

FKZ: 03EN2107A-C

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zur Relevanz der öffentlichen Energiefor- schungsförderung, insbesondere für Industrie und Gewerbe

Kurzstudie im Rahmen des Verbundvorhabens EE4InG2

Karlsruhe, Aachen, Bensheim
Juli 2024

Das Begleitforschungsvorhaben EE4InG2 im Überblick

Projekthintergrund

Die **Energieforschungsförderung** orientiert sich an den energie- und klimapolitischen Zielen der Bundesregierung. Hauptziel ist dabei Klimaneutralität bis 2045 unter anderem durch höhere Energieeffizienz und den Ausbau erneuerbarer Energien. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) flankiert diese Ziele durch **Forschungsförderung der angewandten Energieforschung** im Rahmen des **Energieforschungsprogramms**. Ein Fokus liegt dabei auf der Energie- und Ressourceneffizienz in Industrie und Gewerbe. Das **Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe** fördert den Austausch von Experten in diesen Bereichen. Das BMWK prüft die Wirksamkeit des Energieforschungsprogramms und dessen zukünftige Entwicklung durch **Begleitforschung**. Die Begleitforschung dient schließlich als Instrument zur Bewertung und Weiterentwicklung der Forschungsförderung.

Projektziele

Das Verbundvorhaben EE4InG2 wurde konzipiert als **Begleitforschungsprojekt** für das **Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe (FNW INDG)**. 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.

Projektpartner: IREES, IOB/RWTH Aachen, ETA-Solutions

Kontakt: projektleitungEE4InG2@irees.de

Projekthomepage: <https://ee4ing2.de/>

Hinweise

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben „EE4InG2 – Begleitforschung für Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe 2.0“ wurde mit Mitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen FKZ 03EN2107A-C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den Autoren.

Vorschlag zur Zitation dieses Dokuments: Lösch, Oliver; Decker, Alexandra; Friedrichsen, Nele; Jochem, Eberhard; Moog, Daniel; Schwotzer, Christian; Rothhöft, Katharina (2024): Kurzstudie im Rahmen des Verbundvorhabens EE4InG2: Zur Relevanz der öffentlichen Energieforschungsförderung, insbesondere für Industrie und Gewerbe. Hg. v. IREES GmbH, RWTH Aachen (IOB), ETA-Solutions GmbH. Karlsruhe, Aachen, Bensheim.

Projektpartner

		
<p>IREES – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien GmbH</p> <p>Durlacher Allee 77 D-76131 Karlsruhe</p>	<p>RWTH Aachen University Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB)</p> <p>Kopernikusstr. 10 52074 Aachen</p>	<p>ETA-Solutions GmbH</p> <p>Darmstädter Str. 239 64625 Bensheim</p>
<p>Ansprechpartner: Oliver Lösch</p> <p>Tel.: +49 721 9152636-0 E-Mail: o.loesch@irees.de</p>	<p>Ansprechpartner: Dr.-Ing. Christian Schwotzer</p> <p>Tel.: +49 241 80 26068 E-Mail: schwotzer@iob.rwth-aachen.de</p>	<p>Ansprechpartner: Daniel Moog</p> <p>Tel. +49 6251 82555 33 E-Mail: moog@eta-solutions.de</p>

Inhaltsverzeichnis

1	Executive Summary.....	6
2	Zielstellungen	8
3	Methodisches Vorgehen.....	9
4	Relevanz der Forschungsförderung für die Transformation der Industrie.....	10
4.1	Neue Energie- und Produktionstechniken zur Steigerung der Energieeffizienz und Senkung des Energieverbrauchs.....	10
4.2	Szenarien zur Entwicklung des industriellen Energiebedarfs und Rolle der industriellen Energieeffizienz zur Zielerreichung.....	14
4.3	Spillovereffekte und internationale Industrietransformation.....	17
5	Relevanz der Forschungsförderung für die wirtschaftliche Entwicklung und Wettbewerbsfähigkeit einer industrialisierten Volkswirtschaft	18
6	Relevanz der Forschungsförderung für die Resilienz der deutschen Wirtschaft und Gesellschaft: technologischer Wettbewerb, internationaler Handel, Vermeidung von Schadenskosten	26
6.1	Reduzierung von Lieferkettenrisiken und Sicherung von Marktpositionen	26
6.2	Verschiebungen der Technologieführerschaft und internationale Abhängigkeiten als Herausforderung für Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit	27
6.3	Resilienz der europäischen und deutschen Wirtschaft.....	30
6.4	Vermeidungskosten, Schadenskosten und Adaptationskosten.....	32
7	Praxisbeispiel: Ex-post Evaluation zur Hochtemperatur-Wärmepumpe	33
8	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	38
9	Literaturverzeichnis	42

1 Executive Summary

Die vorliegende Kurzstudie betrachtet die Relevanz der öffentlichen Forschungsförderung, mit Fokus auf die Energieforschung und insbesondere in Industrie und Gewerbe. Dabei werden verschiedene Aspekte in den Blick genommen:

- der **Zusammenhang zwischen Forschungsförderung und wirtschaftlicher Entwicklung sowie Wettbewerbsfähigkeit,**
- die **Rolle der Forschungsförderung, um den Energieeffizienzfortschritt in der Industrie möglich zu machen und Produktionskosten zu senken,**
- die **Resilienz von Wirtschaft und Gesellschaft auch vor dem Hintergrund geopolitischer Herausforderungen.**

Die Kurzstudie greift im Sinne einer Metaanalyse auf Arbeiten Dritter zurück, wertet Datenbanken aus und ergänzt eigene Arbeiten beispielsweise in Form einer Trendanalyse bei relevanten Patenten im Bereich Energieeffizienz in der Industrie.

Im Ergebnis zeigt sich, dass die **Forschung und Entwicklung (FuE) im Energiebereich und deren Förderung eine hohe Relevanz im Kontext der genannten Aspekte hat**, in Summe eine hohe Rendite aufweist, zugleich aber **die öffentlichen Budgets für FuE im Energiebereich im internationalen Vergleich und in Relation zur deutschen Wirtschaftsleistung bereits heute gering ausfallen**. Eine Erhöhung dieser Budgets wäre daher sehr sinnvoll.

Die Kurzstudie zeigt: der positive Zusammenhang zwischen FuE-Investitionen und der wirtschaftlichen Entwicklung von Industrienationen ist in der wissenschaftlichen Literatur eindeutig belegt. **FuE-Investitionen zeigen eine hohe Rendite in Form erhöhten Wirtschaftswachstums und stärken die Wettbewerbsfähigkeit** der eigenen Industrie im internationalen Vergleich. Dieser letzte Aspekt ist insbesondere für exportorientierte Volkswirtschaften wie Deutschland wichtig.

Auch gibt es **klare Erkenntnisse zu den positiven Beschäftigungseffekten von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und zu den positiven Effekten auf die Ausbildung des benötigten akademischen Fachpersonals**. Im Umkehrschluss ist festzuhalten, dass eine Reduktion von Forschungsbudgets den bestehenden Mangel an hochqualifizierten Arbeitskräften weiter verschärfen kann. In geförderten FuE-Projekten arbeiten Studenten, Absolventen und Doktoranden, die über ihre Projektarbeit eine fachlich hochqualifizierte Ausbildung erfahren. Diese Fachkräfte arbeiten in der Folge in der Industrie. **Bei einer Einschränkung der Fördermittel würden diese Aktivitäten zurückgefahren und damit mittelbar auch weniger Fachkräfte zur Verfügung stehen.**

Die Kurzstudie führt das breite **Spektrum möglicher Energietechnologien für die Transformation der Industrie** hin zur Klimaneutralität auf und benennt den Stand der Entwicklung. Es zeigt sich, dass **erheblicher FuE-Bedarf** besteht. Das Spektrum technischer Lösungsoptionen zur Industrietransformation ist sehr breit und es hängt von den konkreten Rahmenbedingungen der Unternehmen ab, welche Lösung jeweils tragfähig sein wird. Daher ist eine entsprechend **breite, technologieoffene FuE wichtig**, um den technischen Lösungsraum nicht zu verkleinern. Auch unter diesem Aspekt ist eine **verlässliche und starke FuE Förderung erforderlich**.

Aktuelle Energieszenarien für die Industrie setzen zur Erreichung der klimapolitischen Ziele erhebliche Effizienzfortschritte durch eine zügige Diffusion neuer Techniken in die Produktion voraus. Hingegen führt ein geringerer Effizienzfortschritt zu erheblichen Mehrinvestitionen für neue Stromerzeugungsanlagen und Infrastrukturen. **Eine hohe FuE-Intensität für die industrielle Energieeffizienz ist also erforderlich für eine umsetzbare und bezahlbare Energiewende sowie zur Erreichung der Klimaschutzziele.** Ohne intensivierte FuE-Förderung neuer Energieeffizienztechniken kann auch deren Diffusion nicht in hinreichendem Maße und nicht schnell genug stattfinden. Diese Situation würde zur Verunsicherung vieler Unternehmen wegen fehlender Perspektive für die technische Transformation ihrer Produktionslinien führen.

In den für Deutschland sehr relevanten energieintensiven Industrien machen Energiekosten einen Großteil der Gesamtkosten aus. Eine deutlich gestärkte FuE für Energieeffizienz ist Voraussetzung für zukünftige Energiekostensenkungen in der Breite der Industrie. Vor dem Hintergrund der aktuellen Bemühungen, die Transformation der Industrie mit anderen politischen Instrumenten (EEW, Klimaschutzverträge, BIK) zu unterstützen, erscheint eine weitere Kürzung öffentlicher FuE-Budgets für industrielle Energieeffizienz nicht zielführend. **Das Energieforschungsprogramm ergänzt die angesprochenen Programme zur Investitionsförderung neuer Technologien, da es die der Investition vorgelagerte Entwicklung von Techniken zur Marktreife adressiert.**

Die Auswirkungen **wirtschaftlicher Abhängigkeiten durch Arbeitsteilung, Spezialisierung und Outsourcing von Produktion** sind in den letzten Jahren vor dem Hintergrund diverser Krisen (Corona, Ukraine-Krieg) sichtbarer geworden. Zugleich zeigen vergleichende Patentanalysen (Deutschland, China, USA), bei Produktgruppen die für die Energieeffizienz der industriellen Produktion besonders relevant sind, **den enormen Aufholprozess insbesondere Chinas, auch angetrieben durch dort stark gestiegene FuE-Budgets. Beide Aspekte gefährden die Resilienz der deutschen Wirtschaft**, sie haben negativen Einfluss auf die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit, und dies nicht nur auf internationalen Märkten, sondern auch auf dem heimischen Markt. **Ein Gegensteuern durch mehr Augenmerk auf technischer Innovation der Industrie**, auch durch öffentliche FuE-Budgets, sollte auch in diesem Kontext Teil der Strategie sein.

Öffentliche FuE-Budgets sollten stärker als erforderliches Risikokapital wahrgenommen werden. Einzelwirtschaftliche Entscheidungskalküle greifen oftmals zu kurz, da sie Investitionsoptionen mit vermeintlich sichererer und höherer Rendite priorisieren. FuE-Investitionen sind individuell betrachtet immer unsichere, aber in ihrer Summe, wie in der Kurzstudie ausgeführt, mittelfristig sehr renditestarke Investitionen.

In der Zukunftsstrategie Forschung und Innovation der Bundesregierung heißt es: „Um bis 2045 treibhausgasneutral zu werden, brauchen wir schnellstmöglich die Technologien und Konzepte für eine klimaneutrale Industrie, den effizienten Einsatz von Ressourcen, zirkuläres Wirtschaften, eine auf erneuerbaren Energien beruhende Energie- und Wärmeversorgung und die Mobilität der Zukunft.“ Eine Kürzung öffentlicher Forschungsbudgets zur Energieforschung ist mit dem Erreichen dieser Mission nicht vereinbar.

Als Ergebnis der Kurzstudie wird empfohlen, öffentliche FuE-Budgets als Zukunftsinvestitionen mit vielfacher Rendite zu verstehen und diese entsprechend auszubauen.

2 Zielstellungen

Anlass dieser Kurzstudie sind zwei aktuelle Entwicklungslinien: zum einen knapper werdende öffentliche Mittel, gesamtwirtschaftlich aufgrund der derzeitigen konjunkturellen Lage sowie fiskalpolitischer Entscheidungen, sowie spezifisch im Hinblick auf die Finanzierung von Klimaschutz und Energiewende unter anderem nach der Entscheidung des Bundesverfassungsgerichtes vom November 2023, dass nicht benötigte Kredite zur Bekämpfung der Corona-Pandemie nicht in den KTF fließen dürfen. Zum anderen stehen Staat und Gesellschaft vor massiven Herausforderungen, die den Einsatz öffentlicher Mittel in großem Ausmaß erfordern; hierunter auch und insbesondere die Erreichung der Klimaschutzziele sowie die Energiewende und die Transformation der Industrie. Aus dieser Gemengelage entsteht für die Bundesregierung und den Gesetzgeber die Notwendigkeit, entweder durch fiskalpolitische Maßnahmen neue Mittel zur Verfügung zu stellen oder die möglichen Ausgaben zu priorisieren und zielgerichtet sowie effektiv einzusetzen. Im Aufstellungsverfahren für den aktuellen Bundeshaushalt 2025 sind Kürzungen der geplanten Budgets der Bundesregierung in vielen Ressorts in der Diskussion, darunter auch der Einzelplan des BMWK für die Energieforschung inklusive der Forschung zur Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe, der bereits in 2024 gegenüber 2023 gekürzt wurde.

Vor diesem Hintergrund ist es das Ziel dieser Kurzstudie, die Relevanz der öffentlichen energiebezogenen Forschungsförderung hinsichtlich Klimaschutz und Energiewende, wirtschaftlicher Entwicklung und Wettbewerbsfähigkeit, sowie Resilienz von Wirtschaft und Gesellschaft zu untersuchen. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf der anwendungsnahen Energieforschung für Industrie und Gewerbe, da diese Kurzstudie im Rahmen der Begleitforschung zum Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe durchgeführt wird.

Für Deutschland als Volkswirtschaft, die nicht zuletzt einen erheblichen Anteil ihres Einkommens aus dem Außenhandel erwirtschaftet und die sich verbindliche Klimaschutzziele für 2030 und 2045 gesetzt hat, lässt sich diese Zielstellung mit folgenden Fragen konkretisieren:

Welche Bedeutung hat die FuE-Förderung im Bereich der Energieanwendung in Industrie und Gewerbe für

1. die wirtschaftliche Entwicklung und den Erhalt der mittel- bis langfristigen Wettbewerbsfähigkeit und somit auch für den Erhalt von Arbeitsplätzen?
2. die zügige Transformation und Dekarbonisierung der Industrie und des Gewerbes, sowie für Produktionskostensenkungen. Sind mehr Innovationen mit FuE-Bedarf erforderlich, um höhere Effizienzgewinne in der Wirtschaft zu ermöglichen, die für das Erreichen der deutschen Klimaschutzziele die Jahre 2030 und 2045 benötigt werden?
3. die Resilienz sowohl der deutschen Wirtschaft gegenüber globalen Unsicherheitsfaktoren als auch der Gesellschaft gegenüber Klimaschäden?

3 Methodisches Vorgehen

Die vorliegende Kurzstudie ist eine Metaanalyse und baut auf ausgewählten Arbeiten Dritter, eigenen Vorarbeiten sowie der Auswertung von Datenbanken und vergleichenden Patentanalysen auf. Die im Folgenden beschriebenen Methoden und Datenbanken werden genutzt, ausgewertet und eingeordnet. Aufgrund der Interdisziplinarität der Fragestellungen wird Literatur aus verschiedenen Fachgebieten genutzt, unter anderem:

- des Maschinen- und Anlagenbaus, der Elektrotechnik und der Materialwissenschaften,
- der Innovationsforschung mit besonderem Fokus auf die Wirkungen von Forschung und Entwicklung auf Patente, spätere Produkte und Markterfolge,
- der wirtschaftswissenschaftlichen Analyse mit ökonometrischen Methoden,
- Analysen zu den zukünftigen Kosten für Adaptationsmaßnahmen und Schadensbeseitigung von Klimawandelschäden.

Es werden Datenbanken ausgewertet, wie z.B. die Datenbank enArgus mit allen geförderten Vorhaben im Rahmen des Energieforschungsprogramms sowie der Datenbank der IEA zu öffentlichen energiebezogenen Forschungsbudgets.

Vergleichende Patentanalysen wurden für die drei Länder China, Deutschland und USA durchgeführt. Es wurden die Anzahl der gemeldeten Patente in etwa 20 Gruppen von Energieeffizienz-Techniken erhoben, ebenso Trends seit 2015 sowie die Spezialisierung eines Landes für bestimmte Energietechniken.

Die vorgenannten Methoden in ihrer Gesamtheit ermöglichen den Autoren, in relativ kurzer Bearbeitungszeit die vorgenannte Zielstellung der Analyse zu bearbeiten.

4 Relevanz der Forschungsförderung für die Transformation der Industrie

4.1 Neue Energie- und Produktionstechniken zur Steigerung der Energieeffizienz und Senkung des Energieverbrauchs

Mit dem Energieeffizienzgesetz setzt die Bundesregierung das Ziel, den jährlichen Endenergieverbrauch von 2008 (2.545 TWh) um 26,5 % auf knapp 1.870 TWh bis 2030 zu reduzieren. Das verarbeitende Gewerbe hat mit einem Anteil von circa 45 % den größten Primärenergiebedarf der Nachfragesektoren (Umweltbundesamt 2024), beschäftigte im Jahr 2023 7,5 Mio. Erwerbstätige (16,3% von 46 Mio. gesamtwirtschaftlich)¹ und erwirtschaftete 2021 20,2% der gesamtwirtschaftlichen Bruttowertschöpfung² Deutschlands. Das verarbeitende Gewerbe hat demnach sowohl eine erhebliche Bedeutung für den gesamtwirtschaftlichen Erfolg Deutschlands als auch eine hohe energiewirtschaftliche Relevanz.

Es ist aufschlussreich, dass das Verarbeitende Gewerbe zwischen 2008 und 2022 seinen Endenergieverbrauch von 715 TWh auf 668 TWh (-6,6 % bei geringer Produktionsauslastung der Grundstoffindustrie) senken konnte, d.h. pro Jahr durchschnittlich um rund 0,5 %/a oder 3,4 TWh/a. Wenn das Ziel von 525 TWh bis 2030 bei etwa gleicher Industriestruktur erreicht werden soll, müsste sich der Endenergieverbrauch der Industrie jährlich um gut 2,5 % oder um 17,9 TWh/a durch energieeffiziente Lösungen vermindern.

Auf den ersten Blick erscheint diese Verfünfachung in der Zeit von 2023 bis 2030 unrealistisch zu sein. Allerdings gibt es verschiedene Effekte, die mittels intensiver FuE sowie schneller Markteinführung der neuen Energie- und Produktionstechniken das Minderungsziel als vielleicht erreichbar erscheinen lassen. Im Bereich Industrie und Gewerbe sind die folgenden technischen Aspekte hierbei von besonderer Bedeutung:

1. Die Integration von Systemen zur **Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung** bietet das Potential, den Wirkungsgrad bestehender Produktionssysteme weiter zu verbessern. Insbesondere die Abwärmeströme gasbeheizter Anlagen zur Prozesswärmeerzeugung besitzen aufgrund ihres Temperaturniveaus von bis zu 500 °C einen hohen nutzbaren Energiegehalt (Fleiter et al. 2023b). Dieser kann in Verbundsystemen, bspw. in Vorwärm- oder Trocknungsprozessen genutzt werden. Da neben Strom aus Erneuerbaren Energien auch Wasserstoff langfristig als Energieträger eingesetzt werden soll, ist davon auszugehen, dass auch gasbeheizte Anlagen weiterhin genutzt werden. Techniken zur Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung werden daher auch in einem zukünftigen Versorgungssystem eine wichtige Rolle spielen. Diese Randbedingungen und zweifelsfreie Chancen sollten in die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten einfließen.

¹ <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitsmarkt/Erwerbstaetigkeit/Tabellen/arbeitsnehmer-wirtschaftsbereiche.html> ; zuletzt aufgerufen am 12.07.2024

² <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Industrie-Handel-Dienstleistungen/Industrie.html> ; zuletzt aufgerufen am 12.07.2024

2. Die **Substitution von Erdgas durch Strom zur Wärmeerzeugung** bietet für viele Anwendungen das Potential zur Reduzierung des Endenergiebedarfs nach dem Stand der Technik, da der die Verbrennung begleitende Luftstickstoff nicht mehr erwärmt wird. Für viele Anwendungen liegt das Potential gegenwärtig im Bereich von 10 %, für einige wenige kann es bis zu 40 % betragen (Fleiter et al. 2023b). Mit der Umstellung auf eine elektrische Beheizung von Thermoprozessanlagen vermindern sich auch die verfügbaren Abwärmeströme. Hier ist zu prüfen, ob die Substitution gasbeheizter Anlagen zur Prozesswärmeerzeugung durch elektrische Anlagen mit ihren veränderten Abgas- und Staubkonzentrationen verbesserte Wärmeübertrager erfordert, um die Energieeffizienz eines Gesamtsystems mit integrierter Abwärmenutzung weiter erhöhen zu können. Die **Hochtemperatur-Wärmepumpe (HT-WP)** verwendet hierfür als Wärmequelle mediengebundene Abwärmemengen und führt diese im Kreislauf. Marktreife HT-WP erreichen derzeit Prozesstemperaturen bis zu etwa 150°C und sind bis 120°C bereits in verschiedenen Branchen und Einsatzgebieten in der Anwendung. Im Labor- und Pilotmaßstab werden bereits Temperaturen bis 200°C und potenziell bis zu 300°C erreicht³. Hier resultieren Verluste nur noch durch bislang unvermeidbare Abstrahlung und innere Wärmen der Produkte, sofern diese nicht auch für Niedertemperaturprozesse verwendet werden (inkl. Sorptionskälteerzeugung).
3. Die **Substitution von relativ energieintensiven Produktionstechniken durch völlig neue Produktionsprozesse** mit deutlich geringerem spezifischen End- und Nutzenergie-Bedarf (vgl. Tabelle 1). Bei diesen Fällen, die eine gewisse energiewirtschaftliche Bedeutung erreichen, käme es darauf an, dass sie möglichst schnell zur Marktreife entwickelt oder für andere Anwendungsfälle adaptiert und dann schnell in die Marktdiffusion gebracht werden.
4. Die systematische Stärkung der Ressourceneffizienz durch Leichtbau, geringeren Verschleiß und weniger Fehlchargen, durch Einführung von Produkten 2. Wahl (in der Porzellanindustrie durchaus üblich), durch verstärktes Recycling von Metallen, Papier und Kunststoffen sowie die Substitution von Metallen und energieintensiven Baumaterialien durch weniger energieintensive Substitute (z.B. Holz, Flachs, Lehm, Kalk u. ä.). Dadurch würde die Nachfrage nach Grundstoffen reduziert und damit auch der für deren Herstellung benötigte Endenergiebedarf.

³ <https://www.dlr.de/de/di/aktuelles/nachrichten/inbetriebnahme-cobra-am-07-05.2024> (letzter Zugriff am 9.07.2024)

Neue Produktionstechnik mit TRL-Einschätzung	Substituierte Produktionstechnik mit energiewirtschaftlicher Bedeutung bei voller Marktdiffusion in D	Erwartete Eff.-Verbesserung	Hinweise
Nano-Membrantechnik (zur Trennung von Stoffen) TRL: 6-8	Thermische Trennverfahren, flüssig/gasförmig mit heute ca. 180 PJ/a (Quelle: (Schäfer et al. 2021))	ca. 90 %	bereits angewandt bei Pharma u. Nahrungsmitteln
Elektrisch geladene Katalysator-Systeme für die Herstellung von Kohlenwasserstoffen; TRL: 4-6	Traditionelle Synthesen mit hoher Temperatur und Druck (z.B. in Zukunft Fischer-Tropsch-Synthese); energie-wirtschaftlich schwer einzuschätzen; mindestens 10 PJ/a	40 - 80 %	Labormaßstab: kalte Plasma-Katalyse (H ₂ + CO ₂); Quelle: u.a. (Pöhlmann 2017);

Tabelle 1: Beispiele für die Substitution von relativ energieintensiven Produktionstechniken durch völlig neue Produktionsprozesse und Einsatz neuer Materialien

Der weitaus größte Teil der industriellen Produktsynthesen in der organischen Chemie erfolgt durch die Reaktion von Stoffen in Lösung. Nachgeschaltete Prozesse, wie Lösungsmittelkonzentration und Lösungsmittelrückgewinnung, spielen eine entscheidende Rolle. Der dafür erforderliche Energieaufwand ist enorm, ca. 10 % der weltweit verbrauchten Energie (Lively und Sholl 2017). Der Vorteil der Nano-Membranverfahren liegt in den relativ milden Anwendungsbedingungen begründet. Da kein Phasenübergang des Lösungsmittels beim Trennverfahren erforderlich ist, verringert sich der Energiebedarf im Vergleich zu thermischen Prozessen um etwa 90 % (vgl. Tabelle 1; (Schäfer et al. 2021))

Eine vielversprechende Alternative zu konventionellen katalytischen Verfahren können Plasmaprozesse bieten, um Treibhausgase in Synthesegas, Methan oder andere Stoffe umzuwandeln. Während dafür hohe Temperaturen und teilweise hohe Drücke bei konventionellen katalytischen Prozessen nötig sind (z.B. Fischer-Tropsch Synthese), ist dies durch Plasma bereits bei atmosphärischem Druck und geringer Temperatur möglich. Nicht-thermisches Plasma (NTP) ermöglicht aufgrund seiner einzigartigen Eigenschaften selbst unter Umgebungsbedingungen chemische Reaktionen. Wie sehr dieses Verfahren zum Einsatz kommt, hängt von vielen Faktoren ab (z.B. Nachfrage und Importe von Synfuels, für CCU verfügbare CO₂-Mengen). Die in Tab. 1 genannten Endenergieeinsparungen von 5 PJ jährlich sind eine sehr niedrige Annahme.

Potentiale zur Energieeffizienzverbesserung können vielfach zusammen mit Maßnahmen zur Dekarbonisierung der Industrie umgesetzt werden.

Eine Studie des Umweltbundesamtes (Fleiter et al. 2023b) kommt anhand der Analyse verschiedener Fallbeispiele zu dem Ergebnis, dass der Umstieg auf CO₂-neutrale Alternativetechniken auch das Potential einer Reduktion des jährlichen Endenergiebedarfs der Anwendungen im Anlagenpark mit sich bringt, wobei aufgrund der Heterogenität der

Prozesse und Anwendungen die Potentiale im Einzelfall unterschiedlich hoch sind. Bei einer Elektrifizierung wird bspw. von einer Reduktion um bis zu 40 Prozent in der Glasherstellung im Bereich kleiner Schmelzwannen in der Behälterglasindustrie ausgegangen, während die Reduktionen durch Elektrifizierung bei der Keramik- und Ziegelherstellung mit 5 Prozent eher gering sind. Für die Zementindustrie wird hingegen von einem Mehrverbrauch durch eine potentielle Vollelektrifizierung ausgegangen. In der Metallindustrie können in einzelnen sehr speziellen Anwendungen, bei denen eine induktive Beheizung möglich ist, Einsparungen bis über 30 Prozent erreicht werden. In der Dampferzeugung wird mit einer Verringerung von unter 10 % bei Umstieg auf einen Elektrodenkessel und um circa 50 % bei Umstieg auf eine HT-Wärmepumpe gerechnet. Bei der Nutzung von Wasserstoff kommt die Studie zum Schluss, dass diese kaum oder nur leichte Effizienzvorteile wie bspw. 5 % in der Dampferzeugung (Nutzung eines Wasserstoffkessels) nach sich zieht. Dies ist insbesondere in der vergleichbaren Anlagentechnik begründet, wie Brenner oder Wärmerückgewinnung. Wobei auch zu beachten ist, dass sich die Studie am Stand der Technik orientiert und keine dezidierte Analyse des Potentials zur Verbesserung der Energieeffizienz der jeweiligen Techniken vornimmt. Hier wird davon ausgegangen, dass insbesondere bei einer Beheizung mit Wasserstoff weitere Effizienzpotentiale durch eine gezielte Abwärmenutzung gehoben werden können, welche in der Größenordnung derjenigen für vergleichbare konventionell gasbeheizte Systeme liegen.

Viele der für eine Transformation notwendigen Technologien befinden sich jedoch noch in einem vergleichsweise geringen Entwicklungsstadium, bzw. vorhandene Techniken (wie HT-Wärmepumpen) schöpfen das bestehende Potenzial zur Senkung des industriellen Energiebedarfs noch nicht aus und sollten daher weiterentwickelt werden. So wird beispielsweise der Technologiereifegrad (TRL) für den Einsatz von Wasserstoff zur CO₂-neutralen Prozesswärmeerzeugung in der Metall- und Mineralindustrie bis auf wenige Ausnahmen mit 4-6 angegeben, wobei mit gezielten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten eine schnelle Hebung des TRL in Aussicht gestellt wird (Fleiter et al. 2023b).

Hinsichtlich der Möglichkeiten einer CO₂-neutralen Prozesswärmeerzeugung durch eine Elektrifizierung der Prozesse ist der Stand der Technik und der Technologiereifegrad deutlich heterogener. So ist der TRL bspw. für viele Prozesse in den Branchen der Aluminium- und Kupfer- sowie Gusseisenherstellung, der Härterei- und Umformtechnik, sowie der Dampferzeugung hoch (TRL 7-9). Für andere Prozesse wie die Elektrifizierung von Walzwerken, der Keramik, Glas und einige Anlagen im Bereich des Schmiedens liegt der TRL hingegen im mittleren Bereich (TRL 4-5) und insbesondere für Prozesse mit hohen Temperaturen und Produktionskapazitäten in der Umformtechnik, in Stahlwalzwerken aber auch der Kalk- und Zementindustrie ist er gering (TRL < 3). Das liegt insbesondere daran, dass bei einer Elektrifizierung je nach Anwendung unterschiedliche Techniken der Elektrifizierung zum Einsatz kommen müssten, u.a. Induktion, direkte und indirekte Widerstandserwärmung, Plasma- oder Lichtbogenbeheizung, deren Technologiereife sich im Hinblick auf die unterschiedlichen Prozessanforderungen der jeweiligen Anwendungen deutlich unterscheidet.

Im Folgenden werden eine Reihe der genannten Techniken näher betrachtet.

Technikbeispiel elektrische Widerstandsheizelemente: Diese Beheizungstechnologie kann für Anwendungen mit vergleichsweise geringen Temperaturen und Kapazitäten

eingesetzt werden. Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf betrifft die begrenzte Leistungsdichte, die maximale Anwendungstemperatur und Lebensdauer der Heizelemente (Nacke und Baake; Nerreter 2011; Lupi 2017). Der FuE-Bedarf schließt neue Anlagenkonzepte, aber auch die Erprobung neuer Heizelementwerkstoffe ein.

Technikbeispiel Induktionserwärmung: Hier liegt die Notwendigkeit für Forschung und Entwicklung in der gezielten Auslegung der Beheizungseinrichtung für neue Anwendungen. Anlagenkenndaten und Spulengeometrie müssen auf das Gut (Werkstück, Schmelze) abgestimmt werden. Bei der Erwärmung von rechteckigen Werkstücken besteht bspw. die Schwierigkeit darin, eine gleichmäßige Wärmeabgabe an das Werkstück zu erreichen (Rudnev et al. 2017).

Technikbeispiel Plasmaerwärmung: Die Verwendung von mittels Strom erzeugtem Plasma, d. h. ionisiertes und elektrisch leitfähiges Gas in **sogenannten Plasmabrennern**, erlaubt eine hohe Leistungsdichte und besitzt das Potenzial, Abgasströme zu reduzieren. Sie sind für die Anwendungen der Metall- und Mineralindustrie jedoch noch nicht erprobt. Nachteile dieser Technologie sind die häufige Wartung, eine aufwendige Kühlung der thermisch belasteten Komponenten, welche sich auch auf den Gesamtwirkungsgrad der Anlage auswirkt, und die geringe Lebensspanne der Elektroden (EnergieAgentur.NRW GmbH 2020; Rao et al. 2013). Es existieren zwar theoretische Ansätze, Plasmabrenner auch zum Erwärmen von Stahl oder zum Sintern von Zementklinker zu verwenden. Hierbei handelt es sich aber bisher um Machbarkeitsstudien. Eine kommerzielle Nutzung im Bereich der Hochtemperaturerwärmung ist nicht vor dem Jahr 2035 zu erwarten (Sandberg 2020; Triple Steelix 2020; Wilhelmsson et al. 2018).

Technikbeispiel direkte elektrische Widerstandserwärmung: Dieses Verfahren wird z. B. beim Schmelzen von Glas oder bei der Schmelzflusselektrolyse von Aluminium, aber auch in der Eisen-, Stahl- und Nichteisenindustrie bei der Erwärmung von Knüppeln, Stangen, Rohren, Blechen, Bändern und Drähten verwendet (Nacke und Baake). Hierbei fließt der Strom direkt durch das zu erwärmende Gut (im Unterschied zur indirekten Widerstandserwärmung mit Heizelementen). Die Technologie ist vielfach durch eine hohe Energieeffizienz gekennzeichnet, jedoch aktuell eher auf sehr spezifische Anwendungen mit geringeren Produktionsmengen beschränkt.

Die hier nur in ersten Ansätzen diskutierte Vielfalt der technischen Handlungsoptionen zur Dekarbonisierung und Steigerung der Energieeffizienz der industriellen Produktion macht deutlich, dass es zur Erreichung der gesetzten Ziele nicht an technologischen Ansätzen mangelt. Jedoch sind in vielen Fällen noch erhebliche FuE-Anstrengungen und entsprechende FuE-Investitionen erforderlich, um die technische und ökonomische Marktreife dieser technischen Optionen zu erreichen.

4.2 Szenarien zur Entwicklung des industriellen Energiebedarfs und Rolle der industriellen Energieeffizienz zur Zielerreichung

Die Langfristszenarien des BMWK für den Industriesektor (Fleiter et al. 2021) betrachten die zukünftige Diffusion von Energieeffizienztechniken, welche sich noch nicht in der kommerziellen Anwendung befinden. Die vorliegenden Energiebedarfs-Szenarien für den Sektor Industrie unterstellen teilweise ein hohes Ambitionsniveau des

Effizienzfortschritts. So wird bspw. in den TN-Szenarien der Studie (berechnet in 2021) eine Marktdiffusion von neuen effizienteren Energietechniken unterstellt, die derzeit meist einen TRL um 6 bis 7 haben (siehe Abbildung 3-1) (Fleiter et al. 2021, S. 32). Die Realisierung der in den Szenarien skizzierten Emissionsminderungspfade setzt mithin voraus, dass diese (und weitere hier nicht genannte) energieeffiziente Lösungen in wenigen Jahren bis TRL 9 weiterentwickelt und schnellstmöglich im Markt zur Diffusion gebracht werden können. In den T45-Szenarien (2022) wird die Diffusionsgeschwindigkeit gegenüber den TN-Szenarien generell noch einmal erhöht (Fleiter et al. 2023a, S. 25). Eine weitere und eher noch deutlich forcierte Förderung der Forschung, Entwicklung und Demonstration ist erforderlich, um die Effizienztechniken tatsächlich so schnell in den Markt zu bringen, wie in den Szenarien angenommen.

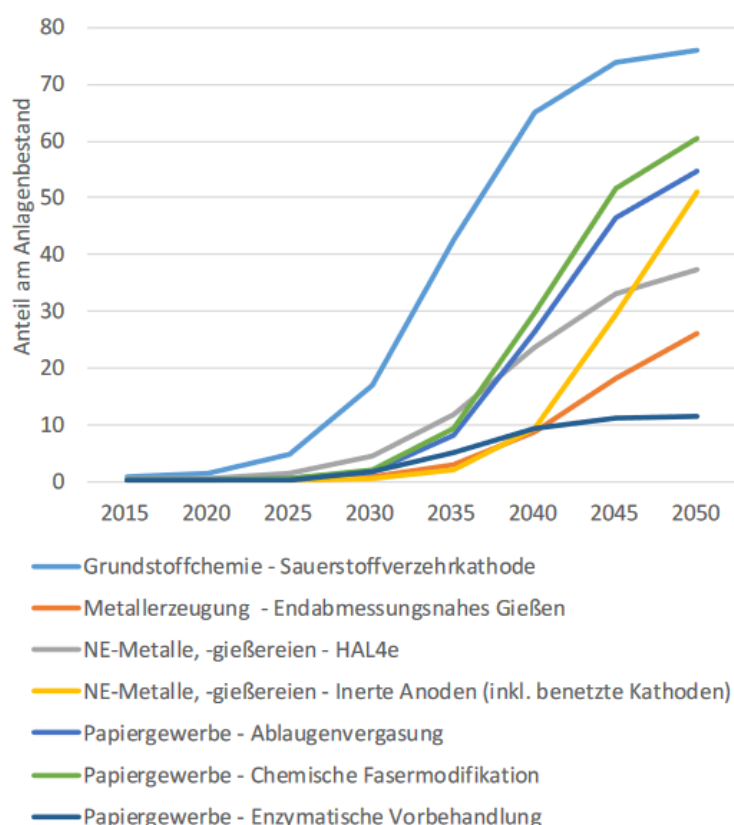


Abbildung 3-1 Diffusion ausgewählter innovativer Effizienzmaßnahmen in den TN-Szenarien der Langfristszenarien (Fleiter et al. 2021, S. 32)

Eine Verringerung des Effizienzfortschritts wirkt sich negativ auf die Erreichbarkeit der Ziele zur Reduzierung des Endenergieverbrauchs aus. So wird in der Sensitivität T45-RedEff der Langfristszenarien ein verringerter Energieeffizienzfortschritt ggü. dem Basisszenario T45-Strom untersucht. Dabei wird angenommen, dass Maßnahmen zur Verbesserung der Effizienz langsamer umgesetzt werden, da die angenommenen Werte für die maximale Umsetzungsrate sowie die Risikobereitschaft (ausgedrückt durch die für Investitionen geforderte Amortisationszeit) im Vergleich zu T45-Strom deutlich niedriger liegen. Weiterhin werden geringere Recyclingquoten bei der Produktion energieintensiver Güter wie Stahl, Aluminium, Kupfer und Papier zugrunde gelegt (Fleiter et al. 2023a,

S. 75). Im Vergleich zu T45-Strom fällt der Strombedarf in T45-RedEff in 2045 um 88 TWh (25 %) höher aus (Fleiter et al. 2023a, S. 78). Dieser erhebliche Strommehrbedarf muss entweder durch entsprechende EE-Erzeugungskapazitäten oder Importe bereitgestellt werden. Durch die reduzierte Materialeffizienz steigt zusätzlich der Wasserstoffbedarf in 2045 gegenüber T45-Strom um 26 TWh (9 %) (Fleiter et al. 2023a, S. 81).

Eine wegen nicht genutzter Effizienzpotenziale zusätzlich gesteigerte Nachfrage nach regenerativ erzeugtem Strom geht mit einem höheren Bedarf für Investitionen in den Anlagenpark Erneuerbarer Energien sowie der Stromnetzinfrasturktur und der damit verbundenen Schwierigkeiten (Akzeptanz, Flächenkonkurrenz, etc.) einher. Ein gesteigerter Bedarf an (grünem) Wasserstoff führt zu einer höheren Importabhängigkeit. Zusätzlich zu speichernde CO₂-Emissionsmengen aufgrund ausbleibender Effizienzgewinne, bspw. aus verbleibenden Erdgas- oder Müllverbrennungsanlagen, würden zu steigenden Produktionskosten in den betroffenen Grundstoffindustrien führen. Mithin sind Energie- und Ressourceneffizienz zentrale Bausteine einerseits zur Reduktion der CO₂-Emissionen und damit ein Beitrag zum Erreichen der klimapolitischen Ziele und andererseits gleichzeitig eine Maßnahme zum Erhalt und zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der Industrie (siehe auch Abschnitt 5).

Die Umstellung auf eine CO₂-neutrale Technik ist im hohen Maße durch die erwarteten Energiepreise bestimmt. Eine Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (Fleiter et al. 2023b) analysiert, wie sich unterschiedliche Preissignale auf die Transformation eines Anlagenparks in Deutschland, bestehend aus Technikbeispielen zur Prozesswärmeerzeugung in der Metall- und Mineralindustrie sowie Dampferzeugung, auswirkt, wobei in der Studie die langfristige Diffusion einer neuen Technik in den Anlagenpark im Fokus steht. Aus betriebswirtschaftlicher Perspektive können Investitionskosten, lange Amortisationszeiten und Liquiditätsprobleme die Umstellung verhindern. In der Studie (Fleiter et al. 2023b) bestimmt jedoch insbesondere die Preisdifferenz zwischen Erdgas und Strom zusätzlich zu einer CO₂-Bepreisung der unterschiedlichen Energieträger die Verbreitung CO₂-neutraler Techniken. Gegenwärtige Effizienzgewinne können, isoliert betrachtet, bisher die Mehrkosten CO₂-neutraler Energieträger gegenüber fossilen Energieträgern meist nicht kompensieren, sodass CO₂-neutrale Techniken beim bisherigen Preisniveau nicht konkurrenzfähig sind. Eine weitere Steigerung der Effizienz der CO₂-neutralen Techniken kann jedoch zur Konkurrenzfähigkeit dieser beitragen. Dies gilt sowohl für die Bereitstellung von Energieträgern (Strom/Wasserstoff), als auch für die energienutzende Technik, um den Energiebedarf und somit die Kosten zu senken.

Da die Ausgestaltung des zukünftigen Systems der Energieversorgung mit Unsicherheiten behaftet ist und sich zudem regional unterscheiden kann, müssen die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten technologieoffen sein. Transformationspfade beinhalten standortspezifisch u.a. eine unterschiedliche Verfügbarkeit von Strom oder grünem Wasserstoff, den Ausbau der CO₂-Infrastruktur oder die Verfügbarkeit biogener Energieträger. Die Forschungsförderung muss die Vielfalt dieser Entwicklungsperspektiven berücksichtigen. Querschnittstechnologien wie energieeffiziente Dämmstoffe, die Reduzierung von Reibungsverlusten (Tribologie) oder Verfahren zur Abwärmenutzung (u. a. Wärmepumpen), die in vielen zukünftigen Rahmenbedingungen eingesetzt werden können, kommt eine besondere Bedeutung zu.

4.3 Spillovereffekte und internationale Industrietransformation

Nationale Förderpolitiken und daraus resultierende Entwicklungen haben Wirkungen, die über die nationalen Grenzen hinaus gehen. Der Nutzen nationaler Anstrengungen in Bezug auf die Transformation der Industrie oder Klimaschutz allgemein ist mithin größer als es aufgrund der nationalen Effekte zunächst scheint. Die Energieeffizienztechnologien, die in Deutschland entwickelt werden, werden ins Ausland exportiert werden. Gleiches gilt natürlich auch in umgekehrter Richtung. Dies sorgt für Exportgeschäfte. Gleichzeitig überträgt es den erarbeiteten Fortschritt in andere Länder und ermöglicht es diesen ebenfalls ihren Energieverbrauch zu senken und die Energieeffizienz zu steigern. Gleiches geschieht, wenn internationale Firmen Effizienzfortschritte, die sie in Deutschland in geförderten Projekten pilotieren, in der Folge für weitere internationale Standorte übernehmen. Spillovereffekte sind auch mit ein Grund dafür, dass Unternehmen bzgl. eigener FuE-Investitionen ggf. zurückhaltend sind, da sie nicht die einzigen Profiteure des eingesetzten FuE-Kapitals sind, sondern es zugleich eine soziale (d.h. nicht-privatisierte) Rendite gibt, die auch Konkurrenten zugutekommen kann. Dies ist ein wichtiges Argument für das Erfordernis einer öffentlichen Forschungsförderung.

Des Weiteren findet politisches Lernen grenzüberschreitend statt. Politische Instrumente werden im Ausland (oder auf sub- oder supranationaler Ebene) übernommen, angepasst und ggf. verbessert. Ein Beispiel hierfür ist das deutsche Energieeinspeisegesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien, das zu einem starken Ausbau Erneuerbarer Energien und einer Senkung der Kosten für Photovoltaik (PV) und Windenergie in Deutschland geführt hat. In der Folge führten zahlreiche andere Länder ebenfalls Einspeisetarife für Erneuerbare ein.

Die Übernahme und Marktdiffusion einer neuen (Energieeffizienz-)Technologie wiederum führt in der Regel über Skaleneffekte zu Kostensenkungen. Davon profitieren Unternehmen weltweit, die diese Technologien zu geringeren Kosten einsetzen können. Beispiele hierfür sind die oben bereits erwähnten Kostensenkungen von Wind und PV, ebenso wie Batterien (Rocky Mountain Institute 2019). Neuere Entwicklungen können dabei die Kostenreduktion für Batterien steigern (Rocky Mountain Institute 2019).

Über die Kombination unterschiedlicher Technologien können darüber hinaus in der internationalen Zusammenarbeit positive Effekte entstehen, wenn sich nationale technologische Fortschritte ergänzen (Ancygier 2020).

Darüber hinaus sind auch Spillover-Effekte durch Forschungsvorhaben innerhalb derselben Unternehmen denkbar. So könnte durch die Präsenz innovativer Forschung zu energieeffizienten Techniken in einem Unternehmen die Aufmerksamkeit für betriebliche Energieeffizienz insgesamt steigen und weitere Maßnahmen anstoßen. Dies kann auch über Netzwerke, beispielsweise Energieeffizienznetzwerke, auf andere Unternehmen ausstrahlen.

Hieraus folgt ein potenziell erheblicher Hebeleffekt für die eingesetzten öffentlichen FuE-Budgets im Hinblick auf die Steigerung der gesellschaftlichen Wohlfahrt durch die Senkung von Treibhausgasemissionen weltweit.

5 Relevanz der Forschungsförderung für die wirtschaftliche Entwicklung und Wettbewerbsfähigkeit einer industrialisierten Volkswirtschaft

Die Konzepte Wettbewerbsfähigkeit, Produktivität und Innovation weisen enge Zusammenhänge auf; hierauf verweist die Europäische Kommission in ihrem Bericht „Science, research and innovation performance of the EU, 2020“ (European Commission 2020). Innovation ermöglicht bessere und günstigere Produkte und verbessert die Effizienz des Produktionsprozesses, d.h. steigert die Produktivität. Technische Innovation zur Senkung des spezifischen Endenergie- oder Nutzenergiebedarfs für den Produktionsprozess – Energieeffizienz in der Industrie – ist ein wichtiger Aspekt hiervon. Die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen hängt wiederum von dieser Fähigkeit zur Steigerung ihrer Produktivität – der Fähigkeit, die Kosten pro Einheit des Outputs zu senken – ab. Höhere Wettbewerbsfähigkeit auf den Weltmärkten wiederum steigert das Wirtschaftswachstum.

Der Bericht (European Commission 2020) zitiert aktuelle Analysen zu den Zusammenhängen zwischen Innovation, Forschung und Entwicklung sowie Wirtschaftswachstum auf Basis der Methode der Wachstumszerlegung (growth accounting), die seit den 1950er Jahren etabliert ist. Hierbei wird mit Hilfe einer Produktionsfunktion unter Nutzung empirischer Daten eine Faktorzerlegung der für das Wirtschaftswachstum ursächlichen Faktoren durchgeführt. Im Ergebnis kann nahezu die Hälfte (47,8 %) der BIP-Wachstumsrate der untersuchten EU-Staaten⁴ der Jahre 2010 bis 2016 Innovation, Forschung und Entwicklung – dem technischen Wandel – zugerechnet werden. Die verbleibenden Wachstumsfaktoren, die in Summe für die verbleibende Hälfte der Wachstumsrate verantwortlich sind, sind strukturelle Änderungen in der geleisteten Arbeit, Änderungen der Anzahl der geleisteten Arbeitsstunden sowie Änderungen des Produktionskapitals.

Eine Studie des DIW im Auftrag der KfW hat 2015 die Zusammenhänge zwischen Wirtschaftswachstum und FuE-Aufwendungen mit Hilfe von ökonometrischen Regressionsmodellen auf Basis empirischer Paneldaten untersucht (Belitz et al. 2015). Methodisch kommt das Konzept einer Produktionsfunktion mit Wissenskapital⁵ zum Einsatz: ein häufig verwendeter Ansatz, um Zusammenhänge zwischen Wirtschaftswachstum und Forschungsaktivitäten zu analysieren. Der Wissenskapitalstock, d.h. die kapitalisierten FuE-Aufwendungen, wird hierbei als Produktionsfaktor neben weiteren Faktoren (Kapitalstock und Arbeitseinsatz) betrachtet. Als empirische Datengrundlage wurden Paneldaten von FuE-Ausgaben (sowohl öffentliche als auch private) für 19 OECD Staaten⁶ für den Zeitraum 1981 bis 2011 herangezogen.

⁴ Es wurden Daten von 19 EU-Staaten für die Analyse genutzt, diese sind: BE, CZ, DE, DK, EE, ES, FR, IT, LV, LT, LU, HU, NL, AT, RO, SI, SK, FI und SE.

⁵ D.h. FuE-Ausgaben werden als Investitionen, die ein über die Zeit abzuschreibendes Wissenskapital bilden, betrachtet

⁶ Belgien, Dänemark, Finnland, Frankreich, Irland, Italien, Niederlande, Portugal, Schweden, Spanien, Großbritannien, Deutschland, Tschechische Republik, Ungarn, Polen, Kanada, Japan, Korea, USA.

Die Panelanalysen bestätigen für alle berücksichtigten Staaten in ihrer Gesamtheit einen direkten Einfluss von FuE-Ausgaben auf das Wirtschaftswachstum. Für das verwendete Sample wurde mittels eines linearen Regressionsmodells für die Produktionsfunktion abgeleitet, dass eine Erhöhung der gesamtwirtschaftlichen FuE-Ausgaben um 1 Prozentpunkt das kurzfristige BIP-Wachstum um 0,05 Prozentpunkte erhöht. Mögliche nichtlineare Zusammenhänge wurden ebenfalls untersucht, es hat sich jedoch gezeigt, dass das lineare Modell robustere Ergebnisse liefert.

Für einzelne Staaten, wie Deutschland, liefern die vorgenannten Paneldatenmodelle aus methodischen Gründen keine verlässlichen Ergebnisse bzgl. des Zusammenhangs von FuE-Ausgaben und Wirtschaftswachstum, wie in der Studie ausgeführt wird. Jedoch können für einzelne Staaten Zeitreihenmodelle zielführend angewandt werden. Mit diesen ist es möglich, bei hinreichend langen Reihen und unter Kontrolle der anderen Inputfaktoren, abermals unter Nutzung einer Produktionsfunktion den genannten Zusammenhang für Deutschland zu analysieren. Den Autoren stand für diese Analyse eine konsistente Zeitreihe der deutschen FuE-Ausgaben von 1964 bis 2012 zur Verfügung. Es kamen mehrere Modellansätze (univariate und multivariate Modelle) zum Einsatz, die hier nicht im Einzelnen beschrieben werden können. Im Ergebnis halten die Autoren fest, dass die Zeitreihenanalysen Evidenz für einen klaren und signifikanten positiven Zusammenhang zwischen FuE-Investitionen und Wirtschaftswachstum in Deutschland liefern. Dass sich dieses Ergebnis aus einer Vielzahl von Modellierungsansätzen speist, spricht für dessen Robustheit.

Quantitativ führt eine Erhöhung der FuE-Ausgaben um einen Prozentpunkt kurzfristig zu einer Erhöhung des BIP-Wachstums um 0,15 bis 0,24 Prozentpunkten und von etwa 0,12 Prozentpunkten in der längeren Frist. Da die beiden Bezugsgrößen (FuE-Investitionen einerseits, BIP andererseits) sich in ihrer absoluten Höhe deutlich unterscheiden, ist ein illustratives Beispiel hilfreich, das hier ebenfalls direkt aus (Belitz et al. 2015) zitiert wird. Unter Annahme der unteren Bandbreite des kurzfristigen Effekts (0,15 Prozentpunkte) und für das Beispieljahr 2012 würde eine Ausweitung der FuE-Ausgaben um 1 Mrd. € bei einer Abschreibungsrate für die FuE-Investitionen von 5% zu einer Erhöhung des BIP um 470 Mio. € im Folgejahr, und analog bei einer Abschreibungsrate von 15% zu einer Erhöhung des BIP um 1,08 Mrd. € im Folgejahr führen; hieraus ergibt sich eine Bandbreite für die Rendite der zusätzlich in FuE investierten Budgets von 40% bis 90 %. Es gilt zu betonen, dass dieses Beispiel nur die kurzfristige Wirkung illustriert; auch in der langfristigen ist der Zusammenhang zwischen FuE-Investitionen in einem bestimmten Jahr und einem positiven Effekt auf das Wirtschaftswachstum gegeben.

Es lässt sich also festhalten, dass FuE-Investitionen für Industrieländer ein zentraler Wachstumstreiber sind. Die Studie verweist weiterhin auf umfangreiche wissenschaftliche Literatur, die mit verschiedenen Ansätzen gleiche oder ähnliche Fragestellungen bearbeitet haben. Die Grundaussage der DIW-Studie von (Belitz et al. 2015), dass ein positiver Zusammenhang zwischen FuE-Investitionen und Wirtschaftswachstum in den Industriestaaten besteht, wird durch diese Literatur ebenfalls bestätigt. Auch (Keuschnigg et al. 2021) kommen bei einer ökonometrischen Analyse von über vier Jahre geförderten und nicht geförderten Unternehmen zu dem Ergebnis, dass sich etwa 28 % des BIP-Wachstums ursächlich auf die Wirkungen des Innovationssystems zurückführen lassen. Dieser Effekt werde mit FuE-Ausgaben von gut 3 % des BIPs erzielt. Eine Erhöhung

der öffentlichen FuE-Ausgaben um 1 Euro könne langfristig das BIP um bis zu 6 Euro erhöhen.

Öffentliche FuE-Ausgaben sind zudem relevant für die Sicherung der akademischen Arbeitskräfte der Zukunft. In vielen Fällen werden mit geförderten energiebezogenen FuE-Verbundvorhaben wissenschaftliche Abschlussarbeiten, oftmals Dissertationen, mitfinanziert. Auch dies ist ein wichtiger Aspekt für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Volkswirtschaft, der nicht unterschätzt werden sollte.

Vor dem Hintergrund der klaren wissenschaftlichen Evidenz eines positiven Zusammenhangs zwischen Forschung und Innovation, FuE-Förderung und Wettbewerbsfähigkeit sowie Wirtschaftswachstum wird im Folgenden ein Blick auf die Entwicklung der öffentlichen und energiebezogenen FuE-Budgets in Deutschland und ausgewählten Wettbewerberländern geworfen.

Die Internationale Energieagentur stellt mit ihrem „Energy Technology RD&D⁷ Budgets Data Explorer“ (IEA 2024b) eine umfangreiche Datensammlung zu energiebezogenen öffentlichen FuE Ausgaben verschiedener Staaten im Zeitverlauf zur Verfügung, auch bis zur Disaggregationsebene „Energieeffizienz Industrie“. Die Daten werden der IEA durch die Staaten zur Verfügung gestellt; für Deutschland werden die Budgets des Energieforschungsprogramms berichtet (IEA 2024a). Diese Daten werden im Folgenden ausgewertet.

Eine langfristige Betrachtung zeigt, dass die deutschen FuE Budgets für Energieeffizienz in der Industrie im langfristigen Vergleich zunächst gesunken, dann seit den 2000er Jahren wieder deutlich angestiegen sind, jedoch auf sehr niedrigem absolutem Niveau (Abbildung 3-2).

Ein Blick auf die aktuellen Budgetentwicklungen der Jahre 2023 und 2024 für den durch das BMWK verwalteten Teil des Energieforschungsprogramms⁸ (Einzelplan 9, Titel 683 01 des Bundeshaushalts) – der auch die Mittel für FuE in den energienutzenden Verbrauchssektoren enthält – zeigt weitere Kürzungen auf. So standen 2022 noch 600 Mio. € zur Verfügung, 2023 waren es 589 Mio. €, 2024 ist dieser Ansatz weiter auf 569 Mio. € gekürzt worden.

Die aktuelle Haushaltsaufstellung für 2025 vom 15.07.2024⁹ sieht demgegenüber nochmals einen Rückgang des Ansatzes auf nun 482 Mio. € vor, ein Rückgang um 15,3 %.

⁷ Research, Development & Demonstration

⁹ https://table.media/wp-content/uploads/2024/07/15172825/240715_BMF_KabV_Haushalt_2025_Table.pdf; zuletzt geprüft am 16.07.2024

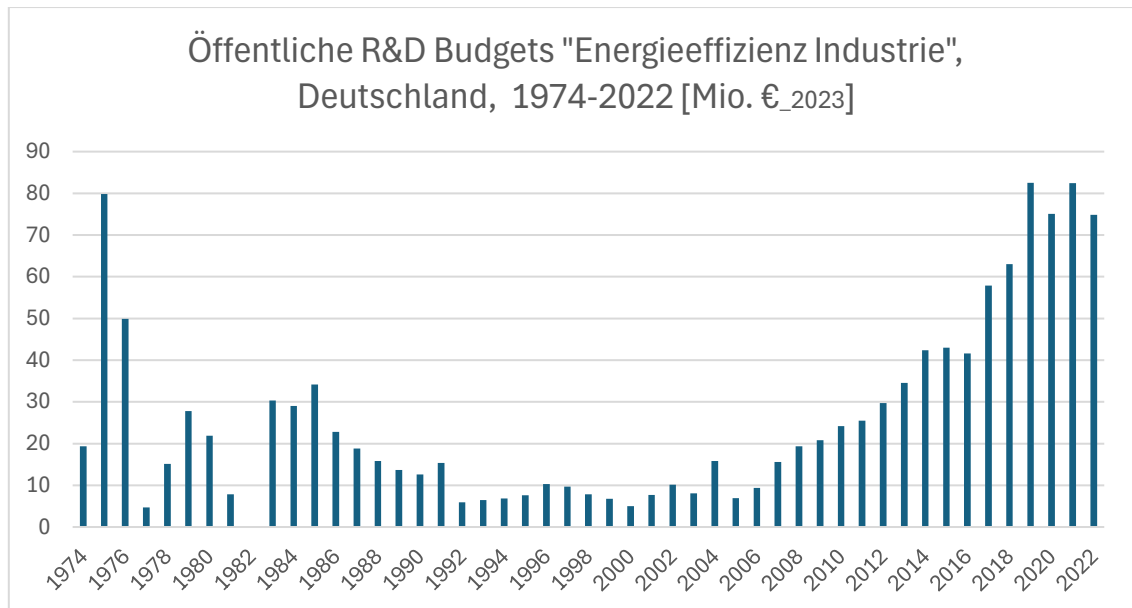


Abbildung 3-2: Öffentliche RD&D Budgets für Energieeffizienz in der Industrie, Deutschland, 1974 - 2022

Die Relation der Budgets für Energieeffizienz in der Industrie zu den gesamten öffentlichen energiebezogenen FuE Budgets Deutschlands (Abbildung 3-3) sowie zur Wirtschaftsleistung (BIP, Abbildung 3-4) verdeutlicht noch stärker, welchen geringen Stellenwert die Förderung für Forschung und Entwicklung für Energieeffizienz in der Industrie bislang hatte. Trotz des Anstiegs seit den 2000er Jahren verbleibt diese auf niedrigem Niveau.

Wie Abbildung 3-4 zeigt, ist der Anteil der Wirtschaftsleistung, der in Form öffentlicher Budgets für Forschung und Entwicklung im Bereich „Energieeffizienz Industrie“ investiert wird, vernachlässigbar: für das Jahr 2022 beträgt dieser Anteil 0,002%. In den letzten Jahren war hier ein weiteres Absinken zu beobachten.

Auch im internationalen Vergleich zeigt sich, dass Deutschland sehr wenig in energiebezogene Forschung und Entwicklung investiert. Für Abbildung 3-5 wurden die jeweiligen öffentlichen energiebezogenen FuE-Gesamtbudgets ausgewählter IEA-Mitgliedsländer in Relation zur jeweiligen Wirtschaftsleistung (BIP in Preisen von 2022) ausgewertet, die Abbildung zeigt die jeweiligen Anteile der Budgets in Promille des jeweiligen BIP.

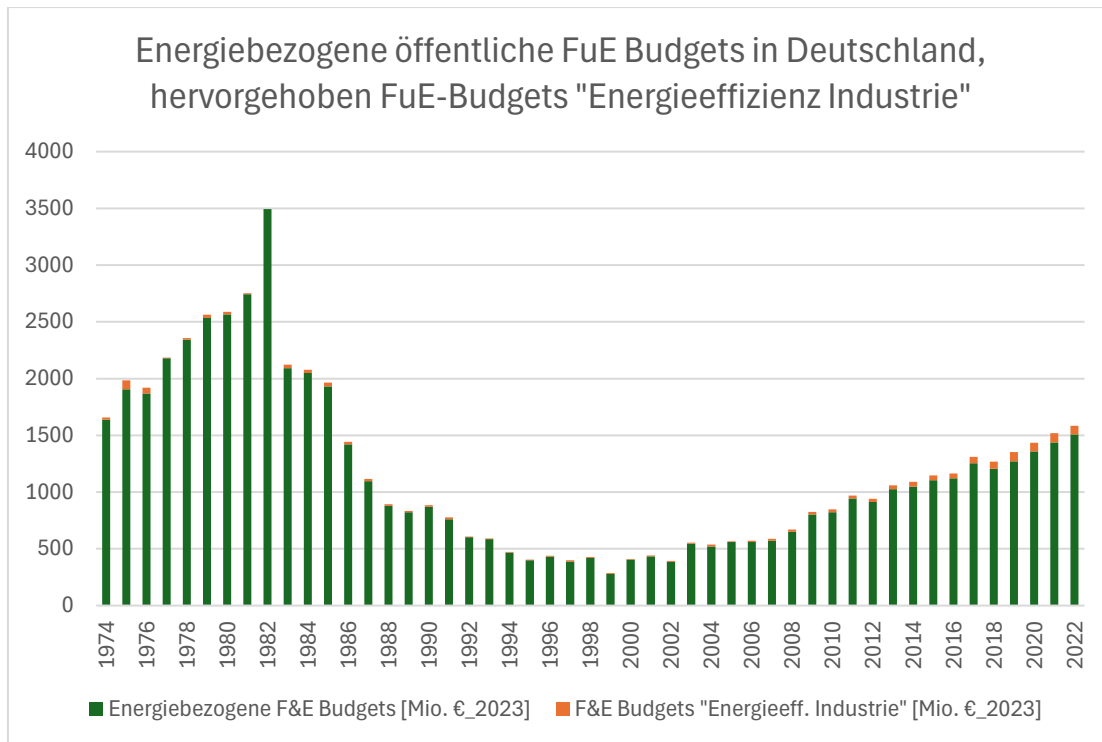


Abbildung 3-3: Öffentliche FuE Budgets für Energieeffizienz in der Industrie in Relation zu den gesamten energiebezogenen öffentlichen FuE Budgets Deutschlands

Deutschland findet sich im Vergleich mit den anderen Industrienationen mit seinen öffentlichen Investitionen in die energiebezogene FuE, mit in den letzten dokumentierten fünf Jahren konstant unter 0,04 % der Wirtschaftsleistung – oder weniger als 0,40 € pro 1000 € Wirtschaftsleistung –, am unteren Ende der Spanne wieder, während Norwegen, Frankreich und mittlerweile auch Spanien in Relation deutlich mehr investieren.

Auch ein Vergleich mit China und den USA, zwei besonders relevanten Wettbewerbern bei Innovation und internationalem Handel, zeigt, dass sich Deutschlands absolute öffentliche Investitionen in energiebezogene FuE insgesamt auf sehr niedrigem Niveau bewegen (Abbildung 3-6).

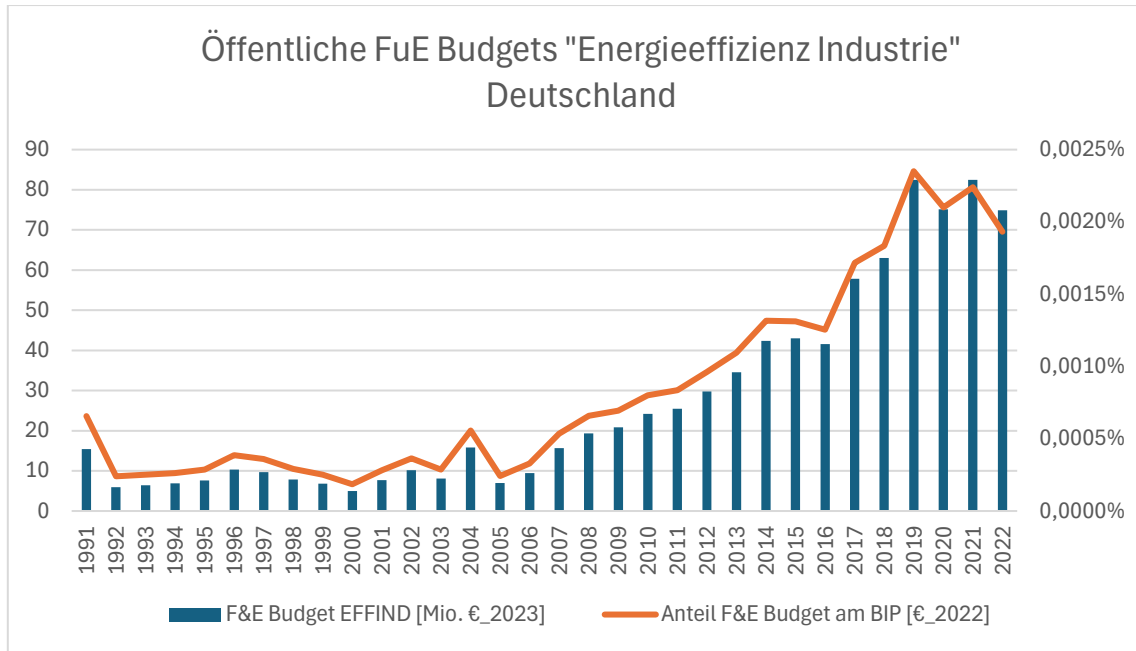


Abbildung 3-4: Öffentliche FuE Budgets Deutschland, und in Relation zur Wirtschaftsleistung

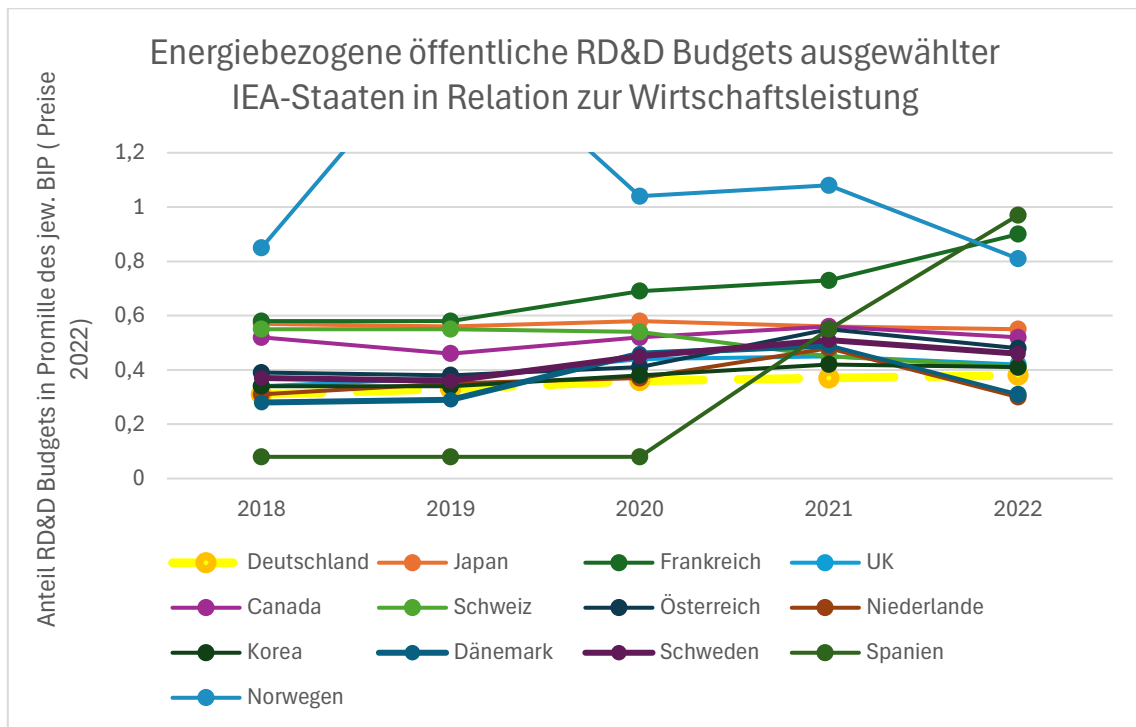


Abbildung 3-5: Öffentliche energiebezogene FuE Budgets ausgewählter IEA-Staaten in Relation zur Wirtschaftsleistung

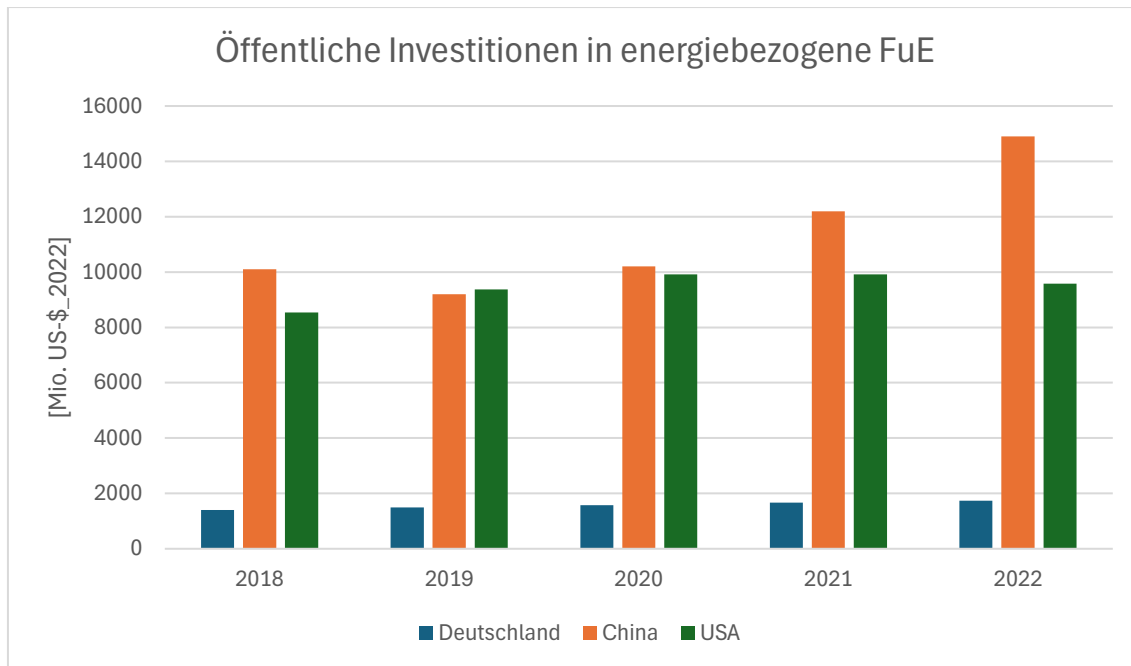


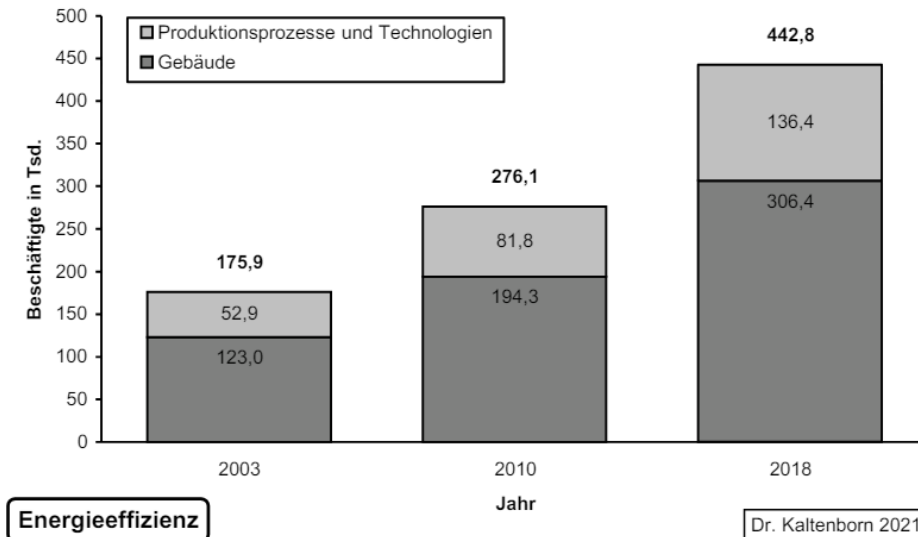
Abbildung 3-6: Öffentliche energiebezogene FuE Budgets D/CHN/USA 2018 - 2022

Beschäftigungseffekte

Verbesserungen der Energieeffizienz erhöhen im Allgemeinen das wirtschaftliche Wohlergehen. Gut gestaltete politische Eingriffe und die Energieeffizienz selbst scheinen konsistent das wirtschaftliche Wohlergehen zu steigern (Saunders et al. 2021). Mithin können sich Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz – durch zusätzliche Investitionen und Energiekosteneinsparungen – positiv auf Einkommen und die inländische Nachfrage auswirken (Pehnt et al. 2011, 8f.; Blazejczak et al. 2014, S. 59).

Diverse Studien heben zudem die möglichen positiven Beschäftigungseffekte hervor, z.B. (Pehnt et al. 2011; Blazejczak et al. 2014; Kaltenborn; Brehm 2021).

Eine Studie von Prognos untersucht die Auswirkungen von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudebereich und in industriellen Produktionsprozessen auf die Beschäftigung. Dabei analysiert die Studie sowohl die direkten Effekte, wie die Schaffung neuer Arbeitsplätze durch energieeffiziente Bau- und Sanierungsmaßnahmen, als auch die indirekten Effekte, die sich aus veränderten wirtschaftlichen Bedingungen in Folge der Energieeinsparungen ergeben. Der Studie zufolge stieg die Zahl der direkt und indirekt im Bereich energieeffizientere Produktionsprozesse und Technologien (Abwärmennutzung, Druckluft- und Pumpsysteme, Installations- und Beratungsleistungen, Prozessleit- sowie Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik) Beschäftigten von 52.900 im Jahr 2003 auf 136.400 im Jahr 2018 (vgl. Abbildung 3-7). (Kaltenborn, S. 95)



Quelle: HOCH u.a. [2019, S. 11], eigene Berechnungen.

Abbildung 3-7: Direkte und indirekte Beschäftigung durch Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden sowie von Produktionsprozessen und Technologien 2003, 2010 und 2018 nach Berechnungen von Prognos (2019) (Sekundärquelle: (Kaltenborn, S. 96))

Positive Beschäftigungseffekte können überdies direkt aus der öffentlichen Forschungsförderung abgeleitet werden. Beispielhaft zeigt eine Studie des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI (Thielmann et al. 2024), dass sich die erheblichen Kürzungen der Fördermittel in diesem Bereich drastisch auf die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Batterieindustrie auswirken, weil sie den jetzt schon bestehenden Mangel an Fachkräften noch weiter verschärfen werden. In den letzten Jahren wurden laut der Studie allein in Deutschland ca. 15.000 Fachkräfte dafür ausgebildet – maßgeblich in Forschungsförderprojekten der öffentlichen Hand, in denen Bachelor-, Master- und Doktorarbeiten entstehen. (Fraunhofer-Gesellschaft 18.06.2024) Es ist anzunehmen, dass reduzierte FuE-Gelder für den Bereich Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe analog zu den für die Batterieindustrie gefundenen Effekten zu einer erheblichen Reduktion der Ausbildung von Fachkräften führen würden, was sich wiederum negativ auf die Wettbewerbsfähigkeit der Volkswirtschaft auswirken könnte.

Weitere positive Effekte ergeben sich mittel- bis langfristig durch die Beiträge von Energieeffizienz und FuE zum Erhalt und Ausbau der Wettbewerbsfähigkeit (siehe hierzu Abschnitt 5). Über die Standortsicherung trägt dies zum mittel- bis langfristigen Erhalt von Arbeitsplätzen bei (Weiß et al. 2011).

6 Relevanz der Forschungsförderung für die Resilienz der deutschen Wirtschaft und Gesellschaft: technologischer Wettbewerb, internationaler Handel, Vermeidung von Schadenskosten

Im Folgenden wird unter anderem der Frage nachgegangen, inwieweit niedrige FuE-Ausgaben für Energie – und speziell auch für die Energieeffizienzforschung in Industrie und Gewerbe – mittel- und langfristig zu erheblichen Schäden für die deutsche Industrie, aber auch für die Wohlfahrt der deutschen Gesellschaft als Ganzes, führen könnten. Dazu werden vier Aspekte betrachtet:

- die momentane Risikoeinschätzung der deutschen Industrie,
- eine Patentanalyse zu 19 ausgewählten Produktgruppen, die für die Energieeffizienz in der Industrie und Gewerbe von Bedeutung sind,
- Überlegungen zur Resilienz der europäischen und deutschen Wirtschaft, sowie
- Klimawandelbedingte Adaptionen- und Schadenskosten

6.1 Reduzierung von Lieferkettenrisiken und Sicherung von Marktpositionen

In seinem Positionspapier "Standort D mit Investitionen stärken" schreibt der BDI im Abschnitt Förderbedarfe u.a. (Bundesverband der deutschen Industrie 2024):

"Die größten Investitions- und Förderbedarfe bei der Risikoreduzierung der Lieferketten auf der Importseite ergeben sich auch weiterhin für Mikroelektronik, Rohstoffe, Clean-Tech-Wertschöpfungsketten, Chemie / Pharmazie und Rüstung."

Als Kriterien eines Prüfprozesses nennt der BDI die Kritikalität von Importgütern, u.a. eine hohe Abhängigkeit von autokratischem Lieferland, keine oder nur geringe Substitutionsoptionen durch andere Lieferländer, einen hohen potenziellen Schaden einer Lieferkettenunterbrechung, geringe marktliche Versicherungsmöglichkeiten, sowie geringe inländische Produktionsflexibilität.

Diese Überlegungen berücksichtigen noch nicht mögliche zukünftige chinesische Importe in großem Umfang in anderen Bereichen, in denen die deutsche Wirtschaft typischerweise stark aufgestellt ist (z.B. Maschinenbau, Anlagentechnik), infolge technischer Überlegenheit und aufgrund geringerer Produktionskosten aufgrund des großen chinesischen Inlandsmarktes. Diese potenziell zunehmenden, Arbeitsplätze in der heimischen Industrie bedrohenden Importe werden in ihrem Ausmaß und in ihrer Relevanz für die deutsche Industrie nicht zuletzt davon abhängen, in welchem Umfang heute FuE-Budgets in Deutschland bereitgestellt werden, um durch Spezialisierung, innovative Techniken und deren Patente den deutschen Herstellern die Inlands- und Auslandsmärkte offen zu halten. Eine Zollpolitik, wie sie derzeit von den USA und der EU praktiziert wird, eröffnet neue Risiken.

6.2 Verschiebungen der Technologieführerschaft und internationale Abhängigkeiten als Herausforderung für Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit

In den vergangenen Jahren häuften sich die Beispiele für wirtschaftliche Abhängigkeiten von Europa bzw. Deutschland, nicht nur aber insbesondere von chinesischen Produkten. Die Corona-Krise (Mikrochips, Antibiotika) und die Sperre im Suezkanal (Mikroelektronik, z.B. für den europäischen Automobilbau) seien exemplarisch genannt. Auch die Beispiele für (mögliche) Wettbewerbsnachteile gegenüber China durch Subventionen und einen sehr großen inländischen Markt (PV-Module und Wechselrichter sowie Elektromobilität) sind inzwischen zahlreich. Hieraus ergeben sich Fragen hinsichtlich der Resilienz der europäischen und deutschen Industrie.

Internationale Arbeitsteilung ist grundsätzlich ein ökonomischer Vorteil, da sie zu günstigen Preisen für alle Nachfrager führt. Dieser kann aber durch sehr unterschiedlich große Inlandsmärkte sowie eine bewusste Technologie- und Industriepolitik sehr großer Staaten auch ausgehebelt werden. Verschiedene Faktoren Anlass, einer möglichen zukünftigen – oder teilweise heute schon gegebenen – industriellen und technologischen Dominanz Chinas nachzugehen.

- Die chinesische Regierung hat sich vor wenigen Jahren explizit das Ziel gesetzt, "bis 2060 die globale Technologieführerschaft zu übernehmen".
- Nach dem Leiden-Ranking (Universität Leiden 2024), welches den quantitativen Umfang wissenschaftlicher Forschung misst, wird die Liste für den Bereich „Physical sciences and engineering“ für die Periode 2019 bis 2022 von chinesischen Universitäten dominiert – die ersten 23 Plätze gehen an chinesische Hochschulen, erst auf Platz 24 folgt mit der Universität Tokio eine Universität außerhalb Chinas. Unter den chinesischen Universitäten befinden sich unter anderem: Tsinghua University, Shanghai Jiao Tong, Zhejiang und Peking (Beida). Diese werden oft gemeinsam mit Cambridge, Harvard und der ETH Zürich genannt. Die ranghöchste deutsche Universität ist das Karlsruher Institut für Technologie auf Platz 60.
- Nominal sind die chinesischen Ausgaben für FuE seit dem Jahr 2000 um das 16-fache gestiegen. Die Gesamtausgaben (öffentlich und privat) für FuE von China lagen 2021 nur noch knapp 20 % hinter den USA (668 Mrd. für China und 806 Mrd. \$ für die USA; (Schug 2024)). Allerdings steckt China den größten Teil dieses Budgets in die angewandte Forschung und experimentelle Entwicklung (USA nur 50 %; der Rest geht in die Grundlagenforschung).
- Dieser rasante Aufholprozess spiegelt sich auch in den Ausbildungszahlen für Ingenieursabschlüsse an chinesischen Universitäten im Jahre 2020 wider: 1,4 Millionen, siebenmal mehr als in den USA. Für 2025 erwartet man fast doppelt so viele Doktoranden in Wissenschaft und Technik aus chinesischen Universitäten verglichen mit amerikanischen Universitäten.

Dieser Auf- und Überholprozess spiegelt sich auch bei einer Patentanalyse in 19 untersuchten Produktgruppen mit Bezug zur Energieeffizienz wider (vgl. Tabelle 2):

- In 18 von 19 Produktgruppen ist das Wachstum der Patente der chinesischen Anmelder höher als in Deutschland und den USA.
- In 12 Produktgruppen ist die Anzahl der Patentanmeldungen mit mindestens 38 % höher als diejenigen amerikanischer Anmelder.
- In acht Produktgruppen, in denen Deutschland ausgehend von der Patentstatistik als spezialisiert angesehen werden kann, befindet sich China im Aufholprozess¹⁰.

Nur bei den Erhitzern und Wärmepumpen haben deutsche Patentanmelder mit ihrer Spezialisierung und höherer Steigerung der Patente die Nase vorn. Die Spezialisierung eines anmeldenden Landes (RPA Relativ Patent Advantage) wird ermittelt durch das Verhältnis des Anteils der Patentanmeldungen zu einer Technik, bezogen auf die gesamten Patentanmeldungen eines Landes relativ zu den Patentanmeldungen zu dieser Technik, weltweit, bezogen auf die gesamten Patentanmeldungen weltweit. Durch Nutzung von Sinusfunktionen kann der Wert des RPA schwanken zwischen –100 und +100. Ab dem Wert +20 kann man von einer eindeutige Spezialisierung in dem betrachteten Technikfeld ausgehen. In bibliometrischen Analysen im Rahmen des ersten Begleitforschungsprojekts EE4InG (Weigold et al. 2022) war bereits aufgefallen, dass chinesische Autoren in 15 von 18 Effizienzklassen auf Platz 1 der Publikationen lagen, gefolgt von US-amerikanischen Autoren in zwei Energieeffizienzklassen (Keramik-Wärmeübertrager und additive Fertigung). Wie sehr sich die internationalen Publikationen im letzten Jahrzehnt verschoben haben, lässt sich gut am Beispiel der Hochtemperaturelektrolyse (HTE) zur Wasserstofferzeugung erläutern:

- Während im Jahr 2010 die US-amerikanischen Autoren mit 31 internationalen Publikationen auf Platz 1 lagen, gefolgt von China mit 17 und Japan mit 14 Veröffentlichungen,
- lagen chinesische Autoren im Jahr 2019 mit 107 Veröffentlichungen auf Platz 1, gefolgt von den US-amerikanischen Kollegen mit 57 Veröffentlichungen und den deutschen Autoren mit 33 Publikationen.

Daraus folgt: Die deutsche Industrie ist durch schnelle technische Aufholprozesse und eine enorme Innovationsintensität in Ländern wie insbesondere China, aber auch USA und Südkorea, zunehmend erheblichen Risiken ausgesetzt, bei neuen Energietechniken zurückzufallen und somit an Wettbewerbsfähigkeit zu verlieren. Eine Stagnation der öffentlichen energiebezogenen FuE-Budgets auf dem derzeitigen, relativ zur Wirtschaftskraft niedrigen Niveau, – oder gar ihr Rückgang – würde die Situation für deutsche Hersteller von Energietechniken noch weiter erschweren. Hierbei geht es auch um zeitliche Aspekte: Die Wettbewerber im Ausland warten nicht, wenn in Deutschland die FuE-Budgets zurückgefahren werden. Vielmehr gibt man ihnen damit Zeit, um auf der Überholspur Fortschritte zu machen.

¹⁰ Antrieb von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen, Dampfkraftanlagen mit Wärmespeichern, Pumpen, Trockner, Industrieöfen, Regeln von Wärmespeichern, Elektromotoren, Generatoren; sonstige energiebezogene Patente

No.	Technikbereich	Verhältnis CN/DE	Anzahl Patente 2020-2022				Spezialisierung RPA			Wachstum 2015-2022 %/a		
			DE	CN	US	DE	CN	US	DE	CN	US	
1	Semipermeable Membrane	0,94	308	290	817	7	-71	22	0,6	1,0	0,6	
2	Katalysatoren	1,84	638	1176	1703	-5	-32	11	0,6	1,9	0,5	
3	Antrieb von elektrisch angetriebenen Fahrzeugen	1,12	2079	2323	1455	59	-100	-46	2,1	5,5	1,9	
4	Dampfkraftanlagen mit Wärmespeichern	0,70	27	19	46	60	-50	38	0,3	7,0	0,8	
5	Pumpen	1,22	1345	1638	1496	45	-21	-23	0,6	1,9	0,5	
6	Klimatisierung	6,51	463	3012	904	-53	37	-63	0,7	2,6	0,7	
7	Erhitzer, Wärmepumpen	1,09	246	268	193	47	-29	-51	1,5	0,9	0,8	
8	Regeln von Wärmespeichern	1,50	2	3	1	55	13	-71	1,0	30,0	1,0	
9	Kälteerzeugung	2,83	848	2397	1364	-3	11	-37	0,7	2,2	0,7	
10	Kältemaschinen	2,44	469	1144	711	-2	-2	-41	1,1	1,9	0,7	
11	Trockner	1,73	176	304	171	95	91	77	0,8	1,8	0,7	
12	Industrieöfen	0,76	295	225	198	60	-44	-48	0,8	1,8	0,5	
13	Wärmetauscher	1,41	520	734	800	13	-39	-26	0,6	1,9	0,5	
14	Wärmetauscher für Industrie	1,38	363	501	544	11	-43	-30	0,6	2,1	0,6	
15	Kondensatoren	2,28	137	312	370	-68	-72	-58	0,5	1,4	0,4	
16	Elektromotoren, Generatoren	1,07	2503	2684	1666	54	-21	-55	1,0	2,4	0,8	
17	Verteilung elektrischer Energie	3,03	1334	4038	2676	-10	11	-23	0,9	2,3	0,7	
18	Wechselrichter, Gleichstromtechnik	2,18	920	2005	1152	15	4	-42	1,0	2,3	0,7	
19	Rest energierelevanter Patente	1,71	4384	7515	7418	31	-4	2	1,1	2,7	0,9	

Tabelle 2: Anzahl der Patente mit Bezug zur industriellen Energieeffizienz, D, China, USA 2020-2022; Spezialisierungsgrad und Wachstumsraten der Patentanmeldungen 2015-2022

6.3 Resilienz der europäischen und deutschen Wirtschaft

Resilienz einer Volkswirtschaft ist die Fähigkeit, auf plötzlich sich verändernde Rahmenbedingungen ohne große Beeinträchtigung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Prozesse reagieren zu können. Beispiele aus den letzten Jahren für sich verändernde Rahmenbedingungen sind die Corona-Pandemie, die Sperrung des Suezkanals und der Angriff Russlands auf die Ukraine mit dem damit verbundenen Ausfall der Erdgaslieferungen. Resilienz im Energiesystem bedeutet, dass die Funktion eines Energiesystems (Versorgungssicherheit) unter Belastungen erhalten bleibt (ggf. mit Einschränkungen) oder zumindest innerhalb kurzer Zeit wiederhergestellt werden kann (Haug et al. 2021, S. 9). Damit hat sie erhebliche Auswirkungen auf die volkswirtschaftliche Resilienz, nicht zuletzt aufgrund der immensen Wichtigkeit für die Betriebssicherheit von Unternehmen.

Auch aus aktuellen Entwicklungen der industriellen Produktionsweise selbst ergeben sich Herausforderungen und neue Resilienzbedarfe. Die zunehmende Vernetzung von ehemals unabhängigen Systemen im Kontext der Transformation besitzt das Potential, die Fehlerwahrscheinlichkeit zu erhöhen und durch sogenannte Kaskadeneffekte können bereits lokale Störungen zu einer systemischen Herausforderung werden. Die Globalisierung und die zunehmende Komplexität der Lieferkette haben diese Risiken verstärkt. Um dieser Herausforderung zu begegnen, ist Forschung und Entwicklung auf Ebene des Energiesystems als auch im betrieblichen Umfeld von großer Bedeutung. Der Aufbau von Resilienz durch Mechanismen wie intelligente Steuerungssysteme und Notfallpläne ist essentiell, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten. (Hiermaier et al. 2021; Buchmann et al. 2022) Nicht zuletzt kann die Industrie selbst als Energieverbraucher und -lieferant systemdienlich zur Resilienz des Energiesystems beitragen (Sauer et al. 2022).

Die Steigerung der Resilienz einerseits und der Effizienz andererseits wird häufig als Zielkonflikt angesehen, da erstere mit Redundanzen einhergehen kann. Resilienz und Effizienz sollten jedoch nicht als Gegensätze betrachtet werden, sondern es sollten Synergien genutzt werden. Redundante Funktionen können aktiv und flexibel genutzt werden und somit resiliente Elemente effizient miteinander kombiniert werden. Beispielsweise können Ersatzlieferanten stärker in das Tagesgeschäft integriert werden, um somit die Resilienz zu erhöhen, ohne Effizienz zu verlieren. Weiterhin können Investitionen in die Stärkung der systemischen Resilienz langfristig zu einer Steigerung der Effizienz führen, da auf Störungen flexibel reagiert werden kann und somit die Ausfälle verringert werden. (Stich et al. 2023; Hiermaier et al. 2021)

Optionale, verteilte Lieferketten und der Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit auf den spezialisierten Technikfeldern (wie z.B. im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus, der chemischen Industrie und des Automotivesektors) nicht nur aus gesamtwirtschaftlichen und beschäftigungspolitischen Gründen, sondern auch im Hinblick auf die Resilienz der europäischen und deutschen Wirtschaft relevant.

Die EU ist heute weitaus stärker mit der chinesischen Wirtschaft verbunden als die USA, wie der höhere Anteil der europäischen Direktinvestitionen in China und die größere Abhängigkeit der EU von Einfuhren aus China im Vergleich zur USA zeigen (Langhammer 2022). China, als Produktionsstandort für europäische Unternehmen und als Quelle vieler wichtiger Produkte für den EU-Markt, verfügt im Konfliktfall gegenüber der EU über vielfältige wirtschafts- und geopolitische Handlungsoptionen. Somit haben die EU und

Deutschland heute in dieser Hinsicht ein höheres Störungsrisiko als die USA. Daher könnten die Kosten für die EU-Industrie und die Verbraucher infolge von eigenen Einfuhrbeschränkungen für subventionierte chinesische Waren erheblich steigen, wenn die chinesische Regierung mit Gegenmaßnahmen wie Ausfuhrbeschränkungen für Vorprodukte reagiert (Bickenbach et al. 2024). Ausfuhrbeschränkungen (z.B. von seltenen Erden) würden der EU-Industrie nicht nur auf dem EU-Binnenmarkt schaden, sondern auch ihre Ausfuhren nach China oder in Drittländer erschweren. Dabei sind Ausfuhrbeschränkungen für notwendige Vorprodukte nur eine von vielen möglichen Gegenmaßnahmen, mit denen China EU-Unternehmen schaden könnte. Dies ist vermutlich einer der Gründe, warum deutsche Automobilhersteller, die im Handel, in der Produktion und in der Forschung und Entwicklung stark in China engagiert sind, der Möglichkeit von EU-Zöllen mehr als skeptisch gegenüberstehen.

Diese Abhängigkeit deutscher Branchen und Unternehmen von wirtschafts- und geopolitischen Entscheidungen anderer Staaten zeigt auch, dass eine sehr kurzfristige Erreichung höherer Resilienz kaum erzielbar ist. Eine Handlungsmöglichkeit, die in mittlerer Frist Wirksamkeit im Hinblick auf eine höhere Resilienz entfalten kann, ist die Stärkung der FuE-Aktivitäten, um weiterhin Zugang zu in- und ausländischen Märkten zu erhalten bzw. um die Wettbewerbsfähigkeit auf diesen Märkten zu stärken.

Aufgebaute FuE-Infrastrukturen im Energiebereich (mit Fokus auf TRL 4 bis 6 mit Zugang zu Pilotlinien) sind angesichts der mittelständisch geprägten Industrielandschaft in Deutschland besonders wichtig. Großunternehmen in Wettbewerbsländern, insbesondere USA und China, (Mallapaty 2024) könnten eine Reduktion der öffentlichen FuE-Budgets eher noch kompensieren.

Öffentliche FuE-Budgets als Risikokapital zur Stärkung der Resilienz

Angesichts großer Investitionsentscheidungen, die Unternehmen für die Transformation treffen müssen, und vor dem Hintergrund der geschilderten Herausforderungen durch geopolitische Entwicklungen, ist es von entscheidender Bedeutung, verlässliche Perspektiven zu schaffen. Die ordnungspolitischen Grundprinzipien einer erfolgreichen Transformationsstrategie umfassen die Kontinuität der Wirtschaftspolitik, die Kohärenz der Teilordnungen, den Grundsatz der Technologieoffenheit und die effiziente Bereitstellung von Mitteln für private Investitionen durch das Finanzsystem. Daraus abgeleitet ergibt sich die Notwendigkeit einer Industriepolitik, die sich auf Fristentransformation, Risikotransformation und die Sicherung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit konzentriert (Hüther 2023). All diese Aspekte werden auch durch öffentliche FuE-Budgets adressiert.

Einzelwirtschaftliche Entscheidungskalküle greifen im Kontext von FuE-Investitionen oftmals zu kurz: der Erfolg von FuE-Investitionen ist oftmals nicht mit hinreichender Verlässlichkeit kalkulierbar, dies lässt sich auch kaum vermeiden und liegt bei noch nicht marktreifen Technologien in der Natur der Sache. In der Abwägung liegt es – bei knapper Liquidität und/oder einer Vielzahl an Investitionsalternativen – unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten oftmals nahe, Entscheidungen zu Gunsten sichererer und vermeintlich renditestärkerer Investitionsoptionen zu treffen. Hier muss der Staat mit ausreichend finanzierten FuE-Budgets eine Rolle als Risikokapitalgeber einnehmen, zur mittel- bis langfristigen Wohlfahrtssicherung für die gesamte Volkswirtschaft.

6.4 Vermeidungskosten, Schadenskosten und Adaptationskosten

Es herrscht der klare Konsens, dass proaktive Maßnahmen und Investitionen – sei es in Klimaschutz oder Energieeffizienz – wirtschaftlich vorteilhafter sind als Untätigkeit.

So stellt eine aktuelle Studie des Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) fest, dass die Weltwirtschaft innerhalb der nächsten 26 Jahre mit einem Einkommensrückgang von 19 % konfrontiert ist im Vergleich zu einem Basisszenario ohne Klimawandelauswirkungen¹¹. Dieser Rückgang ist unabhängig von zukünftigen Emissionsentscheidungen. Diese Schäden überstiegen bereits jetzt die erforderlichen Investitionen für die Begrenzung der Erderwärmung auf 2 °C um das Sechsfache im genannten Zeitraum (6 Bio. \$ (2005)) und divergierten danach stark je nach den Emissionsentscheidungen. (Kotz et al. 2024, S. 551)

Die gegenwärtigen Berechnungen der PIK-Studie liegen damit in einer vergleichbaren Größenordnung wie die des Stern-Reports von 2006 (o.A. 2024), wonach die Kosten des Nichthandelns die erforderlichen Investitionen für Klimaschutz ebenfalls deutlich übersteigen würden. Stern prognostizierte, dass die Kosten für Untätigkeit langfristig bis zu 20 % des globalen BIP ausmachen, während die erforderlichen Investitionen für Maßnahmen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen etwa 1 % des globalen BIP betragen (Stern 2007).

Im Monatsbericht April 2024 der Deutschen Bundesbank wird anhand von Modellsimulationen untersucht, inwieweit Energieeffizienzsteigerungen die Emissionen mindern und die Wirtschaftsaktivität anregen können. Die Ergebnisse zeigen im Rahmen der getroffenen Annahmen¹², dass Steigerungen der Energieeffizienz die gesamtwirtschaftliche Energieintensität senken und die gesamtwirtschaftliche Produktionsentwicklung begünstigen können. Folglich sei die Steigerung der Energieeffizienz ein wichtiger Faktor, um mögliche gesamtwirtschaftliche Aufwendungen für andere klimapolitische Maßnahmen zu mildern. Den Simulationsergebnissen zufolge müsste sich die energiesparende Technologie gegenüber dem marktgängigen Status-Quo jedoch erheblich verbessern, um die geplante Emissionseinsparung allein erreichbar zu machen. In diesem Kontext könnten Energieeffizienzsteigerungen durch eine verstärkte Förderung der Forschung und Entwicklung angeregt werden. (Deutsche Bundesbank 2024, S. 69)

Nobelpreisträger Nordhaus unterstreicht in seinem Essay von 2019 die Bedeutung von technologischem Wandel. Derzeitige emissionsarme Technologie sei mit erheblichen Kostenaufschlägen verbunden. Die Entwicklung neuer, kostengünstiger emissionsmindernder Technologien reduziere die erforderlichen Aufwendungen zum Erreichen der Klimaziele substanziell (Nordhaus 2019, S. 2013). Aus diesem Grund sollten Regierungen die Entwicklung und Marktdiffusion von energieeffizienten, emissionsarmen oder emissionsfreien Technologien fördern.

¹¹ Die wahrscheinliche Spanne liegt zwischen 11 % und 29 %, unter Berücksichtigung physikalischer Klimafaktoren und empirischer Unsicherheiten (Kotz et al. 2024, S. 551).

¹² Der energiesparende technologische Fortschritt ist im Modell als externer Faktor hinterlegt. Andere wirtschaftspolitische Maßnahmen als das Instrument der CO₂-Bepreisung, wie zum Beispiel ein verstärkter Ausbau erneuerbarer Energien, werden im Modell nicht betrachtet (Deutsche Bundesbank 2024, S. 65).

7 Praxisbeispiel: Ex-post Evaluation zur Hochtemperatur-Wärmepumpe

Es folgt eine Zusammenfassung erster Ergebnisse einer ex-post Evaluation, die derzeit im Rahmen der Begleitforschung entsteht und nach Abschluss veröffentlicht wird. Untersucht wird die Wirkung der FuE- Förderung der Hochtemperatur-Wärmepumpe (HT-WP) mit Fokus auf dem EFP. Dabei umfasst der Untersuchungszeitraum Projekte ab 2000 und somit das 4. bis 8. EFP. Industrielle Wärmepumpen (WP) nutzen Abwärmeströme als Wärmequellen und heben diese auf nutzbare Temperaturen an, sodass die Wärme in den Prozess (Wärmesenke) zurückfließt. HT-WP geben dabei nach der Definition der IEA einen Teil ihrer Nutzenergie bei Vorlauftemperaturen über 100°C ab.

Der Annex 58 des TCP *Heat Pumping Technologies* (HPT) der IEA schätzt die Entwicklung der HT-WP nach Temperatur der Wärmesenke und Heizleistung ein. Demnach sind derzeit bereits HT-WP bis 120°C zwischen 0,2-10 MW bei mehreren Herstellern verfügbar, werden aber erst in den kommenden Jahren eine breitere Anwendung in der Industrie erfahren. Für den Temperaturbereich 120°C bis 160°C werden derzeit größere Demonstrationen und marktreife Technologien erwartet. Die Entwicklung vieler Prototypen und ihr Einsatz in diversen Anwendungen sowie Branchen wird gegenwärtig in Demonstrationen abgeschlossen und zu marktreifen Technologien weiterentwickelt, oft im Rahmen von geförderten FuE-Projekten. Durch den großen Bedarf an Dekarbonisierungsoptionen in der Prozesswärme und der Schlüsselrolle von HT-WP im unteren bis mittleren Temperaturbereich wurde ihre Entwicklung durch den Marktdruck in den letzten Jahren beschleunigt. Im Bereich über 160°C ist die Entwicklung ähnlich, jedoch mit deutlich geringerer Anzahl an FuE-Projekten, sodass sich ihr Markteintritt laut IEA auf 2026-2028 verschiebt. Bei größeren Leistungen über 10 MW könnten bereits ab 2025 einige Anlagen bis 120°C in den Markt kommen, während sie sich bei über 120°C noch in der Entwicklung befinden und erste große Demonstrationsprojekte ab 2025 erwartet werden. Bis Ende der 2020er Jahre werden HT-WP in allen genannten Temperatur- und Leistungsbereichen die bevorzugte Technologie werden. (IEA TCP HPT 2023)

Insgesamt belief sich im Jahr 2012 das technische Potenzial zur industriellen *Wärmebereitstellung* in der deutschen Industrie bis 140°C durch Wärmepumpen auf 600 PJ/a, wobei auf den Hochtemperaturbereich von 100-140°C knapp 190 PJ/a entfallen, dabei liegen die größten Einsatzpotenziale in der Nahrungsmittelindustrie (145 PJ/a), der Chemieindustrie (132 PJ/a) und der Papierindustrie (145 PJ/a) (Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI 2015). Auch *Trocknungsprozesse* in der Metallverarbeitung, im Maschinenbau sowie in den Gummi-, Kunststoff- und Holzindustrien zeigen hohe Einsatzmöglichkeiten. Mit der Technologieentwicklung in den letzten 10 Jahren, mit der weitere Anwendungs-, Effizienz- und Nutztemperaturbereiche erschlossen wurden (derzeit bis 120°C mit Tendenz bis 150°C), sowie den mittlerweile deutlich gestiegenen Energie- und CO₂-Zertifikatspreisen sollten die technischen und wirtschaftliche Potenziale von industriellen WP ebenfalls gewachsen sein. Daher bietet die HT-WP ein hohes Effizienzpotenzial für die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung und ihre Entwicklung sowie Anwendung sollte entsprechend gefördert werden.

Im EFP wurden seit dem Jahr 2000 insgesamt 14 Verbundprojekte (jeweils mit mehreren Partnern) zu HT-WP gefördert. Dabei zeichnet sich eine steigende Projektanzahl ab, der Großteil der Vorhaben startete in den 2010er Jahren. Die Förderung kann als Anschub

der wissenschaftlichen Forschung und industriellen Innovation gesehen werden, um theoretische Konzepte in die Anwendung zu bringen. Die anschließende Verwertung der Ergebnisse in Veröffentlichungen, Patenten und Vermarktungen geschieht nachfolgend oft ohne zusätzliche Finanzierung, da der Wert der ursprünglich unsicheren Idee mittlerweile als wirtschaftlich kalkulierbar erscheint.

Folgende Tabelle gibt eine Übersicht über sechs geförderte Hersteller aus insgesamt sieben abgeschlossenen EFP-Projekten zu HT-WP, ihre Fördersummen (FS) und -Förderquoten (FQ) sowie ihren aktuellen Stand bzgl. WP-Serien im HT-Bereich. Dabei ist zu sehen, dass es bereits mit geringen Fördersummen zwischen 150-750 Tsd. € gelungen ist, eine spezifische Technologie in die nötige Anwendung zu überführen und langfristig neue Produktserien in den Markt zu bringen.

Tabelle 3: Ausgewählte Hersteller aus abgeschlossenen EFP-Projekten mit Vorhabenbeginn in den Jahren 2000-2018 und ihr aktueller Stand (Juni 2024) bzgl. HT-WP

Hersteller	Projekttitle	Laufzeit	FS & FQ	Aktueller Stand
Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH (FKW)	Absorptions-Kompressions-WP für HT	02.2001 – 07.2003	172.155€ 97%	FKW wurde 2009 Teil der FH Hannover und 2020 aufgelöst
	Arbeitsfluid für HT-WP	07.2001 – 06.2003	131.184€ 97%	
Verum GmbH	Hochtemperatur-Wärmepumpe	09.2001 – 08.2003	255.208 60%€	Verum wurde 2013 aufgelöst
Dürr thermea GmbH (heute: ENGIE)	Industrie-Hochtemperaturwärmepumpe mit NH3	09.2010 – 02.2014	250.201€ 60%	thermeco2-Wärmepumpenserie für HT-Bereich ¹³
	Wärmepumpe: Ejektor	07.2012 – 10.2015	203.508€ 60%	
GEA Refrigeration Germany GmbH (GEA)	Industrie-Hochtemperaturwärmepumpe mit NH3	09.2010 – 12.2013	283.839€ 45%	WP-Serie GEA Grasso L/V XHP mit GEA-Verdichtern ¹⁴
S. H. RECYCLING-TECHNOLOGIEN GMBH (SHRT)	HT-Kompressionswärmepumpe mit Lösungsmittel-kreislauf	11.2013 – 01.2017	746.043€ 50%	Angebot an industrieller Kühlung und WP-Technik ¹⁵
AGO AG Energie + Anlagen (AGO)	HT-Wärmepumpe	10.2018 – 06.2022	483.109€ 50%	WP-Serien AGO Calora ¹⁶ (HT) & AGO Congelo ¹⁷

¹³ <https://www.engie-refrigeration.de/de/waerme/thermeco2-hochtemperaturwaermepumpen>

¹⁴ <https://www.gea.com/de/news/trade-press/2022/gea-at-chillventa-grasso-l-xhp-v-xhp/>

¹⁵ <https://www.steffenhartmann.info/de/das-unternehmen.html>

¹⁶ <https://www.ago-energie.de/thermotechnik/ago-calora-industriewaermepumpe/>

¹⁷ <https://www.ago-energie.de/thermotechnik/ago-congelo-ht-absorptionswaermepumpe/>

6 geförderte Hersteller	7 Projekte zu HT-WP und ihren Komponenten	3 – 4 Jahre	150.000 – 750.000€	Mehrere WP-Serien
			45–100%	

Quelle: eigene Darstellung ausgewählter PtJ-Projektdate zu HT-WP (Stand November 2023) sowie eigene Internet-Recherchen zum aktuellen Stand der Hersteller (Stand Juni 2024)

Abbildung 3-8 zeigt, dass es zu einer größeren Lücke in der Förderung zu HT-WP zwischen 2004-2009 kam, da gerade in den 2000er Jahren die vorhandenen Förderbudgets im Effizienzbereich sehr gering ausfielen, wie in Abbildung 3-2 zu sehen. Somit konnte trotz des absehbaren Potenzials der industriellen WP, die Technologie aufgrund knapper Fördermittel nicht frühzeitiger gefördert werden. Andere Gründe für die Förderlücke könnten die entsprechenden EFP mit anderen Fokusthemen und Förderstrukturen sein.

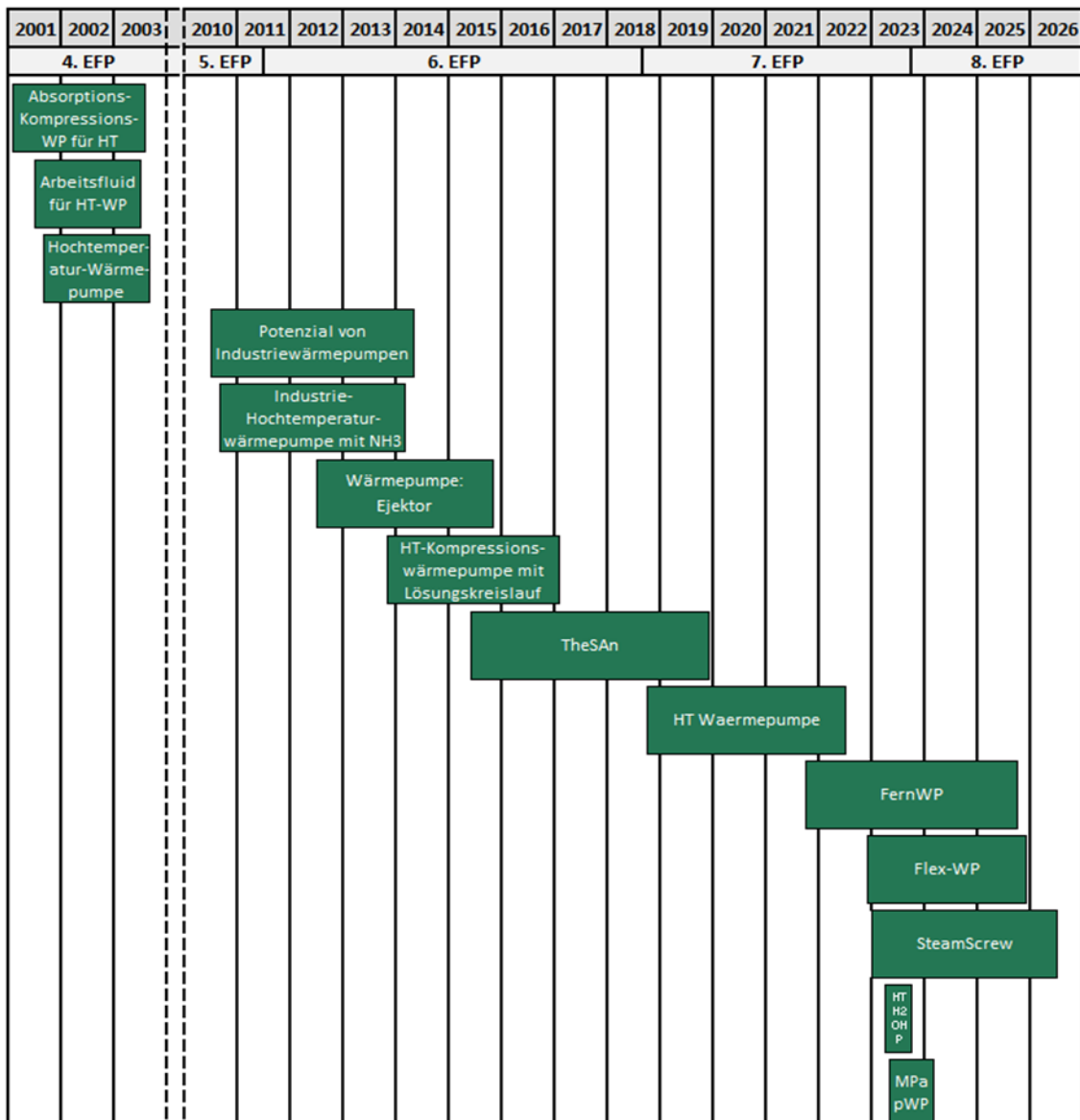


Abbildung 3-8: Übersicht & Zeitachse geförderter FuE-Projekte im EFP zu HT-WP

Quelle: eigene Darstellung ausgewählter PtJ-Projektdate zu HT-WP im EFP in Industrie und Gewerbe (Stand November 2023)

Gleichzeitig zeichneten sich die ersten drei Projekte zu HT-WP, die zwischen den Jahren 2001-2003 gefördert wurden, im weiteren Verlauf nicht als erfolgreich ab, und die beteiligten Firmen wie FKW und Verum GmbH lösten sich in den nachfolgenden Jahren auf. Dies zeigt, dass eine lückenlose und kontinuierliche Förderung für die Technologieentwicklung ein wichtiger Faktor sein kann, um sowohl Technologie als auch FuE-Beteiligte nachhaltig im Markt zu etablieren. Die negative Entwicklung der genannten Firmen könnte sich auch aus der nachfolgenden negativen Wirtschaftsentwicklung sowie geringen Gaspreisen und fehlendem Effizianzreiz ergeben. Dies gilt es zusammen mit der EFP-Struktur durch Interviews tiefergehend zu untersuchen

Hingegen waren die Forschungsprojekte und somit die Förderung Anfang der 2010er Jahre sehr erfolgreich, sodass die beteiligten Firmen wie ENGIE (vormals thermea) und SHRT die Forschungsergebnisse umsetzen konnten und mittlerweile WP im höheren Temperaturbereich vermarkten. GEA hat auf Basis seiner etablierten Schrauben- und Kolbenverdichter ebenfalls WP-Systeme entwickelt. Ende der 2010er konnte AGO im Rahmen des EFP-Projekts *HT Waermepumpe* mehrere Patente anmelden und hat mittlerweile WP-Serien auf den Markt gebracht, von denen mehrere im Hochtemperaturbereich liegen und eine Senktemperatur von bis zu 150°C erreichen.

In den 2000er und 2010ern geförderte Unternehmen sind mittlerweile erfolgreiche Hersteller im Wärmepumpenbereich und erschließen kontinuierlich immer höhere Prozesswärmebereiche. So wird durch die Energietechnologie HT-WP nicht nur ein immer größeres Effizienzpotenzial durch Abwärmenutzung erschlossen, sondern auch perspektivisch die Dekarbonisierung der Energieversorgung in Branchen mit Wärmebedarfen bis 200°C ermöglicht. Die Projektförderung im Verbund von Forschungseinrichtung, Hersteller und Anwender hat sich somit als erfolgreiches Konzept erwiesen, um den wissenschaftlichen und innovativen Fortschritt in den Markt zu bringen. Zurzeit laufen drei größere Verbundprojekte, alle unter Beteiligung von KMU und/oder Großunternehmen, sodass ein weiterer Sprung in der Entwicklung zu höheren Temperaturbereichen und Leistungen zu erwarten ist.

Auch zukünftig sollten Verbünde gefördert werden, die mittels anwendungsnaher FuE höhere Nutztemperaturbereiche und/oder neue Anwendungen sowie Branchen erschließen möchten, um die Marktdiffusion der Technologie zu erhöhen und ihre Effizienzpotenziale auszunutzen. Das 8. Energieforschungsprogramm formuliert ein klares Sprintziel: „Bis 2030 werden in Industrieprozessen Hochtemperatur-Wärmepumpen genutzt, die Prozesswärme über 300 Grad Celsius bereitstellen können“. Dieses Ziel bis 2030 zu erreichen, ist sehr ambitioniert und wird nur mit erheblichen zusätzlichen FuE-Anstrengungen möglicherweise schrittweise gelingen können. Daher müssten auch ganz konkret für diesen Bereich entsprechende Fördermittel vorgehalten werden. Neben der Förderung der HT-WP als Gesamtkonzept, ist auch die Weiterentwicklung essenzieller Komponenten wie Verdichter und Kältemittel erforderlich. Verlässlichkeit im Hinblick auf das Vorhandensein öffentlicher FuE-Förderung über ein individuelles Verbundvorhaben hinaus ist in diesem Kontext wichtig.

Gleichzeitig sind andere Industrieländer ebenfalls stark in der Entwicklung von WP-Technologien vertreten und bauen ihren HT-Bereich aus. Insbesondere Japan, Norwegen und Frankreich zeigen starke Herstellerlandschaften (IEA TCP HPT 2023). Somit ist auf globaler Ebene ein Wettbewerb zu erwarten. Daher gilt es, Technik-Resilienz

aufzubauen sowie den technischen Entwicklungsvorsprung zu bewahren und weiter auszubauen, ohne auf den internationalen Austausch und gegenseitiges Lernen im Rahmen geeigneter Formate, wie z.B. dem TCP HPT der IEA, zu verzichten.

8 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die vorliegende Kurzstudie konnte mit Blick auf die formulierten Fragestellungen zur Rolle der öffentlichen FuE-Förderung, insbesondere im Bereich der Energieforschung für Industrie und Gewerbe, zeigen, dass die Relevanz der öffentlichen FuE-Förderung mit Blick auf alle untersuchten Aspekte evident hoch und durch wissenschaftliche Literatur untermauert ist. Im Folgenden werden die zentralen Schlussfolgerungen aus den vorstehenden Abschnitten zusammengetragen.

1. *Welche Bedeutung hat die FuE-Förderung im Bereich der Energieanwendung in Industrie und Gewerbe für die wirtschaftliche Entwicklung und den Erhalt der mittel- bis langfristigen Wettbewerbsfähigkeit und somit auch für den Erhalt von Arbeitsplätzen?*

Es konnte gezeigt werden, dass der positive Zusammenhang zwischen FuE-Investitionen und der wirtschaftlichen Entwicklung von Industrienationen in der wissenschaftlichen Literatur unter Nutzung unterschiedlicher Analysemethoden nachweisbar existiert. FuE-Investitionen, sowohl private als auch öffentliche, zeigen eine hohe Rendite in Form erhöhten Wirtschaftswachstums und stärken die Wettbewerbsfähigkeit der eigenen Industrie. Dieser letzte Aspekt ist insbesondere für exportorientierte Volkswirtschaften wie Deutschland wichtig.

Auch gibt es klare Erkenntnisse zu den positiven Beschäftigungseffekten von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und, zumindest für den spezifischen Bereich der Förderung der Batterieforschung, zu den positiven Effekten auf die Ausbildung des benötigten akademischen Fachpersonals. Im Umkehrschluss ist damit festzuhalten, dass eine Reduktion von Forschungsbudgets den bestehenden Mangel an hochqualifizierten Arbeitskräften weiter verschärfen kann.

Hingegen zeigt die Auswertung der IEA-Datenbank zur öffentlichen FuE-Förderung, dass Deutschlands Investitionen in energiebezogene FuE in den letzten Jahren in Relation zu seinen direkten Mitbewerbern und zu seiner Wirtschaftskraft am unteren Ende der Spanne liegen. Dies gilt auch spezifisch für die FuE-Mittel für Energieeffizienz in der Industrie. Etwaige weitere Kürzungen würden dieses Bild weiter verschlechtern.

2. *Welche Bedeutung hat die FuE-Förderung im Bereich der Energieanwendung in Industrie und Gewerbe für die zügige Transformation und Dekarbonisierung der Industrie und des Gewerbes, sowie für Produktionskostensenkungen? Sind mehr Innovationen mit FuE-Bedarf erforderlich, um höhere Effizienzgewinne in der Wirtschaft zu ermöglichen, die für das Erreichen der deutschen Klimaschutzziele die Jahre 2030 und 2045 benötigt werden?*

Die Kurzstudie führt das breite Spektrum möglicher Produktions- und Querschnittstechniken für die Transformation der Industrie hin zur Klimaneutralität auf und benennt den Stand der Entwicklung nach TRL. Es wird erkennbar, dass erheblicher FuE-Bedarf besteht. Im Kontext sich verändernder Rahmenbedingungen ist ein hinreichend technologieoffener, und damit breiter und auch hinsichtlich des Finanzbedarfs umfänglicher, Ansatz erforderlich. Unterschiedliche technische Lösungen (Elektrifizierung – und hier wiederum verschiedenste Ansätze – , Wasserstoff, CCS, CCU, Biomasse, ...) werden für unterschiedliche industrielle Produktionssysteme geeignet sein und müssen

weiterentwickelt werden. Eine Beschleunigung der Dekarbonisierung kann durch einen gezielten Transfer und Nutzung der Ergebnisse aus FuE-Projekten erfolgen. Diese müssen hierfür in der Breite vorhanden sein. Ohne eine verlässliche und starke FuE Förderung wird dies vor dem Hintergrund unterschiedlicher TRL und damit aus Sicht der Unternehmen unterschiedlicher Risikoniveaus nicht gelingen.

Zugleich zeigt ein Blick auf aktuelle Energieszenarien für die Industrie, dass zur Erreichung der klimapolitischen Ziele erhebliche Effizienzfortschritte durch eine recht zügige Diffusion neuer Techniken in die Produktion angenommen wird. Darüber hinaus zeigen Szenarienvarianten, dass ein geringerer Effizienzfortschritt durch zu langsame Diffusion neuer Techniken zu erheblichen Mehrinvestitionen für neue Stromerzeugungsanlagen und Infrastrukturen führt.

Eine hohe FuE-Intensität für die industrielle Energieeffizienz ist also erforderlich für eine umsetzbare und einzel- wie gesamtwirtschaftlich bezahlbare Energiewende.

In den energieintensiven Industrien machen Energiekosten einen Großteil der Gesamtkosten aus. In Deutschland hat die energieintensive Industrie zugleich eine große Bedeutung in der Wirtschaftsstruktur. Eine Senkung der Energiekosten durch forcierte Energieeffizienz – und als Voraussetzung hierfür wiederum eine deutlich gestärkte FuE für Energieeffizienz – wirkt sich mit zeitlichem Versatz direkt auf die Wettbewerbsfähigkeit aus. Vor dem Hintergrund der aktuellen Bemühungen die Transformation der energieintensiven Industrie mit anderen politischen Instrumenten (Klimaschutzverträge) zu unterstützen, wäre eine weitere Kürzung öffentlicher FuE-Budgets für industrielle Energieeffizienz nicht zielführend.

3. Welche Bedeutung hat die FuE-Förderung im Bereich der Energieanwendung in Industrie und Gewerbe für die Resilienz sowohl der deutschen Wirtschaft gegenüber globalen Unsicherheitsfaktoren als auch der Gesellschaft gegenüber Klimaschäden?

Resilienz einer Volkswirtschaft ist die Fähigkeit, sich ohne übermäßige Beeinträchtigungen an verändernde Rahmenbedingungen anzupassen. Die Kurzstudie untersucht spezifische Aspekte der Resilienz der Wirtschaft und Gesellschaft vor dem Hintergrund der Herausforderungen internationaler Konkurrenz für die deutsche Wirtschaft und des Klimawandels als solchem.

Die Auswirkungen der wirtschaftlichen Abhängigkeiten durch ein hohes Maß an Arbeitsteilung, Spezialisierung und Outsourcing von Produktion sind in den letzten Jahren vor dem Hintergrund diverser Krisen (Corona, Ukraine-Krieg) sichtbarer geworden. Zugleich zeigen vergleichende Patentanalysen (Deutschland, China, USA), bei Produktgruppen die für industrielle Produktion und Energieeffizienz besonders relevant sind, den enormen Aufholprozess insbesondere Chinas, auch angetrieben durch dort stark gestiegene FuE-Budgets. Die deutsche Industrie ist durch schnelle technische Aufholprozesse und eine enorme Innovationsintensität in Ländern wie insbesondere China, aber auch USA, Japan und Südkorea, zunehmend erheblichen Risiken ausgesetzt, bei neuen Energietechniken zurückzufallen und somit an Wettbewerbsfähigkeit zu verlieren. Eine Stagnation der öffentlichen energiebezogenen FuE-Budgets auf dem derzeitigen, relativ zur Wirtschaftskraft niedrigen Niveau, – oder gar ihr Rückgang – würde die Situation für deutsche Hersteller von Energietechniken noch weiter erschweren.

Diese Aspekte gefährden die Resilienz der deutschen Wirtschaft, sie haben negativen Einfluss auf die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit, und dies nicht nur auf internationalen Märkten, sondern auch auf dem heimischen Markt.

Öffentliche FuE-Budgets sollten stärker als erforderliches Risikokapital wahrgenommen werden. Einzelwirtschaftliche Entscheidungskalküle greifen oftmals zu kurz, da sie Investitionsoptionen mit vermeintlich sichererer und höherer Rendite priorisieren. FuE-Investitionen sind individuell betrachtet immer unsichere, aber in ihrer Summe, wie in Kapitel 5 ausgeführt, mittel- bis langfristig sehr renditestarke Investitionen.

Ein nicht eingedämmter Klimawandel wird, so die übereinstimmende Aussage der untersuchten Literatur, katastrophale Folgen auch im Hinblick auf die gesamtgesellschaftliche Wohlfahrt in einer Größenordnung von ca. 20% des BIP haben. Investitionen zur Vermeidung weiterer Treibhausgasemissionen haben daher absehbar eine hohe Rendite in Form vermiedener Schadenskosten. Die Zusammenhänge zwischen Investitionen in FuE, höherer Energieeffizienz und in der Folge geringerer Emissionen wurde bereits dargelegt. Es ist naheliegend, dass sich dermaßen große Schäden äußerst nachteilig auf die Stabilität unserer Gesellschaften auswirken werden und es zu weiteren, nicht oder nur schwer monetarisierbaren Wohlfahrtsverlusten käme. Daher sind Investitionen in Klimaschutz auch Investitionen in die Resilienz unserer Gesellschaften.

Ergänzend zeigt das untersuchte Praxisbeispiel „Hochtemperatur-Wärmepumpe“, wie eine langjährige Förderung von Verbundvorhaben zur Markteinführung zuvor nicht marktreifer Technologien führen kann.

Fazit und Handlungsempfehlungen

FuE-Förderung im Energiebereich, und im Speziellen bzgl. Energieeffizienz in der Industrie, ist von hoher Bedeutung im Hinblick auf vielfältige Aspekte:

- für die wirtschaftliche Entwicklung insgesamt und die Resilienz sowie Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie national wie international;
- für die Senkung des Energieverbrauchs in der Industrie, was zum einen zu geringeren Produktionskosten und zum anderen zu geringeren Aufwendungen auf Ebene der Energieversorgung führt; es ist nicht damit zu rechnen, dass die erforderlichen und in Energieszenarien unterstellten Energieeffizienzfortschritte ohne hinreichende FuE-Förderung auch tatsächlich eintreten;
- als wichtiger Bestandteil der Klimaschutzpolitik, um klimabedingte Schadenskosten zu reduzieren;
- zur Sicherung der Ausbildung akademischer Fachkräfte und Sicherung der Beschäftigung.

Demgegenüber stehen relativ zur Wirtschaftsleistung und im internationalen Vergleich niedrige FuE-Budgets für die Energieforschung in Deutschland zur Verfügung, dies gilt in besonderem Maße für die Energieeffizienzforschung für Energie und Gewerbe.

Daher wird empfohlen, auf Kürzungen in diesem Bereich nicht nur zu verzichten, sondern öffentliche FuE-Budgets als Zukunftsinvestitionen mit vielfacher Rendite in einen klimaneutralen Industriestandort Deutschland zu verstehen und diese entsprechend auszubauen.

9 Literaturverzeichnis

Ancygier, Andrzej (2020): Beyond Borders: how to strengthen the external impact of domestic climate action. Climate Analytics. Berlin.

Belitz, Heike; Junker, Simon; Schiersch, Alexander; Podstawski, Maximilian (2015): Wirkung von Forschung und Entwicklung auf das Wirtschaftswachstum. Gutachten des DIW Berlin im Auftrag der KfW Bankengruppe. DIW Berlin. Berlin. Online verfügbar unter https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Studien-und-Materialien/Gutachten_FuE_DIW_KfW_internet.pdf.

Bickenbach, Frank; Dohse, Dirk; Langhammer, Rolf J.; Liu, Wan-Hsin (2024): Foulspiel? Zu Höhe und Umfang der Industriesubventionen in China. Institut für Weltwirtschaft Kiel (ifw) (Kiel Policy Brief, 173). Online verfügbar unter https://www.ifw-kiel.de/fileadmin/Dateiverwaltung/IfW-Publications/fis-import/3efc594b-3e1c-41e4-b6b0-150e947a45db-KBP173_dt.pdf, zuletzt geprüft am 03.07.2024.

Blazejczak, Jürgen; Edler, Dietmar; Schill, Wolf-Peter (2014): Steigerung der Energieeffizienz: ein Muss für die Energiewende, ein Wachstumsimpuls für die Wirtschaft. In: *DIW Wochenbericht* 81 (4), S. 47–60. Online verfügbar unter https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.435700.de/14-4-1.pdf.

Brehm, Anna (2021): Beschäftigungseffekte der Energiewende: Bisherige Entwicklung und Zukunftsperspektiven. Hintergrundpapier. Hg. v. Deutsch-französische Büro für die Energiewende (DFBEW). Online verfügbar unter https://energie-fr-de.eu/de/gesellschaft-umwelt-wirtschaft/aktuelles/leser/hintergrundpapier-zu-den-beschaeftigungseffekten-der-energiewende.html?file=files/ofaenr/04-notes-de-synthese/02-access-libre/06-societe-environnement-economie/2021/DFBEW_HP_Beschaeftigungseffekte_Energiewende_2112.pdf, zuletzt geprüft am 26.06.2024.

Buchmann, Marius; Stark, Sanja; Blank-Babazadeh, Marita; Mayer, Christoph (2022): Elektrische Verteilnetze resilient ausbauen – Herausforderungen und Handlungsoptionen. In: *Z Energiewirtschaft* 46 (1), S. 27–39. DOI: 10.1007/s12398-021-00316-x.

Bundesverband der deutschen Industrie (2024): Standort D mit Investitionen stärken. Programm für Infrastruktur, Transformation und Resilienz erforderlich. Hg. v. BDI. Berlin. Online verfügbar unter <https://bdi.eu/publikation/news/standort-d-mit-investitionen-staerkenhttps://bdi.eu/publikation/news/standort-d-mit-investitionen-staerken>, zuletzt geprüft am 03.07.2024.

Deutsche Bundesbank (Hg.) (2024): Monatsbericht – April 2024. 76. Jahrgang. Nr. 4. Online verfügbar unter <https://publikationen.bundesbank.de/publikationen-de/berichte-studien/monatsberichte/monatsbericht-april-2024-928516>, zuletzt geprüft am 19.06.2024.

EnergieAgentur.NRW GmbH (Hg.) (2020): Nationaler Emissionshandel in Deutschland ab 2021. Online verfügbar unter https://www.energieagentur.nrw/klimaschutz/emissionshandel/nationaler_emissionshandel_in_deutschland_ab_2021, zuletzt geprüft am 24.11.2020.

European Commission (2020): Science, research and innovation performance of the EU, 2020 - A fair, green and digital Europe. Hg. v. Publications Office. Online verfügbar unter <https://data.europa.eu/doi/10.2777/534046>.

Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Herbst, Andrea (2023a): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. T45-Szenarien. Modul Industriesektor. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Hirzel, Simon; Neusel, Lisa; Aydemir, Ali; Schwotzer, Christian et al. (2023b): CO₂-neutrale Prozesswärmeerzeugung. Umbau des industriellen Anlagenparks im Rahmen der Energiewende: Ermittlung des aktuellen SdT und des weiteren Handlungsbedarfs zum Einsatz strombasierter Prozesswärmeanlagen. Hg. v. Umweltbundesamt. Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung, Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik der RWTH Aachen University. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-neutrale-prozesswaermeerzeugung>.

Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Manz, Pia; Neuwirth, Marius; Herbst, Andrea (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. Treibhausgasneutrale Hauptszenarien. Modul Industriesektor. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/Modul_TN_Hauptszenarien_Industrie.pdf, zuletzt geprüft am 19.06.2024.

Fraunhofer-Gesellschaft (18.06.2024): Massive Kürzungen der Forschungsförderung bremsen notwendige Innovationen bei Schlüsseltechnologien für die Energiewende. Online verfügbar unter <https://www.cines.fraunhofer.de/de/pressemitteilungen/massive-kuerzungen-der-forschungsfoerderung-bremsen-notwendige-i.html>, zuletzt geprüft am 19.06.2024.

Haug, Gerald H.; Spath, Dieter; Hatt, Hanns (2021): Resilienz digitalisierter Energiesysteme. Wie können Blackout-Risiken begrenzt werden? Halle (Saale), München, Mainz: Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V. - Nationale Akademie der Wissenschaften; acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V.; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V (Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:3:2-133492>.

Hiermaier, Stefan; Hiller, Daniel; Edler, Jakob; Roth, Edler; Arlinghaus, Julia C.; Clausen, Uwe (2021): Resilienz. Ein Fraunhofer-Konzept für die Anwendung. Hg. v. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung. München.

Hüther, M. (2023): Deindustrialisierung: Schreckgespenst oder notwendiger Schritt im Strukturwandel der deutschen Wirtschaft? 76. Aufl. ifo Institut. München (ifo Schnelldienst, 3).

IEA (2024a): Energy Technology RD&D Budgets. May 2024 Edition Database documentation. IEA. Paris. Online verfügbar unter https://iea.blob.core.windows.net/assets/53533e19-2f21-4dca-ab9a-c251bc0f9e33/RDD_Documentation.pdf.

IEA (2024b): Energy Technology RD&D Budgets Data Explorer. Detailed breakdown of public budgets on energy RD&D submitted to the IEA by its member and association countries. IEA. Paris. Online verfügbar unter <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-technology-rdd-budgets-data-explorer>, zuletzt geprüft am 03.07.2024.

IEA TCP HPT (2023): Annex 58 High-Temperature Heat Pumps Task 1 - Technologies. Task Report. Hg. v. Heat Pump Centre - RISE research Institutes of Sweden. Borås, Sweden. Online verfügbar unter <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2023/09/annex-58-task-1-technologies-task-report.pdf>, zuletzt geprüft am 03.07.2024.

Kaltenborn, Bruno: Auswirkungen der ökologischen Transformation: Beschäftigungseffekte des Klimaschutzes in Deutschland. Forschungsförderung Working Paper. Hg. v. Hans-Böckler-Stiftung. Düsseldorf. Online verfügbar unter https://www.boeckler.de/fpdf/HBS-008185/p_fofoe_WP_231_2021.pdf, zuletzt geprüft am 26.06.2024.

Keuschnigg, Ch.; Gogola, G.; Johs, J.; Kritzinger, M.; Sardadvar, S. (2021): Wirkung von Forschungsausgaben. Wirtschaftspolitisches Zentrum, Universität St. Gallen; WPZ Research, Wien.

Kotz, Maximilian; Levermann, Anders; Wenz, Leonie (2024): The economic commitment of climate change. In: *Nature* 628 (8008), S. 551–557. DOI: 10.1038/s41586-024-07219-0.

Langhammer, Rolf J. (2022): Reluctant US vs Ambitious German Direct Investment in China - the Tale of Two Strategies. Institut für Weltwirtschaft Kiel (ifw) (Kiel Policy Brief, 162). Online verfügbar unter https://www.ifw-kiel.de/fileadmin/Dateiverwaltung/IfW-Publications/fis-import/0325aa54-ce17-468d-8655-70609640c815-KPB_162.pdf, zuletzt geprüft am 03.07.2024.

Lively, R.P.; Sholl, D.S. (2017): From Water to Organics in Membrane Separations. In: *Nature materials* 16 (3), S. 276–279. Online verfügbar unter DOI: 10.1038/nmat4860.

Lupi, S. (2017): Fundamentals of Electroheat. Electrical Technologies for Process Heating. 1. Aufl. Schweiz: Springer International Publishing.

Mallapaty, Smriti (2024): China Promises more money for science in 2024. Nachrichtenartikel. In: *Nature*, 08.03.2024. Online verfügbar unter <https://www.nature.com/articles/d41586-024-00695-4>, zuletzt geprüft am 03.03.2024.

Nacke, B.; Baake, E.: Elektrothermische Verfahren. In: , S. 286–360.

Nerreter, W. (2011): Grundlagen der Elektrotechnik. 2. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag. Online verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/isbn/9783446423855>.

Nordhaus, William (2019): Climate Change: The Ultimate Challenge for Economics. In: *American Economic Review* 109 (6), S. 1991–2014. DOI: 10.1257/aer.109.6.1991.

o.A. (2024): Der Klimawandel bedroht die Weltwirtschaft. Studie des Potsdam-Instituts. Stand: 18.04.2024 11:30 Uhr. In: *tagesschau*, 18.04.2024. Online verfügbar unter <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/klimafolgen-potsdam-institut-weltwirtschaft-schrumpft-drastisch-100.html>, zuletzt geprüft am 19.06.2024.

Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Unter Mitarbeit von Julia Repenning, Lukas Emele, Ruth Blanck, Sybille Braungardt, Wolfgang Eichhammer und Rainer Elstrand. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

Pehnt, Martin; Arens, Marlene; Duscha, Markus; Eichhammer, Wolfgang; Fleiter, Tobias; Gerspacher, Andreas et al. (2011): Kurzzusammenfassung. Energieeffizienz: Potenziale, volkswirtschaftliche Effekte und innovative Handlungs- und Förderfelder für die Nationale Klimaschutzinitiative. Endbericht des Projektes "Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative". Hg. v. IFEU, Fraunhofer ISI, Prognos, GWS. Institut für Energie- und Umweltforschung. Heidelberg, Karlsruhe, Berlin, Osnabrück, Freiburg. Online verfügbar unter https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/NKI_-Zusammenfassung_Endbericht-NKI-V37.pdf, zuletzt geprüft am 19.06.2024.

Pöhlmann, F. (2017): Zusammenspiel von chemischer Reaktion und Porendiffusion bei der kobaltkatalysierten Fischer-Tropsch-Synthese unter Einsatz von CO₂-haltigem Synthesegas. Dissertation. Universität Bayreuth.

Rao, L.; Rivard, F.; Carabin, P. (2013): Thermal Plasma Torches for Metallurgical Applications. In: T. Jiang, J.-Y. Hwang, P. J. Mackey, O. Yucel und G. Zhou (Hg.): 4th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, S. 57–65.

Rocky Mountain Institute (2019): Breakthrough Batteries - Powering the Era of Clean Electrification. Rocky Mountain Institute. Online verfügbar unter https://rmi.org/wp-content/uploads/2019/10/rmi_breakthrough_batteries.pdf.

Rudnev, V.; Loveless, D.; Cook, R. L. (2017): Handbook of Induction Heating. 2. Aufl.: Taylor & Francis Group.

Sandberg, E. (2020): A scenario analysis of furnace heating technologies in the iron and steel industry,. Hg. v. Luleå University of Technology, Department of Engineering Science and Mathematics.

Sauer, Alexander; Buhl, Hans Ulrich; Mitsos, Alexander; Weigold, Matthias (2022): Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Band 2: Markt- und Stromsystem, Managementsysteme und Technologien energieflexibler Fabriken. Hg. v. Fraunhofer-Gesellschaft. Online verfügbar unter https://synergie-projekt.de/wp-content/uploads/2020/08/SynErgie_Band_2.pdf, zuletzt geprüft am 11.07.2024.

Saunders, Harry D.; Roy, Joyashree; Azevedo, Inês M.L.; Chakravarty, Debalina; Dasgupta, Shyamasree; La Rue Can, Stephane de et al. (2021): Energy Efficiency: What Has Research Delivered in the Last 40 Years? In: *Annu. Rev. Environ. Resour.* 46 (1), S. 135–165. DOI: 10.1146/annurev-environ-012320-084937.

Schäfer, Bernhard; Haltenort, Philipp; Sauer, Jörg (2021): Bewertung: Organophile Nanofiltration – Größenausschlussbasiertes Membrantrennverfahren für organische Stoffsysteme. Arbeitspapier. IKFT KIT. Karlsruhe.

Schug, S. (2024): China mausert sich jetzt auch noch zur Wissenschafts-Supermacht. Wirtschafts-Woche. Online verfügbar unter <https://www.wiwo.de/politik/ausland/internationale-forschung-china-mausert-sich-jetzt-auch-noch-zur-wissenschafts-supermacht/29851864.html>, zuletzt geprüft am 08.07.2024.

Stern, Nicholas H. (2007): The economics of climate change. The Stern review. 1. publ. Cambridge: Cambridge Univ. Press (The Stern review). Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0803/2007275608-b.html>.

Stich, Volker; Schröer, Tobias; Linnartz, Maria; Janßen, Jokim (2023): Resilienz jetzt – Wie Krisen unseren Blick auf Wertschöpfungsnetzwerke verändern. In: Peter H. Voß (Hg.): Die Neuerfindung der Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 41–49.

Thielmann, Axel; Neef, Christoph; Schmaltz, Thomas; Weymann, Lukas (2024): Wird der Aufbau eines europäischen und deutschen Batterie-Ökosystems am Fachkräftemangel scheitern? Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Online verfügbar unter <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/2024/batterieforschung-kuerzung-foerderung-folgen-aufbau-oekosystem-europa-deutschland-fachkraefte-mangel.html>, zuletzt geprüft am 26.06.2024.

Triple Steelix (Hg.) (2020): PLATIS - a project for fossil-free heating in the steel industry. Online verfügbar unter <https://www.triplesteelix.se/en-GB/projects/platis-44758213>, zuletzt geprüft am 20.10.2020.

Umweltbundesamt (2024): Branchenabhängiger Energieverbrauch des verarbeitenden Gewerbes. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltwirtschaft/industrie/branchenabhaengiger-energieverbrauch-des#der-energiebedarf-deutschlands>, zuletzt aktualisiert am 08.07.2024, zuletzt geprüft am 08.07.2024.

Universiteit Leiden (2024): CWTS Leiden Ranking 2023. Physical Sciences and engineering publications, 2019-2022. Online verfügbar unter <https://www.leidenranking.com/ranking/2024/list>, zuletzt geprüft am 03.07.2024.

Weigold, Matthias; Weyandt, Astrid; Walter, Jessica; Sauer, Jörg; Schäfer, Bernahrd; Haltenort, Philipp et al. (2022): Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt EE4InG. TU Darmstadt, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IREES GmbH, ETA-Solutions GmbH. darmstadt. Online verfügbar unter https://ee4ing.de/wp-content/uploads/2020/06/2022-03_28_EE4InG_Sachbericht.pdf, zuletzt geprüft am 03.07.2024.

Weiß, Julika; Otto, Siegmund; Mohaupt, Franziska; Hoffmann, Esther; Hirschl, Bernd (2011): Energieeffizienz und Beschäftigung-Abschlussbericht. Berlin.

Wilhelmsson, B.; Kollberg, C.; Larsson, J.; Eriksson, J.; Eriksson, M. (2018): Cemzero. A feasibility study evaluating ways to reach sustainable cement production via the use of electricity. Hg. v. Vattenfall und Cementa. Schweden.