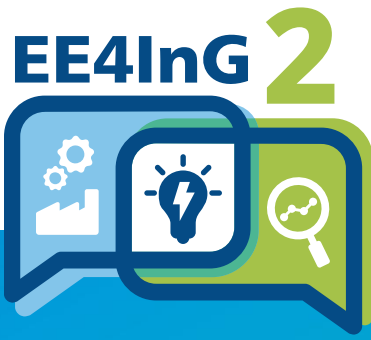




Strategie und Forschungsroadmap des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe

25. Oktober 2025



**FORSCHUNGSNETZWERKE
ENERGIE**



**INDUSTRIE
UND GEWERBE**

FORSCHUNGSNETZWERKE
ENERGIE

Das Begleitforschungsvorhaben EE4InG2

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

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

EE4InG2

Begleitforschung für
Energieeffizienz in
Industrie und Gewerbe 2.0

ee4ing2.de

Autorinnen und Autoren

Die vorliegende Strategie wurde im Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe entwickelt. Die Erstellung wurde durch das Begleitforschungsvorhaben EE4InG2 (Förderkennzeichen: 03EN2107A-C) koordiniert. Die Kapitel 5.1 bis einschließlich 5.8 liegen in der Verantwortung der jeweiligen Kuratoren und Kuratorinnen bzw. Sprecher und Sprecherinnen. Alle weiteren Kapitel wurden federführend von der Begleitforschung entworfen und in einem gemeinsamen Diskussionsprozess des Forschungsnetzwerks finalisiert.

Autorinnen und Autoren¹

Begleitforschung EE4InG2:

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

Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik:

Dr. Kathrin Rübberdt (Koordinatorin - DECHEMA e.V.), Dr. Alexis Bazzanella (DECHEMA e.V.), Prof. Dr. Marcus Grünwald (Ruhr-Universität Bochum), Dr. Sebastian Härtner (Merck KGaA), Prof. Dr. Elias Klemm (Universität Stuttgart), Prof. Dr. Norbert Kockmann (TU Dortmund), Dr. Frank Stenger (Evonik)

Forschungsfeld Fertigungstechnik:

Prof. Dr. Matthias Weigold (Koordinator - PTW, TU Darmstadt), Juliane Heydemann (ETA-Solutions GmbH), Daniel Moog (ETA-Solutions GmbH), Arthur Stobert (PTW, TU Darmstadt)

Forschungsfeld Hochtemperatursupraleitung:

Prof. Dr. Christof Humpert (Koordinator - TH Köln), Prof. Dr. Alexander Alekseev (Linde GmbH), Prof. Dr. Tabea Arndt (KIT), Prof. Dr. Robert Bach (FH Südwestfalen), Prof. Dr. Michael Bäcker (MaTech-Consult GmbH), Prof. Dr. Eberhard Jochem (IREES GmbH), Prof. Dr. Mathias Noe (KIT), Dr. Carsten Räch (Vision Electric Super Conductors GmbH), Dr. Wolfgang Reiser (Vision Electric Super Conductors GmbH)

Forschungsfeld Thermoprozessestechnik:

Dr. Joachim G. Wünning (Koordinator - WS Wärmeprozessestechnik GmbH), Alexander Fröhlich (IWP - TU Chemnitz), Felix Kaiser (IOB - RWTH Aachen), Prof. Dr. Tobias Kleinert (IAT - RWTH Aachen), Dr. Frans Kremer (OWI Science for Fuels gGmbH), Martin Kroll (IWP - TU Chemnitz), Katharina Rothhöft (IOB - RWTH

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

Aachen), Dr. Christian Schwotzer (IOB - RWTH Aachen), Dr. Bernhart Stranzinger (VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH)

Forschungsfeld Tribologie:

Dr. Thomas Lohner (Koordinator - Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebesysteme, TU München), Dr. Jörg Schöfer (Kompetenzzentrum Tribologie, Robert Bosch GmbH), Rolf Luther (Fuchs Lubricants Germany GmbH), in Abstimmung mit dem Kuratorium des Forschungsfelds Tribologie

Forschungsfeld Wärme und Abwärme:

Dr. Andreas Hauer (Koordinator – ZAE Bayern), Dr. Olaf Andersen (Fraunhofer IFAM), Cedric Fritsch (Kraftblock), Katharina Gruber (FfE), Dr. Mateo Jesper (Universität Kassel), Oliver Lösch (unabhängiger Berater im Auftrag der IREES GmbH), Dr. Stefanie Tafelmeier (ZAE Bayern), Prof. Dr. Annelies Vandersickel (DLR)

Forschungsfeld Wärmepumpen und Kältetechnik:

Dr. Marek Miara (Koordinator - Fraunhofer ISE), Juliane Heydemann (ETA-Solutions GmbH), Daniel Moog (ETA-Solutions GmbH), Prof. Dr. Peter Schossig (Fraunhofer ISE), Dr. Christian Vering (RWTH Aachen)

Cluster Aerocele:

Prof. Dr. Irina Smirnova (Koordinatorin – TU Hamburg), Dr. Gerd-Sebastian Beyerlein (RAMPF Advanced Polymers GmbH & Co. KG), Prof. Dr. Barbara Milow (DLR / Universität Köln), Dr. Christian Scherdel (Center for Applied Energy Research e.V.), Dr. Bernhard Seifried (DLR), Dr. Dirk Weinrich (Aerogel-it GmbH)

Danksagung

Das Forschungsfeld Tribologie bedankt sich bei Dr. Nazlim Bagcivan (Surface Technologies, Schaeffler Technologies AG & Co. KG), Andreas Kümmeth (Innovation Lab, Wittenstein SE), Prof. Dr. Katharina Schmitz (, RWTH Aachen) sowie Dr. Volker Weihnacht (Fraunhofer IWS) für Anregungen, Hinweise und wertvolle Diskussionen zu den Textbeiträgen des Forschungsfeldes.

Das Forschungsfeld Wärmepumpen und Kältetechnik bedankt sich bei Prof. Dr. Constanze Bongs (HKA Karlsruhe), Johannes Brunder (IGTE), Dr. Stefan Henninger (Johnson Controls), Dr. Stefan Hess (Infineon), Dr. Rainer Jakobs (IZW), Dr. Enrico Jende (DLR), Dr. Heinz Jürgensen (Bitzer), Dr. Rainer Lang (Vaillant), Dr. Joachim Maul (Viessmann), Prof. Dr. Dirk Müller (RWTH Aachen), Markus Müller (ILK Dresden), Dr. Klaus Ramming (AGO), Dr. Manuel Riepl (ZAE Bayern), Dr. Martin Sabel (BWP), Dr. Lena Schnabel (Fraunhofer ISE, IEG), Prof. Panagiotis Stathopoulos (DLR), Prof. Christiane Thomas (TU Dresden) sowie Dr. Matthias Utri (Fraunhofer IEG), für Anregungen, Hinweise und wertvolle Diskussionen zu den Textbeiträgen des Forschungsfeldes.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Executive Summary	8
2 Motivation	11
3 Übergreifende strategische Aspekte der Energieforschung für Industrie und Gewerbe	12
3.1 Erfolgreiche Energieforschung trotz großer epochaler Unsicherheiten	12
3.2 Neue Techniken und Themenfelder der Transformation	15
4 Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe	19
4.1 Ziele und Strukturen des Forschungsnetzwerkes	19
4.2 Das Forschungsnetzwerk im Kontext des 8. Energieforschungsprogramms ...	21
5 FuE-Bedarfe der Forschungsfelder und Cluster	25
5.1 Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik	25
5.1.1 Rückblick des Forschungsfelds	25
5.1.2 Aktuelle Arbeiten des Forschungsfelds	26
5.1.3 FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Forschungsfelds	27
5.2 Forschungsfeld Fertigungstechnik	33
5.2.1 Rückblick des Forschungsfelds	34
5.2.2 Aktuelle Arbeiten des Forschungsfelds	37
5.2.3 FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Forschungsfelds	38
5.3 Forschungsfeld Hochtemperatursupraleitung	43
5.3.1 Rückblick des Forschungsfelds	43
5.3.2 Aktuelle Arbeiten des Forschungsfelds	45
5.3.3 FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Forschungsfelds	46
5.4 Forschungsfeld Thermoprozesstechnik	51
5.4.1 Rückblick des Forschungsfelds	51
5.4.2 Aktuelle Arbeiten des Forschungsfelds	52
5.4.3 FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Forschungsfelds	53
5.5 Forschungsfeld Tribologie	59
5.5.1 Rückblick des Forschungsfelds	59
5.5.2 Aktuelle Arbeiten des Forschungsfelds	61

5.5.3	FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Forschungsfelds.....	63
5.6	Forschungsfeld Wärme und Abwärme	68
5.6.1	Rückblick des Forschungsfelds.....	68
5.6.2	Aktuelle Arbeiten des Forschungsfelds.....	69
5.6.3	FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Forschungsfelds.....	72
5.7	Forschungsfeld Wärmepumpen und Kältetechnik	76
5.7.1	Rückblick des Forschungsfelds.....	78
5.7.2	Aktuelle Arbeiten des Forschungsfelds.....	80
5.7.3	FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Forschungsfelds.....	82
5.8	Cluster Aerogele	84
5.8.1	Rückblick des Clusters.....	84
5.8.2	Aktuelle Arbeiten des Clusters.....	85
5.8.3	FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Clusters	86
5.9	Querschnittsthemen des Forschungsnetzwerkes.....	92
5.9.1	Nutzen der Energieforschung in Industrie und Gewerbe für das Energiesystem	92
5.9.2	Querschnittsthemen der Forschungsfelder des Forschungsnetzwerks IuG	93
6	Fazit und Handlungsempfehlungen	101
6.1	Fazit	101
6.2	Handlungsempfehlungen	104
7	Abbildungsverzeichnis	108
8	Tabellenverzeichnis	110
9	Literaturverzeichnis	111

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (Alternating Current)
BMWE	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CVT	Chemische Verfahrenstechnik
DC	Gleichstrom (Direct Current)
EE	Erneuerbare Energien
EFP	Energieforschungsprogramm
FF	Forschungsfeld(er)
FFT	Forschungsfeld Tribologie
FN IuG	Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe
FNE	Forschungsnetzwerke Energie
FOGI	Forschungsgemeinschaft Industrieofenbau e.V.
FuE	Forschung und Entwicklung
GfT	Gesellschaft für Tribologie
HLK	Heizung, Lüftung und Klimatisierung
HT	Hochtemperatur
HTS	Hochtemperatursupraleitung
HTSL	Hochtemperatursupraleiter
HVDC	Hochspannungs-Gleichstrom (High Voltage Direct Current)
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
IT	Informationstechnik
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LCA	Life Cycle Assessment
LNG	Liquid Natural Gas
MVDC	Mittelspannungs-Gleichstrom (Medium Voltage Direct Current)
PCM	Phasenwechselmaterialien (Phase-change Material)
PEM	Protonen-Austausch-Membran (Proton Exchange Membrane)
PtH	Power-to-Heat
PV	Photovoltaik
RLT	Reinlufttechnik
TMS	Transkranielle Magnetstimulation
TRL	Technologiereifegrad (Technology Readiness Level)
WKA	Windkraftanlage
WP	Wärmepumpe

1 Executive Summary

Industrie und Gewerbe sind zentrale Treiber unseres Wohlstands – und entscheidend für das Gelingen der Energiewende, denn rund 40 % des gesamten Endenergieverbrauchs entfallen auf diese Sektoren (AGEB 2025). Mit einem Anteil von etwa 20 % an der Bruttowertschöpfung ist das Verarbeitende Gewerbe ein Eckpfeiler der deutschen Volkswirtschaft (AK UGRdL).

Energie ist in vielen Branchen ein wichtiger Kostenfaktor – und damit ein Hebel für die Wettbewerbsfähigkeit. Innovative, energieeffiziente und klimafreundliche Lösungen bieten Unternehmen Chancen, Kosten zu senken, ihre Marktposition zu stärken und sich im internationalen Wettbewerb zu behaupten. Forschung und Entwicklung in diesem Bereich erschließen wirtschaftlich nutzbare Effizienzpotenziale und stärken die Innovationskraft Deutschlands.

Die Energieforschungsförderung für Industrie und Gewerbe in Deutschland hat eine lange und erfolgreiche Historie. Die Breite der in den Branchen der deutschen Industrie genutzten Energietechniken ist sehr ausgeprägt; diese Vielfalt spiegelt sich in der Energieforschung für diesen Bereich wider. Technische Innovationen entstehen durch den Austausch und Kooperation der Forschenden untereinander sowie mit herstellenden und anwendenden Unternehmen, der Politik und weiteren Akteurinnen und Akteuren des Innovationssystem. Seit über zehn Jahren ist das Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe die zentrale Vernetzungsplattform für die vom Bund geförderte Energieforschung für Industrie und Gewerbe in Deutschland. Mit den Forschungsfeldern und Clustern existieren aktive Strukturen, die sich bestimmten Technikbereichen langfristig widmen: Chemische Verfahrenstechnik, Fertigungstechnik, Hochtemperatursupraleitung, Thermoprozesstechnik, Tribologie, Wärme und Abwärme, Wärmepumpen und Kältetechnik sowie das Cluster Aerogele.

In der vorliegenden Strategie leitet das Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe aus der Vielfalt der denkbaren Forschungsthemen priorisierte FuE-Themen und -Bedarfe für die Energieforschungsförderung bis Mitte der 2030er Jahre ab. Diese werden in das achte Energieforschungsprogramm eingeordnet. Damit sind sie Konkretisierungen des 8. Energieforschungsprogramms oder Vorschläge für zukünftige Anpassungen. Aus dem Entwicklungsstand der Techniken in den verschiedenen Bereichen und den erarbeiteten Bedarfen werden Handlungsempfehlungen abgeleitet. Die Strategie richtet sich einerseits an politische Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger, andererseits dient sie als interne Arbeitsgrundlage des Forschungsnetzwerks für seine strategische Ausrichtung. Anwenderunternehmen, Infrastrukturdienstleister und beratende Ingenieurinnen und Ingenieure finden in der vorliegenden Strategie einen Überblick über den Stand der Technikentwicklung in vielen für sie relevanten Bereichen.

Die in dieser Strategie als von besonderer Relevanz erkannten Themen sind:

- Die Umstellung auf eine nachwachsende und auf Recycling beruhende Rohstoffbasis sowie die Elektrifizierung und Flexibilisierung von Prozessen: Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik
- Die Umstellung auf energie- und ressourceneffiziente sowie energieflexible Prozessketten sowie das Vorantreiben der Digitalisierung für resiliente, flexible und nachhaltige Produktionssysteme: Forschungsfeld Fertigungstechnik
- Die Initiierung von Demonstrationsprojekten für Energiekabel und Stromschienen, die Optimierung der Kälte- und Kryotechnik sowie die Anwendungsentwicklung im Bereich von Strombegrenzern und Windkraftanlagen: Forschungsfeld Hochtemperatursupraleitung
- Die energieeffiziente Defossilisierung der industriellen Prozesswärme durch Elektrifizierung sowie durch Wasserstoff und seine Derivate; in Kombination mit einer verstärkten Digitalisierung und Flexibilisierung der Prozess- und Anlagentechnik als Enabler: Forschungsfeld Thermoprozesstechnik
- Die Entwicklung nachhaltiger Materialien und Schmierstoffe sowie digitaler Simulationswerkzeuge für tribologische Kontakte und Zustandsüberwachungssysteme zur Befähigung energie- und ressourceneffizienter sowie resilienter Maschinen und Anlagen: Forschungsfeld Tribologie
- Die Demonstration von technischen Lösungen zur flexiblen Sektorkopplung in der Anwendungsumgebung z.B. mit thermischen Speichern: Forschungsfeld Wärme und Abwärme
- Die Erforschung und Optimierung der Nutzung verschiedener Wärmequellen zur Effizienzsteigerung. Außerdem die Entwicklung von Methoden und Technologien, die die Integration und die Standardisierung von Anlagen vereinfachen: Forschungsfeld Wärmepumpen und Kältetechnik
- Der Aufbau von Demonstrationsanlagen und Unterstützung bei der Prozessskalierung, die Implementierung und Erprobung des Materials zur Energieeffizienzsteigerung in Endanwendungen, sowie eine verstärkte Untersuchung der Nutzungsoptionen nachhaltiger und recycelter Rohstoffe: Cluster Aerogele

Zentrales Ergebnis der Strategieentwicklung sind folgende Handlungsempfehlungen:

1. Forschung und Entwicklung stärken

Die Innovationsdynamik in einigen asiatischen Ländern – insbesondere in China –, sowie erhebliche staatliche Investitionen dieser Länder in Forschung und Entwicklung gefährden die internationale Wettbewerbsfähigkeit deutscher Hersteller von Investitions- und Gebrauchsgütern. Eine rohstoffarme und exportorientierte Volkswirtschaft wie Deutschland muss daher konsequent in ihre eigene Innovationskraft investieren. Forschung und Entwicklung zu Energietechniken und energieeffizienten Produktionsverfahren im Bereich Industrie und Gewerbe sollte deutlich gestärkt und langfristig finanziell abgesichert werden.

2. Planungssicherheit für Unternehmen schaffen

Langfristige Investitionsentscheidungen in der Industrie erfordern stabile politische Rahmenbedingungen. Unternehmen engagieren sich in Forschung und Entwicklung und Demonstrationsvorhaben nur dann, wenn ein klarer, konsistenter energie- und klimapolitischer Kurs vorhanden ist. Das Ziel der Klimaneutralität 2045 muss glaubwürdig und verlässlich verfolgt werden. Hierzu bedarf es auch politischer Instrumente, um die derzeitigen Preisunterschiede zwischen grünem Strom und fossilen Brennstoffen zu reduzieren.

3. Demonstrationsprojekte konsequent fördern

Demonstrationsvorhaben sind entscheidend, um technische Entwicklungen in die industrielle Praxis zu überführen. Sie ermöglichen den Funktionsnachweis unter realen Bedingungen und schaffen Vertrauen für die potentielle Anwendung. Insbesondere im vorherrschenden starken internationalen Wettbewerb ist es notwendig, öffentlich geförderte Innovationen durch betriebliche Demonstrationen schneller in den Markt zu bringen und damit Wettbewerbsvorteile zu schaffen.

4. Beteiligung an der Weiterentwicklung des Energieforschungsprogramms

Das Strategiepapier des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe sollte als zentrales Arbeitsergebnis bei der Weiterentwicklung des Energieforschungsprogramms berücksichtigt werden. Eine direkte Einbindung des Netzwerks – etwa im Rahmen eines strukturierten Beteiligungsprozesses – wird empfohlen.

5. Förderprozesse vereinfachen und beschleunigen

Die Antrags- und Bewilligungsprozesse sollten auf mögliche Vereinfachungen und eine deutliche Beschleunigung geprüft werden. Lange Bewilligungszeiten erhöhen das Risiko, dass sich Partner aus der Antragstellung oder geförderten Vorhaben zurückziehen – und gefährden so den Projekterfolg. Die Erfahrungen mit den jüngst eingeführten Mikroprojekten könnten hier als positives Beispiel anregend sein.

2 Motivation

Der positive Zusammenhang zwischen Investitionen in Forschung und Entwicklung (FuE) einerseits und der wirtschaftlichen Entwicklung andererseits ist wissenschaftlich vielfach belegt. Investitionen in FuE erhöhen die Produktivität des Kapitalstocks, damit das Wirtschaftswachstum, und sie stärken die Wettbewerbsfähigkeit (Lösch et al. 2024).

Energie ist in vielen Industrie- und Gewerbebranchen ein wichtiger Produktions- und damit Kostenfaktor, und ihre Nutzung ist zugleich mit erheblichen Treibhausgasemissionen verbunden, die wiederum zu hohen gesamtwirtschaftlichen Folgekosten führen. Die Steigerung der Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe verbunden mit einer Defossilisierung des Energieeinsatzes ist daher ein entscheidender Hebel, um Produktionskosten und Emissionen zu senken und die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Unternehmen im Inland zu sichern und auszubauen.

Die deutsche Industrie ist durch schnelle technische Aufholprozesse und eine enorme Innovationsintensität in Ländern wie insbesondere China, aber auch USA und Südkorea, zunehmend dem Risiko ausgesetzt, bei neuen energieeffizienten oder defossilisierten Produktionstechniken zurückzufallen und somit an Wettbewerbsfähigkeit auf den internationalen Gütermärkten zu verlieren.

Bis zur angestrebten Klimaneutralität Deutschlands sind es nur noch 20 Jahre. Insbesondere für die Industrie, die teilweise Anlagenlebensdauern von Jahrzehnten aufweist, ist dies eine enorme Herausforderung – es drohen stranded assets. Umso dringlicher ist es, energieeffiziente Techniken zur Defossilisierung schnell und umfassend zur technischen und wirtschaftlichen Marktreife zu bringen. Die aktuell angespannte geopolitische Situation sorgt für zusätzliche Unsicherheiten. Die nationale Energieforschungsförderung kann zur Resilienz der deutschen Industrie beitragen, wenn sie dauerhaft, verlässlich, und in relevantem Umfang zur Verfügung steht.

Das 8. Energieforschungsprogramm (EFP) ist das zentrale Instrument für die Förderung der angewandten Energieforschung des Bundes und als lernendes Programm angelegt. Hier setzt die vorliegende Strategie an: aus dem Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe heraus werden Themen des 8. EFP konkretisiert. Dies führt zu einer Forschungsroadmap mit Fokus auf energieeffizienten Produktionsverfahren mit konkreten Vorschlägen für neue Verbundvorhaben und einem Ausblick auf die kommenden zehn Jahre bis 2035.

Die vorliegende Strategie des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe stellt somit zum einen der Politik eine wichtige Handreichung zur Ausrichtung und Weiterentwicklung der Energieforschungsförderung im Bereich Industrie und Gewerbe zur Verfügung. Zum anderen ist sie Planungsinstrument für das Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe für die Fokussierung der Arbeiten und Aktivitäten der kommenden Jahre.

3 Übergreifende strategische Aspekte der Energieforschung für Industrie und Gewerbe

Zwei strategische Aspekte der Energieforschung werden im Folgenden behandelt:

- Wie kann Energieforschung trotz einer zeitlich unsicheren Transformation der industriellen Produktionsstruktur und unsicherer Entwicklungen globaler Handelsmärkte erfolgreich betrieben werden?
- Wie ist die energiewirtschaftliche Bedeutung neuer Energieeffizienztechniken angesichts dieser Unsicherheiten einzuschätzen?

3.1 Erfolgreiche Energieforschung trotz großer epochaler Unsicherheiten

Die Weiterentwicklung der Energieforschungsförderung in Industrie und Gewerbe steht in den kommenden Jahren vor erheblichen Herausforderungen. Denn die Transformation der deutschen Industrie binnen 20 Jahren orientiert sich an dem Ziel der Klimaneutralität 2045. Die Bandbreite künftiger Entwicklungen ihrer Rahmenbedingungen ist in der EU und global sehr groß. Die heute global etablierten Gütermärkte könnten sich infolge von geopolitischen Machtverschiebungen deglobalisieren. Die derzeitige international zumindest im Grundsatz abgestimmte Klimaschutzpolitik (Paris-Abkommen) könnte in den kommenden Jahrzehnten zugunsten einer Weiternutzung von Erdöl und Erdgas abgeschwächt oder gar ausgesetzt werden. Diese Entwicklungen dürften auch Auswirkungen auf die Marktdiffusion bestimmter Effizienz- und Produktionstechniken in den kommenden zwei Jahrzehnten haben; sie müssen daher in ihrer heute plausibel erscheinenden Bandbreite mitbedacht werden. Es stellen sich z. B. folgende Fragen:

- Für welche Techniken kann man von einer erfolgreichen Marktdiffusion ausgehen - unabhängig von den geo- und klimapolitischen Rahmenbedingungen?
- Welche Kostendegressionen sind bei den in Entwicklung befindlichen Techniken bei verkleinerten Handelsmärkten noch möglich?

Durch Auswertungen von Energiebedarfsprojektionen sowie mittels Szenarien zu möglichen geo- und klimapolitischen, demographischen und wirtschaftlichen Entwicklungen wurden denkbare Rahmenbedingungen für die Energieforschungsförderung für Industrie und Gewerbe bis 2050 skizziert.

Aktuelle Langfristprojektionen für die deutsche Industrie bis zum Jahr 2045 verdeutlichen die mit der industriellen Transformation einhergehenden Unsicherheiten während der kommenden zwei Dekaden anhand von zwei Merkmalen (vgl. Abbildung 3.1):

- des absoluten Energiebedarfs, der zwischen 460 und 740 TWh/a (1.660 bis 2.660 PJ/a) gesehen wird,

- und der Energiebedarfsstruktur, mit einem Stromanteil zwischen 36 % bis 68 % und einem Wasserstoffanteil zwischen 11 % bis 42 % am Endenergiebedarf der Industrie.

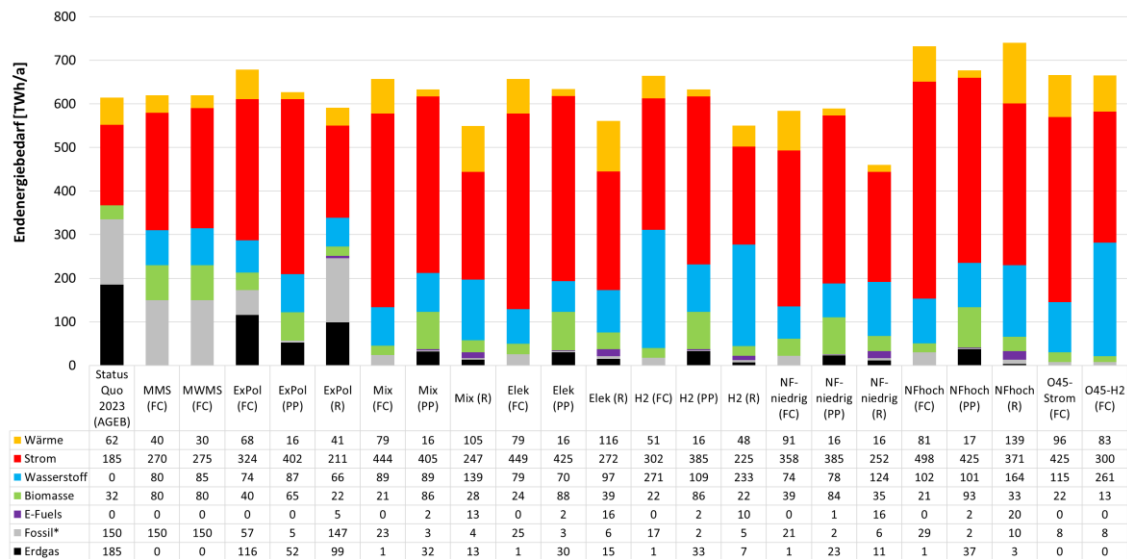


Abbildung 3-1: Vergleich des Endenergiebedarfs der Industrie (ohne stofflichen Energieträgereinsatz) in TWh/a für 2045 aus verschiedenen Studien und Betrachtung unterschiedlicher Modelle. *Erdgas separat ausgewiesen, wenn möglich. Quellen: Harthan et al. 2024: Projektionsbericht 2024 (MMS, MWMS), Luderer et al. 2025: Ariadne-Report (ExPol, Mix, Elek, H2, NFniedrig, NFhoch, Modellvergleich Forecast (F), PyPSA (PP) und REMIND(R)) und Fleiter et al. 2024b: Langfristszenarien O45 (O45-Strom, O45-H2).

Ausgehend von einem heutigen industriellen Endenergiebedarf von rund 2 300 PJ² entsprechen diese Projektionen einem ungefähr gleichbleibenden industriellen Endenergiebedarf für das Jahr 2045, mit einer Bandbreite von etwa plus / minus 20 %. Bei einem angenommenen durchschnittlichen Zuwachs der Bruttowertschöpfung der Industrie von rd. 1 % pro Jahr erscheint die aus den Szenarien resultierende Abnahme der Energieintensität als gering, insbesondere bei den Projektionen mit zunehmendem Energiebedarf. Denn es ist zu erwarten, dass der interindustrielle Strukturwandel und der Trend zu höherer Wertschöpfung und produktbegleitenden Dienstleistungen auch weiterhin zur Reduktion der industriellen Energieintensität beitragen werden.

Diese Spreizung des Ausblicks auf den möglichen Endenergiebedarf ist von unsicheren technischen Fortschritten sowie Preisen und Verfügbarkeiten grüner Endenergieträger abhängig. Eine weitere Quelle von Unsicherheiten sind wichtige geo- und klimapolitische, ökonomische und demografische Rahmenbedingungen (vgl. Tabelle A-1 und Jochem und Lösch 2025). Die Autoren sehen zwei deutlich unterschiedliche Szenarien:

- Das Szenario „Zielorientierte weltweite Dekarbonisierung“ unterstellt, dass die Transformation der Energieanwendung in den EU-Ländern, aber auch in China

² Wert aus den AGEB Energiebilanzen für 2023 zuzüglich 100 PJ, um aktuelle Konjunkturdepression u.a. durch Corona zu berücksichtigen.

und den USA (ab 2030) zielorientiert vorankommt, um ein 2°C-Ziel zu erreichen. Die heutigen Schwellenländer schließen sich relativ frühzeitig dieser Politik an.

- Das Szenario „Späte weltweite Dekarbonisierung“ geht davon aus, dass die Dekarbonisierung in der EU und den anderen OECD-Ländern (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) nur schleppend vorangeht. Gründe sind deglobalisierte Handelsmärkte, demographischer Rückgang, schwaches Wirtschaftswachstum pro Kopf und zurückgehende Wettbewerbsfähigkeit.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser zwei alternativen Dekarbonisierungs-Szenarien kann aus heutiger Sicht nicht annähernd eingeschätzt werden. Mit Blick auf die Energieforschung für Industrie und Gewerbe stellen sich deshalb zunächst zwei Fragen:

- Welche energieanwendenden Techniken für Industrie und Gewerbe, die sich aktuell in der FuE-Phase befinden (Technologiereifegrad (TRL) 3 bis 6), sind szenario-invariant? Eine szenario-invariante Effizienzlösung ist dadurch charakterisiert, dass sie sich unter den Bedingungen der beiden geschilderten Szenarien rentabel einsetzen lassen wird. Ein Beispiel ist die Hochtemperatur-Wärmepumpe, die sich in vielen Anwendungsfällen – unabhängig von den beiden Szenarien – in den kommenden 10 Jahren durchsetzen wird.
- Wenn eine Effizienztechnik derzeit in einem der beiden Szenarien nicht einsatzfähig erscheint: könnte man sie durch gezielte FuE-Aufwendungen mit vertretbarem Aufwand zur Szenario-Invarianz weiterentwickeln?

In manchen Fällen wird letztere Option vermutlich nicht möglich sein, weil es sich entweder um eine Effizienzverbesserung einer traditionellen, mit fossilen Brennstoffen betriebenen Produktionsanlage handelt oder um die gleiche Produktion, aber zukunftsorientiert mit Strom oder einem grünen Brenngas zur Wärmeerzeugung betrieben. Im Grunde wäre für derartige Produktionsbereiche eine *Doppelstrategie der FuE* zur Energieeffizienz erforderlich. Denn es könnte

- Unterschiede in der Geschwindigkeit der Transformation geben, z.B. könnte China aus Gründen der angestrebten globalen Marktführerschaft intensiv die Transformation strategisch verfolgen, vgl. die Entwicklung bei Photovoltaik-Modulen (PV), E-Autos und absehbar Klimatisierungsanlagen (Lösch et al. 2024),
- Ereignisse geben (z.B. schnell ansteigende Schadensereignisse bis 2035), die in vielen Industrie- und Schwellenländern zu einem sprunghaften Wechsel der Klimapolitik hin zu mehr Ambition führen könnten.

Abschätzung der energiewirtschaftlichen Bedeutung neuer Energieeffizienztechniken

Eine energiewirtschaftliche Bewertung neuer effizienter Produktionsverfahren erfordert einen Ausblick auf die bis 2045 plausibel zu erwartenden End- und Nutzenergiebedarfe der Anwendungsbereiche dieser neuen effizienten Lösungen.

Der Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen, die verbesserten tribologischen Eigenschaften von bewegten Systemen, die geringeren anfallenden Abwärmemengen durch

die Substitution von Verbrennungsprozessen, die verbesserte Prozessregelung, effizientere Elektromotoren, die Einführung von Gleichstromnetzen in Betrieben oder der Einsatz von KI und digitalen Zwillingen und vieles mehr sind in ihrer energiewirtschaftlichen Bedeutung zu bewerten. Zudem kann Leichtbau in Design und Produktion den Bedarf an energieintensiven Grundstoffen reduzieren; oder ein intensiveres Recycling führt zu höheren Anteilen der Sekundärproduktion von Grundstoffen. Es ist anzunehmen, dass nur ein Teil dieser möglichen Effizienzsteigerungen durch neue Techniken in den o.g. Langfristprojektionen abgebildet wurde.

Denn die Detaillierungstiefe nach Prozess- und Querschnittstechniken in den Ergebnisdarstellungen der Langfristprojektionen ist in vielen Fällen nicht hinreichend, um die energiewirtschaftliche Bedeutung neuer Effizienztechniken im Rahmen dieser Projektionen quantitativ abschätzen zu können. Zur weiteren Differenzierung nach Strom- und Wärmeanwendungen kann auch die Anwendungsbilanz von 2023 und eine erste Nutzenergiebilanz hinzugezogen werden.

In denjenigen Fällen, in denen die energiewirtschaftliche Quantifizierung einer neuen Effizienztechnik nicht über die o.g. Daten möglich ist, wäre die potenzielle energiewirtschaftliche Bedeutung über die unterstellte volle Marktdiffusion der neuen Effizienztechnik in ihren möglichen Anwendungsfällen mit bottom up-Methoden zu bestimmen.

3.2 Neue Techniken und Themenfelder der Transformation

Die zukünftig noch effizientere Nutzung von Energie in Produktionsprozessen hängt auch von neuen Techniken ab, z. B. Anwendungen der Künstlichen Intelligenz (KI) und Einführung der Gleichstromversorgung in den Produktionsbetrieben. Ebenso ist die beschleunigte Diffusion bereits etablierter Techniken, die möglichst energieeffizient angewandt werden sollten, z.B. Reinraumtechnik, als neues Feld zu nennen. Derartige neue Techniken bringen neue Chancen und Herausforderungen für die angewandte FuE.

Künstliche Intelligenz und Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe

Die KI kann an sehr verschiedenen Stellen der Energieumwandlung und Energienutzung in den Betrieben in Zukunft eine erhebliche Rolle spielen, so beispielsweise bei:

- der Prozessoptimierung zur Minimierung der Kosten bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Produktqualität und eventuell variierender Mengen- oder Konzentrationsverhältnisse der Inputs (vgl. auch unten digitaler Zwilling),
- der Anpassung der Fahrweise einer Produktion an stark schwankende Strompreise im Tages- und Wochenverlauf (Flexibilisierung),
- der zeitgerechten Planung für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten sowie
- der Sicherheitsüberwachung, um Stillstandzeiten sowie An- und Abfahrverluste zu vermeiden oder zu minimieren.

Eine Umfrage bei österreichischen Unternehmen zu den Erwartungen an die Wirkungen von KI, wenn sie in den Betrieben eingesetzt würde, brachte die meisten Nennungen von 95 % für die Energie- und Ressourceneffizienz, gefolgt von verbesserter Wartungsplanung (85 %) und verminderten Produktionskosten (75 %) (Birkelbach et al. 2024).

Die Anwendung von KI ist in verschiedenen Branchen der Industrie derzeit sehr dynamisch. Ein Schwerpunkt ist die adaptive, lernfähige und kollaborative Robotik, die insbesondere in der Fahrzeugindustrie eingesetzt wird, oder die automatische Steuerung von Produktionsprozessen, die insbesondere in der Grundstoffindustrie zur Anwendung kommt. Das Forschungs- und Entwicklungsumfeld in den industriellen KI-Anwendungen nutzt intensiv Vernetzungs- und Kollaborationsprogramme wie das IEA IETS TCP (Birkelbach et al. 2024).

Einen Ausblick auf die KI-Anwendungen und Entwicklungsanstrengungen in den kommenden Jahren geben internationale Patentanmeldungen und Veröffentlichungen (Schmoch und Jochem 2025):

- Die internationalen Patentanmeldungen für KI und Energieeffizienz in 10 ausgewählten Branchen und Anwendungsfeldern nahmen um den Faktor 20 von 2 010 auf 966 Anmeldungen in 2019 zu. Seitdem verharren sie auf diesem Niveau.
- Im Jahr 2021 ist der Fahrzeugbau Spitzenreiter mit 62 % der 903 Anmeldungen, gefolgt von der Stromverteilung (11,6 %), E-Batterien (7,8 %) und E-Fahrzeugen (6,9 %).
- Auf technisch tieferer Ebene für die Jahre 2021-2022 ergibt sich bei insgesamt 727 Patentanmeldungen 35 % für Roboter (nicht bereinigt von Medizin-Robotern), 16,6 % für Klimatisierung, 10,3 % für das Formen von Kunststoffen und 9,1 % für additive Fertigung.

Analysiert man die Anzahl der Patente und internationaler Veröffentlichungen nach Ländern der Anmelder bzw. Erstautoren, dann dominieren die USA, gefolgt von Japan, Deutschland und Südkorea bei den Patenten. Dagegen dominieren Erstautoren aus China bei den internationalen Veröffentlichungen. Deutsche Anmelder und Erstautoren liegen eher bei Platz 3 bis 5.

Digitale Zwillinge zur Beurteilung flexibler Fahrweisen in energieintensiven Unternehmen

Eine Technik, welche die Lücke der Digitalisierung in der industriellen Produktion schließen und zugleich zu besserer Energienutzung beitragen kann, sind digitale Zwillinge als eine spezielle Anwendung von KI. Sie stellen eine digitale Abbildung technischer Systeme und Prozesse dar, sie simulieren den Produktionsprozess und steuern ihn simultan; somit dienen sie u.a. als Grundlage für ein verbessertes Energiemanagement.

Digitale Zwillinge werden bereits in verschiedenen Industriebranchen erfolgreich eingesetzt. Beispielsweise nutzen Unternehmen der Automobilindustrie digitale Modelle für

ihre Produktionsanlagen, um den Energieverbrauch während verschiedener Phasen des Fertigungsprozesses zu überwachen und anzupassen. Digitale Zwillinge können mit der Vorabinformation über Wetter und Strompreise ein flexibles und kostenoptimiertes Lastmanagement realisieren.

Aktuelle FuE-Projekte konzentrieren sich darauf, digitale Zwillinglösungen weiterzuentwickeln und deren Integration in bestehende Produktionssysteme voranzutreiben. Sobald diese Systeme etabliert sind, ergeben sich die nachgelagerten Fragestellungen der Systemintegration und breitflächigen Vernetzung betrieblicher Produktionsprozesse. Zukünftige FuE-Projekte müssen somit vor allem die Vereinheitlichung und Kompatibilität mehrerer Systeme sowie eine intelligente Integration und Optimierung (meist mittels KI) einschließlich der jeweils aktuellen Situation auf der Energieangebotsseite adressieren.

Betriebliche Gleichstromnetze - verstärkte Elektrifizierung bei erhöhter Stromnutzungseffizienz

Im Kontext der Transformation gewinnen Gleichstromnetze (DC-Netze) zunehmend an Bedeutung für Forschung und industrielle Anwendungen. Mit Blick auf die Energieeffizienz sind die Verteilverluste geringer; zusätzlich ermöglichen sie den Einsatz neuer effizienter E-Motoren und energieeffiziente direktelektrische Prozesswärmeerzeugung.

DC-Netze werden zentral über AC/DC-Wandler mit dem örtlichen Verteilnetz verbunden; sie können auch direkt durch betriebsinterne PV-Anlagen, Wind- und Wasserkraft sowie Batteriespeicher versorgt werden. Betriebliche Gleichstromnetze erhalten durch den wachsenden Anteil grüner Stromerzeugung am Produktionsstandort von der Energieangebotsseite einen zusätzlichen Impuls. Auch Hochspannungs-Gleichstromübertragungsleitungen (HVDC) arbeiten mit Gleichstrom. Pilotprojekte wie „DC-Industrie“ zeigten das Stromeinsparpotenzial (jährlich etwa 2 bis 4 TWh) und den Bedarf für diese Technik auf.

Besonders im Bereich elektrifizierter Wärmeanwendungen zeigen sich signifikante Vorteile: die widerstandsbasierte Beheizung benötigt bereits Gleichstrom. Der Umstieg auf ein DC-Netz eliminiert Wandlungsverluste und führt zu einer höheren Effizienz sowie zu einer besseren Automatisierbarkeit. Zudem kann die lokale Entkopplung von externen Störgrößen der Stromversorgung (wie Frequenzschwankungen im AC-Netz) die Prozesssicherheit vor allem für kontinuierliche Prozesse erheblich erhöhen.

Zukünftige FuE- sowie Demo-Projekte zu betrieblichen Gleichstromnetzen in bestehenden Betriebsstandorten könnten die Elektrifizierung industrieller Prozesse unterstützen bzw. deren Anwendung und Marktdiffusion beschleunigen. Hierbei wird auch die KI eine wichtige Rolle spielen, um die Energieeffizienzpotenziale der DC-Technik voll zu realisieren. Allein im Bereich KI und Stromverteilung stieg die Anzahl der internationalen Patentanmeldungen von etwa 10 pro Jahr in 2010 um den Faktor 10 bis zum Jahr 2022.

Reinraumtechnik

Die Funktionsweise von Reinräumen basiert auf Maßnahmen zur Schaffung kontrollierter Produktionsumgebungen, um Produkte, Personal oder Ausrüstung vor Verunreinigungen zu schützen. Hochwirksame HEPA- (High-Efficiency Particulate Air) und ULPA-Filter (Ultra-Low Penetration Air) werden zur Luftfilterung eingesetzt. Insbesondere in höheren Klassen von Reinräumen wird zusätzlich ein laminarer Luftstrom verwendet, um Störungen im Luftfluss zu minimieren. Zudem werden Umgebungsparameter wie Temperatur, Feuchtigkeit und Druck durch ein präzise gesteuertes HLK-System (Heizung, Lüftung und Klimatisierung) kontrolliert. Die Reinraumtechnik findet Verwendung in der Mikroelektronik, insbesondere bei der Halbleiterherstellung, in der Biotechnologie und der pharmazeutischen Produktion sowie hochpräziser Fertigung (z.B. Getriebeherstellung). Auch Bereiche wie die Lebensmittel- und Getränkeindustrie sowie Operationssäle im Gesundheitssektor setzen auf diese Technik, um hohe Hygienestandards sicherzustellen.

Vor allem in den Bereichen der Mikroelektronik und der Medizin ist in den kommenden Jahren eine Zunahme an Relevanz dieser Technik zu erwarten. In der Mikroelektronik steigen die Anforderungen an Reinräume zunehmend durch die zunehmende Miniaturisierung der produzierten elektronischen Komponenten. Die Gewährleistung einer partikel- und kontaminationsfreien Umgebung ist im Produktionsprozess essenziell, um Defekte und Ausfälle zu vermeiden, d.h. die Produktqualität zu gewährleisten. Mit sinkender Größe insbesondere der fotolithografischen Strukturen der Chips erhöht sich somit auch die Herausforderung an die verwendete Reinraumtechnik.

Ebenso wird die Pharmazie durch Fortschritte in der Bio- und Gentechnologie neue Anforderungen an diese Technologie stellen. Gleichzeitig wird erwartet, dass moderne HLK-Systeme energieeffizienter gestaltet werden können. Die Entwicklung von Reinraumverkleidungssystemen aus recycelten Materialien – etwa PET – sowie Innovationen in der Materialwissenschaft versprechen eine Verbesserung sowohl der Funktionalität als auch des ökologischen Fußabdrucks dieser Systeme. Aus diesen Themen ergeben sich zahlreiche Forschungsbedarfe für zukünftige Projekte in vielen Branchen.

Dieser Trend zur Reinraumtechnik zeichnet sich auch bei den internationalen Patenten zur Klimatisierung ab. China meldete in den Jahren 2020 bis 2022 immerhin 3 012 Patente an (USA: 904, Deutschland: 463). China ist auf diesem Gebiet der Klimatisierung hochspezialisiert (Relative Patent Advantage RPA = 37), allerdings belegen die USA, Japan und Südkorea mit der Anzahl der Patentanmeldungen des speziellen Gebietes von KI im Kontext der Klimatisierung die ersten drei Plätze der Rangliste.

Die vier hier aufgeführten neuen Technikbereiche bieten neue Chancen für eine effizientere Energienutzung. Die zunehmende Verbreitung einer Produktionstechnik fordert Forschung und Entwicklung zur Hebung weiterer Energieeffizienzfortschritten heraus. Die genannten Technikbereiche können ein Beleg dafür sein, dass es immer wieder neue "niedrig hängende Früchte" der Energieeinsparung geben wird.

4 Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe

4.1 Ziele und Strukturen des Forschungsnetzwerkes

Das Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe (FN IuG) ist eines der derzeit acht Forschungsnetzwerke Energie und wurde im Juni 2016 vom BMWi (heute BMWF) zur Unterstützung der Energieforschung des Bundes im Bereich Industrie und Gewerbe gegründet (Wirth 2016). Es hat das Ziel, die Energieeffizienz der deutschen Wirtschaft zu steigern und ihre Defossilisierung zu ermöglichen. Dabei spielt die Förderung von Forschung und Entwicklung eine zentrale Rolle, insbesondere im Hinblick auf innovative, effiziente und flexible Prozesse und Technologien. Der Fokus liegt zunehmend auf der Optimierung gesamter Prozessketten sowie dem energetischen Zusammenspiel vom Rohstoff bis zum fertigen Produkt. Damit wird eine Grundlage für nachhaltige und energieeffiziente Produktionsprozesse geschaffen.

Für die Mitglieder bietet das Netzwerk eine Plattform für den Austausch zwischen Expertinnen und Experten, die sich mit der Steigerung der Energieeffizienz in den Sektoren Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen beschäftigen. Das Netzwerk unterstützt das BMWF, auch durch das vorliegende Papier, mit der Entwicklung von Forschungsroadmaps und strategischen Empfehlungen, die darauf abzielen, innovative Konzepte für die Energiewende in Deutschland voranzutreiben. Durch die Bündelung von Fachwissen aus verschiedenen Disziplinen trägt das Netzwerk dazu bei, neue Trends zu identifizieren und Verbundvorhaben zu entwickeln, die direkt auf die Bedürfnisse der Industrie und des Gewerbes zugeschnitten sind.

Das FN IuG umfasst eine Vielzahl von Themen und Forschungsansätzen und bildet die Breite der Energieforschung in Industrie und Gewerbe ab. Seit nunmehr zehn Jahren hat sich das Netzwerk kontinuierlich weiterentwickelt und an die sich wandelnden Anforderungen der Energieforschung angepasst. Diese Entwicklung wurde maßgeblich vorangetrieben durch das wachsende Interesse der Fachcommunity sowie dem steigenden Bedarf an praxisnahen Lösungen für eine nachhaltige Energiewandlung und -nutzung. Viele der heute etablierten Strukturen und thematischen Schwerpunkte sind aus Eigeninitiative und fachlicher Vernetzung heraus entstanden und bilden heute eine tragfähige Grundlage für zukünftige Forschungsaktivitäten.

Sieben **Forschungsfelder** (FF) bündeln dabei Schlüsselthemen mit hohem Forschungsaufkommen und strategischer Bedeutung. Sie bieten einen langfristigen Förderrahmen und gewährleisten eine koordinierte Förderung über mehrere Förderphasen. Die Forschungsfelder sind aktuell (BMWF/PtJ 2024):

- Thermoprozesstechnik (u.a. Industrieöfen mit Prozesstemperaturen meist über 800 °C)
- Wärme und Abwärme (u.a. Wärmespeicher, Wärmeübertrager, Abwärmenutzung)

- Wärmepumpen und Kältetechnik (u.a. Wärme- und Kälteerzeugung mit verschiedenen technischen Konzepten)
- Chemische Verfahrenstechnik (u.a. Verfahren zur Defossilisierung Membrantechniken, neue Katalysatoren, Mikrosystemtechnik)
- Fertigungstechnik (u.a. 3D-Fertigung, Gleichstrom-Anwendungen, Robotik)
- Hochtemperatursupraleitung (u.a. verlustlose Stromleitung, neue Magnettechnik-Anwendungen)
- Tribologie (u.a. neue Schmierstoffe, verlustarme Oberflächen)

Zusätzlich zu den Forschungsfeldern gibt es **Cluster**, die einen organisierten Austausch unter Expertinnen und Experten ermöglichen. Diese Cluster konzentrieren sich auf Themen mit erhöhtem Forschungsaufkommen. Sie stellen eine Struktur innerhalb des Forschungsnetzwerks dar, auch wenn sie aktuell nach außen meist nicht durch Aktivitäten sichtbar sind. Aktuell gibt es folgende Cluster (BMW/PtJ 2024):

- Aerogele
- Aufbereitung/Recycling von Reststoffen
- Glas
- Wasser
- Wäschereitechnologie
- WBG-Halbleiter (Wide-Bandgap)

Insbesondere das Cluster Aerogele stellt eine aktive Struktur, mit besetzter Sprecherinnenfunktion und regelmäßigen Arbeitstreffen, dar. Es beschäftigt sich mit der Entwicklung und Anwendung von hochporösen, kleinstporigen Festkörpern, die für ihre extrem niedrige Wärmeleitfähigkeit und ihr geringes Gewicht bekannt sind. Dieses Cluster hat sich aufgrund des großen Interesses der Community und der langjährigen Förderung zu einem dynamischen Austauschforum entwickelt.

Ein weiteres Element der thematischen Clusterung im Forschungsnetzwerk sind sogenannte **Querschnittsthemen**. Sie treten meist als Teilaspekte in Projekten auf und reichen in ihrer ganzen Breite über die Energieforschung hinaus. Aktuell relevante Querschnittsthemen sind unter anderem Künstliche Intelligenz für Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe sowie Digitalisierung und Sensorik. (BMW/PtJ 2024)

Der Zugang zur Energieforschungsförderung sowie die Evolution von Themen werden über die Förderung von **Einzelprojekten** bewusst offen gehalten. Die beschriebenen Strukturen der Forschungsfelder, Cluster und Querschnittsthemen sind aus solchen Einzelvorhaben hervorgegangen.

Ein zentrales Anliegen des Netzwerks ist die kontinuierliche Unterstützung und Wahrnehmung durch das BWME, um die strategische Bedeutung der Forschungsfelder und Cluster

nachhaltig zu unterstreichen. Durch die breite Beteiligung von Expertinnen und Experten sowie den regelmäßigen Austausch kann ein bidirektionaler Wissenstransfer entstehen, der es dem BWME ermöglicht, praxisnahe Impulse für die Energiepolitik aufzunehmen und gezielt zu fördern. (BMWE/PtJ 2024)

Mit dem **Industriewende-Dialog** gibt es seit 2024 ein Format, das den Austausch und Wissenstransfer zu den Themen der Energieforschung für Industrie und Gewerbe unterstützt. Durch diese Stärkung des Austauschs können auch neue Impulse für zukünftige Forschungsaktivitäten generiert werden.

4.2 Das Forschungsnetzwerk im Kontext des 8. Energieforschungsprogramms

Das 8. EFP verfolgt einen missionsorientierten Ansatz, um technologische und systemische Herausforderungen der Energiewende gezielt zu adressieren. Die folgenden Abschnitte geben einen kompakten Überblick zu relevanten Forschungsthemen für Industrie und Gewerbe und ordnen diese den Missionen zu. Die Beiträge aus Industrie und Gewerbe weisen Bezüge zu rund zwei Drittel der Programm- und Sprinterziele auf. Die dargestellten Inhalte basieren auf dem Programmtext (BMWK 2023) und der Förderbekanntmachung (BMWK 2024) des 8. EFP.

Die **Mission Energiesystem 2045** zielt auf ein flexibles, resilientes und nachhaltiges Energiesystem. Der Bereich Industrie und Gewerbe spielt hierfür eine Schlüsselrolle. Forschungsthemen beinhalten die Verbesserung der Gesamteffizienz durch Elektrifizierung der Wärmeversorgung, Nutzung industrieller Flexibilitätspotenziale und Energiespeicher, die Sicherstellung von Resilienz und Versorgungssicherheit durch Verringerung technischer und rohstoffbezogener Abhängigkeiten, Diversifizierung und zirkuläres Wirtschaften, die Erhöhung der Nachhaltigkeit mittels innovativer Produkte, Herstellungsverfahren und effizientem Anlagen- und Produktdesign sowie die wirtschaftlich ausgewogene Gestaltung der Transformation durch automatisierte Produktion, flexible Energieverbräuche und Effizienzmaßnahmen zur Vermeidung von Spitzenlastsituationen. Bis 2030 soll laut Sprinterziel eine sektorübergreifende, integrierte Energieinfrastrukturplanung (Strom, Wärme, Wasserstoff, Power-to-X, Lastmanagement) mit validierten Methoden bundesweit umsetzbar sein.

Die **Mission Wärmewende 2045** fokussiert die Transformation der Wärme- und Kälteversorgung in allen Nutzungsbereichen. Zugehörige Forschungsschwerpunkte umfassen effiziente Produktionsverfahren für Wärmepumpen und Dämmstoffe, die Defossilisierung der industriellen Wärme- und Kälteerzeugung durch optimierte Prozessführung und Agententechnik, den Aufbau robuster Verteilinfrastrukturen mit Großwärmepumpen, industrieller Abwärmenutzung und Wärmespeichern sowie die Ausschöpfung von Flexibilitätspotenzialen durch steuerbare Wärme- und Kälteanlagen, thermische Speicherung und gezielte Lastverschiebung. Ein Sprinterziel sieht vor, dass bis 2030 Hochtemperatur-

Wärmepumpen über 300 °C und drei wirtschaftlich nutzbare, technisch konkurrenzfähige Speicherlösungen entwickelt und zur Marktreife geführt werden.

Die **Mission Stromwende 2045** zielt darauf ab, eine sichere, klimaneutrale und zugleich bezahlbare Stromversorgung aus erneuerbaren Energien zu realisieren. Für Industrie und Gewerbe stehen Forschungsthemen wie flexible Verbrauchersteuerung, Leistungselektronik, Hochtemperatursupraleitungs-Technologien (HTS), Energieeffizienzsteigerung, Hochtemperatur-Wärmespeicher, innovative Fertigungsverfahren sowie systemdienliche Nutzung flexibler Speicher und Anlagen im Fokus. Bis 2030 sollen gemäß der Sprinterziele 15-MW-Windgeneratoren ohne kritische Rohstoffe verfügbar sein, eine vollständige PV-Wertschöpfungskette in der EU binnen fünf Jahren etabliert und der stabile Betrieb defossilisierter Teilnetze großformatig demonstriert werden.

Die **Mission Wasserstoff 2030** fördert den Aufbau einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft, mit Fokus auf stoffliche und thermische Nutzung in energieintensiven Prozessen. Forschungsbeiträge im industriellen und gewerblichen Sektor liegen in der Effizienzsteigerung bei der flexiblen Rückverstromung von grünem Wasserstoff, beispielsweise durch Wasserstoffturbinen, Gasmotoren und die Neuentwicklung entsprechender Anlagen, sowie in der Umstellung industrieller Prozesse auf effiziente Wasserstoffanwendung, etwa durch die Entwicklung alternativer Hochtemperatur-Prozesse, Anlagen und optimierter Komponenten. Ein Sprinterziel fordert, dass bis 2030 mindestens eine vollständige H₂-Infrastrukturkette mit industrieller Nutzung großmaßstäblich demonstriert werden soll.

Die **Mission Transfer** fördert die Markteinführung von Schlüsseltechniken durch praxisnahe Projekte und enge Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft. Ziele im Bereich Industrie und Gewerbe sind der Ausbau von Fachpersonal durch Nachwuchsförderung und eine enge Verzahnung von Wissenschaft und Praxis. Außerdem die Erschließung technischen Innovationspotenzials zur Sicherung und Erweiterung von Wertschöpfungsketten und Technologiesouveränität, die Erhöhung von Akzeptanz und Nachnutzungsmöglichkeiten durch die Verfügbarkeit von Forschungsergebnissen im Sinne der Offenen Wissenschaft für praktische Anwendungen und weitere Forschungsprojekte. Wesentliches Sprinterziel ist die Fortführung des Formats „Reallabore der Energiewende“, wobei die Auswahl neuer Reallabore entlang der genannten Missionen erfolgt.

Einordnung des FN IuG in die Struktur des 8. EFP

Mit dem 8. EFP wurde die Energieforschung in Deutschland inhaltlich ausgebaut und neu strukturiert. Die Steigerung der Energieeffizienz im Bereich Industrie und Gewerbe wies im 7. EFP eine besondere Präsenz auf (BMWi 2018, 2021). So wurde darin die Steigerung der Energieeffizienz der Industrie als zentrales Schwerpunktthema in der zugehörigen Förderbekanntmachung hervorgehoben. Im Themenbereich „Energienutzung und Energieeffizienz“ des 8. EFP bleibt die Effizienzsteigerung im Sektor Industrie und Gewerbe zwar explizit als Teilziel erhalten, wirkt jedoch inhaltlich weniger stark akzentuiert. Die Erhöhung der Energieflexibilität im industriellen Verbrauchssektor wird im 8. EFP – wie

bereits im 7. EFP – als Teilziel benannt und ist in verschiedenen Missionen und Programmzielen verortet, ohne als zentrales Schwerpunktthema explizit hervorgehoben zu sein.

Tabelle 4-1: Implizite Abbildung der Forschungsfelder innerhalb des 8. EFP (Eigene Darstellung)

Mission	Programmeziele	Chemische Verfahrens- technik	Wärme- pumpen & Kältetechnik	Hoch- temperatur- Supraleitungen	Tribologie	Thermo- prozesse	Fertigungs- technik	Wärme und Abwärme
Energiesystem 2045	P1: Zielbild und Transformationspfade für das Energiesystem 2045 weiterentwickeln							
	P2: Gesamteffizienz des Energiesystems verbessern	×	×			×	×	×
	P3: Resilienz und Versorgungssicherheit im Energiesystem sicherstellen	×	×	×		×	×	×
	P4: Nachhaltigkeit im Energiesystem erhöhen	×			×	×	×	
	P5: Die Transformation wirtschaftlich und balanciert gestalten	×	×			×	×	×
Wärmewende 2045	P1: Wärme- und Kältebedarf in Gebäuden klimaneutral und nachhaltig decken		×				×	×
	P2: Wärme- und Kälteversorgung in Industrie und Gewerbe defossilisieren und effizienter machen	×	×			×	×	×
	P3: Robuste Infrastruktur zum effizienten Verteilen und Speichern von Wärme und Kälte gestalten		×					×
	P4: Flexibilitätspotenzial des Wärme- und Kältesektors nutzen	×	×			×		×
Stromwende 2045	P1: Strom aus erneuerbaren Energien effizient und nachhaltig erzeugen							
	P2: Stabiles Stromnetz für eine zuverlässige Stromversorgung garantieren			×				
	P3: Strom effizient nutzen und speichern	×				×	×	×
	P4: Dezentrale Stromerzeuger und -verbraucher effizient vernetzen	×	×			×	×	×
Wasserstoff 2030	P1: Grünen Wasserstoff und seine Derivate effizient erzeugen							
	P2: Resiliente Wasserstoffinfrastruktur entwickeln und erproben							
	P3: Effizienz bei der flexiblen Rückverstromung von grünem Wasserstoff erhöhen							
	P4: Industrieprozesse auf effiziente Wasserstoff-technologien umstellen	×				×		×
Transfer	P1: Verfügbarkeit von qualifiziertem Fachpersonal für die Energiewende ausbauen	×	×	×	×	×	×	×
	P2: Innovations- und Portfoliomanagement in der Energieforschung festigen							
	P3: Agile Prozesse und Formate nutzen							
	P4: Technologisches Innovationspotenzial erschließen sowie Wertschöpfungsketten erhalten und ausbauen	×	×	×	×	×	×	×
	P5: Akzeptanz und Nachnutzungsmöglichkeiten in der Energieforschung durch Prinzipien der Offenen Wissenschaft steigern	×	×	×	×	×	×	×

Im 7. EFP wies die Strukturierung der Forschungsthemen für den Bereich Industrie und Gewerbe eine hohe Ähnlichkeit mit der Forschungsfeld-Struktur des FN IuG auf. Die sieben FF finden im 8. EFP sowie der zugehörigen Förderbekanntmachung nahezu keine direkte Entsprechung mehr. Dies liegt nicht zuletzt am geringeren technischen Detaillierungsgrad der Förderschwerpunkte im 8. EFP ggü. dem 7. EFP. Tabelle 4-1 zeigt, in welchen Missionen des 8. EFP die Themen der FF zumindest implizit enthalten sind. Auffällig ist dabei eine geringe Sichtbarkeit des Themas Tribologie. Auch die Hochtemperatursupraleitung – obwohl sie ein beträchtliches Potenzial zur verlustarmen Stromübertragung birgt – wird nur punktuell adressiert. Die inhaltlichen Schwerpunkte der weiteren Forschungsfelder finden innerhalb der Missionsstruktur größtenteils eine nachvollziehbare Zuordnung.

Das 8. EFP versteht sich als lernendes Programm, das im Sinne einer zielgerichteten Programmsteuerung Anpassungen an veränderte Rahmenbedingungen ermöglichen soll. Dies eröffnet grundsätzlich die Möglichkeit, auftretende Herausforderungen im laufenden Programmzyklus aktiv zu adressieren.

5 FuE-Bedarfe der Forschungsfelder und Cluster

Die folgenden Unterkapitel geben die im Zuge des Strategieprozesses entwickelten Forschungsroadmaps der sieben Forschungsfelder sowie des Clusters Aerogele wieder.

5.1 Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik

Im Rahmen des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe deckt das Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik wesentliche Aspekte für die Energieforschung, Energieeffizienz und die Transformation der Chemischen Industrie ab. Nur im Zusammenspiel von Wissenschaft und Industrie können skalierbare Technologien/Lösungsansätze entwickelt werden, die gleichzeitig einen deutlichen Beitrag für den Klimaschutz leisten und zur Wettbewerbsfähigkeit beitragen.

Beheimatet ist das Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik in der DECHEMA bzw. den gemeinsamen Gremien von DECHEMA und VDI-GVC. Mit mehreren Hundert ehrenamtlich engagierten Forschenden und Anwendern aus der Prozessindustrie bietet dieses fachlich und institutionell sehr breit aufgestellte Netzwerk die Gewähr, dass aktuelle Themen identifiziert, bearbeitet und in die Umsetzung gebracht werden.

5.1.1 Rückblick des Forschungsfelds

Das Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik wurde in den vergangenen 10 Jahren vor allem durch die enge Abstimmung und den Austausch der Projekte untereinander geprägt. Ein wesentliches Werkzeug dafür war die Initiative ENPRO – Energieeffizienz und Prozessbeschleunigung für die Chemische Industrie. Die Besonderheit und der Erfolgsfaktor dieser Initiative bestanden in der Koordinierung und Vernetzung der Einzelprojekte im Rahmen des ENPRO-Gesamtverbunds. Dadurch konnten Informationen ausgetauscht, Doppelarbeiten vermieden und Synergien genutzt werden. Die Projekte im Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik in Einzelförderung bzw. unter dem Dach der von der DECHEMA betreuten Initiative „Wanted Technologies“ zu Themen der Fluidodynamik und Trenntechnik wurden ebenfalls in diesen Austausch einbezogen. Ziel der ENPRO-Initiative war es, Prozesse in der chemischen Industrie energieeffizienter und flexibler zu gestalten sowie Abläufe deutlich zu verkürzen. Die Arbeiten konzentrierten sich dabei auf die drei Schwerpunkte „Batch to Conti“, „Modularisierung“ und „Datenintegration“.

In Förderphase 1 umfasste ENPRO vier Projekte, in denen die technische Machbarkeit (bis TRL 3) nachgewiesen wurde. In Förderphase 2 wurden in acht Projekten Module entwickelt und die automatisierungstechnischen Voraussetzungen für deren Zusammenspiel geschaffen (ca. TRL 6). Beide Phasen wurden begleitet von der ebenfalls geförderten Austauschplattform ENPRO-Connect. Die Potenziale der entwickelten Technologien wurden in einem gemeinsamen Bericht im Januar 2022 quantifiziert. Demnach könnten durch den Übergang zu kontinuierlichen Prozessen, durch Modularisierung und durch

Digitalisierung in der deutschen Spezialchemie 1,3 TWh Strom und 1,7 TWh Wärme jährlich eingespart werden. Darüber hinaus würden auch Roh- und Hilfsstoffe eingespart. Für den Anlagenbau bedeutet die Modularisierung eine Reduzierung des Planungsaufwands um geschätzt 10-30 %. Der Aufwand für die Integration von Modulen in Anlagen vor Ort sinkt dank der Standards und des Prinzips „Plug-and-Produce“ um 80 %. Weitere Vorteile betreffen u.a. Verbesserungen bei Qualität, Ausbeute, Einsparungen an Apparate- und Automatisierungskosten, umfangreiche Standardisierungen, verbesserte Methoden für eine optimale Modulauswahl sowie vereinfachte Wartungs- und Folgeprozesse.

5.1.2 Aktuelle Arbeiten des Forschungsfelds

Derzeit laufen im Forschungsfeld fünf Projekte im Rahmen des Energieforschungsprogramms, siehe Tabelle 5-1.

Tabelle 5-1: Aktuell laufende Forschungsprojekte des Forschungsfelds CVT innerhalb des EFP

Akronym	Projekttitel	Potenzielle Anwendungsfälle	Laufzeit
REUNION	VerNetzter DEMonstrator-VerbUND für optimierte Prozessketten	Einbindung von Modulen in bestehende bzw. Entwicklung neuer Prozesse in der chemischen Industrie	01/2024 - 12/2026
AutoEx	Effizienter Betrieb von Extraktionskolonnen durch Online-Zustandsdiagnostik	Effiziente und energiesparende Downstream-Prozesse in der biotechnologischen Produktion	08/2023 - 07/2027
Mimose-A	Multimodale IoT-Devices zur umfassenden und selbstlernenden Anlagenüberwachung	Selbstlernende Anlagenüberwachung in der Chemieindustrie zur Vermeidung von Unregelmäßigkeiten und Optimierung von Prozessen	11/2023 - 10/2026
WinPro	Wärmepumpen in der Prozessindustrie	Nutzung von Abwärme als Ersatz für fossile Energieträger	05/2024 - 04/2027
RAMP ²	Roboter-assistierte modulare rohrlose Produktion	Mehr Flexibilität und Energieeinsparung in der biotechnologischen Pharma-Produktion	12/2024 - 11/2026
DiKey	Digitale Schlüsseltechnologien zur Bestimmung der Stoffdaten für effiziente Stofftrennung in der chemischen Industrie	Schnelle Entwicklung nachhaltigerer Prozesse auf Basis von Stoffdaten	04/2025 - 03/2027

Weitere Projekte sind derzeit in Vorbereitung bzw. bereits beantragt, siehe Abbildung 5-1; auch die Initiative Wanted Technologies, aus der eine Reihe von Projekten stammen, wird weitergeführt.

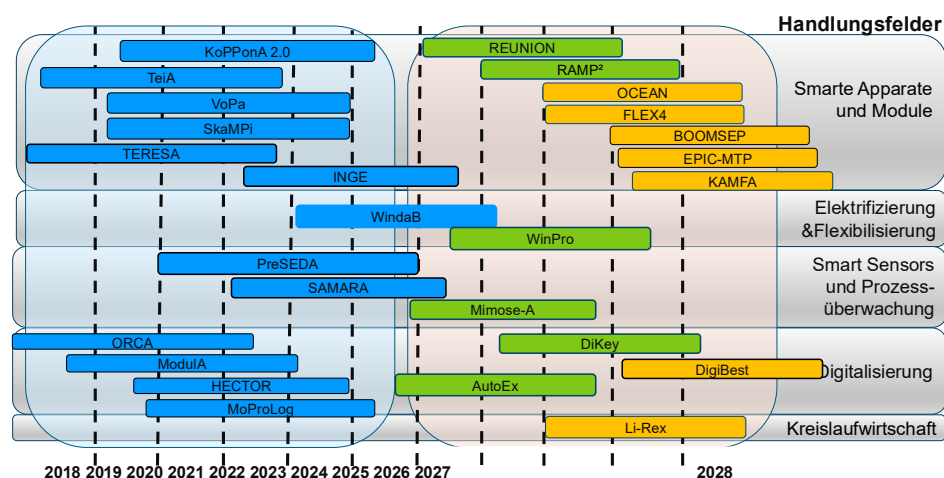


Abbildung 5-1: Übersicht über abgeschlossene, laufende und geplante Projekte im Forschungsfeld CVT

Die derzeit laufenden bzw. geplanten Projekte legen den Schwerpunkt vor allem auf Digitalisierung und Integration. Damit adressieren sie den logischen nächsten Schritt: Aufbauend auf Effizienzsteigerungen und Modularisierung/ Flexibilisierung werden die technischen Lösungen zusammengebracht, um die Transformation der chemischen Industrie über den Einzelprozess hinaus voranzutreiben.

Bis 2022 war ein Großteil der Projekte im Gesamtverbund ENPRO - Energieeffizienz und Prozessbeschleunigung für die Chemische Industrie angesiedelt. Dank des Koordinierungsvorhabens ENPRO-CONNECT war es möglich, die Projekte regelmäßig und systematisch zu vernetzen und Synergien frühzeitig zu erkennen und zu nutzen. Mit dem Ende von ENPRO im Jahr 2022 fehlt die für die Umsetzung und den Rollout so wichtige regelmäßige und systemische Vernetzung der einzelnen Forschungsprojekte z.B. über regelmäßige Netzwerk-Veranstaltungen oder formalisierte Berichtspflichten. Gerade in der Verfahrenstechnik können verschiedene Techniken sehr erfolgreich kombiniert und damit Synergien geschaffen werden; dafür sind jedoch eine frühzeitige Abstimmung und Austausch der Forschenden und Entwickelnden notwendig. Deshalb sollte in der weiteren Arbeit unbedingt wieder eine Vernetzungsmöglichkeit geschaffen werden, die allein über die ehrenamtliche Tätigkeit des Forschungsfeldes CVT nicht geleistet werden kann.

5.1.3 FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Forschungsfeldes

Die chemische Industrie ist eine der Kernbranchen der deutschen Wirtschaft. Ihr Endenergiebedarf – auch spezifisch je Nettoproduktion – ist hoch: zudem ist sie als Vorlieferantin in zahlreichen Wertschöpfungsketten ein zentraler Schlüssel zu mehr Nachhaltigkeit in sehr vielen Produkten des produzierenden Gewerbes. Aktuell befindet sie sich in einem grundlegenden Transformationsprozess im Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit und Klimaschutz/Nachhaltigkeit; gleichzeitig muss sie sich im wachsenden

globalen Wettbewerb behaupten. Dieser Prozess ist herausfordernd, bietet aber auch die Chance, den Standort Deutschland und Europa zu sichern und gleichzeitig die Technologieführerschaft in vielen Bereichen energieeffizienter und klimaneutraler Prozesse und Anlagen zu erhalten oder auszubauen.

Die zentrale Herausforderung für das Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik ist die notwendige vollständige Veränderung ihrer heute weitgehend fossilen Rohstoff- und Energieträgerbasis weg von fossilen Rohstoffen wie Öl und Gas, hin zu alternativen Kohlenstoff- und Energiequellen. Im Kontext des Forschungsfeldes Chemische Verfahrenstechnik heißt dies: Auf die Umstellung und Optimierung einzelner Prozesse muss nun der nächste Schritt folgen - die Integration der Prozesse, die Weiterentwicklung der Standorte und ihrer Infrastruktur und die kontinuierliche Transformation hin zu einem Konzept „Chemiestandort 2050“.

Notwendig sind dafür konkrete Forschungsprojekte, die die chemische Industrie fit machen für die anstehenden Herausforderungen und die Einbindung in ein nachhaltiges Energiesystem. Dazu zählen insbesondere Verbundprojekte im Bereich:

- Effizienzsteigerung in Entwicklungs- und Produktionsprozessen
- Nutzung einer nachhaltigen Rohstoffbasis
- Schließung von Stoffkreisläufen (Circular Economy)
- Neue Formen des Energieeintrags (z.B. Elektrifizierung, Wärmepumpen)
- Digitale Vernetzung der technischen Lösungen durch Technologiestandards wie DEXPI (Data Exchange in Process Industries) sowie die semantische Beschreibung der Daten, damit genAI getriebene Optimierungen für Anwender nutzbar werden.
- Die Schaffung von realen Testfeldern zur Erforschung von neuen Kooperationsmodellen zwischen Industrie, Start-ups und Wissenschaft.

Die zentralen Forschungs- und Entwicklungsthemen, um die Ziele der Forschungsroadmap 2035 zu erreichen, werden im Folgenden dargelegt.

Verarbeitung nachwachsender und recycelter Rohstoffe

Die rohstoffliche Kohlenstoffbasis der chemischen Industrie in Deutschland von rund 13 Mio. Tonnen Kohlenstoff pro Jahr basiert derzeit, mit Ausnahme eines 13%-igen Anteils an bio-basierten Rohstoffen, weitgehend auf fossilen Rohstoffen, im Wesentlichen Rohbenzin (Naphtha), Erdgas und geringe Mengen an Kohle und anderen Kohlenwasserstoffen (Geres et al. 2019). Als alternative Kohlenstoffquellen können in Zukunft CO₂ aus industriellen Punktquellen (bei der Klinker- und Kalkproduktion), aus Biogas- und Kläranlagen oder der thermischen Abfallbehandlung dienen (eventuell auch aus Direct Air Capture (DAC)). Um den Bedarf von 13 Mio. Tonnen Kohlenstoff durch CO₂ zu decken, sind stöchiometrisch knapp 48 Mio. Tonnen abgeschiedenes CO₂ erforderlich. Dies erfordert die Nutzung mehrerer CO₂ Quellen und der für die jeweilige CO₂ Quelle notwendigen

Abscheide- und Aufbereitungstechnik. Abschätzungen zufolge werden die maßgeblichen CO₂-Lieferanten große Biogasanlagen (10 Mio. t/ CO₂ a) (Steindamm 2023), Müllverbrennungsanlagen (14 Mio. t/ CO₂ a), sowie die Klinker- und Kalkproduktion (14 Mio. t/ CO₂ a) sein (Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) 2025). Weitere mögliche Kohlenstoffquellen sind Biomasse sowie das chemische Recycling vor allem von Kunststoffen. Beide eröffnen unterschiedliche mögliche Produktionsrouten, von der Fermentation von Zucker oder Stärke über die Depolymerisation von Kunststoffen in ihre Monomere bis zur Gewinnung von Pyrolyse-Ölen als Grundstoff für Cracker oder die Herstellung von Syngas und die anschließende katalytische Umsetzung zu verschiedenen Grundchemikalien.

Recycelte bzw. nachwachsende Rohstoffe müssen stärker genutzt werden, um den Einsatz fossiler Rohstoffe möglichst weit abzusenken. Sie unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung jedoch erheblich von Öl oder Gas. Deshalb müssen dafür neue Prozessrouten entwickelt werden, die konkurrenzfähig gegenüber den seit Jahrzehnten optimierten Synthesewegen sind. Besonders bei der Aufbereitung der Rohstoffe durch Recycling oder der Nutzung von Abfallströmen für weitere Reaktionen wird derzeit viel Energie z.B. für Pyrolyse und/ oder viel Lösungsmittel für die Aufreinigung benötigt. Hier gilt es, nachhaltige und konkurrenzfähige Alternativen zu entwickeln.

Mögliche Forschungsthemen sind die Entwicklung neuer katalytischer Verfahren für die Pyrolyse zur Energieeinsparung und Optimierung der Produktzusammensetzung, energieeffizienter Solvolysenverfahren mit integriertem Lösemittel- und Katalysatorrecycling, energiesparender Verfahren für Biomasseaufschluss und -vorbehandlung und neuer Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Nutzung. Diese FuE-Anstrengungen dienen insbesondere dem Ziel "Übergang von der linearen zur zirkulären Wirtschaft" der Mission Energiesystem, denn es werden Prozesse auf der primären Rohstoff-/ Grundstoffwandlung vermieden.

Umstellung des Energieeintrags in Prozesse

Eine weitere wesentliche Rolle in der Transformation der chemischen Industrie spielt Wasserstoff. Er kann sowohl als Reduktionsmittel in verschiedenen Prozessen zum Einsatz kommen als auch als Energieträger dienen. Der Energieeintrag in chemische Prozesse kann darüber hinaus direkt durch Strom (Elektrifizierung), durch elektrisch oder über Wärmepumpen erzeugte Wärme sowie über andere Methoden wie Ultraschall, Mikrowellen oder Kavitation erfolgen. Dies ermöglicht die direkte Nutzung regenerativ erzeugten Stroms. Flexible chemische Prozesse erlauben es, die Nachfrage innerhalb gewisser Grenzen dem Energieangebot anzupassen.

Forschungsthemen sind z.B. die Wärmeintegration in Batch-Prozessen und die Beeinflussung von Temperaturprofilen in verfahrenstechnischen Apparaten durch elektrische Beheizung und Felder. Diese Aktivitäten werden allen Missionen des Energieforschungsprogramms zuzuordnen sein.

Schnelle Entwicklung neuer Syntheserouten und Prozesse

Um diese Anforderungen abzubilden, müssen schnell neue Syntheserouten und neue Prozesse entwickelt werden, um die Umstellung des Energieeintrags und die Änderungen der Rohstoffbasis innerhalb bestehender Anlagen oder bei Neuinvestitionen realisieren zu können. Eine beispielhafte neue Prozessroute, um die veränderte Rohstoffbasis in der Grundstoffchemie zu nutzen, kann die Synthese von Methanol durch Hydrierung von CO₂ sein. Prozessentwicklungen in der chemischen Verfahrenstechnik nahmen in der Vergangenheit erhebliche Zeit in Anspruch. Neue Ansätze der Modellierung und Simulation, aber auch modulare flexible Prozessansätze ermöglichen es, die Zeit der Prozessentwicklung erheblich zu verkürzen und so schneller auf den Umbau der Branche reagieren zu können.

Forschungsthemen sind z.B. die Modellierung von Prozessen anhand von Stoffdaten und der digitale Scale-up von Prozessen. Diese Entwicklungen werden insbesondere der „Mission Wärmewende“ zuzuordnen sein.

Flexibilisierung von Prozessen

„Klassische“ Prozesse der chemischen Verfahrenstechnik sind in der Regel auf einen bestimmten Rohstoff und einen möglichst kontinuierlichen Betrieb optimiert. Qualitativ variierende Rohstoffe wie Biomasse oder Recyclate und eine variierende Stromversorgung aus erneuerbaren Quellen erfordern Prozesse, die sich an Qualitäts- und Preis-Veränderungen flexibel anpassen können. Solche Prozesse können außerdem zur Stabilisierung des Stromsystems beitragen, indem sie Strom dann abnehmen, wenn er in hohem Maß und zu geringen Preisen verfügbar ist, und zu Zeiten niedriger Verfügbarkeit und hoher Strompreise heruntergefahren werden.

Mögliche Forschungsthemen sind die systemische Betrachtung chemischer Prozesse im Hinblick auf ihre Flexibilisierungsmöglichkeiten und die Entwicklung neuer stofflicher Zwischenspeicher-Technologien. Diese Entwicklungen werden einen hohen Beitrag zur „Mission Energiesystem“ bringen, denn schon heute beträgt der Strombedarf der chemischen Industrie knapp 158 PJ oder 23,6 % des gesamten industriellen Strombedarfs (Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI) 2025).

Optimierung von bzw. Alternativen zu Prozessen unter extremen Bedingungen

Viele Prozesse der chemischen Verfahrenstechnik erfordern hohe Temperaturen und/oder hohe Drücke und damit viel Energie in Form von Hochtemperatur-Wärme (HT) oder Kraft. Entwicklungen in der Katalysatortechnik, aber auch die Kombination chemischer und biotechnologischer Prozessschritte ermöglichen die Durchführung der Reaktionen bei deutlich milderen und somit weit weniger energieintensiven Bedingungen. Mögliche Themen sind die nachhaltige Energiebereitstellung für Hochtemperaturprozesse und die Entwicklung neuer energieeffizienter Prozessfenster durch die Kombination von Chemo- und Biokatalyse und integrierte Reaktions- und Trennprozesse.

Der Schwerpunkt der Wirkungen dieser prozesstechnischen Entwicklungen ist den beiden Missionen "Wärme- und Stromwende" zuzuordnen.

Innovative energiesparende Prozesse und Apparate mit Schwerpunkt Downstream

Innovative energiesparende Prozessschritte und Apparate können zur Nachhaltigkeit und Kostensenkung beitragen. Dazu zählen auch hybride Prozesse und Apparate sowie Ansätze zur Integration von Energieversorgung und Prozess. Besonders das Downstream-Processing, also die Isolierung und Reinigung der Produkte aus den Reaktionen, treibt bisher häufig den Energiebedarf nach oben, weil Methoden wie Destillation eine große Rolle spielen. Neben neuen Methoden der Wärmeerzeugung wie Hochtemperatur-Wärmepumpen (Sprinterziel 2030) ist die (Weiter-)Entwicklung alternativer Trennprozesse z.B. über Membranen, Extraktionsprozesse und Adsorption, die oft nahe an Raumtemperaturen arbeiten, ein wichtiger Hebel, die Energieeffizienz insgesamt zu erhöhen und gleichzeitig Energiekosten einzusparen. Darüber hinaus kann durch effiziente Niedertemperaturverfahren ein prozessinternes Recycling von Hilfsstoffen im Downstream Processing der Ressourcenbedarf senken und einen Beitrag zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft leisten.

Auch können durch effizienteres Downstream-Processing und die Reduzierung von Reaktionskaskaden z.B. biotechnologische Prozesse wettbewerbsfähig werden. Mögliche Forschungsthemen sind u.a. verbesserte thermische Prozessführung in Trennapparaten, neue hybride Membranprozesse und die Entwicklung von hochselektiven Rezeptoren für (Reaktiv-)Extraktionsverfahren im Zusammenwirken mit maßgeschneiderten Apparatedesigns. Diese FuE-Arbeiten tragen ebenfalls zu den meisten Zielen der Missionen "Wärme- und Stromwende" und "Energiesystem – Ressourceneffizienz und zirkuläre Wirtschaft" bei.

Neue Apparate und Anlagen und digitale Integration

Den Schlüssel für flexible und innovative Prozesse mit maximaler Energie- und Ressourceneffizienz bilden „smarte“ Apparate und Anlagen, die alle chemischen Grundoperationen einschließlich der Rohstoff- und Produktaufbereitung abdecken, die in digitalisierte Prozessumgebungen eingebunden sind und deren Daten für die Prozessmodellierung und -Optimierung genutzt werden können. Diese Entwicklungsarbeiten betreffen den Energiebedarf der Produktionsverfahren von Feinchemikalien und Pharmaka.

Mögliche Forschungsthemen sind u.a. die Modellierung von Apparaten und Entwicklung von Modellen für deren optimierte Verschaltung sowie die Entwicklung flexibler Anlagenkomponenten. Diese Arbeiten erfüllen sowohl Ziele der Missionen von Wärme- und Stromwende als auch das Digitalisierungsziel der "Mission Energiesystem".

Datenräume und Shared Economy

Die Flexibilisierung und Digitalisierung bieten die Möglichkeit, den Standort Deutschland durch die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle zu transformieren. Diese Transformation zielt darauf ab, die bestehende Industrie durch innovative kommerzielle Prozesse in einen kooperativen und kollaborativen Gesamtstandort zu überführen.

Insbesondere Mietmodelle für eine Vielzahl neuer Produktionstechnologien, die als „ready-to-use“ Module bereitgestellt werden, können eine signifikante Rolle spielen. Darüber hinaus ermöglicht die Nutzung von Daten über Dataspaces das Training von Modellen, während die Integration von Forschungsdaten durch Initiativen wie die Nationale Forschungsdateninfrastruktur (NFDI) und Manufacturing X Dataspaces eine wertvolle Ressource für die Weiterentwicklung industrieller Anwendungen darstellt. Mögliche Forschungsthemen sind u.a. die Entwicklung von Verschlüsselungstechnologien zur übergreifenden Nutzung proprietärer Daten und neue Geschäftsmodelle für „shared assets“ im industriellen Bereich. Diese Themen zahlen u.a. auf den Schwerpunkt Systemintegration und digitale Lösungen in der Mission Energiesystem ein.

Ausblick

Eine besondere Herausforderung stellt angesichts der langen Investitionshorizonte (oft mehr als 20 Jahre) die Umstellung der industriellen Standorte im laufenden Betrieb dar; sie erfordert Konzepte für die Einbindung neuer Techniken in bestehende Produktionsstandorte bzw. die Ertüchtigung und Anpassung vorhandener Anlagen.

Abbildung 5-2 zeigt die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Forschungsthemen. Die Vorhaben können voneinander stark profitieren, da große Effekte vor allem aus dem Zusammenspiel der Themen entstehen. Die Einbindung der Forschungsthemen in das Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik bzw. im Weiteren in das Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe ermöglichen es, die verschiedenen Entwicklungslinien aufeinander abzustimmen. So profitieren alle Prozessentwicklungen und -optimierungen von Ansätzen zur beschleunigten Prozessentwicklung, und die verschiedenen Prozesse zahlen wiederum auf die Flexibilisierung der Energienutzung und den Wandel der Rohstoffbasis ein.

Die Transformation des Standorts kann nur im Zusammenspiel von Wissenschaft, angewandter Forschung und Industrie sowie durch die Einbindung anderer Sektoren gelingen. Der Aufbau eines neuen „Branchenökosystems“ ist von einem einzelnen Unternehmen nicht zu bewältigen; dafür bedarf es der gemeinsamen Forschung und Entwicklung und gemeinsamer Zielbilder z.B. für Infrastrukturen.

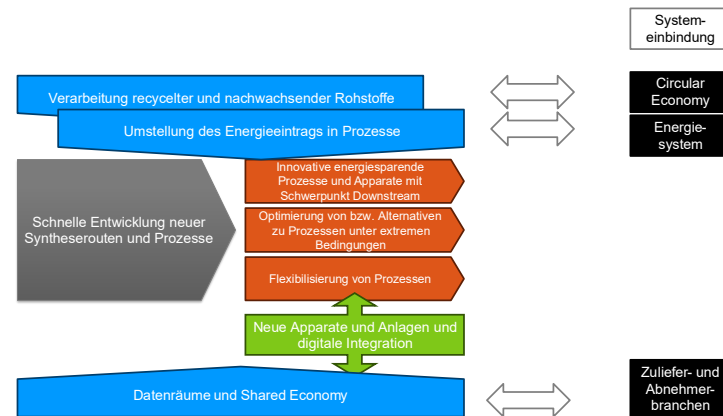


Abbildung 5-2: Zusammenspiel der Forschungsthemen des Forschungsfeldes CVT in ihrer Rolle als "Enabler" für die gesamte Prozesskette der Produktion in der Chemischen Industrie

5.2 Forschungsfeld Fertigungstechnik

Die Fertigungstechnik ist ein Teilgebiet der industriellen Produktionstechnik und befasst sich vor allem mit den materiell-technischen Aspekten von Fertigungsprozessen (Awiszus 2012). Die Verfahren der Fertigungstechnik bilden eine breite Palette technologischer Ansätze zur Herstellung von Halbzeugen und Endprodukten in der Industrie. Die Fertigungstechnik umfasst unter anderem die Sektoren Gummi- und Kunststoffwaren, Metallverarbeitung sowie den Maschinen- und Fahrzeugbau³ (Weigold et al. 2022b).

Die industriellen Strukturen in Deutschland sind geprägt durch eine Konzentration großer Industriestandorte, etwa im Automobilbau oder Maschinen- und Anlagenbau, sowie eine Vielzahl mittelständischer Unternehmen (KMU), die flächendeckend vertreten sind. Gemeinsam bilden sie das Rückgrat der deutschen Industrie (BMW/PtJ 2024). Mit 5,6 Mio. Beschäftigten im Verarbeitenden Gewerbe in Deutschland (2023) trägt die Fertigungstechnik maßgeblich zur Bruttowertschöpfung der Industrie bei (Statistisches Bundesamt 2024b).

Der Endenergiebedarf der Fertigungstechnik-intensiven Branchen betrug in 2022 rund 300 TWh/a bzw. 1080 PJ/a (Statistisches Bundesamt 2024a). Dies entsprach knapp 12 % des Endenergiebedarfs über alle Sektoren hinweg bzw. 45 % des Endenergiebedarfs der Industrie (Umweltbundesamt 2024). Die dort entstehenden Investitions- und Gebrauchsgüter – einschließlich Querschnittstechniken wie Pumpen oder Druckluftsysteme – ermöglichen erhebliche Energieeinsparungen in allen Industriebranchen, im Verkehr und im Gebäudebereich. Damit besitzt die Fertigungstechnik eine strategische Schlüsselrolle für die nachhaltige Transformation des industriellen Kapitalstocks und der fertigungstechnisch hergestellten Gebrauchsgüter (BMW/PtJ 2024).

³ Relevante Sektoren für die Fertigungstechnik nach Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008): WZ 16, 22, 25–30, 33

5.2.1 Rückblick des Forschungsfelds

Die Strategie der Energieforschung im Forschungsfeld Fertigungstechnik kann anhand drei zentraler Ansätze verdeutlicht werden (BMWE/PtJ 2024):

1. **Prozesszentrierter Ansatz:** Der prozesszentrierte Ansatz richtet seinen Fokus unmittelbar auf den Fertigungsprozess selbst. Ziel ist es, durch Maßnahmen wie Prozessverkürzung, -integration oder die energetische Optimierung einzelner Verfahrensschritte oder des Prozesses Effizienzsteigerungen zu erreichen. Auch die Optimierung der Versorgungstechnik – beispielsweise Druckluft, Hydraulik, Kühlwasser oder Kühlschmierstoffe – wird systematisch einbezogen.
2. **Prozessübergreifender Ansatz:** Beim prozessübergreifenden Ansatz wird die Systemgrenze über einzelne Maschinen oder Prozesse hinaus erweitert. Vernetzungstechnologien werden genutzt und standortübergreifendes Strom- und Wärmemanagement realisiert. Dabei kommen unter anderem Elektrifizierungsstrategien, Demand Side Management, der Einsatz von Gleichstromnetzen sowie Konzepte zur Abwärmenutzung und Wärmespeicherung zum Tragen. Der Fokus liegt hier auf der energetischen Optimierung der gesamten Prozessumgebung und deren Infrastrukturen – auch im Zusammenspiel mit dem umliegenden Energiesystem.
3. **Prozessmittelbarer Ansatz.** Der prozessmittelbare Ansatz wirkt nicht direkt im Produktionsprozess, sondern entfaltet seine Energieeinsparpotenziale an anderer Stelle, häufig erst nach der Fertigung oder außerhalb des Werkgeländes. Ein klassisches Beispiel ist die Entwicklung leichterer Bauteile für die Luftfahrt, die im Betrieb wiederum einen geringeren Treibstoffeinsatz für den Transport zur Folge haben. Ein weiteres Beispiel sind neue Fertigungstechnologien, wie der 3D-Druck zur Herstellung von effizienteren Wärmespeichern oder Wärmepumpenkomponenten. Im Rahmen des prozessmittelbaren Ansatzes wird klar, wie die Fertigungstechnik als Enabler auf andere Sektoren wirkt und mittelbar zur Senkung des Energieverbrauchs über den gesamten Produktlebenszyklus beiträgt.

Eine Betrachtung der Entwicklungen der letzten 30 Jahre zeigt, dass sich die Forschungsthemen entlang der verschiedenen Kategorien im zeitlichen Verlauf weiterentwickelt haben (Abbildung 3-1, Tabelle 5-2). Die Systemgrenzen der Energieforschung in der Fertigungstechnik haben sich sukzessive ausgeweitet – von der energieeffizienten Auslegung einzelner Fertigungsprozesse (prozesszentriert), über die energetische Optimierung gesamter Prozessketten (prozessübergreifend), bis hin zu solchen Fertigungslösungen, die mittelbar auf die Energieeffizienz von Endprodukten und Systemen wirken (prozessmittelbar).

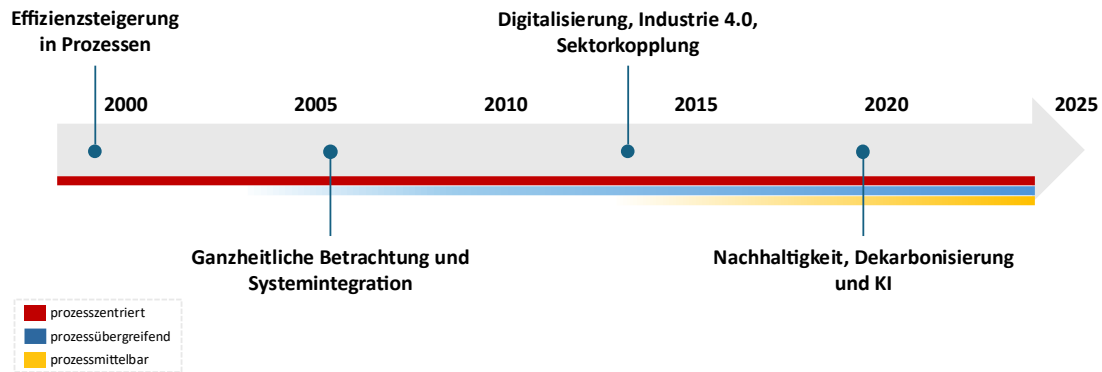


Abbildung 5-3: Zeitstrahl der Energieforschungsschwerpunkte im Forschungsfeld Fertigungstechnik (Eigene Darstellung)

Abbildung 5-3 stellt die zeitliche Entwicklung der Forschungsschwerpunkte und -themen seit den 1990er-Jahren dar. Im Folgenden wird diese Entwicklung kurz erläutert, ergänzt um beispielhafte Projekte mit Bezug zum Forschungsfeld Fertigungstechnik⁴.

Mit dem 3. und 4. EFP standen die Steigerung der Energieeffizienz bestehender Prozesse – etwa durch Optimierung von Wärmebehandlung und Antrieben, Abwärmenutzung sowie erste Projekte zu Energiemanagement und Querschnittstechnologien sowie die Reduktion energiebedingter Umwelt- und Klimabelastungen – im Mittelpunkt. Ein prozesszentriertes Projekt war *MAXIEM* (FKZ: 0327488A). Darin wurde die ganzheitliche energetische Optimierung von Werkzeugmaschinen adressiert. Ziel war es, den Energieverbrauch über den gesamten Betriebszyklus zu analysieren und gezielt zu senken, ohne den Fertigungsprozess zu beeinträchtigen. Dazu wurden Software-Tools zur Berechnung des Energiebedarfs sowie Technologieoptionen für Einsparmaßnahmen entwickelt. Abhängig von der nutzerspezifischen Maschinenbelegung konnten Energieeinsparungen von bis zu 50 % erzielt werden. (Abele 2013)

Das 5. EFP kennzeichnet den Übergang von **prozesszentrierten** zu **prozessübergreifenden Fragestellungen** und den Ausbau systemischer Ansätze wie Energiemanagementsysteme (z. B. ISO 50001), Energiefluss- und Lebenszyklusanalysen sowie Prozesssimulation und -modellierung. Zudem rückten die energetische Bewertung ganzer Produktionsketten und Anlagenparks, erste Ansätze zur Prozessintegration sowie die Einbindung von KMU und der Technologietransfer in den Fokus. Als Beispielprojekte können *eSimPro* (FKZ: 02PO2030) (Eisele und Abele 2013) und *ECOMATION* (Verl 2017) angeführt werden, in denen die Optimierung von Fertigungsprozessen wie dem Fräsen durch intelligente Prozessführung, angepasste Schnittparameter und Sensorintegration im Mittelpunkt stand. Gleichzeitig markierten sie den Übergang von der klassischen Maschinenoptimierung hin zu einer systematischeren Betrachtung der Energieeffizienz, etwa durch die Analyse ganzer Prozessketten.

⁴ Bei den angeführten Projekten im gesamten Abschnitt zum Forschungsfeld Fertigungstechnik handelt es sich um Vorhaben mit Beteiligung des PTW der Technischen Universität Darmstadt. Sie dienen als exemplarischer Überblick und sind stellvertretend zu verstehen; eine vollständige Auflistung aller Projekte mit Bezug zum Forschungsfeld erfolgt aufgrund der Vielzahl der Vorhaben nicht.

Tabelle 5-2: Thematische Entwicklung der Energieforschung mit Bezug zum heutigen Forschungsfeld Fertigungstechnik seit den 1990er-Jahren (Eigene Darstellung. Zeitrahmen, Fokus, detaillierte Inhalte angelehnt an OpenAI 2025. Zeitliche Einordnung der Energieforschungsprogramme nach (BMWi 2017))

Zeiträumen	Fokus	Detaillierte Inhalte
1990er-/frühe 2000er-Jahre (3. und 4. EFP)	Fokus auf Effizienzsteigerung bestehender Prozesse (z. B. Wärmebehandlung, Antriebe), Abwärmenutzung , erste Projekte zu Energiemanagement und Querschnittstechnologien .	Effizienzsteigerung in Prozessen - Energieeinsparung in etablierten Fertigungsverfahren (z. B. spanende Bearbeitung, Gießen, Umformen) - Thermische Prozesse: Abwärmenutzung und Ofenoptimierung - Elektrische Antriebe und mechanische Anlagentechnik (Pumpen, Lüfter, Druckluft) – erste Querschnittstechniken - Entwicklung erster Energiemanagementansätze in der Produktion
späte 2000er-Jahre (5. EFP)	Ausbau systemischer Ansätze: Energiemanagementsysteme , Prozesssimulation, Lebenszyklusanalysen . Stärkere Berücksichtigung von KMU, erste Ansätze zur Prozessintegration .	Ganzheitliche Betrachtung und Systemintegration - Einführung und Verbreitung von Energiemanagementsystemen (z. B. ISO 50001) - Systemische Ansätze: Energieflussanalysen, Life Cycle Energy Assessments - Simulation und Prozessmodellierung (z. B. CFD, FEM) zur energetischen Optimierung - Energetische Bewertung von Produktionsketten und Anlagenparks - Erste Projekte zur Energieeffizienz in KMU und Technologietransfer
Frühe 2010er-Jahre (6. EFP)	Integration von Energieeffizienz im Systemverbund und im Kontext von Industrie 4.0 : Forschungsprojekte zu Sensorik, Digitalisierung, energieadaptiver Prozessregelung, Lastmanagement und Flexibilität .	Digitalisierung, Industrie 4.0, Sektorkopplung - Energieeffizienz als integrativer Bestandteil von Industrie 4.0 - Sensorik, Datenanalyse, Smart Metering in der Fertigung - Lastmanagement und Flexibilität in der Produktion (z. B. Peak Shaving, Demand Side Management) - Forschungsprojekte zu energieadaptiver Prozessführung und regelungsstrategien - Integration erneuerbarer Energien in Produktionsstandorte - Wärmepumpen und thermische Netze in der Produktion - Additive Fertigung (AM) unter Energiegesichtspunkten
Späte 2010er-/frühe 2020er-Jahre (7. und 8. EFP)	Stärkere Ausrichtung auf die Dekarbonisierung industrieller Prozesse : u. a. durch Elektrifizierung, Sektorenkopplung, Kreislaufwirtschaft , Einsatz erneuerbarer Energien in der Produktion. Zunehmend Querschnittsthemen wie digitale Zwillinge , energieeffiziente Produkt- und Anlagenentwicklung, verstärkter Technologietransfer in KMU.	Nachhaltigkeit, Dekarbonisierung und KI - Dekarbonisierung der industriellen Produktion (z. B. Substitution fossiler Prozesswärme) - Elektrifizierung von Prozessen, z. B. durch Plasmatechnologie, Mikrowellen, Laser - Künstliche Intelligenz für Prozessoptimierung und Betriebsführung - Sektorenkopplung zwischen Strom, Wärme, Kälte und Stoffströmen (z. B. Wasserstoff) - Kreislaufwirtschaft & energieeffiziente Recyclingprozesse - Digitale Zwillinge und Prozessdatenanalyse zur Energieoptimierung - Förderung von Transferprojekten zur Anwendung in KMU - Anlagen- und Produktauslegung unter Energiegesichtspunkten (Design for Energy Efficiency)

Mit dem 6. EFP verlagerte sich der Forschungsschwerpunkt zunehmend auf **prozessübergreifende Fragestellungen**. Dabei rückte die Integration von Energieeffizienz im Systemverbund und im Kontext von Industrie 4.0 in den Fokus, etwa durch Forschungsprojekte zu Sensorik, Digitalisierung, energieadaptiver Prozessregelung, Lastmanagement und der Steigerung der betrieblichen Flexibilität. Zu diesen Themen wurde im Forschungsfeld mit dem Leuchtturmvorhaben *ETA-Fabrik* (FKZ: 03ET1145) (Abele und Beck 2019) und diversen Anschlussprojekten, wie bspw. *PHI-Factory* (FKZ: 03ET1455A) (Technische Universität Darmstadt 2020a) sowie *SynErgie* (FKZ: 03SFK3A) (Technische Universität Darmstadt 2020b), eine deutschlandweit einmalige Modellfabrik an der Technischen Universität Darmstadt aufgebaut. Dort werden die Effizienzpotenziale einzelner Teilsysteme, des

Produktionsverbundes sowie die energetische Einbindung in Fabrikhalle und Energieinfrastruktur, inklusive der Nutzung verschiedener Speichersysteme, im Fabrikneubau und im Bestand erfolgreich und mit nachhaltiger fach-öffentlicher Wirkung demonstriert (BMW/PtJ 2024).

5.2.2 Aktuelle Arbeiten des Forschungsfelds

Forschungsthemen und -projekte

Mit dem 7. und 8. EFP gewinnt die **prozessmittelbare Perspektive** der Fertigungstechnik an Bedeutung, bei weiterhin hoher Relevanz prozessübergreifender Themen. Sie zeigt sich in einer stärkeren Ausrichtung auf die Dekarbonisierung industrieller Prozesse – etwa durch Elektrifizierung, Sektorenkopplung, Kreislaufwirtschaft und den Einsatz erneuerbarer Energien – sowie in Querschnittsthemen wie digitale Zwillinge, energieeffiziente Produkt- und Anlagenentwicklung und den verstärkten Technologietransfer in KMU. Zugleich nehmen die Schnittmengen mit benachbarten Forschungsfeldern wie *Wärme und Abwärme* oder *Wärmepumpen- und Kältetechnik* zu. Ebenso verzahnen sie sich enger mit übergeordneten Querschnittsthemen wie Digitalisierung und Künstliche Intelligenz (Abschnitt 4.1).

Ein Beispiel für den Bereich der Dekarbonisierung industrieller Prozesse stellt die industrielle Trocknung dar. Diese gilt als typische Querschnittstechnologie mit breiter Anwendung entlang der Fertigungstechnik-intensiven Branchen und hoher energetischer Relevanz, da ein Großteil der bis 200 °C eingesetzten Prozesswärme hierfür benötigt wird (Prognos AG 2007). Verbundprojekte wie *ETA-Fabrik* (FKZ: 03ET1145) und *LoTuS* (FKZ: 03EN2026) erzielten durch optimierte Trocknungsparameter und alternative Verfahren wie Infrarot- und Induktionstrocknung Energieeinsparungen von bis zu 57 % (Weigold 2023). Vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft und den zugehörigen R-Strategien (Deutsches Institut für Normung e. V. 2025) gewinnen energieeffiziente Reinigungs- und Trocknungsprozesse weiter an Bedeutung, insbesondere für die Wiederaufbereitung von Komponenten.

Im Bereich des Innovationstransfers ist das Projekt *ETA-Transfer* (FKZ: 46ETA01) (Weigold et al. 2022a) zu nennen. Das Vorhaben schloss die Lücke zwischen der Erforschung und der Umsetzung industrieller Energieeffizienzmaßnahmen. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus dem Vorhaben *ETA-Fabrik* wurden bei neun Industriepartnern im Maschinen- und Fahrzeugbau Energieeffizienzpotenziale messtechnisch erfasst, bewertet und anschließend pilothaft gehoben. Die Maßnahmen wurden über mindestens zwölf Monate überwacht und durch Praxisberichte und Medienbeiträge in die Industrie transferiert.

Künstliche Intelligenz als zentrales Querschnittsthema wird in zahlreichen Vorhaben aufgegriffen, bspw. *KI4ETA* (FKZ: 03EN2053A) sowie *etaGPT* (FKZ: 03EN4107B). *KI4ETA* zielte darauf ab, durch KI-basierte Analyse und Prozessoptimierung bislang verborgene Energie- und Ressourceneffizienzpotenziale in der Industrie nutzbar zu machen und Fabriken energieeffizienter und -flexibler zu gestalten. *etaGPT* entwickelt ein Assistenzsystem

basierend auf Large-Language-Modellen (LLM) für das industrielle Energiemanagement, das Unternehmen bei der Analyse, Optimierung und Dekarbonisierung ihrer Energieverbräuche unterstützt.

Aktivitäten im Forschungsfeld

Das Kuratorium des Forschungsfelds Fertigungstechnik umfasst 12 Mitglieder aus Industrie und Forschung und trifft sich halbjährlich, betreut durch Fördergeber und Projektträger. Es diskutiert aktuelle Energiethemen und identifiziert Forschungsbedarfe. Die Sitzungsinhalte werden von den Mitgliedern vorgeschlagen, eingeladene Experten liefern vertiefende Einblicke. Die behandelten Schwerpunkte zeigen direkte Synergien zu den Forschungsfeldern Wärme und Abwärme sowie Wärmepumpen und Kältetechnik und indirekte Bezüge zu weiteren Feldern.

Tabelle 5-3 fasst ausgewählte Themen vergangener Sitzungen zusammen.

5.2.3 FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Forschungsfelds

Die Fertigungstechnik steht unter wachsendem Transformationsdruck: Rohstoffknappheit, instabile Lieferketten, steigende Energie- und Emissionskosten sowie der Klimawandel treffen auf stagnierende Produktivitätsentwicklungen. Gleichzeitig verlangt die fortschreitende Digitalisierung nach resilienten und energieeffizienten Produktionssystemen.

Charakteristisch für die aktuelle Entwicklung ist eine zunehmend prozessmittelbare Perspektive, bei gleichzeitig hoher Relevanz prozessübergreifender Aspekte (vgl. Abschnitt 5.2.2). Fortschritte in der Fertigungstechnik entstehen immer stärker an den Schnittstellen zu benachbarten Forschungsfeldern. Themen mit zunehmend systemischem Bezug wie Wärme- und Abwärmenutzung, energieflexible Prozessgestaltung, Wärmepumpen- und Kältetechnik sowie digital gestützte Energiemanagement- und Flexibilisierungskonzepte gewinnen an Bedeutung.

Das übergeordnete Ziel des Forschungsfelds ist die Steigerung der Energieproduktivität – also dem Verhältnis aus wirtschaftlicher Leistung pro eingesetzter Energieeinheit (Pehnt 2010, S. 30) – bei gleichzeitiger Sicherstellung einer nachhaltigen und resilienten industriellen Wertschöpfung. Hierzu müssen technische Innovationen, datengetriebene Prozessoptimierung und der gezielte Einsatz energie- und materialeffizienter Verfahren kombiniert werden. Für die kommenden Jahre zeichnen sich zwei prioritäre Forschungsschwerpunkte ab, auf die das Forschungsfeld Fertigungstechnik gezielt hinarbeiten sollte:

1. **Energie- und ressourceneffiziente sowie energieflexible Prozessketten**
2. **Energieeffiziente Digitalisierung der Fertigungstechnik**

Tabelle 5-3: Zusammenfassung der Themen vergangener Kuratoriumssitzungen im FF Fertigungstechnik (Eigene Darstellung)

Thema	Ausgangslage	Zentrale Herausforderungen	Technologiepotenziale	Lösungsansätze
Klimaneutrale Prozesswärme in den Branchen der Fertigungstechnik	76 % Anteil an industriellem Endenergiebedarf (2023) (AGEB 2024) 72 % der industriellen Prozesswärme fossil - Prozesswärme in der Fertigungstechnik u.a. relevant bei Wärmebehandlung, Beschichtung, Reinigung	- Hohe Temperaturanforderungen - Heterogene Anwendungen - Fehlende Infrastruktur und unzureichende Beratungsangebote - Hoher Reinvestitionsbedarf der Primärerzeugungskapazitäten in den Sektoren Stahl (53 %), Chemie (59 %) und Zement (30 %) bis 2030.	- Anwendungen bis 200 °C bieten erhebliches Potenzial für Hochtemperatur-Wärmepumpen - Solarthermie bislang unterschätzt, obwohl robust und ganzjährig einsetzbar - Geothermie: Potenzial bis zu 25 % des industriellen Wärmebedarfs - Hybridlösungen mit PV und Solarthermie zunehmend praxistauglich	- Neue Geschäftsmodelle - Beschleunigter Infrastrukturausbau - Entbürokratisierung von Genehmigungsverfahren - Förderung marktnaher Technologien - Carbon Contracts for Difference (CCfDs) können Markttransformation fördern - Benchmark-Projekte für unterschiedliche Branchen
Energieeffizienz in der Wasserstoffelektrolyseurproduktion	Drei Hauptprozesse zur Fertigung von Wasserstoffelektrolyseuren, insbesondere PEM-Elektrolyseuren: Komponentenfertigung (energieintensiv), Stack-Fertigung (montageorientiert) und Systemfertigung (Test und Montage).	- Serienfertigung vielerorts in den frühen Anfängen; Prozesse bisher manuell & erfahrungsbasiert - Niedrige Automatisierung, hohe Materialkosten, fehlendes Recycling, Henne-Ei-Problem bei Wasserstoffhochlauf	Hohe Einsparpotenziale in der Komponentenfertigung durch Elektrifizierung thermischer Prozesse, Nutzung von Infrarottechnologie oder H₂-Brennern, optimierte Reinigungsprozesse & Teilkonditionierung	- Aufbau automatisierter Serienfertigung - Politische Unterstützung und regulatorische Planungssicherheit - Optimierte Planungsmethodiken zur Energie- und Versorgungsplanung in neuen Fabriken - Digital unterstützte Prozessüberwachung
Abwärmennutzung in fertigungstechnischen Prozessen	- Hohe Exergieverluste bei thermischen Prozessen der Fertigungstechnik (Schweißen, Gießen, Schmieden, Wärmebehandlung) - Teils niedrige Wirkungsgrade < 20 % in der Prozesswärmebereitstellung - Potenzial: 12 000–70 000 GWh/a (Kawamura et al. 2023)	- Externe Auskopplung vielfach nicht umgesetzt aufgrund hoher Investitionen und fehlender Wirtschaftlichkeit - Regulatorische Hürden (z. B. fehlende Umlagebefreiung für Wärmepumpenstrom) und mangelnde Planungssicherheit erschweren Umsetzung - Fehlende systematische Erfassung von Abwärmepotenzialen	Prozessinterne Wärmerückgewinnung (Eigen-Rekuperation) mittels in Prozessketten integrierten HT-Wärmepumpen, Kaltdampfprozessen (CAES, LAES), thermodynamischen Maschinen	- Thermodynamisch fundierte Anlagenkonzepte - Belastbare Datengrundlage durch standardisierte Erhebungsverfahren oder verbindliches Abwärmekataster (Abwärmeplattform als sinnvolles bestehendes Instrument) - Beseitigung regulatorischer Hürden und Vermeidung von Lock-in-Effekten

1. Energie- und ressourceneffiziente sowie energieflexible Prozessketten

Ganzheitliche Prozesskettenoptimierung

Die Fertigungstechnik kann den Energie- und Ressourcenverbrauch deutlich senken, wenn gesamte Prozessketten vom Rohstoff bis zum Recycling integrativ betrachtet werden. Wesentliche Ansätze für die Prozesskettenoptimierung in der Fertigungstechnik sind:

- Substitution energieintensiver Verfahren, z. B. durch hybride additive-subtraktive Fertigung, die Materialverluste reduziert und Energie spart.

- Abwärmenutzung und Energiespeicherung, etwa durch die Weiterverwendung von Prozesswärme in Trocknungs- oder Reinigungsprozessen und den Einsatz thermischer oder elektrischer Speicher für energieflexible Abläufe.
- Modulare und kreislauffähige Anlagenkonzepte, die langlebig und rohstoffarm ausgelegt sind, ermöglichen die Rückgewinnung von Ressourcen (z. B. Wärme, Prozesswasser) und eine flexible Anpassung an neue Fertigungsanforderungen.

Diese Ansätze ermöglichen prozessübergreifende Effizienzgewinne und schaffen die Basis für Sektorkopplungen, wie die Einspeisung von Abwärme in lokale Netze oder die Nutzung von Speichern für Lastverschiebungen.

Integration von Energieflexibilität in Produktionssysteme

Zukunftsfähige Fertigungssysteme müssen Lasten flexibel verschieben und verschiedene Energiequellen nutzen, um auf volatile Märkte und schwankende Netzbedingungen zu reagieren. Energieflexible Produktionssysteme senken Betriebskosten, erhöhen die Resilienz und leisten netzdienliche Beiträge. Zentrale Ansätze hierfür sind:

- Energieadaptive Produktionsplanung und übergreifende Energiemanagementsysteme: Intelligente Fertigungssysteme (z.B. MES) und Energiemanagementsysteme berücksichtigen Strompreisschwankungen und variable Netzentgelte, ggf. auch standortübergreifend. So können energieintensive Prozesse in günstige Zeitfenster verlagert werden, ohne die Produktivität wesentlich zu beeinträchtigen.
- Hybride Energieversorgung: Die Kombination aus Strom, Wasserstoff, Abwärme und Speichern ermöglicht flexible Energiequellenwahl und reduziert Lastspitzen – insbesondere bei thermischen Prozessen wie Wärmebehandlung oder Trocknung.
- Prozessnahe Speicher und modulare Flexibilität: Thermische und elektrische Speicher puffern kurzfristige Lasten; modulare Anlagen erleichtern die Integration in bestehende Fertigungsumgebungen.

Für die industrielle Umsetzung sind geeignete politische Rahmenbedingungen notwendig. Demonstratoren und Reallabore helfen, Zielkonflikte – etwa zwischen Energieeffizienz und Flexibilität – frühzeitig zu erkennen und praxisnah zu lösen.

Strategische Transformation

Die strategische Transformation hin zur klimaneutralen Fertigung erfordert fundierte Planung und praxisnahe Erprobung. Digitale Zwillinge kompletter Fertigungsanlagen ermöglichen die Simulation von Transformationsszenarien und die energetische Optimierung einzelner Prozessketten. Auf dieser Basis können Unternehmen konkrete Transformationspfade mit messbaren Zwischenzielen entwickeln und ihren Energieeinsatz schrittweise dekarbonisieren.

Für die Umsetzung in der Praxis sind Reallabore, Lernfabriken und Demonstratoren entscheidend. Sie schaffen skalierbare Blaupausen für energieeffiziente, flexible und klimaneutrale Fertigungsprozesse – insbesondere für den industriellen Mittelstand.

2. Energieeffiziente Digitalisierung der Fertigungstechnik

Digitalisierung als Effizienztreiber

Die Digitalisierung bietet erhebliche Potenziale zur Steigerung von Energie- und Ressourceneffizienz in der Fertigungstechnik, wenn sie energieeffizient, datensparsam und nutzungsorientiert umgesetzt wird. Digitale Zwillinge von Anlagen und Prozessen ermöglichen Echtzeit-Optimierungen von Energieverbrauch und Fertigungsabläufen. KI-gestützte Qualitäts- und Prozessregelungen vermeiden Ausschuss und unnötigen Energieeinsatz, indem sie Abweichungen früh erkennen und automatisch gegensteuern. Präzise Sensorik und Aktorik erlauben die gezielte Steuerung energieintensiver Schritte wie Wärmebehandlung, Galvanik oder Lackierung. So entstehen resiliente, energieeffiziente Produktionssysteme, die sich kontinuierlich an technische und energetische Anforderungen anpassen.

Dateninfrastrukturen und algorithmische Effizienz

Eine energieoptimierte Dateninfrastruktur verhindert, dass Digitalisierung selbst zum Treiber eines höheren Nettoenergieverbrauchs wird. Edge-Cloud-Kombinationen verlagern rechenintensive, nicht zeitkritische Aufgaben in die Cloud, während latenz- und sicherheitskritische Regelungen auf Edge-Systemen laufen. Energieeffiziente Algorithmen und Minimum-Viable-AI-Ansätze reduzieren Speicher-, Übertragungs- und Rechenaufwand. On-Premise-Server mit Abwärmenutzung können die bei Berechnungen entstehende Energie in den Fertigungsprozess zurückführen. So lassen sich Rechenlast, Energieverbrauch und Latenz gezielt optimieren, ohne die Prozessstabilität zu gefährden.

Rechenzentren und Datenräume

Energieeffiziente Rechenzentren und On-Premise-Server in Fertigungsumgebungen ermöglichen die Kopplung von IT und Produktion: Ihre Abwärme kann z. B. in Trocknungsprozessen, Temperierkreisläufen oder Wärmebehandlungsöfen genutzt werden. Effiziente Kühltechnologien und Lastmanagement senken den Stromverbrauch zusätzlich. Datenräume mit standardisierten Schnittstellen vernetzen Maschinen und Sensorik entlang der Wertschöpfungskette und sichern souveräne Datenflüsse. Digitale Produktpässe, Variantenmanagement und Extended-Reality-gestützte Assistenzsysteme schaffen praxisnahe Nutzungsszenarien – von der Qualitätssicherung bis zur vorausschauenden Wartung. Zentrale Herausforderung bleibt die energetisch optimale Verbindung von Hard- und Software mit Abwärmenutzung.

Fazit und Ausblick

Die skizzierten Forschungs- und Entwicklungsbedarfe stehen in engem Zusammenhang mit den Zielen des 8. EFP, insbesondere der Mission *Wärmewende* (Programmziele 2 und 4: Effizienzsteigerung und Flexibilisierung der Wärme- und Kälteversorgung). Relevante Schnittstellen bestehen auch zu den Missionen *Energiesystem*, *Wasserstoff* und *Transfer*. Innovationen der Fertigungstechnik – etwa prozessintegrierte Energieeffizienz, optimierte Prozessketten und digitalisierte, KI-gestützte Produktionssysteme – können branchenübergreifend zur Dekarbonisierung beitragen. Die prozessmittelbare Perspektive verschiebt sich dabei zunehmend zu Schnittstellen mit benachbarten Forschungsfeldern wie *Wärme- und Abwärmenutzung* oder *Wärmepumpen- und Kältetechnik*, bleibt aber eng mit prozessübergreifenden Querschnittsthemen wie Digitalisierung und Künstliche Intelligenz sowie Systemfragestellungen wie Flexibilisierung und Ressourceneffizienz verknüpft.

Handlungsbedarf und künftige Verbundvorhaben

Die Fertigungstechnik zeichnet sich durch eine hohe thematische Breite, starke Querschnittsrelevanz und enge Verzahnung von Maschinenbau, Prozesswissen und Digitalisierung aus. Um die Transformation der Industrie wirksam zu unterstützen, werden **interdisziplinäre Großprojekte mit Leuchtturmcharakter** benötigt, die Fertigungstechnik in den Mittelpunkt stellen und gezielt Schnittstellen zu benachbarten Technologiefeldern adressieren – etwa Künstliche Intelligenz, Wasserstoff- und Speichertechnologien oder Kreislaufwirtschaft. Neben diesen strategischen Großvorhaben braucht es niedrigschwellige Förderformate für **Proof-of-Concept-Projekte**, um neue Fertigungstechnologien, Prozessketten und Digitalmethoden frühzeitig zu validieren und als Basis für Verbundvorhaben nutzbar zu machen – komplementär zu bestehenden Mikroprojekten mit Unternehmensfokus.

Mögliche **Verbund- und Leuchtturmvorhaben der nächsten Jahre** könnten u. a. sein:

- **Hybride Fertigungs- und Energieprozessketten:** Kombination additiver und subtraktiver Verfahren mit integrierter Abwärmenutzung und Lastflexibilität.
- **Energieadaptive Großanlagen:** Entwicklung von Press-, Gieß- oder Wärmebehandlungsanlagen, die auf variable Energieversorgung reagieren und prozessnahe Speicher integrieren.
- **Digitale Zwillinge für energieflexible Prozessketten:** Aufbau von Test- und Transferplattformen, die energetische Optimierung, Lastmanagement und Qualitätssicherung in Echtzeit koppeln.
- **Modulare Kreislauf-Fertigungskonzepte:** Fertigungssysteme, die Wiederaufbereitung, Recycling und Materialsubstitution in den Produktionsprozess integrieren und so die Dekarbonisierung der gesamten Wertschöpfungskette unterstützen.

Charakteristisch für die Energieforschung in der Fertigungstechnik ist dabei ein **hoher Wettbewerb um FuE-Mittel** und ein starker Fokus auf **Anwendungsorientierung und Praxistransfer**. Die beschriebenen Verbundvorhaben adressieren diesen Bedarf, indem sie sowohl technologieübergreifende Innovationssprünge („Technologie-Enablement“) als auch die branchenübergreifende Dekarbonisierung unterstützen.

5.3 Forschungsfeld Hochtemperatursupraleitung

Hochtemperatursupraleiter (HTSL) besitzen bereits bei Kühlung mit flüssigem Stickstoff bei einer Temperatur von -196 °C (77 K) auch bei sehr hohen Stromdichten einen vernachlässigbaren elektrischen Widerstand. Vielversprechende Anwendungen ergeben sich deshalb u. a. in der Energietechnik und in stromintensiven Industrieprozessen (Humpert 2012), im Transport, in der Luft- und Raumfahrt, der Medizintechnik, der Teilchenphysik und der Kernfusion.

Der vernachlässigbare Widerstand beim Stromtransport ermöglicht z. B. Hochstromschienen im Bereich der Elektrolyse oder Aluminiumherstellung, die 90 % Ressourcen und Energie im Vergleich zu konventionellen Stromschienen einsparen. Aufgrund der bis zu 100-fach höheren Stromdichte im HTSL im Vergleich zu einem konventionellen Kupferleiter sind die Anwendungen wesentlich leichter, kompakter und somit ressourceneffizienter (Noe und Bauer 2021). Auch der selbstregenerierende Übergang von der Supraleitung zur Normalleitung bei starker Erhöhung der Stromdichte ermöglicht neue Anwendungen wie den supraleitenden Strombegrenzer. Dadurch werden die zerstörerischen Auswirkungen von zu hohen Kurzschlussströmen in Stromnetzen vermieden.

5.3.1 Rückblick des Forschungsfelds

Bereits im Vorfeld der Etablierung des Forschungsfelds begann schon vor 2008 die Förderung der Hochtemperatursupraleitung, die in den Folgejahren gezielt entlang der gesamten Wertschöpfungskette fortgesetzt wurde (Abbildung 5-4).

In den Projekten *ELSA* und *HIGHWAY* wurde die grundlegende Verbesserung der Materialeigenschaften und des Herstellprozesses von HTS-Bandleitern realisiert. Es folgten im Projekt *SupraTech* die Hochskalierung der Fertigung zu einer Pilotproduktion mit weiter verbesserten Eigenschaften der Bandleiter sowie im Projekt *HTS-NextGEN* die Steigerung der Produktionskapazität und -geschwindigkeit in einem industriellen Maßstab.

Zeitlich parallel wurde durch *VATESTA* und *VATESTA II* eine spezielle Forschungsinfrastruktur aufgebaut, um bei variabler Temperatur und einem hohen Hintergrundmagnetfeld die Charakterisierung von HTS-Hochstromleitern und Magnetspulen zu ermöglichen. Dieses Ziel wurde auch mit dem Projekt *HTS-Generator* verfolgt, in dem ein einzigartiger Rotationsteststand mit kryogenen Testbedingungen konzipiert wurde.

Mit dem Projekt *ENSYSTROB* wurde weltweit erstmals ein resistiver, supraleitender Strombegrenzer entwickelt und in einem Kraftwerk erfolgreich getestet. Aus dem Projekt

iSFCL entwickelte sich eine weitere Anwendung eines Strombegrenzers, der sich heute noch im Einsatz in einer Industriestromversorgung befindet. Mit dem Projekt *SmartCoil* wurde ein Patent für eine neue Art von Strombegrenzer erstmals hin zu einem realen Demonstrator entwickelt.

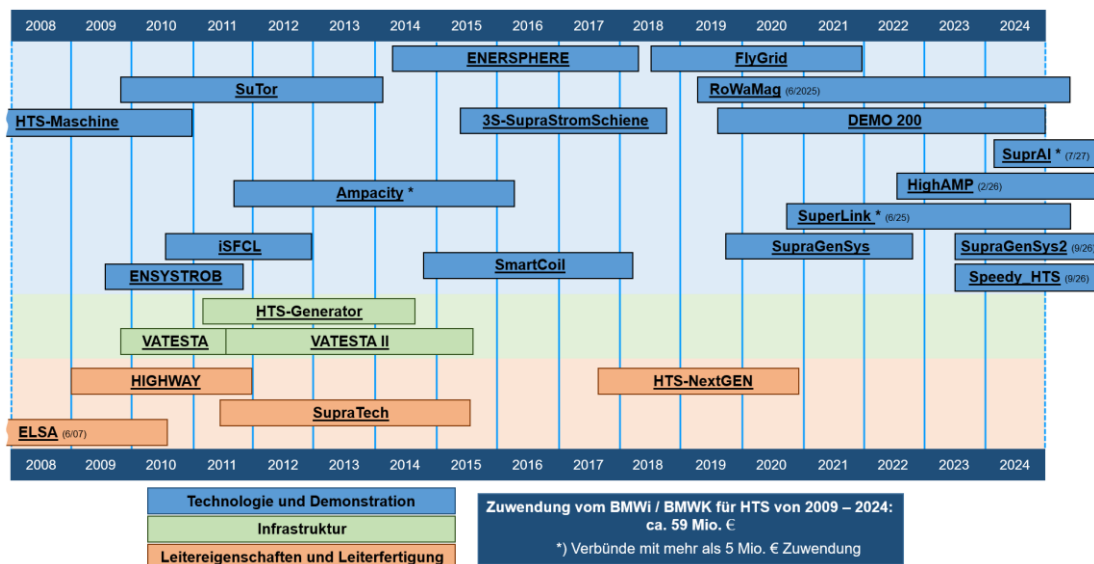


Abbildung 5-4: Geförderte Projekte (BMW i bzw. BMWK) im Forschungsfeld Hochtemperatursupraleitung.

Erste Technologieentwicklungen für rotierende Maschinen kamen mit den Projekten *HTS-Maschine* und *SuTor*. Im EU-Projekt *EcoSwing* (2015 bis 2019) konnte eine Windkraftanlage realisiert werden, deren Generator mit einem HTS-Rotor ausgestattet war. Zur Effizienzsteigerung des Generators und mit dem Ziel einer deutlichen Gewichtsreduzierung wurden im Projekt *SupraGenSys* die technologischen Grundlagen für eine voll-supraleitende Windkraftanlage entwickelt.

Zu den weltweiten Highlights auf dem Gebiet der supraleitenden Stromleitungen zählen die Projekte *Ampacity* und *3S-SupraStromSchiene*. Im Projekt *Ampacity* wurde ein 1 km langes Mittelspannungskabel entwickelt, integriert in das Netz der Stadt Essen und über fünf Jahre ohne ungeplante Unterbrechung betrieben. Im Projekt *3S-SupraStromSchiene* wurde erstmals eine modulare supraleitende Stromschiene für 20 kA für eine Chlorelektrolyse qualifiziert und installiert. Darauf aufbauend wurde im Projekt *DEMO200* eine Industriestromschiene für 200 kA entwickelt und demonstriert.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten der HTS wurden mit den Projekten *ENERSPHERE* und *FlyGrid* demonstriert, in denen die netzdienliche Integration eines Schwungmassenspeichers mit reibungsfreien HTS-Lagern realisiert wurde. Mit *RoWaMag* wurde ein robuster und wartungsarmer Magnetheizer für die Erwärmung von Metallbillets entwickelt mit einem um gut 30 % höherem Wirkungsgrad. Durch die bisher durchgeführten Projekte wurden erhebliche Fortschritte entlang der gesamten Wertschöpfungskette vom Material (Troshyn 2022) bis zu den genannten Anwendungen erzielt. Wesentlich für die Erfolge waren die hohe Anwendungsrelevanz der Projekte und die enge Zusammenarbeit von Wissenschaftlern, Industriepartnern und Anwendern.

5.3.2 Aktuelle Arbeiten des Forschungsfelds

Die aktuellen Projekte konzentrieren sich insbesondere auf weitere Anwendungen im Bereich der supraleitenden Stromschienen für stromintensive Industrieprozesse und Kabel für die elektrische Energieverteilung in Städten.

Im Reallabor *SuprAl* wird eine 600 m lange supraleitende Stromschiene für einen Gleichstrom von 200 kA beim Aluminium-Hersteller TRIMET in Hamburg installiert. Erwartet wird eine Verminderung der elektrischen Verlustleistung um 90 % gegenüber einer konventionellen Stromschiene. Das Projekt ist auch ein wichtiger Bestandteil der Forschungsroadmap und wird nur durch die kontinuierliche Entwicklung der HTS-Stromschiene in den Vorgängerprojekten 3S-SupraStromSchiene und DEMO200 ermöglicht.

Elektromobilität und Wärmepumpenanwendung werden auf der innerstädtischen Verteilnetzebene einen Netzausbau zur Erhöhung der Übertragungskapazität erforderlich machen. Da der Tiefbau bei der Erneuerung von Kabelsystemen im innerstädtischen Bereich aufwändig und kostspielig ist, werden von Netzbetreibern Systeme bevorzugt, die eine Nutzung vorhandener Rohrleitungen von bestehenden Gasdruck- und Ölkabeln erlauben und gleichzeitig die Übertragungskapazität erhöhen. Im Projekt *HighAMP* wird daher ein leistungsstarkes und kompaktes dreiphasiges Supraleiterkabel für den Retrofit-Einsatz in Bestandsrohren entwickelt. Mit dem Bau eines Demonstrators für die 20 kV Verteilnetzebene und einem Nennstrom von 3 kA sowie der anschließenden Hochskalierung des Konzepts auf die 110 kV Ebene soll die komplette Leistungsklasse konventioneller VPE-Stadt-kabel abgedeckt werden. Der Einsatz von flüssigem Stickstoff als Kühlmedium und Dielektrikum sowie eine symmetrische Dreileiteranordnung sollen dabei ein platzsparendes Kabeldesign ermöglichen.

Für den wachsenden Strombedarf im Innenstadtbereich von Großstädten wurde im Rahmen des Projekts *SuperLink* ein HTS-Kabelsystem entwickelt, welches die Anforderungen von hoher Leistung (500 MVA) auf der Verteilebene (bei 110 kV) bei gleichzeitig kleinstem Bauraum und einer Unempfindlichkeit gegenüber thermischen Emissionen anderer Medien (z. B. Fernwärme) erfüllt. Mit der Entwicklung des Kabels sowie von Endverschlüssen, Verbindungsmuffen und Kälteeinspeisemuffen wurden auch Aspekte der elektrischen Alterung von HTS-Kabeln und des Einflusses von HTS-Verbindungen auf die bestehende Verteilnetzinfrastuktur untersucht. Mit dem erfolgreichen halbjährigen Test eines 150-m-Demonstrators im Netz der Stadtwerke München wird der Sprung einer HTS-Kabeltechnologie in den Bereich der im Netz einsetzbaren Kabel-Produkte möglich sein.

Darüber hinaus wird aktuell die Technologieentwicklung im Bereich der Windkraftgeneratoren in den Projekten *SupraGenSys2* und *Speedy-HTS* vorangetrieben. Diese Projekte sind Bestandteil der Forschungsroadmap (siehe unten).

5.3.3 FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Forschungsfelds

Forschungsroadmap 2035

Für die nächsten 10 Jahre sehen die Autoren und Autorinnen eine Forschungsroadmap, die zum einen auf eine weitere Technologie- und Anwendungsentwicklung im Bereich der Windkraftanlagen und der supraleitenden Strombegrenzer im Höchstspannungsbereich setzt und zum anderen auf weitere Demonstratoren und Pilotanwendungen im Bereich der Stromschienen und Kabel. Hierbei liegt der Fokus auf dem Gesamtsystem, das neben HTS-Leitersystem und der Kühlung über lange Distanzen auch die Einbindung in das Stromnetz mit allen notwendigen Anforderungen umsetzt. Die konkret geplanten Projekte sind in Abbildung 5-5 im Zeitverlauf und mit ihrer anvisierten Erhöhung des TRL farblich dargestellt.

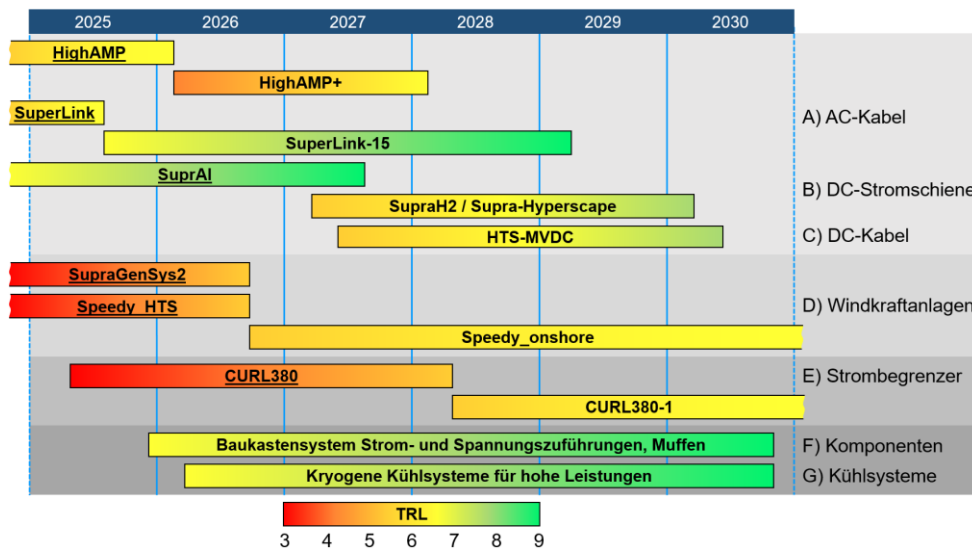


Abbildung 5-5: Überblick über die Forschungsroadmap bis 2030 des Forschungsfelds Hochtemperatursupraleitung mit geplanter TRL-Entwicklung.

A) AC-Kabel für innerstädtische Verteilnetze

Das im Projekt *SuperLink* entwickelte und typgeprüfte, vollständige HTS-Kabelsystem für 500 MVA bei 110 kV wird mit allen Komponenten einem halbjährigen Systemtest in einem Umspannwerk unterzogen (Bach und Prusseit 2023). Dabei wird das Kabelsystem (in Summe 150 m lang mit allen vorhandenen Endverschlüssen und Verbindungsmuffen) mit verschiedenen Lastzyklen bei gleichzeitig zugeschalteter Netzspannung beansprucht. Nach dem erfolgreichen Test dieser Demonstratorinstallation soll in München ein HTS-Hochspannungskabel über eine Länge von ca. 15 km verlegt werden (*SuperLink-15*). Hierbei ergibt sich als weiterer Vorteil die positive Auswirkung einer solchen HTS-Kabelverbindung auf die bestehende stark gealterte Kabelinfrastruktur im Netz, die um bis zu 40 % entlastet würde.

Im Nachfolgeprojekt *HighAMP+* soll das Kabelkonzept in Kombination mit einem neuartigen Kunststoffkryostaten weiterentwickelt werden. Durch den Einsatz eines elektrisch isolierenden Kryostaten ist zu erwarten, dass die Betriebsspannung bei gleichbleibenden

Kabeldimensionen gesteigert, die Entfernungen zwischen benötigten Kältestationen vergrößert und deutliche Kosteneinsparungen realisiert werden können.

Bei ersten Pilot- und Demonstrationsstrecken werden die Investitionskosten für die neuartigen supraleitenden Systeme höher ausfallen gegenüber konventionellen Lösungen. Zusätzlich sehen Netzbetreiber, deren Hauptaufgabe die Versorgungssicherheit und Netzstabilität ist, aufgrund der Neuheit höhere Risiken bei einer supraleitenden Verbindung. Diesen höheren Kosten und Risiken stehen zu Beginn nur begrenzte Einsparungen gegenüber. Der regulatorische Rahmen, insbesondere die Anreizregulierung, erschweren diesen Prozess zusätzlich, da sich Innovationsprojekte negativ auf die Erlösobergrenze der Netzbetreiber auswirken. Dies ließe sich durch eine engere Verzahnung von Regulierung und Förderpolitik oder auch die Übernahme von Haftungsrisiken überwinden.

B) DC-Stromschiene

Das Reallabor *SupraAl* wird durch die Installation einer 200 kA Stromschiene in der Aluminium-Produktion diese Technologie auf einen TRL von 8 bis 9 heben. Dies ist hinsichtlich weiterer Einsatzfelder in der Industrie sehr wichtig, z. B. bei der Herstellung von Chlor, Kupfer, Zink, Graphit, Aluminium und Wasserstoff (H_2) mit Betriebsströmen zwischen 20 kA und 400 kA. DC-Stromschienen werden im Unterschied zu Kabeln in industrieller Umgebung mit beengten Verhältnissen eingesetzt.

Als Nachfolgeprojekte zu *SupraAl* befinden sich zwei Projekte im Konzeptstadium. Für die Versorgung von H_2 -Elektrolyseuren bestehen Gespräche mit Nucera und dem Fraunhofer IEE zum Einsatz von supraleitenden Stromschienen bis zu 40 kA (*SupraH2*). Es wird erwartet, dass eine Entwicklung bis zur Demonstrationsreife notwendig sein wird. Weiter sind für die Versorgung von Hochleistungs- bzw. Hyperscale-Rechenzentren ebenfalls supraleitende Stromschienen in Diskussion. Die Energieeffizienz von heutigen Rechenzentren liegt zwischen 50 % und 65 %. Nach dem neuen Energieeffizienzgesetz (EnEfG) muss die Energieeffizienz jedoch einen Wert von mindestens 83 % erreichen. Dies kann erreicht werden, wenn durch die Nutzung von DC-Niederspannung Umwandlungsverluste vermieden und durch die Verwendung von HTSL Leitungsverluste reduziert werden (*Supra-Hyperscape*). Verschiedene Betreiber von Rechenzentren sind in der Konzeptfindung.

C) DC-Kabel in der Mittelspannung

Die einzigartigen Vorteile der Supraleitung bei der Energieübertragung können in Zukunft durch die Verwendung in der Mittelspannungs-Gleichstrom-(MVDC)-Technologie, z. B. bei Spannungen im Bereich von 50 kV, ausgenutzt werden. MVDC erfährt aktuell weltweit hohe Beachtung, da auch konventionell in Industrie- und Verteilnetzen höhere Übertragungsleistungen als bei Wechselstrom möglich sind (FEI 2024).

Der Einsatz von HTS kann die Vorteile der DC-Technologie verstärken und erweitert gleichzeitig das Anwendungsspektrum der MVDC-Technologie bis hin zu Übertragungsnetzen aufgrund der deutlich höheren Stromtragfähigkeit. Die rechtzeitige Förderung von HTSL in der MVDC-Technologie ist dabei von besonderer Bedeutung, da hier

supraleitende Betriebsmittel in einem sich gerade entwickelnden Anwendungsfeld getestet werden können. Im Gegensatz zur AC-Technologie konkurrieren die neuen HTS-Betriebsmittel dabei nicht gegen etablierte konventionelle Produkte.

Die Entwicklung supraleitender MVDC-Kabel kann auf Komponenten mit hohem TRL der AC-Kabel und DC-Stromschienen zurückgreifen. Trotzdem sind für eine baldige Marktreife noch umfangreiche Entwicklungen notwendig. Aktuell bestehen noch zu wenige Erfahrungen bei der Herstellung und Installation großer Längen supraleitender Kabel. Auch besteht Entwicklungsbedarf bei verschiedenen Komponenten, wie Endverschlüssen, Kryostat-Flansch-Übergängen und der Anbindung der Kühlanlagen. Schließlich ist die einfache Einbindung in das Gesamtsystem aus Konvertern und Netz entscheidend für den praxisnahen Test und die Akzeptanz der supraleitenden MVDC-Technologie.

Ziel eines Projekts *HTS-MVDC* sollte deshalb die zeitnahe Demonstration aller Komponenten in einem Systemdemonstrator in einer relevanten Testumgebung sein. Ein aussagefähiger Demonstrator sollte dabei einen hohen TRL von mindestens 6 bis 7 aufweisen, um eine schnelle Kommerzialisierung zu ermöglichen. Unter Berücksichtigung der genannten Punkte sollte ein HTS-DC-Kabelsystem mit einer Länge von ca. 1 km, einer Spannung von 50 – 110 kV und einer Leistung von 100 – 250 MW realisiert werden.

D) Windkraftanlagen (WKA)

HTS-Generatoren für die Windkraft bieten neben einer deutlichen Steigerung der Leistung relativ zum Bauraum den sehr wichtigen Vorteil des Wegfalls des hohen Bedarfes an Seltenen Erden. Hier kann sich ein Reduktionsfaktor von bis zu 10 000 ergeben: statt 1 500 kg werden weniger als 40 g für eine WKA mit HTSL benötigt (Köster 2023).

Aktuell werden in *SupraGenSys2* direktangetriebene Generatoren untersucht. Aufgrund der geringen Umdrehungsgeschwindigkeiten (ca. 10 Upm) sind große HTSL-Mengen erforderlich, die effizient eingesetzt werden müssen. Vorteilhaft sind die mit der geringen Geschwindigkeit korrelierten niedrigen AC-Verluste. Im Projekt *Speedy_HTS* wird über ein dreistufiges Getriebe eine hohe Umdrehungszahl angestrebt, die nur geringe HTSL-Mengen in einer besonderen Spulenarchitektur erfordert und in kompakten Abmaßen hohe Leistungen bietet.

Beide Projekte zeigen auf, welche Vorteile (Materialeffizienz, Unabhängigkeit von Seltenen Erden, hohe Leistungsdichte, mögliches Upgrading bestehender Anlagen) HTS-basierte Windkraftgeneratoren haben. Weiterentwicklungsbedarfe bestehen auf den Gebieten der AC-Verluste, der Kälteanbindung, einer angepassten berührungslosen Erregerstromübertragung und integrierten Leistungselektronik. Erst im Anschluss an diese Technologieentwicklungen bis zu einem TRL von ca. 5 kann ein Demonstrator eines supraleitenden HTS-Windgenerators realisiert werden. Ein erforderliches Anschlussprojekt von *Speedy_HTS* wäre ein Projekt *Speedy_onshore* zum Aufbau einer praxisnahen Anlage mit einer Leistung von bis zu 14 MW im Gehäuse einer 3 MW-WKA zusammen mit der

Entwicklung der oben genannten Technologiebausteine. Aufgrund der großen Herausforderungen ist eine Projektlaufzeit von 5 Jahren plausibel.

E) AC-Strombegrenzer für die Höchstspannung

Aktuell hat im Verbundprojekt *CURL380* die Entwicklung für einen 380 kV supraleitenden Strombegrenzer begonnen. In dem Projekt werden die kritischen Komponenten und das Gesamtdesign inklusive der Systemintegration adressiert. Nach einem erfolgreichen Projektverlauf kann in 2028 mit der Entwicklung und dem Test eines einphasigen Prototyps begonnen werden. Aufgrund des hohen Entwicklungsaufwandes und des damit verbundenen Risikos wird zunächst nur eine Phase entwickelt (*CURL380-1*). Daran anschließend kann bis spätestens 2035 die erste dreiphasige Pilotanwendung im Netz installiert sein. Die Entwicklung neuartiger supraleitender Strombegrenzer für die Höchstspannungsebene adressiert direkt die Entwicklung neuer Netztechnologien, die für den weiteren Netzausbau relevant sind und zu einer Stabilisierung und zum Schutz des Stromnetzes im Übertragungsbereich beitragen.

F) Komponenten

Herausforderung in vielen HTS-Projekten im energietechnischen Bereich ist die Verbindung zwischen supraleitenden Kabeln bzw. Stromschienen sowie der verlustarme Übergang vom HTSL zum konventionellen Leiter. Um die hierfür notwendigen Komponenten so weit möglich zu vereinheitlichen und auf einen hohen TRL zu bringen, soll begleitend ein Projekt zum Aufbau eines *Baukastensystems von Strom- und Spannungszuführungen sowie Muffen* realisiert werden. Dieses Projekt dient dem Erkennen und Sammeln von Entwicklungsbedarfen, entwickelt und vereinheitlicht notwendige Lösungen und betrachtet dabei fertigungstechnische Aspekte im Hinblick auf eine kostengünstige Produktion. Dieser Ansatz soll bewirken, dass Know-how während Projektpausen nicht verloren geht, der Austausch zwischen Projekten gefördert und Synergien geschaffen werden.

G) Kryogene Kühlsysteme

Eine weitere Herausforderung in vielen Pilotprojekten stellt die Kühltechnik dar. Derzeit am Markt verfügbare kryogene Kühlsysteme sind überwiegend nicht auf die spezifischen Anforderungen von HTS-Anwendungen ausgelegt und können diese ohne erhebliche konstruktive Anpassungen nur unzureichend erfüllen. Insbesondere in höheren Leistungsklassen, z. B. ab etwa 20 kW für HTS-Kabelsysteme, existieren bislang keine Anlagen. Im unteren Leistungsbereich sind zwar kommerziell verfügbare Kühlaggregate und Komponenten vorhanden, es mangelt jedoch an kosteneffizienten, standardisierten und hochrobusten Systemen. Diese Problematik soll in einem Projekt zur Entwicklung der *kryogenen Kühltechnik* angegangen werden. Ziel ist zum einen die Konzeption, Realisierung und Demonstration eines kryogenen Kühlsystems der 20-kW-Leistungsklasse, zum anderen die Definition vereinheitlichter Komponenten und Schnittstellen, die eine einfache Planung und Realisierung der kryogenen Kühlsysteme für HTS-Pilotprojekte ermöglichen.

Weiterer FuE-Bedarf

Neben den konkret genannten Projekten der Forschungsroadmap, die insbesondere die Anwendungen im Bereich der elektrischen Energietechnik adressieren, besteht weiterer dringender Forschungs- und Entwicklungsbedarf in den folgenden Bereichen mit bisher geringem TRL. Diese Forschungsbereiche gehen weit über das Forschungsfeld hinaus und müssen in einem größeren Kontext betrachtet und gefördert werden.

Fusion: Für die Fusion ist die Entwicklung von großen supraleitenden Magnetspulen anvisiert. Bis Mitte der 2030er Jahre sollen erste größere Demonstratoren entstehen, die u. a. auch mit Hochtemperatur-Supraleitern realisiert werden sollen. Somit ergeben sich Synergien bei der Nutzung von vorhandener Infrastruktur und Know-how im Bereich HTS.

Wasserstoff: Im Energiesystem müssen elektrische Energie und Wasserstoff gemeinsam gedacht werden. Die „hybride Energiepipeline“ mit dem Transport von elektrischer Energie und Flüssigwasserstoff in einer kompakten Leitung trägt dieser ganzheitlichen Sichtweise Rechnung. Erste Demonstrationen werden derzeit in den Wasserstoffleitprojekten erarbeitet (TransHyDE-Projekt AppLHy!). Der in Zukunft hohe Wasserstoffbedarf von Gaskraftwerken könnte vorteilhaft mit Flüssigwasserstoff gedeckt werden, der gleichzeitig die Kühlung zur Übertragung der elektrischen Energie in das Netz per HTS übernimmt.

Transport- und Mobilitätssektor: Hier bietet die HTS-Technologie in Antriebssträngen für große Fahrzeuge mit großen Nutzlasten und über größere Distanzen deutliche Effizienzvorteile. Der Kühlaufwand erscheint in Verbindung mit den Effizienzgewinnen ab einer Leistungsklasse von ca. 500 kW gerechtfertigt, bei Verwendung von Flüssigwasserstoff je nach Missionsprofil auch schon für kleinere Leistungen.

Luft- und Raumfahrt: In der Luftfahrt ermöglichen Supraleiter durch ihre Gewichtsersparnis Anwendungen, die mit konventioneller Technik nicht realisierbar sind. So sind supraleitende Antriebsstränge für voll-elektrische Flugzeuge mit Reichweiten jenseits von 300 bis 500 km alternativlos. Im Rahmen des EU-Projekts ASCEND unter Führung von Airbus SA wurde mit Beteiligung von OSWALD Elektromotoren GmbH ein skalierter Antriebsstrang entwickelt. In der Raumfahrt ermöglichen Supraleiter Antriebe mit bisher nicht realisierbaren Kräften z. B. für Cargo-Missionen zu Mond und Mars (EU-Projekt SUPREME, Institut für Raumfahrtssysteme, Universität Stuttgart). Supraleitende Spulen können auch Kleinsatelliten im erdnahen Magnetfeld steuern (Tomorrow's Motion GmbH).

Medizintechnik: Die transkranielle Magnetstimulation (TMS) ist ein nichtinvasives Verfahren zur Diagnostik und Therapie, bei dem Hirnareale durch die Schädeldecke mit Magnetfeldern stimuliert oder gehemmt werden. Die Neurologie und die Psychiatrie setzt TMS sowohl diagnostisch als auch therapeutisch erfolgreich ein. Die Anwendung der TMS wird allerdings durch starke Wärmeentwicklung in Kopfnähe aufgrund des Widerstands der elektrischen Leiter und in den TMS-Spulen stark eingeschränkt. Das Forschungsvorhaben SuperTMS löst dies durch die Entwicklung einer supraleitenden TMS-Spule. Der Prototyp soll TRL 6 erreichen und an handelsüblichen TMS-Systemen einsetzbar sein.

Fazit zum Forschungsfeld Hochtemperatursupraleitung

Der Einsatz der Hochtemperatursupraleitung ermöglicht in vielen Anwendungen eine deutliche Effizienzsteigerung, Ressourceneinsparung und Optimierung des Bauraums. Deshalb werden Demonstratorprojekte im Bereich von supraleitenden Stromschienen für energieintensive Industrieprozesse und Energiekabel für die innerstädtische Stromverteilung entwickelt. Hierbei ist auch der Kontakt zu Akteuren in der Kälte- und Kryotechnik wichtig, um zügig zu optimierten Lösungen für aussichtsreiche Märkte zu kommen. Darüber hinaus sind aus Sicht des Forschungsfeldes weitere Anwendungsentwicklungen im Bereich von supraleitenden Strombegrenzern und Windkraftanlagen notwendig.

5.4 Forschungsfeld Thermoprozesstechnik

In der Industrie nehmen Thermoprozesse eine unverzichtbare Rolle ein, um Produkte herzustellen und deren Eigenschaften gezielt einzustellen. Insbesondere in den energieintensiven Sektoren wie der Stahl-, Glas-, Keramik- und Nicht-Eisenmetallindustrie sind solche Prozesse mit sehr hohen Temperaturen und einem entsprechenden Energiebedarf verbunden. Aufgrund des hohen Energiebedarfs und der damit verbundenen CO₂-Emissionen ist die Transformation der Thermoprozesstechnik von entscheidender Bedeutung für die Erreichung der Dekarbonisierungsziele. Dabei ist die Thermoprozesstechnik durch eine hohe Vielfalt gekennzeichnet: Viele Anlagen sind individuell auf die spezifischen Anforderungen des jeweiligen Produkts oder Rohstoffes ausgelegt. Die Anlagen zeichnen sich durch eine hohe Investition aus und sind im Allgemeinen auf eine lange Lebensdauer, teilweise über Jahrzehnte, konzipiert (Fleiter et al. 2023). Im Rahmen der Transformation ist dies ein wesentlicher Aspekt, der berücksichtigt werden muss.

5.4.1 Rückblick des Forschungsfelds

Das Forschungsfeld Thermoprozesstechnik hat sich im Jahr 2023 aus dem vorherigen Forschungsfeld „Metallerzeugung und -verarbeitung“ formiert. Mit dieser thematischen Erweiterung öffnet es sich für alle Branchen, in denen Prozesse bei besonders hohen Temperaturen – häufig über 1 000 °C – eine zentrale Rolle spielen. Organisatorisch ist das Forschungsfeld eng an die Forschungsgemeinschaft Industrieofenbau e.V. (FOGI) angegliedert, die sich aus der VDMA-Fachabteilung Thermoprozesstechnik heraus gebildet hat. Die Mitglieder sind in den Bereichen Erwärmen, Schmelzen und Gießen von Metallen, Wärme- und Oberflächenbehandlung von Metallen, Keramik und Glas sowie Feuertechnik tätig. Die Mitgliederstruktur der FOGI – bestehend aus Firmen und Instituten – spiegelt die industrielle Breite des Feldes wider.

Im Fokus steht die vorgelagerte, vorwettbewerbliche Forschung, insbesondere im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF). In diesem Rahmen wurden bereits zahlreiche Projekte durchgeführt, unter anderem zu folgenden Themen:

- Elektrifizierung industrieller Thermoprozessanlagen
- Energieeffiziente Ofensteuerung und Prozessoptimierung
- Integration von alternativen Brennstoffen
- Ressourcenschonung und Werkstoffrückgewinnung
- CO₂-Reduzierung

Diese IGF-Vorhaben dienen häufig als Grundlage für weiterführende Projekte im EFP. Die enge Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungseinrichtungen innerhalb der FOGI hat dazu geführt, dass viele Mitglieder auch an EFP-Projekten aktiv beteiligt sind.

Ein Blick auf das aktuelle EFP verdeutlicht die zentrale Rolle der Thermoprozesstechnik in der industriellen Transformation. Im 7. EFP wurden im Jahr 2023 rund 20 Verbundprojekte mit Fördersummen zwischen 1 bis 2 Millionen Euro pro Projekt über eine Laufzeit von etwa drei Jahren durchgeführt - das entspricht einem Fördervolumen von rund 10 Millionen Euro jährlich. Im aktuell laufenden 8. EFP (Stand 2025) liegt der Fokus verstärkt auf der Transformation der Wärmeerzeugung in industriellen Prozessen. Hierzu zählen insbesondere Projekte zur Substitution von Erdgas durch Wasserstoff (16 Projekte) und Ammoniak (4 Projekte), zur direkten Elektrifizierung (4 Projekte) sowie zur Effizienzsteigerung (7 Projekte). Diese Ausrichtung unterstreicht die strategische Bedeutung der Thermoprozesstechnik für die Energiewende in der Industrie.

5.4.2 Aktuelle Arbeiten des Forschungsfelds

Die Thermoprozesstechnik leistet einen sehr relevanten Beitrag zur Dekarbonisierung industrieller Prozesse. Vor dem Hintergrund energiepolitischer Zielsetzungen und volatiler Energiemärkte konzentriert sich die aktuelle Forschung auf die Entwicklung **nachhaltiger, effizienter** und **flexibler** Prozesse.

Die folgenden Themenbereiche sind besonders relevant und prägen die laufenden Arbeiten im Forschungsfeld:

Alternative Verfahren zur Prozesswärmeerzeugung

Ein zentrales Arbeitsfeld ist die Substitution fossiler Energieträger durch alternative Techniken und Energieträger zur Bereitstellung von Prozesswärme. Hierbei stehen aktuell besonders zwei Pfade im Fokus (Fleiter et al. 2023):

Der Einsatz **alternativer Brennstoffe** wie Wasserstoff, Ammoniak oder biogene Kohlenstoffträger wird intensiv erforscht. Dabei gilt es, sowohl die prozesstechnischen Anforderungen als auch die Wechselwirkungen mit Materialien und Abgasbehandlungssystemen zu berücksichtigen.

Parallel dazu rückt die direkte **Elektrifizierung** thermischer Prozesse in den Fokus. Verfahren wie Widerstandheizung, Induktion oder Plasmabrenner haben das Potenzial, Prozesswärme unmittelbar aus regenerativ erzeugtem Strom bereitzustellen. Derzeitige Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Weiterentwicklung der Hochtemperaturbeständigkeit, Systemintegration, Regelbarkeit und Anpassung bestehender Anlagentechnik.

Digitalisierung und intelligente Prozessführung

Im Zuge der digitalen Transformation industrieller Prozesse gewinnt die Digitalisierung auch in der Thermoprozesstechnik zunehmend an Relevanz. Die Integration digitaler Technologien, insbesondere **Künstlicher Intelligenz**, eröffnet neue Möglichkeiten zur Anlagenüberwachung, Lebensdauerprognose sowie zur adaptiven Prozessregelung. Ziel der aktuellen Forschung ist die Entwicklung datengetriebener Modelle, die eine zustandsorientierte Regelung ermöglichen und gleichzeitig die Betriebssicherheit sowie Ressourceneffizienz erhöhen.

Effizienzsteigerung und Anlagenoptimierung

Die Steigerung der Energieeffizienz stellt eine der grundlegenden Aufgaben in der Thermoprozesstechnik dar. Neben der Optimierung thermischer Prozesse selbst stehen dabei auch die Verbesserung von Wärmerückgewinnungssystemen, Minimierung von Wärmeverlusten und die gezielte Anpassung der Anlagentechnik im Fokus aktueller Projekte. Diese Ansätze leisten einen unmittelbaren Beitrag zur Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs und zur Senkung von Emissionen in der Prozesskette.

Flexibilisierung und Hybridisierung

Vor dem Hintergrund eines zunehmend fluktuierenden Energieangebots erweist sich die Anpassungsfähigkeit von Anlagen an variable Last- und Versorgungsprofile als entscheidend. Die Betriebsflexibilisierung umfasst sowohl den dynamischen Fahrbetrieb thermischer Anlagen als auch die bedarfsgerechte Einbindung von Energiespeichern. Parallel werden Strategien zum Anlagenumbau bestehender Systeme hin zu hybriden Konzepten entwickelt, etwa durch die Kombination elektrischer und fossiler/alternativer Heizsysteme (Fleiter et al. 2024a).

5.4.3 FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Forschungsfelds

Die Thermoprozesstechnik ist ein zentrales Querschnittsfeld energieintensiver Branchen und spielt eine Schlüsselrolle im Übergang zu einer klimaneutralen Industrie. Aufgrund ihres hohen Energiebedarfs – insbesondere für die Bereitstellung von Hochtemperaturprozesswärme – steht die Branche vor der Herausforderung, technische Lösungen zu entwickeln, die sowohl den Anforderungen der Dekarbonisierung als auch der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit gerecht werden.

Dabei reicht die notwendige Transformation weit über die Thermoprozessanlage hinaus. Die **systemische Relevanz von Thermoprozessanlagen** ergibt sich aus ihrer Einbindung in komplexe Energiesysteme, die Erzeugung, Umwandlung, Speicherung und Nutzung von Energie miteinander verknüpfen. Diese Zusammenhänge werden in Abbildung 5-6 veranschaulicht. Die Prozesswärmeerzeugung muss künftig nicht isoliert, sondern als integraler Bestandteil eines dynamischen Energiesystems gedacht werden – mit direkten Schnittstellen zu fluktuierender Stromerzeugung, Wasserstoff- und Ammoniakpfaden sowie flexiblen Nutzungsmöglichkeiten. Die Vielfältigkeit und systemische Relevanz dieses Feld verlangt individuelle, auf den Prozess zugeschnittene Lösungen, was die Komplexität der Forschung zusätzlich erhöht.

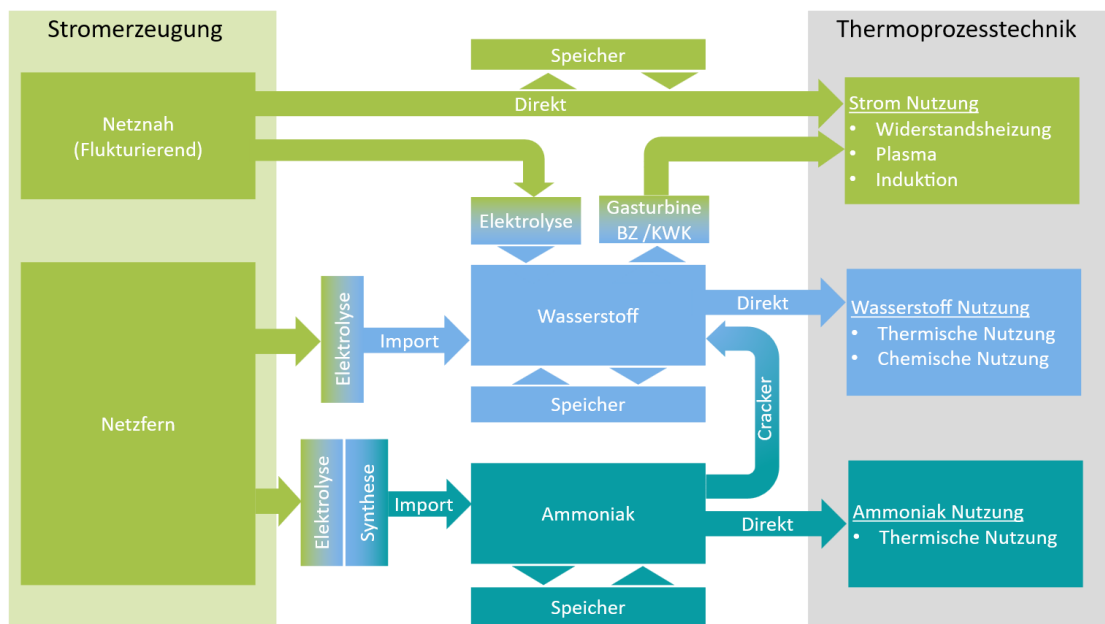


Abbildung 5-6: Thermoprozessstechnik im Kontext einer sich wandelnden Energieversorgung

Um die **CO₂-Neutralität** zu erreichen, sieht die Forschungsroadmap des Forschungsfeldes Thermoprozessstechnik als zentrales Ziel vor, nahezu alle thermischen Prozesse und die Prozesswärmeerzeugung CO₂-neutral zu gestalten. Dabei ist eine technikoffene, energieeffiziente sowie flexible Nutzung der verfügbaren erneuerbaren Energie (u. a. Strom, Wasserstoff und Derivate) wesentlicher Bestandteil der Forschungsaktivitäten. Zur Erreichung dieses Ziels stehen zwei Richtungen im Fokus: die Elektrifizierung und der Einsatz alternativer Brennstoffe.

Bis 2035 kommt der **Elektrifizierung** im Rahmen der Transformation zur klimaneutralen Thermoprozessstechnik eine Schlüsselrolle zu. Elektrische Beheizungsverfahren bieten in vielen Prozessen die Möglichkeit, fossile Energieträger ganz oder teilweise durch CO₂-freie Stromquellen zu ersetzen und damit Prozesswärme ganz oder weitgehend emissionsfrei bereitzustellen. Dies betrifft sowohl bestehende Anlagen, die auf elektrische Heizsysteme umgerüstet oder hybridisiert werden können, als auch den Neubau vollständig elektrifizierter Aggregate.

Verschiedene Techniken stehen hierfür zur Verfügung. Bereits etablierte Verfahren wie **elektrische Widerstandsheizelemente** (z.B. in Schmelzöfen in der Aluminiumindustrie) haben sich in bestimmten Anwendungsfeldern bewährt, stoßen jedoch bei hohen Temperaturen an Grenzen. Aktuell gibt es für die indirekte Beheizung mittels Widerstandsheizelementen maximale Einsatztemperaturen und eine begrenzte Lebensdauer. Für diese Anwendungen sind neue Ofenkonzepte und temperaturbeständige Werkstoffe erforderlich. Ein Beispiel für aktuelle Forschung ist das Projekt *HT-Heiz*, in dem neuartige Widerstandsheizelemente durch innovative Werkstoff- und Verfahrenskombinationen entwickelt werden. In einem anderem Projekt (*MatELHeat*), das im Rahmen des Leittechnologieprojekts *EnabEL* durchgeführt wird, ist die Alterung und Lebensdauer von Heizleitern in hybriden Beheizungskonzepten Thema. Es ist somit zentral, zukünftig Heizelemente zu entwickeln, die der starken Belastung während der Thermoprozesse standhalten und weiterhin eine lange Lebensdauer aufweisen.

Die induktive Erwärmung ist eine etablierte Technik in der Metallverarbeitung und ermöglicht industrielle Erwärmungsprozesse mit hoher Effizienz, Präzision und Freiheit von direkten Emissionen. Da Widerstandsheizungen hinsichtlich Temperatur und übertragbarer Leistungsdichte begrenzt sind, bieten induktive Lösungen besonders große Vorteile für die Schnellerwärmung, die lokale Erwärmung sowie Hochtemperaturanwendungen. Aktuelle Forschungsarbeiten konzentrieren sich daher auf diese Themen sowie auf den Ersatz erdgasbetriebener Prozesse. Im Fokus stehen dabei temperatur- und thermoschockbeständige Werkstoffe sowie die Steigerung von Effizienz und Flexibilität. Beispielhaft ist das Projekt *InduJet* (7. EFP), in dem klassische, erdgasbetriebene Brenner durch induktiv betriebene Heißgaserzeuger ersetzt werden sollen. Hierfür müssen temperaturbeständige Suszeptoren entwickelt und der Wirkungsgrad maximiert werden. Ein weiteres Projekt, *Re₂Pli*, untersucht den Einsatz der Induktion zur Erwärmung von Blechplatinen im Presshärteprozess als Ersatz für erdgasbeheizte Rollenherdöfen.

Plasmatechnologie ermöglicht extrem hohe Temperaturen und ist insbesondere für Prozesse interessant, bei denen konventionelle Heizmethoden an ihre Grenzen stoßen. Der Entwicklungsstand ist allerdings noch vergleichsweise gering.

Die Integration der elektrischen Beheizungstechniken steht vor systemischen Herausforderungen: Elektrisch betriebene Thermoprozessanlagen benötigen hohe Anschlussleistungen, die nicht überall verfügbar sind. Gleichzeitig erfordert die volatile Einspeisung erneuerbarer Energien flexible Lastprofile. Ohne geeignete Speichertechnologien und intelligente Betriebsstrategien drohen hohe Stromkosten und Netzeingriffe. Derzeit fehlen jedoch klare regulatorische Rahmenbedingungen – etwa zur CO₂-Bepreisung – sowie ökonomische Anreize, um Elektrifizierungsmaßnahmen wirtschaftlich umzusetzen. Ein wichtiger Forschungsansatz in diesem Zusammenhang ist das Projekt *HighPowHeat*. Ziel ist die Machbarkeitsuntersuchung für hohe elektrische Anschlussleistungen in Thermoprozessanlagen mittels Widerstandsheizerwärmung. Zukünftig muss die Elektrifizierung auf einen größeren Leistungsbereich bis zu mehreren Megawatt erweitert werden – eine zentrale Voraussetzung für den breiten industriellen Einsatz elektrischer Beheizung.

Anschließend an die Machbarkeitsuntersuchungen muss der entsprechende Aufbau von Pilotanlagen folgen.

Die elektrischen Anlagen müssen sich dabei an den realen (zukünftigen) Bedingungen orientieren. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung von Strom aus erneuerbaren Energien ergibt sich ein volatiler Strommarkt. Ein aktuelles Beispiel hierfür ist das Projekt *FlexLBO*, in dem flexible und energieeffiziente Fahrweisen für Lichtbogenöfen entwickelt und hinsichtlich ihrer ökologischen und ökonomischen Auswirkungen bewertet werden, um CO₂-Emissionen durch den gezielten Einsatz verschiedener Energieträger signifikant zu reduzieren. Diese Untersuchungen müssen für weitere Anlagen in der Thermoprozesstechnik durchgeführt werden. Aufgrund des hohen Energiebedarfs bietet ein flexibler Anlagenbetrieb die Möglichkeit, die Volatilität des Strommarktes abzufangen. Hierfür sind jedoch breite Untersuchungen notwendig. Zusätzlich ist die Integration von Speichertechnologie direkt an Thermoprozessanlagen möglich.

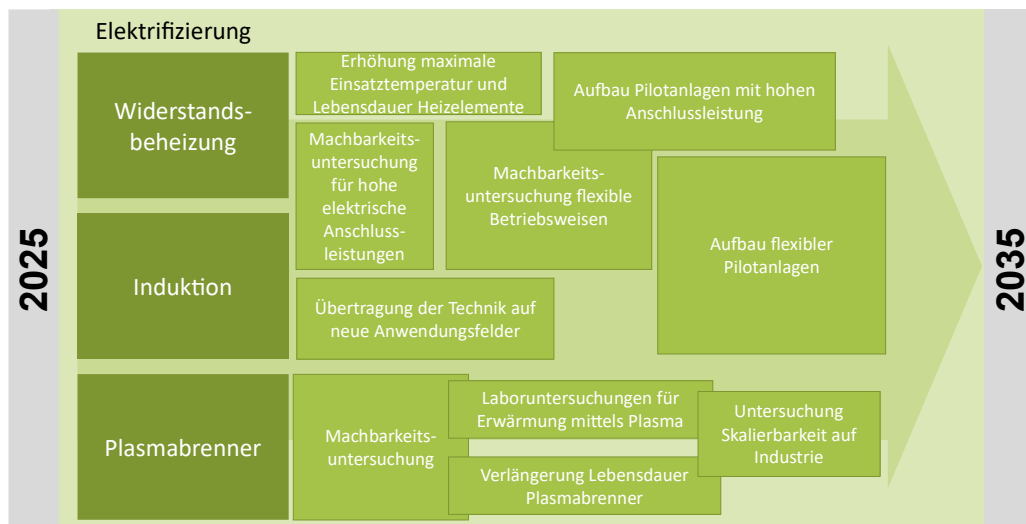


Abbildung 5-7: Forschungsthemen Elektrifizierung

Die wichtigsten **alternativen Brennstoffe** für die Thermoprozesstechnik sind Wasserstoff, Ammoniak und biogene Kohlenstoffträger. Die Verwendung dieser alternativen Brennstoffe sorgt für verschiedene Herausforderungen, welche im Rahmen von FuE Projekten vor einer großindustriellen Umsetzung adressiert werden müssen.

Die Veränderung der Brennstoffzusammensetzung (aufgrund eines vollständigen Wechsels oder durch das Mischen mehrerer Brennstoffe) führt zu Veränderungen des Verbrennungsprozesses, der Wärmeübertragung und der Abgase. Dies hat Folgewirkungen auf die Ofenmaterialien und dessen Lebensdauer, wie z.B. das Kriechverhalten (Projekt „*Flexible Ofenbetriebsweisen*“). Eine sichere und energieeffiziente Prozessführung muss im Einzelfall geklärt werden. Das Handling von Wasserstoff, Ammoniak und Sauerstoff ist mit eigenen sicherheitstechnischen Herausforderungen verbunden. Ohne eine vollständige sicherheitstechnische Beurteilung kann nicht geklärt werden, ob mit der Umstellung Mängel der Betriebssicherheit vollständig ausgeschlossen werden können. Bei der Verwendung von Strahlheizrohren zur Trennung von Verbrennungs- und

Produktatmosphäre ergeben sich zusätzliche Herausforderungen, da der Brennstoffwechsel zu einer veränderten Wärmebelastung führen kann, was unter anderem die Lebensdauer und die Produktqualität negativ beeinflussen kann. Auswirkungen von verschiedenen Brennstoffgemischen auf die Prozesstechnik wurden bzw. werden untersucht in Projekten wie „Hybrid-Fire“, „BrEEGa“ oder „FlexHeat2Anneal“. Auch in Zukunft ist mit weiteren Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet zu rechnen, insbesondere in Abstimmung auf die individuellen Anforderungen einzelner Prozesse (wie bspw. im aktuellen Projekt „H₂-Endogas“ auf den Aufkohlungsprozess).

Bei der Verbrennung von **Wasserstoff** anstelle von Erdgas gelten die Komponenten auf der Seite der Brennertechnik generell als einsatzbereit. Allerdings ist der Einfluss der Verbrennung von Wasserstoff anstelle von Erdgas für viele Einzelprozesse nicht ausreichend untersucht. Die Auswirkungen auf die Anlagen (Feuerfestmaterial, Lebensdauer) und die Produktqualität benötigen vor allem langfristige Demonstrationsprojekte an Pilotanlagen. Diese Untersuchungen sind aktuell Gegenstand von Projekten wie beispielsweise „H₂InHeat“, „ZeroCO₂Glas“, „H₂-EiPro“ und „Hybrid-Fire“, und werden branchenabhängig auch noch in den nächsten Jahren notwendig sein.

Im Bezug auf **Ammoniak** und bei der Verbrennung von Wasserstoff mit Luft ergeben sich zusätzliche Herausforderungen hinsichtlich der Steuerung der erzeugten Emissionen und des Messens im trockenen Abgas. Stickoxidemissionen können trotz Nutzung und Kombination von Minderungsmaßnahmen die heutigen bzw. zukünftigen gesetzlichen Vorgaben übersteigen. Zusätzliche FuE-Arbeiten, vor allem im industriellen Kontext, sind notwendig, um den emissionsarmen Betrieb erfolgreich zu demonstrieren. Dies ist ebenfalls erforderlich, um gesamtsystemische Lösungen, welche auch die Infrastruktur einbeziehen, erfolgreich zu demonstrieren. Da Ammoniak hoch korrosiv ist, wird ein speziell darauf abgestimmtes Transport- und Verteilnetz benötigt.

Bei Ammoniak stellt der Brennerbetrieb eine weitere Herausforderung dar. Die direkte Substitution von Erdgas durch Ammoniak in industriellen Brennern ist nicht möglich, da die verbrennungstechnischen Eigenschaften wesentliche Unterschiede aufweisen. Ammoniak besitzt eine eingeschränkte Zündfähigkeit (hohe Zündenergie und -temperatur) und eine deutlich geringere laminare Flammgeschwindigkeit sowie -temperatur im Vergleich zu Erdgas oder Wasserstoff. Der emissionsarme Verbrennungsbetrieb ist Gegenstand aktueller Forschungsprojekte wie „NH₃-Cracker“ oder „FLOXonia“. Hier ist ebenfalls damit zu rechnen, dass weitere Forschungsprojekte zur Nutzung von Ammoniak als Brennstoffalternative in Zukunft notwendig sind.



Abbildung 5-8: Forschungsthemen Alternative Brennstoffe

Es ist davon auszugehen, dass die **Digitalisierung** auch im Bereich der Prozesstechnik an Signifikanz gewinnen wird. Künstliche Intelligenz besitzt sowohl das Potenzial zur inkrementellen Verbesserung als auch zur exponentiellen Entwicklung. Der Einsatz der künstlichen Intelligenz eröffnet eine Vielzahl von Möglichkeiten, um die gesteckten Ziele unter den sich kontinuierlich wandelnden Rahmenbedingungen des Energiemarktes zu erreichen. In diesem Umfeld wird der flexible Energieeinsatz in Thermoprozessanlagen zunehmend relevant, um auf die schwankenden Einspeisebedingungen zu reagieren und die Aggregate systemdienlich zu fahren. Für diese zunehmend komplexen, teilweise hybrid beheizten Anlagen erweisen sich der breitflächige Einsatz von KI und ausreichende Digitalisierungsmaßnahmen als unabdingbar.

Zunächst ist ein Digitalisierungsschritt sowie eine Sammlung von Prozessdaten aus den spezifischen Betrieben erforderlich. Die Analyse der vorliegenden Daten dient zur Optimierung der Prozesse und hat somit eine Steigerung der Effizienz zur Folge. Eine Steigerung der Effizienz wirkt sich sowohl auf die Qualitätsmerkmale als auch auf den Energiebedarf und die bessere Ausnutzung der Anlagen aus. Die Entwicklung von Proven-in-use-Konzepten ist jedoch zwingend erforderlich, um eine flexible und effiziente Automatisierung sowie eine umfassende Datenbereitstellung in der breiten Anwendungspalette der Prozesstechnik zu gewährleisten.

Andererseits ist die künstliche Intelligenz auch in der Forschung von entscheidender Bedeutung. Sie ermöglicht eine weitschichtige, breitere Parameterbetrachtung, welche das Auffinden neuer Lösungen begünstigt. Gerade im Bereich der Materialforschung führen geringere Materialmengen sowie die Art der Wärmeprozesse zu neuen Eigenschaften.

Schließlich ist die Digitalisierung und Anwendung von künstlicher Intelligenz in dem zuvor genannten hybriden Vorgehen von entscheidender Bedeutung, um eine Optimierung zu erreichen. Aufgrund der sich ständig ändernden Rahmenbedingungen, wie beispielsweise dem Energiemarkt, ist eine automatisierte Anpassung unter Berücksichtigung der

erforderlichen Wärmebedingungen unabdingbar. Die Energiepreise stellen einen maßgeblichen Faktor bei den Maßnahmen im Bereich der Energie dar. Eine flexible Anpassung der Preise und Verfügbarkeit wird notwendig sein, beispielsweise im Hinblick auf die unterschiedlichen Angebote für elektrischen Strom und Wasserstoff. Aufgrund der Tatsache, dass Wärmeprozesse nicht kurzfristig umgestellt werden können, ist es ratsam, vorausschauend zu agieren und die Marktfluktuationen zu nutzen.



Abbildung 5-9: Forschungsthemen Digitalisierung

5.5 Forschungsfeld Tribologie

Die Tribologie beschäftigt sich im Gegensatz zur Strukturmechanik mit den Verbindungen von Elementen (Popov 2018) und dabei mit den Themenfeldern Reibung, Verschleiß und Schmierung (Gesellschaft für Tribologie e. V. 2002). In jedem technischen System von Maschinen und Anlagen gibt es zahlreiche tribologische Kontakte, die die maschinelle Umsetzung von industriellen Prozessen erst ermöglichen und einen großen Einfluss auf Effizienz und Nachhaltigkeit haben. Durch Optimierung tribologischer Kontakte zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß ergeben sich hohe Einsparpotenziale an Primärenergie (Woydt et al. 2023; Woydt et al. 2021; Woydt et al. 2019): So errechnen beispielsweise Holmberg und Erdemir (2017), die U.S. Advanced Research Projects Agency-Energy (2017) und Holmberg und Erdemir (2019) Einsparpotenziale zwischen 8 % und 24 % des Primärenergieverbrauchs.

5.5.1 Rückblick des Forschungsfelds

Die gewaltigen Einsparpotenziale stellen den Rahmen für bisherige, laufende und künftige Vorhaben des Forschungsfelds Tribologie (FFT) dar. Die im Zeitraum 2010 bis 2025 verfolgte Strategie lässt sich mit folgenden Stichworten beschreiben:

- Die Steigerung der Energieeffizienz und Lebensdauer technischer Systeme wurde volks- wie betriebswirtschaftlich und umweltpolitisch zunehmend wichtiger; das Interesse an reibungsmindernden Lösungen ist gestiegen.
- Insbesondere aufgrund der Anforderungen im Bereich der Mobilität stand die Reibungsminderung tribologischer Kontakte im Vordergrund; die CO₂-Gesetzgebung erzeugt hier seit Jahren immensen Druck.
- Für elektrische und elektromechanische Antriebssysteme wurde das tribologische Potenzial zur Reibungsminderung erkannt (Reichweite).
- Die 1990 erstmals beschriebene Superlubricity (extrem niedrige Reibungszahlen $< 0,01$) sollte in technischen Systemen realisiert werden; damit verbunden war die Entwicklung von neuen Materialien, Beschichtungen und Schmierstoffen.
- Es galt, mittels Modellierung und Simulation das Verständnis und die Messbarkeit der Superlubricity zu verbessern.
- Durch Querschnittsthemen sollten tribologische Systemansätze geschaffen und verbessert werden.

Die Umsetzung erfolgte in Verbundvorhaben, die sich unter unterschiedlichen Anwendungen den Querschnittsthemen und übergeordneten Fragestellungen gewidmet haben:

- Deutliche Absenkung von Reibung in vielen industriellen Anwendungen, z.B. Getrieben, Wälzlagern, Förderkettentrieben, Transportanlagen u.v.m.
- Reduzierung und Einstellung innermotorischer Reibung.
- Effiziente elektromechanische Antriebssysteme (E-Antriebe).
- Ertüchtigung der Messtechnik zum Nachweis von Superlubricity.
- Standzeiterhöhung von Maschinenelementen, insbesondere auch unter tribo-korrosiven Bedingungen („wasserhaltige Betriebsfluide“).

Eine zeitliche Übersicht der abgeschlossenen Vorhaben im FFT mit Zuordnung der betrachteten Anwendungsfälle und Technologien/Themen ist in Abbildung 5-10 gezeigt.

Die erreichten Effizienzsteigerungen sind erheblich. Exemplarisch sei auf Ergebnisse aus den Vorhaben PEGASUS II und CHEOPS³ verwiesen:

- In einem Achsgetriebe wurde durch verbesserte Zahnradoberflächen der Einsatz von sehr niedrigviskosen Getriebeölen ermöglicht. Während dabei die Wirkungsgrade marktgängiger Getriebeöle bei 94 – 95 % lagen, wurden mit dem besten, viskositäts-abgesenkten Öl im Rahmen von PEGASUS II knapp 98 % erreicht.
- Selbst diese Werte wurden in CHEOPS³ durch wasserhaltige Getriebefluide übertroffen, die insbesondere unter hoher Last auf bemerkenswert hohe Spitzenwirkungsgrade von bis zu 99,6 % kommen, was einer Verlustleistungseinsparung von 74 % entspricht (Sedlmair et al. 2021).

Die Ergebnisse der Vorhaben im FFT gelangten vor allem im Umfeld der Mobilität in die Umsetzung, weil dort die Regulierung durch konkrete CO₂-Vorgaben und vorhandenes

Kapital aufeinandertreffen. So wurden die in den ersten Vorhaben entwickelten Beschichtungen in der Serienfertigung von Ventiltrieben (100 Mio. Komponenten) und Kolbenringen (20 Mio. Komponenten), und neue Öle in Mengen von mehreren 10 000 t eingesetzt und so über 0,5 Mt CO₂ p.a. vermieden.

Projekt	Anwendungsfälle	Technologien/Themen	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
PEGASUS	PKW-Antriebsstrang; PKW-Achsgetriebe;	Grundlagen Superlubricity; Industrialisierung ta-C-Beschichtungstechnik; Schmierstoff- und Additiventwicklung;																
POSEIDON	Mediengeschmierte Wälzlager;	Korrosionsbeständige Wälzlagerstähle; Reibungsarme und überrollbeständige Schichtsysteme;																
PEGASUS II	PKW-Antriebsstrang; Motor-komponenten; Getriebe; Dichtung; Anlagentechnologie; Hydraulik;	Kohlenstoffbasierte Beschichtungen; Industrialisierung Beschichtungstechnik; Schmierstoff- und Additiventwicklung; Oberflächenstrukturierung;																
CHEOPS³	Motorradkette; Landmaschinenkette; Motorsteuerkette; Kettenritzel/-räder; Motorradgetriebe; Gleitlager-/ Gleitringdichtungskomponenten; E-Mobility-Getriebe; RangeExtender; (Bogenzahnkupplung);	Beschichtungen; Wasserhaltige Schmierstoffe; Schmierstoff- und Additivwechselwirkung; Trocken- und Minimalmengenschmierung																
POSEIDON II	Mediengeschmierte Wälzlager;	Randschichtbehandlung neuer tribokorrosionsbeständiger Wälzlagerstähle; Beschichtung Wälzlageringringe; Tribologische Modellierung und Validierung;																
Prometheus	Kolbenringe; Kolbenhemd für Motorrad/PKW-Motor; LKW-Motor und Industrie-/Großmotor;	Öl- und triboaktive Hochleistungs-kohlenstoff- sowie Eisenbassischichten;																
EWARP	Pumpen für Gebäude und Klimatechnik; Mediengeschmierte Gleitlager; Gleitringdichtungen;	Grafitwerkstoffe, Herstellungsprozesse;																
SULUTRIB	Tribometer für Superlubricity;	Messung ultra niedrige Reibung und Verschleiß;																

Abbildung 5-10: Zeitliche Übersicht der abgeschlossenen Vorhaben im Forschungsfeld Tribologie mit Zuordnung der betrachteten Anwendungsfälle und Technologien/Themen.

5.5.2 Aktuelle Arbeiten des Forschungsfelds

Derzeit laufen im FFT die beiden Vorhaben CHEPHREN und TurboGetEff, wobei sich CHEPHREN gerade im Abschluss befindet (siehe Abbildung 5-11). Das Verbundvorhaben TurboGetEff hat zum Ziel, die Effizienz von Turboantriebssträngen im Megawattbereich geräuschneutral und rotordynamisch sicher zu steigern. Das Vorhaben CHEPHREN hat zum Ziel, Superlubricity-Phänomene systematisch zu untersuchen und den Weg für die Erschließung breiter Anwendungsfelder zu ebnen.

Projekt	Anwendungsfälle	Technologien/Themen	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
CHEPHREN I+II	Zahnradgetriebe; E-Bike-Getriebe; Sondergetriebe; Förderketten-triebe; Steuerkettenritzel; Riemenrad; E-Achse; Wälzlager;	Beschichtungen; Innovative Schmierstoffe und Additive; Hochleistungskunststoffe;																
TurboGetEff	Turbogetriebe; Druckkamm; Gleitlager;	Einsatz von Druckkammern zur Effizienzsteigerung; Laufflächenprofilierung																

Abbildung 5-11: Zeitliche Übersicht der laufenden Vorhaben im Forschungsfeld Tribologie mit Zuordnung der betrachteten Anwendungsfälle und Technologien/Themen.

Abbildung 5-12 zeigt beispielhaft die Anwendungen und untersuchten Technologien im Verbundvorhaben CHEPHREN, in dem Superlubricity-Phänomene und neuartige Tribokörper, Schmierstoffe und Tribokonzepte anhand von 8 Anwendungsfällen von 13 Partnerinstitutionen aus Wissenschaft und Industrie systematisch untersucht wurden. Das Vorhaben ist ein gutes Beispiel für die Transformation tribologischer Themen aus der Mobilität in andere Anwendungsfelder, für die Wichtigkeit einer engen Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie und für den tribologischen Systemansatz durch Querschnittsthemen.

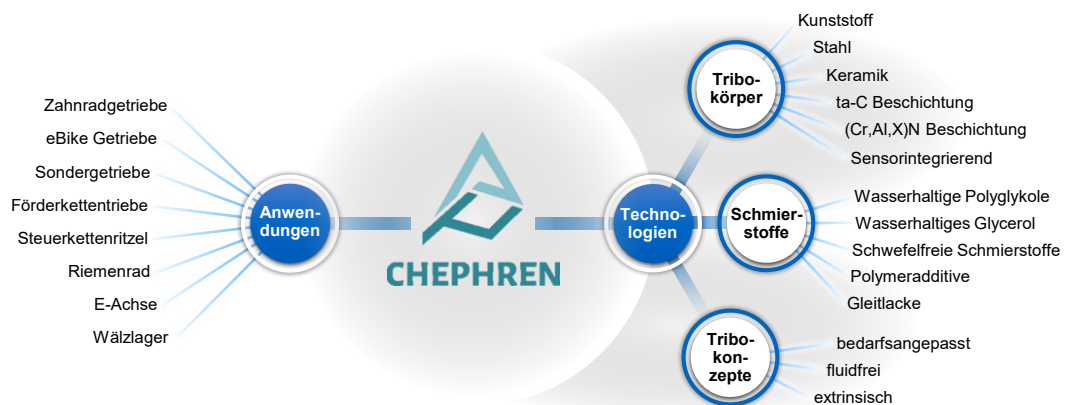


Abbildung 5-12: Betrachtete Anwendungen und Technologien im Verbundvorhaben CHEPHREN.

Das Kuratorium des FFT setzt sich derzeit aus 11 Mitgliedern zusammen, die ein ausgewogenes Verhältnis von Expertinnen und Experten aus Industrie und Wissenschaft repräsentieren. Das Kuratorium des FFT steht in engem Austausch mit der Gesellschaft für Tribologie (GfT). Die GfT fördert den Wissensaustausch und unterstützt die Tribologieforschung – z. B. durch Konferenzen, Publikationen, Workshops und Schulungen. Seit vielen Jahren hat sich auf der jährlichen GfT Tribologie-Fachtagung eine Sondersession zum FFT etabliert. In dieser stellen Forschende, Expertinnen und Experten ihre Ergebnisse vor und ermöglichen so einen Einblick in neueste Entwicklungen, Herausforderungen und Lösungswege. Der Austausch auf der GfT Tribologie-Fachtagung ist insbesondere für den Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis sowie für das Erkennen von tribologischen Herausforderungen wesentlich. Auch die Öffentlichkeitsarbeit wird regelmäßig mit der GfT abgestimmt, wie z. B. ein gemeinsamer Beitrag in der GfT Festschrift 2025 und auf der Homepage des FFT (Forschungsnetzwerke Energie 2024). Im Rahmen der 65. GfT Tribologie-Fachtagung 2024 wurde in Zusammenarbeit mit der Begleitforschung eine

große Umfrage zur Bedeutung der Tribologie durchgeführt, die den FuE-Bedarf zu tribologischen Fragestellungen verdeutlicht (ETA-Solutions GmbH).

Trotz der breiten industriellen Relevanz und des hohen FuE-Bedarfs tribologischer Fragestellungen findet sich der Begriff „Tribologie“ nicht direkt im 8. EFP. Die Tribologie ist thematisch jedoch vielen Missionen und Programmzielen zugeordnet. Die fehlende Benennung des Begriffs „Tribologie“ im 8. EFP führt dazu, dass Vorhaben mit tribologischen Fragestellungen heute nur indirekt adressiert werden können.

5.5.3 FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Forschungsfelds

Die Hebung von Einsparpotenzialen durch Reibungsreduktion in Maschinen und Anlagen in Produktion und Nutzungsphase wird auch künftig eine große Rolle spielen. Aus heutiger Sicht ist allerdings zu erwarten, dass sich die Schwerpunkte der tribologischen Forschung verschieben werden: Der Wunsch nach maximaler Energieeffizienz steht zunehmend im Kontext sich verknappender oder nicht mehr verfügbarer Ressourcen sowie legislativer und geopolitischer Veränderungen. Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit, Zuverlässigkeit und verlängerte Lebensdauer oder Wiederverwertbarkeit müssen gegenüber den rein technischen Anforderungen ausbalanciert werden. Durch volatile Randbedingungen werden zunehmend Marktverwerfungen in den Lieferketten resultieren, denen mit konstruktiver Robustheit und Resilienz bestehender Produkte begegnet werden muss, sowie mit schnellerer Entwicklung neuer Produkte. Aufstrebende Technologiefelder, wie beispielsweise künstliche Intelligenz (KI) und neue Sensortechnologien, können hier wesentliche Beiträge liefern.

Hauptthemenfelder und Ziele des FFT

Abbildung 5-13 zeigt die erwarteten Hauptthemenfelder und Ziele des FFT sowie deren Zuordnung zur Energie- und Ressourceneffizienz.

Die erkennbare, drastische Reduzierung des bestehenden Lösungsraumes zur Auslegung tribologischer Kontakte in Maschinen und Anlagen macht die Suche nach neuen und insbesondere *nachhaltigen Materialien und Schmierstoffen* unausweichlich. Dies gilt insbesondere für das Ziel der Wirkungsgradmaximierung und Lebensdauersteigerung als wesentlicher Stellhebel für die Steigerung der Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz entlang des Produktlebenszyklus. Verschleiß ist hierbei einer der zentralen lebensdauerbegrenzenden Schädigungsmechanismen, sodass neue Lösungen zur Verschleißminderung bzw. gänzlichen Verschleißvermeidung zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen werden, wozu innovative und kostengünstige Fertigungs- und Bearbeitungsverfahren beitragen.

Hauptthemenfelder	Ziele	Energieeffizienz		
		in der Produktion	Energieeffizienz in der Nutzungsphase	Ressourceneffizienz
Nachhaltige Materialien und Schmierstoffe	Wirkungsgradmaximierung	●	●	●
	Steigerung Langlebigkeit/Instandsetzung	●		●
	Enabling neuer Produkte / Technologien	●	●	
Virtuelles Design für Effizienz, Robustheit und Resilienz	Reduzierung Time-to-Market		●	
	Zuverlässige Auslegung		●	●
Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen	Reduzierung von Ausfallzeiten	●	●	●
	Absenkung Reparaturkosten	●		●

Abbildung 5-13: Erwartete Hauptthemenfelder und Ziele im Forschungsfeld Tribologie sowie deren Zuordnung zur Energie- und Ressourceneffizienz.

Die Entwicklungszeit von tribologischen Kontakten in Maschinen und Anlagen war in der Vergangenheit stark von Umfang und Dauer experimenteller Testreihen dominiert. Die sich verändernden globalen Märkte führen zu einem massiven Kosten- und Zeitdruck (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. 2024) in der Entwicklung (Time-to-Market). Wesentliche Schlüssel, um als deutsche Industrie konkurrenzfähig zu bleiben, sind daher umfassende Simulationswerkzeuge, die über *virtuelles Design* die Entwicklungsgeschwindigkeit beschleunigen, sowie tribologische Auslegungsmethoden, welche die Erprobungsaufwände drastisch reduzieren. Damit werden „Digitale Zwillinge“ mittelfristig das Instrument zur schnellen Auslegung und Modifikation tribologischer Kontakte. In diesem Zusammenhang ist als zunehmend wichtiger Aspekt die Beschreibung der chemischen Prozesse im tribologischen Kontakt zu nennen, die sog. Tribochemie.

Die *Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen* ist teilweise bereits eine zuverlässige Methode, um Stillstandszeiten und Reparaturkosten zu senken. Neue Methoden zur Zustandsüberwachung von Produkten und Anlagen z. B. mittels KI-gestützter Schadensfrüherkennung können den zuverlässigen Betrieb von Energieanlagen weiter absichern. Neue Sensortechnologien bieten das Potenzial, auch bei Consumer-Produkten die Ressourceneffizienz erheblich zu erhöhen. Für „Digitale Zwillinge“ können mit einfachen Sensoren (z. B. Temperatur) reale Betriebsdaten von Anlagen mit Vorhersagen durch Computermodelle abgeglichen werden, um durch "Rückwärtssimulation" (Hindcasting) die Zuverlässigkeit der Vorhersagen zu testen und die Genauigkeit zu verbessern.

Erwartete Themenschwerpunkte im FFT bis 2035

Das FFT liefert wichtige Beiträge zur Zielerreichung des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe und insbesondere auch zu den Missionen und Zielen des 8. Energieforschungsprogramms. Diese Beiträge bestehen sowohl im Transfer von bisher im Rahmen von Verbundvorhaben des FFT entwickelter Technologielösungen auf bislang kaum berücksichtigte Industriezweige, als auch in der Erforschung neuer technologischer Ansätze im Rahmen der Hauptthemenfelder. Abbildung 5-14 ordnet den erwartenden Hauptthemenfeldern des FFT konkrete Themenschwerpunkte zu, ergänzt um den Transfer von tribologischen Technologien zur Steigerung der Marktdurchdringung.

Nachhaltige Materialien und Schmierstoffe

Die Entwicklung praxisgerechter Kombinationen aus Materialien und Schmierstoffen für tribologische Kontakte zur Reibungsminimierung (Superlubricity) wird auf absehbare Zeit weiterhin ein zentraler Themenschwerpunkt des FFT bleiben. Die Herausforderung für die Zukunft besteht zum einen in der Hebung von Kostenpotenzialen und der Steigerung der Robustheit von Superlubricity. Zum anderen gilt es, den sich verändernden Rahmenbedingungen der Ressourcenbeschaffung und Gesetzgebung Rechnung zu tragen und nachhaltig verfügbare Lösungen zu entwickeln.

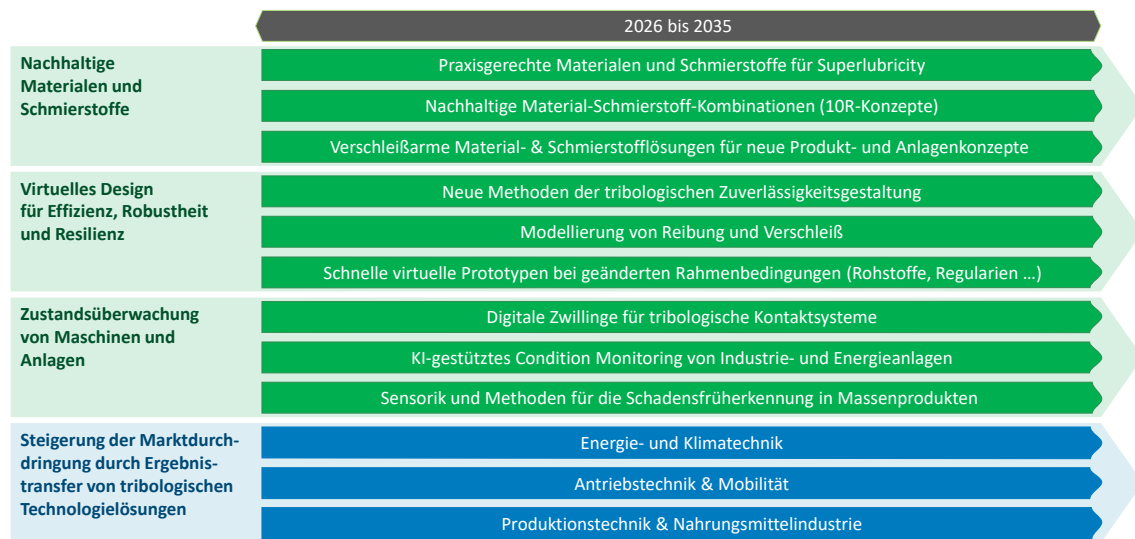


Abbildung 5-14: Hauptthemenfelder mit erwarteten Themenschwerpunkten im Forschungsfeld Tribologie sowie Anwendungstransfer von tribologischen Technologielösungen.

In Bezug auf Schmierstoffe umfasst dies sowohl den zukünftig verstärkten Einsatz synthetischer Grundöle (Kohlenwasserstoffe, Esteröle, Polyglykole) und wasserhaltiger Schmierstoffe als auch die verstärkte Verwendung von Re-Raffinaten, sowohl aus petrochemischen wie oleochemischen Quellen (Altspeisefette), und nachwachsenden Rohstoffen (aus Bio-Raffinerien). Im Zusammenhang mit dem 10R-Ansatz sind angepasste Schmierstoffe anzustreben, z. B. Konzepte zur Nachadditivierung, Aufarbeitung, zum Downgrading u.a. Hier ist auch die gezielte Formulierung von Schmierstoffen in Hinsicht auf Aufarbeitungskonzepte einzuschließen ("Formulation to Recycling"). Auf der Seite der Materialien steht die Abbildung einer verschleißarmen und rauheitsoptimierten Oberfläche im Vordergrund, um dauerhaft optimale Schmierungsbedingungen zu gewährleisten. Dies beinhaltet sowohl klassische Hartstoffschichten (ta-C, a-C:H ...) als auch neue Lösungen wie Polymer Coatings. Auch systemische Lösungen wie die intrinsische Schmierung oder andere Konzepte der Minimalmengenschmierung können wichtige Beiträge liefern.

Im Kontext der nachhaltigen Reibungsminimierung ist gerade auch das Enabling neuer Produkt- und Anlagenkonzepte für die Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz ein zentraler Aspekt des Themenschwerpunkts. Beispielsweise fehlen derzeit Materialkonzepte für den verschleißarmen Betrieb von stationären Großmotoren für die Energieerzeugung mit alternativen Kraftstoffen (z. B. Wasserstoff), um einen wirtschaftlichen und langfristigen Anlagenbetrieb mit häufigen Hochfahrzyklen zu gewährleisten.

Virtuelles Design für Effizienz, Robustheit und Resilienz

Um unter zunehmend volatilen Randbedingungen neue Produkte schnell am Markt platzieren und bestehende Systeme robust gegen kurzfristige Marktstörungen anpassen zu können, ist die beschleunigte Entwicklung digitaler Methoden und Systeme erforderlich. Grundlage hierfür ist der Ausbau der Methodik für die Zuverlässigkeitsgestaltung tribologischer Kontaktsysteme, die aktuell noch nicht für alle relevanten tribologischen Kontakte im ausreichenden Maße vorhanden ist.

Die simulative Abbildung tribologischer Kontakte für eine virtuelle Auslegung benötigt detaillierte Kontaktmodelle und statistische Auslegungsansätze, die in der Lage sind, mit Hilfe von Optimierungsverfahren und Methoden der Uncertainty Quantification Reibkräfte und Verschleißraten für alle relevanten Betriebsbereiche vorherzusagen und Toleranzen und Steuerungen von Materialkennwerten in adäquater Form mit einzubeziehen. Für Modellparameter wie Reibungs- und Verschleißkoeffizienten sind geeignete Prüftechniken zu entwickeln und zu standardisieren.

Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen

Um die neuen Entwicklungen in der Sensortechnik im Rahmen der Zustandsüberwachung und Schadensfrüherkennung optimal einsetzen zu können, ist die Entwicklung digitaler Zwillinge auf Basis der bereits erwähnten Simulationsmodelle für das virtuelle Design anzustreben, wobei dieses Ziel zwei Aspekte umfasst: die digitale Repräsentanz der Systeme (Vorhersage) und die Rückmeldung aus der Anwendung mittels Sensoren (Ist-Zustand).

Entscheidend für eine erfolgreiche Schadensfrüherkennung und Prognose der Restlebensdauer („predictive health management“) ist neben der Entwicklung von hochsensitiven Sensoren und geeigneten Simulationsmodellen auch die Erforschung des Zusammenhangs von Sensorsignal und der auftretenden Schadensart, um für die Lebensdauer Vorhersage im digitalen Zwilling den korrekten Modellansatz initiieren zu können. Elementar ist hier die Nutzung der Methoden des maschinellen Lernens, um bereits kleinste Anomalien in der richtigen Weise interpretieren zu können.

Steigerung der Marktdurchdringung durch Transfer von tribologischen Technologien:

Ein wesentlicher Nutzungsschwerpunkt der Ergebnisse aus dem FFT lag in der Vergangenheit auf dem Automobilsektor (Abschnitt 5.5.1). Eine Analyse der bisherigen Verbundvorhaben zeigt, für welche Anwendungsfelder und Industriezweige zukünftig ein besonders großes Transferpotenzial der bisherigen tribologischen Technologielösungen besteht. Dies sind unter anderem:

- Wärmepumpen, Klimageräte und Kompressoren für das Wasserstoffnetz
- Mobile und stationäre hydraulische Systeme
- Baumaschinen, Bausektor und Landwirtschaft
- Produktionstechnik (u.a. Werkzeugmaschinen, additive Fertigung, Fördertechnik)
- Robotik, Klein-Fluggeräte und Drohnen
- Nahrungsmittelindustrie – Ernte-, Produktions- und Abfüllmaschinen

Dabei sind als übergeordnete Tendenzen der zunehmende Einsatz von Kunststoffen in tribologischen Kontakten und der Betrieb von tribologischen Kontakten unter elektromagnetischen Randbedingungen festzustellen.

Konkrete Verbundvorhaben und Mikroprojekte im FFT bis 2030

Aus dem querschnittlichen Charakter des FFT ergibt sich, dass die in Abbildung 5-14 beschriebenen Themenfelder zunächst anhand von Fokusanwendungen entwickelt und in einer zweiten Phase in die Breite getragen werden. Derzeit werden konkrete Vorschläge für Verbundvorhaben und Mikroprojekte bis 2030 durch das Kuratorium des FFT gesammelt und geplant. Abbildung 5-15 zeigt den aktuellen Stand.

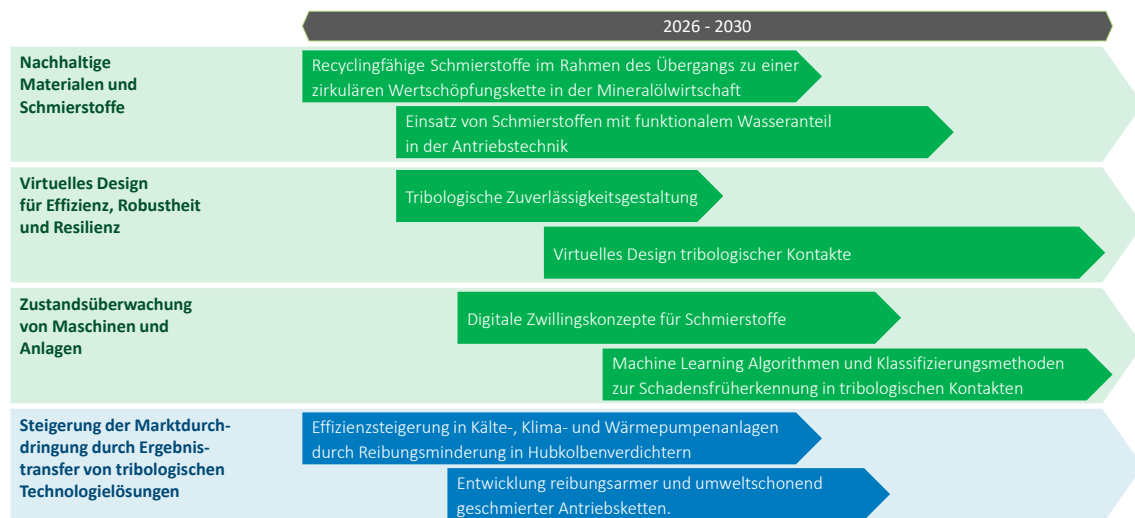


Abbildung 5-15: Konkrete Vorschläge für Verbundvorhaben und Mikroprojekte im Forschungsfeld Tribologie bis 2030.

5.6 Forschungsfeld Wärme und Abwärme

Der Prozesswärmebedarf in Deutschland beträgt ca. ein Viertel des Endenergiebedarfs und ist für über 25 % der CO₂-Emissionen verantwortlich. Industrielle Prozesse können sehr unterschiedlich sein. Die benötigte Wärme deckt eine breite Vielfalt an Temperaturanforderungen von Prozesskälte bei – 40 °C bis zu Hochtemperatur-Anwendungen für Zement oder Glas bei über 1 000 °C ab.

Das Ziel der Aktivitäten im Forschungsfeld Wärme und Abwärme ist eine klimaneutrale Bereitstellung von Prozesswärme vornehmlich durch erneuerbare Energiequellen. Diese werden voraussichtlich hauptsächlich in Form erneuerbarer Elektrizität aus PV und Wind zur Verfügung stehen. Daher werden Power-to-Heat Technologien (PtH) im Zusammenspiel mit thermischen Speicherungs-lösungen stark an Bedeutung gewinnen. Diese Kombination wird auch als „flexible Sektorkopplung“ bezeichnet.

Neben der Integration Erneuerbarer wird auch die Nutzung von industrieller Abwärme zu den Klimazielen beitragen können. Die Hebung von Abwärmepotenzialen wird zu einer Steigerung der allgemeinen Energieeffizienz beitragen.

Dabei sind weitere technische Entwicklungen bei der Aufnahme der Abwärme (Wärmeübertrager und weitere Komponenten), aber auch eine verbesserte Kenntnis des Wärmebedarfs auf der Nutzerseite wichtig. Unter Umständen steht die aufgenommene Abwärme nicht bei der gewünschten Temperatur oder zum gewünschten Zeitpunkt zur Verfügung. Eine Temperaturanpassung durch Wärmepumpen oder Kältemaschinen, sowie der Einsatz thermischer Energiespeicher zur zeitlichen Anpassung kann die Nutzung von Abwärme erweitern bzw. überhaupt erst ermöglichen.

5.6.1 Rückblick des Forschungsfelds

Mit kleineren Verbundvorhaben wurden bereits zu Beginn der 2000er Jahre innovative Technologien zur Abwärmennutzung, -speicherung und -rückgewinnung erforscht. Beispielsweise Rekuperatoren, Dampfspeicher aber auch Phasenwechselmaterialien (PCM). In diesem Fall Salze, die ihren Aggregatzustand ändern, dabei Wärme aufnehmen und durch Kristallisation wieder abgeben. Weiterhin wurde der Organic Rankine Cycle (ORC) weiterentwickelt, bei dem Dampfturbinen mit einem anderen Arbeitsfluid als Wasserdampf betrieben werden, oder Thermoelektrische Generatoren, die Abwärme nutzen um Strom zu erzeugen. Hier stand entweder die Materialentwicklung oder die Systemoptimierung im Vordergrund. Auch Kältemaschinen z.T. durch Abwärme angetrieben, wurden untersucht.

Durch die ressortübergreifende „Förderinitiative Energiespeicher“ (damals von BMWi, BMBF und BMU gefördert) wurden von 2012-2018 FuE-Projekte zu industriellen thermischen (Hochtemperatur-)Speichern durchgeführt. In Nachfolgevorhaben kam es dadurch zu einer Schwerpunktbildung „thermische Energiespeicher“ im Förderbereich. Die grundlegende Thermodynamik, Material- und Komponentenentwicklung bis zum Labor- und

Technikumsmaßstab war Ziel der Projekte. Kostengünstige thermochemische Materialien (TCM), aber auch Latentwärmespeicher mit PCM, z.B. Natrium- oder Kaliumnitrate sowie Salzschnmelzen, und deren Zusammenspiel mit der Komponentenentwicklung für Speichersysteme, wie Verkapselung oder Wärmeübertragerentwicklung, sowie die Weiterentwicklung sensibler Wärme- und Kältespeicher standen dabei im Fokus.

Mit Gründung der Forschungsfelder innerhalb des Forschungsnetzwerkes Industrie und Gewerbe wurde das Thema Abwärmenutzung im Jahr 2017 zunächst konkret zusammengefasst und als wichtiger Schwerpunkt sichtbar gemacht. Die Ausweitung der vorhergehenden Aktivitäten hin zu konkreten Demonstrationsvorhaben schloss auch Energiespeicherthemen ein. Gleichzeitig wurden energieintensive Wirtschaftszweige auf die innovativen technischen Möglichkeiten aufmerksam oder setzten bestehende Kooperationen mit FuE-Einrichtungen fort. Das Forschungsfeld erarbeitete eine Systematisierung von Technologien und deren anwendungstechnische Einbindung sowie die Identifikation von Forschungslücken. Diese konnten wiederum für die Ausarbeitung des Förderauftrages „Klimaneutrale Wärme und Kälte“ vom 15.09.2022 genutzt werden. Hier wurde zum ersten Mal das Format der Mikroprojekte erprobt und etablierte sich neben den üblichen FuE-Projekten. Thematisch wurden vorrangig Technologieweiterentwicklungen mit passenden Konsortien aufgegriffen (z.B. für Trocknungsprozesse) oder innovative Ansätze mit PCM, bspw. durch Ausnutzung der Materialausdehnung für die Druckluftherzeugung.

In das 8. Energieforschungsprogramm vom Mai 2024 bettet sich der Themenkomplex „Wärme und Abwärme“ nunmehr in die Mission „Wärmewende 2045“ mit einem wichtigen Sprinterziel ein, das die Implementierung von Energiespeichern bis 2045 vorsieht. Aufgrund der zunehmenden Relevanz der Sektorkopplung und dem steigenden Bewusstsein für die Notwendigkeit, Energie zu speichern um Dargebot und Nutzung zu entkoppeln, auch in der Industrie, werden die Mission Stromwende 2045 und Energiesystem 2045 gleichermaßen adressiert.

5.6.2 Aktuelle Arbeiten des Forschungsfelds

Der Kuratoriumsvorsitz des Forschungsfelds ging im Herbst 2024 von Herrn André Schlott an Herrn Andreas Hauer über. Seitdem haben zwei Treffen stattgefunden (online und hybrid in Berlin), um das Kuratorium neu zu besetzen. Im Rahmen dessen wurde auch die Themenstruktur des FF Wärme und Abwärme neu erarbeitet (Abbildung 5-16). Den bisherigen Treffen haben unter anderem VertreterInnen des BMW, des PtJ, aus der Forschung und Entwicklung sowie der Industrie beigewohnt. Ziel ist es, vermehrt Vertreter und Vertreterinnen aus der Industrie, als den potenziellen Nutzern der betrachteten Technologien, in die gemeinsamen Diskussionen einzubinden.

Wärme- (Kälte-) Bereitstellung

- Bedarf Prozesswärme / -kälte
- Erneuerbare Wärme (Solarthermie, Biomasse, Geothermie,...)
- Erneuerbare Elektrizität (Wärmepumpen, Kältemaschinen)
- Energiespeicher (elektrisch, chemisch, thermisch)
- Wärmequelle Abwärme

Abwärmennutzung

- Abwärmepotenziale
- Wärmeaufnahme (Wärmeübertrager, ...)
- Abnehmer thermischer Energie (intern, extern)
- Temperaturanpassung (Wärmepumpe, Kältemaschinen)
- Zeitliche Anpassung (thermische Energiespeicher)

Abbildung 5-16: Neue Themenstruktur des Forschungsfeldes Wärme und Abwärme

Auf Grund des erst kürzlich gebildeten neuen Kuratoriums, wurden noch keine explizit neuen Aktivitäten in Form von Projekten innerhalb des FF Wärme und Abwärme gestartet. Tabelle 5-4 zeigt Projektbeispiele der Kuratorinnen und Kuratoren, welche sich sowohl zu den Aktivitäten des FF Wärme und Abwärme als auch den Inhalten des 8. EFP einordnen lassen und eine gute Basis für weitere Aktivitäten innerhalb des FF bilden.

Tabelle 5-4: Auswahl aktueller Vorhaben des Forschungsfelds Wärme und Abwärme

<u>Projekt</u>	<u>Partner</u>	<u>Ziele</u>	<u>Inhalte</u>
PCM-Grid Elektrischer Dampferzeuger mit Speicherfunktion DLR e. V. - Institut für Technische Thermodynamik	Viessmann, RuLa BRW, Fraunhofer IFAM, Knauf Interfer (Ass.= Progroup (Ass.))	Elektrisch beladener Rippenrohrlatentwärmespeicher zur Prozessdampfbereitstellung (Demonstrator) und Pillow-Plate-Latentwärmespeicher im Labormaßstab	• Digitale Tools zur technischen Auslegung von Latentwärmespeichern • Qualifizierung elektrisch beladener Rippenrohrlatentwärmespeicher für den industriellen Einsatz • Bestimmung des Potentials des Pillow-Plate Design zur Reduktion der Investitionskosten • Nutzen eines Digitalen Zwillings zur Prozesssteuerung und -überwachung
urbanHEAT Universität Kassel	MAN Truck & Bus SE, N-ERGIE Netz GmbH, Volkswagen AG	Dekarbonisierungs-Roadmap für die Wärmeversorgung von MAN Nürnberg	• Optimierung Fernwärmeanschluss für Industriestandorte mit hohen Rücklauftemperaturen. • Interaktion zwischen Industrie und Fernwärme (z. B. prädiktive Regelstrategien). • Anreiz- und Tarifmodelle für Effizienzmaßnahmen in Fernwärmenetzen. • Übertragbarkeit auf andere Fernwärmenetze und Industriestandorte.
iAST ZAE Bayern	Gießerei Heunisch GmbH, Küttner GmbH & Co.KG	Demonstration der Nutzung diskontinuierlicher industrieller Abwärme bei über 100°C durch Wärmespeicher	• Entwicklung eines Zweistoffspeichers - Feststoffschüttung im Direktkontakt mit Wärmeträger Öl –in einem drucklosen System. • Übertragung Entwicklungsergebnisse auf einen Demonstrator
FENOPHES Kraftblock	Fraunhofer ISE	• Testen eines sensiblen Speichermediums zur Abwärmenutzung • Optimierung von Prozesseffizienz durch Wiederverwendung von Abwärme • Optimierung von Speichermaterial	• Messung des Abwärmepotenzials in Keramikmanufaktur • Vergleich zwischen Salzschnmelze- und sensiblen thermischen Speichern • Bau und Integration eines Demonstrators für einen Ofen • Wärme aus Abgas wird gespeichert und für Vorwärmung des Ofens oder des Gases wiederverwendet, um bei Kaltstarts oder generell den Primärenergiebedarf zu senken

5.6.3 FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Forschungsfelds

Konkrete zukünftige Verbundvorhaben können auf Grund des erst kürzlich geformten Kuratoriums aktuell noch nicht genannt werden (siehe oben). Der folgende Inhalt bezieht sich vor allem auf die Diskussionen im Rahmen des Kuratoriums und der vergangenen oben genannten Treffen.

Die Zusammenhänge des Themenspektrums mit den Zielen des aktuellen 8. Energieforschungsprogramms sind vielfältig. Die aktuell durchgeführten (siehe Beispiele oben) Aktivitäten der Kuratoren und Kuratorinnen fallen insbesondere unter die folgenden Programmziele der Mission Wärmewende des 8.EFP:

- Programmziel 2: *Wärme- und Kälteversorgung in Industrie und Gewerbe defossilisieren und effizienter machen*, im Speziellen 2.1, 2.2, 2.4 und 2.5
- Programmziel 3: *Robuste Infrastruktur zum effizienten Verteilen und Speichern von Wärme und Kälte gestalten*, im Speziellen 3.1, 3.3 und 3.4
- Programmziel 4: *Flexibilitätpotenzial des Wärme- und Kältesektors nutzen*, im speziellen 4.1 und 4.2

Darüber hinaus betreffen die folgenden Sprinterziele innerhalb der Mission Wärmewende das FF Wärme und Abwärme:

- „Bis 2030 werden in Industrieprozessen Hochtemperatur-Wärmepumpen genutzt, die Prozesswärme über 300 °C bereitstellen können.“
- „Das Ziel der Erdwärmekampagne² des BMWK, in der mitteltiefen und tiefen Geothermie bis zum Jahr 2030 ein geothermisches Potenzial von 10 TWh zu erschließen, wird von der Energieforschung durch die Weiterentwicklung insbesondere des Angebotes und der Bewertung von Untergrunddaten und der Entwicklung moderner Explorationstechnik aktiv unterstützt.“
- „Bis 2030 sind jeweils drei Speicherlösungen beziehungsweise -systeme für den Industrie- und den Quartiersbereich im Einsatz, die Überschussenergie (aus EE-Strom, Abwärme oder Solarthermie) so kosteneffizient speichern, dass die entladene Nutzwärme (ggf. in Kombination mit Wärmepumpen) preislich konkurrenzfähig zur Wärmeerzeugung aus Strom oder synthetischen Brennstoffen ist.“

Im Folgenden wird verdeutlicht, welche Art von Forschungsprojekten in den kommenden Jahren aus Sicht des Kuratoriums im Themenspektrum des Forschungsfeldes besondere Relevanz haben und Priorität genießen sollten:

Förderung von Machbarkeitsstudien (z.B. über Mikroprojekte): Diese senken zum einen die Hemmschwelle für die konkrete Planung und Beantragung größerer öffentlich geförderter Projekte. Zum anderen werden Folge-Projekte dadurch effizienter, da in Machbarkeitsstudien die Umsetzbarkeit der Ziele klar definiert wird. Machbarkeitsstudien helfen dabei die Industriebedarfsseite zu klären, den Austausch mit der Industrie zu stärken und Bedarfe und deren Hemmnisse zu analysieren.

Demonstrationsprojekte und Methodenentwicklung: Demonstrationsprojekte ermöglichen es, die Sichtbarkeit der neuen Technologien beim Endanwender zu erhöhen und Vertrauen in neue Systeme und Technologien zu schaffen. Als wichtig wird dabei die Demonstration einerseits von Einzeltechnologien und Anwendungen als auch andererseits des Zusammenwirkens der unterschiedlichen Technologien für die Dekarbonisierung gesehen. Beispielsweise Projekte in denen das gesamte Abwärme- und Effizienzpotenzial eines Industriestandortes (siehe „urbanHeat“-Projekt) durch optimierten Einsatz von Wärmepumpen gehoben wird oder die erfolgreiche Elektrifizierung von industriellen Prozessen gezeigt werden kann. Dies erfordert:

- a) Neue Designmethoden für integrierte Energiesysteme, zur Unterstützung der Transformationspfade. Hierbei soll die Konzeptentwicklung für die Deckung des Wärmebedarfs bzw. die Nutzung von Abwärmepotenzialen mit innovativen Methoden unterstützt werden.
- b) Neue Methoden zur Optimierung, Überwachung und Steuerung des Betriebs hochintegrierter Systeme (inkl. digitale Zwillinge, Ausnutzung KI-Methoden)
- c) Reallabore zur Erprobung neuer Technologieverbünde, Regelungsstrategie bzw. ein gezielter Fördermitteleinsatz durch strategisch gewählte Anwendungsfälle (Übertragbarkeit zu anderen Anwendungen, Skalierbarkeit, Relevanz, etc.)

Verbundvorhaben zur Werkstoff- bzw. Komponentenentwicklung: Projekte, die Fertigungstechnik für neue Werkstoffe und Komponenten entwickeln, um eine nachgewiesenermaßen erfolgreiche Entwicklung in die Anwendung zu bringen. Darüber hinaus sollte Life Cycle Assessments (LCA) für neue Technologien am Anfang (d.h. prospective LCA) gefordert und gefördert werden, um die wirtschaftliche Umsetzbarkeit einer Entwicklungsschiene beurteilen zu können.

Elektrifizierung von Industrieprozessen: Die Elektrifizierung von thermischen Prozessen wird als eine effiziente Lösung gesehen, da erneuerbare Elektrizität so direkt genutzt werden könnte. Die Verwendung von „grünem“ Wasserstoff ergibt vor allem bei hohen Temperaturniveaus oder dem Fehlen eines passenden Netzanschlusses Sinn.

Ein Ansatz zum Umgang mit diesen Fragestellungen wären Demonstrationsprojekte, welche die Prozessumstellungen untersuchen. Die Randbedingung für die Umstellung der

Prozesse ist vor allem die gleichbleibende Produktqualität durch ähnliche Prozessbedingungen (Stichwort „elektrische Flamme“). Anlagenkomponenten wie Wärmeübertrager müssen ggf. angepasst werden und die geforderte Leistung muss trotz Elektrifizierung bereitgestellt werden (Stichwort Energiedichte und Anlagendurchsatz). Darüber hinaus müssen die Konsequenzen für die Abwärmenutzung durch elektrifizierte Prozesse (weniger mediengebundene Abwärme) betrachtet werden.

Lösungen für eine dezentrale Energieversorgung und -nutzung: Es wird generell eine stärker dezentrale Bereitstellung von Energie auch durch lokal verfügbare erneuerbare Energiequellen beobachtet. Inselnetze und On-site Nutzung von Abwärme bei Industrieunternehmen ist teilweise schon seit Jahrzehnten möglich, aber eine externe Nutzung ist nur schwer ankoppelbar. Hier wird ein Bedarf an Clearing-Stellen gesehen, sowie mehr Transparenz und Vorhersehbarkeit tatsächlicher Kosten. Gleiches gilt für die Vertragsgestaltung, Verpflichtungsgestaltung der Wärmeverfügbarkeiten und mögliche Backup-Bereitstellung sowie die Hemmnisse bei der Sektorkopplung und der Einbindung von Speichern. Auch hier existiert der Wunsch nach Demonstrationsprojekten, um Lösungen aufzuzeigen, ggf. Vertragsvorgaben und -hilfen zu liefern und eine (monetäre/fiskale) Bewertung von Abwärme zu erarbeiten. Außerdem sollte auch mehr Transparenz bzgl. des rechtlichen Rahmens und möglicher Geschäftsmodelle für Versorger und Abnehmer hergestellt werden.

Im Folgenden werden einige Hinweise aus dem Kuratorium des Forschungsfeldes zur Erreichbarkeit der für das Forschungsfeld relevanten EFP-Ziele gegeben. Eine Umsetzung des Programmziels 2 „Wärme- und Kälteversorgung in Industrie und Gewerbe defossilisieren und effizienter machen“ wird sowohl kurzfristig (5 Jahre) als auch langfristig (10 Jahre) als eher schwierig eingeschätzt. Vorallem die Umsetzung des Sub-Ziels 2.1 „Mittel- und Hochtemperaturprozesse defossilisieren“ wird als schwierig erachtet. Gründe dafür wurden bereits in der Bedarfsaufzählung oben genannt. Hindernisse für die Verwendung bereits vorhandener Technologien sind vorhanden. Vor allem bei Hochtemperatur-Prozessen fehlt es an Demonstrationsprojekten, die die Umsetzbarkeit der Elektrifizierung von Prozessen nachweisen. Es wird angenommen, dass eine auf Wasserstoff basierende Prozesswärmebereitstellung, nicht in den nächsten 5 Jahren flächendeckend eingeführt bzw. verfügbar sein wird.

Das Sub-Ziel 2.4 „Effizienz bei thermischen Prozessen und Komponenten steigern“ wird aus technologischer Sicht als einfacher umsetzbar angesehen. Jedoch scheint es dafür einen zu geringen staatlichen Anreiz bzw. keine hinreichende Verpflichtung zu geben.

Das kurzfristige Umsetzen des Sub-Ziel 2.5 „Resilienz und systemdienlichen Betrieb von Industrieprozessen steigern“ wird als schwierig eingeschätzt. Die meisten Prozesse könnten durch den Einsatz thermischer Speicher nachhaltiger und systemdienlicher betrieben werden. Allerdings sind die Marktbedingungen (Stromkosten und Netzentgelte) in Deutschland schwierig. Mit einer technologischen Weiterentwicklung und somit

möglichen Kostensenkungen und regulativen Anpassungen, insbesondere bei Netzentgelten, kann sich die Situation verbessern.

Die Umsetzung des Programmziels 3. „Robuste Infrastruktur zum effizienten Verteilen und Speichern von Wärme und Kälte gestalten“ wird als mittelschwer eingeschätzt. Die dafür notwendige Elektrifizierung hängt stark vom Netzausbau und den Marktbedingungen (wie oben beschrieben) ab.

Die kurzfristige Umsetzbarkeit des Programmziels 4 „Flexibilitätpotenzial des Wärme- und Kältesektors nutzen“ wird als schwer eingeschätzt. Grund dafür sind auch weniger technologische Aspekte als vielmehr regulatorische. Langfristig wird die Umsetzung als einfacher eingeschätzt, sofern die in Sub-Ziel 2.5 erwähnten Hemmnisse abgebaut werden.

Bezüglich der Sprinterziele der Mission Wärmewende wurden folgende Hinweise zu den Zieldefinitionen selbst diskutiert:

- „Bis 2030 werden in Industrieprozessen Hochtemperatur-Wärmepumpen genutzt, die Prozesswärme über 300 °C bereitstellen können.“

Das Ziel von 300 °C scheint etwas willkürlich, als technisch treffender wird hier eine Temperaturdifferenz (erreichbarer Temperaturhub der Wärmepumpe) bzw. ein COP (Coefficient of Performance) gesehen.

- „Bis 2030 sind jeweils drei Speicherlösungen beziehungsweise -systeme für den Industrie- und den Quartiersbereich im Einsatz, die Überschussenergie (aus EE-Strom, Abwärme oder Solarthermie) so kosteneffizient speichern, dass die entladene Nutzwärme (ggf. in Kombination mit Wärmepumpen) preislich konkurrenzfähig zur Wärmeerzeugung aus Strom oder synthetischen Brennstoffen ist.“

Eine Bereitstellung von Prozesswärme aus thermischen Speichern, die mit sehr günstiger oder kostenfreier erneuerbarer Energie geladen wurden, soll preislich konkurrenzfähig zu vergleichbaren Lösungen mit elektrischen oder chemischen Energiespeichern (z.B. Wasserstoff oder anderen synthetischen Brennstoffen) sein. Das heißt hier werden Ansätze flexibler Sektorkopplung - Power-to-Heat plus thermische Energiespeicherung - mit der Speicherung von Strom und anschließender Wärmeerzeugung bzw. mit der Umwandlung in Wasserstoff (oder weiteren chemischen Kraftstoffen) und Wärmebereitstellung durch dessen Verbrennung verglichen. Ein Vergleich von Energiespeicherlösungen im Hinblick auf ihre ökonomische Performance in konkreten Anwendungsfällen wird begrüßt.

Ein Großteil der Programmziele des 8. EFP steht in enger Wechselwirkung, bspw.: 2.2, 2.4, 2.5, 3.3, 3.4, 4.1, 4.2. Die Wärme- (bis 150 °C) und Kälteerzeugung erfolgt im Optimalfall gekoppelt mittels Wärmepumpen. Bspw. im Automotive- oder Maschinenbau können Wärmepumpen i.d.R. gleichzeitig einen großen Teil des Wärme- und Kältebedarfs bereitstellen. Dazu sind Kühlwasser- und Wärmenetze notwendig, die möglichst alle Kälte- und Niedertemperaturwärmeverbraucher eines Standorts verbinden. Mittels elektrischer und thermischer Speicher kann der Betrieb systemdienlich gestaltet und die genutzte Abwärme maximiert werden. Durch die Nutzung von saisonalen Speichern kann sommerlicher Abwärmeüberschuss nutzbar gemacht werden. Planung und Betrieb eines solchen Systems ist ohne innovative Tools nicht möglich (bspw. prädiktive Regelung, KI-Lastprognose, Auslegungs- und Simulationssoftware).

Innerhalb des Kuratoriums wurden folgende Ergänzungsvorschläge für die Weiterentwicklung des 8. Energieforschungsprogramms erarbeitet:

- Explizite Nennung von Verbundvorhaben zu Fertigungstechnologien, die für die Herstellung von Werkstoffen, Komponenten und Anlagen für die Wärme- und Abwärmenutzung benötigt werden (siehe Bedarfsauflistung).
- Priorisierung von Verbundvorhaben zur flexiblen Sektorkopplung, insbesondere bei netz- und systemdienlichem Betrieb
- Explizite Nennung eines Themenfeldes "Flexible Elektrifizierung von neuartigen chemischen Prozessen", sowie Synergien zwischen Wärmespeicher und chemischen bzw. wasserstoffbasierten Prozessen

Förderfähigkeit der Entwicklung und Anwendung intelligenter Tools zur Planung der Kälte und Wärmeversorgung auch für den Industriebereich explizit in das EFP aufnehmen.

5.7 Forschungsfeld Wärmepumpen und Kältetechnik

Das Forschungsfeld Wärmepumpen und Kältetechnik wurde 2022 berufen, um die drängenden Herausforderungen des Klimawandels und der Energiewende durch innovative, energieeffiziente und umweltfreundliche Lösungen im Bereich der Wärme- und Kältebereitstellung zu adressieren. Das Forschungsfeld ist ein zentraler Pfeiler für eine nachhaltige und unabhängige Energieversorgung von Industrien und Gebäuden in der Zukunft.

Motivation. Elektrische Wärmepumpen heben Wärme aus regenerativen Quellen auf höhere Temperaturen. Je nach Bauform und Größe können sie Raumwärme für ein Einfamilienhaus erzeugen, als Wärmequelle in einem Fernwärmenetz dienen oder Prozesswärme in der Industrie bereitstellen. Beim Betrieb mit grünem Strom ermöglicht die Wärmepumpe die Defossilisierung des Gebäudesektors (Raumwärme, Fernwärme) und gewisser Teile des Industriesektors (insbesondere Niedertemperatur-Prozesswärme).

Der Wirkungsgrad der transformierten Wärme nimmt mit dem Temperaturhub (Unterschied zwischen Wärmequelle und -senke) ab, was die Möglichkeiten zur wirtschaftlichen Bereitstellung von Prozesswärme bei höheren Temperaturen derzeit begrenzt und Gegenstand der Forschung ist.

Da bei der Transformation Wärme einer Quelle entzogen wird, können Wärmepumpen auch zur Kälteerzeugung dienen. So werden gleichermaßen auch die Gebäudeklimatisierung und die Kälteerzeugung im Industriesektor defossilisierbar.

Energiepolitische Relevanz der Wärmepumpe. Die Wärmepumpe spielt eine entscheidende Rolle für die Energiewende. Im Bereich der Raumwärmeerzeugung besteht ein enormes Potenzial, das auf geschätzte 660 TWh pro Jahr beziffert wird, wovon bislang jedoch nur ein kleiner Teil erschlossen ist; zusätzlich wird für Prozesswärme im industriellen Sektor, speziell bei Temperaturen bis etwa 200 °C, ein Bedarf von rund 200 TWh pro Jahr gesehen, der durch den Einsatz von Groß- und Industrierärmepumpen gedeckt werden könnte (Agora Energiewende und Fraunhofer IEG 2023). Die Umsetzung in diesem Bereich ist allerdings aufgrund vielfältiger Prozessrandbedingungen mit spezifischen Herausforderungen verbunden.

Angesichts des bevorstehenden Technologiehochlaufs und der langen Investitionszyklen bietet sich gerade im Segment der Groß- und Industrierärmepumpen eine große Chance für die Forschung: Statt lediglich fossile Wärmeerzeuger auszutauschen und damit die Unabhängigkeit von fossilen Energieimporten abzuschwächen, können innovative Technologien mit hohen Effizienzen erforscht und entsprechend des wirtschaftlichen Potenzials etabliert werden. Dies verspricht langfristig signifikante positive Effekte auf die CO₂-Emissionen und die Kosten für die Bereitstellung von Energie.

Im Hinblick auf die Kältetechnik und steigende Temperaturen speziell im Sommer wird in verschiedenen Sektoren ein zusätzlicher Bedarf von etwa 66 bis 90 TWh pro Jahr für die Kältebereitstellung prognostiziert (Agora Energiewende und Fraunhofer IEG 2023; Goetschkes et al. 2021). Insgesamt adressiert das Forschungsfeld der Wärmepumpen und Kältetechnik somit einen gesamten Endenergiebedarf von rund 950 TWh pro Jahr. Selbst bei signifikanter Reduktion von Wärmebedarfen zum Beispiel durch Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand steigt gleichzeitig der Kühlbedarf, sodass der Gesamtenergiebedarf in den nächsten Jahren in der Größenordnung bleiben wird.

Im Hinblick auf die Kältetechnik und steigende Temperaturen speziell im Sommer wird in verschiedenen Sektoren ein zusätzlicher Bedarf von etwa 66 bis 90 TWh pro Jahr für die Kältebereitstellung prognostiziert (Agora Energiewende und Fraunhofer IEG 2023; Goetschkes et al. 2021). Insgesamt adressiert das Forschungsfeld der Wärmepumpen und Kältetechnik somit einen gesamten Endenergiebedarf von rund 950 TWh pro Jahr. Selbst bei signifikanter Reduktion von Wärmebedarfen zum Beispiel durch Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand steigt gleichzeitig der Kühlbedarf, sodass der Gesamtenergiebedarf in den nächsten Jahren in der Größenordnung bleiben wird.

Strategie. Im Forschungsfeld werden die unterschiedlichen Reifegrade der Wärmepumpenanwendung aufgegriffen und differenziert unterstützt: Für die Gebäudewärmepumpe liegen die Herausforderungen (1) in der kostengünstigen Industrialisierung und im systematischen Hochlauf über sämtliche Gebäudetypen- und Alterklassen, (2) der Weiterentwicklung im Hinblick auf die Umweltfreundlichkeit, Effizienz und Akzeptanz und (3) in der standardisierten Installation und im optimalen Betrieb im sehr heterogenen Gebäudebestand. Für die Großwärmepumpe als Quelle im Fernwärmenetz stehen Wirkungsgrad und Kosten für Fertigung, Betrieb und Wartung im Vordergrund. Die Industrierärmepumpe muss jeweils am Standort individuell in die Prozessumgebung integriert werden, wozu ggf. Veränderungen am Prozess und zusätzliche Komponenten wie Speicher und Wärmenetze benötigt werden. Die breite Anwendung der Industrierärmepumpe erfordert also immer eine ganzheitliche Systembetrachtung sowie tiefgreifende Forschungsanstrengungen zu möglichst zugänglichen Auslegungs- und Installationsmethoden. Diese Forschung steht in enger Verknüpfung mit dem Forschungsbereich „Speicher und Netze für Wärme und Kälte“. (Miara et al. 2025; Henniger 2023)

Auf dem Gebiet der Kälteerzeugung werden Sorptionskälteanlagen, Kompressionskälteanlagen und alternative Technologien wie z.B. Magnetokalorik weiterentwickelt, wobei TRL im Allgemeinen auf diesen Gebieten eher niedriger ausfallen.

5.7.1 Rückblick des Forschungsfelds

Das Forschungsfeld Wärmepumpen und Kältetechnik wurde vor zwei Jahren ins Leben gerufen und befindet sich nach wie vor in der Formungs- und Ausgestaltungsphase. Nichtsdestotrotz wurden in der kurzen Zeit unterschiedliche Formate aufgesetzt, die sich gut etabliert haben. Tabelle 5-5 fasst die Formate zusammen.

Die **Treffen des Kuratoriums** dienen primär der strategischen Ausrichtung des Forschungsfeldes. Darüber hinaus werden die Meetings für laufende organisatorische Angelegenheiten genutzt. Gelegentlich werden externe Gäste für Impulsvorträge eingeladen, die als Basis für anschließende Diskussionen dienen.

Die **"Frühstücksrunde"** konzentriert sich auf die Diskussion spezifisch ausgewählter Themen. Nach einem kurzen Impulsvortrag folgt eine vertiefende inhaltliche Debatte. Bisher wurden diese Runden unter anderem zum Austausch mit anderen Forschungsfeldern, wie beispielsweise der Tribologie, genutzt.

Tabelle 5-5: Veranstaltungsformate im FF Wärmepumpen und Kältetechnik

Titel	Anzahl	Für wen	Dauer	Inhalte / Ziel	Ort
Treffen des Kuratoriums	1 x Jahr Präsenz 1 x Jahr Online	Intern im Kuratorium	1 Tag plus optional Abendessen am Tag davor	Austausch und Vernetzung zwischen den Kuratoriums-Mitgliedern, Treffen der Entscheidungen, Bestimmung der Strategie/Richtung	Jeweils zu klären
Frühstücksrunde	Alle 3 Monate Donnerstags 8:00 Uhr	Intern im Kuratorium	1 Stunde	Jour Fixe mit Impulsvorträgen für den internen Kreis des Kuratoriums	Online
„Wärme & Kälte Dialog“ (Vorstellung der Projekte)	Alle 3 Monate	Breites Publikum	1,5 Stunden	Mit Vorträgen zu bestimmten Projekten	Online

Das erfolgreich etablierte Format **"Wärme & Kälte Dialog"** richtet sich an ein breiteres Publikum. Regelmäßig erhalten mehr als hundert Zuhörerinnen und Zuhörer Einblicke in jeweils drei thematisch verbundene Projekte. Im Anschluss an jeden Vortrag gibt es ausreichend Zeit für Fragen und Diskussionen.

Neben den regelmäßigen Formaten, organisiert das Forschungsfeld punktuell **Workshops** zu gezielt ausgewählten Themen. Bis jetzt wurden drei Workshops veranstaltet. Im Oktober 2022 sowie im Mai 2025 wurden Workshops zu dem Thema Industrie- und Großwärmepumpen organisiert. Mit jeweils grob 80 eingeladenen Personen wurden die Chancen, Bedürfnisse, Herausforderungen sowie Hemmnisse präsentiert und diskutiert. Danach wurden die Ergebnisse jeweils in Form einer Roadmap mit den wichtigsten Erkenntnissen zusammengefasst. Im November 2023 fand ein ähnlicher Workshop zu dem Thema Kälte aus Wärme mit Sorptionstechnologie statt.

Kurzfristig nach dem Etablieren des Forschungsfeldes haben die Teilnehmenden des Kuratoriums sich mit inhaltlichen und strategischen Fragen beschäftigt. Während FF-internen Sitzungen (Forschungsfeld Wärmepumpen und Kältetechnik 2025, 2024) wurden für die Bereiche Gebäudewärmepumpe sowie andere Anwendungen sowohl technologische als auch markttechnische Herausforderungen ausgearbeitet.

Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Unabhängig von der betrachteten Technologie wurde mehr Schnelligkeit der Implementierung sowie mehr Standardisierung und Konstanz in den Planungsbedingungen gefordert,
- Unabhängig von der Technologie wurde bzgl. der markttechnischen Herausforderungen die Kommunikation zum Endkunden/ in die Gesellschaft als große Herausforderung gesehen,
- Bei den technologischen Herausforderungen für die Gebäude-WP wurden die finanziellen Aspekte vermehrt hervorgehoben,

- Neben den Gebäudewärmepumpen wurden die Industrie-WP bzw. Hochtemperatur-WP als entscheidend für die Zukunft genannt.

5.7.2 Aktuelle Arbeiten des Forschungsfelds

Verbindung zu den Missionen des 8. Energieforschungsprogramms

Die Missionsorientierung im 8. Energieforschungsprogramm verbindet das Thema Wärmepumpen und Kältetechnik auf vielfältige Weise mit übergeordneten gesellschaftlichen und technologischen Zielen der Energiewende. Die einzelnen Missionen greifen dabei unterschiedliche Aspekte auf und adressieren sowohl den Gebäudesektor als auch industrielle Anwendungen und Infrastrukturen hinsichtlich Wärme- und Kältebereitstellung.

Im Zentrum steht die Mission Wärmewende, die maßgeblich auf die Defossilisierung der Wärmeversorgung in Haushalten, Gewerbe und Industrie abzielt. Hier spielen Wärmepumpen eine Schlüsselrolle als Technologie, die Umweltwärme – etwa aus Luft, Wasser oder dem Erdreich – effizient nutzbar macht. Die Forschung innerhalb dieser Mission konzentriert sich auf die Entwicklung leistungsfähiger, klimafreundlicher Wärmepumpensysteme, die auch bei niedrigen Außentemperaturen oder in industriellen Prozessen mit höheren Temperaturanforderungen zuverlässig arbeiten. Gleichzeitig wird auch an innovativer Kältetechnik geforscht, etwa zur effizienten Raumkühlung, Prozesskälte oder zur Nutzung von Abwärme in reversiblen Systemen⁵. Auch im Sprinterziel zur Wärmewende werden Wärmepumpen direkt adressiert („Bis 2030 werden in Industrieprozessen Hochtemperatur-Wärmepumpen genutzt, die Prozesswärme über 300 °C bereitstellen können.“). Zudem steht die Mission Stromwende in engem Zusammenhang mit Wärmepumpen, da diese zunehmend als Stromverbraucher mit hohem Potenzial zur Flexibilisierung des Stromnetzes betrachtet werden können. Durch eine gezielte Steuerung – etwa im Rahmen von Smart Grids oder durch die Einbindung in variable Stromtarife – können Wärmepumpen zur Netzentlastung beitragen und erneuerbaren Strom sinnvoll in thermischen Speichern einspeisen oder direkt nutzen. Kältetechnische Systeme, insbesondere in Kombination mit thermischen Speichern, tragen ebenfalls zur Lastverschiebung bei und ermöglichen damit eine effizientere Stromnutzung.

Die Mission Energiesystem wiederum betrachtet Wärmepumpen und Kältesysteme als integrale Bestandteile eines resilienten, vernetzten und sektorübergreifenden Energiesystems. Die Einbindung dieser Systeme in Energiemodelle, die Bewertung ihres Einflusses auf Netzstabilität und Infrastruktur sowie die Entwicklung effizienter Regelungsstrategien sind zentrale Forschungsfragen. Auch hybride Versorgungssysteme, bei denen Wärmepumpen mit weiteren Technologien wie Fernwärme, Solarthermie oder Wasserstoffsyste men kombiniert werden, sind Teil dieser Systemforschung.

⁵ Vergleiche die Programmziele der Wärmewende mit direktem Kontext zu Wärmepumpen und Kältetechnik: 1.1 Innovative Lösungen hochskalieren, 1.3 Energieeffizienz von der Komponente bis zum Gesamtsystem erhöhen, Qualitätssicherung mitdenken, 2.2 Industrie- und Großwärmepumpen für den Hochlauf vorbereiten, 2.3 Hochtemperatur-Wärmepumpen weiterentwickeln, und nachhaltige Wärmequellen umstellen, 3.1 Wärmenetze auf regenerative und nachhaltige Wärmequellen umstellen.

Schließlich zielt die Mission Transfer auf die beschleunigte Umsetzung von Forschungsergebnissen in die Praxis. Wärmepumpen und Kälteanlagen profitieren hier von Fördermaßnahmen, die den Markthochlauf unterstützen, etwa durch Demonstrationsprojekte, die Aus- und Weiterbildung von Fachkräften oder die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle. Besonders im Bereich der Kältetechnik ist der Technologietransfer in Branchen wie Lebensmittel, Logistik oder Rechenzentren von wachsender Bedeutung – nicht zuletzt im Kontext steigender Anforderungen an Energieeffizienz und Klimaverträglichkeit.

Insgesamt zeigt sich, dass Wärmepumpen und Kältetechnik nicht isoliert betrachtet werden, sondern als systemrelevante Technologien in nahezu alle strategischen Missionen des 8. EFP eingebettet sind. Ihre Rolle reicht dabei von der Wärmeerzeugung über die Stromnetzstabilisierung bis hin zur industriellen Prozessgestaltung und zur Dekarbonisierung ganzer Sektoren.

Analyse der Projekte

Im Rahmen der Arbeiten des Forschungsfeldes wurde eine detaillierte Untersuchung von 37 öffentlich geförderten Projekten, basierend auf fünf zentralen Parametern – Geräteleistung, Technologiereifegrad, Anwendungsbereich, technologischer Schwerpunkt und maximale Temperatur – durchgeführt. Die analysierten Projekte stammen aus dem Bereich „Energiesystem: Nutzung“ (ESN), der Teil des Fachbereichs „Energie und Klima“ (EKL) beim Projektträger Jülich ist. Die Analyse offenbart klare Muster in der Forschungslandschaft und identifiziert entscheidende Lücken.

Der größte Teil der Projekte (19 von 37) konzentriert sich auf den Sektor Wohngebäude. Hierbei liegt der Technologiereifegrad mehrheitlich zwischen 5 und 7, was auf Projekte in der Demonstrations- und Validierungsphase hindeutet. Die analysierten Geräte weisen in diesem Bereich überwiegend eine Leistung von unter 25 kW auf. Bemerkenswert ist, dass von diesen 19 Projekten lediglich drei spezifisch die Anforderungen von Mehrfamilienhäusern adressieren, was auf eine Forschungsfokuslücke in diesem wichtigen Segment hinweist.

Der Industriesektor ist mit 11 von 37 Projekten der zweitgrößte Anwendungsbereich. Hier zeigt sich eine deutlich breitere Streuung der Leistung von weniger als 100 kW bis über 1 000 kW, was die Diversität industrieller Prozesse widerspiegelt. Die Projekte in diesem Bereich befinden sich tendenziell in einem früheren Stadium der Entwicklung, wobei TRL 4 am häufigsten vorkommt.

Der führende technologische Schwerpunkt ist die Kälteerzeugung, die in 11 Projekten beleuchtet wird. Dies unterstreicht die wachsende Bedeutung von Kühlprozessen. Weitere wichtige Schwerpunkte sind die Komponenteoptimierung (5 Projekte), die auf Effizienzverbesserungen abzielt, und die Lärmreduktion (4 Projekte), ein kritischer Aspekt für die Akzeptanz von Anlagen, insbesondere in urbanen Umgebungen.

Identifizierte Diskrepanzen und Forschungsbedarf:

Ein kritischer Abgleich dieser Forschungsergebnisse mit den vorher ausgearbeiteten technologischen und markttechnischen Herausforderungen zeigt deutliche Diskrepanzen: Schlüsselthemen wie die Finanzierung von Anlagen, effektives Monitoring, verbesserte Kommunikation, die optimierte Versorgung von Mehrfamilienhäusern, die Vereinfachung der Installation, die Standardisierung von Prozessen sowie die Erhöhung der Gebrauchsdauer werden durch die analysierten Projekte nicht ausreichend abgedeckt. Zudem müssen Kernthemen wie die Steigerung der Energieeffizienz ganzheitlicher und systemdienlicher aufgefasst werden, um das tatsächliche Optimum in der Bereitstellung von Wärme und Kälte zu erreichen. Das betrifft vor allem die Themen: Einbindung von Wärmepumpen und Kältetechnik in das Energiesystem, systematische Verbesserungen an den unterliegenden Kältemittelkreisläufen (Design und Regelung), sowie Steigerung von Faktoren, die die Akzeptanz der Technik erhöhen.

Dies markiert signifikante Bereiche, in denen zukünftige Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen dringend benötigt werden, um die Marktintegration und breitere Akzeptanz der Technologien voranzutreiben.

5.7.3 FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Forschungsfelds

Die Kernpunkte der Forschungs-Roadmap wurden von den Beteiligten der Kuratoriumssitzung unter Berücksichtigung der Ergebnisse vergangener Workshops und Arbeitstreffen ausgearbeitet (Miara et al. 2025; Forschungsfeld Wärmepumpen und Kältetechnik 2025, 2024; Henniger 2023). Dabei wurden die zentralen Forschungs- und Entwicklungsbereiche skizziert, um den Einsatz von Wärmepumpen- und kältetechnischen Systeme zu beschleunigen. Die Roadmap wurde wie folgt untergliedert.

I. Technologische Schwerpunkte:

- Bei den **Wärmequellen und der Effizienz** sollte sich die Wissenschaft auf die Erforschung und Optimierung der Nutzung verschiedener Wärmequellen konzentrieren. Auch die Forschung an **Hochtemperatur-Wärmepumpen** für industrielle Prozesse und spezifische Gebäudeanforderungen sollte im Vordergrund stehen. Zudem sind die Bewältigung von Herausforderungen bei **Niedertemperatur-Wärmequellen** für eine effiziente Wärmeentnahme von hoher Bedeutung.
- Die **Komponentenoptimierung** sollte sich auf die Verbesserung von Leistung und Zuverlässigkeit konzentrieren. Des Weiteren sollte die Entwicklung **neuer Kältemittel** mit geringerem GWP (Global Warming Potential) vorangetrieben werden. Auch Innovationen bei **Wärmepumpen-Invertern** für verbesserte Steuerung und Effizienz sind anzustreben.
- Im Bereich der **Systemintegration und Regelung** sollte die Forschung intelligente Regelstrategien und die Systemintegration für einen optimalen Betrieb zum Ziel

haben. Auch der Umgang mit der Wechselwirkung zwischen Wärmepumpen und der **Netzstabilität** sollte beachtet werden.

- Neben der klassischen Kompressionstechnologien sollten neue Ansätze wie Magneto-, Elasto-, und Elektrokalorik verfolgt werden. Die genannten Technologien basieren auf der **reversiblen Temperaturänderung von Festkörpermateri-
alien** unter dem Einfluss äußerer Felder (Magnet-, Kraft- oder elektrisches Feld). Ihre große Bedeutung liegt darin, dass sie potenziell **umweltfreundliche und hocheffiziente Alternativen** zu den derzeit üblichen, gasbasierten Kompressions-
systemen für Kühlung und Wärmezeugung darstellen. Sie ermöglichen den Verzicht auf Kältemittel und ebnen den Weg für kompaktere und energieeffizien-
tere Wärme- und Kälteanwendungen der Zukunft, meistens für Spezialanwen-
dungen. Die TRL im Allgemeinen auf diesen Gebieten ist zurzeit in der niedrigen
Klassen einzuordnen.

II. Anwendungsfeldspezifische Herausforderungen und Lösungen:

- Für **Mehrfamilienhäuser** sollte die Entwicklung maßgeschneiderter Wärmepum-
penlösungen und die Bewältigung von Herausforderungen im Zusammenhang
mit der Wärmeverteilung innerhalb komplexer Gebäudestrukturen im Fokus ste-
hen.
- Bei **industriellen Wärmepumpen** sollte der Forschungsschwerpunkt auf den spe-
zifischen Anforderungen und Integrationsherausforderungen von industriellen
Wärmepumpenanwendungen sowie auf Hochleistungsanwendungen liegen.
- Gezielte Forschungsanstrengungen sollten sich zudem auf die **Lärmreduktion**
von Wärmepumpenaggregaten konzentrieren, da dies besonders entscheidend
für die urbane und wohnliche Integration ist.

III. Überwindung von Implementierungsbarrieren und Marktreife:

- Im Bereich der **Vereinfachung der Installation und Standardisierung** sollte sich
die Forschung auf die Entwicklung von Methoden und Technologien zur Verein-
fachung von Planungs- und Installationsprozessen konzentrieren. Auch die För-
derung der Standardisierung von Komponenten und Installationsverfahren zur
Kostenreduzierung und Erhöhung der Zuverlässigkeit ist wichtig.
- Das **Monitoring und die Leistungsvalidierung** sollten die Einrichtung robuster
Monitoringsysteme zur Verfolgung der realen Leistung und Validierung der Effi-
zienz umfassen. Ebenso sollte die Definition und Validierung von Key Perfor-
mance Indicators (KPIs) für Wärmepumpensysteme vorangetrieben werden.
- Bei den **wirtschaftlichen und Akzeptanzfaktoren** sollte die Analyse und Adressie-
rung finanzieller Herausforderungen sowie die Erforschung neuer Finanzierungs-
modelle im Mittelpunkt stehen. Eine verbesserte **Kommunikation** ist entschei-
dend für die Akzeptanz. Auch die Berücksichtigung von Aspekten der **Lebens-
dauer/Haltbarkeit** bei der Produktentwicklung ist von Bedeutung.

Dem Forschungsfeld Wärmepumpen und Kältetechnik ist die umfangreiche Themenvielfalt bekannt. Das Ziel des Forschungsfeldes ist es die verschiedenen Forschungsschwerpunkte zu diskutieren und so gut es geht die einzelnen Themenfelder jeweils in den Gesamtkontext der (Forschungs-)Branche zu bringen. Die diverse Besetzung des Kuratoriums fördert diese ganzheitliche Sichtweise und bringt Vertreterinnen und Vertreter der unterschiedlichen Perspektiven zusammen. Das dynamische Umfeld, in dem die Forschung des Wärme- und Kältesektors stattfindet, erfordert eine stetige Evaluierung und (Neu-)Priorisierung der Schwerpunkte, weshalb auf eine Festlegung einer bestimmten Themenreihenfolge verzichtet wird.

5.8 Cluster Aerogele

Aerogele gehören zu den innovativsten Materialklassen unserer Zeit. Ihre niedrige Wärmeleitfähigkeit, hohe innere Oberfläche, hohe Porosität bei niedriger Dichte und chemische sowie physikalische Anpassungsfähigkeit machen sie zu einer technologischen Schlüsselressource für die Energie- und Klimawende. Als Hochleistungsdämmstoff, thermischer Isolator, Katalysatorträger oder Funktionsmaterial können Aerogelmaterialien in nahezu allen Forschungsmissionen des 8. Energieforschungsprogramms eingesetzt werden. Ihre Herstellung aus fossilfreien Rohstoffen, Biomasse oder Industrieabfall, ihre Rezyklierbarkeit und das Potenzial zur Wertschöpfungserweiterung machen sie gleichzeitig zu einem wichtigen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft und zur Rohstoffsouveränität. Das folgende Strategiepapier ordnet aktuelle Forschungs- und Entwicklungsergebnisse zu Aerogelmaterialien den Missionen des Programms zu, benennt Herausforderungen und unterbreitet politische Handlungsempfehlungen. Damit leistet es einen Beitrag zur systematischen Verankerung dieser Materialtechnologie in der energiepolitischen Strategie Deutschlands.

5.8.1 Rückblick des Clusters

Im Zeitraum von 2017 bis heute wurden im Cluster „Beitrag der Aerogele zur Energieeffizienz-Erhöhung in der Industrie“ mehrere bedeutende Forschungsprojekte durchgeführt, die wichtige Erkenntnisse und Fortschritte im Bereich der Aerogeltechnologie ermöglichten. Einige Projekte fokussierten sich dabei auf den Einsatz von Aerogelmaterialien als Hochleistungswärmedämmstoffe zum Einsatz in industriellen Thermoprozessanlagen. Durch ihre guten Dämmungseigenschaften können Aerogelmaterialien dazu beitragen, die Energieeffizienz wärmeintensiver Prozesse zu verbessern. Beispielweise wurde in den Jahren 2017 bis 2021 das Projekt „AeroFurnace“ realisiert, welches sich auf die Optimierung nanoporöser Kohlenstoffkomposite zur Wärmedämmung in Prozessöfen bei Temperaturen über 1 500 °C konzentrierte. Ziel war es, bestehende Komposite aus dem Labormaßstab zu einer mechanisch stabilen und gut bearbeitbaren Wärmedämmung weiterzuentwickeln. Ein zentrales Ergebnis waren faserverstärkte Kohlenstoffxerogel-Kompositplatten mit einer für Temperaturen > 1 000°C sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeit, prädestiniert für industrielle Hochtemperaturanwendungen sind.

Ein weiteres relevantes Projekt war „AeroREF“, das in den Jahren 2019 bis 2022 durchgeführt wurde. Hierbei wurde ein neuartiges Verbundmaterial aus Aerogel und feuerfestem Material entwickelt, welches durch verringerte Wärmeverluste signifikante Energieeinsparungen ermöglichte. Hochtemperaturversuche im Technikum der TUHH bestätigten eine Reduzierung der Wärmeverluste um bis zu 20 %, was einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Energieeffizienz darstellt.

Ferner wurde untersucht, welchen prozesstechnischen Mehrwert Aerogelmaterialien in diversen Branchen bieten können. Unter anderem im Rahmen des Projekts „AeroPRO-Cast“ (2017 - 2021) wurde die Optimierung von Aerogel-Granulaten für den Einsatz in Gießereien untersucht. Durch den Zusatz von Resorcin-Formaldehyd oder Kohlenstoff-Aerogel-Granulat konnte die Kernfestigkeit von Formen erhöht werden, wodurch Ausschuss reduziert wurde. Der technische Herstellungsprozess wurde erfolgreich vom Labormaßstab auf den industriellen Maßstab übertragen.

Das Projekt „NAFT“ (2018 - 2021) befasste sich mit metallischen Nanopartikel-Aerogelen in Form von Tinten für großflächigen Druck dünner Schichten. In diesem Zusammenhang wurden Synthesemethoden skaliert, um effektivere Druckverfahren zu ermöglichen und den Energieaufwand bei der Herstellung zu reduzieren.

Zuletzt wird neben Aerogelmaterialien auch der Herstellungsprozess von Aerogelen in FuE Projekten laufend weiterentwickelt und verbessert. So wurde beispielsweise ein wichtiger Schritt im Projekt „AeroKonti“ (2017 - 2021) unternommen, bei dem ein kontinuierlicher Prozess zur Herstellung von Aerogelen entwickelt wurde, um die Energieeffizienz durch überkritische CO₂-Trocknung im Technikumsmaßstab zu steigern. Die Ergebnisse zeigten geringere Produktionskosten sowie einen um etwa 15 - 20 % reduzierten Energieeinsatz.

Erste Ansätze zur Verwendung von Industrieabfall wurden erfolgreich im Projekt PolymA-EROcycle entwickelt. Hier wurden erstmalig nachhaltige und skalierbare Polymer-Aerogele auf Basis recycelter Reststoffe hergestellt.

5.8.2 Aktuelle Arbeiten des Clusters

Die aktuell im Cluster laufenden Arbeiten führen diese Trends fort und untersuchen einerseits neue Anwendungsgebiete von Aerogelen zur Verbesserung und Steigerung der Energieeffizienz von bestehenden Prozessen, und andererseits Verbesserungsmöglichkeiten im Herstellungsprozess von Aerogelmaterialien, die aktuell noch wenig optimiert und ineffizient sind.

Ein Beispiel ist das bis 2025 laufende Projekt „THEA“. Das Projekt fokussiert sich auf Bauteile zur thermischen und akustischen Abschirmung für Anwendungen im Automobilbau. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen auch auf weitere Sektoren wie Luftfahrt und Haushaltsgeräte übertragen werden können. Ein zentrales Ergebnis ist die Entwicklung einer

Hochtemperaturcharakterisierung speziell für Aerogelmaterialien, die zur Senkung des Systemgewichts beitragen.

Zudem wird aktuell das Projekt „AeroKinetics“ durchgeführt, das eine modulare Plattform als Technologieprüfstand zum datengetriebenen Scale-Up des überkritischen CO₂-Trocknungsprozesses von Aerogelmaterialien entwickelt. Dabei werden sowohl Batch- als auch kontinuierliche Prozesse untersucht, um umfassende Optimierungen hinsichtlich Energieverbrauch, Emissionen sowie Kosten zu erreichen.

Herausforderungen liegen weiterhin darin, Laborforschung erfolgreich in Reallabore umzusetzen sowie industrielle Maßstäbe zu erreichen. Beides ist entscheidend für den Nachweis industrieller Funktionsfähigkeit und die erfolgreiche Kommerzialisierung organischer und hybrider Aerogelmaterialien.

Ein langfristiger strategischer Ansatz zwischen akademischen Institutionen und industriellen Partnern ist erforderlich, um innovative Materialien unter Verwendung von Hochdrucktechnik herzustellen – diese sollen direkt oder indirekt zur Steigerung der Energieeffizienz beitragen.

Organische und anorganisch/organische Hybridaerogelmaterialien haben sich als vielversprechendes Entwicklungsfeld herauskristallisiert. Sie bieten hervorragende mechanische Eigenschaften bei geringer Staubentwicklung und können idealerweise aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden – ihre Anwendungsbereiche sind vielfältig: Von Life Sciences über Baustoffe bis hin zum Leichtbau.

5.8.3 FuE-Bedarf und Forschungsroadmap 2035 des Clusters

Aerogele können einen signifikanten Beitrag zu mehreren Missionen des 8. EFP leisten. Im Nachfolgenden ist dies an einigen Beispielen aufgezeigt.

Mission Wärmewende 2045

Programmziel 1: Wärme- und Kältebedarf in Gebäuden klimaneutral und nachhaltig decken

Passive Strahlungskühlung

Durch gezielte Reflektion von Sonnenlicht und gleichzeitige Emission im Infrarotbereich können mit Aerogelmaterialien Oberflächentemperaturen deutlich unterhalb der Umgebungstemperatur erzielt werden. Damit lässt sich der Einsatz konventioneller Kältetechnik in Gebäuden signifikant reduzieren. Erste Aerogelmaterialien erzielen Kühlleistungen von $> 90 \text{ W/m}^2$ bei über 10 °C Temperaturdifferenz zur Umgebung. Diese Technologie ist besonders relevant in urbanen Hitzeinseln, wo sie neben energetischen auch gesundheitliche Vorteile bietet. In Verbindung mit Photovoltaik-Modulen und Dachbegrünungssystemen könnten derartige Aerogelmaterialien in multifunktionalen Dachsystemen integriert werden, die Energie erzeugen, Gebäude kühlen und die Umgebungstemperatur senken.

Ziel 1.1: Innovative Lösungen hochskalieren

Effiziente Prozesse der Aerogelherstellung entwickeln / Kosten senken

Derzeit ist die Produktion von Aerogelmaterialien in Europa gering und kostenintensiv. Durch Prozessentwicklung (z.B. kontinuierliche Produktion, Lösemittelrecycling, KI-gestütztes Materialdesign) können die Produktionskosten drastisch gesenkt werden. Diese Entwicklung muss gezielt gefördert werden, um Produktionskapazitäten in Deutschland zu sichern und Technologieführerschaft zu etablieren. Notwendig sind hierfür neben technologischer Forschung gezielte industriepolitische Maßnahmen zur Investitionsförderung, zur Schaffung von Skalierungsplattformen und zur Etablierung eines europäischen Marktzugangs.

Die Umsetzung dieser Ziele erfordert tiefgehendes Know-how in Chemie, Hochdrucktechnik und Verfahrenstechnik. Dieses Wissen ist im Cluster „Aerogele für Energieeffizienz“ gebündelt und wird durch die enge Zusammenarbeit von Industrie und Forschung gezielt eingesetzt, um das Verständnis für Aerogelmaterialien zu vertiefen und moderne, skalierbare Produktionstechnologien zu entwickeln und zu demonstrieren.

Ziel 1.4: Ressourcen nachhaltig einsetzen

Herstellung von Aerogelmaterialien aus Industrieabfall

Die Produktion von Aerogelmaterialien ist noch immer energieintensiv und benötigt teure Rohstoffe. Daher ist die Verwendung von Reststoffen oder Abfällen zur Produktion von Aerogelmaterialien von Vorteil. Pilotprojekte zeigen, dass eine energieeffiziente Herstellung von Aerogelmaterialien aus sekundären Rohstoffen technisch umsetzbar ist. Neue Prozesse erlauben die Herstellung von Aerogelmaterialien aus Bauschutt, Biopolymeren oder Industrieabfällen (z.B. Lignin, Chitosan). Im Rahmen des EU-Projekts SNUG werden Aerogelmaterialien aus Bauschutt produziert, ein Recycling von Produktions- und Montageabfällen wird erprobt.

Im Cluster zeigt sich, dass die Aerogeltechnologie eine Plattform zum höherwertigen Recycling von industriellen Reststoffströmen – Kunststoffen – bieten kann (Projekt PolymA-EROcycle). Aerogelmaterialien besitzen hier eine besondere Relevanz, weil unsortierte, höhervernetzte, und selbst kontaminierte Kunststoffe, die sonst überwiegend thermisch verwertet oder deponiert werden, im “open-loop” Ansatz recycelt werden können.

Im Bereich der Biopolymere nehmen seit kurzem Aerogele aus Bioabfallströmen eine bedeutende Rolle ein. Aerogelmaterialien aus Zellulose, Alginat, Pektin oder Chitosan, die aus Altholz, Ernteabfällen, Fruchtschalen, Meeresalgen, Flachs oder den Schalen von (invasiven) Krustentieren hergestellt werden, sind mittlerweile möglich. Derartige Biopolymeraerogele oder Bioaerogele können aus Materialien hergestellt werden, welche aus Abfällen einen Mehrwert generieren, ohne mit der Lebensmittelherstellung zu konkurrieren. Bioaerogele können einfach als Filtermaterial funktionalisiert werden, um spezifisch toxische Substanzen zu absorbieren. Auch die Produkte der Bioraffinerie (Kraft- und Bioraffinerie-Lignin, Lignozellulose oder Zellulose) können so erstmalig einer

höherwertigen Nutzung als Bioaerogele und in der Anwendung als Hochleistungswärmedämmstoff zugeführt werden.

Über den direkten positiven Beitrag zur Energiewende aus Applikationen heraus, stellen Aerogelmaterialien im Kontext zirkulärer Wertschöpfungsketten eine Technologieplattform bereit, die unmittelbar zur Lösung von aktuell vorhandenen gesellschaftlichen Problemstellungen beitragen kann.

Programmziel 2: Wärme- und Kälteversorgung in Industrie und Gewerbe defossilisieren und effizienter machen

Aerogelmaterialien für Wärme- und Kälteversorgung

Aerogelmaterialien sind als Schlüsseltechnologie hilfreich zur Steigerung der Effizienz von Wärme- und Kälteversorgung in der Industrie. Durch ihre niedrige Wärmeleitfähigkeit kann die Effizienz bei thermischen Prozessen, wie industriellen Tiefkälteanlagen und Großwärmepumpen, durch höhere Dämmwerte gesteigert werden. In industriellen Tiefkälteanlagen führt ein geringerer Wärmeeintrag von außen durch bessere Dämmleistung zu Wärmedämmung einer höheren Prozesseffizienz und zu geringeren Stromverbräuchen über die gesamte Anlagenlebensdauer (14 bis ~ 30 Jahre). Insbesondere die Wärmedämmung von Komponenten mit hohem Temperaturunterschied, z.B. Wärmeeintrag bei tiefen Temperaturen (- 60 bis - 40 °C) sollten für eine Effizienzsteigerung berücksichtigt werden, wie z.B. lange Rohrtrassen zwischen Verbrauchern und Verdichtern oder die Niederdruckseite in Kaskaden-Tiefkälteanlagen. Der Einsatz von Aerogelmaterialien als Wärmedämmung im industriellen Kälteanlagenbau ist kostengetrieben. Aus diesem Grund ist die Herstellung aus kostengünstigen Edukten und ein skalierbarer kosteneffizienter Herstellungsprozess von Aerogelmaterialien wesentlich.

Liquid Natural Gas (LNG) und Liquid Hydrogen (LH₂) stellen mittel- bis langfristig wichtige Energieträger im Rahmen der Energiewende dar. Jedoch erfordern diese Energieträger Tiefkälte-Temperaturen bis unter – 160 °C bei LNG bzw. – 253 °C bei LH₂, um diese Gase im flüssigen Zustand zu transportieren und zu lagern. Eine effiziente Wärmedämmung ist daher entscheidend, um Sicherheitsanforderungen zu erfüllen und Energieverluste durch Boil-Off und Gasfreisetzungen wirtschaftlich zu minimieren. Aerogelmaterialien bieten wegen ihrer exzellenten thermischen Performance selbst bei tiefsten Temperaturen sehr gute Lösungsansätze in kryogenen Anwendungen und schützen Anlagen effektiv vor Korrosion. Im Bereich LNG bieten Aerogelblankets aus Silika bereits eine akzeptierte und etablierte Lösung. Neuartige Aerogelmaterialien der nächsten Generation mit verbesserten Eigenschaften, wie einfachere Integration, niedrigere Kosten, und einer stark verbesserten Nachhaltigkeit, die die Nachteile aktueller Aerogelmaterialien adressieren, stellen wichtige zukünftige Lösungen für LNG und Wasserstoff dar. Der Einsatz ist heute noch kostenlimitiert – durch neue europäische Herstellungstechnologien kann hier ein strategischer Markt entstehen. Ergänzend sind eine standardisierte Normierung und Qualitätsprüfung auf europäischer Ebene notwendig, um die Akzeptanz in der Industrie zu fördern.

Ziel 2.4: Effizienz bei thermischen Prozessen und Komponenten steigern

Aerogelmaterialien gelten als vielversprechende Schlüsseltechnologie für Hochtemperatur-Dämmwendungen in Bereichen wie Luft- und Raumfahrt, Automobilbau und Energietechnik. Durch Fortschritte in der Herstellung sowie der Entwicklung von hoch performanten Aerogel-basierten Kompositmaterialien konnten die thermischen Belastbarkeitsgrenzen von Aerogelmaterialien deutlich erhöht werden. Polyimid-basierte Aerogelmaterialien halten kurzzeitig Temperaturen bis etwa 1 000 °C stand, Zirkoniumdioxid-basierte bis 1 300 °C, Silikat-basierte bis 1 500 °C, Aluminiumoxid-basierte bis 1 800 °C und Kohlenstoff-Aerogele sogar bis zu 2 500 °C. Damit bieten sie großes Potenzial für den Einsatz in extremen thermischen Umgebungen.

Im Vergleich zu konventionellen Dämmstoffen ermöglichen Aerogelmaterialien bis zu 40 % Energieeinsparung, da sie bei extremen Temperaturen ihre Dämmleistung beibehalten und Wärmeverluste minimieren. Feuerfeste Silica-basierte Aerogelmaterialien bieten zusätzliche Vorteile, da sie nicht brennbar sind (Euroklasse A1) und gleichzeitig Korrosionsschutz für Anlagenkomponenten ermöglichen. Durch die geringe Materialdicke bei gleicher Dämmleistung können Platzbedarf, Materialeinsatz und CO₂-Fußabdruck signifikant reduziert werden. Projekte des Clusters wie AeroFurnace zeigen mehr als 100 % bessere Dämmeffizienz gegenüber herkömmlichen Filzen bei gleichzeitiger Gewichtsersparnis. Die Integration von Aerogelmaterialien in industrielle Hochtemperaturprozesse trägt somit wesentlich zur Senkung des Energieverbrauchs, zur Verlängerung der Anlagenlebensdauer und zur Erfüllung wichtiger Umwelt- und Klimaziele bei.

Mission Stromwende 2045

Programmziel 3: Strom effizient nutzen und speichern

Aerogelmaterialien tragen zur thermischen Isolierung von Batteriepacks bei, schützen die Fahrgastzelle und dienen als Leichtbaumaterial. Sie ermöglichen höhere Reichweiten und größere Sicherheit bei Batteriebrand. Diese Anwendung hat sich als Game-Changer in der Aerogelindustrie erwiesen und stellt ein bedeutendes wirtschaftliches Potenzial im Bereich mehrerer Milliarden Euro dar.

Aerogelmaterialien aus Biopolymeren oder Recyclingruß eignen sich als Elektrodenmaterial für Batterien und Superkondensatoren. Ergänzend dazu können sie in Strukturkomponenten integriert werden, sodass multifunktionale Bauteile entstehen, die zugleich tragend und elektrisch leitfähig sind. Solche integrierten Materialien sind relevant für die nächste Generation von Elektrofahrzeugen. Derzeit sind Aerogelmaterialien in Batterie- oder Hybridelektrofahrzeugen (BEV/HEV) vielseitig einsetzbar und tragen bereits jetzt dazu bei, die Elektromobilität sicherer und effizienter zu machen und die Reichweite der Elektrofahrzeuge zu erhöhen.

Aerogelmaterialien bieten ein enormes Potenzial für den Einsatz in Leistungselektronik und integrierten Schaltkreisen (ICs). Es werden teils elektrisch isolierende Materialien mit hoher thermischer Leitfähigkeit zur thermischen Ankopplung benötigt. Erste Studien

zeigen 28 % bessere Wärmeabfuhr und 14 % weniger Materialeinsatz bei gleicher Kühlleistung, wenn strukturierte Aerogelmaterialien mit eingebetteten Nanodrähten eingesetzt werden. Diese Eigenschaften sind vor allem für Rechenzentren, Windkraftanlagen oder PV-Wechselrichter relevant. Insgesamt können Aerogelmaterialien so entscheidend zur Erhöhung der Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Leistungsfähigkeit moderner Elektronik beitragen.

Mission Wasserstoff 2030

Programmziel 1 Grünen Wasserstoff und seine Derivate effizient erzeugen

Neben der Wärmedämmung spielen Aerogelmaterialien dank ihrer hohen spezifischen Oberfläche zunehmend eine Rolle bei der Wasserstoffgenerierung und -nutzung, beispielsweise durch deren möglichen Einsatz als Katalysatorträger, Photokatalysatoren, Wasserstoffspeicher oder als Elektrodenmaterial in Elektrolyseuren. Auch hier gibt es in der Forschung bereits vielversprechende Ansätze, die es zu skalieren gilt. Kohlenstoffaerogele mit eingebetteten Platin-Nanopartikeln bieten eine vielfach erhöhte Reaktivität bei gleichzeitiger Edelmetalleinsparung (Faktor 10 - 20). Varianten mit TiO₂ oder Eisen-Stickstoff-Kombinationen ermöglichen sogar komplett platinfreie PEM-Elektrolyse. Diese Entwicklungen sind strategisch wichtig für Europa, da sie die Abhängigkeit von importierten Rohstoffen senken und neue Wertschöpfungsketten aufbauen können.

Ziel 2.3: Wasserstoff effizient speichern

In Brennstoffzellen können Aerogele als Elektrodenmaterial oder thermische Isolierung verwendet werden. Sie fördern die Gasverteilung sowie katalytische Reaktionen und reduzieren gleichzeitig den Materialverbrauch. Die Kombination aus hoher Porosität, funktionalisierbarer Oberfläche und geringer Dichte macht sie zu einem idealen Basismaterial für mobile und stationäre Brennstoffzellensysteme. Perspektivisch könnten Aerogelmaterialien als Wasserstoffspeicher fungieren – ein Feld, das derzeit intensiv erforscht wird.

Mission Transfer

Ziel 4.1: Deutsche Hersteller und Forschungskollaborationen mit europäischen Partnern fördern

Derzeit stammen hochwertige Aerogelmaterialien überwiegend aus China und den USA. Für Deutschland und Europa ergibt sich eine strategische Chance: Durch gezielte Förderung energieeffizienter Herstellungsverfahren, Skalierung von Pilotanlagen und Etablierung technischer Standards kann ein eigenständiger Markt und eine Technologieführerschaft entstehen. Insbesondere der Übergang von Batch- zu kontinuierlichen Prozessen und die Kombination mit KI-gestütztem Materialdesign sind hierfür entscheidend.

Ziel 4.2 Vollständige Wertschöpfungsketten des Energiesystems berücksichtigen

Aerogelmaterialien bieten große Chancen für eine zirkuläre, ressourcenschonende Wirtschaft – ein zentrales Ziel des 8. Energieforschungsprogramms. Ihre Herstellung aus Industrieabfällen, Bauschutt oder biogenen Reststoffen erlaubt eine stoffliche Aufwertung

bislang ungenutzter Materialströme, reduziert den Primärrohstoffbedarf und senkt CO₂-Emissionen in der Produktionskette. Zugleich entstehen durch mechanisches Recycling von Produktionsverschnitten und Montageresten neue Produkte wie Einblasdämmstoffe oder granulare Dämmzusätze.

Besonders interessant ist die Entwicklung zirkulärer Aerogelsysteme, bei denen ganze Bauelemente am Ende ihrer Lebensdauer demontiert, recycelt und erneut in den Stoffkreislauf eingebracht werden. Diese Art der Produktverantwortung bietet große Chancen für die Erfüllung zukünftiger EU-Richtlinien zur Kreislaufwirtschaft. Die Entwicklung vollständig kreislauffähiger Aerogelsysteme erfordert jedoch, dass Recyclingaspekte bereits in die Produktgestaltung integriert („Design for Recycling“) und geeignete Sammel-, Rückführungs- und Aufbereitungsinfrastrukturen eingerichtet werden.

Zukünftig denkbar sind Rücknahmesysteme auf Baustellen, bei denen Ausbauplatten demontiert, aufbereitet und erneut verbaut werden. In Kombination mit digitalen Produktpässen und Ökobilanzierung kann so eine vollständige Transparenz über Lebenszyklen und Materialflüsse hergestellt werden. Eine gezielte Förderung entsprechender Geschäftsmodelle (z. B. Aerogele-as-a-Service) könnte eine Schlüsselrolle beim Markthochlauf spielen.

Programmziel 5: Akzeptanz und Nachnutzungsmöglichkeiten in der Energieforschung durch Prinzipien der Offenen Wissenschaft steigern

Forschung zu Aerogelmaterialien muss besser kommuniziert und politisch sichtbar gemacht werden. Plattformen wie „Science made in Hamburg“ zeigen, wie Impact Stories für die öffentliche Wahrnehmung aufbereitet die Akzeptanz und das Vertrauen in neue Technologien stärken. Wichtig ist die Vernetzung regionaler Kompetenzzentren und die Förderung öffentlicher Demonstrationsanlagen, um die Potenziale von Aerogelmaterialien sichtbar und erfahrbar zu machen. Auch öffentlich-private Partnerschaften im Bereich Bildung und Ausbildung könnten helfen, das Thema langfristig in die Gesellschaft zu tragen.

Fazit und Empfehlungen an die Politik

Aerogelmaterialien verbinden Klimaschutz, Energieeffizienz und technologische Souveränität. Ihre Anwendung in Gebäuden, Industrie, Mobilität und Wasserstoffsystemen macht sie zu einem strategischen Baustein der Energiewende. Deutschland sollte die Entwicklung, Skalierung und Markteinführung dieser Technologie politisch unterstützen, um Innovationskraft, Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit zu stärken. Der systematische Einbezug von Aerogelmaterialien in strategische Innovationspolitik ist ein realistischer und wirkungsvoller Schritt zur Erreichung der Klimaziele, zur Sicherung von Technologieführerschaft und zur langfristigen Reduktion von Emissionen in allen Bereichen der Energieversorgung.

Empfehlungen an die Politik:

- Aufnahme von Aerogelmaterialien als Schlüsseltechnologie in Förderprogramme
- Aufbau nachhaltiger europäischer Produktionskapazitäten⁴
- Skalierung energie- und kosteneffizienter Herstellungsverfahren
- Stärkung zirkulärer Stoffströme durch Recyclinginitiativen
- Normierung und Zertifizierung über VDI-Richtlinien und EU-Standards
- Förderung internationaler Forschungskooperationen zu Biopolymeraerogelen
- Aufbau von Demonstrationsprojekten und Reallaboren mit öffentlicher Sichtbarkeit

5.9 Querschnittsthemen des Forschungsnetzwerkes

Eine thematische Vernetzung ist sowohl zwischen den Forschungsnetzwerken als auch innerhalb des Forschungsnetzwerks für Industrie und Gewerbe wichtig. Im Folgenden werden diese beiden Punkte daher näher ausgeführt.

5.9.1 Nutzen der Energieforschung in Industrie und Gewerbe für das Energiesystem

Die Energieforschung in Industrie und Gewerbe hat zahlreiche Wechselwirkungen mit der Transformation des gesamten Energiesystems und kann vielfältigen Nutzen abseits der Defossilisierung und Kostensenkung industrieller Produktion durch deren Flexibilisierung sowie durch Herstellung hocheffizienter Investitionsgüter für den Energieumwandlungs- und -verteilungssektor entfalten. Ziel des Forschungsnetzwerkes Industrie und Gewerbe sollte es daher sein, die Vernetzung mit den anderen Forschungsnetzwerken Energie (FNE) deutlich zu intensivieren und den Nutzen der Energieforschung für Industrie und Gewerbe für das gesamte Energiesystem fokussiert zu verfolgen.

Die Steigerung der Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe reduziert den in Zukunft erwartbaren Energiebedarf der Industrie und damit die erforderliche Angebotsmenge an Endenergieträgern, insbesondere Strom und Wasserstoff. Hier gibt es Wechselwirkungen mit den FNE Erneuerbare Energien, Stromnetze, Wasserstoff und Systemanalyse.

Insbesondere für Hochtemperaturprozesse ist die Frage, ob eine Direktelektrifizierung möglich ist, oder ob mit Wasserstoff oder hybriden Lösungen gearbeitet werden muss. Diese Frage muss für jede Hochtemperatur-Anwendung individuell geklärt werden. Eine Intensivierung der Forschung in diesem Bereich würde zu mehr Klarheit über zukünftige Wasserstoff- und Strombedarfe der Industrie führen. Auch der zukünftige Biomasse-Bedarf wird bei dieser Frage der Erzeugung von Hochtemperaturwärme mit der Option als Chemierohstoff thematisiert. Diese Informationen bestimmen Größenordnungen der zukünftigen inländischen Energieinfrastruktur für die industrielle Produktion. Ein intensiver Austausch mit den FNE Erneuerbare Energien, Bioenergie, Stromnetze, Systemanalyse

und Wasserstoff dürfte sehr nützlich sein. Zudem könnte die Hochtemperatursupraleitung zur Verminderung von Materialbedarf von Windkonvertern sowie von Leitungsverlusten und zur deutlichen Steigerung der Übertragungskapazität (bei gleichem Raumbedarf) für Stromtransport in städtischen Gebieten (z. B. im 2 bis 20 km-Bereich) beitragen.

Die Steigerung der Nachfrageflexibilität des Industriesektors dürfte einen weiteren Beitrag zur Steigerung der Gesamteffizienz und der Stabilität einer im Wesentlichen auf volatilen Energiequellen beruhenden Stromversorgung liefern. Flexibilisierung des Strombezugs wird den Bedarf für Redispatch reduzieren und zugleich die Stromproduktionskosten senken. Die Energieforschung in Industrie und Gewerbe ist für die Ausweitung der Flexibilitätspotenziale sowie deren Wirtschaftlichkeit zentral, da neue technische Lösungen für Nachfrageflexibilität, z. B. thermische Speicher, entwickelt werden. Hier sind vor allem die FNE Stromnetze, Systemanalyse und Erneuerbare Energien betroffen.

Das FNE Energiewendebauen könnte vom Input des FNE Industrie und Gewerbe mit Blick auf die Themen Lebenszyklusbetrachtungen, embedded emissions, graue Energie, Scope-3 Emissionen profitieren.

5.9.2 Querschnittsthemen der Forschungsfelder des Forschungsnetzwerks IuG

Im Folgenden werden vielversprechende Querschnittsthemen zwischen den aktiven Strukturen des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe betrachtet. Die Identifikation erfolgte durch Vertreterinnen und Vertreter aller Forschungsthemen, unterstützt durch die Begleitforschung EE4InG2. Es wurden die Perspektiven des entwickelnden als auch des anwendenden Forschungsfeldes oder Clusters berücksichtigt (vgl. Auszug der identifizierten Querschnittsthemen in Abbildung 5-17). Die Querschnittsthemen wurden hinsichtlich ihrer Relevanz (erwarteter Effizienzbeitrag) nach Priorität A (sehr relevant, dunkelgrün) und Priorität B (relevant, hellgrün) kategorisiert. Aus der Prioritätsstufe A werden im Folgenden aus der Sicht des Technik-entwickelnden Themenfeldes die Chancen eines schnellen Wissens- und Techniktransfers dargestellt.

Technologie-entwicklungs-FF/Cluster	Technologieanwendungs-FF/Cluster							
	TPT	WuA	WP/KT	CVT	FT	Tribologie	HTS	Aerogele
TPT		WT mit Keramik-schichten	Einsatz WP zur Prozesswärme-erzeugung	E-Cracker; Pyrolyse	Metallpulver für 3D-Produktion; Elektrolyseure; dezentrale H ₂ -Herstellung		Herstellen geeigneter Spezial-Legierungen	
WuA	Abwärmenutzung von Abgas-Restwärme		Sorptions-Kälteerzeugung; Abwärme als Quelle für WP	Wärme-management/ Elektrifizierung; Wärmeversorgung			Thermische Isolierung	
WP/KT	Abschrecken von warmen Materialien; Kühl- u. Kältetechnik in der Anlagenperipherie; Produktabwärme	Wärmekreislauf-führung aus Prozessabwärme		HT-WP; Stofftrennung mit WP in Destillations-kolonnen; Simulation Einsatz WP auf Prozesse	Fertigung hocheffizienter Kompressoren/Wärmeübertrager	Geänderte tribol. Anforderungen durch Weiter-/Neuentwicklung; Kompressoren-technik	Spz. Kälte- u. Kühllösungen (Kryotechnik); Wartungszyklen Krypumpen reduzieren	
CVT	Wirkung von H ₂ /Chemie auf Feuerfest/Keramik	Beschichtungen zur Vermeidung von Korrosion u. Fouling; Membran-Technik	Effektive Kälte- und Arbeitsmittel		Lackierpulver u. Materialien aus Kunststoff; Lernen von funktionaler Sichtweise der CVT; Modularisierte Anlagen	Synth. Schmiermittel; Schmierstofffreie Technologien	Kunststoff- und Isolier-Ummantelungen	Herstellung von Aerogelen
FT	Hochleitungs-materialien mit verbesserten thermischen Eigenschaften; 3D-Druck für HT-Wärmeübertrager	Fertigungsketten/-techniken für Wärmespeicher/-übertrager; Flexibilisierung	Ölfreie Turbokompressoren	3D-Fertigung Armaturen/Reaktoren; Modularisierung MTP/Plug-and-Play		Intrinsische Schmierung; Oberflächen-strukturierung	Präzisionsfertigung für supraleitende Materialien für erhöhte Leitfähigkeit und Stabilität	
Tribologie	Verminderte Reibung/Verschleiß bei Transportanlagen, E-Motoren	Verminderte Reibung/Verschleiß bei Pumpen, Ventilatoren, E-Motoren	Verminderte Reibung/Verschleiß bei Pumpen, Kompressoren, Ventilatoren, ölfreie Verdichter	Verminderte Reibung/Verschleiß mechanische verfahrens-technische Anlagen; Wasserstoff-tribologie	Verminderte Reibung/Verschleiß Werkzeuge; Super Lubricity; Oberflächen-technologie; Schmierverfahren		Verminderte Reibung/Verschleiß bei Pumpen, Kompressoren, Kälteerzeugung	
HTS	Vermeidung von Stromtransport-verlusten in betrieblichen Netzen			Verminderte Leitungsverluste bei Stromversorgung	Stromversorgung Fertigungsstandort; G leichtstromfabrik	Supraleitende Lager (Bilfinger); Schwebetechnik		
Aerogele	Wärme-Dämmung mit Aerogelen	Aerogele als Adsorbens für thermische Adsorptions-speicher; Dämmung	Erhöhung Energieeffizienz durch bessere Dämmung; Aerogele als Kühlmittelträger	Aerogele als Trägermaterialien in katalytischen Prozessen	Aerogele in additiver Fertigung	Aerogele als Schmierstoffe; Aerogelkomposite zur Erhöhung der Verschleißbarkeit	Kunststoff- und Isolier-Ummantelungen	

Abbildung 5-17: Auszug aus Gesamtüberblick der Querschnittsthemen. Priorisierung in Priorität A (dunkelgrün) und Priorität B (hellgrün).

Thermoprozesstechnik

• Chancen für Wärme und Abwärme

In der Thermoprozesstechnik besteht ein erhebliches Potenzial zur stärkeren Nutzung industrieller Abwärme. Aktuell kommen häufig Luftvorwärmssysteme zum Einsatz, die Abgaswärme wird zur Vorwärmung der Verbrennungsluft genutzt. Dennoch bleiben Abgastemperaturen von 120 bis 250 °C häufig ungenutzt (Fritz 2023, Fritz et al. 2022). Diese Wärme kann oft nicht direkt für andere Industrieprozesse genutzt werden, eignet sich aber beispielsweise zur Einspeisung in Wärmenetze. Die Thermoprozesstechnik fokussiert sich auf die Optimierung einzelner Aggregate, während das Forschungsfeld Wärme und Abwärme zur systemischen Einbindung, Speicherung und Weiterverwertung von Abwärme beiträgt. Dies gilt auch für die Weiterentwicklung zentraler Komponenten wie Wärmeübertragern, bei denen Korrosion und Fouling die Lebensdauer, Wartung und Effizienz beeinträchtigen können.

Ein wichtiges Querschnittsthema zwischen beiden Forschungsfeldern ist die PtH-Technik, die Prozesswärme aus Strom bereitstellt. PtH-Verfahren wie elektrische Widerstandsheizung oder Induktion leisten nicht nur einen Beitrag zur Dekarbonisierung, sondern bieten auch Synergien mit der Abwärmenutzung, etwa durch die Kopplung mit Wärmespeichern oder flexible Betriebsstrategien. Durch die Zusammenarbeit der Forschungsfelder lassen

sich prozessnahe und systemische Lösungen zur Abwärmenutzung entwickeln – etwa durch die Kombination aus thermoprozessseitiger Wärmebereitstellung und wärmetechnischer Optimierung der Rückgewinnung, Speicherung und Weiterverwendung der Abwärme.

Fertigungstechnik

- *Chancen für die Thermoprozesstechnik*

Die Thermoprozesstechnik profitiert zunehmend von Entwicklungen der Fertigungstechnik – insbesondere im Bereich der additiven Fertigung. Diese bietet die Möglichkeit, Bauteile wie Wärmetauscher und Brennkammern anwendungsnah und geometrisch optimiert durch die Realisierung komplexer, innenstrukturierter Geometrien herzustellen. Sie erlaubt die Umsetzung maßgeschneiderter Designlösungen mit hoher Wärmeleitfähigkeit bei zugleich geringem Strömungswiderstand.

Durch die gezielte Gestaltung von Strömungskanälen und Oberflächenstrukturen lassen sich hocheffiziente Wärmetauscher realisieren, die ideal auf die Anforderungen thermischer Prozesse abgestimmt sind. Die enge Kooperation mit der Fertigungstechnik ist daher essenziell, um nicht nur die Materialentwicklung, sondern auch die Prozessführung, Nachbearbeitung und Qualitätssicherung für thermisch hochbeanspruchte Komponenten weiterzuentwickeln. So kann die additive Fertigung künftig eine Schlüsseltechnologie zur Effizienzsteigerung in der Thermoprozesstechnik darstellen (Kahlfeld et al. 2023, Mehla et al. 2024).

- *Chancen für die Chemische Verfahrenstechnik*

Fortschritte in der Fertigungstechnik – insbesondere im Bereich der additiven Fertigung – eröffnen neue Möglichkeiten für die Entwicklung und Optimierung verfahrenstechnischer Komponenten. Die chemische Verfahrenstechnik profitiert unmittelbar von neuen Fertigungslösungen durch die Realisierung komplexer Geometrien, strömungsoptimierter Strukturen und funktionsintegrierter Bauteile. Beispielsweise lassen sich reaktive oder thermisch hochbelastete Armaturen und Reaktorkomponenten durch 3D-Druck gezielt auf ihre Einsatzbedingungen hin anpassen. Umgekehrt könnten Modularisierungskonzepte wie MTP (Module Type Package) oder Plug-and-Play-Ansätze aus der Verfahrenstechnik zumindest teilweise auf die Fertigungstechnik übertragen werden. Solche Ansätze könnten die Planung und Inbetriebnahme von Anlagen deutlich beschleunigen und flexibilisieren. Einheitliche Schnittstellenstandards und die Nutzung FAIRer Datensätze fördern die Interoperabilität und schaffen die Grundlage für eine digital unterstützte Prozessentwicklung, bei der Simulationsmodelle, Sensorik und modulare Hardware effizient zusammenspielen.

- *Chancen für Wärmepumpen- und Kältetechnik*

Im Zuge der Transformation von Wärmebereitstellungssystemen entstehen neue Anforderungen an Effizienz, Kompaktheit und Modularität von Wärmepumpen und Kältemaschinen sowie deren Systemkomponenten. Dies eröffnet vielversprechende Schnittstellen zur Fertigungstechnik, insbesondere in der Entwicklung und Herstellung hocheffizienter, hochintegrierter Wärmeübertrager (als zukünftige Perspektive) sowie ölfreier Turbo-kompressoren. Zudem besteht erhebliches Potenzial bei der Fertigung hocheffizienter Kompressoren durch Einsatz fortschrittlicher Verfahren wie additiver Fertigung, Laserstrukturierung oder seriennaher Blechumformung. Anforderungen aus der Wärmepumpentechnologie, etwa zur thermischen Zyklisierungsfestigkeit, konstruktiven Flexibilität und Skalierbarkeit, können gezielt in zukünftige Fertigungskonzepte integriert werden. Diese Verzahnung ermöglicht eine effiziente, gekoppelte Bereitstellung von Wärme und Kälte, etwa im Bereich der Reinraumtechnik mit neuester Reinlufttechnik (RLT), und fördert die Entwicklung anpassungsfähiger, wirtschaftlich produzierbarer Systeme.

- *Chancen für Wärme und Abwärme*

Die effiziente Nutzung von Prozesswärme und industrieller Abwärme stellt hohe Anforderungen an Komponenten, die thermisch belastbar, geometrisch anpassbar und werkstoffseitig optimiert sein müssen. Dies betrifft beispielsweise die Fertigung von wärmeübertragenden und speichernden Systemen, für die auch Zyklenstabilität eine wichtige Rolle spielt. Daraus ergeben sich vielfältige Anknüpfungspunkte zur Fertigungstechnik, insbesondere in der werkstoffgerechten Auslegung und Herstellung solcher Bauteile. Ein engeres Zusammenspiel beider Bereiche bietet Potenzial, Erkenntnisse aus der thermischen Systementwicklung – etwa zu Temperaturprofilen, Einsatzumgebungen oder Betriebszyklen – gezielt in die Entwicklung neuer Fertigungsprozesse und Werkstoffsysteme einfließen zu lassen. Besonders relevant sind additive Verfahren wie der 3D-Druck, die strukturierte Oberflächen, integrierte Strömungsführungen und funktionsintegriertes Design ermöglichen – Eigenschaften, die z. B. für Hochtemperatur-Wärmeübertrager oder kompakte Wärmespeicher von Vorteil sind. Eine stärkere Verzahnung von Werkstoffentwicklung, Fertigungstechnologie und thermischem Design könnte neue Impulse für die Nutzung industrieller Abwärme schaffen.

Wärmepumpen- und Kältetechnik

- *Chancen für Wärme und Abwärme*

Bei der Rückgewinnung industrieller Abwärme ergeben sich Schnittstellen zwischen der Wärmepumpentechnologie und der Forschung zur Abwärmenutzung. Potenziale bestehen insbesondere in der Entwicklung integrierter Systemlösungen zur Rückgewinnung nieder- bis mitteltemperierter Prozesswärme und deren thermodynamisch optimierter Einbindung in Wärme- und Kältekreisläufe. Dies schließt auch die mögliche Nutzung von thermischen Speichern mit ein. Schnittstellen ergeben sich bei der Auslegung wärmegeführter Prozessketten, der Integration regenerativer Wärmeströme sowie der

Entwicklung temperaturvariabler Arbeitsmedienkreisläufe. Eine koordinierte Bearbeitung durch beide Forschungsfelder kann die Grundlage für adaptive, sektorübergreifende Wärmenutzungskonzepte schaffen. Auch eine trilaterale Zusammenarbeit mit dem Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik erscheint vielversprechend.

- ***Chancen für die Chemische Verfahrenstechnik***

Die Entwicklung von Hochtemperatur-Wärmepumpen eröffnet neue Perspektiven für die Elektrifizierung thermischer Trennprozesse in der chemischen Verfahrenstechnik. Potenziale ergeben sich in der verfahrenstechnischen Integration von Wärmepumpensystemen in Kolonnen, Verdampfern und Sorptionsprozesse auf unterschiedlichen Temperaturniveaus. Insbesondere bei Destillations- oder Verdampferkolonnen können Wärmepumpen durch gezielte Temperaturkopplung zwischen Sumpf- und Kopf-temperatur oder zwischen Dampfzufuhr und Wärmeabführung zur Effizienzsteigerung beitragen. Forschungsbedarfe bestehen in der stofflichen und konstruktiven Auslegung ölfreier Verdichter für Anwendungen mit direktem Kontakt zum Prozessmedium, im Einsatz chemikalienbeständiger und korrosionsresistenter Werkstoffe sowie in der gezielten thermischen Kopplung von Prozessschritten durch Kreislaufintegration. Hochporöse Materialien wie Aerogele können ergänzend zur Effizienzsteigerung durch verbesserte thermische Isolation beitragen. Simulationsgestützte Methoden ermöglichen eine präzise Bewertung der Auswirkungen auf verfahrenstechnische Abläufe und die dynamischen Wechselwirkungen zwischen Wärmepumpe und Trennapparat. Die enge Verzahnung beider Disziplinen eröffnet die Möglichkeit, industrielle Wärmebereitstellung grundlegend neu zu denken – hin zu vollständig elektrifizierten, rückgewinnungsfähigen und energieautarken Prozessketten in der Grundstoff- und Chemieindustrie.

- ***Chancen für die Hochtemperatursupraleitung***

Die HTS-Technik benötigt ein Kühlmittel bei etwa - 200°C; zurzeit wird dies mit Flüssigstickstoff in einem Kryostaten erreicht. Den vermeidbaren ohmschen Verlusten konventioneller Stromleiter steht bei der HT-Supraleitungstechnik der energetische Aufwand für die Kühlung gegenüber. Die Fortschritte bei der Herstellung der supraleitenden Kabel aus keramischen HTS-Materialien waren in den vergangenen Jahren erheblich, so dass jetzt die Technik und die Betriebskosten der Kryotechnik in den Vordergrund rücken. Hier geht es um Effizienzverbesserungen der Flüssigstickstoff-Pumpe, des Zwischenkühlers und der Vakuumpumpe sowie bei den Kälteerzeugungsmaschinen, um ein geschlossenes Kühlsystem aufzubauen. Neben dem Wärmeeintrag durch den Kryostaten sind auch die hydraulischen Verluste durch den zirkulierenden Flüssigstickstoff und der Wärmeeintrag der Zirkulationspumpen wichtig. Die hierdurch erforderliche zusätzliche Kälteleistung lässt sich u. a. durch den Einbau von Zwischenkühlstationen beeinflussen.

Wärme und Abwärme

- *Chancen für die Chemische Verfahrenstechnik*

Das Wärmemanagement in der chemischen Verfahrenstechnik erfordert eine präzise Abstimmung von Wärmebereitstellung, -nutzung und -speicherung. Ergebnisse aus dem Forschungsfeld Wärme und Abwärme, insbesondere zu PtH-Konzepten und thermischen Speichern, bieten hier konkrete Ansatzpunkte für die Elektrifizierung und Flexibilisierung verfahrenstechnischer Prozesse sowie eine optimierte, systemische Nutzung von Abwärmern. Bei der Elektrifizierung der Industrie spielt der Energieeintrag in Form von Wärme eine wesentliche Rolle. Die flexible Sektorkopplung auf Basis elektrischer Wärmebereitstellung und Speicherlösungen erlaubt es, Energieangebot und -nachfrage zeitlich zu entkoppeln. Besonders relevant ist dies in Chemiestandorten mit hoher Wärmenachfrage, etwa in Chemieparks, wo die Integration großskaliger thermischer Speicher zur Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch beitragen kann.

Tribologie

- *Chancen für die Fertigungstechnik*

An der Schnittstelle zwischen Fertigungstechnik und Tribologie bestehen vielfältige technologische Potenziale. Tribologische Innovationen – etwa reibungsarme, verschleißbeständige oder ölfreie Systeme – stellen hohe Anforderungen an Fertigungspräzision, Werkstoffauswahl und Oberflächenbehandlung. Fortschrittliche Fertigungsverfahren ermöglichen wiederum tribologisch optimierte Geometrien, Mikrostrukturen und Beschichtungen. Ein Beispiel sind ölfreie Turbokompressoren, bei denen tribologisch anspruchsvolle Lager und Dichtungen präzise Fertigungstechnologien erfordern. Auch miniaturisierte Systeme wie Mikrolager oder Präzisionsaktuatoren profitieren maßgeblich von einem engen Zusammenspiel beider Disziplinen.

Die Reduktion von Reibung und Verschleiß ist zugleich zentral für Werkzeugmaschinen, Robotersysteme und Antriebstechnik, da sie Präzision, Energieeffizienz und Wartungsfreundlichkeit steigert. Potenziale liegen hier insbesondere in tribologisch optimierten Oberflächen, funktionalisierten Werkstoffen und intrinsischer Schmierung durch additive Fertigung, die externe Schmierstoffe reduzieren oder ersetzen können. In Präzisionsgetrieben oder Hochleistungsaktuatoren verbessern Technologien wie laserstrukturierte Oberflächen oder DLC-Beschichtungen (Diamond-Like-Carbon) die Systemperformance deutlich. Langfristig eröffnet das Konzept der Superlubricity weitere Innovationspfade, deren Umsetzung eng mit fertigungstechnischen Anforderungen verbunden ist. Eine intensivere Verzahnung der beiden Disziplinen könnte die industrielle Umsetzbarkeit tribologischer Lösungen deutlich beschleunigen.

- **Chancen für die Chemische Verfahrenstechnik**

In verfahrenstechnischen Anlagen – etwa bei Rührwerken, Kolbenkompressoren oder Fördersystemen – ergeben sich vielfältige Anknüpfungspunkte zwischen tribologischen Anforderungen und verfahrenstechnischer Auslegung. Reibungs- und Verschleißprozesse wirken sich direkt auf Energieeffizienz, Standzeiten und die Eignung von Werkstoffen in medienbelasteten Umgebungen aus. Gleichzeitig beeinflussen tribologische Eigenschaften zentrale Parameter des Prozessdesigns – etwa Pumpbarkeit, Partikelabrieb oder die Stabilität von Kreislaufsystemen. Das wechselseitige Zusammenspiel beider Bereiche bietet Potenziale, um Prozesse robuster und komponentenschonender zu gestalten. Ein besonders dynamisches Feld ist die Wasserstofftribologie: Entlang der H₂-Wertschöpfungskette – bei Verdichtern, Speichern oder medienführenden Systemen – stellen sich neue tribologische Herausforderungen, die nur im engen Zusammenspiel mit der chemischen Verfahrenstechnik lösbar sind.

Hochtemperatursupraleitung

- **Chancen für die Thermoprozesstechnik und Chemische Verfahrenstechnik**

Die Hochtemperatursupraleitung hat bei der Stromversorgung mit sehr hohen Stromdichten für Industrieöfen mit Induktions- oder Widerstandserwärmung ein erhebliches Stromeffizienz-Potenzial. Denn die Stromleitungsverluste zwischen der Abnahmestelle von der Höchst- oder Hochspannungsebene bis zum jeweiligen Ofen am Betriebsstandort können bei konventioneller Stromzuführung erheblich sein. Je nach Leistungsbedarf der konkreten Industrieöfen, ihrer Betriebsweise und ihrer Standortsituation sind Entwicklungen zur Anpassung von Komponenten der HTS-Technik erforderlich (z. B. die Anschlüsse oder die Auslegung der Kryoplanen). Ähnliches gilt für die Stromzuführung von Elektrolysen wie z. B. für die Erzeugung von Primäraluminium oder die Kupferraffination, die elektrolytische Herstellung von Chlor oder Fluor. Schließlich könnten Warmumformprozesse durch Einsatz von Magnetheizern mit HTS-Spulen für Wärmeerzeugung in Metallen wesentlich energieeffizienter betrieben werden als Öfen zur Zwischenerhitzung (z. B. Strangpressen von Aluminium).

Aerogele

- **Chancen für die Thermoprozesstechnik**

Wärmedämmung ist in der Thermoprozesstechnik ein entscheidender Faktor für die Effizienz und Sicherheit thermischer Prozesse. In diesem Kontext gewinnen Aerogele zunehmend an Bedeutung, da ihr Einsatz eine signifikante Reduktion des Wärmeverlusts erzielen kann, was die Energieeffizienz verbessert. Aerogele bieten speziell für Thermoprozessanlagen eine vielversprechende Kombination aus guten Wärmedämmeigenschaften, hoher mechanischer und chemischer Stabilität, sowie geringem Platzbedarf. Zudem sind anorganische Aerogele nicht brennbar. Der Einsatz von Aerogelen unterstützt dadurch die Thermoprozesstechnik bei Forschungsvorhaben, welche auf nachhaltige und ressourcenschonende Prozesse abzielen. Zusätzliche Forschungsarbeit sowie

Langzeitversuche sind in Zukunft notwendig, um Aerogelmaterialien gezielt auf die spezifischen Prozessanforderungen abzustimmen.

- *Chancen für die Wärme und Abwärme*

Aerogele können dazu beitragen, die Energieeffizienz bestehender und zukünftiger Prozesse der Abwärmenutzung zu verbessern. Dieser Effekt kann sowohl bei bestehenden Thermoprozessen als auch bei diversen Speichertechnologien genutzt werden. Des Weiteren können durch den Einsatz von aerogelbasierten Dämmmaterialien energetische Verluste in Rohrleitungen oder Anlagen, die mit Abwärme arbeiten, erheblich reduziert werden.

Aerogele unterstützen auch die globalen Trends der Dekarbonisierung und Verbesserung von Ressourcennutzung. Zukünftige Forschungskooperationen könnten sich auch hier darauf konzentrieren, speziell auf die Einsatzgebiete abgestimmte Materialkombinationen zu entwickeln (Aerogelkomposite o.ä.) und deren Recyclingskonzepte zu realisieren.

- *Chancen für die Wärmepumpen- und Kältetechnik*

Die Dämmung von Wärmepumpen spielt eine entscheidende Rolle bei der Minimierung von Wärmeverlusten innerhalb des Systems. Mit ihrem niedrigen Wärmeleitvermögen und ihrer hohen spezifischen Oberfläche sind Aerogele in der Lage, signifikante Verbesserungen in der Dämmleistung verglichen mit konventionellen Dämmstoffen zu erzielen. Hierdurch können sowohl die Betriebszeiten als auch die Betriebskosten gesenkt werden. Darüber hinaus eröffnet der Einsatz von Aerogelen als Kühlmittelträger für Wärmepumpen neue Möglichkeiten zur Verbesserung der Systemeffizienz. Aerogele können so gestaltet werden, dass sie spezifische thermische Eigenschaften aufweisen, die es ihnen ermöglichen, Wärme effizient zu transportieren und dabei gleichzeitig ihre eigenen thermischen Verluste zu minimieren. Dies könnte insbesondere in Anwendungen relevant sein, wo hohe Temperaturen oder schnelle Temperaturwechsel erforderlich sind.

6 Fazit und Handlungsempfehlungen

6.1 Fazit

Der Endenergieverbrauch von Industrie und Gewerbe betrug 2023 in Summe 3 330 PJ, das sind rund 40 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland (AGEB 2025). Das Verarbeitende Gewerbe trug im Jahr 2022 mit 713,5 Mrd. Euro rund 20 % zur gesamtwirtschaftlichen Bruttowertschöpfung Deutschlands bei (AK UGRdL). Diese Zahlen verdeutlichen sowohl die hohe Relevanz von Industrie und Gewerbe für den Wohlstand in Deutschland, als auch für die Transformation hin zu klimaneutralem Wirtschaften.

Der Draghi-Report zur Zukunft der Wettbewerbsfähigkeit Europas von 2024 weist auf eine deutliche Innovationslücke Europas gegenüber den USA und China als zentralen Wettbewerbern hin. Forschung und Entwicklung zur Nutzung von Energie in Industrie und Gewerbe sind essenziell, um Potenziale zur Energieeinsparung und zur Defossilisierung der Produktion durch neue Techniken zu heben, zu erweitern, und wirtschaftlich attraktiver zu gestalten. In geopolitisch unsicheren Zeiten ist es für eine rohstoffarme und exportorientierte Volkswirtschaft wie Deutschland von fundamentaler Bedeutung, die Energieproduktivität zu steigern und damit zugleich die Wettbewerbsfähigkeit auf dem heimischen Markt als auch auf internationalen Märkten zu sichern und auszubauen. Eine hocheffiziente Nutzung von Energie und stetige technische Innovation sind hierfür unverzichtbar – hierfür braucht es eine Kraftanstrengung sowohl in Forschung und Entwicklung als auch für eine schnellere Diffusion in die Anwendungsmärkte.

Dabei ist die Bandbreite der heute beforschten Techniken im Energieforschungsprogramm bereits enorm groß. Dies wird schon durch die vom Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe abgedeckten Themen anhand der Forschungsfelder und Cluster deutlich: von der chemischen Verfahrenstechnik, über die Fertigungstechnik, die Hochtemperatursupraleitung, die Thermoprozesstechnik und die Tribologie, bis zu den Forschungsfeldern Wärme und Abwärme, Wärmepumpen und Kältetechnik und dem Cluster Aerogele. Und auch wenn diese Aufzählung bereits sehr umfassend ist und die genannten Forschungsfelder und Cluster wiederum jeweils eine breite technische Vielfalt umfassen, ist sie bei weitem noch nicht hinreichend, um die technische Heterogenität der Forschungsthemen zur Energieanwendung in Industrie und Gewerbe vollständig abzubilden. Es fehlen beispielsweise wichtige Bereiche der Sensorik und Digitalisierung, der künstlichen Intelligenz und der betrieblichen Gleichstromtechnik.

Das Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe, getragen von den im Rahmen des Energieforschungsprogramms Forschenden selbst und dem Projektträger Jülich, unterstützt durch die Begleitforschung, ist ein etabliertes und aktives Forum der deutschen Energieforschung. Es unterstützt das BMWF mit Empfehlungen zur Weiterentwicklung der Energieforschungsförderung für Industrie und Gewerbe. Die gemeinsame Arbeit in den Strukturen des Forschungsnetzwerks trägt dazu bei, neue Trends zu identifizieren und

Verbundvorhaben zu entwickeln, die auf die Bedürfnisse der Industrie und des Gewerbes zugeschnitten sind.

Die in dieser Strategie enthaltenen Forschungsroadmaps für die sieben Forschungsfelder und das Cluster Aerogele zeigen für die jeweiligen Themenbereiche die prioritären technischen Forschungsthemen für die kommenden zehn Jahre auf:

- Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik:
 - Umstellung der Rohstoffbasis weg von fossilen Rohstoffen und hin zu nachwachsenden und recycelten Rohstoffen
 - Umstellung des Energieeintrags in Prozesse durch Elektrifizierung und Flexibilisierung
- Forschungsfeld Fertigungstechnik:
 - Umstellung auf Energie- und ressourceneffiziente sowie energieflexible Prozessketten
 - Digitalisierung in der Fertigungstechnik vorantreiben für resiliente, flexible und nachhaltige Produktionssysteme
- Forschungsfeld Hochtemperatursupraleitung:
 - Demonstrationsprojekte im Bereich von Energiekabeln und Stromschienen,
 - die Optimierung der Kälte- und Kryotechnik hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Robustheit sowie
 - weitere Anwendungsentwicklungen für supraleitende Strombegrenzer und Windkraftanlagen
- Forschungsfeld Thermoprozesstechnik:
 - Defossilisierung der industriellen Prozesswärme durch:
 - Alternative Brennstoffe (u.a. Wasserstoff, Ammoniak)
 - Elektrifizierung
 - Digitalisierung und Flexibilisierung als Enabler der Defossilisierung
- Forschungsfeld Tribologie:
 - Nachhaltige Materialien und Schmierstoffe zur Steigerung der Effizienz
 - Virtuelles Design tribologischer Kontakte und Zustandsüberwachung von Maschinen und Anlagen für Effizienz, Robustheit und Resilienz
- Forschungsfeld Wärme und Abwärme:
 - Machbarkeitsstudien, z.B. über Mikroprojekte, senken die Hemmschwelle für die konkrete Planung und Beantragung größerer FuE Vorhaben;

Demonstrationsprojekte schaffen Sichtbarkeit und Vertrauen bei den Anwendern

- Die Elektrifizierung von Industrieprozessen sowie die flexible Sektorkoppelung mit nachfrageseitigen Systemkomponenten wie z.B. thermischen Speichern
- Forschungsfeld Wärmepumpen und Kältetechnik:
 - Entwicklung von Methoden und Technologien zur Vereinfachung der Installation, der Integration in den Bestand sowie der Standardisierung von Anlagen
 - Erforschung und Optimierung der Nutzung verschiedener Wärmequellen zur Steigerung der Effizienz
- Cluster Aerogele:
 - Aufbau von Demonstrationsanlagen im großen Maßstab und Unterstützung der Prozessskalierung
 - Implementierung und Erprobung des Materials zur Energieeffizienzsteigerung in Endanwendungen
 - Verstärkte Untersuchung von Nutzungsmöglichkeiten nachhaltiger und recycelter Rohstoffe

Diese Auflistung kann nur einen ersten Eindruck der Vielfältigkeit der Forschungsthemen bieten, für eine ausführliche Darstellung wird auf Kapitel 5 verwiesen.

Die gemeinsame Arbeit an der Entwicklung dieser Strategie im Forschungsnetzwerk hat gezeigt, wie viele thematische Querverbindungen mit Blick auf die beforschten Techniken es zwischen den Forschungsfeldern und Clustern gibt. Ein intensivierter Austausch zu Querschnittsthemen kann zukünftig dazu beitragen, mehr und anwendungsnahe Verbundvorhaben zu entwickeln und durchzuführen. Ein verstärkter Austausch des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe mit den anderen Forschungsnetzwerken Energie ist ebenso vielversprechend. Die Defossilisierung und Reduktion des Energieverbrauchs in Industrie und Gewerbe durch Forschung und Entwicklung und den Markteintritt neuer Techniken wird auch positive Auswirkungen auf die Zielsetzungen der anderen Forschungsnetzwerke haben.

Ein zentrales Fazit der Strategieentwicklung ist die Notwendigkeit, die vielfältigen technischen Lösungen aus der Energieforschung für Industrie und Gewerbe einerseits konsequent bis zur Marktreife auszuentwickeln, und andererseits durch das politische Instrumentarium eine schnelle Adaption dieser technischen Lösungen durch die Anwenderbranchen zu ermöglichen, beispielsweise durch die verstärkte Förderung von Demonstrationsprojekten und ggf. eine Risikoübernahme für den Probetrieb und die ersten Jahre des Regelbetriebs.

6.2 Handlungsempfehlungen

Die Handlungsempfehlungen richten sich insbesondere an die für die Energieforschung zuständigen Entscheidungsebenen der Exekutive und Legislative, aber mitunter auch an andere Akteure des Innovationssystems wie z.B. die technischen Ausschüsse von Hersteller- und Anwenderbranchen in Industrie und Gewerbe. Die Handlungsempfehlungen wurden im Zuge der Strategieentwicklung gemeinsam von den Akteurinnen und Akteuren im Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe mit der Begleitforschung EE4InG2 erarbeitet.

Wettbewerbsfähigkeit und Resilienz durch FuE für Industrie und Gewerbe sichern

Das Verständnis für die wichtige Rolle von Energieeffizienz und Defossilisierung in Industrie und Gewerbe in Verbindung mit FuE für innovative Techniken zur Sicherung und Stärkung von Wettbewerbsfähigkeit und Resilienz sollte gestärkt werden ("Efficiency first").

Forschung und Entwicklung verwandelt technische Ideen in Lösungen und erarbeitet Chancen aus Herausforderungen. Durch FuE steigt das wirtschaftliche Potenzial zur Einsparung von Energie im Produktionsprozess und ermöglicht den Umstieg von fossilen auf erneuerbare Energieträger in der Produktion. Dies stärkt die Innovationskraft und die Wettbewerbsfähigkeit. Insbesondere für den exportorientierten Mittelstand ist die Forschungsförderung ein wichtiges Element, um sich von Wettbewerbern abzusetzen und die eigene Marktposition rechtzeitig und nachhaltig zu stärken.

Die Finanzierung der nationalen Energieforschungsförderung für Industrie und Gewerbe sollte nachhaltig und verlässlich gestärkt werden, um dieser entscheidenden Rolle gerecht werden zu können. Eine Stagnation der öffentlichen FuE-Budgets für Industrie und Gewerbe auf dem derzeitigen, relativ zur deutschen Wirtschaftskraft sehr niedrigen Niveau, stünde der Ausschöpfung der genannten Potenziale und Möglichkeiten entgegen. Das Risiko weiterer Exportrückgänge auf den internationalen Gütermärkten nähme zu.

Vermeidung von Unsicherheit über den energie- und klimapolitischen Rahmen seitens der Bundesregierung und der EU

Die Bereitschaft von Technikhersteller- und -anwenderunternehmen an FuE-Vorhaben teilzunehmen ist von einer klaren und verlässlichen Perspektive des energie- und klimapolitischen Rahmens abhängig. Nur wenn das Ziel der Klimaneutralität bis 2045 aus Sicht der investierenden Industrie- und Gewerbeunternehmen politisch glaubhaft verfolgt wird, besteht auch Vertrauen darin, dass die erforderlichen Anstrengungen zur Ermöglichung einer wirtschaftlichen Umsetzung defossilierter Techniken in Industrie und Gewerbe vorangetrieben und realisiert werden.

Dies betrifft beispielsweise die Bereitstellung von Infrastrukturen (Strom- und Wasserstoffnetz), den Ausbau erneuerbarer Energien, sowie eine progressive Entwicklung des CO₂-Preises bei Wahrung des Carbon Leakage Schutzes z.B. durch einen funktionalen CBAM.

Proaktiver Umgang mit den derzeit offenen Entwicklungen von Geo-Politik, Welthandels- und globaler Klimapolitik

Angesichts der unsicheren Entscheidungssituation für Unternehmen, die verursacht wird durch derzeitige Entwicklungen in der Geopolitik, durch die Zoll-Politik der amerikanischen Regierung und die regional auseinanderdriftenden Klimapolitiken, stellt sich die Frage einer möglichst unabhängigen Energie-FuE-Politik. Die Analysen zweier Alternativ-Szenarien („Zielorientierte weltweite Dekarbonisierung“ und „Späte weltweite Dekarbonisierung“) kommen zu folgenden Ergebnissen:

- Energieeffiziente Lösungen sind zukunfts-invariant, sofern von ihnen sowohl bei transformierten als auch bei fossil betriebenen Produktionsstrukturen eine Rentabilität erwartet werden kann. Die FuE-Anstrengungen zu diesen Lösungen haben keine Risiken seitens der globalen Entwicklungen. Sie stärken auch das Exportpotenzial der Hersteller in Deutschland.
- Besonders aussichtsreich hierzu sind Energiewandler von Endenergie in Nutzenergie, die HTS- und betriebliche Gleichstromtechnik sowie die Substitution von Nutzenergie-intensiven Produktionsprozessen durch völlig neue Prozesse (z.B. die Substitution thermischer Trennverfahren durch Membrantechniken).

Funktionsnachweise in der Anwendung durch mehr Demonstrationsvorhaben stärken

Ein Funktionsnachweis in der realen betrieblichen Produktionsumgebung ist entscheidend dafür, dass Anwenderunternehmen neue technische Lösungen zur Energieeffizienzsteigerung und Defossilisierung ihrer Produktion adaptieren und sich für eine Investition entscheiden. In vielen Fällen sind technische Lösungen so weit erforscht, dass die betriebliche Demonstration der nächste erforderliche Entwicklungsschritt ist, um den Markteintritt zu ermöglichen. Viele Anwender sind jedoch nicht bereit, das mit einer erstmaligen Technikanwendung in ihrem eigenen Betrieb einhergehende finanzielle Risiko alleine zu tragen. Hier wäre eine staatliche (Teil-)Risikoübernahme durch Fördermittel erforderlich. Da die Anlagengröße für den Markteintritt der realen betrieblichen Produktionsumgebung entsprechen muss, weisen Demonstrationsvorhaben in der Regel einen deutlich höheren Investitionsbedarf auf als die für den Bereich Industrie und Gewerbe im Energieforschungs-Programm bislang typischen Budgets für FuE-Verbundvorhaben.

Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit einer neuen Technik oder eines neuen Produktionsprozesses sind, bei unterstellter und in der Regel zwingend notwendiger Produktgleichheit, die gesamten Produktionskosten in Relation zur konventionellen, fossilen Produktion. Neben den Investitionen (CAPEX) sind die Betriebskosten (OPEX), und hier wiederum insbesondere die Kosten durch relative Energieträgerpreise (bspw. Strom vs. Erdgas) sowie durch den CO₂-Preis, relevant. Für viele transformative Techniken ist bei den aktuellen Preisrelationen noch keine Wettbewerbsfähigkeit gegeben. Bis diese bspw. durch steigende CO₂-Preise erreicht wird, ist eine „Brücke“ durch andere politische Instrumente erforderlich. Neben einer anteiligen Investitionsförderung sollte daher auch geprüft werden, ob für Demonstrationsvorhaben auch eine anteilige Betriebskostenförderung bzw. Preisabsicherung für einen definierten Zeitraum ermöglicht werden kann, bis sichergestellt ist, dass die neue Technik in der betrieblichen Anwendungsumgebung dauerhaft ohne technische Restriktionen betrieben werden kann. Anschließend wäre ggf. ein Übergang beispielsweise in einen Klimaschutzvertrag denkbar.

Berücksichtigung des Strategiepapiers bei der Überarbeitung des Energieforschungsprogramms

Die vorliegende Strategie hat auf Basis der Mitarbeit einer Vielzahl der relevanten Akteure des Forschungs- und Entwicklungssystems gezeigt, dass sich die aktuell beforschten und für die nähere Zukunft als prioritär eingestuften Themen an verschiedenen Stellen des aktuellen 8. Energieforschungsprogramms (8. EFP) wiederfinden. Zugleich wurde an wenigen Stellen deutlich, welche Themen aktuell keine oder nur geringe Berücksichtigung im 8. EFP finden. Die Strategie sollte daher als wichtiger Input für eine zukünftige Überarbeitung des EFP herangezogen werden. Auch die direkte Einbeziehung der Akteure des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe in eine mögliche zukünftige Weiterentwicklung, beispielsweise durch einen Beteiligungsprozess, wird empfohlen.

Prüfung einer Verschlinkung und Beschleunigung des Antrags- und Bewilligungsprozesses für Vorhaben im Rahmen des Energieforschungsprogramms

Es sollte geprüft werden, ob die Antragsstellung für FuE-Vorhaben vereinfacht und der Bewilligungsprozess beschleunigt werden könnte. Eine Erfahrung aus Vorhaben der Vergangenheit ist, dass mit der Bewilligungsdauer von Vorhaben die Wahrscheinlichkeit steigt, dass Verbundpartner insbesondere aus der Industrie sich aus dem Vorhaben oder bereits aus dessen Beantragung zurückziehen. Dies gefährdet potenziell die Weiterentwicklung einer Innovation. Die Erfahrungen mit den Mikroprojekten könnten in diesem Kontext Hinweise geben, wie hier positive Anreize zur Planung, Beantragung und der Durchführung von FuE Projekten gesetzt werden können.

Stärkere Vernetzung von Forschenden mit dem Innovationssystem und angrenzenden Technikfeldern

Das Innovationssystem technischer Lösungen für Industrie und Gewerbe besteht typischerweise aus Forschenden, Hersteller- und Anwenderunternehmen in unterschiedlichen Größen (von Start-ups über kleine und mittlere Unternehmen, bis hin zu Großkonzernen), normen- oder standardsetzenden Institutionen, der Politik sowie mit Blick auf die Markteinführung auch aus verschiedenen Finanzintermediären. Darüber hinaus gibt es für viele technische Lösungsoptionen angrenzende Technikfelder, aus denen Anregungen für die eigenen Arbeiten gewonnen oder sogar direkt Lösungen für Detailfragen übernommen werden können. Forschende sollten dementsprechend die Vernetzung mit anderen Akteuren des Innovationssystems und Forschenden in angrenzenden Technikfeldern anstreben.

Die vorliegende Strategie hat gezeigt, dass es sehr viele Schnittmengen zwischen separat strukturierten Forschungsbereichen gibt, und dass zukünftig ein verstärkter Austausch zwischen diesen Forschungsbereichen angestrebt werden sollte.

Aufbau und Stärkung von Koordinierungs- und Transferplattformen für Verbundvorhaben

Um Synergien zwischen verschiedenen Verbundvorhaben im gleichen oder in verwandten Themenbereichen der Energieforschungsförderung für Industrie und Gewerbe systematisch erkennen und nutzen zu können, sind Koordinierungs- und Transferplattformen ein mögliches Mittel. Dies kann einerseits das Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe mit seinen Forschungsfeldern und Clustern selbst sein, andererseits spezifische Vorhaben, die dem Zweck der Koordinierung einer definierten Anzahl von forschenden Verbundvorhaben dienen. Ein Beispiel aus der Vergangenheit ist ENPRO-CONNECT, das Koordinierungsvorhaben der ENPRO-Initiative aus dem Forschungsfeld der Chemischen Verfahrenstechnik. Es wird empfohlen, zu prüfen, wie sowohl die – mit Ausnahme der Tätigkeiten des PtJ und der Begleitforschung – bislang rein ehrenamtliche Arbeit im Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe als auch eine stärkere spezifische Koordinierung für Verbundvorhaben in verwandten Themenbereichen gestärkt werden könnten.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Vergleich des Endenergiebedarfs der Industrie (ohne stofflichen Energieträgereinsatz) in TWh/a für 2045 aus verschiedenen Studien und Betrachtung unterschiedlicher Modelle. *Erdgas separat ausgewiesen, wenn möglich. Quellen: Harthan et al. 2024: Projektionsbericht 2024 (MMS, MWMS), Luderer et al. 2025: Ariadne-Report (ExPol, Mix, Elek, H2, NFniedrig, NFhoch, Modellvergleich Forecast (F), PyPSA (PP) und REMIND(R)) und Fleiter et al. 2024b: Langfristszenarien O45 (O45-Strom, O45-H2).	13
Abbildung 5-1: Übersicht über abgeschlossene, laufende und geplante Projekte im Forschungsfeld CVT	27
Abbildung 5-2: Zusammenspiel der Forschungsthemen des Forschungsfeldes CVT in ihrer Rolle als "Enabler" für die gesamte Prozesskette der Produktion in der Chemischen Industrie	33
Abbildung 5-3: Zeitstrahl der Energieforschungsschwerpunkte im Forschungsfeld Fertigungstechnik (Eigene Darstellung)	35
Abbildung 5-4: Geförderte Projekte (BMW i bzw. BMW K) im Forschungsfeld Hochtemperatursupraleitung.	44
Abbildung 5-5: Überblick über die Forschungsroadmap bis 2030 des Forschungsfeldes Hochtemperatursupraleitung mit geplanter TRL-Entwicklung.	46
Abbildung 5-6: Thermoprozesstechnik im Kontext einer sich wandelnden Energieversorgung.	54
Abbildung 5-7: Forschungsthemen Elektrifizierung	56
Abbildung 5-8: Forschungsthemen Alternative Brennstoffe	58
Abbildung 5-9: Forschungsthemen Digitalisierung	59
Abbildung 5-10: Zeitliche Übersicht der abgeschlossenen Vorhaben im Forschungsfeld Tribologie mit Zuordnung der betrachteten Anwendungsfälle und Technologien/Themen.	61
Abbildung 5-11: Zeitliche Übersicht der laufenden Vorhaben im Forschungsfeld Tribologie mit Zuordnung der betrachteten Anwendungsfälle und Technologien/Themen.	62
Abbildung 5-12: Betrachtete Anwendungen und Technologien im Verbundvorhaben CHEPHREN.	62
Abbildung 5-13: Erwartete Hauptthemenfelder und Ziele im Forschungsfeld Tribologie sowie deren Zuordnung zur Energie- und Ressourceneffizienz.	64
Abbildung 5-14: Hauptthemenfelder mit erwarteten Themenschwerpunkten im Forschungsfeld Tribologie sowie Anwendungstransfer von tribologischen Technologielösungen.	65
Abbildung 5-15: Konkrete Vorschläge für Verbundvorhaben und Mikroprojekte im Forschungsfeld Tribologie bis 2030.	67
Abbildung 5-16: Neue Themenstruktur des Forschungsfeldes Wärme und Abwärme ...	70

Abbildung 5-17: Auszug aus Gesamtüberblick der Querschnittsthemen. Priorisierung in
Priorität A (dunkelgrün) und Priorität B (hellgrün).94

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Implizite Abbildung der Forschungsfelder innerhalb des 8. EFP (Eigene Darstellung)	23
Tabelle 5-1: Aktuell laufende Forschungsprojekte des Forschungsfelds CVT innerhalb des EFP	26
Tabelle 5-2: Thematische Entwicklung der Energieforschung mit Bezug zum heutigen Forschungsfeld Fertigungstechnik seit den 1990er-Jahren (Eigene Darstellung. Zeitrahmen, Fokus, detaillierte Inhalte angelehnt an OpenAI 2025. Zeitliche Einordnung der Energieforschungsprogramme nach (BMW 2017)).....	36
Tabelle 5-3: Zusammenfassung der Themen vergangener Kuratoriumssitzungen im FF Fertigungstechnik (Eigene Darstellung)	39
Tabelle 5-5: Auswahl aktueller Vorhaben des Forschungsfelds Wärme und Abwärme ..	71
Tabelle 5-6: Veranstaltungsformate im FF Wärmepumpen und Kältetechnik	79

9 Literaturverzeichnis

- Abele, Eberhard (2013): Maximierung der Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen. Schlussbericht zum Projekt MaxiEM ; Projektlaufzeit: 01.12.2008 bis 30.11.2012. Darmstadt, Hannover: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek. Online verfügbar unter <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/782530303.pdf>.
- Abele, Eberhard; Beck, Martin (2019): Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt ETA-Fabrik. Unter Mitarbeit von Dominik Flum, Philipp Schraml, Niklas Panten, Felix Junge, Christoph Bauerdick, Mark Helfert et al. Hg. v. Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW). Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität Darmstadt. Darmstadt.
- AGEB (2024): Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/anwendungsbilanzen/>, zuletzt geprüft am 16.11.2024.
- AGEB (2025): Energiebilanz der Bundesrepublik 2023. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Online verfügbar unter https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/?_jahresbereich-bilanz=2021-2030, zuletzt geprüft am 10.08.2025.
- Agora Energiewende; Fraunhofer IEG (2023): Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland. Strategien für den Markthochlauf in Wärmenetzen und Industrie. Unter Mitarbeit von U. Weiß und A. Kraus. Agora Energiewende; Fraunhofer IEG.
- AK UGRdL: Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder. Wirtschaft. Statistische Ämter des Bundes und der Länder. Online verfügbar unter <https://www.statistikportal.de/de/ugrdl/ergebnisse/wirtschaft-und-bevoelkerung/bipbws>, zuletzt geprüft am 10.08.2025.
- Awiszus, Birgit (Hg.) (2012): Grundlagen der Fertigungstechnik. Mit 55 Tabellen. 5., aktualisierte Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl.
- Bach, Robert; Prusseit, Werner (2023): Innovative supraleitende Energiekabel für die Umsetzung der Energiewende. In: *Elektrotech. Inftech.* 140 (7-8), S. 620–625. DOI: 10.1007/s00502-023-01191-9.
- Birkelbach, Felix; Hofmann, René; Kienberger, Thomas; Knöttner, Sophie Beatrice; Weiß, Wolfgang; Zawodnik, Vanessa (2024): IEA Industrielle Energietechnologien

und Systeme (IETS) Annex 18: Digitalisierung, KI und verwandte Technologien für industrielle Energieeffizienz und THG-Emissionsreduktion. Hg. v. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Wien. Online verfügbar unter https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea_pdf/schriftenreihe-2024-18-iea-iets-annex-18.pdf, zuletzt geprüft am 08.08.2025.

BMWE/PtJ (Hg.) (2024): Förderstrukturen im Forschungsbereich Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe. Internes Arbeitspapier.

BMWi (2017): Energieforschungsprogramme der Bundesregierung 1977-1980 (1. - 6. EFP). Fundstelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

BMWi (2018): 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung - Innovationen für die Energiewende. Fundstelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

BMWi (2021): Förderbekanntmachung Angewandte nichtnukleare Forschungsförderung im 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“. Fundstelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

BMWK (2023): 8. Energieforschungsprogramm zur angewandten Energieforschung – Forschungsmissionen für die Energiewende. Fundstelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

BMWK (2024): Förderbekanntmachung zur angewandten Energieforschung im Rahmen des 8. Energieforschungsprogramms. Fundstelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter <https://www.energieforschung.de/energieforschungsprogramm/energieforschungsprogramm-des-bmwk>.

Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) (Hg.) (2025): Emissionssituation 2024 im Europäischen Emissionshandel 1. Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen, Luft- und Seeverkehr in Deutschland. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2024.pdf?__blob=publicationFile&v=7, zuletzt geprüft am 15.08.2025.

Deutsches Institut für Normung e. V. (2025): CIRCULAR THINKING in Standards. Wie Normung eine Circular Economy unterstützen kann. Version 3. Online verfügbar unter <https://www.din.de/resource/blob/954722/528a3db4f6177b57c2a9d4a10ce7dad9/circular-thinking-in-standards-normen-zur-umsetzung-der-r-strategien-data.pdf>, zuletzt geprüft am 31.07.2025.

- Eisele, Christian; Abele, Eberhard (2013): Energieeffiziente Produktionsmaschinen durch Simulation in der Produktentwicklung. Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes: eSimPro. Unter Mitarbeit von TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover, Technische Informationsbibliothek und Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen.
- ETA-Solutions GmbH (Hg.): Kurzstudie im Rahmen des Verbundvorhabens EE4InG2. Aktuelle Nutzung, Hemmnisse und Forschungsbedarfe tribologischer Techniken in der Industrie [Veröffentlichung in Planung].
- FEI (2024): DC-LabSaxony geht an den Start. Sächsische Hochschulen und Institute kooperieren, um Gleichspannungsnetze von morgen zu erforschen. Hochschule Zittau/Görlitz. Online verfügbar unter <https://f-ei.hszg.de/startseite/aktuelles/news/dc-labsaxony-geht-an-den-start>, zuletzt aktualisiert am 18.11.2024, zuletzt geprüft am 18.08.2025.
- Fleiter, Tobias; Haendel, Michael; Klobasa, Marian; Lux, Benjamin; Khanra, Manish; Männer, Wolfgang et al. (2024a): Flexibilisierung elektrifizierter Industrieprozesse. Eine Analyse der technischen und ökonomischen Herausforderungen aus Unternehmens- und Systemperspektive. 1. Aufl. Hg. v. Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI). Cottbus. Online verfügbar unter https://www.klimaschutz-industrie.de/fileadmin/kei/Dateien/Publikationen/20240916_KEI_Studie_FlexIPro_final_barrierefrei.pdf, zuletzt geprüft am 15.08.2025.
- Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Hirzel, Simon; Neusel, Lisa; Aydemir, Ali; Schwotzer, Christian et al. (2023): 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 ISI, 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; Bussmann, Simon; Neuwirth, Marius; Herbst, Andrea; Lotz, Meta Thuri (2024b): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. O45-Szenarien. Modul Industriesektor. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Online verfügbar unter https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_O45_Industriebericht_v11.pdf, zuletzt geprüft am 08.08.2025.

Forschungsfeld Wärmepumpen und Kältetechnik (Hg.) (2024): Präsenztreffen Kuratorium Wärmepumpen und Kältetechnik. Unter Mitarbeit von Marek Miara. Fraunhofer ISE.

Forschungsfeld Wärmepumpen und Kältetechnik (Hg.) (2025): Präsenztreffen Kuratorium Wärmepumpen und Kältetechnik. Unter Mitarbeit von Marek Miara. Fraunhofer ISE.

Forschungsnetzwerke Energie (2024): Ein wichtiger Schritt nach vorn: das Forschungsfeld Tribologie. Online verfügbar unter https://www.forschungsnetzwerke-energie.de/news/de/ein_wichtiger_schritt_nach_vorn_das_forschungsfeld_tribologie, zuletzt geprüft am 31.07.2025.

Fritz, Markus (2023): Industrial excess heat utilisation for residential heating. Dissertation. TU Darmstadt. Institut IWAR - Wasser- und Abfalltechnik, Umwelt- und Raumplanung.

Fritz, Markus; Savin, Margaux; Aydemir, Ali (2022): Usage of excess heat for district heating - Analysis of enabling factors and barriers. In: *Journal of Cleaner Production* 363. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132370.

Geres, Roland; Kohn, Andreas; Lenz, Sebastian Cornelius; Ausfelder, Florian; Bazzanella, Alexis; Möller, Alexander (2019): Roadmap Chemie 2050. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland : eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Online verfügbar unter <https://edocs.tib.eu/files/e01fn19/1682254917.pdf>.

Gesellschaft für Tribologie e.V (2002): Tribologie. GfT-Arbeitsblatt 7. Verschleiß, Reibung. Definitionen, Begriffe, Prüfung. Online verfügbar unter <https://gjetc.org/wp-content/uploads/2023/01/Topical-Paper-Waste-Heat.pdf>, zuletzt geprüft am 31.07.2025.

Goetschkes, Christoph; Schmidt, Dana Laureen; Rogotzki, Robert; Kanngießer, Annedore (2021): Kältetechnik in Deutschland - Metastudie Kältebedarf Deutschland.

Harthan, Ralph O.; Förster, Hannah; Bürger, Veit; Braungardt, Sibylle; Görz, Wolf Kristian; Jansen, Luca Lena et al. (2024): Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024). TREIBHAUS-GAS-PROJEKTIONEN FÜR DEUTSCHLAND. Hg. v. Umweltbundesamt. Öko-Institut e.V.; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; IREES GmbH; Thünen-Institut.

Henniger, Stefan (2023): Ergebnisse des Workshops Industrie- und Großwärmepumpen. Hg. v. Forschungsfeld Wärmepumpen und Kältetechnik. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Bonn.

- Holmberg, Kenneth; Erdemir, Ali (2017): Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. In: *Friction* 5 (3), S. 263–284. DOI: 10.1007/s40544-017-0183-5.
- Holmberg, Kenneth; Erdemir, Ali (2019): The impact of tribology on energy use and CO₂ emission globally and in combustion engine and electric cars. In: *Tribology International* 135, S. 389–396. DOI: 10.1016/j.triboint.2019.03.024.
- Humpert, Christof (2012): Long distance transmission systems for the future electricity supply – Analysis of possibilities and restrictions. In: *Energy* 48 (1), S. 278–283. DOI: 10.1016/j.energy.2012.06.018.
- Jochem, Eberhard; Lösch, Oliver (2025): Zwei Szenarien zentraler Rahmenbedingungen für Deutschland bis 2050 - Zur Bewertung von FuE-Aktivitäten zur Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe. Bericht für AP 2.2. des Begleitforschungsvorhabens. Hg. v. IREES GmbH. Karlsruhe.
- Kahlfeld, Robin; Meyer, Ina; Messmann, Cameron; Lachmayer, Jasper; Thies, Niklas; Ehlers, Tobias et al. (2023): Strukturen in additiv gefertigten Wärmeübertragern — Parameterbasierte Generierung und messtechnische Charakterisierung innerer Gitterstrukturen zur Verbesserung des Wärmeübergangs. Unter Mitarbeit von Technische Informationsbibliothek (TIB): Hannover : Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V.
- Kawamura, T.; Beck, P.; Hamada, T.; Sakai, S.; Thomas, S.; Hüer, L. (2023): Topical paper on the potential of waste heat usage in Germany and Japan.
- Köster, Robin (2023): Direct Drive Wind Generators with Superconducting Excitation in the Multi-MW Class. Dissertation. Technische Universität Darmstadt.
- Lösch, Oliver; Decker, Alexandra; Friedrichsen, Nele; Jochem, Eberhard; Moog, Daniel; Schwotzer, Christian; Rothhöft, Katharina (2024): Zur Relevanz der öffentlichen Energieforschungsförderung, insbesondere für Industrie und Gewerbe. Kurzstudie im Rahmen des Verbundvorhabens EE4InG2. Hg. v. IREES GmbH, RWTH Aachen (IOB), ETA-Solutions GmbH. Karlsruhe, Aachen, Bensheim.
- Luderer, Gunnar (Hrsg.); Bartels, Frederike (Hrsg.); Brown, Tom (Hrsg.); Aulich, Clara; Benke, Falk; Fleiter, Tobias et al. (2025): Die Energiewende kosteneffizient gestalten: Szenarien zur Klimaneutralität 2045. Hg. v. Kopernikus-Projekt Ariadne. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Online verfügbar unter https://ariadneprojekt.de/media/2025/03/Ariadne-Report_Szenarien2025_Maerz2025_lowres.pdf.
- Mehla, Sunil; Selvakannan, PR.; Mazur, Maciej; Bhargava, Suresh K. (2024): Aufkommende technologische Anwendungen der additiven Fertigung. In: Suresh K. Bhargava, Seeram Ramakrishna, Milan Brandt und PR. Selvakannan (Hg.):

Additive Fertigung für Chemiewissenschaften und Chemieingenieurwesen. Singapore: Springer Nature Singapore, S. 191–268.

Miara, Marek; Schossig, Peter; Burger, Andreas; Ahrendts, Fabian; Stathopoulos, Panagiotis (2025): Ergebnisse des 2. Workshops Industrie- und Großwärmepumpen. Hg. v. Forschungsfeld Wärmepumpen und Kältetechnik. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Berlin.

Noe, Mathias; Bauer, Markus (2021): Ohne Widerstand in die Anwendung. In: *Physik in unserer Zeit* 52 (6), S. 290–297. DOI: 10.1002/piuz.202101615.

OpenAI (Hg.) (2025): ChatGPT. Version 4.0. Gespräch über eine thematische Übersicht zur Energieforschung im Forschungsfeld „Fertigungstechnik“ über die letzten rund 30 Jahre, zuletzt geprüft am 31.07.2025.

Pehnt, Martin (Hg.) (2010): Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch. Heidelberg: Springer.

Popov, Valentin L. (2018): Is Tribology Approaching Its Golden Age? Grand Challenges in Engineering Education and Tribological Research. In: *Front. Mech. Eng.* 4, Artikel 16. DOI: 10.3389/fmech.2018.00016.

Prognos AG (2007): Potenziale für Energieeinsparung und Energieeffizienz im Lichte aktueller Preisentwicklungen. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Basel und Berlin.

Schmoch, Ulrich; Jochem, Eberhard (2025): Fallen deutsche Hersteller beim internationalen Innovationswettbewerb zur Energieeffizienz in der industriellen Produktion zurück? Eine Analyse internationaler Patentanmeldungen und Publikationen. Hg. v. IREES GmbH. Karlsruhe.

Sedlmair, Martin; Lohner, Thomas; Stahl, Karsten (2021): Wirkungsgradsteigerung in BEV-Getrieben durch wasserhaltige Getriebefluide. In: Johannes Liebl (Hg.): Experten-Forum Powertrain: Reibung in Antrieb und Fahrzeug 2020. Verbrennungsmotoren in elektrifizierten Antriebssträngen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (ATZ live), S. 209–214.

Statistisches Bundesamt (Hg.) (2024a): Industrieller Energieverbrauch in Deutschland nach Branchen in Milliarden Kilowattstunden (Mrd. kWh). Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Tabellen/Grafik-Tabelle-2.html>, zuletzt geprüft am 31.07.2025.

Statistisches Bundesamt (Hg.) (2024b): Pressemitteilung Nr. 058 vom 15. Februar 2024. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/02/PD24_058_421.html, zuletzt geprüft am 31.07.2025.

Steindamm, Tim (2023): CO₂-Abscheidung: Potenzial aus Biomasseanlagen. Kurzstudie zur Potenzialabschätzung für die CO₂-Abscheidung in Biomasseanlagen (Holzenergie-, Biogas- und Biokraftstoffanlagen) in Deutschland. Hg. v. SEEGER ENGINEERING GMBH. Bundesverband Bioenergie e.V. (BBE). Online verfügbar unter https://www.bioenergie.de/download_file/force/1820/201, zuletzt geprüft am 15.08.2025.

Technische Universität Darmstadt (Hg.) (2020a): Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt PHI-Factory - Flexible elektrische Fabriknetzführung zur systemübergreifenden Steigerung der Energieeffizienz unter den Anforderungen zukünftiger Verteilnetze mit regenerativer Energieerzeugung. Online verfügbar unter <https://edocs.tib.eu/files/e01fb21/1747641669.pdf>.

Technische Universität Darmstadt (Hg.) (2020b): SynErgie - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung : Schlussbericht Teilvorhaben: A_TU Darmstadt (03SFK3A) : 01.09.2016-31.10.2019 - öffentlicher Teil.

Troshyn, Alexei (2022): Industrielle Herstellungsverfahren für Hochtemperatur-Supraleiter basierte Bandleiter der 2. Generation. Dissertation. Technische Universität München.

Umweltbundesamt (Hg.) (2024): Energieverbrauch im Jahr 2022 auf zweitniedrigstem Wert seit 1990. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/energieverbrauch-im-jahr-2022-auf-zweitniedrigstem>, zuletzt geprüft am 31.07.2025.

Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI) (Hg.) (2025): Daten und Fakten zu Energie, Rohstoffe, Preise. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/energiestatistik-gesamt-2025.pdf>, zuletzt geprüft am 15.08.2025.

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (Hg.) (2024): China Going Global: Ziele, Maßnahmen, Gegenstrategien.

Verl, Alexander (2017): Abschlussbericht FOR 1088 Ecomation. Als Manuskript gedruckt. Düsseldorf: VDI Verlag (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik, Nr. 695).

Weigold, Matthias (2023): LoTuS - Leistungsoptimierte Trocknung und Sauberkeit : gemeinsamer Schlussbericht : Fachbereich: Energieeffizienz für Industrie und Gewerbe (ESN 2) : Projektlaufzeit: 01.12.2019-31.05.2023 (42 Monate). Unter Mitarbeit von TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover, Technische Informationsbibliothek (TIB), Technische

Universität Darmstadt, BvL Oberflächentechnik, Heraeus Noblelight GmbH, Henkel AG & Co. KGaA et al.

Weigold, Matthias; Burkhardt, Max; Petruschke, Lars; Kohne, Thomas; Grosch, Benedikt; Wächter, Andreas (2022a): Abschlussbericht des Projekts ETA-Transfer. Transferprojekt zur Verbreitung von Forschungsergebnissen der ETA-Fabrik (FKZ: 46ETA01). Technische Universität Darmstadt; Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW).

Weigold, Matthias; Walther, Jessica; Frensch, Ann-Christin; Weyand, Astrid; Sauer, Jörg; Schäfer, Bernhard et al. (2022b): Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt EE4InG : Förderbereich: Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) : Laufzeit: 01.10.2018-30.09.2021. Hg. v. Technische Universität Darmstadt. Darmstadt. Online verfügbar unter 10.2314/KXP:1849807132.

Wirth, Hans-Christoph (2016): Förderkonzept Energieeffizienz in Industrie und GHD – Die BMWi-Forschungsfelder –. Plattform Forschung und Innovation. 10.06.2016. Hg. v. BMWi. Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Downloads/ful-plattform-praesentation-foerderkonzept-energieeffizienz-industrie-ghd.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 04.08.2025.

Woydt, Mathias; Bock, Eberhard; Hosenfeldt, Tim; Bakolas, Vasilios; Luther, Rolf; Wincierz, Christoph (2023): Wirkungen der Tribologie auf die CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase von Produkten. Beiträge der Tribologie zur Defossilisierung. Hg. v. Gesellschaft für Tribologie e.V. Online verfügbar unter <https://www.gft-ev.de/wp-content/uploads/GfT-Studie-Wirkungen-der-Tribologie.pdf>, zuletzt geprüft am 12.08.2025.

Woydt, Mathias; Gradt, Thomas; Hosenfeldt, Tim; Luther, Rolf; Rienäcker, Adrian; Wetzel, Franz-Josef; Wincierz, Christoph (2019): Tribologie in Deutschland: Querschnittstechnologie zur Minderung von CO₂-Emissionen und zur Ressourcenschonung. Hg. v. Gesellschaft für Tribologie e.V. Online verfügbar unter <https://www.gft-ev.de/wp-content/uploads/GfT-Studie-Tribologie-in-Deutschland.pdf>, zuletzt geprüft am 12.08.2025.

Woydt, Mathias; Hosenfeldt, Tim; Luther, Rolf; Scholz, Christian; Bäse, Mirjam; Wincierz, Christoph; Schulz, Joachim (2021): Tribologie in Deutschland: Verschleißschutz und Nachhaltigkeit als Querschnittsherausforderungen. Hg. v. Gesellschaft für Tribologie e.V. Online verfügbar unter <https://www.gft-ev.de/wp-content/uploads/GfT-Studie-Verschlei%C3%9Fschutz-und-Nachhaltigkeit.pdf>, zuletzt geprüft am 12.08.2025.