik kommt wegen der Spannungen und Polarisation auf internationaler Ebene nicht mehr zustande. Die Fortschritte der Treibhausgasminderung sind schleppend und regional sehr unterschiedlich.
- Die Rivalitäten zwischen den Machtblöcken führen zu regionalen militärischen Auseinandersetzungen mit hohen Rüstungsausgaben der Machtblöcke zulasten von Investitionen in die Transformation.
- Man beobachtet eine geringe Nettozuwanderung in Deutschland, die durch zusätzliche Geburten nicht kompensiert wird, im Gegenteil: die schlechten wirtschaftlichen Aussichten und die geringere Zahl von Einwanderern reduzieren die durchschnittlichen Geburten je Frau. Die Bevölkerung nimmt auf 78 Mio.

Personen ab; die Personen im Erwerbsalter sind rückläufig von heute 50 Mio. auf knapp 45 Mio. in 2050.

- Die Rivalitäten zwischen den Machtblöcken führen zu regionalen militärischen Auseinandersetzungen mit hohen Rüstungsausgaben der Machtblöcke zulasten von Investitionen in die Transformation.
- Dies alles reduziert den Wachstumspfad der deutschen Wirtschaft auf durchschnittlich 200 € pro Kopf und Jahr bzw. auf ein durchschnittliches Wachstum des BIP von 0,4 % pro Jahr bis 2050.
- Die stagnierende Wirtschaft in Deutschland ist u.a. gekennzeichnet durch fehlendes Kapital, um eine stringente Circular Economy-Politik durchführen zu können. Denn diese Politik substituiert Ressourcenverbrauch über eine längere Zeit durch Kapital und Personal mit entsprechendem Knowhow. (Letzteres ist schon heute bei 1 Mio. arbeitenden Ingenieurinnen und Ingenieuren und 120.000 nicht besetzbaren Arbeitsplätze ein Problem, das sich bei abnehmenden Personen im Erwerbsalter noch mehr verschärft.)

Insgesamt kommt in diesem Szenario die Dekarbonisierung in der EU und in Deutschland, aber auch in Ländern wie den USA, Japan oder Kanada nur schleppend voran. Es wird daher „Späte weltweite Dekarbonisierung“ genannt.

Fazit: Als Ergebnis dieser Analysen und Szenarien liegen dann Informationen zu szenario-abhängigen Produktions- und anderen einflussreichen Rahmenannahmen vor. Diese können von Energiesystem-Modellen weiter in Energiebedarfsmengen umgerechnet werden. Über die in den Modellen abgebildete mögliche Marktdurchdringung effizienter Produktionstechniken und eventuell mögliche Skaleneffekte (einschließlich Annahmen zu einem bestimmten Außenhandels-anteilen) werden die Marktdurchdringungspotentiale einer betrachteten Effizienztechnik für einen bestimmten Zeitraum und ein bestimmtes Szenario nachvollziehbar.

2.3 Resultierende Fragen für die Energieforschung in Industrie und Gewerbe

Aufgrund der Ergebnisse der Simulationen im Gegenstandsbereich für die einzelnen Produktions- und Effizienztechniken lassen sich weitere Überlegungen zu folgenden Aspekten anstellen:

- Wie können szenario-invariante Effizienztechniken schneller in die Marktdiffusion gebracht werden? Fehlt noch die Lösung eines speziellen technischen Problems, beispielsweise die Korrosion von Wärmeübertragern? Oder sind Demo-Anlagen in verschiedenen Anwender-Branchen als Referenz erforderlich – auch als besserer Wegbereiter für den Außenhandel?

- Welche Transformationstechniken vermindern den Importbedarf von Grundstoffen? Leichtbau? Erhöhung der Recyclinganteile bei Grundstoffen? Können diese Verfahren energieeffizienter und dadurch rentabler und wettbewerbsfähiger werden?
- Die Exporte der deutschen Industrie haben schon heute ein Spezialisierungsmuster (Fahrzeuge, Maschinen- und Anlagenbau, Spezialchemikalien und Pharmaka). Welche weitere Spezialisierung im Bereich der Transformationstechniken wäre besonders aussichtsreich im internationalen Wettbewerb?
- Man spricht heute von einer Gefährdung der Wettbewerbsfähigkeit der Investitions- und Gebrauchsgüterhersteller im Inland infolge schnellerer technischer Erfolge und besserer Produktivität ausländischer Hersteller. Was könnten energieeffiziente Lösungen dazu beitragen, dieser Gefährdung entgegenzuwirken?

Es wäre klug, diese Fragen intensiv zu verfolgen. Denn ein exportorientiertes Land wie Deutschland würde einen Teil seines Volkseinkommens schmälern, wenn es nicht sorgfältig seine Chancen im Export energieeffizienter Transformationstechniken analysiert und entsprechend handelt – angefangen bei Forschung und Entwicklung.

3 Position Deutschlands im Bereich der Hochtemperatursupraleitung im internationalen Vergleich

Der Forschungsstandort Deutschland im Bereich der HTS kann aufgrund der langjährigen öffentlichen Förderung als sehr gut angesehen werden. Der internationale Vergleich (ISIS 2024) zeigt jedoch, dass insbesondere in USA, Südkorea und China hohe private und staatliche Investitionen geplant sind, so dass Deutschland in Zukunft den Anschluss verlieren könnte.

Die Situation in den USA ist gekennzeichnet durch sehr hohe private aber auch staatliche Investitionen in energietechnische Anwendungen, die zumindest zum Teil ausschließlich mit HTS realisiert werden können. Insgesamt über 8 Milliarden US\$ stehen in den nächsten Jahren für Fusion, elektrisches Fliegen, Kabel und militärische Anwendungen zur Verfügung. Um den erwarteten hohen Bedarf an hochwertigen HTS-Bandleitern zu befriedigen, wurden in den USA in den letzten Jahren mit MetOx und HTS zwei neue Hersteller etabliert. Die Leiterentwicklung wird im Rahmen eines neuen arpa-e Programms mit 10 M\$ gefördert. Die wichtigsten Anwendungsprojekte sind hier:

- HTS Kabel für Übertragungsnetze mit neuer Verdampfertechnologie für die Kühlung durch die Firma VEIR
- Fusion: Entwicklung und Aufbau eines full-scale SPARC Magneten bei CFS
- Elektrisches Fliegen: Komponentenentwicklung unter Führung von Boeing und NASA

In Südkorea erfolgt die Förderung weitgehend im Rahmen des Programms PRISM mit ca. 35 M\$ (Zeitraum: 2022 – 2027). Wichtige Einzelprojekte sind die Entwicklung von HTS-Motoren, HTS-Kabeln für Datacenter sowie effiziente Kühltechnik und Weiterentwicklung von HTS-Bandleitern. Herausragend ist das separat geförderte HTS-Kabelprojekt in Musan/Sunyu. Das 1 km lange, dreiphasige AC-Kabel für eine Spannungsebene von 23 kV und einer Übertragungsleistung von 60 MVA wird voraussichtlich in 2026 in Betrieb gehen.

Die Aktivitäten in China werden dominiert durch die Fusionsforschung. So wurden bereits im Jahr 2024 von den Unternehmen Energy Singularity (Shanghai) und StarTorus (Xi'an) HTS Tokamak Systeme mit bis zu 26 HTS-Magneten in Betrieb genommen. Im Zuge der Projekte werden die Kapazitäten zur Herstellung von HTS-Bandleitern bei Shanghai Creative Superconductor, Shanghai Superconductor und EastSuper massiv ausgeweitet. Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt sind Maglev Zugsysteme. Hier wurde in 2024 ein Demonstrator durch China Aerospace Science and Industry Corporation in Betrieb genommen. Aber auch im Bereich der HTS-Kabel ist China sehr aktiv. Das längste HTS-Kabel Chinas ist seit 2021 im regulären Netzbetrieb in Shanghai (1,2 km; 2,2 kA; 35 kV; 70 % Energieeinsparung).

In Japan konzentriert sich die Entwicklung auf die Kombination von Wasserstoff- und Supraleitertechnologie im Rahmen der nationalen Wasserstoffstrategie von 2023. Die Aktivitäten umfassen sowohl stationäre energietechnische Anwendungen wie z. B. mit flüssigem Wasserstoff gekühlte HTS Generatoren und HTS Kabel als auch elektrisches Fliegen mit HTS Systemen. Weitere Aktivitäten betreffen medizinische Anwendungen von HTS Magneten in MRI und Beschleunigersystemen.

4 Querschnittsthemen der Forschungsfelder

Die folgenden Matrizen geben die in Zusammenarbeit zwischen den Forschungsfeldern des Foschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe und der Begleitforschung EE4InG2 identifizierten Querschnittsthemen zwischen den Forschungsfeldern wieder. Sie sind als Anhang zu Kapitel 5.9.2 der Strategie des Forschungsnetzwerks zu verstehen.

| Technologieanwendungs-FF/Cluster | | | | |
|------------------------------------|---|--|---|---|
| Technologieentwicklungs-FF/Cluster | TPT | WuA | WP/KT | CVT |
| TPT | | Herstellung von Wärmetauschern mit Keramikschichten, aus Keramik oder Glas | Einsatz von Wärmepumpen zur Prozesswärmeverzeugung in Niedrigtemperaturprozessen | Elektrischer Cracker, W-Dämmung mit Aerogelen; Verbrennungsprozesse und Öfen in der Chemie; Feuerfeste Ofenauskleidung; Pyrolyse; unterschiedliche Normen und Sicherheitsbestimmungen als Hemmnis; Einsatz von unaufbereiteten Abfällen |
| WuA | Neue Korrosions- und Fouling-Lösungen bei Wärmetauschern; Abwärmenutzung von Abgas-Restwärme (insbesondere <250°C, bis zu diesem T-Niveau ist Nutzung für Luftvorwärmung etc. etabliert, aber noch Diffusionspotenzial); Flexibilisierung vs. Hybridisierung; Dämmung/Isolierung; ökonomische Machbarkeit | | Sorptions-Kälteerzeugung bei verschiedenen Temperaturen; Schnittstellen- und Prozessparameter identifizieren; Systembetrachtung, Methodenentwicklung, Lernfabrik; Abwärme als Quelle für WP; Auslegung von WP-Arbeitspunkten bei Abwärmenutzung, auch mit Speichern | Wärmemanagement und Elektrifizierung (PtH); Flexible Sektorkopplung (PtH+Speicher); Standortanalyse Chemiepark für Nutzung thermischer Speicher für Wärmeversorgung und -management |

| | | | | |
|---|---|---|---|--|
| WP/KT | Abschrecken von warmen Materialien; Kühl- und Kältetechnik i.d. Anlagenperipherie; Produktabwärme | Wärmekreislaufführungen aus Prozess-Abwärme | | HT-Wärmepumpen, Sorptions-Kälteerzeugung bei versch. Temp.; therm. Stoffstrennung mit WP in Destillationskolonne (Sumpf-/Kopftemperatur verbunden über WP, geringer T-Hub) bzw. Verdampferkolonne (Dampf unten, Wärme oben); ölfreie Verdichter bei Produktkontakt; Aerogele; Korrosionsbeständigkeit; Simulation von Auswirkung von WP-Einsatz auf Prozesse der CVT; allgemeiner: Elektrifizierung der therm. Trenntechnik; Evaluation WP-Einsatz in Chemie |
| Technologienanwendungs-FF/Cluster | | | | |
| Technologieentwicklungs-FF/Cluster | FT | Tribologie | HTS | Aerogele |
| TPT | Herstellung von Metallpulver für 3D-Produktion; Elektrolyseure, dezentrale H2 Herstellung | | Herstellen geeigneter Spezial-Legierungen | |
| WuA | | | Thermische Isolierung | |

| | | | | |
|-------|--|--|---|--|
| WP/KT | Fertigung hocheffizienter Kompressoren; Fertigung hocheffizienter Wärmeübertrager (Entwicklungsperspektive); Effiziente/Gekoppelte Bereitstellung von Wärme und Kälte; Reinraum-Technik mit neuester RLT (Anwendungsperspektive) | Geänderte tribologische Anforderungen durch Weiter-/Neuentwicklung Kompressorentechnik | Spezielle Kälte- und Kühlösungen für HTSL (Kryotechnik mit Flüssig-Stickstoff); Wartungszyklen Kryopumpe reduzieren | |
|-------|--|--|---|--|

| Technologieanwendungs-FF/Cluster | | | | |
|------------------------------------|---|---|--|---|
| Technologieentwicklungs-FF/Cluster | TPT | WuA | WP/KT | CVT |
| CVT | Herstellung von synthetischen Brennstoffen für HT-Prozesse oder Hybrid; Pyrolyse als Schnittstellenthema; Wirkung von H ₂ z.B. auf Feuerfest/Keramik; Chemie von Feuerfest/Keramik; Schnittstelle: DECHEMA | Herstellung von Beschichtungen zur Vermeidung von Korrosion und Fouling; Membran-Technik verdrängt Abwärme therm. Trennverfahren | Entwicklung von effektiven Kälte- und Arbeitsmitteln | |
| FT | Beherrschung von Hochleistungsmaterialien mit verbesserten thermischen Eigenschaften (z.B. mittels 3D-Druck); 3D-Druck für HT-Wärmetauschern + Brennkammern | Fertigung neuartiger Wärmetauscher; flexibler Betrieb mit Energiespeichern; Integration therm. Speicher in Produktionsinfrastruktur; Wärmetauscher für Latentspeicher; Weiterentwicklung Fertigungstechnik für thermische Speichersysteme und Komponenten; Fertigungsketten-/techniken für Wärmespeicher sowie Wärmeübertrager; Flexible Energieumwandlung) | Fertigung ölfreier Turbokompressoren | 3D-Fertigung komplexer Armaturen und Reaktoren; Modularisierung MTP/Plug-and-Play; Vereinheitlichung von Schnittstellen; FAIR Datensatz |

| | | | | |
|-------------------|---|--|---|--|
| Tribologie | Verminderte Reibung und Verschleiß bei Transportanlagen und E-Motoren | Verminderte Reibung und Verschleiß bei Pumpen, Ventilatoren, E-Motoren | Verminderte Reibung und Verschleiß bei Pumpen, Kompressoren, Ventilatoren; ölfreie Verdichter; Tribologie als Enabler für alternative zu fördernde/bewegte Medien (z.B. Ammoniak) | Verminderte Reibung und Verschleiß bei mechanischen verfahrenstechnischen Anlagen, Wasserstofftribologie |
|-------------------|---|--|---|--|

| Technologieanwendungs-FF/Cluster | | | | |
|------------------------------------|--|--|---|---------------------------|
| Technologieentwicklungs-FF/Cluster | FT | Tribologie | HTS | Aerogele |
| CVT | Herstellung von Lackierpulvern und Materialien aus Kunststoff; - eher Produktseite; Lernen von funktionaler Sichtweise der CVT; modularisierte Anlagen | Synthetische Schmieröle; RRBOs; bio-basierte/-abbaubare Formulierungen; Festschmierstoffe | Herstellung von Kunststoff- und Isolier-Ummantelungen | Herstellung von Aerogelen |
| FT | | Geänderte tribologische Anforderungen durch reibungsoptimierte Werkzeug- und Maschinenkomponenten (z.B. Minimalmengenschmierung); intrinsische Schmierung; additive Fertigung, gradierte Eigenschaften, Schmierfunktionalität; Oberflächenstrukturierung | Präzisionsfertigung für Supraleitende Materialien für erhöhte Leitfähigkeit und Stabilität (Dünnenschicht-technologien und additiver Fertigung) Skalierung und Massenproduktion (bspw. hochpräzises Ziehen/ Wickeln, Automatisierung) | |

| | | | | |
|-------------------|---|--|---|--|
| Tribologie | Verminderte Reibung und Verschleiß bei Werkzeugen; Präzisionsgetriebe; Superlubricity; Oberflächentechnologie; Schmierverfahren | | Verminderte Reibung und Verschleiß bei Pumpen, Kompressoren Kälteerzeug | |
|-------------------|---|--|---|--|

| Technologieanwendungs-FF/Cluster | | | | |
|------------------------------------|---|--|--|--|
| Technologieentwicklungs-FF/Cluster | TPT | WuA | WP/KT | CVT |
| HTS | Vermeidung von Stromtransportverlusten in betrieblichen Netzen von einigen 100 Metern Leitungslänge z.B. für Elektrolysen zur Produktion von Al, Cu, Zn sowie Magnethitzer mit HT-Supraleiter-Spulen; Anwendungen bei elektrischer Wärmeerzeugung; Erhöhung Leistungsdichte; Induktionsöfen | | | Verminderte Zuleitungsverluste von Strom bei großen Elektrolysen (z.B. Chlor, Fluor) und Beheizung von Crackern |
| Aerogele | Wärme-Dämmung mit Aerogenen | Aerogele als Adsorbens für thermische Adsorptionsspeicher, Dämmung | Erhöhung Energieeffizienz durch bessere Dämmung, Aerogele als Kühlmittelträger | Herstellungsverfahren, besonders unter Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Aerogele als Trägermaterialien in katalytischen Prozessen |

| Technologieanwendungs-FF/Cluster | | | | |
|------------------------------------|--|---|---|----------|
| Technologieentwicklungs-FF/Cluster | FT | Tribologie | HTS | Aerogele |
| HTS | Stromversorgung von großen Fertigungsstandorten; Gleichstromfabrik; TEVA Unternehmen; Anwendung im Betrieb weniger relevant, mit Ausnahme von raumkritischen Anwendungen | supraleitende Lager (Bilfinger); Schwebetechnik | | |
| Aerogele | Weiterentwicklung von Herstellungsverfahren, Anwendung von Aerogelen in additiver Fertigung | Aerogele als Schmierstoffe zur Verringerung der Reibung, Aerogelkomposite zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit | Herstellung von Kunststoff- und Isolier-Ummantelungen | |

5 Literaturverzeichnis

- Ansari, D.; Gehrung, R. M.; Pepe, J. M. (2024): Die Golfstaaten, China und Zentralasiens grüner Energiesektor. Interaktionen, geopolitische Dynamiken und Implikationen für EU und Deutschland. Hg. v. SWP-Aktuell. Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP). Berlin (63).
- Bühler, L., Scharf, H., Möst, D. (2024): Marktausblick zu erwarteten Wasserstoffpreisen und -mengen in Deutschland. TU Dresden (Schriften des Lehrstuhls für Energiewirtschaft, 29).
- Cloonan, Kelly (2024): Trotz E-Auto-Wende: Energieriese Exxon glaubt, dass Öl und Gas bis 2050 die wichtigsten Energieträger bleiben. Business Insider Deutschland. Online verfügbar unter https://www.businessinsider.de/wirtschaft/international-business/exxon-oel-und-gas-bleiben-trotz-elektroautos-wichtige-energietraeger/?xing_share=news, zuletzt aktualisiert am 27.08.2024, zuletzt geprüft am 08.08.2025.
- Fleiter, T.; Rehfeldt, M.; Manz, P.; Bussmann, S.; Neuwirth, M.; Herbst, A.; Lotz, M. T. (2024): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. O45-Szenarien. Modul Industriesektor. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_O45_Industriebericht_v11.pdf, zuletzt geprüft am 08.08.2025.
- Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe (2025): Strategie und Forschungsroadmap der Forschungsnetzwerke Industrie und Gewerbe. Hg. v. IREES GmbH, RWTH Aachen (IOB), ETA-Solutions GmbH. Online verfügbar unter <https://ee4ing2.de/projekt/strategie/>, zuletzt geprüft am 04.12.2025.
- Harthan, R. O.; Förster, H.; Bürger, V.; Braungardt, S.; Görz, W. K.; Jansen, L. L. et al. (2025): Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024). TREIBHAUSGAS-PROJEKTIONEN FÜR DEUTSCHLAND. Hg. v. Umweltbundesamt. Öko-Institut e.V.; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; IREES GmbH; Thünen-Institut.
- Hernandez, A. (2025): TotalEnergies to shut Antwerp steam cracker end-2027. Hg. v. Reuters. Online verfügbar unter <https://www.reuters.com/business/energy/totalenergies-shut-antwerp-steam-cracker-end-2027-2025-04-22/>, zuletzt geprüft am 01.12.2025.
- ISIS (Hg.) (2024): 31st International Superconductivity Industry Summit (ISIS-31). Kanazawa, Japan, 1.–2. Dezember 2024.
- Jochem, E.; Lösch, O. (2025): Zwei Szenarien zentraler Rahmenbedingungen für Deutschland bis 2050 - Zur Bewertung von FuE-Aktivitäten zur Energieeffizienz in Industrie und

Gewerbe. Bericht für AP 2.2. des Begleitforschungsvorhabens. Hg. v. IREES GmbH. Karlsruhe.

Kaczmarczyk, P.; Krebs, T. (2025): Grüner Stahl als zentraler Pfeiler einer resilienten Wirtschaft. Hg. v. Universität Mannheim. Mannheim. Online verfügbar unter https://www.vwl.uni-mannheim.de/media/Lehrstuhle/vwl/Krebs/Grüner_Stahl.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2025.

Luderer, G.; Bartels, F.; Brown, T.; Aulich, C.; Benke, F.; Fleiter, T. et al. (2025): Die Energiewende kosteneffizient gestalten: Szenarien zur Klimaneutralität 2045. Hg. v. Kopernikus-Projekt Ariadne. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Online verfügbar unter https://ariadneprojekt.de/media/2025/03/Ariadne-Report_Szenarien2025_Maerz2025_lowres.pdf.

Münkler, H. (2023): Welt in Aufruhr. Die Ordnung der Mächte im 21. Jahrhundert. Berlin: Rowohlt.

oe24 (2025): COP30-Verhandlungen enden: Das sind die Ergebnisse. Online verfügbar unter <https://www.oe24.at/welt/cop30-verhandlungen-enden-das-sind-die-ergebnisse/657144860>, zuletzt geprüft am 24.11.2025.

Schaude, G.; Dektisch, A.; Gieseler, G.; Jochem, E.; Lange, S.; Legler, H. et al. (1976): Szenarien Chemische Technik – Planungsunterlagen zur Vorbereitung des Teilprogramms „Chemische Technik“ im Rahmenprogramm Forschung und Entwicklung zur Sicherung der Rohstoffversorgung. Battelle-Institut; Dornier System; Fraunhofer ISI. Frankfurt, Friedrichshafen, Karlsruhe.

Wietschel, M.; Weißenburger, B.; Wachsmuth, J.; Müller, V. P. (2024): Was wissen wir über Importe von grünem Wasserstoff und seinen Derivaten und was lässt sich daraus für eine deutsche Importstrategie ableiten? Impulspapier. DOI: 10.24406/publication-2623.