

Gemeinsamer Schlussbericht zum Projekt EE4InG

25.03.2022



Förderkennzeichen: 03ET1630A-B

Förderbereich: Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe,
Handel und Dienstleistungen (GHD)

Verbundpartner

A Technische Universität Darmstadt**
**Konsortialführer



B Karlsruher Institut für Technologie



Im Unterauftrag

IREES GmbH



ETA-Solutions GmbH



Laufzeit 01.10.2018 – 30.09.2021

Darmstadt, den 25.03.2022



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele (01.10.2018 – 30.05.2020)

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold (01.06.2020 – 30.09.2021)

Jessica Walther

Technische Universität Darmstadt

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

Eugen-Kogon-Straße 4

D – 64287 Darmstadt

Tel. + 49 (6151) 16 20478

Fax + 49 (6151) 16 20087

info@ptw.tu-darmstadt.de

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor:innen.

Verfasser :innen des Berichts:

PTW, TU Darmstadt:

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Astrid Weyand

Jessica Walther

IKFT, KIT:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Sauer

Dr. Bernhard Schäfer

Philipp Haltenort

IREES GmbH:

Oliver Lösch

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Jochem

Dr. Felipe Toro

Dr. Felix Reitze

Jana Deurer

ETA-Solutions GmbH:

Dr.-Ing. Philipp Schraml

Martin Beck

Johannes Thirolf

Alexander Uhl

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	ii
Abbildungsverzeichnis.....	iv
Tabellenverzeichnis.....	vii
Abkürzungsverzeichnis.....	viii
Vorabbemerkung.....	1
1. Kurzdarstellung des Forschungsprojekts.....	1
1.1. Aufgabenstellung.....	1
1.2. Voraussetzungen des Vorhabens.....	1
1.3. Planung und Ablauf des Forschungsvorhabens.....	2
1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Forschungsbeginn.....	3
2. Forschungsergebnisse.....	10
2.1. Kurzdarstellung der genutzten Methodiken.....	10
2.1.1. Forschungsfeldspezifische Technologien: EDUAR&D.....	10
2.1.2. Forschungsfeldspezifische Technologien: Quick-Scan.....	12
2.1.3. Identifikation forschungsfeldübergreifender Technologien.....	12
2.1.4. Multikriterielle-Technologiebewertung der untersuchten F&E-Themen.....	13
2.1.5. Gesamtbewertung.....	16
2.2. Trends und Megatrends in der Industrie.....	23
2.3. Forschungsfeld Fertigungstechnik.....	24
2.3.1. Technologiefeldübergreifende Hemmnisse und Engpässe im Forschungsfeld.....	25
2.3.2. Betrachtete Technologien im Forschungsfeld Fertigungstechnik.....	26
2.3.3. Additive Fertigung.....	27
2.3.4. Trocknung.....	29
2.3.5. Kunststoffverarbeitung.....	32
2.3.6. Pumpen und Systeme.....	37
2.3.7. Reifenherstellung.....	38
2.3.8. Batteriezellfertigung.....	40
2.3.9. Kühl- und Kältetechnik.....	42
2.3.10. Moderne Produktionsinfrastruktur – Energieeffizienz durch Digitalisierung.....	46
2.3.11. Raumluftechnik.....	49
2.3.12. Leichtbau.....	50
2.3.13. Vakuumtechnologie.....	52
2.3.14. Elektrische Antriebssysteme.....	53
2.3.15. Gleichstromnetze.....	55
2.3.16. Zusammenfassung für das Forschungsfeld Fertigungstechnik.....	56
2.4. Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik.....	58
2.4.1. Technologiefeldübergreifende Hemmnisse und Engpässe im Forschungsfeld.....	59
2.4.2. Betrachtete Technologien im Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik.....	59
2.4.3. Organophile Nanofiltration.....	60

2.4.4. Additive Fertigung in der chemischen Verfahrenstechnik.....	63
2.4.5. Technische Nanokatalysatoren.....	65
2.4.6. Zusammenfassung für das Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik.....	68
2.5. Forschungsfeld Eisen und Stahl (bzw. Metallherstellung)	69
2.5.1. Betrachtete Technologien im Forschungsfeld Eisen und Stahl (bzw. Metallherstellung) ...	71
2.5.2. Direktreduktionsroute (Primärstahlherstellung).....	72
2.5.3. Hochtemperaturelektrolyse im Anwendungsumfeld Grundstoffindustrie.....	77
2.5.4. Weitere begonnene Analysen im Forschungsfeld Eisen und Stahl.....	83
2.6. Forschungsfeld Abwärme.....	85
2.6.1. Technologiefeldübergreifende Hemmnisse und Engpässe im Forschungsfeld	86
2.6.2. Thermische Nachverbrennung	87
2.6.3. Nutzung von Niedertemperaturabwärme	90
2.6.4. Thermische Energiespeicher: Latentwärmespeicher	93
2.6.5. Mitteltemperatur-Wärmeübertrager.....	98
2.6.6. ORC-Anlagen (Organic Rankine Cycle).....	102
2.6.7. Thermoelektrische Generatoren (TEG)	105
2.7. Forschungsfeld Tribologie.....	108
2.7.1. Technologiefeldübergreifende Hemmnisse und Engpässe im Forschungsfeld	111
2.8. Forschungsfeld Hochtemperatur-Supraleitung	111
2.8.1. Technologiefeldübergreifende Hemmnisse und Engpässe im Forschungsfeld	112
2.8.2. Betrachtete Technologien im Forschungsfeld Hochtemperatur-Supraleitung.....	112
2.8.3. HTS-Industriestromschienen.....	112
2.9. Forschungsfeld Industrie- und Gasmotoren.....	115
2.10. Technologiefeldübergreifende Zusammenfassung	117
2.10.1. Zusammenfassende Beobachtungen aus Forschungspolitischer Sicht	129
2.10.2. Zusammenfassende Beobachtungen aus energie- und industriepolitischer Sicht.....	133
2.11. Energieeffizienz-Knowhow-Gefälle zwischen Branchen und Unternehmen.....	136
2.11.1. Handlungsempfehlungen.....	138
2.12. Dialogprozess Wärme	139
2.13. Stellungnahme zur rationalen Anwendung von Wasserstoff.....	141
3. Voraussichtlicher Nutzen der Arbeitsergebnisse	143
4. Veröffentlichung der Ergebnisse.....	145
4.1. Wissenschaftliche Veröffentlichungen	145
4.2. Teilnahme an Tagungen, Messen o.Ä.....	146
Literatur	149
Anhang	159
Anhangsverzeichnis.....	159

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Aufbau des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe	3
Abbildung 1-2: Primärenergiebedarf der Fertigungstechnik in Deutschland (Quelle: Eigene Darstellung nach [3])	5
Abbildung 1-3: Anteil der Branchen am Stahlbedarf Deutschlands 2015 (Quelle: Eigene Darstellung nach [4])	6
Abbildung 2-1: Typische Struktur von EDUAR&D, Quelle: Eigene Darstellung IREES.....	11
Abbildung 2-2: Typischer Ablauf der Quick-Scan Analyse.....	12
Abbildung 2-3: Beispiel einer multikriteriellen Bewertung in der Darstellung einer „Bewertungsspinne“.	16
Abbildung 2-4: Multikriterielle Bewertung der Technischen Nanokatalyse für die Stützjahre 2030, 2040 und 2050.....	17
Abbildung 2-5: Darstellung der erwarteten Endenergieeinsparungen der Technischen Nanokatalyse, Markierungen: Stützjahre der multikriteriellen Betrachtung, Linie: linearer Trend für die mathematische Funktionalisierung.....	18
Abbildung 2-6: Darstellung des Anteils der Endenergie (EE) – Versorgung von Applikationen der technischen Nanokatalyse und deren Entwicklung von 2020 bis 2050 mit Unterteilung in (A) abnehmender Relevanz und (B) zunehmender Relevanz.....	18
Abbildung 2-7: Abweichung der Emissionsfaktoren der Szenarien „Start“ und „fuEL“ $\Delta \epsilon_n, m$ zur Abschätzung von Unsicherheiten der THG-Minderungspotenziale durch die zeitabhängige Entwicklung der Emissionsfaktoren.	20
Abbildung 2-8: Verminderte jährliche Emissionen durch den Einsatz technischer Nanokatalysatoren, Blau: Emissionsminderung, Hellblau: Emissionsminderung mit positiver Abweichung der Emissionsfaktoren, Grün: Emissionsminderung mit negativer Abweichung der Emissionsfaktoren.	21
Abbildung 2-9: Kumulierte verminderte Emissionen durch den Einsatz technischer Nanokatalysatoren, Blau: Emissionsminderung, Hellblau: Emissionsminderung mit positiver Abweichung der Emissionsfaktoren, Grün: Emissionsminderung mit negativer Abweichung der Emissionsfaktoren, Hellgrün: Kennzeichnung der Einsparung von 5 mio.t CO ₂ -äq.	21
Abbildung 2-10: Auftragung der kumulierten verminderten Emissionen von 2020 bis 2050 über dem Jahr, in welchem eine kumulierte Emissionseinsparung von 5 mio.t CO ₂ -äq. erwartet wird.	22
Abbildung 2-12: Häufigkeit der Nennung identifizierter Megatrends.....	23
Abbildung 2-13: Anzahl der Unternehmen in der Fertigungstechnik 2016 [3]	25
Abbildung 2-14: Abschätzung des Energiebedarfs 2030 für verschiedene Szenarien	29
Abbildung 2-15: Energieintensivität der verschiedenen Technologien der Kunststoffverarbeitung.	33
Abbildung 2-16: Jährliche eingesparte Endenergie (links) und kumulierte eingesparte Endenergie (rechts) der Forschungsimpulse der Kunststoffverarbeitung.....	36
Abbildung 2-17: Verminderte jährliche THG-Emissionen (links) sowie kumulierte eingesparte THG-Emissionen der Forschungsimpulse der Kunststoffverarbeitung	37
Abbildung 2-18: Jährliche eingesparte Endenergie (links) und kumulierte eingesparte Endenergie (rechts) des Forschungsimpulses Pumpen und Systeme.	38
Abbildung 2-19: Verminderte jährliche THG-Emissionen (links) sowie kumulierte eingesparte THG-Emissionen des Forschungsimpulses Pumpen und Systeme.	38
Abbildung 2-20: Jährliche eingesparte Endenergie (links) und kumulierte eingesparte Endenergie (rechts) der Forschungsimpulse der Reifenherstellung.....	39
Abbildung 2-21: Verminderte jährliche THG-Emissionen (links) sowie kumulierte eingesparte THG-Emissionen der Forschungsimpulse der Reifenherstellung.....	40
Abbildung 2-22: Jährliche eingesparte Energie (links) und kumulierte eingesparte Energie (rechts) im Kontext Kühl- und Kältetechnik.....	45

Abbildung 2-23: Jährliche eingesparte Emissionen (links) und kumulierte eingesparte Emissionen (rechts) im Kontext Kühl- und Kältetechnik	45
Abbildung 2-24: Jährlich eingesparte Endenergie (links) und kumulierte eingesparte Endenergie (rechts) durch die Forschungsimpulse im Bereich der elektrischen Antriebssysteme von 2025 bis 2050.....	54
Abbildung 2-25: Jährliche verminderte THG-Emissionen (links) und kumulierte verminderte THG-Emissionen (rechts) durch die Forschungsimpulse im Bereich der elektrischen Antriebssysteme von 2025 bis 2050.....	55
Abbildung 2-26: Jährlich eingesparte Endenergie (links) und kumulierte eingesparte Endenergie (rechts) durch den Einsatz von Gleichstromnetzen in den Sektoren Industrie und GHD von 2025 bis 2050.....	56
Abbildung 2-27: Jährliche verminderte THG-Emissionen (links) und kumulierte verminderte THG-Emissionen (rechts) durch den Einsatz von Gleichstromnetzen in den Sektoren Industrie und GHD von 2025 bis 2050.....	56
Abbildung 2-28: Reaktorfunktionsweise und Darstellung der unterschiedlichen Skalen einer Katalyse mit Nanokompositen.....	65
Abbildung 2-29: Anteilige Verteilung (nach Themenfeldern/Anwendungsbereichen) identifizierter Förderprojekte im Energieforschungsprogramm (Laufzeitbeginn 2000-2018) im Bereich Eisen- und Stahlerzeugung.....	71
Abbildung 2-30: Diffusionspfad der substituierten Rohstahlmengen, differenziert nach unterstellter anteiliger Nutzung von Erdgas und grünem Wasserstoff als Reduktionsgas	75
Abbildung 2-31: Jährliche erwartete Emissionsminderung und Energieeinsparung des modellierten Diffusionspfades für die Direktreduktion - Nutzung von 100% Grünstrom.....	75
Abbildung 2-32: Erwartete zusätzliche Energie- und THG-Einsparungen durch die anteilige Nutzung von SOE-Kapazitäten zur Bereitstellung von grünem Wasserstoff für einen Diffusionspfad der Direktreduktionsroute zur Primärstahlerstellung in Deutschland	80
Abbildung 2-33: Ermittelte Publikationen zur Hochtemperaturelektrolyse im Zeitverlauf, 1976-2019	81
Abbildung 2-34: Technisches Abwärmepotenzial von stationären Anlagen in Deutschland, unterteilt nach Branchen und Temperatur (nur mediengebundene Abwärmeströme)	86
Abbildung 2-35: Schematische Darstellung der Katalytische Nachverbrennung (KNV) [142]	87
Abbildung 2-36: Schematische Darstellung der rekuperativen Thermischen Nachverbrennung [142]	88
Abbildung 2-37: Schematische Darstellung der regenerativen Thermischen Nachverbrennung [142]	88
Abbildung 2-38: Jährliche eingesparte Energie (links) und kumulierte eingesparte Energie (rechts) im Kontext Niedertemperaturabwärme	93
Abbildung 2-39: Jährliche eingesparte Emissionen (links) und kumulierte eingesparte Emissionen (rechts) im Kontext Niedertemperaturabwärme	93
Abbildung 2-40: Zentrale Akteure des Innovationssystems für Latentwärmespeicher in Deutschland sowie exemplarische Forschungsprojekte	96
Abbildung 2-41: Der Technikzyklus und seine sechs verschiedenen Phasen angewandt auf die Mitteltemperatur-Wärmetauscher.....	100
Abbildung 2-42: Schema einer ORC-Anlage mit Thermoölkreislauf (Quellenseitig) und Warmwasservorlauf eines Fernwärmenetzes auf Seiten der Abwärmesenke	102
Abbildung 2-43: Schematischer Aufbau eines thermoelektrischen Generators (TEG)	106
Abbildung 2-44: Einteilung tribologischer Fragestellungen [156].....	109
Abbildung 2-45: a) Modul einer supraleitenden Stromschiene (Quelle: VESC GmbH), b) Einblick in das Innere der Stromschiene (Quelle: eigene Aufnahme, ZIEHL 2020), c) Modell des Aufbaus einer HTS-Stromschiene im Projekt 3S bei der BASF, 1) Stromzuführung, 2) Stromschiene, 3 Kälteversorgung mit LN2-Kreislauf, 4) in Rot überbrückte konventionelle Stromschiene [166].	113

Abbildung 2-46: Ergebnis der bibliometrischen Analyse zu synthetischen Kraftstoffen in Scifinder.	116
Abbildung 2-47: Potenzial des verminderten Endenergiebedarfs bis 2050 durch den Einsatz der betrachteten Effizienztechniken.....	120
Abbildung 2-48: Zusammenführung der analysierten Effizienz-Techniken zu 10 Technik-Clustern mit ihren Effizienzpotentialen 2030 und 2050 - grafische Darstellung	121
Abbildung 2-49: Kumulierte vermiedene CO ₂ -Emissionen bis 2030 der betrachteten Energieeffizienz-Techniken	123
Abbildung 2-50: Kumulierte vermiedene CO ₂ -Emissionen bis 2050 der betrachteten Energieeffizienz-Techniken	124
Abbildung 2-51: Risiko-Betrachtung der in EE4Ing untersuchten Energieeffizienz-Techniken – das F&E-Risiko	128
Abbildung 2-52: Risiko-Betrachtung der in EE4Ing untersuchten Energieeffizienztechniken – Perspektive des Risikos bzgl. Erreichen der Marktdiffusion.....	129
Abbildung 2-53: Endenergieeinsatz für Raumwärme aller Sektoren und für Prozesswärme von Industrie und Gewerbe nach Temperaturniveaus für 2019 [175], [183], [184]	140
Abbildung 2-54: Differenzierte Einschätzung der erforderlichen Nutzung von Wasserstoff in den Nachfragesektoren	141

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Wechselwirkungsthemen, welche im weiteren Projektverlauf bearbeitet werden.....	13
Tabelle 2-2: Kriterien der multikriteriellen Bewertung.	14
Tabelle 2-5: Je Forschungsfeld betrachtete Megatrends und Trends.....	24
Tabelle 2-6: Der Fertigungstechnik zugeordnete Wirtschaftszweige [1]	25
Tabelle 2-7: Betrachtete Technologien im Forschungsfeld Fertigungstechnik	26
Tabelle 2-8: Sammlung technischer Energieeffizienzmaßnahmen und deren Energieeinsparpotenziale bezogen auf den Gesamtenergiebedarf der Trocknungsanlage	31
Tabelle 2-9: Abschätzung des Endenergiebedarfs des Wirtschaftszweiges 22.2 Herstellung von Kunststoffwaren.	33
Tabelle 2-10: Übersicht über die betrachteten Themen im Forschungsfeld Fertigungstechnik	57
Tabelle 2-11: Zusammenfassung für das Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik.....	69
Tabelle 2-12: Systemeffizienzen von Elektrolysesystemen, exemplarische Auswahl am Markt erhältlicher Systeme sowie Literaturwerte	79
Tabelle 2-13: Länderrangfolge für ORC-Patentanmeldungen und Anzahl der Internationalen Publikationen	104
Tabelle 2-14: Endenergiebedarf von Industrie und Gewerbe 2019, durch die Studie abgedeckter EE-Bedarf sowie rentable Energieeffizienz-Potenziale 2030 und 2050	117
Tabelle 2-15: Zusammenführung der analysierten Effizienz-Techniken zu 10 Technik-Clustern mit ihren Effizienzpotentialen 2030 und 2050	120
Tabelle 2-16: Risiken der F&E-Phase und der Marktdiffusionsphase - Beispiel: ORC-Technik.....	126
Tabelle 2-17: Häufigkeit bei den fünf Spitzenplätzen der internationalen Patentanmeldungen zu 18 Energieeffizienztechniken nach Ländern, verschiedene Zeitabschnitte für einzelne Techniken	130
Tabelle 2-18: Häufigkeit bei den fünf Spitzenplätzen der internationalen Publikationen zu 20 Energieeffizienztechniken nach Ländern, verschiedene Zeitabschnitte für einzelne Techniken	131
Tabelle 2-19: Realisierbare Effizienz-Potenziale durch beschleunigten Knowhow-Transfer	137

Abkürzungsverzeichnis

AC/DC	Alternating current/Direct current
AEL	Alkalische Elektrolysetechnik
AM	Additive Manufacturing
AP	Arbeitspaket
API	Application Programming Interface
B2B	Business-to-Business
BF-BOF	Blast Furnace - Basic Oxygen Furnace
BHKW	Brennheizkraftwerk
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BPW	Bruttoproduktionswert
BS	Brennstoff
BSA	Brennstoffanteil
CAD	Computer Aided Design
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
CO ₂ -äq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
DLT	Distributed-Ledger-Technology
DRI	Direct Reduced Iron
DV	Digital Video
EAF	Electric Arc Furnace
EDUAR&D	Energiedaten und -analyse R&D
EEV	Endenergieverbrauch
EKA	Energiekostenanteil
EMAS	Eco-Management and Audit Scheme
EVU	Energieversorgungsunternehmen
F&E	Forschung und Entwicklung
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistung
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
HT	Hochtemperatur
HT	Hochtemperatur
HTE	Hochtemperatur-Elektrolyse
HTS	Hochtemperatur-Supra
HTSL	Hochtemperatur-Supra-Leitung
i.H.v.	In Höhe von
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen

KNV	Katalytische Nachverbrennung
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWS	Kohlenwasserstoffe
LCA	Life Cycle Assessment
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LHV	Lower Heating Value
Li-air	Lithium-Luft
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
Li-S	Lithium-Schwefel
LM-PBF	Laser Melting - Powder Bed Fusion
LWS	Latentwärmespeicher
SEC	Spezifischer Energiebedarf (specific Energy Consumption)
MT	Mittlere Temperatur
NF	Nanofiltration
NT	Niedertemperatur
ORC	Organic Rankine Cycle
OSN	Organophile Nanofiltration
PAN	Polyacrylnitril
PCM	Phase Change Material
PDMS	Polydimethylsiloxan
PEM	Proton Exchange Membrane
RCAT	Rotary Cup Atomizers
Rd.	Rund
RNV	Regenerative Nachverbrennung
SOE	Solid Oxide Electrolyzer
SWOT	Strengths Weaknesses Opportunities Threats
TEG	Thermoelektrische Generatoren
TFC	Thin film composite (Kompositmembranen)
THG	Treibhausgas
TNV	Thermische Nachverbrennung
TP	Teilprojekt
TPM	Total Productive Maintenance
TRL	Technology Readiness Level
VOC	Volatile Organic Compounds
WT	Wärmetauscher

Vorabbemerkung

Auch wenn im Sprachgebrauch häufig synonym verwendet, besteht in der deutschen Sprache ein Unterschied zwischen dem Wort *Technologie* und *Technik*. Im deutschen Sprachgebrauch meint Technologie die Wissenschaft/die Beschreibung über viele Techniken mit ähnlicher Zielsetzung (z.B. Industrieproduktion, Software für Social Media). Häufig wird der Begriff Technologie jedoch fälschlicherweise eingesetzt, wo eigentlich konkrete Techniken gemeint sind. Allerdings ist diesbezüglich auch ein Wandel der Sprache zu beobachten, so dass einer synonymen Verwendung des Wortes Technologie statt Technik im Bericht aus Sicht des Projektteams mit Nachsicht begegnet werden kann.

1. Kurzdarstellung des Forschungsprojekts

1.1. Aufgabenstellung

Zur Erreichung der Energiewendeziele der Bundesregierung ist auch eine wesentliche Steigerung der Energieeffizienz im industriellen Sektor erforderlich. Ziel des Vorhabens EE4InG: Energieeffizienz für Industrie und Gewerbe ist es deshalb, entscheidende Innovationen zu erkennen und Akteure des Innovationssystems zu vernetzen, um hierauf aufbauend die Ergebnisverbreitung zu beschleunigen. Entsprechend sollten Entwicklungsansätze identifiziert werden, die ein erhebliches Potenzial bei der Steigerung der Energieeffizienz und damit der Einsparung von CO₂-Emissionen mit sich bringen.

Das Projekt fokussiert sieben Forschungsfelder sowie einzelne Forschungsprojekte, welche nicht im Rahmen eines Forschungsfeldes organisiert sind. In enger Verzahnung mit den Forschungsfeldern sollen Lösungen zur Steigerung der Energieeffizienz (Techniken und Methoden) identifiziert werden, vor deren industrieller Einführung noch ein erheblicher Forschungsbedarf besteht, der von Unternehmen alleine nicht gedeckt werden kann. Weiterhin sollen Effizienzlösungen gefunden werden, die bereits erfolgreich in einem Zweig der Industrie eingesetzt werden und bei denen das Potenzial besteht, sie in anderen Bereichen der Industrie in gleicher Weise nutzbringend einzusetzen. Besondere Bedeutung haben hier Ansätze, die im Rahmen der Energieforschungsprogramme der Bundesregierung entwickelt wurden, darüber hinaus jedoch auch internationale Forschungsergebnisse.

Auf der Basis der Ergebnisse der F&E-Analysen und der Chancen des branchenübergreifenden Abbaus des Knowhow-Defizits wurden – unter Einbezug der jeweils betroffenen Akteursgruppen – Handlungsempfehlungen für zielgerichtete F&E- und Diffusionsaktivitäten für die jeweils betrachtete Effizienz-Technik erarbeitet.

1.2. Voraussetzungen des Vorhabens

Mit den insgesamt acht „Forschungsnetzwerken Energie“ wurde durch das BMWK ein Instrument geschaffen, um die steigende Themenvielfalt weiter zu systematisieren und die wichtigsten Akteure bei der Gestaltung zukünftiger F&E-Schwerpunktprogramme, wie im Vorfeld der Konzipierung des 7. Energieforschungsprogramms, einzubinden. Das Instrument der Forschungsnetzwerke dient somit insbesondere auch der strategischen Weiterentwicklung der Forschungsförderung durch Ideen- und Erfahrungsaustausch in den jeweiligen Bereichen. Diese acht Bereiche bilden zwei Drittel des industriellen und gewerblichen Endenergiebedarfs ab (für 2019 mit gut 2.500 PJ (Industrie) und 565 PJ (Gewerbe und Dienstleistungen, ohne Energiebedarf für Gebäude und Militär)).

Unter dem Dach des *Forschungsnetzwerks Energie in Industrie und Gewerbe* werden die einzelnen Akteure der sieben unterlagerten und themenbezogenen Forschungsfelder organisatorisch zusammengefasst; durch eine gemeinsame Internetseite und einen Newsletter wird versucht, eine gegenseitige Befruchtung und Anregung zwischen den Forschungsprojekten und Forschungsfeldern zu erreichen und auf weitere Branchen und Akteure in Industrie und Gewerbe die energieeffizienten Lösungen zu kommunizieren. Zusätzlich wurden Einzelforschungsprojekte eingebunden, welche nicht im Rahmen eines Forschungsfeldes organisiert bzw. zugeordnet sind. Das Forschungsnetzwerk richtet sich hierbei an Wissenschaft, Industrie und Gewerbe in Deutschland.

Es ist auch zu berücksichtigen, dass von erfolgreichen F&E-Anstrengungen nicht nur die deutsche Industrie und der Gewerbesektor als Energieanwender ihre Wettbewerbsfähigkeit stärken können, sondern auch die oft sehr exportorientierten Anlagen- und Maschinenhersteller die Position ihrer Wettbewerbsfähigkeit in den globalisierenden Märkten erhalten können. Durch den hohen Exportanteil der deutschen Investitionsgüterindustrie tragen die Exporte auch zu einer Energiewende in anderen Ländern bei (derzeit insbesondere in den Ländern der EU und in Schwellenländern).

1.3. Planung und Ablauf des Forschungsvorhabens

Mit dem Begleitforschungsprojekt sollen Forschungs- und Entwicklungsansätze identifiziert werden, welche durch ein erhebliches Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz bzw. zur Reduktion des Primär- und Endenergiebedarfs eine Verminderung von CO₂-Emissionen mit sich bringen. Das übergeordnete Ziel war es, entscheidende Innovationen energieeffizienter Lösungen zu erkennen und in ihren verschiedenen Anwendungsbereichen zu vernetzen. Hierbei können branchenspezifische Anpassungsentwicklungsarbeiten erforderlich werden (z.B. neue thermische Trennverfahren in der chemischen Industrie, angewandt auf die Trennverfahren in der Nahrungsmittelherstellung oder bei chemischen Reinigern).

Als Untersuchungsgegenstand standen im Fokus:

- Individuelle Effizienzpotenziale der Fokus-Branchen-Forschungsfelder:
 - Fertigungstechnik
 - Chemische Verfahrenstechnik
 - Eisen- und Stahl-Erzeugung
- Effizienzpotenziale der weiteren vier Forschungsfelder (Abwärmenutzung, Tribologie, Industrie und Gasmotoren sowie HT-Supraleitung) und weitere Einzelbranchen und -F&E-Projekte
- Übergreifende Effizienzpotenziale unter Einbeziehung aller Forschungsfelder und Einzelforschungsprojekte

Die Untersuchungsebenen waren:

- Verfügbare Technologien und Methoden zur Energieeffizienz
- Entwicklung neuer energieeffizienter Technologien

Im Rahmen des *Forschungsnetzwerks Energie in Industrie und Gewerbe* wurden insgesamt sieben Forschungsfelder für einzelne Schwerpunktthemen gebildet (siehe Abbildung 1-1). Das Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe wird durch einen Kurator geleitet und von einem Beirat bestehend aus zehn interdisziplinären Mitgliedern begleitet. Der Beirat konstituiert sich aus den Leitern der Forschungsfelder sowie aus Personen mit branchen- und technologieübergreifender Expertise.



Abbildung 1-1: Aufbau des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe

Die wissenschaftliche Grundlage des Forschungsnetzwerks soll im Rahmen dieses Begleitforschungsprojekts erarbeitet werden und eine nachvollziehbare Bewertung von Innovationen und Diffusionspotenzialen ermöglichen. Zur Erarbeitung dieses wissenschaftlichen Rahmens und zur Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur Identifikation, Kommunikation und Vernetzung, Bewertung sowie Gewichtung einzelner in F&E-Projekten bearbeiteten Effizienz-Lösungen wurde ein interdisziplinäres wissenschaftliches Konsortium aus drei Forschungsinstituten sowie einem Dienstleister gebildet.

Aufgrund der im Vergleich herausragenden Bedeutung der drei Branchen-Forschungsfelder Fertigungstechnik, Chemische Verfahrenstechnik sowie Eisen und Stahl wurde das interdisziplinäre Konsortium mit der entsprechenden Expertise ausgewählt. Die Bearbeitung der Forschungsfelder und der Einzelprojekte sowie die Erarbeitung der erforderlichen Methodik der Analysen wurden einvernehmlich auf die vier Partner verteilt.

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Forschungsbeginn

Der Stand zu Forschungsbeginn lässt sich basierend auf den Branchen-Forschungsfeldern genauer betrachten. Im Rahmen des Begleitforschungsprojekts findet die Abgrenzung der einzelnen Branchen anhand der Klassifikation der Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes nach dem statistischen Bundesamt statt [1].

Für die Branchen-Forschungsfelder werden dabei die folgenden Klassen subsumiert:

1. Fertigungstechnik:

- 16 Holz, Holz-, Kork-, Flecht- u. Korbwaren (ohne Möbel)
- 22 Gummi- u. Kunststoffwaren
- 25 Metallerzeugnisse
- 26 DV-geräte, elektronische u. optische Erzeugnisse
- 27 Elektrische Ausrüstung
- 28 Maschinen
- 29 Kraftwagen u. Kraftwagenteile

- 30 Sonstige Fahrzeuge
- 33 Reparatur, Instandhaltung u. Installation v. Maschinen und Ausrüstung

2. Chemische Verfahrenstechnik

- 20 Herstellung von chemischen Erzeugnissen
- 21 Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen

3. Eisen und Stahl

- 24.10 Herstellung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen, darunter
 - Hochofen-Eisenreduktion
 - Oxygenstahl-Herstellung
 - Direktreduktionsverfahren
 - Elektrostahl-Herstellung
 - Ferrolegierungen
- 24.20 Herstellung von Stahlrohren, Rohrform-, Rohrverschluss- und Rohrverbindungsstücken aus Stahl
 - Stahlrohr-Walzen
- 24.31 Herstellung von Blankstahl
- 24.32 Herstellung von Kaltband mit einer Breite von weniger als 600 mm
- 24.33 Herstellung von Kaltprofilen
- 24.51 Eisengießereien
- 24.52 Stahlgießereien

Für diese Forschungsschwerpunkte wurden die spezifischen Prozesse, Querschnittsthemen und Querschnittstechnologien genauer untersucht.

Weiterhin wurden im Rahmen dieses Begleitforschungsprojekts die vier weiteren Technologie-Forschungsfelder des *Forschungsnetzwerks Energie in Industrie und Gewerbe* analysiert (vgl. Abbildung 1-1); unabhängige Forschungsprojekte von nicht zusammenhängenden Einzelthemen wurden in einem reduzierten Umfang analysiert.

Im Folgenden wird auf die sieben gesetzten Forschungsschwerpunkte des Begleitforschungsprojekts genauer eingegangen.

Fertigungstechnik

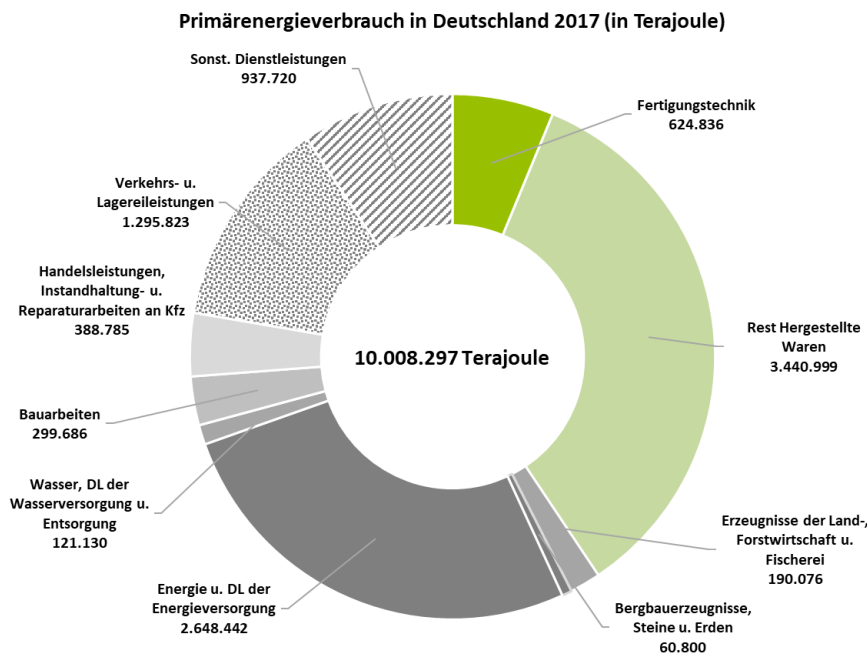
Zum Forschungsfeld Fertigungstechnik zählt die energetische Betrachtung von Maschinen und Anlagen in sämtlichen Fertigungsverfahren, die für die Bearbeitung von Werkstoffen und zur Herstellung von Erzeugnissen eingesetzt werden. Die Fertigungstechnik ist hierbei ein Teilbereich der Produktionstechnik und wird gemäß der DIN 8580 in sechs Hauptgruppen unterteilt:

1. Urformen

2. Umformen
3. Trennen
4. Fügen
5. Beschichten
6. Stoffeigenschaften ändern

In Deutschland waren im Jahr 2015 im verarbeitenden Gewerbe 7,25 Mio. Beschäftigte tätig. Allein auf die Automobilindustrie und den Maschinenbau entfallen hierbei ca. 1,4 Mio. Personen, während 7-8 % der gesamten deutschen Bruttowertschöpfung in diesen Branchen entsteht [2]. Die Fertigungstechnik ist somit ein wesentlicher Motor für die wirtschaftliche Entwicklung in Deutschland.

Die Energieforschung trägt in diesem wichtigen Forschungsfeld zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Fertigung am Standort Deutschland bei. Energieeffiziente Produkte (Maschinen, Anlagen, Komponenten etc.) der Fertigungstechnik bieten darüber hinaus Wettbewerbsvorteile im globalen Wettbewerb.



- 40,62 % des Primärenergiebedarfs aller Produktionsbereiche entfällt auf das **verarbeitende Gewerbe**
- 15,36% des Primärenergiebedarfs des verarbeitenden Gewerbes entfällt auf die **Fertigungstechnik**
- **Produkte der Fertigungstechnik** (z.B. Maschinen- und Anlagen, Querschnittstechnologien) determinieren wesentlich den Energiebedarf aller Produktionsbereiche

Abbildung 1-2: Primärenergiebedarf der Fertigungstechnik in Deutschland (Quelle: Eigene Darstellung nach [3])

Gemäß der vorab dargestellten Abgrenzung kann der Anteil der Fertigungstechnik am Primärenergiebedarf dargestellt werden (siehe Abbildung 1-2). Es ist ersichtlich, dass die Fertigungstechnik mit 625 PJ/a ein Viertel des Gesamtenergiebedarfs des verarbeitenden Gewerbes beansprucht. Weiterhin werden Produkte sowie Komponenten der Fertigungstechnik als energieverbrauchende Investitionsgüter produktionsbereichs- und sektorenübergreifend eingesetzt.

Die Energieforschung in der Fertigungstechnik hat somit zwei Perspektiven:

- Optimierung des Energieverbrauchs in der Fertigungstechnik selbst (z.B. Minimierung der Reibung)
- Veränderung der Fertigungstechnik zur Optimierung des Energieverbrauchs der hergestellten Produkte (z. B. Pumpen, Wärmeübertrager, Elektromotoren)

Eisen und Stahl

Die Herstellung von Roheisen und Rohstahl sowie deren erste Bearbeitung sind Grundpfeiler der deutschen Industrie. Stahl ist für den Aufbau und Erhalt von Infrastrukturen, insbesondere im Gebäude-, Tiefbau- und Mobilitätsbereich, unverzichtbar. Darüber hinaus ist die Stahlproduktion zentraler Lieferant für eine der bedeutendsten Branchen der deutschen Wirtschaft, die Kfz-Industrie. Deutlich wird dies an der Stahlnachfrage in Deutschland (siehe Abbildung 1-3): ca. 35 % der nachgefragten Stahlmengen gehen in die Bauwirtschaft, weitere 26 % in den Automobilbau. Auch der Maschinenbau als einer der Träger der deutschen Industrie ist mit 11 % ein bedeutender Stahlnachfrager.

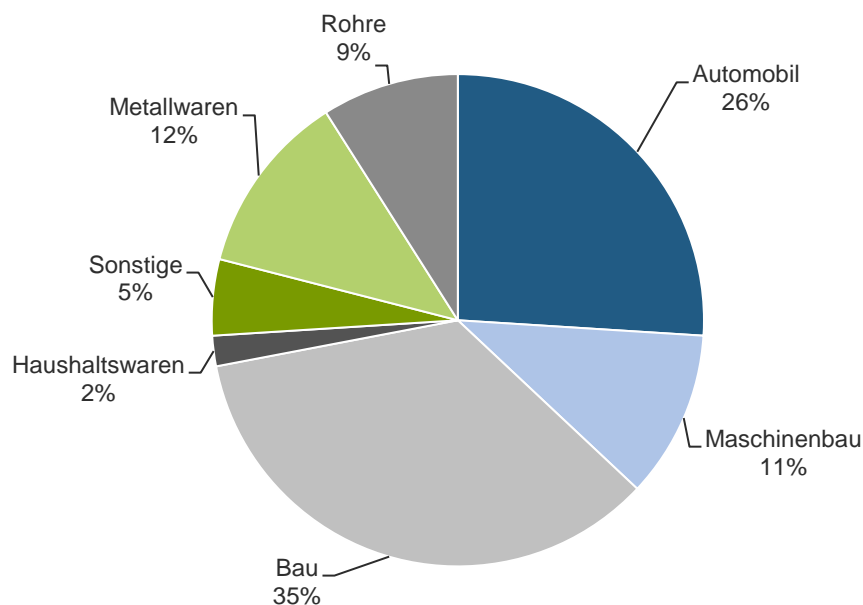


Abbildung 1-3: Anteil der Branchen am Stahlbedarf Deutschlands 2015 (Quelle: Eigene Darstellung nach [4])

Die Herstellung von Roheisen und Rohstahl ist sehr energie- und emissionsintensiv. Die Rohstahlproduktion in Deutschland liegt seit vielen Jahren (unter Nicht-Berücksichtigung der Wirtschaftskrise 2009) stabil zwischen ca. 42 und 49 Mio. t pro Jahr, im Jahr 2016 betrug sie 42,1 Mio. t. Die Emissionen der deutschen Eisen- und Stahlherstellung summierten sich 2016 auf 53,2 Mio. t CO₂-äq., darunter 37,2 Mio. t energiebedingte und 16 Mio. t prozessbedingte Emissionen. Letztere entstammen überwiegend aus dem Einsatz von Koks als Reduktionsmittel im Hochofen (und in geringerem Umfang durch den Einsatz von Kalkstein im Hochofen sowie Elektrodenabbrand im Elektrolichtbogenofen). [4].

Ca. zwei Drittel des erzeugten Rohstahls werden in integrierten Hüttenwerken als Oxygenstahl hergestellt. Das verbleibende Drittel wird über die Elektrostahlroute überwiegend aus Stahlschrott hergestellt, wobei sich der Elektrostahlanteil seit 1990 verdoppelt hat. Daneben kommt an einem Standort in Hamburg das Direktreduktionsverfahren mit Erdgas zum Einsatz.

Die Struktur des Energieverbrauchs unterscheidet sich erheblich, abhängig von den geschilderten Verfahren. Bei der integrierten Hochofenroute dominiert die Steinkohle als Ausgangsstoff für Koks sowie geringere Mengen anderer Kohlen, fester und flüssiger fossiler Energieträger. In den integrierten Hüttenwerken werden die bei der Kokerei, am Hochofen und am Konverter entstehenden Prozessgase weitestgehend zur Eigenstromversorgung genutzt, weshalb der Fremdstrombezug gering ausfällt. Die auf Kohle als Reduktionsmittel und Energieträger basierende Hochofenroute (BF-BOF) ist seit Jahrzehnten Stand der Technik in der Produktion. Endenergieeffizienzpotenziale sind weitgehend ausgereizt. Allerdings gibt es noch erhebliche Potenziale auf Seiten der Nutzenergie durch Abwärmenutzung. Bei der Sekundärroute dominiert der Strombedarf des Elektrolichtbogenofens. Die Elektrostahlroute produziert derzeit meist Stähle geringerer Qualität (Baustahl) aufgrund der dem Schrott anhaftenden Verunreinigungen bzw. mangelnder getrennter Erfassung und Sortierung von Schrotten.

Nach der Herstellung des Rohstahls schließt sich die sekundärmetallurgische Weiterverarbeitung, das Vergießen und für die überwiegende Menge die Weiterverarbeitung zu Walzstahlprodukten (wie z.B. Flachband für die Automobilbranche oder lange Produkte für den Bausektor) im Walzwerk an. In der Regel erfolgt nach dem Stranggießen eine Abkühlung mit anschließender Erwärmung der Brammen für das Warmwalzen. Dies geht mit erheblichen Ineffizienzen des Energieeinsatzes einher. Diese Energieverluste kann das Dünnband-Gießen weitgehend vermeiden.

Chemische Verfahrenstechnik

Von der chemischen und pharmazeutischen Industrie werden wichtige Produkte für die Industrie, Landwirtschaft, Handel und zu kleinem Umfang auch für Endverbraucher bereitgestellt:

- Grundchemikalien
- Düngemittel
- Kunststoffe, Chemiefasern, Kautschuke
- Schädlingsbekämpfungsmittel
- Anstriche, Farben, Pigmente, Druckfarben
- Wasch- und Körperpflegemittel

Die chemische und pharmazeutische Industrie zeichnet sich durch eine vergleichsweise hohe Energieintensität aus. Während mit 447 000 Mitarbeitern etwa 7,3 % der Mitarbeitenden des verarbeitenden Gewerbes in der chemischen und pharmazeutischen Industrie tätig sind, entfällt mit 677 PJ im Jahr 2017 24,7 % des Energieverbrauchs des verarbeitenden Gewerbes auf die chemische Industrie. Die chemische und pharmazeutische Industrie bezieht die benötigten Energieträger zu vergleichsweise günstigen Konditionen, weshalb die Energiekosten lediglich einen Anteil von 18,3 % der gesamten Energiekosten des verarbeitenden Gewerbes ausmachen. Trotzdem ist der Anteil der Energiekosten am Umsatz der chemischen und pharmazeutischen Industrie mit 3,4 % deutlich höher als der Durchschnitt des verarbeitenden Gewerbes (2,0 %). [5] Aus diesem Grund spielen Werkzeuge zur Verbesserung der Energieeffizienz schon lange eine große Bedeutung in der Forschung und Anwendung in der chemischen Verfahrenstechnik. Methoden, die insbesondere in Großunternehmen schon mit Erfolg eingesetzt werden, sind:

- Pinch-Analyse
- Modell-Prädiktive Regelungstechnik
- Prozessdaten-Management

- Statische und dynamische Prozessmodelle
- Supply-Chain-Modellierung und Optimierung
- Managementmethoden wie LEAN, Six-Sigma, TPM

Die Produkte und Produktionsweisen in der chemischen und pharmazeutischen Industrie können stark vereinfacht in zwei Kategorien eingeteilt werden:

1. Großprodukte („Commodities“) wie Grundchemikalien, Massenkunststoffe, Düngemittel, Zwischenprodukte oder Lösungsmittel werden in kontinuierlichen Prozessen erzeugt. Diese zeichnen sich durch eine hohe Kapital- und niedrige Personalintensität aus. Auf diesem Gebiet sind Großunternehmen tätig. Die Prozesse und Anlagen sind in der Regel nicht flexibel bezüglich Produktwechsell. Das Verhalten von Verfahren und Anlagen kann in der Regel sehr gut mit Modellen vorhergesagt werden, weshalb die oben genannten Methoden zur Verbesserung der Energieeffizienz sehr gut anwendbar sind.
2. Spezialitäten („Specialties“), wie Spezialkunststoffe, Spezialfarben und -pigmente, Druckfarben, Wasch- und Körperpflegemittel sowie Wirk- und Effektstoffe. Diese werden sowohl von mittelständischen Unternehmen wie Großunternehmen in der Regel in chargenweise betriebenen Prozessen und Anlagen hergestellt. Die Anlagen und Prozesse sind in der Regel flexibel hinsichtlich eines Wechsels von Produkten, die in der Anlage hergestellt werden. Die Parameter der Anlagen ändern sich zeitlich im Verlauf des Chargenprozesses stark, weshalb die Prozesse meistens nur mit deutlich größerem Aufwand durch Modelle beschrieben werden können. Mittelständische Unternehmen haben häufig keinen Zugang zu diesen komplexen Modellierungsansätzen.

In den letzten Jahren wurde intensiv an Konzepten gearbeitet, um Prozesse und Anlagen, mit denen chemische Spezialitäten hergestellt werden, so zu gestalten, dass sie ähnlich effizient wie Großprodukte in kontinuierlichen Anlagen produziert werden können. Dabei kommen Konzepte der Modularisierung zum Einsatz, wie sie bspw. im Projekt Enpro entwickelt werden [6]. Weitere Beispiele für moderne Forschungsansätze sind die durchgängige Digitalisierung der Produktion und die additive Fertigung von Anlagenkomponenten. Durch die Energiewende und der damit verbundenen stark fluktuierenden Bereitstellung von elektrischer Energie werden neue Chancen und Herausforderungen für wichtige Stromverbraucher, wie die chemische und pharmazeutische Industrie, entstehen. In der Fachwelt werden Ansätze wie das „Demand-Side-Management“, „Sektorkopplung“ oder die „Elektrifizierung chemischer Prozesse“ mit Hilfe der Elektrochemie diskutiert.

Nicht im Rahmen des Begleitforschungsprojekts betrachtet werden indirekte Emissionen, die auf Grund der Nutzung und anschließender Entsorgung der Produkte der chemischen Industrie entstehen. Die damit verbundene Frage der zukünftigen Kreislaufwirtschaft von Chemieprodukten ist, obwohl von großer Bedeutung für die CO₂-Bilanz der chemischen Industrie [7], nicht Aufgabe dieses Projekts.

Abwärmenutzung

Etwa 60 % der in der Industrie eingesetzten Endenergie (ca. 2500 PJ/a) wird derzeit in Nutzenergie gewandelt, die dann in den vielen Produktionsprozessen als Wärme, Kraft, Licht oder Datenverarbeitung genutzt wird. In beiden Wandlungsstufen entsteht letztlich Abwärme in Abgasen bzw. Abluft in technisch gefassten Strömen, in Flüssigkeiten oder Produkten sowie Abfallstoffen auf sehr verschiedenen Temperaturniveaus; oft wird die Abwärme auch einfach an die Umgebung abgegeben.

Wieviel von diesen etwa 1.500 PJ pro Jahr entstehende Abwärme [8] in technisch gefasster Form, - betriebsintern oder -extern – genutzt werden könnte, entscheiden nicht nur Energiepreise und die Kosten der jeweiligen Abwärmenutzung, sondern auch Entscheidungsroutrinen in den Unternehmen oder offene Fragen der Risikoübernahme bei betriebsexterner Nutzung von Abwärme.

Die Nutzung von Abwärme - insbesondere bei hohen Temperaturen $> 500\text{ °C}$ wie auch bei Temperaturen $< 80\text{ °C}$ - wurde bis heute in vielen Branchen aus verschiedenen Gründen eher vernachlässigt. Diese Zurückhaltung der Unternehmen, die Abwärme aus ihren Prozessen intensiver zu nutzen, hat auch technische Gründe wie z.B. Fouling der Wärmeübertrager mit oft erheblichem Reinigungsaufwand, Korrosion von Wärmeübertragern oder dem Piping sowie Ungleichzeitigkeit von Abwärmeeinfall und Wärmebedarf bei Batch-Betrieb. Solange diese technischen Herausforderungen nicht gelöst sind, wird es immer wieder Vorbehalte in den betroffenen Betrieben geben, die erheblichen und oft rentabel nutzbaren Abwärme-Potenziale zu realisieren. Dies wird auch im Bericht des Konsultationsprozesses zum 7. Forschungsprogramm in Kap. 3.15 so gesehen und eine Fülle von Entwicklungs- und Weiterentwicklungsvorschlägen gemacht [9].

Industrie- und Gasmotoren

Die Wandlung von chemischer Energie in mechanische und ggf. nachgeschaltete elektrische Energie mittels Motoren und Turbinen wird auch in Zukunft in Energiesystemen in den betrachteten Industrien von Bedeutung sein [9]. Vor dem Hintergrund, dass zukünftig fossile Kraftstoffe durch regenerativ erzeugte Kraftstoffe substituiert werden sollen, nimmt insbesondere die chemische Industrie im Bereich der Forschung und der Herstellung regenerativ erzeugter Kraftstoffe eine bedeutende Rolle ein. Darüber hinaus werden Innovationen bei der Herstellung und Anwendung von Industrie- und Gasmotoren einen deutlichen Einfluss auf die Fertigungstechnik sowohl herstellerseitig als auch anwenderseitig nehmen.

Hochtemperatursupraleitung

Die Innovationen bei Herstellung und Anwendung neuer Systemlösungen unter Nutzung von Supraleitern haben das Potenzial, signifikanten Nutzen für die Fokusbereiche des Begleitforschungsprojekts zu bringen. Komponenten wie Generatoren, Transformatoren, Kabel, Strombegrenzer, rotierende Maschinen wie Pumpen und Verdichter, spielen eine wichtige Rolle in den betrachteten Industrien. In diesen Komponenten werden im Erfolgsfall zukünftig hochtemperatur-supraleitende Elemente verbaut werden.

Die Fertigungstechnik und die chemische Industrie werden darüber hinaus auch auf der Herstellerseite eine bedeutende Rolle bei der Umsetzung der Hochtemperatursupraleiter von der Forschung in die Anwendung spielen.

Tribologie

Tribologische Fragestellungen tauchen in unterschiedlichster Weise in den betrachteten Forschungsfeldern auf. Hinsichtlich der Forschung zur Minimierung der unerwünschten Begleiterscheinungen tribologischer Vorgänge, wie etwa Energieverluste durch Reibungswärme oder Bauteilverschleiß, können die betrachteten Industrien eine bedeutende Rolle spielen. Insbesondere die Fertigungstechnik und die chemische Verfahrenstechnik können einerseits bei maschinenbaulichen Fragestellungen und bei der Schmierstoffentwicklung Unterstützung leisten. Andererseits sind sie bei der Entwicklung neuartiger Werkstoffe und Beschichtungen wesentlich für die Forschung und Umsetzung von Maßnahmen für reibungsoptimierte Maschinen und Anlagen.

Unabhängige Forschungsprojekte

Die zweite Säule der Forschungsförderung des BMWi wird durch Einbeziehung der Einzelprojekte im Rahmen der geplanten TPs berücksichtigt. Die Zuständigkeit für identifizierte Forschungspartner wurde während der Projektlaufzeit bestimmt und richtete sich nach den Inhalten des jeweiligen Forschungsprojekts. Im Konsultationsprozess zum 7. Forschungsprogramm werden insbesondere periphere Technologien angesprochen, welche die Gesamtenergieeffizienz des Energieversorgungssystems verbessern sollen (z.B. Speichertechniken, Flexibilisierung der Stromnachfrage) oder die zu einer effizienten Klima-neutralen Produktionsstruktur beitragen sollen (z.B. komplette CCU-Ketten als Demonstration). [9].

2. Forschungsergebnisse

2.1. Kurzdarstellung der genutzten Methodiken

Im Rahmen des Forschungsprojekts kamen verschiedene Methodiken zum Einsatz, die im Folgenden näher beschrieben werden. Dies ist zunächst die EDUAR&D-Methode, mit der forschungsfeldspezifische Technologien im Detail analysiert wurden. Für kürzere, forschungsfeldspezifische Analysen kam die Quick-Scan-Methode zum Einsatz. Zudem werden die Vorgehensweisen zur Identifikation der forschungsfeldübergreifenden Technologien und zur multikriteriellen Bewertung der betrachteten F&E-Themen ausgeführt.

2.1.1. Forschungsfeldspezifische Technologien: EDUAR&D

EDUAR&D, kurz für „Energiedaten und -analyse R&D“, ist die im Rahmen des Projekts EE4InG genutzte Methodik zur Bewertung von vielversprechenden Technologien, die potenziell zu einer erheblichen Senkung des Energiebedarfs und/oder der Treibhausgasemissionen in den Forschungsfeldern (und teilweise darüber hinaus) beitragen könnten. EDUAR&D ist ein strukturierter Such- und Analyseprozess, der verschiedenste methodische Ansätze zur Darstellung, Analyse und Bewertung der Technologien miteinander verbindet. Dabei muss nicht zwangsläufig jede EDUAR&D-Analyse das gesamte Tableau der zur Verfügung stehenden Optionen nutzen: dies ist teilweise abhängig von den zur Verfügung stehenden Informationsquellen. Ziel ist es, Handlungsempfehlungen (z. B. bzgl. thematischer Schwerpunktsetzungen, Intensivierung bestehender Förderungen, etc.) insbesondere für die zukünftige Energieforschung des Bundes abzuleiten. Die EDUAR&D-Methodik wurde im Auftrag des BMWi am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung entwickelt [10]. Abbildung 2-1 zeigt den typischen Gesamtprozess des EDUAR&D-Prozesses.

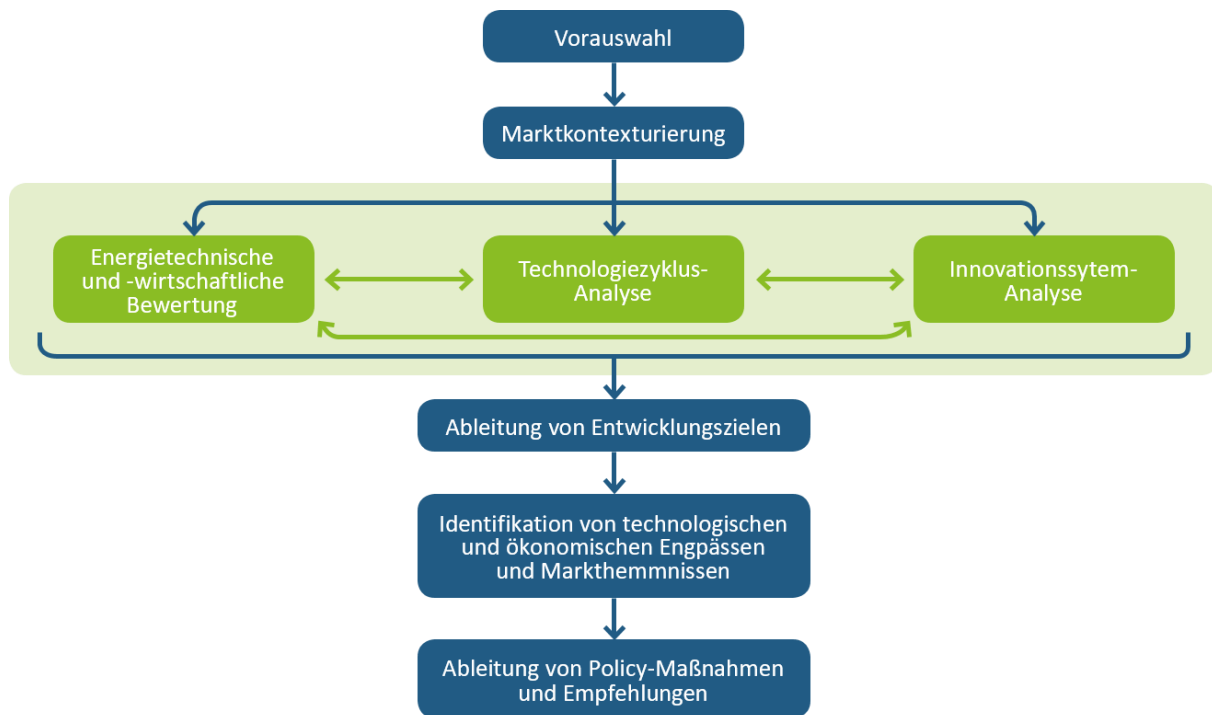


Abbildung 2-1: Typische Struktur von EDUAR&D, Quelle: Eigene Darstellung IREES

Für die durch einen knappen Vorauswahl-Prozess identifizierte Technologie (beispielsweise anhand ihrer potenziellen Relevanz für den Energieverbrauch oder die THG-Emissionen einer Branche oder eines bestimmten Produktionsprozesses) wird zunächst eine Marktkontexturierung durchgeführt. Diese beschreibt die Regionalität der denkbaren Märkte und die derzeitige oder absehbar überwiegende Marktform (Monopol – Polypol) sowie mögliche Konkurrenztechnologien und die hierdurch absehbare Wettbewerbsintensität.

Zentraler und komplexester Teil ist die dreigliedrige Analyse, die aus einer energietechnischen/ -wirtschaftlichen Bewertung, einer Technologiezyklus-Analyse sowie einer Innovationssystem-Analyse besteht. Die energietechnische/ -wirtschaftliche Bewertung kann verschiedene Komponenten beinhalten, wie eine erste Abschätzung des möglichen Einflusses der Technologie auf den Energiebedarf und die THG-Emissionen (entsprechende Diffusion vorausgesetzt), die Angabe von Kosten-Nutzen-Indikatoren sowie weitere, auch qualitative Bewertungen, z. B. bzgl. möglichem Exportpotenzial. Die Technologiezyklus-Analyse dient dazu, die technologische und ökonomische Marktnähe der Technologie besser verorten zu können. Die sechs Phasen des Technologiezyklus können auch dazu dienen, je nach Verortung der Technologie, zielgerichtete Handlungsempfehlungen abzuleiten. Die Verortung im Technologiezyklus kann durch Patent- und Publikationsanalysen unterstützt werden (z. B. über das Verhältnis von Grundlagen- zu Anwendungspatenten, Zunahme oder Abnahme von Patenten und Publikationen über die Zeit). Auch eine SWOT-Analyse kann Bestandteil der Technologiezyklus-Analyse sein. Gemäß der Definition [11] generieren, verbreiten und nutzen Innovationssysteme Innovationen. Sie setzen sich zusammen aus Komponenten und Relationen, wobei erstere Akteure, Technologien und den regulatorischen Rahmen (inkl. Förderpolitik) umfassen, und letztere die vielfältigen formellen und informellen Beziehungen zwischen diesen Komponenten. Die Analyse schließt mit der Identifikation möglicher Entwicklungsziele, von technologischen und ökonomischen Engpässen und Markthemmnissen aus den vorherigen Analyseschritten. Hieraus werden dann wiederum Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Im Rahmen des Vorhabens EE4InG dienen die EDUAR&D-Technologieanalysen auch als Input für Expertengespräche und werden in Folge dieser Gespräche nach Bedarf angepasst.

2.1.2. Forschungsfeldspezifische Technologien: Quick-Scan

Im Laufe des Projekts wurde als Zusatz zur umfangreichen EDUAR&D-Analyse außerdem die Methode des Quick-Scan eingesetzt. Ziel dieser kürzeren Analysen ist es, einen kurzen Forschungsimpuls zu geben, der den Lesern als Anhaltspunkt für weitere Aktivitäten dienen kann. Darin enthalten ist ein kurzer Überblick über das Thema, einer Abschätzung der Forschungspotenziale und Empfehlungen für potenzielle Konsortien, mit denen dann nachfolgende Fachgespräche durchgeführt oder Forschungsprojekte diskutiert werden können. Die Analysen basieren in der Regel auf Interviews mit ausgewählten Expert:innen auf dem Gebiet. Der typische Ablauf des Quick-Scan im Projekt ist an die Phasen der EDUAR&D-Analyse angelehnt und in Abbildung 2-2 grafisch dargestellt.



Abbildung 2-2: Typischer Ablauf der Quick-Scan Analyse

2.1.3. Identifikation forschungsfeldübergreifender Technologien

Bei forschungsfeldübergreifenden Technologien geht es um die Frage, inwieweit sich die F&E-Arbeiten und -Anregungen für zukünftige Forschungstätigkeiten in den sechs Forschungsfeldern gegenseitig positiv verstärkend oder abschwächend beeinflussen. Beispielsweise dürfte die Diffusion der Nanofiltration in der chemischen und pharmazeutischen Industrie viele Anwendungsfelder der thermischen Trennverfahren mit ihren Wärmeübertrager-Systemen obsolet machen, dagegen aber die Aufmerksamkeit für hocheffiziente Pumpensysteme (eventuell mit Gleichstrombetrieb) deutlich erhöhen. Im 1. Halbjahr 2020 wurde dieses Arbeitspaket mit der Identifikation von Wechselwirkungen anhand einer Matrix von den Projektpartnern gestartet.

Die Wechselwirkungsmatrix für forschungsfeld-übergreifende und beeinflussende Effizienzthemen wurde in einer ersten Ideenrunde aufgestellt. In Abstimmung mit dem PtJ (finale Abstimmung Januar 2021) wurden die in der ersten Ideenrunde identifizierten Themen weiter ausgearbeitet und konkreti-

siert. Somit konnten fünf Wechselwirkungsthemen identifiziert werden, welche im weiteren Projektverlauf bearbeitet werden sollen (vgl. Tabelle 2-1). Die Themen werden weitestgehend bilateral bearbeitet mit jeweils einer Institution in der Themenverantwortlichkeit.

Die Auswahl wurde u. a. nach folgenden Kriterien getroffen:

- Position im Technikzyklus (mindestens am Ende der euphorischen Phase)
- hohe Wahrscheinlichkeit einer Rentabilität bei Markteintritt in Zyklusphase 5
- hohe zukünftige energiewirtschaftliche Bedeutung der erwarteten Effizienz-Gewinne bei voller Diffusion

Die Ergebnisse dieser Bearbeitung der Wechselwirkungsfelder wurden in den erarbeiteten F&E-Empfehlungen im Bereich Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe berücksichtigt.

Tabelle 2-1: Wechselwirkungsthemen, welche im weiteren Projektverlauf bearbeitet werden

Partner	Forschungsfelder	Neue Ergebnisse
<u>IKFT - KIT & PTW - TU Da</u>	Chemische Verfahrenstechnik & Fertigungstechnik	Einsatz Additiver Fertigung in der Verfahrenstechnik (Herstellung optimierter Reaktionsapparate etc.) und ihre Auswirkungen auf den Netto-Energiebedarf.
<u>PTW - TU Da & ETA-Solutions</u>	Fertigungstechnik & Abwärmenutzung	Abwärmenutzung im Kontext von Kühl- und Kältetechnik.
<u>IKFT - KIT & IREES</u>	Chemische Verfahrenstechnik & Abwärmenutzung	Diffusion der Nano-Membrantechnik reduziert die Abwärmepotenziale der thermischen Trennverfahren bei ca. 100 bis 450°C.
<u>ETA-Solutions & IREES</u>	Metallerzeugung und -verarbeitung, Chemische Verfahrenstechnik, Fertigungstechnik, Abwärmenutzung	Kühl- und Kältetechnik, verstärkte Anwendung der Ad- und Absorptions-Technik inkl. Latentwärmespeicher.
<u>IREES</u>	Metallerzeugung und -verarbeitung & Abwärmenutzung	Veränderung der Abwärmenutzungspotenziale bei der Substitution der Hochofenlinie durch die Direktreduktion zur Herstellung von Primärstahl.
<u>PTW- TU Da</u>	Alle	Energieeffizienzpotenziale durch Digitalisierung und deren Digitalisierungsaufwand.

2.1.4. Multikriterielle-Technologiebewertung der untersuchten F&E-Themen

Um die Ergebnisse in den jeweiligen Analysen zu bewerten und übersichtlich für einen schnellen Einblick aufzubereiten, wurde die multikriterielle Bewertung als Methode gewählt. Diese ermöglicht auch mit einfachen Mitteln eine Quantifizierung, Klassifizierung und Bewertung in verschiedenen Kategorien visuell in einer "Bewertungsspinne" darzustellen. Hierzu wurden acht Bewertungskriterien festgelegt, welche in Tabelle 2-2 aufgeführt werden.

Tabelle 2-2: Kriterien der multikriteriellen Bewertung.

Kriterium	Dimension / Indikator / Berechnung	Quantitativ / Qualitativ	Kategorie
Energieeinsparpotenzial (Endenergie)	[PJ/a]	Quantitativ	Muss
THG-Minderungspotenzial (Endenergie u. Prozess-Emissionen)	[Mio. CO ₂ -äq./a]	Quantitativ	Muss
Hemmnisse	Technisch /regulatorisch / ökonomisch	Qualitativ	Muss
Position im Technikzyklus	Bewertung 1-5 für TZ 2-6	Qualitativ	Kann
Rentabilität (TZ 5)	Interne Verzinsung	Quantitativ	Kann
Investitionsrisiko (TZ 5)	statische Amortisationszeit	Quantitativ	Kann
Wettbewerbssituation bei Markteintritt (TZ 5)	Technisch/ökonomischer Vorteil	Qualitativ	Kann
Kostendegression/Skaleneffekt (TZ 6)	Angenommene/ Ermittelte Lernkurve	Quantitativ/ Qualitativ	Kann

Für die Bewertungskriterien werden hierbei quantitative Abschätzungen oder qualitative Einordnungen vorgesehen. Durch ihre hohe Relevanz für eine technologische Bewertung aus der Perspektive der Energieeffizienz erfolgte die Definition des Energieeinsparpotenzials, des THG-Minderungspotenzials und der Ausprägung erwarteter Hemmnisse als „Muss“-Kriterium. Eine Bewertung durch die „Kann“-Kriterien wird dabei als optional angesehen. Die Ausprägung der einzelnen Perspektiven ist dabei von der betrachteten Technologiezyklusposition und dem damit verbundenen Diffusionszustand abhängig. Hierdurch ergibt sich eine Zeitabhängigkeit der multikriteriellen Bewertung. Im Rahmen der technologischen Beurteilungen erfolgte daher eine Anfertigung mehrerer Bewertungsspienen für verschiedene Stützjahre. Diese wurden aufgrund einer besonderen Relevanz, beispielsweise der Veränderung der Technologiezyklusposition gewählt. Um jedoch eine Vergleichbarkeit aller Technologien herzustellen, wurde mindestens eine multikriterielle Bewertung für den Zustand einer vollständigen Diffusion angefertigt, sofern dies für den Betrachtungszeitraum bis 2050 zu erwarten ist.

Im Folgenden werden die Kriterien der Bewertung erläutert und Ihre jeweilige Klassifizierung vorgestellt.

- Das Energieeinsparpotenzial (Endenergie): wird quantifiziert (in PJ/a) mittels Schätzung der netto eingesparten Endenergiemengen.
 1. < 1 PJ/a
 2. 1 bis 5 PJ/a
 3. 5 bis 20 PJ/a
 4. 20 bis 50 PJ/a
 5. > 50 PJ/a

- Die CO₂-Emissionsminderung (Primärenergieeitig) wird in Mio.t_{CO₂-äq./a} quantifiziert. Hierzu werden mittels Schätzung der netto eingesparten Primärenergienmengen die spezifischen CO₂-Emissionen für die Primärenergieträger ermittelt.
 1. < 0,07 Mio. t_{CO₂-äq./a}
 2. 0,07 bis 0,35 Mio.t_{CO₂-äq./a}
 3. 0,35 bis 1,4 Mio.t_{CO₂-äq./a}
 4. 1,4 bis 3,5 Mio.t_{CO₂-äq./a}
 5. > 3,5 Mio.t_{CO₂-äq./a}
- Technische, informatorische und regulatorische Hemmnisse werden über qualitative Zuordnung zu Klassen der Hemmnis-Intensität zugeordnet.
 1. viele schwer zu überwindende Hemmnisse
 2. viele zu überwindende Hemmnisse
 3. wenige zu überwindende Hemmnisse, davon ein Teil schwierig
 4. wenige, leicht zu überwindende Hemmnisse
 5. keine merklichen Hemmnisse
- Die derzeitige Phase im Technikzyklus wird im Rahmen der Technologieanalyse Bestimmt. Bei einer möglichen Zuordnung in mehrere Phasen wird der Mittelwert der Phasen gewählt. Eine Einordnung in die erste Technologiezyklusposition „Entwicklung und Entdeckung“ wird hierbei durch die Wahl der untersuchten Technologien ausgeschlossen.
 1. Euphorie
 2. Ernüchterung
 3. Neuorientierung
 4. Aufstieg
 5. Diffusion
- Das Investitions-Risiko orientiert sich an der statischen Amortisationszeit, ohne Subventionen, welche gegenüber der technischen Lebensdauer (typische Standzeit bis zur Reinvestition) der Effizienztechnik betrachtet wird.
 1. Amortisation bei > 80% der Lebensdauer
 2. Amortisation bei 50% bis 80% der Lebensdauer
 3. Amortisation bei 25% bis 50% der Lebensdauer
 4. Amortisation bei 15% bis 25% der Lebensdauer
 5. Amortisation bei < 15 % der Lebensdauer
- Die Rentabilität wird durch die interne Verzinsung, ohne Subventionen, beurteilt.
 1. <8 % interne Verzinsung (unrentabel)
 2. 8-12 %
 3. 12-20 %
 4. 20 - 30 %
 5. >30 %
- Die Skaleneffekten werden durch die Höhe des geschätzten Kostendegressions-Koeffizienten bei jeweiliger Verdopplung der Herstellungs-Stückzahlen quantifiziert. Als Orientierungsgröße gilt hierbei die in den nächsten 30 Jahren weltweit vorstellbare Losgröße.
 1. Keine Skalierungseffekte zu erwarten; Fortschrittsrate (f) = 1,0
 2. Geringfügige kummulierte Produktion möglich f: 0,99 bis 0,93
 3. Produktion in mittleren Serien möglich f: 0,93 bis 0,85

4. Produktion in mittleren Großserien möglich, auch exportbedingt $f: 0,85$ bis $0,8$
 5. ausgesprochene Großserien-Produktion, auch wegen Export möglich $f < 0,8$
- Die Wettbewerbssituation von Effizienz-Techniken durch konventionelle oder andere innovative Techniken wird durch eine qualitative Zuordnung klassifiziert.
 1. Nicht Kompetitiv, da traditionelle oder andere Effizienztechniken rentabler sind
 2. Kompetitiv mit akzeptablen Mehrkosten
 3. Kompetitiv in Nischen- und kleineren Märkten
 4. Kompetitiv im marktführenden Segment
 5. Herausragende Marktstellung in den meisten Anwendungen

Nachfolgend wird in Abbildung 2-3 das Beispiel einer Multikriteriellen Darstellung durch eine Bewertungsspinne gezeigt. Die Interpretation der Darstellung würde geringfügige Energieeinspar- und Emissionsminderungspotenziale vorsehen. Dafür bestehen wenige zu überwindende Hemmnisse bei einer Technologiezyklusposition im Bereich der Neuorientierung. Es besteht eine Rentabilität mit einer internen Verzinsung von 12-20% und eine kompetitive Marktsituation in kleineren Nischenmärkten, bei einer adäquaten Ausprägung von Skalierungseffekten. Als Besonderheit könnte hierbei ein ausgesprochen kleines Investitionsrisiko angesehen werden. Demnach besteht für die gezeigte Beispieltechnologie eine Amortisation bei weniger als 25% der technischen Lebensdauer.

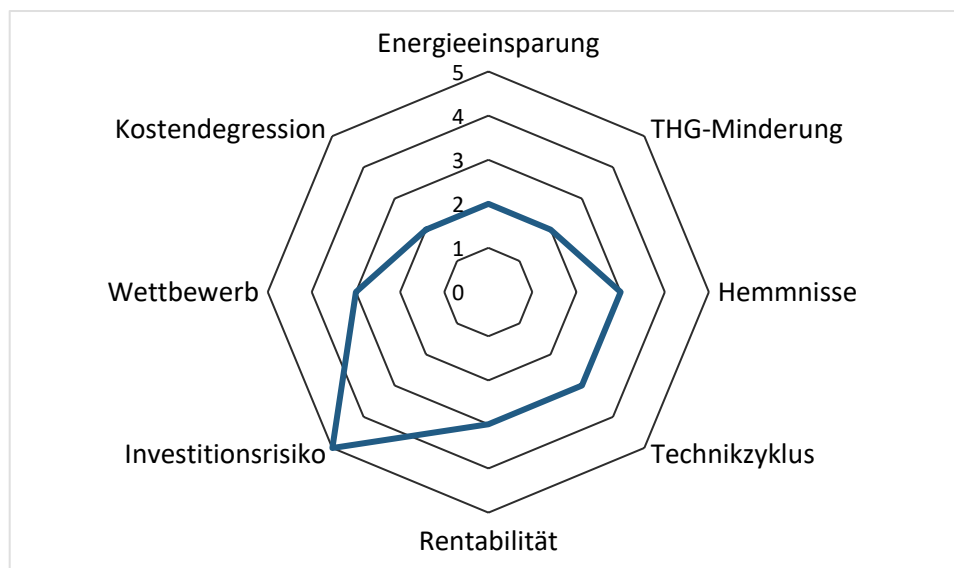


Abbildung 2-3: Beispiel einer multikriteriellen Bewertung in der Darstellung einer „Bewertungsspinne“.

2.1.5. Gesamtbewertung

Strategie der Gesamtbewertung

Im Rahmen einer technologischen Gesamtbewertung wird eine technologie- und forschungsfeldübergreifende Bewertung der untersuchten Effizienztechniken angestrebt. Hierfür wurden im Rahmen des AP 5.1 Kriterien formuliert, welche im Rahmen der Gesamtbewertung berücksichtigt werden.

Dabei soll die energiewirtschaftliche und klimapolitische Bedeutung der jeweiligen Technik/Technologie dargestellt werden. Weiterhin wird eine graphische Darstellung in der Form eines Portfolioansatzes angestrebt. Hierbei sollen die Potenziale und Risiken der Technologie gegeneinander abgewogen werden und schnell visuell erfassbar sein. Zur Darstellung wird die Entwicklung einer Punkteskala durchgeführt,

welche es ermöglicht bestehende Risiken und Hemmnisse durch numerische Deskriptoren darzustellen. Dabei sollen Forschungs- und Markteintrittskriterien berücksichtigt werden, welche die Produktionskosten, Standzeiten und Produktqualitäten im Vergleich zu den konventionellen Produktionstechniken betrachtet. Auch die Aspekte der Kostendegression und der Skalierungsrisiken sollen hierbei berücksichtigt werden.

Vorgehen der Gesamtbewertung

Die angestrebte Darstellung von Potenzialen und Risiken bedingt zunächst die Definition der gewählten Perspektiven beider Eigenschaften. Für die Abschätzung der Potenziale, im Kontext der energiewirtschaftlichen und klimapolitischen Bedeutung, werden die folgenden Zielgrößen als Deskriptoren genutzt:

- die kumulierte Emissionseinsparung von Treibhausgasen von 2020 bis 2050 bei einer unterstellten Technologieentwicklung und Verbreitung in mio. t CO₂-Äq.
- der jährliche verminderte Endenergiebedarf durch den Einsatz der Technologie bei einer unterstellten Technologieentwicklung und Verbreitung in PJ/a

Die Bestimmung der beiden Deskriptoren wird im Folgenden anhand des Beispiels der technischen Nanokatalyse dargestellt. Die Grundlage der Bewertung stellen die Identifikation von Stützjahren und die Durchführung von multikriteriellen Bewertungen dar. Für den Einsatz technischer Nanokatalysatoren wurden hierbei die Stützjahre 2030, 2040 und 2050 gewählt, da diese mit Änderungen der Technikzyklusposition assoziiert werden. Die Darstellung erfolgt in Abbildung 2-4. Die Darstellung zeigt, dass für die Nanokatalysatoren die erwartete Veränderung der Technologiezyklusposition vorliegt. Darüber hinaus kann eine Zunahme der erwarteten Endenergieeinsparung und der Wettbewerbssituation verzeichnet werden. Für die THG-Minderung besteht sogar eine Abnahme des Minderungspotenzials.

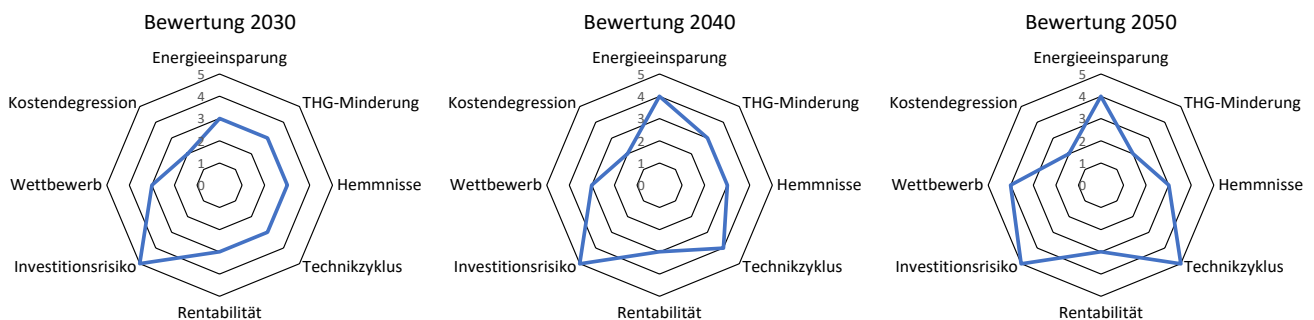


Abbildung 2-4: Multikriterielle Bewertung der Technischen Nanokatalyse für die Stützjahre 2030, 2040 und 2050.

Im Folgenden wird, ausgehend von der Analyse der Stützjahre, eine Abschätzung der jährlichen Endenergieeinsparungen von 2020 bis 2050 vorgenommen. Hierbei werden Effekte der Technologieverbreitung, der Skalierung von Herstellprozessen und der Überwindung von Hemmnissen berücksichtigt. Die Darstellung dieser Prognose für die technische Nanokatalyse ist in Abbildung 2-5 zu sehen. Durch die periodische Effizienzsteigerung technischer Katalysatoren durch neue Produktgenerationen und einer unwahrscheinlichen Sättigung des Effizienzpotenzials, kann dabei ein linearer zeitlicher Verlauf der erwarteten Endenergieeinsparung angenommen werden. Die Markierungen im Diagramm signalisieren dabei die Stützjahre. Die Auftragung ermöglicht eine mathematische Funktionalisierung durch eine lineare Funktion, welche zur Bestimmung der jährlichen Verbrauchsminderung genutzt werden kann.

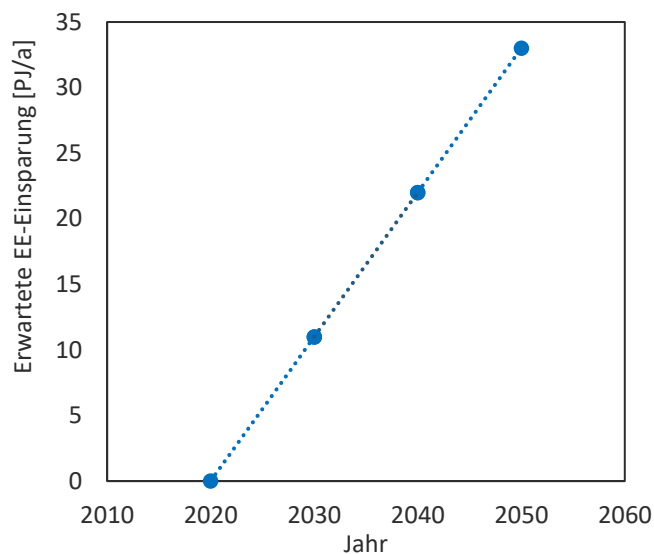


Abbildung 2-5: Darstellung der erwarteten Endenergieeinsparungen der Technischen Nanokatalyse, Markierungen: Stützjahre der multikriteriellen Betrachtung, Linie: linearer Trend für die mathematische Funktionalisierung.

In einem nachfolgenden Schritt werden den aufgezeigten Energieeinsparungen Emissionsminderungen zugeordnet. Dies erfolgt durch Emissionsfaktoren, welche abhängig von der eingesetzten Endenergieform sind. Die Entwicklung der Applikationsspezifischen Energieversorgung stellt hierbei eine weitere Abschätzung im Rahmen der Gesamtbetrachtung dar. Für die technische Nanokatalyse wird ausgehend von dem gegenwärtigen Endenergiezusammensetzung [12] eine Veränderung nach Abbildung 2-6 erwartet. Hierbei erfolgt eine Unterteilung in Endenergieträger mit abnehmender Relevanz, siehe Abbildung 2-6 (A), und zunehmender Relevanz, siehe Abbildung 2-6 (B). Der Auftragung kann entnommen werden, dass die Nutzung von Methan (Erdgas), Flüssige Kohlenwasserstoffe (KWS), Stein- und Braunkohle abnimmt. Die Verwendung von Strom, Fernwärme, Wasserstoff und den erneuerbaren Energien erfolgt hingegen intensiver.

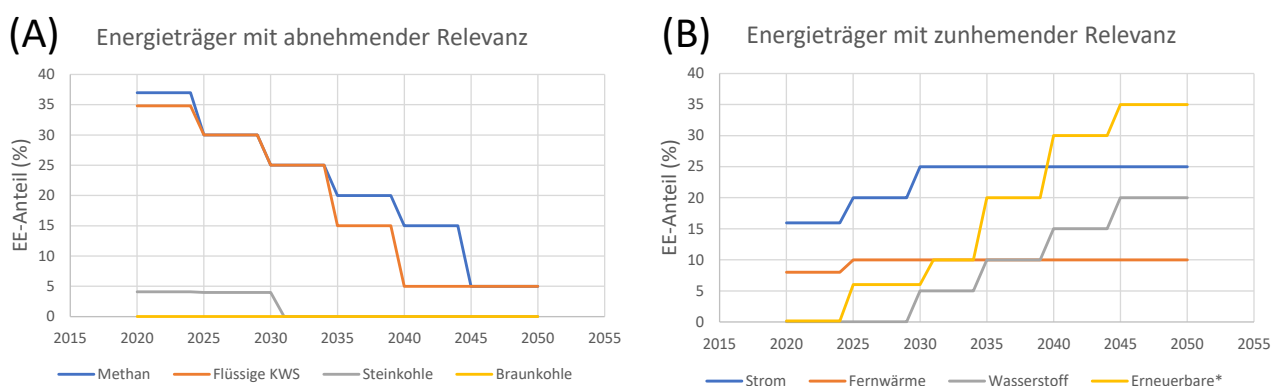


Abbildung 2-6: Darstellung des Anteils der Endenergie (EE) – Versorgung von Applikationen der technischen Nanokatalyse und deren Entwicklung von 2020 bis 2050 mit Unterteilung in (A) abnehmender Relevanz und (B) zunehmender Relevanz.

Die Bestimmung der verminderten Emissionen muss dabei auch die Emissionsintensität unterschiedlicher Endenergieträger von 2020 bis 2050 berücksichtigen. Hierzu wurden die spezifischen Emissionsfaktoren aus dem Dynamis Hauptbericht [13] entnommen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass

bezüglich der Entwicklung der Emissionsfaktoren eine Unsicherheit besteht. Dies basiert auf der Entwicklung der zukünftigen industriellen Energieversorgung, welche gegenwärtig nur durch Szenarien angenähert werden kann. Für die Emissionsfaktoren wären dabei zwei mögliche Effekte denkbar:

- Es bestehen positive Abweichungen der Emissionsfaktoren vom geplanten Entwicklungspfad durch den zu langsamen Ausbau der erneuerbaren Energien. Alternativ wäre eine unzureichende Nutzung von erneuerbaren Energien zur Herstellung von Endenergieträgern aus ökonomischen Gründen denkbar. (z.B. aus ökonomischen Gründen)
- Negative Abweichung, welche auf eine unerwartet hohe Abnahme der Emissionsfaktoren beruhen, wären jedoch auch denkbar. Diese könnten durch einen unerwartet schnellen Ausbau der erneuerbaren Energie oder anderer CO₂-freier Energiequellen bewirkt werden. Gleichzeitig könnten auch Effizienzsteigerungen der Primärenergiegewinnung oder der Energieversorgung zu einer Überproportionalen Abnahme der Emissionsfaktoren führen.

Die quantitative Abschätzung der Unsicherheit von Emissionsfaktoren erfolgt durch eine Szenarienanalyse. Dabei werden das „Start“- und das „fuEL“-Szenario der Dynamis-Untersuchung als Grundlage verwendet. Dabei handelt es sich um Perspektiven welche eine 65 %ige („Start“) und eine 95 %ige („fuEL“) Reduzierung des THG-Ausstoßes gegenüber 1990 aufweisen [13]. Als Grundlage der Quantifizierung von Unsicherheiten wird im Rahmen der technologischen Gesamtbewertung die Differenz von Emissionsfaktoren $\Delta\varepsilon_{n,m}$ des Energieträgers n im Jahre m genutzt. Die Berechnung erfolgt dabei nach Gleichung (1) und ergibt sich aus den Emissionsfaktoren des Endenergieträgers n im Jahr m des „Start“ ($\varepsilon_{n,m,Start}$)- oder des „fuEL“ ($\varepsilon_{n,m,fuEL}$)-Szenarios. Die numerischen Werte der Stützjahre des Dynamis-Hauptberichts wurden zu diesem Zweck mathematisch angenähert.

$\Delta\varepsilon_{n,m} = \varepsilon_{n,m,Start} - \varepsilon_{n,m,fuEL} $	(1)
--	-----

Die positive Abweichung von Emissionsfaktoren wird im Rahmen der Unsicherheitsbetrachtung durch den modifizierten Emissionsfaktor $\varepsilon_{n,m,fuEL,pos}$ nach Gleichung (2) ermittelt. Für negative Abweichungen des Emissionsfaktors erfolgt ein analoges Vorgehen für $\varepsilon_{n,m,fuEL,neg}$ nach Gleichung (3).

$\varepsilon_{n,m,fuEL,pos} = \varepsilon_{n,m,fuEL} + \Delta\varepsilon_{n,m}$	(2)
$\varepsilon_{n,m,fuEL,neg} = \varepsilon_{n,m,fuEL} - \Delta\varepsilon_{n,m}$	(3)

Die Berechnung einer spezifischen THG-Emission $Y_{n,m}$ des Endenergieträgers n im Jahr m wird dabei zunächst durch den Energieverbrauch $E_{n,m}$ und den Emissionsfaktor $\varepsilon_{n,m,fuEL}$ nach Gleichung (4) durchgeführt.

$Y_{n,m} = E_{n,m} \cdot \varepsilon_{n,m,fuEL}$	(4)
--	-----

Bei Berücksichtigung der Unsicherheit der Emissionsfaktoren ergibt sich hierdurch ein möglicher Wertebereich von $E_{n,m} \cdot \varepsilon_{n,m,\text{fuEL,neg}} \leq Y_{n,m} \leq E_{n,m} \cdot \varepsilon_{n,m,\text{fuEL,pos}}$. Hierbei wird aus Plausibilitätsgründen die Vereinbarung $\varepsilon_{n,m,\text{fuEL,neg}} \geq 0$ getroffen, da Verfahren mit negativen THG-Emissionen technisch unwahrscheinlich erscheinen.

Eine Auftragung von $\Delta\varepsilon_{n,m}$ für die Endenergieträger mit zeitlich abhängigen Emissionsfaktoren ist in Abbildung 2-7 dargestellt. Für die erneuerbaren Energien, Braun- und Steinkohle würde hierbei $\Delta\varepsilon_{n,m} = 0$ für den Betrachtungszeitraum angenommen.

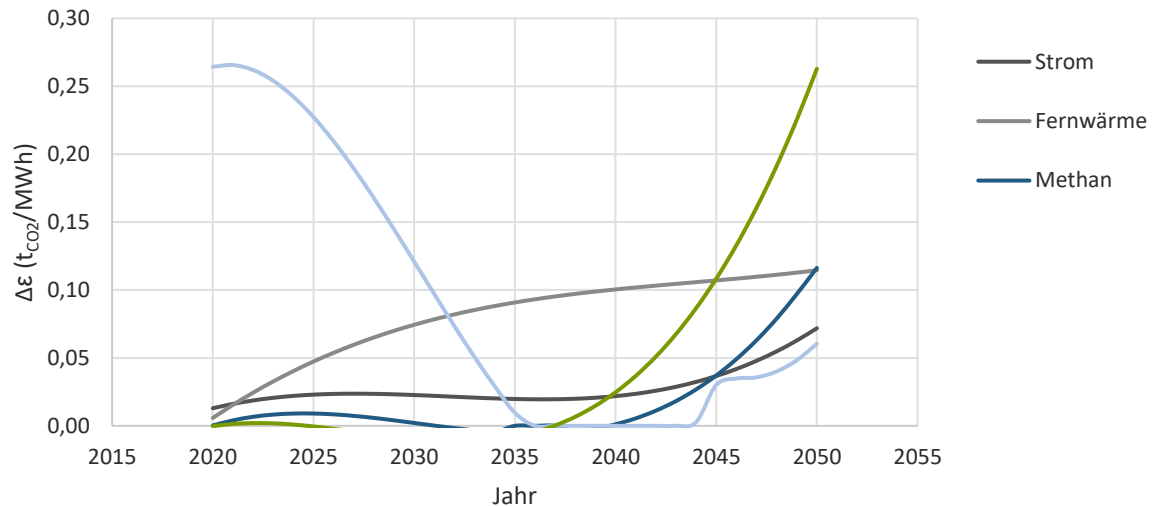


Abbildung 2-7: Abweichung der Emissionsfaktoren der Szenarien „Start“ und „fuEL“ $\Delta\varepsilon_{n,m}$ zur Abschätzung von Unsicherheiten der THG-Minderungspotenziale durch die zeitabhängige Entwicklung der Emissionsfaktoren.

Die Bewertung einer Technologie verwendet anschließend die geschätzten jährlichen Energieeinsparungen und die Emissionsfaktoren, um die verminderten Emissionen zu ermitteln. Für das Beispiel der technischen Nanokatalysatoren wird dies in Abbildung 2-8 dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass ein besonders hohes Emissionseinsparpotenzial zwischen 2030 bis 2040 vorliegt. Dieser Effekt basiert auf den realisierten Endenergieeinsparungen, den genutzten Endenergieträgern und dessen Emissionsfaktoren. Dabei ist ersichtlich, dass aufgrund der zeitlich veränderlichen Emissionsfaktoren ab 2040 eine hohe Unsicherheit bezüglich der realisierbaren THG-Emissionen besteht. Dabei wäre auch eine fehlende Emissionseinsparung ab 2045 möglich. Sollten durch den Einsatz einer Effizienztechnik prozessbedingte Emissionsminderungen auftreten, werden diese bei der Bestimmung der jährlichen THG-Minderung berücksichtigt.

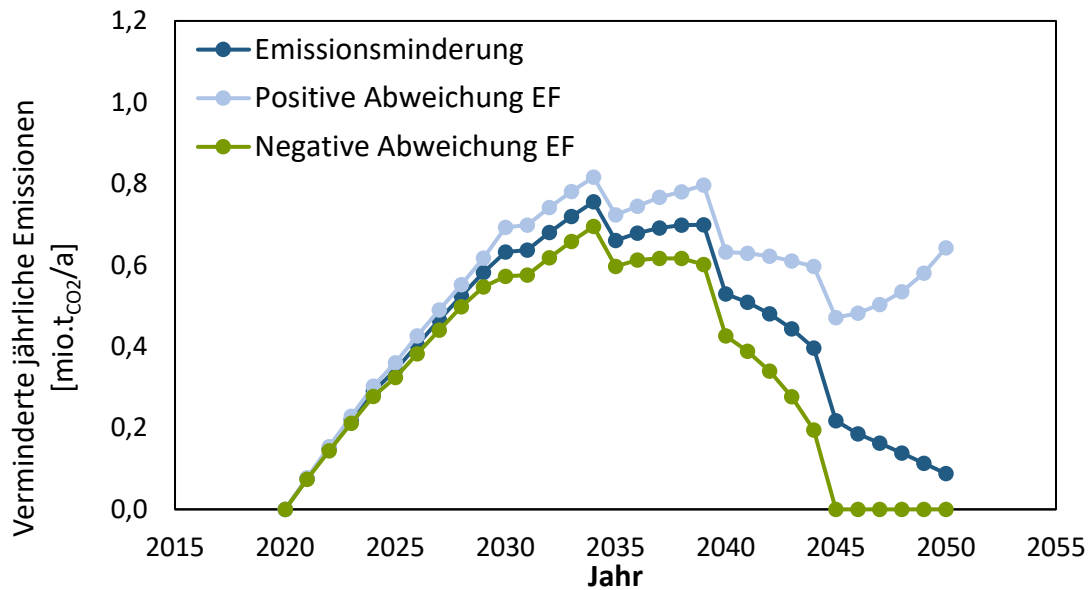


Abbildung 2-8: Verminderte jährliche Emissionen durch den Einsatz technischer Nanokatalysatoren, Blau: Emissionsminderung, Hellblau: Emissionsminderung mit positiver Abweichung der Emissionsfaktoren, Grün: Emissionsminderung mit negativer Abweichung der Emissionsfaktoren.

Anschließend erfolgte eine Kumulierung der jährlichen Emissionen. Die daraus resultierende Darstellung für den Einsatz technischer Nanokatalysatoren ist in Abbildung 2-9 dargestellt.

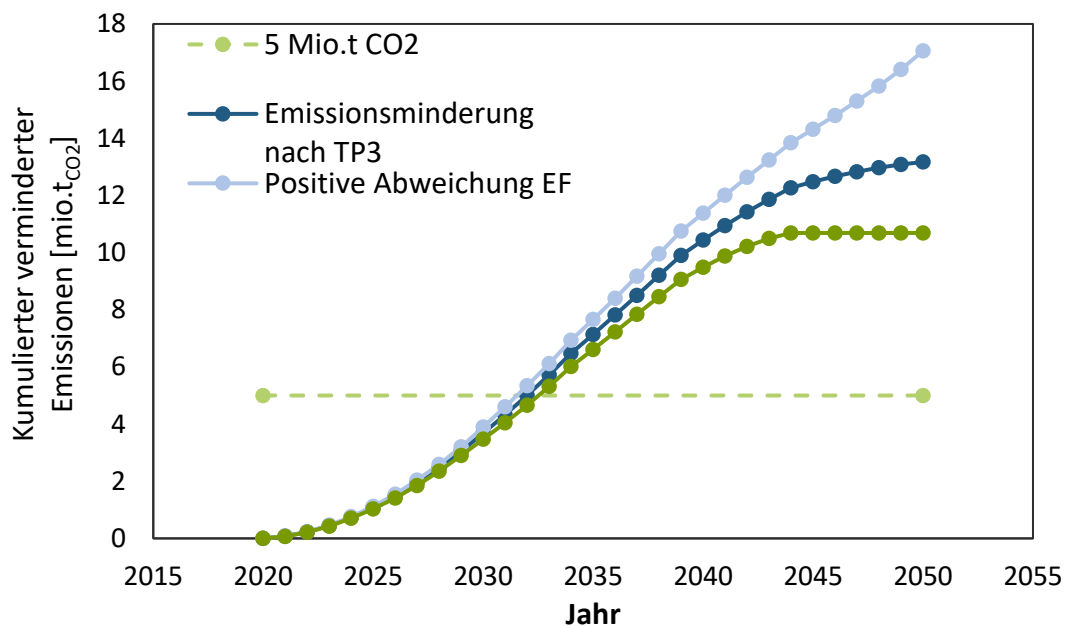


Abbildung 2-9: Kumulierte verminderte Emissionen durch den Einsatz technischer Nanokatalysatoren, Blau: Emissionsminderung, Hellblau: Emissionsminderung mit positiver Abweichung der Emissionsfaktoren, Grün: Emissionsminderung mit negativer Abweichung der Emissionsfaktoren, Hellgrün: Kennzeichnung der Einsparung von 5 mio.t CO₂-äq.

In der kumulierten Darstellung kann hierbei die mögliche Gesamtmenge des verminderten THG-Ausstoßes ermittelt werden. Gleichzeitig können die Unsicherheiten der THG-Faktoren berücksichtigt werden. Die kumulierte Gesamtmenge kann dabei in den Kontext des abgeschätzten gesamtgesellschaftlichen CO₂-Budgets von 6700 mio.t.CO₂-äq. bis 2050 gesetzt werden, welches eine 67%ige Wahrscheinlichkeit

zum Erreichen einer mittleren Temperaturerhöhung von 1,75 °C [14] bedeutet. Die in Abbildung 2-10 eingezeichnete THG-Minderung von 5 Mio.t CO₂-äq. Kann dabei zur zeitlichen Abschätzung der Klimawirksamkeit einer Technologie herangezogen werden. Hierbei indiziert eine möglichst frühe Erreichung dieser THG-Einsparung einen schnell zu realisierenden Beitrag einer Technik zur Reduzierung der industriellen THG-Emissionen. Die Darstellung dieses Kriteriums zum Vergleich verschiedener Technologien kann nach Abbildung 2-10 erfolgen.

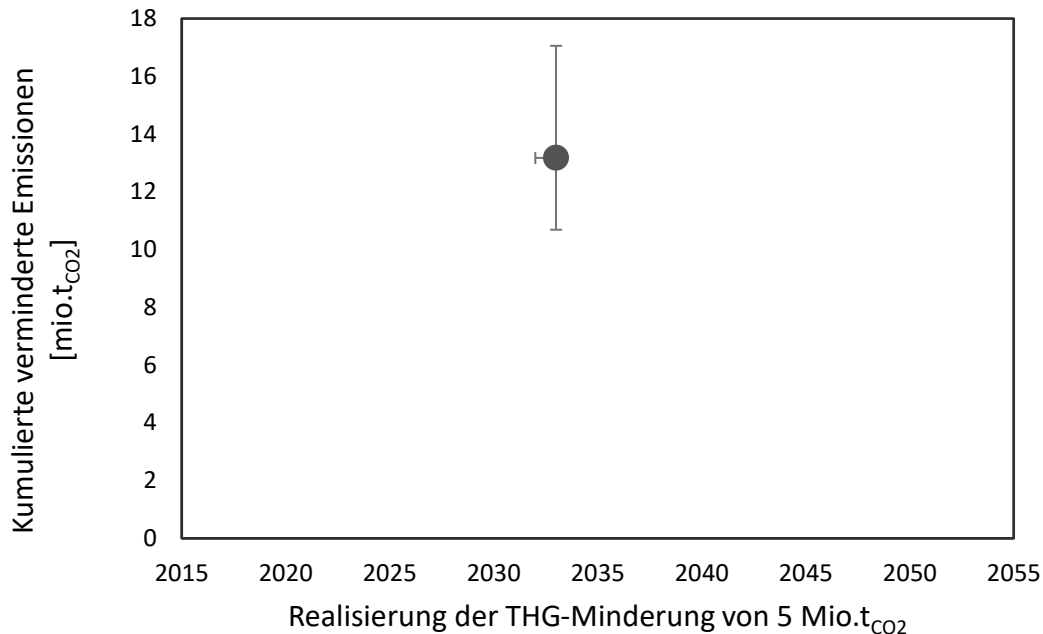


Abbildung 2-10: Auftragung der kumulierten verminderten Emissionen von 2020 bis 2050 über dem Jahr, in welchem eine kumulierte Emissionseinsparung von 5 mio.t CO₂-äq. erwartet wird.

Risikoperspektiven der Portfolio-Darstellung

Bei den Betrachtungsperspektiven zu Risiken für die Forschungs- und Entwicklungsphase und die Diffusionsphase einer Energieeffizienz-Technik wird eine eindeutige Ausrichtung der Kategorien bezüglich einer entwicklungspezifischen Fragestellung vorgesehen. Die Risikoperspektiven, deren charakteristische Fragestellungen und Teilaspekte werden tabellarisch aufgeführt. Dabei erfolgen Betrachtungen der F&E-Risiken und der Risiken der Markteinführung und -diffusion.

Für jeden Teilaspekt wird ein qualitativer Risikodeskriptor D_R abgeleitet ($D_R = 1 \rightarrow$ kein Risiko und $D_R = 5 \rightarrow$ sehr hohes Risiko). Die Einzelrisiken werden summiert und die zwei höchsten Risiken getrennt ausgewiesen. Die Risiko-Summe $\sum D_R$ wird anschließend in eine Portfoliodarstellung überführt und interpretiert. Die Teilaspekte bezüglich der spezifischen Fragestellungen werden Abschnitt 2.10 genauer aufgeführt, weswegen an dieser Stelle auf eine ausführliche Darstellung verzichtet wird.

2.2. Trends und Megatrends in der Industrie

Für die Trends und Megatrends in der Industrie wurde eine umfangreiche Analyse durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse werden hier kurz zusammengefasst. Das vollständige White Paper befindet sich im Anhang. Da die Inhalte zu Beginn des Projekts erarbeitet wurden, konnten etwaige Implikationen der die COVID-19 Pandemie nicht berücksichtigt werden.

Um dauerhaft wirtschaftlich erfolgreich zu sein, müssen Unternehmen sich kontinuierlich an Entwicklungen am Markt und der Umwelt anpassen. Dies gilt insbesondere für sogenannte Megatrends das sind globale, längerfristige Entwicklungen mit hohen Eintrittswahrscheinlichkeiten und nachhaltigen Auswirkungen [15].

Im Rahmen einer Meta-Analyse wurden verschiedene Studien zu Trends und Megatrends analysiert und hinsichtlich der Häufigkeit der Nennung und der Relevanz für die sieben Forschungsfelder bewertet (vgl. Abbildung 2-1). Die ausgewerteten Studien wurden durch eine intensive bibliometrische Analyse identifiziert.

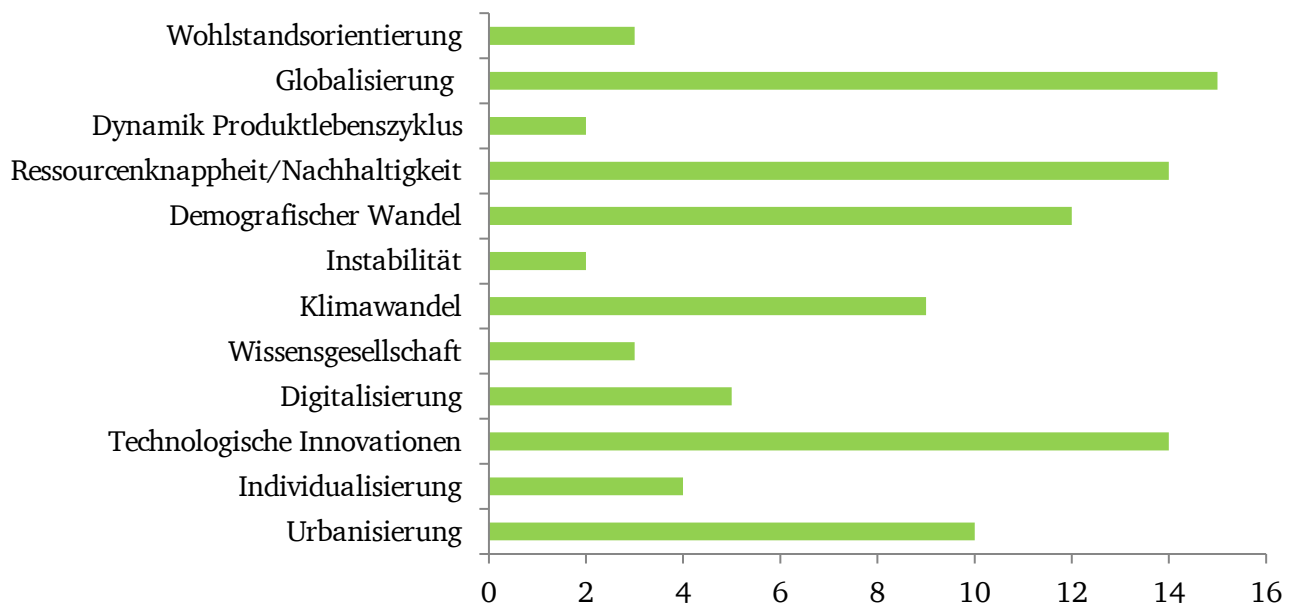


Abbildung 2-11: Häufigkeit der Nennung identifizierter Megatrends

Neben den dargestellten Megatrends und deren Implikationen auf die betrachteten Forschungsfelder wurden zudem forschungsfeldspezifische Trends ermittelt. Eine Übersicht der betrachteten Themen kann Tabelle 2-3 entnommen werden.

Tabelle 2-3: Je Forschungsfeld betrachtete Megatrends und Trends

	Fertigungstechnik	Chemische Verfahrenstechnik	Eisen und Stahl
Betrachtete Megatrends und forschungsfeldspezifische Trends	<ul style="list-style-type: none"> • Globalisierung • Demografie • Urbanisierung • Klimawandel • Ressourcenknappheit/ Nachhaltige Ressourcennutzung • Individualisierung • Digitalisierung • Kältetechnik • Kunststoffproduktion und -recycling • Additive Fertigung • Trocknung 	<ul style="list-style-type: none"> • Digitalisierung • Modularisierung • Prozessintensivierung • Zirkuläre Wirtschaft 	<ul style="list-style-type: none"> • Marktdominanz Chinas und weltweite Überkapazitäten • Preise für Produktionsfaktoren und Produkte

2.3. Forschungsfeld Fertigungstechnik

Die Fertigungstechnik ist ein Teilgebiet der industriellen Produktionstechnik. Der Begriff der Produktion umfasst die gesamte Auftragsabwicklung von der technischen Angebotsbearbeitung über die Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Fertigung, Montage sowie die Materialwirtschaft und das Qualitätsmanagement. [16] Während sich die Produktionstechnik mit Fragen der Formgebung von Material bei möglichst geringem Materialverlust, Energieeinsatz und Umweltbelastung beschäftigt und gleichzeitig auch die Bereiche der Handhabung, des Transports und der Lagerung enthält, umfasst das Teilgebiet der Fertigungstechnik vor allem die materiell-technischen Elemente des Fertigungsprozesses [17]. Die Herstellung erfolgt mittels genauer Vorgaben (Abmessungen, Maßtoleranzen, Festigkeitskennwerte, Oberflächenbeschaffenheit, u.v.m.) und Konstruktionsunterlagen (wie beispielsweise Zeichnungen oder anderen Informationsträgern) [18]. Zur Realisierung der Vorhaben kann auf eine Vielzahl von unterschiedlichen Fertigungsverfahren zurückgegriffen werden. Diese sind nach DIN 8580 aufgrund der Vielzahl systematisiert [19]. Die Auswahl eines Fertigungsverfahrens kann nach den Kriterien der Wirtschaftlichkeit, Produktivität, Flexibilität, Prozesssicherheit, Qualität, Umweltverträglichkeit und des Arbeitsschutzes erfolgen. Da die Fertigungstechnik nicht genauer definiert ist, findet im Rahmen des Projekts EE4InG die Abgrenzung der Fertigungstechnik anhand der Klassifikation der Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes nach dem statistischen Bundesamt statt, die nachfolgend nochmal aufgeführt sind [1].

Tabelle 2-4: Der Fertigungstechnik zugeordnete Wirtschaftszweige [1]

Klasse	Bezeichnung
16	Holz, Holz-, Kork-, Flecht- u. Korbwaren (ohne Möbel)
22	Gummi- u. Kunststoffwaren
25	Metallerzeugnisse
26	DV-geräte, elektronische u. optische Erzeugnisse
27	Elektrische Ausrüstung
28	Maschinen
29	Kraftwagen u. Kraftwagenteile
30	Sonstige Fahrzeuge
33	Reparatur, Instandhaltung u. Installation v. Maschinen und Ausrüstung

2.3.1. Technologiefeldübergreifende Hemmnisse und Engpässe im Forschungsfeld

Die die Fertigungstechnik betreffenden Hemmnisse sind sehr vielfältig. Dies liegt zum einen an den vielfältigen Technologien, die sich in den diversen Wirtschaftszweigen wiederfinden, die der Fertigungstechnik zugeordnet werden (vgl. Tabelle 2-4). Zum anderen liegt dies aber auch an der Vielzahl, insbesondere kleiner Unternehmen in der Fertigungstechnik. Die Verteilung ist in Abbildung 2-12 dargestellt.

Diese Diversität hat zur Folge, dass sich in verschiedenen Technologien bzw. Technologiefeldern Potenziale zur Energieeinsparung durch Forschung ergeben, aber dafür auch Forschung in vielen Technologiefeldern notwendig ist. Außerdem gestaltet sich auch der Austausch von Know-How in Bezug auf übergreifende Effizienzpotenziale als Herausforderung in der Fertigungstechnik.

Anzahl der Unternehmen in der Fertigungstechnik (2016)

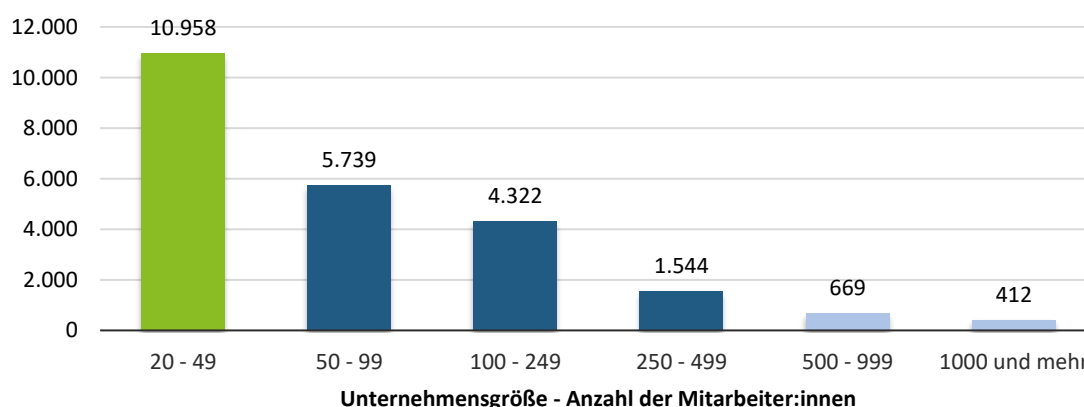


Abbildung 2-12: Anzahl der Unternehmen in der Fertigungstechnik 2016 [3]

Das branchenspezifische Know-How in der Fertigungstechnik ist grundsätzlich abhängig von der betrachteten Technologie. In der Additiven Fertigung beispielsweise dominieren aktuell Aspekte wie eine Steigerung der Fertigungsqualität und die Verkürzung der Fertigungsdauer aus wirtschaftlichen Gründen die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Eine Betrachtung des Energiebedarfs oder der Umweltauswirkungen ist aktuell im industriellen Kontext kaum relevant [20].

In der Kunststoffbranche sind Prozessverbesserungen, auch hinsichtlich der Energieeffizienz, bereits deutlich weiter vorangeschritten. Dennoch liegt aufgrund des niedrigen Anteils der Energiekosten an den Gesamtkosten eines kunststoffverarbeitenden Unternehmens auch hier (noch) kein Fokus auf der Reduktion des Energiebedarfs. Dies liegt zum Teil auch daran, dass Potenziale verschiedener Effizienzmaßnahmen wie bspw. eine Rückgewinnung der Abwärme des Prozesses aktuell in der Industrie nicht bekannt sind bzw. deren Potenziale unterschätzt werden. Dies ergab sich aus Gesprächen mit führenden Maschinenherstellern auf der K-Messe (Branchenleitmesse für die Kunststoffindustrie) im Oktober 2019, die im Rahmen von EE4InG besucht wurde.

Auf die branchenspezifischen Hemmnisse wird in den jeweiligen Abschnitten bzw. in den Analysen im Anhang näher eingegangen.

2.3.2. Betrachtete Technologien im Forschungsfeld Fertigungstechnik

Auf Basis erster Expertengespräche innerhalb des Kuratoriums Fertigungstechnik sowie des Workshops des Projekt-Kick-Offs wurden die in Tabelle 2-5 dargestellten Themen als relevant für das Forschungsfeld Fertigungstechnik im Rahmen des EE4InG Projektes erachtet und näher bearbeitet.

Tabelle 2-5: Betrachtete Technologien im Forschungsfeld Fertigungstechnik

Technik	Bearbeitet als
Additive Fertigung	Eduard-Analyse
Trocknung	Eduard-Analyse
Kunststofftechnik	Eduard-Analyse
Pumpen und Systeme	Quick-Scan
Reifenherstellung	Quick-Scan
Batteriezellenfertigung	Eduard-Analyse*
Kühl- und Kältetechnik	Eduard-Analyse + Quick-Scan
Moderne Produktionsinfrastruktur	Eduard-Analyse
Raumlufttechnik	Quick-Scan
Leichtbau	Eduard-Analyse
Vakuumanwendungen	Quick-Scan
Elektrische Antriebssysteme	Quick-Scan
Gleichstromnetze	Quick-Scan

2.3.3. Additive Fertigung

Für die Additive Fertigung (abgekürzt AM für engl. Additive Manufacturing) wurde eine umfangliche Analyse durchgeführt, welche sich mit ihren ausgearbeiteten Kapiteln an der EDUAR&D-Analyse orientiert. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Die vollständige Analyse befindet sich im Anhang.

Die Additive Fertigung basiert auf dem Prinzip des schichtweisen Aufbaus von Bauteilen durch das Verbinden von Material, wobei sich in der durchgeführten Analyse aufgrund des hohen Potenzials in der Industrie auf metallpulverbasierte Verfahren fokussiert wurde. Neben dem eigentlichen Aufschmelzen und Zusammenfügen des Pulvers während des Fertigungsprozesses selbst ist auch der Prozess der Pulverherstellung im Rahmen der Additiven Fertigung von (energetischer) Bedeutung. Auch dafür können verschiedene Verfahren zum Einsatz kommen, die in der Analyse näher ausgeführt wurden.

Marktkontexturierung

Die Additive Fertigung findet weltweit in verschiedenen Branchen Anwendung und gewann in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung, was sich auch an der Wachstumsrate von knapp 25% erkennen lässt. Die Regionen, in denen am meisten AM-Systeme installiert werden, sind Nordamerika (37,7 %), Asien/Pazifik (29,7 %) und Europa (28,2 %). Deutschland liegt dabei mit 8,4 % der installierten AM-Systeme auf Platz 4, hinter den USA, China und Japan. [21]

Je nach Gestalt und Anforderungen an das Endprodukt lassen sich höhere Effizienzen mit der additiven oder der subtraktiven Fertigung erzielen. Die Additive Fertigung kann dort Vorteile bieten, wo individualisierte, komplexe Teile in geringer Stückzahl gefordert sind. Anwendung findet die Additive Fertigung aus diesem Grund in der Luft- und Raumfahrt, in der Elektronikindustrie und in der Automobilindustrie. [22]

Energetische und -wirtschaftliche Bewertung

Bei der Pulverherstellung werden hohe Temperaturen benötigt, die zum einen von der Schmelztemperatur des jeweiligen Werkstoffs und zum anderen von der gewünschten Partikelgröße abhängen. Wie hoch der Anteil der Pulverherstellung am gesamten Fertigungsprozess ist, lässt sich dabei nicht pauschal abschätzen. Von Relevanz ist auch der hohe Ausschussanteil bei der Herstellung des Pulvers aufgrund unterschiedlicher Partikelgrößen, die im Pulverfertigungsprozess entstehen.

Bei der Fertigung selbst schwanken die Werte für den spezifischen Energiebedarf zwischen 13,98 kWh/kg und 2141,39 kWh/kg, je nach verwendetem Fertigungsverfahren. [23] Beim direkten Vergleich der Fertigung eines Beispiel-Bauteils, einmal additiv und einmal subtraktiv, ergab sich ein fast 8-mal so hoher Energiebedarf bei der Additiven Fertigung. Im untersuchten Fallbeispiel entfiel dabei der größte Energieanteil auf die Kühlung, die notwendig ist, da der Laser eine hohe Wärmeentwicklung hat. Die Kühlung ist im Gegensatz zum Laser, der auf Platz zwei der Energieverbraucher liegt, nicht von der Bauteilgeometrie oder der Bauraumauslastung abhängig und ist somit ein fixes Element, das nur von der eingesetzten Maschine abhängig ist. [24] Für die Nachbearbeitung fällt ein zusätzlicher Energiebedarf an, der abhängig von den jeweiligen Nachbearbeitungsschritten und den Bauteilanforderungen ist.

Wie bereits bei den einzelnen Phasen der Additiven Fertigung, lässt sich auch der Gesamtenergiebedarf der Additiven Fertigung in Deutschland schwer verlässlich ermitteln. Einen konkreten Wirtschaftszweig, anhand dessen mit Hilfe der Kostenstruktur des verarbeitenden Gewerbes [2] der Endenergiebedarf abgeschätzt werden kann, gibt es nicht. Aus diesem Grund wurden in Gesprächen mit Expert:innen Annahmen diskutiert, die eine Abschätzung ermöglichen.

Technologiezyklusanalyse

Wie beschrieben, kann die Additive Fertigung in unterschiedliche Technologien unterteilt werden, die sich jeweils in einem anderen Entwicklungsstadium befinden. Demzufolge muss auch die Einteilung in den Technologiezyklus differenziert erfolgen. Basierend auf [25] befand sich die Technologie des pulverbettbasierten Schmelzens im Jahr 2018 auf dem Weg in die Phase der Ernüchterung.

Um die Bedeutung der Technologie genauer zu analysieren, wurden im Projekt Patente analysiert. Die Anzahl der erteilten Patente für die Additive Fertigung insgesamt hat ab dem Jahr 2014 einen starken Anstieg erfahren, während die Zahl der Patentanmeldungen bereits ab 2013 stark gewachsen ist [21]. Im Ländervergleich liegen Deutschland (69) und die USA (59) deutlich vorn [26]. Die Anzahl der Veröffentlichungen ist ebenso wie die Zahl der Patente in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen, die meisten Veröffentlichungen stammen jedoch aus China (24%), gefolgt von den USA (16%) [27].

Innovationssystem-Analyse

Im Innovationssystem spielen Pulverhersteller, Hersteller der Additiven Fertigungsmaschinen, Softwarehersteller für CAD und Simulation, Topologieoptimierer, Forschung und Wissenschaft, Institutionen zur Bereitstellung von Standards in dem Bereich sowie Anwender eine wichtige Rolle. Eine Auflistung von Akteuren in den jeweiligen Bereichen ist in der Analyse zu finden.

Mögliche Entwicklungsziele und Hemmnisse

Die Additive Fertigung ist eine recht neue Technologie und noch nicht „ausgereift“, wie es bei anderen Themen und Technologien im Projekt der Fall ist. Es gibt deswegen einige Entwicklungsziele, die zur Optimierung der Innovationstechnologie verfolgt werden sollten. Aus technischer Sicht besteht Bedarf an der Optimierung und Weiterentwicklung der eingesetzten Materialien, der AM-Anlagen und deren Prozessparameter sowie dem Bauteildesign. Dazu gehört die Entwicklung neuer Materialien und einer Materialdatenbank zur Darstellung der jeweiligen Eigenschaften von Materialien und die Prüfung der energetischen Verbesserung in der Pulverherstellung, beispielsweise durch Abwärmennutzung.

Aber auch die Fertigungsanlagen selbst und deren Prozessparameter bieten viele Potenziale zur Optimierung aus energetischer Sicht. Ein Faktor, der aufgrund des hohen Energiebedarfs einer Weiterentwicklung bedarf, ist die Laser-Anlage. Beispielsweise durch den Einsatz einer 4-Laser-Anlage wird die Belichtungsdauer auf ein Viertel reduziert. Die gesamte Bauzeit kann reduziert werden, wenn die Schichtdicke erhöht wird. Dies geht aktuell noch meist mit einer verschlechterten Qualität einher, weswegen hier ein guter Kompromiss gefunden und gleichzeitig weiter an der Qualitätssteigerung bei größeren Schichtdicken gearbeitet werden sollte. Ein weiterer Ansatz liegt in der Nutzung der Abwärme des Kühlsystems, um die Bauplattform zu heizen. Allgemein kann an alternativen Kühlsystemen gearbeitet werden, da die Kühlung den größten Anteil am Energieverbrauch hat und eine Effizienzsteigerung hier besonders aussichtsreich erscheint.

Trotz der vielen Vorteile, die die Additive Fertigung bietet, gibt es einige Hemmnisse, die in Zukunft überwunden werden müssen. Dazu gehört beispielsweise die grundsätzliche Änderung des Konstruktionsprozesses für additive Bauteile oder die generelle untergeordnete Rolle des Energiebedarfs in der Additiven Fertigung aufgrund anderer technischer Herausforderungen.

Empfehlungen und mögliche Policy-Maßnahmen

Im Rahmen der Analyse wurde für die Additive Fertigung ein Fachgespräch organisiert, aus dem mögliche Maßnahmen hervorgingen. Grundsätzlich können sich diese in die Optimierung des Fertigungsprozesses, die Optimierung der Pulverherstellung, die Entwicklung neuer Werkstoffverbunde und die ganzheitliche Bilanzierung der Additiven Fertigung unterteilen.

Die Gesamtenergieeinsparungen für die Empfehlungen sind in Abbildung 2-13 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Abschätzungen auf vielen Annahmen beruhen und als grobe Richtwerte betrachtet werden sollten. Sobald abschätzbar, sollte zudem das Potenzial der Empfehlung zum Thema der ganzheitlichen Bilanzierung der Additiven Fertigung ergänzt werden. Diese ist aktuell aufgrund der nicht möglichen Abschätzung nicht enthalten.

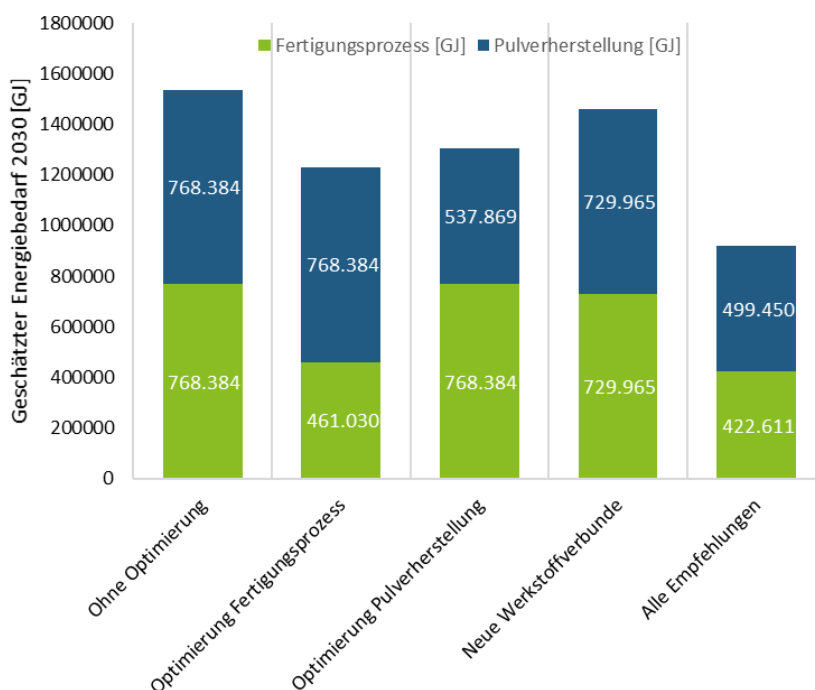


Abbildung 2-13: Abschätzung des Energiebedarfs 2030 für verschiedene Szenarien

2.3.4. Trocknung

Für die Trocknung wurde eine umfangreiche Analyse durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Die vollständige Analyse befindet sich im Anhang.

Einführung

Die Einsatzgebiete industrieller Trocknung sind vielfältig. Diese wird z. B. eingesetzt, um Qualitätseigenschaften der Trocknungsgüter zu verbessern oder zu erhalten, deren Transportierbarkeit oder Verwendbarkeit zu ermöglichen oder deren Haltbarkeit zu verlängern. Trocknungsprozesse spielen auch energetisch eine erhebliche Rolle bei Prozesswärmeanwendungen unter 200 °C. Hier gehören insbesondere die Herstellung und Bearbeitung von Holz, Papier und Lebensmitteln zu den energieintensiven Branchen im Bereich der Trocknung. Die Trocknung kann grundsätzlich durch drei verschiedene Prinzipien durchgeführt werden – thermisch, mechanisch oder sorptiv. Je nach Trocknerbauart sind verschiedene Energieverbraucher in der Trocknungsanlage zu berücksichtigen. In allen Fällen ist aber die Beheizung, die oft brennstoffbasiert ist, der größte Energieverbraucher. [28]

Marktkontexturierung und Energiebedarf

Die Anforderungen an den Trocknungsprozess werden unter anderem durch den Trocknungsgrund definiert. Gründe zur Trocknung sind z. B. die Erhöhung der Lebensdauer und Erhaltung von Qualitätseigenschaften des Trocknungsguts [28]. Analog zur Vielfalt der Trocknungsgründe findet sich auch eine Vielfalt in der Form des Trocknungsguts. Am häufigsten sind Trocknungsgüter in Form von Schüttgut, Stückgut, Pasten, Schlämmen und Faserstoffen [28]. Vor diesem Hintergrund wird die Trocknung als Querschnittsprozess betrachtet.

Auch aus einer energetischen Perspektive spielt die Trocknung eine signifikante Rolle in der deutschen Industrie, da ein Hauptteil der bis 200 °C eingesetzten Prozesswärme für Trocknungsprozesse verbraucht wird [29]. Energieverbraucher sind vor allem in den Branchen der Lebensmittelindustrie, Papierherstellung und Druckerei, Holzverarbeitung, Lacken, Gummi- und Kunststoffwaren sowie Chemie und Keramik zu finden [28].

Zur Einordnung in die Energielandschaft dient ein Blick auf Endenergieverbräuche der deutschen Industrie und die Rolle der Prozesswärme. Dabei stellt die Prozesswärme mit 67 % bzw. 1.794,5 PJ einen der höchsten Endenergieverbräuche dar [30]. Besonders bei Temperaturniveaus unter 150 °C spielen Trocknungsprozesse eine Rolle [31], wobei diese mit einem geschätzten jährlichen Energiebedarf von 200 PJ rund 60 % dieses Temperaturbereichs abbilden [28], [29]

Einsparpotenzial

Nach einer Studie wird das technische Energieeinsparpotenzial für Trocknungsprozesse in Industrie und Gewerbe in Deutschland auf 14 % geschätzt (Prognos 2007). Durchschnittlich bieten Energieeffizienzmaßnahmen ein Energieeinsparpotenzial von ca. 20 %. So wird der Umsetzung einer einzigen Energieeffizienzmaßnahme an jeder deutschen Trocknungsanlage insgesamt ein Energieeinsparpotenzial von ca. 47 PJ/a zugeschrieben. [28], [32], [33]

Zur energetischen Optimierung der Trocknung wurden Maßnahmen und Potenziale identifiziert, die teilweise schon breite Anwendung in industriellen Trocknungsanlagen finden, sich teilweise aber auch noch in der Testphase befinden. Eine Auswahl technischer Maßnahmen wird in Tabelle 2-6 zusammengefasst.

Tabelle 2-6: Sammlung technischer Energieeffizienzmaßnahmen und deren Energieeinsparpotenziale bezogen auf den Gesamtenergiebedarf der Trocknungsanlage

Kategorie	Maßnahme	Einsparpotenzial	Quelle
Anlagentechnik	Prozessinterne oder -übergreifende Abwärmenutzung ggf. mit Wärmepumpe	15 – 80 % ¹	[34], [35]
	Dämmung	8 – 23 % ¹	[34]
Beheizung	Direkte Beheizung	35 – 45 % ²	[28]
	Dampftrocknung	50 %	[28]
	Prozessparameter (produktspezifisch) optimieren	10 – 30 %	[36], [37]
	Feuchteregelung	5 %	[28]
	Abschaltung in Nichtnutzungszeiten	3 %	[32]
Trocknungs-technologie	Vakuumtrocknung	70 – 80 %	[37], [38]
	Strahlungstrocknung	20 – 50 %	[32], [37]
	Induktionstrocknung	75 %	[32]
	Mikrowellentrocknung	20 – 90 %	[28], [32], [37]
	Sorptionstrocknung	50 %	[28]
Vorprozesse	Mechanische Vorentfeuchtung	56 %	[28], [32]

Hemmnisse

Im Fachgespräch [35] sowie in der Literatur wurden ökonomische, organisatorische und technische Hemmnisse identifiziert. Für eine Aufschlüsselung der maßnahmenbezogenen technischen Hemmnisse wird auf die entsprechende EDUAR&D-Analyse im Anhang verwiesen.

Durch einen Fokus auf Investitionskosten und Amortisationszeiten statt auf dem Einsparpotenzial entlang des System-Lebenszyklus wird system- und technologieübergreifend die Akzeptanz von Umbaumaßnahmen zur Effizienzsteigerung erschwert. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn zudem Entscheidungen über Betriebskosten und Investitionen nicht in derselben Hand liegen oder unklar ist, inwiefern energieeffiziente Anlagen einen Wettbewerbsvorteil bringen. Zur Schaffung von Anreizen für Energieeffizienz und -flexibilität fehlt es einerseits an Optimierungsdruck durch CO₂- und Energiepreise bzw. Regulatorik (z. B. im Bereich der Abwärme). Andererseits ist die Flexibilisierung größerer Lasten und die

¹ Energieeffizienzmaßnahme an einer Bauteilreinigungsanlage (Einkammeranlage) mit integrierter Trocknung. Energieeinsparpotenzial bezieht sich auf Gesamtenergiebedarf der Anlage.

² Einsparpotenzial bezieht sich auf den Brennstoffverbrauch einer Trocknungsanlage.

Teilnahme an Regelleistungsmärkten insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen oft schwierig oder nicht rentabel.

Neben dem Energiebedarf werden die CO₂-Emissionen durch den verwendeten Energieträger bestimmt. Jedoch liegt im Bereich der Trocknung oft der Fokus mehr auf der Verfahrenstechnik, während der Energieträger nicht als Bestandteil des betrachteten Systems angesehen wird. Zudem werden Trocknungsprozesse in vielen Bereichen nicht als wertschöpfendes Verfahren betrachtet, wodurch es an Motivation zur Entwicklung von Kernkompetenzen in der Trocknung oder deren Optimierung mangelt.

Forschungsempfehlung

Hinsichtlich Trocknungstechnologien lassen sich nicht-thermische Trocknungsverfahren (z. B. Sorptionstrocknung) mit signifikantem Einsparpotenzial sowie rein elektrische Beheizung zum potenziellen Einsatz mit erneuerbarer Energie als energetisch vielversprechende Richtungen identifizieren.

Die Frage der Abwärme soll jedoch weiterhin thematisiert und Ansätze zur Identifikation von Abwärmepotenzialen und Umsetzung prozessinterner und -übergreifender Abwärmennutzung erarbeitet werden. Zur Steigerung des Abwärmennutzungsgrads kann ferner der Einsatz von Wärmepumpentechnologien signifikante Potenziale bieten, welche hinsichtlich Integrierbarkeit und erreichbarer Temperaturen jedoch weiterentwickelt werden müssen.

Ferner sollen Ansätze zur Steigerung der Transparenz im Trocknungsprozess bzw. im (Ziel-) Trocknungsgrad weitere Optimierungspotenziale aufdecken, weshalb die Entwicklung von übertragbaren Technologien zur Prozessüberwachung notwendig ist. In Kombination mit einer messbaren Definition des Ziel-trocknungsgrads kann eine Weiterentwicklung in Richtung einer Prozessregelung für energieeffiziente produktspezifische Prozesse ermöglicht werden.

Neben empfohlenen F&E-Aktivitäten sollen ökonomische Randbedingungen potenziell in effektive politische Werkzeuge ausgedehnt werden, die möglicherweise einen Market-Pull zur Weiterentwicklung des Trocknungsprozesses bewirken.

THG-Minderungspotenzial

Da zur Trocknung am häufigsten Erdgas, aber teilweise auch Strom, Fernwärme oder erneuerbare Energien eingesetzt werden, ergibt sich mit den vom Projektpartner IREES jeweils abgeschätzten Emissionsfaktoren ein THG-Minderungspotenzial von 2,18 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2030 und 0,75 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2050. Es ergeben sich kumulierte verminderte THG-Emissionen von 26,24 Mio. t CO₂-äq. für den Zeitraum von 2025 bis 2050.

2.3.5. Kunststoffverarbeitung

Für die Kunststoffverarbeitung wurde eine umfangreiche EDUAR&D-Analyse durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Die vollständige Analyse befindet sich im Anhang.

Energiebedarf in der Kunststoffverarbeitung: Zur Beurteilung der Energieintensität der betrachteten Technologien in der Kunststoffverarbeitung wurden die Ergebnisse aus vier Umfragen zugrunde gelegt. Die Ergebnisse können Abbildung 2-14 entnommen werden.

Zur Abschätzung des Gesamtenergiebedarfs zur Herstellung von Kunststoffwaren wurde die Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes [2] herangezogen (siehe Tabelle 2-7). In dieser

sind für die einzelnen Wirtschaftszweige der Bruttowertschöpfung (BPW) sowie der Energiekostenanteil (EKA) in Prozent am BPW angegeben. Auf dieser Basis lassen sich die Energiekosten der Wirtschaftszweige ermitteln. Mit einer Abschätzung der Energiepreise für Strom (S) und Brennstoffe (BS) auf Basis der Zusammensetzung des Wirtschaftszweiges (siehe Annahmen in Tabelle 2-7) sowie der Abschätzung des Brennstoffanteils (BSA) am Endenergieverbrauch (EEV) von [39] lässt sich der Endenergiebedarf für Strom und Brennstoffe iterativ bestimmen. Damit ergibt sich ein Gesamtendenergiebedarf des Wirtschaftszweiges 22.2 Herstellung von Kunststoffwaren von 58 PJ/a.

Technikzyklusanalyse: Die Techniken Extrusion und Spritzgießen sind im Technikzyklus im Bereich Diffusion mit einem Technologiereifegrad Level von 9 *Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes* einzuordnen.

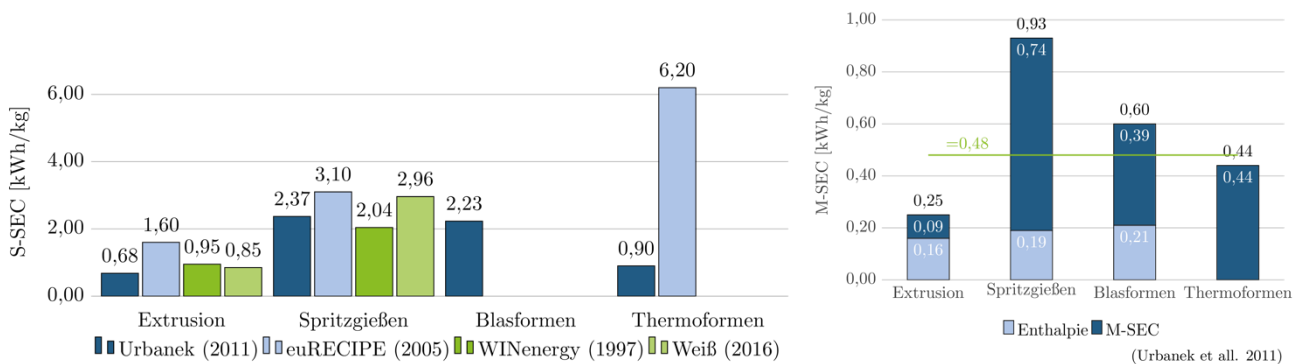


Abbildung 2-14: Energieintensivität der verschiedenen Technologien der Kunststoffverarbeitung.

Tabelle 2-7: Abschätzung des Endenergiebedarfs des Wirtschaftszweiges 22.2 Herstellung von Kunststoffwaren.

Wirtschaftszweig	BPW [1.000€]	EKA [%]	Energiekosten [1.000€]	Preis [€/MWh]		BSA EEV [%]	Endenergie [TJ/a]	
				BS	S		BS	S
22.2 Herstellung von Kunststoffwaren	70.560.668 T€	2,4	1.693.456 T€				22.005	36.367
22.21 Herstellung von Platten, Folien, Schläuchen und Profilen aus Kunststoffen ¹	25.324.620 T€	2,4	607.791 T€	55	140	48	10.482	11.511
22.22 Herstellung von Verpackungsmitteln aus Kunststoffen ²	11.364.223 T€	3	340.927 T€	52	126	20	2.200	8.833
22.23 Herstellung von Baubedarfsartikeln aus Kunststoff ¹	8.495.182 T€	1,2	101.942 T€	53	135	58	2.408	1.773
22.29 Herstellung von sonstigen Kunststoffwaren ¹	25.376.642 T€	2,6	659.793 T€	55	140	33	6.914	14.250

¹ Viele KMU

² Große und mittlere Unternehmen

Innovationssystem-Analyse: Zentrale Akteure sind Kunststoffverarbeiter, Technologie- und Kunststofflieferanten, sowie Wissenschaft und Forschung. Die Politik reguliert einerseits die Rahmenbedingungen und agiert andererseits als Fördermittelgeber für F&E-Vorhaben.

Forschungspotenziale: Die im Folgenden genannten Forschungspotenziale wurden im Rahmen eines Fachgesprächs identifiziert. Die dafür zugrunde gelegten Annahmen können der EDUAR&D-Analyse entnommen werden.

Entwicklung eines Auslegungskatalogs:

Bei der Entwicklung von Kunststoffverarbeitungsmaschinen, des herzustellenden Produktes oder des Verarbeitungsprozesses gilt es, eine Vielzahl von Entscheidungen zu treffen, die mitunter einen erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf haben. Auf Maschinenebene stehen eine Vielzahl von verschiedenen Komponenten zur Auswahl. Im Bereich der Produktentwicklung gilt es sowohl eine Entscheidung über den Kunststoff zu treffen als auch die physische Form des Produktes festzulegen. Auch hier ist der Entscheidungsspielraum meist sehr groß. Bei der Prozessentwicklung muss das Fertigungsverfahren sowie die Prozessparameter festgelegt werden. All diese Entscheidungen können hinsichtlich des Energiebedarfs optimiert werden. Allerdings fehlt in der Industrie zurzeit das Wissen über den Einfluss der einzelnen Größen. Daher muss hier das Ziel sein, Transparenz über den Einfluss der einzelnen Entscheidungsgrößen im Entwicklungsprozess auf Maschinen-, Produkt- und Prozessebene zu schaffen.

Ermitteltes Energieeinsparpotenzial: Das Endenergieeinsparpotenzial eines Auslegungskatalogs wurde auf ca. 30 Prozent abgeschätzt. Dies entspricht einem Endenergiebedarf der Branche von ca. 6,3 PJ pro Jahr für das Jahr 2020. Mit der Annahme, dass für die kunststoffverarbeitende Industrie eine jährliche Wachstumsrate von -1 % bis zum Jahr 2050 angenommen wird, ergibt das eine jährliche Einsparung von 5,7 PJ für das Jahr 2030. Dabei wurde angenommen, dass die ersten Einsparungen aufgrund des Forschungsimpulses im Jahr 2027 erzielt werden können und diese sich bis zum Jahr 2030 kontinuierlich auf den Wert von 5,7 PJ steigern. Volle Diffusion wird ab dem Jahr 2030 angenommen. Aufgrund der angenommenen Wachstumsrate von -1 % pro Jahr der Branche fallen die jährlichen Endenergieeinsparungen kontinuierlich auf einen Wert von 4,7 PJ im Jahr 2050 an. Es ergibt sich ein kumulierter eingesparter Energieeinsatz von 117 PJ bis zum Jahr 2050.

THG-Minderungspotenzial: Es handelt sich beim Einsparpotenzial ausschließlich um Strom, der eingespart werden kann. Mit dem Emissionsfaktor für Strom, der im Projekt vom Partner IREES abgeschätzt wurde, ergibt sich ein THG-Minderungspotenzial von 0,36 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2030 und 0,03 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2050. Es ergeben sich kumulierte verminderte THG-Emissionen von 3,75 Mio. t CO₂-äq. für den Zeitraum von 2025 bis 2050.

Hemmnisse: Es wurden keine merklichen Hemmnisse identifiziert.

Transparenzschaffung und Optimierung der Peripheriesysteme nach Systemansatz:

Ein zentraler Punkt bei der Effizienz-Optimierung in der Industrie ist der Multiplikatoreffekt bei der Auslegung der Peripheriesysteme nach Systemansatz und damit abgestimmt auf den zentralen Produktionsprozess. Zur Gestaltung der peripheren Systeme, hier im Besonderen Kühl- und Kältetechnik sowie Temperiertechnik, bestehen vielfältige Lösungsmöglichkeiten. Deswegen fehlt in der Industrie zurzeit meist das Wissen über eine energieeffiziente Ausführung dieser. Weiterhin ist die Peripherie in der Regel nicht auf den vorliegenden Produktionsprozess abgestimmt.

Ermitteltes Energieeinsparpotenzial: Das Endenergieeinsparpotenzial wurde auf ca. 20 Prozent abgeschätzt. Dies entspricht einem Endenergiebedarf der Branche von ca. 4,2 PJ pro Jahr für das Jahr 2020. Mit der Annahme, dass für die kunststoffverarbeitende Industrie eine jährliche Wachstumsrate von -1 % bis zum Jahr 2050 angenommen wird, ergibt das eine jährliche Einsparung von 3,8 PJ für das Jahr 2030. Dabei wurde angenommen, dass die ersten Einsparungen aufgrund des Forschungsimpulses im Jahr 2027 erzielt werden können und diese sich bis zum Jahr 2030 kontinuierlich auf den Wert von 3,8 PJ steigern. Volle Diffusion wird ab dem Jahr 2030 angenommen. Aufgrund der angenommenen Wachstumsrate von -1 % pro Jahr der Branche fallen die jährlichen Endenergieeinsparungen kontinuierlich auf einen Wert von 3,1 PJ im Jahr 2050 an. Es ergibt sich ein kumulierter eingesparter Energieeinsatz von 78 PJ bis zum Jahr 2050.

THG-Minderungspotenzial: Es handelt sich beim Einsparpotenzial ausschließlich um Strom, der eingespart werden kann. Mit dem Emissionsfaktor für Strom, der im Projekt vom Partner IREES abgeschätzt wurde, ergibt sich ein THG-Minderungspotenzial von 0,24 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2030 und 0,02 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2050. Es ergeben sich kumulierte verminderte THG-Emissionen von 2,5 Mio. t CO₂-äq. für den Zeitraum von 2025 bis 2050.

Hemmnisse: Im Bereich der Werkzeugtemperierung wurde das organisatorische Hemmnis des hohen Kostenfaktors bei Berücksichtigung der Werkzeugtemperierung bereits bei der Konstruktion genannt. Im Bereich der Abwärmenutzung liegen zwei technologische Hemmnisse vor. Zum einen ist die Minimierung der Strahlungs- und Konvektionsverluste bei Materialwechsel mit geringer Verarbeitungstemperatur problematisch. Zum anderen liegt meist ein geringes Temperaturniveau vor, welches eine Weiterverarbeitung der Abwärme nur durch weitere Aufbereitung möglich macht.

Transparenzschaffung und Optimierung der Materialtrocknung:

Zur Gestaltung der Materialvortrocknung bestehen verschiedene technische Möglichkeiten mit verschiedenen Parametern, die eingestellt werden müssen. In der Industrie besteht zurzeit meist nicht das Wissen über eine effiziente Ausführung als auch eine intelligente Regelung dieser Anlagen.

Ermitteltes Energieeinsparpotenzial: Das Endenergieeinsparpotenzial wurde auf ca. 30 Prozent abgeschätzt. Mit der Annahme, dass der Endenergiebedarf der Trocknung im Jahr 2020 4,9 PJ betrug, ergibt sich ein Endenergieeinsparpotenzial von 1,5 PJ für das Jahr 2020. Mit der Annahme, dass die Produktion der Branche jährlich um 1 Prozent sinkt, ergibt sich ein Endenergieeinsparpotenzial von 1,4 PJ für das Jahr 2030. Dabei wurde angenommen, dass die ersten Einsparungen aufgrund des Forschungsimpulses im Jahr 2027 erzielt werden können und diese sich bis zum Jahr 2030 kontinuierlich auf den Wert von 1,4 PJ steigern. Volle Diffusion wird ab dem Jahr 2030 angenommen. Aufgrund der angenommenen Wachstumsrate von -1 % pro Jahr der Branche fallen die jährlichen Endenergieeinsparungen kontinuierlich auf einen Wert von 1,1 PJ im Jahr 2050 an. Es ergibt sich ein kumulierter eingesparter Energieeinsatz von 27,8 PJ bis zum Jahr 2050.

THG-Minderungspotenzial: Es handelt sich beim Einsparpotenzial ausschließlich um Strom, der eingespart werden kann. Mit dem Emissionsfaktor für Strom, der im Projekt vom Partner IREES abgeschätzt wurde, ergibt sich ein THG-Minderungspotenzial von 0,09 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2030 und 0,01 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2050. Es ergeben sich kumulierte verminderte THG-Emissionen von 0,89 Mio. t CO₂-äq. für den Zeitraum von 2025 bis 2050.

Hemmnisse: Es wurden keine merklichen Hemmnisse identifiziert.

Gesamtbewertung der Forschungsimpulse der Kunststoffverarbeitung:

Einsparpotenzial: Das Endenergieeinsparpotenzial im Bereich der Kunststoffverarbeitung wird insgesamt auf ca. 46 Prozent abgeschätzt. Dieses setzt sich aus 30 % Einsparpotenzial im Bereich der Auslegung (bezogen auf M-SEC), 20 % Einsparpotenzial durch Optimierung der Peripherie (bezogen auf M-SEC) sowie 30 % Einsparpotenzial bezüglich der Materialvortrocknung (bezogen auf Materialtrocknung). Mit der Annahme, dass der Endenergiebedarf der Kunststoffproduktion und Materialvortrocknung im Jahr 2020 25,9 PJ betrug und dass die Branche im Jahr um 1 % sinkt, ergibt sich ein Endenergiebedarf der Produktion für das Jahr 2030 von 23,4 PJ und ein Endenergie-Einsparpotenzial von 10,9 PJ. Dabei wurde angenommen, dass die ersten Einsparungen aufgrund der Forschungsimpulse im Jahr 2027 erzielt werden können und diese sich bis zum Jahr 2030 kontinuierlich auf den Wert von 10,9 PJ steigern. Volle Diffusion wird ab dem Jahr 2030 angenommen. Aufgrund der angenommenen Wachstumsrate von -1 % pro Jahr der Branche sinken die jährlichen Endenergieeinsparungen kontinuierlich auf einen Wert von 8,9 PJ im Jahr 2050 an. Es ergibt sich ein kumulierter eingesparter Energieeinsatz von 222,77 PJ bis zum Jahr 2050. Der Verlauf der jährlichen Endenergieeinsparung sowie der kumulierten eingesparten Endenergie ist in Abbildung 2-15 zu sehen.

THG-Minderungspotenzial: Das THG-Minderungspotenzial ergibt sich aus dem Endenergieeinsparpotenzial multipliziert mit den jeweiligen Emissionsfaktoren. Im Bereich Kunststoffverarbeitung sind Energieeinsparungen im Bereich Strom zu erzielen. Der Emissionsfaktor für den Strommix in Deutschland wurde im Projekt vom Partner IREES abgeschätzt. Damit ergibt sich ein THG-Minderungspotenzial von 0,69 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2030 und 0,05 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2050. Es ergeben sich kumulierte verminderte THG-Emissionen von 7,14 Mio. t CO₂ für den Zeitraum von 2025 bis 2050. Hinsichtlich der kumulierten verminderten THG-Emissionen wird der Schwellenwert von 5 Mio. t CO₂-äq. im Jahr 2036 realisiert. Der Verlauf der jährlichen verminderten THG-Emissionen sowie der kumulierten verminderten THG-Emissionen ist in Abbildung 2-16 zu sehen.

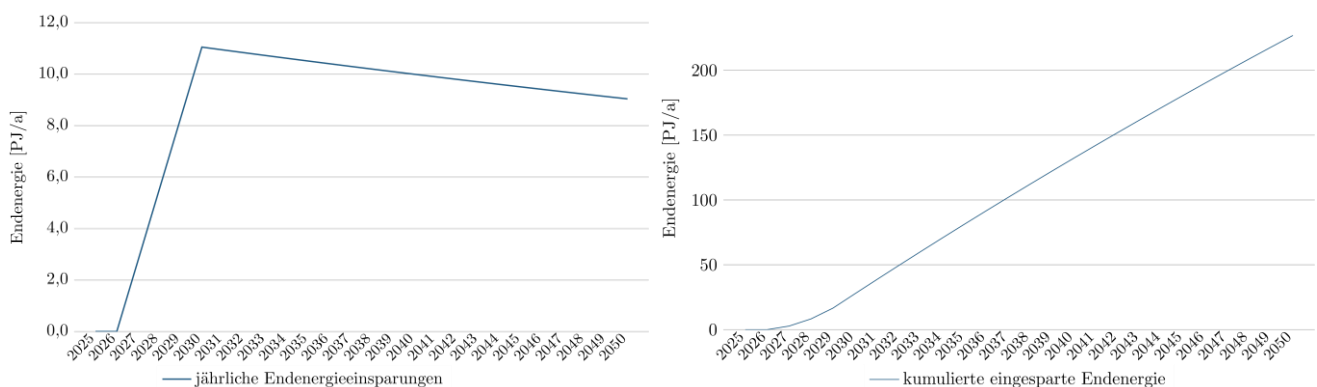


Abbildung 2-15: Jährliche eingesparte Endenergie (links) und kumulierte eingesparte Endenergie (rechts) der Forschungsimpulse der Kunststoffverarbeitung.

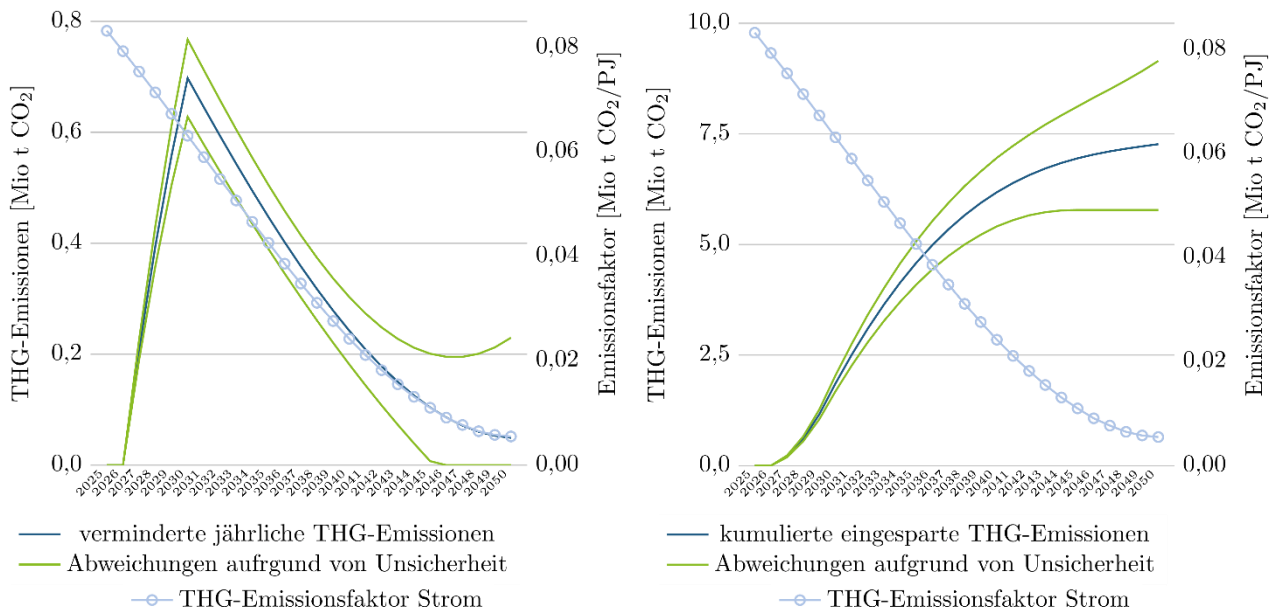


Abbildung 2-16: Verminderte jährliche THG-Emissionen (links) sowie kumulierte eingesparte THG-Emissionen der Forschungsimpulse der Kunststoffverarbeitung.

2.3.6. Pumpen und Systeme

Für das Themenfeld Pumpen und Systeme wurde ein Quick-Scan erstellt. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Die vollständige Analyse befindet sich im Anhang.

Die Pumpentechnologie bildet die Basis für viele Prozesse und Dienstleistungen mit Flüssigkeiten in der Industrie sowie im privaten und gewerblichen Bereich. Mit jährlich rund 75,6 PJ (21 TWh) haben Pumpen einen Anteil von 3 % am gesamten industriellen Endenergieverbrauch bzw. 9 % am industriellen Stromverbrauch [30]. Im Rahmen der Bearbeitung fanden Experteninterviews mit den Firmen Wilo SE, der Sulzer AG, dem Institut für Fluidsystemtechnik der TU Darmstadt sowie dem Verband für Pumpen und Systeme des VDMA statt. Im Rahmen der Experteninterviews wurde ein Einsparpotenzial im Bereich Pumpen und Systeme von durchschnittlich 34 Prozent identifiziert. Dieses setzt sich aus drei Teilbereichen zusammen, welche sich zu jeweils zwei Einsparpotenzial-Kategorien von jeweils 34 % gruppieren lassen. Grundlage beider Kategorien bildet die Optimierung der Pumpen- bzw. Systemregelung. Kategorie A besteht zusätzlich aus der Optimierung der Dimensionierung und Systemplanung und Kategorie B zusätzlich aus der Technologieentwicklung von dezentral einsetzbaren Pumpmodulen.

Ermitteltes Einsparpotenzial: Das ermittelte Einsparpotenzial beträgt jährlich 25,7 PJ. Dabei wird eine volle Diffusion ab dem Jahr 2030 angenommen. Somit ergibt sich ein kumulierter eingesparter Energieeinsatz bis zum Jahr 2050 von 578 PJ. Der Verlauf der jährlichen Endenergieeinsparung sowie der kumulierten eingesparten Endenergie ist in Abbildung 2-15 zu sehen.

THG-Minderungspotenzial: Im Bereich Pumpen und Systeme handelt es sich vollständig um eingesparten Strom. Der Emissionsfaktor für den Strommix in Deutschland wurde im Projekt vom Partner IREES abgeschätzt. Dieser beträgt im Jahr 2030 0,0631 Mio. t CO₂-äq./PJ und sinkt bis 2050 kontinuierlich auf 0,0055 Mio. t CO₂-äq./PJ. Der Verlauf des Emissionsfaktors für Strom über die Zeit ist in Abbildung 2-16 abgebildet. Damit ergibt sich ein THG-Minderungspotenzial von 1,62 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2030 und 0,14 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2050. Es ergeben sich kumulierte verminderte THG-Emissionen von 17,76 Mio. t CO₂-äq. für den Zeitraum von 2025 bis 2050. Hinsichtlich der kumulierten verminderten

THG-Emissionen kann der Schwellenwert von 5 Mio. t CO₂-äq. im Jahr 2031 realisiert werden. Der Verlauf der jährlichen verminderten THG-Emissionen sowie der kumulierten verminderten THG-Emissionen ist in Abbildung 2-16 zu sehen.

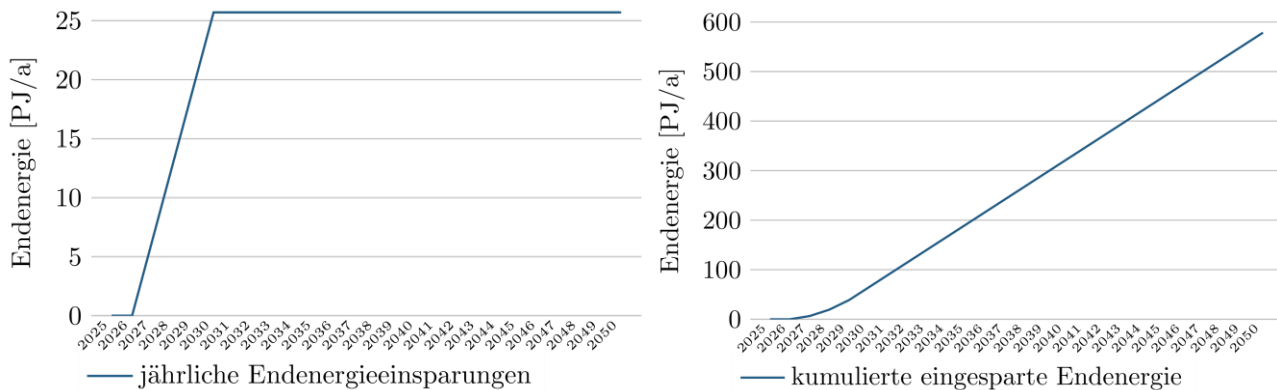


Abbildung 2-17: Jährliche eingesparte Endenergie (links) und kumulierte eingesparte Endenergie (rechts) des Forschungsimpulses Pumpen und Systeme.

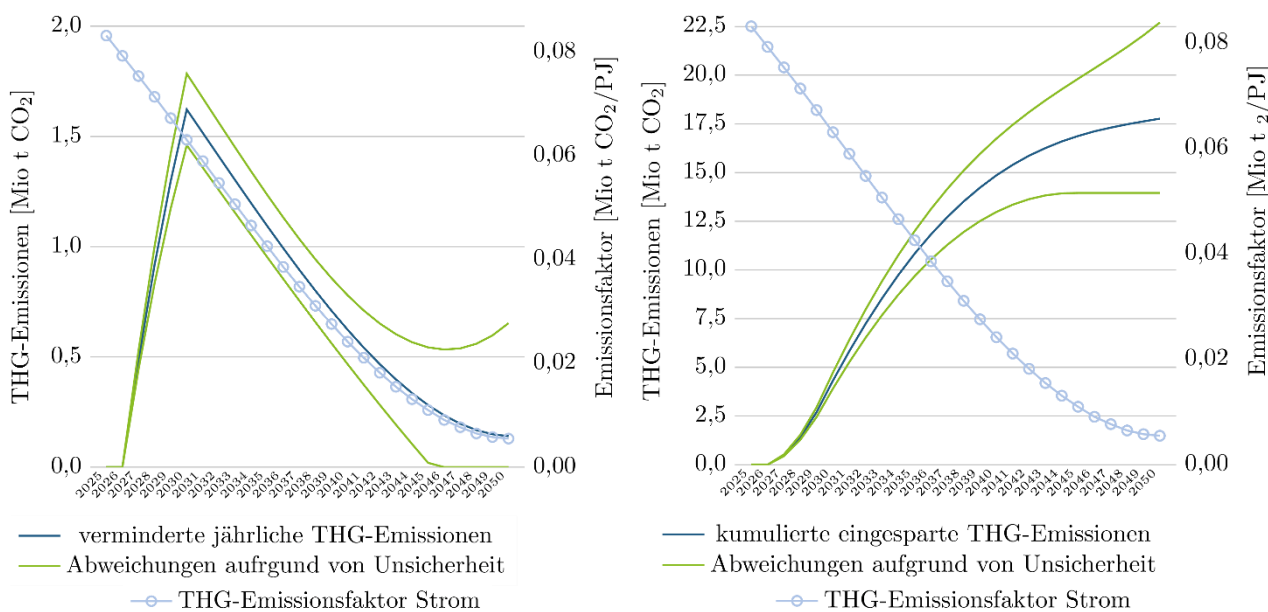


Abbildung 2-18: Verminderte jährliche THG-Emissionen (links) sowie kumulierte eingesparte THG-Emissionen des Forschungsimpulses Pumpen und Systeme.

2.3.7. Reifenherstellung

Für das Themenfeld Reifenherstellung wurde ein Quick-Scan erstellt. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Die vollständige Analyse befindet sich im Anhang.

Mit rund 9,2 PJ jährlich ist die Reifenherstellung ein energieintensiver Prozess. Für das Themenfeld Reifenentwicklung wurde ein Quick-Scan erstellt. Im Rahmen dessen fand ein Interview mit Experten aus der Branche statt, welche aufgrund von Wettbewerbsvorteilen nicht namentlich genannt werden möchten. Im Rahmen der Experteninterviews wurde ein Einsparpotenzial im Bereich der Reifenherstel-

lung von durchschnittlich 8,7 Prozent identifiziert. Dieses setzt sich aus 20 % Einsparpotenzial im Bereich der Mischungsherstellung, welche wiederum 22 % des Endenergiebedarfs der Reifenproduktion darstellt, und 10 % Einsparpotenzial in der Vulkanisation, welche 43 % des Endenergiebedarfs der Reifenproduktion einnimmt, zusammen.

Ermitteltes Einsparpotenzial: Mit der Annahme, dass der Endenergiebedarf der Branche jährlich um 1,8 % wächst, ergibt sich ein Einsparpotenzial von 0,85 PJ. Dabei wird eine volle Diffusion ab dem Jahr 2030 angenommen. Es ergibt sich ein kumulierter eingesparter Energieeinsatz bis zum Jahr 2050 von 22,77 PJ. Der Verlauf der jährlichen Endenergieeinsparung sowie der kumulierten eingesparten Endenergie ist in Abbildung 2-19 zu sehen.

THG-Minderungspotenzial: Im Bereich der Reifenherstellung sind Energieeinsparungen im Bereich Strom und Erdgas zu erzielen. Dabei setzen sich hinsichtlich der Gesamtbetrachtung die Energieeinsparungen aus 50,5 % Strom und 49,5 % Erdgas zusammen. Der Emissionsfaktor für den Strommix in Deutschland wurde im Projekt vom Partner IREES abgeschätzt. Der Emissionsfaktor für Erdgas wurde auf Basis von (Juhrich 2016) auf konstant 0.0559 Mio. t CO₂-äq./PJ festgelegt. Damit ergibt sich ein THG-Minderungspotenzial von 0,05 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2030 und 0,04 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2050. Es ergeben sich kumulierte verminderte THG-Emissionen von 0,96 Mio. t CO₂-äq. für den Zeitraum von 2025 bis 2050. Hinsichtlich der kumulierten verminderten THG Emissionen, wird der Schwellenwert von 5 Mio. t CO₂-äq. nicht realisiert. Der Verlauf der jährlichen verminderten THG-Emissionen sowie der kumulierten verminderten THG-Emissionen ist in Abbildung 2-20 zu sehen.

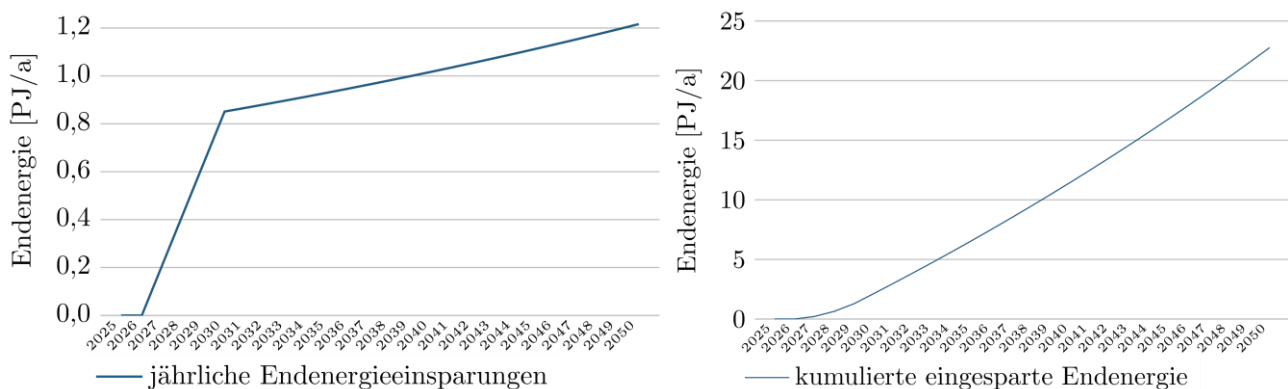


Abbildung 2-19: Jährliche eingesparte Endenergie (links) und kumulierte eingesparte Endenergie (rechts) der Forschungsimpulse der Reifenherstellung.

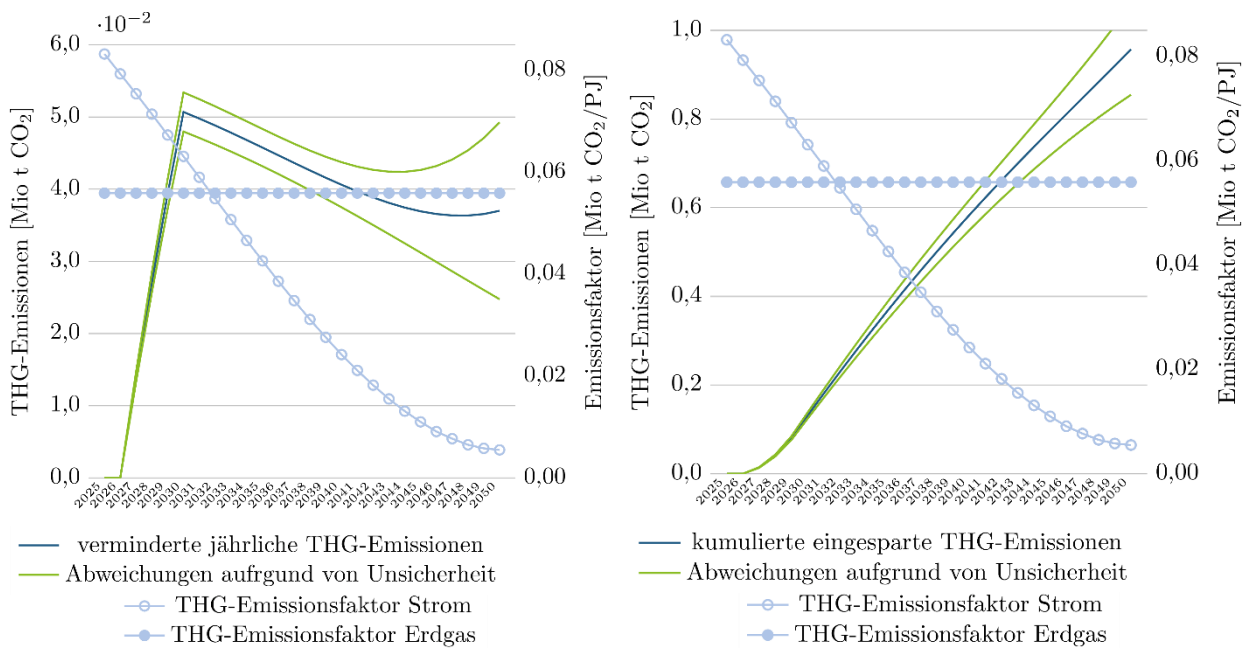


Abbildung 2-20: Verminderte jährliche THG-Emissionen (links) sowie kumulierte eingesparte THG-Emissionen der Forschungsimpulse der Reifenherstellung.

2.3.8. Batteriezellfertigung

Für das Thema Batteriezellfertigung wurde eine verkürzte EDUAR&D-Analyse erstellt. In Abstimmung mit dem PtJ am 05.10.2020 wurde die Bewertung der Batterieherstellung im Projekt nicht weiter bearbeitet, sodass kein Expertenfachgespräch durchgeführt wurde. Die Empfehlungen basieren daher rein auf Literaturrecherchen. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Die vollständige Analyse befindet sich im Anhang.

Die Anwendungsmöglichkeiten für Lithium-Ionen-Batterien (LIB) sind vielfältig und erstrecken sich von der Konsumelektronik über die Elektromobilität und stationäre Energiespeicherung bis hin zu industriellen Großbatterien. [40]–[42] Die globale Nachfrage nach LIB Zellen lag im Jahr 2017 bei 100 bis 125 GWh. [43] Davon sind etwa 57-69 GWh der Elektromobilität zuzuschreiben und etwa 1,5-5 GWh den stationären Anwendungen. Im Bereich der portablen/mobilen Anwendungen³ lag der LIB-Markt in 2017 zwischen 45 und 50 GWh. [44] Die Prognosen der Nachfrage nach LIB Zellen gehen von einem starken Wachstum aus. So wird für das Jahr 2025 von einer Nachfrage zwischen 200 und 800 GWh und im Jahr 2030 bereits im Bereich von einer TWh ausgegangen. [43] Insbesondere im Bereich der Elektromobilität wird ein starkes Wachstum angenommen. Aktuell kommt bereits die Hälfte der globalen Nachfrage nach LIB aus der Elektromobilität [45], für das Jahr 2030 wird prognostiziert, dass bis zu 80% der LIB Nachfrage aus dem Bereich der Elektromobilität kommt. Weiterhin wird bei der Speicherung von erneuerbaren Energien enorme Wachstumsraten erwartet. [45] Hinsichtlich der Produktionskapazitäten wurden die bislang aufgebauten und bis 2025 angekündigten Zellproduktionskapazitäten von [42], [44], [46] ausgewertet. Es zeigt sich, dass ein Zubau von 100 GWh jährlich erwartet wird. Die Prognosen der Produktionsmenge für das Jahr 2030 reichen dabei von ca. 400 GWh (durch etablierte Hersteller) bis ca.

³ tragbar bzw. 3C — Konsum, Kommunikation, Computer

900 GWh (durch etablierte Hersteller sowie weiteren Ausbau und neue Hersteller). Es wird angenommen, dass ein weiterer massiver Zubau an Zellproduktionskapazitäten spätestens ab 2025 erforderlich wird, um die wachsende Nachfrage zu bedienen. [43]

Zur Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs zur Herstellung von Batterien und Akkumulatoren in Deutschland wurde auf Basis der Kostenstruktur der Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes [2] sowie [39] eine Abschätzung vorgenommen. In dieser sind für die einzelnen Wirtschaftszweige der Bruttoproduktionswert (BPW) sowie der Energiekostenanteil (EKA) in Prozent am Bruttoproduktionswert (BPW) angegeben. Auf dieser Basis lassen sich die Energiekosten der Wirtschaftszweige ermitteln. Mit einer Abschätzung der Energiepreise für Strom (S) und Brennstoffe (BS) auf Basis der Zusammensetzung des Wirtschaftszweiges sowie des Anteils des Brennstoffanteils (BSA) am Endenergieverbrauch (EEV) nach [39] lässt sich der Endenergiebedarf für Strom und Brennstoffe iterativ bestimmen. Laut Statistisches Bundesamt (2020) hatte der Wirtschaftszweig 27.20 Herstellung von Batterien und Akkumulatoren im Jahr 2018 einen BPW von ca. 3,6 Milliarden Euro, wovon 1,1 Prozent als Energiekosten angegeben werden. Damit lassen sich Energiekosten in Höhe von ca. 40 Millionen Euro ermitteln. Mit der zugrunde gelegten Annahme, dass vorwiegend mittelgroße Unternehmen im Wirtschaftszweig vorhanden sind und diese damit durchschnittlich einen Brennstoffpreis von 50 €/MWh und einen Strompreis von 140 €/MWh zahlen sowie der Annahme, dass der Anteil der Brennstoffe am Endenergieverbrauch (EEV) 31,6 Prozent beträgt (basierend auf Lässig [39]), lässt sich der Endenergiebedarf von 409 TJ für Brennstoffe und 884 TJ für Strom im Jahr 2018 berechnen.

Für die energietechnische Bewertung wurden verschiedene Studien zur Life-Cycle-Analyse von Batterien herangezogen. Hierbei zeigt sich, dass die Energieverbrauchsdaten der einzelnen Studien sich signifikant unterscheiden. So wird der Energiebedarf zur Zellherstellung für LIB zwischen 0,04 und 0,8 kWh/kg in den Quellen [47]–[49] angegeben, in den Quellen [50]–[52] allerdings zwischen 8,6 und 112 kWh/kg. Dies liegt zum einen an (zum Teil) fehlenden direkten Industriedaten und zum anderen an verschiedenen Vorgehensweisen zur Ermittlung. So verwenden die Studien [47], [51], [53] einen Prozessansatz (Bottom-Up), während die Studien [48]–[50], [52], [54]–[56] einen Top-Down Ansatz verfolgen. Weiterhin geben nur ein Teil der Studien den Energiebedarf zur Zellherstellung explizit an, während einige Studien die Materialproduktion und Zellherstellung zusammenfassen [54]–[56]. Lediglich die Montage der Batterie wird hier gesondert aufgelistet, wobei RECHARGE 2018 die Zellherstellung und Batteriemontage zusammenfasst. Lediglich die Studie von Yuan et. al [51] betrachtet den Zellherstellungsprozess im Detail und gibt Energiebedarfe für die einzelnen Prozessschritte an. Hierbei zeigt sich, dass die Trocknung und der Trockenraum mit 7,16 kWh/kg und 4,49 kWh/kg die energieintensivsten Prozesse sind. Die **energiewirtschaftliche Bewertung** zeigt, dass die Materialkosten die Haupttreiber der Produktionskosten darstellen. Lediglich 4% der durchschnittlichen Kostenstruktur einer LIB stellen Energiekosten dar. [57] Derzeit dürfte der Endenergiebedarf infolge fehlender Großproduktion von Zellen in Deutschland marginal sein.

Hinsichtlich der **Technikzyklusanalyse** wurden keine Patent- und bibliometrische Analyse durch das Fraunhofer ISI durchgeführt. Eine Literaturanalyse diesbezüglich zeigt, dass Lithium-Ionen-Batterien sich in der *Diffusion* (Phase 6) befinden. Lithium-Schwefel-(Li-S) und Lithium-Luft-Batterien (Li-air) haben die Desillusionierungsphase überschritten. Es wird zurzeit noch diskutiert, welche der beiden Techniken sich herauskristallisieren werden. In den Quellen liegen diese im Bereich der *Neuorientierung* oder im *Aufstieg*. [58], [59] Hinsichtlich des TRL lassen sich LIBs in die Klasse 9 (Qualifiziertes System mit

Nachweis des erfolgreichen Einsatzes) einordnen [60], [61]. Li-S und Li-air können zurzeit anhand der Literaturanalyse noch nicht eingeordnet werden.

Bei der **Innovationssystem-Analyse** wurden verschiedene Akteure aus Industrie (Elektroden- und Zellenhersteller, Komponentenhersteller der Anode, Kathode, Elektrolyte und Separatoren) und Forschung sowie Verbände identifiziert. In Deutschland sind zurzeit lediglich die Batteriemodul- und Batteriepackmontage im industriellen Maßstab etabliert. Die Zellfertigung wird hingegen lediglich in kleineren Pilot- und Forschungsanlagen betrieben. [44]

Im Bereich der potenziellen Energieforschungsansätze wurden die zwei Teilbereiche Material- und Technologieentwicklung sowie die Fertigungsentwicklung identifiziert. Für die Fertigungsentwicklung – worauf der Fokus im Bereich der Arbeiten lag – wurden die Teilaspekte

- Lösemittelreduzierte oder –freie Produktion der Elektroden zur Reduktion des Energieeinsatzes in der Trocknung,
- Hochdurchsatz-Trockenverfahren der Elektroden u.
- Effiziente Formierungsstrategie

identifiziert.

2.3.9. Kühl- und Kältetechnik

Für die Kühl- und Kältetechnik wurde eine umfängliche Analyse durchgeführt, welche sich mit ihren ausgearbeiteten Kapiteln an der EDUAR&D-Analyse orientiert. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Die vollständige Analyse befindet sich im Anhang.

Der Themenkomplex der Kühl- und Kältetechnik stellt einen Bereich dar, welcher eine (sehr) hohe Anwendungsrelevanz und entsprechende Verbreitung in Industrie und Gewerbe aufweist. Kühl- und kältetechnische Systeme bestehen aus einer unterschiedlichen Anzahl an Einzelsystemen und Komponenten, welche durch den Verbund ein kühl- und kältetechnisches System ergeben. Durch eine große Anzahl unterschiedlicher Varianten und somit Ausgestaltungsformen der Einzelkomponenten (u.a. bedarfsfallabhängige Konfiguration) ergibt sich eine ebenso große Variantenvielfalt möglicher Systemgestaltungen kühl- und kältetechnischer Systeme.

Im konkreten Anwendungsfall weisen sowohl die Teilkomponenten kühl- und kältetechnischer Gesamtsysteme als auch deren Zusammenspiel im Verbund teils nicht triviale und unmittelbare Wechselwirkungen untereinander auf. Auch Abhängigkeiten zueinander erschweren das Verständnis des Gesamtsystems für gewöhnliche Betreiber oder Laien.

Marktkontexturierung: Die Anzahl möglicher Systemelemente und die Variantenvielfalt dieser Elemente führt zu einem relativ heterogenen Bestand an verschiedenen Anbietern und Herstellern von kühl- und kältetechnischen Systemelementen. Mitunter handelt es sich um spezialisierte Hersteller, teilweise bieten die Hersteller eine Vielzahl möglicher Systemelemente an. Ebenso variiert die Größe der Anbieter. Eine einfache Auswertung öffentlich verfügbarer Wirtschaftskennzahlen deutet insgesamt auf einen steigenden Trend der jeweiligen Zahlen hin, welcher sich zudem auch in der Entwicklung der Schätzungen bzw. der Statistik des Bestands an kühl- und kältetechnischen Anlagen in Deutschland widerspiegelt. Neben verschiedenen Anbietern und Herstellern konnten darüber hinaus verschiedene Verbände identifiziert werden, welche sich im (Markt-) Kontext der Kühl- und Kältetechnik bewegen.

Energiebedarf Kühl- und Kältetechnik: Die wesentlichen verfügbaren Datengrundlagen zum Energiebedarf der Kühl- und Kältetechnik in Deutschland deuten sowohl auf gewisse Ungenauigkeiten hinsichtlich des absoluten Energiebedarfs hin als auch hinsichtlich des relativen Energiebedarfs verschiedener Branchen zueinander. Grundsätzlich wird für das Jahr 2017 der Energiebedarf der (gesamten) Kühl- und Kältetechnik in Deutschland (73 TWh) anteilig am Gesamtstrombedarf in Deutschland (520 TWh) auf ca. 14 % beziffert. Dahingegen wird der Strombedarf lediglich der Industriekälte (12 TWh) am Gesamtindustriestrombedarf (228 TWh) auf etwa 5 % beziffert (Jahr 2017). [62]

Innerhalb der beiden herangezogenen und wesentlichen Datenquellen (AGEB-Daten sowie VDMA-Studie) fallen die angesprochenen und recht prominenten Unterschiede hinsichtlich der Verfügbarkeit und der Vergleichbarkeit der Daten sowie der Qualität der Daten im Kontext der historischen Datenentwicklung auf. Insgesamt besitzt die VDMA-Studie eine wesentlich umfassendere Detailtiefe im Vergleich zu den AGEB-Daten, wenngleich auch einzelne Werte der VDMA-Studie im Bereich der Industriekälte⁴ hinterfragt werden können.

Technologiezyklusanalyse: Sowohl die Verfügbarkeit als auch der Reifegrad von existierenden Optimierungstechniken und Möglichkeiten wird als recht hoch eingeschätzt. Aufgrund der Technologiezyklus aus einer übergeordneten Perspektive heraus, d.h. ohne Fokussierung auf eine einzelne Technologie, erfolgt keine Technologiezyklus-Analyse im klassischen Sinne. Im Kontext der Vielzahl verfügbarer Effizienzoptionen wird z.B. auf Möglichkeiten von Drehzahlregelung, Wärmerückgewinnung oder der Regelung nach Umgebungsbedingungen verwiesen.

Innovationssystem-Analyse: Im Kontext der Innovationssystem-Analyse werden unterschiedliche Akteure im Bereich der Kühl- und Kältetechnik mit einem forschungs- und entwicklungsrelevanten Hintergrund identifiziert. In Teilen konnten Akteure und Experten aus dieser Gruppe als Teilnehmer eines Fach- bzw. Einzelgesprächs gewonnen werden.

Neben der Identifikation von Akteuren im Feld wurde darüber hinaus eine systematische Recherche von Forschungsprojekten (ab 2010) sowie eine Stichwortanalyse durchgeführt. Hierbei wiesen die Stichworte „Thermisch angetriebene Kälteerzeugung“ und „Solare Kühlung“ die häufigsten Nennungen auf.

Forschungspotenziale: Im Folgenden sind die im Rahmen der Projektarbeit ausgearbeiteten Forschungsempfehlungen dargestellt, welche sich als Ergebnis von Expertengesprächen, Literaturrecherchen sowie Projekterfahrungen ergeben. Die Sammlung der einzelnen Empfehlungen und Themen wurden in einem zweiten Schritt geclustert, sodass eine Berücksichtigung der zeitlichen Perspektive erfolgte. Weiterhin wurde als Ergebnis bzw. Weiterentwicklung des ersten Clusters ein Forschungsimpuls im Sinne eines Quick-Scan ausgearbeitet. Die Empfehlungen reichen von einfacher Technologieforschung über eine grundsätzliche Potenzialermittlung bis hin zu Wärmenetzen aus einer größeren Perspektive. Dabei stellen die Cluster 1 bis 4 zeitlich aufeinander aufbauende Schritte dar. Cluster 5 ist als eigenständiges Cluster losgelöst von diesen zu betrachten. Die aufgezeigte Reihenfolge der genannten Themen folgt keiner Priorisierung.

Cluster 1 – Bedarfs- und Potenzialkataster:

- Kartierung des Wärme- und Kältebedarfs
- Hybridisierung Kälteprozesse

⁴ Keine Analyse der anderen Bereiche

- Standardisierte Übergabesysteme (werksintern)

Cluster 2 – Methodisieren der Technologie- und Anlagenplanung

- Anwendungsnahe Komponentenmodelle
- Betriebsangepasste Auslegung

Cluster 3 – Bedarfsgerechter Betrieb (Transfer Forschungsergebnisse)

- Bedarfsangepasste Betriebsführung
- Erstellung Betriebskennfelder
- Einfache Auslegungs- und Bewertungstools

Cluster 4 – Perspektive Wärmenetze

- Standardisierte Übergabesysteme (werksgrenzenübergreifend)
- Einbindung Erneuerbarer Energien
- Flexibler Betrieb in Netzen

Cluster 5 – Vertiefte Technologie- und Komponentenforschung

- Elasto-, Elektro- und Magnetokalorik
- Standardisierte, günstige Sorptionsprozesse
- Kältemittelstrategie, natürliche/Low-GWP-Kältemittel
- Qualitätssicherung Kältekreis
- Wasser als Kältemittel
- Rekuperative Expansion

Wie dargestellt wurde ausgehend des ersten Clusters für das Themenfeld Kühl- und Kältetechnik ein Quick-Scan erstellt. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Die vollständige Analyse befindet sich im Anhang.

Ausgehend von Expertengesprächen, Literaturrecherchen und Projekterfahrungen wird u.a. vor dem Hintergrund einer als ungenau verfügbaren und unterschätzten energetischen Bedeutung der Kühl- und Kältetechnik ein Forschungsimpuls abgeleitet. Die (unterschätzte) energetische Relevanz im Themenfeld dürfte in Zukunft weiter ansteigen und den bisherigen Trend fortsetzen. Gleichzeitig wird die Existenz einer Effizienzlücke erwartet, sodass (verfügbare) Möglichkeiten zu effizienten Anlagenbetrieben oftmals nicht umgesetzt werden. Die systemische Komplexität führt darüber hinaus dazu, dass häufig ein bedarfsgerechter Betrieb und (zielführende) Gesamtsystembetrachtungen und Anpassungen nicht zum Einsatz kommen. Das herrschende Knowhow-Gefälle soll ausgehend der folgenden Teilschritte abgebaut werden, um Effizienzpotenziale im Bereich der Kühl- und Kältetechnik ausschöpfen zu können:

1. Studie zur Ermittlung des (realen) quantitativen und qualitativen Bestands kühl- und kältetechnischer Anlagen in Deutschland (Aufbau einer Datenbasis)
2. Identifikation allgemeingültiger, effizienter Systemkonfigurationen in Abhängigkeit unterschiedlicher Randbedingungen (Referenzsysteme)
3. Quantifizierung der Effizienzpotenziale durch systematische Analyse des Anlagenbestands (aus Datenbasis) gegenüber effizienter Referenzsysteme
4. Entwicklung von Lösungsansätzen zur Überwindung des herrschenden Knowhow-Gefälles sowie Darstellung von Hemmnissen der Technologieanwendungen

Ermitteltes Einsparpotenzial: Das Energieeinsparpotenzial wird auf ca. 7,5 PJ pro Jahr beziffert. Bei einer potenziellen Steigerung des Energiebedarfs (und damit des Einsparpotenzials) um 20 % je 10 Jahre, wird für das Jahr 2030 entsprechend ein Energieeinsparpotenzial i.H.v. 9 PJ abgeschätzt.

THG-Minderungspotenzial: Mit den Emissionsfaktoren im Jahr 2030 und einer angenommenen Energieträgerzusammensetzung ergibt sich ein THG-Minderungspotenzial i.H.v. 0,57 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2030.

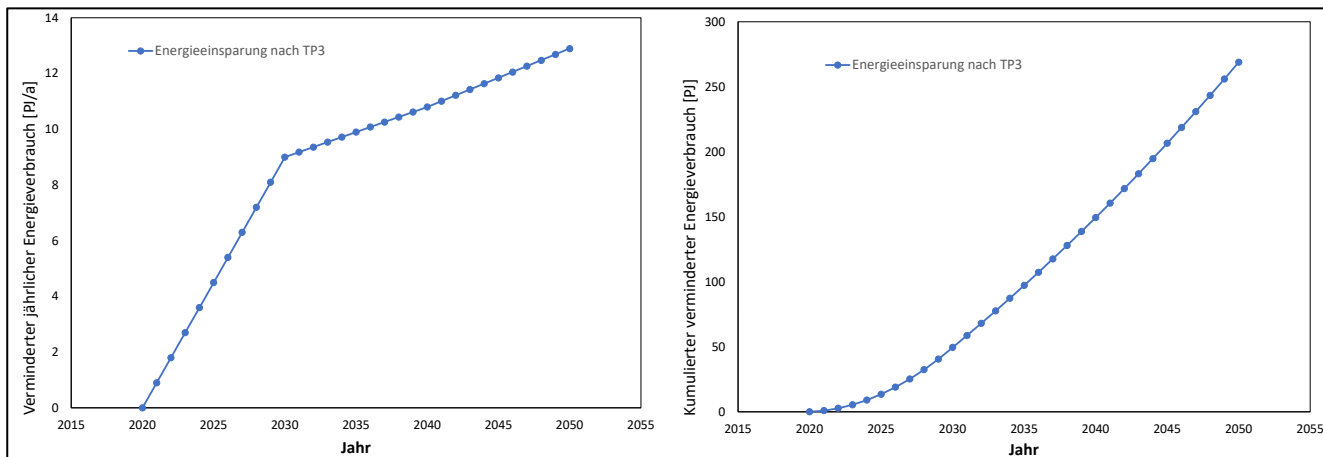


Abbildung 2-21: Jährliche eingesparte Energie (links) und kumulierte eingesparte Energie (rechts) im Kontext Kühl- und Kältetechnik

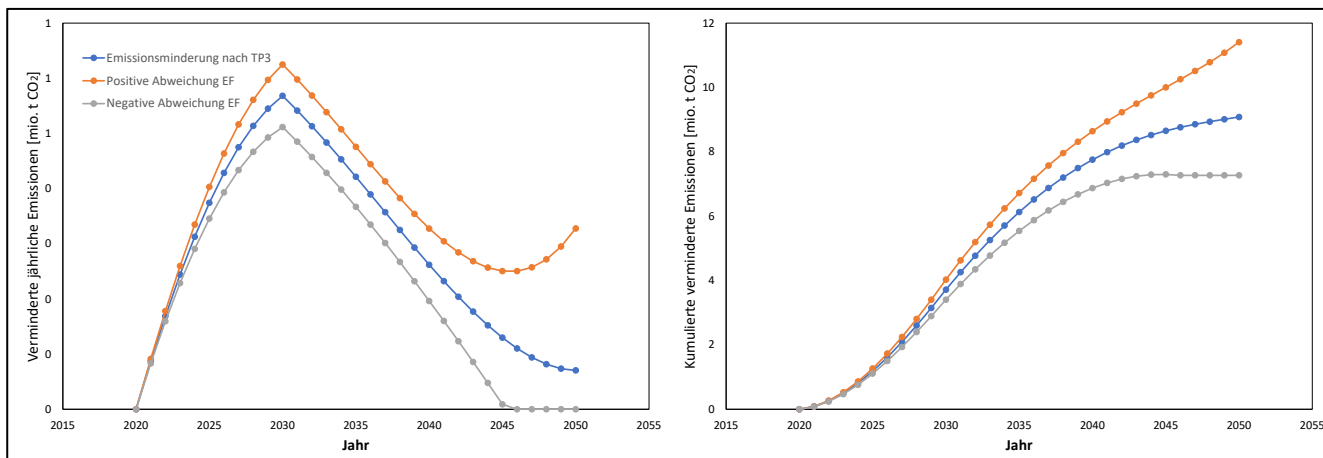


Abbildung 2-22: Jährliche eingesparte Emissionen (links) und kumulierte eingesparte Emissionen (rechts) im Kontext Kühl- und Kältetechnik

Hemmnisse: Im Bereich der Kühl- und Kältetechnik werden unterschiedliche Hemmnisse aufgeführt, welche sich insbesondere auf die klassischen Energieeffizienzhemmnisse beziehen. So können z.B. das Investor-Nutzer-Dilemma, die Höhe der Investitionskosten oder auch ein mangelndes Vertrauen in innovative Techniken eine große Rolle spielen. Weiterhin kann z.B. auch eine mangelhafte Ausbildung wesentlicher Grund für eine unzureichende Verbreitung effizienter Technologien im Bereich der Kühl- und Kältetechnik darstellen.

2.3.10. Moderne Produktionsinfrastruktur – Energieeffizienz durch Digitalisierung

Da es sich bei der Digitalisierung um eine Querschnittstechnologie handelt, zeigen sich Auswirkungen der Digitalisierung auf die Energieeffizienz in modernen Produktionsinfrastrukturen in unterschiedlichen Einsatzbereichen. Generell sind durch die zunehmende Automatisierung und Konnektivität in der produzierenden Industrie Daten in einem noch nie dagewesenen Ausmaß in Produktionssystemen vorhanden und ihre Menge nimmt weiter stetig zu. Die Europäische Kommission erwartet, dass das globale Datenvolumen von 2018 bis 2025 um 530 % zunehmen wird. [63] Zu den produktionsrelevanten Daten gehören beispielsweise Sensordaten, Identifikationsnummern/Codes, Steuerungsdaten, Produktdaten und Bilddaten, die von Produktionsanlagen, Bedienern, der Lieferkette oder anderen Quellen stammen können [64]. Insbesondere bei Anwendungsfällen auf Maschinenebene können hochfrequente Daten hierbei schnell zu großen Datenmengen führen. Der Aufwand für die Datenintegration und -aufbereitung in modernen Produktionsinfrastrukturen ist aufgrund der Vielfalt der Datenquellen mit unterschiedlichen Strukturen und Semantiken und komplexen Aufgaben wie der Synchronisation oftmals komplex. Gleichzeitig müssen hohe Anforderungen an Betriebs- und Datensicherheit jederzeit erfüllt werden. Vielfach bieten datengestützte Verfahren jedoch potenziell direkte oder indirekte Auswirkungen auf die Energieeffizienz der Produktionsinfrastruktur.

Digitalisierung in der Produktionsinfrastruktur

Die vielfältigen Auswirkungen der Digitalisierung in der Produktion werden durch die Breite an Anwendungsfeldern und spezifischen Anwendungsfällen deutlich, in denen aus verschiedenen Prozessen und Maschinen wiederum spezifische Daten und Informationen aufgenommen und verarbeitet werden. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Anwendungsfelder *Condition Monitoring und Predictive Maintenance, Qualitätsmanagement, Process Monitoring und die Prozessoptimierung, Energy Monitoring und Energieeffiziente/-flexible Produktion, sowie transparente, datengetriebene Geschäftsmodelle* [65]

Energietechnische und -wirtschaftliche Bewertung

In der Diskussion um eine Steigerung der Energieeffizienz rücken digitale Technologien zunehmend in den Fokus. So nimmt die Digitalisierung beispielsweise eine zentrale Rolle ein in der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung, der Energieeffizienzstrategie 2050, dem Klimazielplan 2030, sowie dem European Green Deal. [66] Im starken Kontrast dazu steht jedoch, dass aktuell nur wenige Studien zu den konkreten Effekten der Digitalisierung auf die Energieeffizienz existieren. Die Auswirkungen zur Steigerung der Energieeffizienz sind nicht eindeutig geklärt. Zudem gibt es teils sehr widersprüchliche Aussagen bezüglich der Energieeffizienzauswirkungen. Eine aktuelle, umfassende Studie kommt zu dem Ergebnis, dass Digitalisierungsmaßnahmen bislang mit einem erhöhten Energieverbrauch einhergehen, da verbrauchssteigernde Effekte stärker ausfallen als senkende Effekte. [67] Zu den verbrauchssteigernden Effekten zählen demnach:

- Gesteigertes Wirtschaftswachstum durch die Steigerung der Arbeits- und Energieproduktivität
- Direkte Auswirkungen durch den erhöhten Bedarf an Informations- und Kommunikationstechnologien, die hergestellt und betrieben werden müssen

Demgegenüber werden die folgenden verbrauchssenkenden Effekte herausgestellt:

- Steigerung der Energieeffizienz der digitalisierten Prozesse oder durch digitalisierte Prozesse
- Sektoraler Wandel / Tertiarisierung durch die Zunahme von IKT-Dienstleistungen

Eine Unternehmensbefragung des ZEW Mannheim ergab zudem, dass digitale Technologien zur Senkung des Energieverbrauchs bisher eher zögerlich eingesetzt und deren Potenziale noch nicht voll ausgeschöpft werden. Zudem ist Energieeinsparung der am seltensten genannte Grund für die Umsetzung von Digitalisierungsmaßnahmen im verarbeitenden Gewerbe. [66] Dies deutet darauf hin, dass weitere Förder-, Steuer-, oder Aufklärungsmaßnahmen notwendig sein könnten, um die Auseinandersetzung der Unternehmen mit dem Mittel der Digitalisierung zur Energieeffizienzsteigerung zu incentivieren. Auch eine Umfrage, die im Rahmen des Projekts durch die Kuratoren der verschiedenen Forschungsfelder ausgefüllt wurde, bestätigt dieses Bild. In jedem Forschungsfeld werden dabei sowohl der Grad der Digitalisierung als auch die Affinität zur Digitalisierung als überwiegend niedrig eingeschätzt.

Technologiezyklus-Analyse

Sowohl die Verfügbarkeit als auch der Reifegrad von existierenden Digitalisierungsmaßnahmen wird als hoch eingeschätzt. Da keine Fokussierung auf eine einzelne Technologie vorgenommen wurde, erfolgt keine Technologiezyklus-Analyse im klassischen Sinne. Im Kontext der Vielzahl verfügbarer Maßnahmen wird stattdessen auf die erwähnten Potenziale von *Condition Monitoring und Predictive Maintenance*, *Qualitätsmanagement*, *Process Monitoring und die Prozessoptimierung*, *Energy Monitoring und Energieeffiziente/-flexible Produktion*, sowie *transparente, datengetriebene Geschäftsmodelle* verwiesen.

Innovationssystem-Analyse

Da sich auch zukünftig ein stark anhaltender Trend zur Digitalisierung in der Produktion erwarten lässt, werden in diesem Abschnitt aktuell bereits verbreitete und zukünftig relevante „Enabler“ der Digitalisierung und ihre jeweiligen energiebezogenen Eigenschaften diskutiert.

GAIA-X: Daten und digitale Infrastrukturen spielen eine Schlüsselrolle in der Wirtschaft. Aktuell fehlt es oftmals an Transparenz der gespeicherten und verarbeiteten Daten und der zugrunde liegenden Infrastruktur oder den geltenden Rechtssystemen. Auch fehlende, allgemein zugängliche Anwendungsprogrammierschnittstellen (APIs) deuten auf isoliert stattfindende Entwicklungsprozesse hin, was wiederum die Entwicklung einer gemeinsamen Infrastruktur hemmt. Die Initiative GAIA-X soll diese Hindernisse beseitigen, indem ein Daten- und Infrastruktur-Ökosystem geschaffen wird, das den europäischen Werten und Standards entspricht. GAIA-X stützt sich auf Datenschutz, Offenheit und Transparenz, Authentizität und Vertrauen, digitale Souveränität und Selbstbeschränkung, freien Marktzugang und Wertschöpfung, Modularität und Interoperabilität sowie Benutzerfreundlichkeit, um ein föderiertes Ökosystem aufzubauen. [68]

Blockchain-Technologie: Bei der Blockchain-Technologie handelt es sich um die bekannteste Ausprägung der Distributed-Ledger-Technologien (DLT). Über DLT werden Rechner vernetzt, die einen Konsens über die Reihenfolge von durchgeführten Transaktionen bilden und diesen Zustand speichern und fortlaufend aktualisieren. Auf diese Weise entstehen Transaktionsdatenbanken, die eine Verwaltung von Daten ohne eine zentrale Plattform erlauben. Damit ist die Blockchain ein Informationsprotokoll und dezentral organisiertes Datenregister, welches durch die spezifischen Eigenschaften Transparenz, Sicherheit, Unveränderlichkeit, Robustheit und Multi-Stakeholder-Partizipation geprägt ist und somit eine Vertrauensbasis für Parteien mit sehr unterschiedlichen Interessen erzeugen kann. [69], [70]

Rechenzentren: Moderne Produktionsmaschinen besitzen eine Vielzahl interner Sensoren, die teils hochfrequente Daten bereitstellen. Innerhalb kürzester Zeit entstehen so potenziell große Datenmengen und der Bedarf nach mehr Rechenleistung. Immer mehr Software-Services werden mittlerweile als

Cloud-Lösungen angeboten, wobei die Dienste nicht lokal im Unternehmen, sondern in Rechenzentren ausgeführt werden, die bereits heute etwa 1 % des weltweiten Stromverbrauchs [71] erzeugen – in den USA sogar 2 % [72]. Insgesamt steigt weltweit der Energieverbrauch durch Rechenzentren, Datenströme und private Endgeräte prozentual stärker als der gesamte Energieverbrauch, sodass einzelne Prognosen für das Jahr 2030 von einem Anteil der IKT am globalen Stromverbrauch von 20 % ausgehen (vgl. Abbildung 4) [73]. Durch sogenannte Hyperscale-Rechenzentren lässt sich die Energieeffizienz deutlich steigern. Weiterhin lassen sich auch durch die Abwärmenutzung von Rechenzentren große Energieeffizienzpotenziale realisieren.

Künstliche Intelligenz: In der Industrie kann der Zweck des Einsatzes von KI technisch, geschäftlich oder kompetenzbasiert sein. Aus technischer Sicht besteht eine typische Aufgabe darin, Produktionsausfälle durch vorausschauende Wartung zu reduzieren. Kompetenzbasierte KI-Aufgaben entlasten die Mitarbeiter, z.B. durch Assistenzsysteme. Die wichtigsten KI-Aufgaben aus technischer Sicht in der Fertigung sind die Steigerung der Effizienz/Produktivität, die Reduzierung der Betriebskosten und die Verbesserung der Produktqualität [74]. Techniken des maschinellen Lernens bieten geeignete Instrumente, um die Datenanalyse für komplexe Anwendungen einzusetzen. [65]

Entwicklungsziele und mögliche Hemmnisse

Vor dem Hintergrund der betrachteten Technologien lassen sich folgende Entwicklungen erwarten, Probleme identifizieren und Lösungen vorschlagen:

- Um die Vorteile der Digitalisierungsmaßnahmen hinsichtlich der Energieeffizienz nicht durch den erhöhten Energieverbrauch der IKT zu negieren, sollte auf effiziente Recheninfrastrukturen geachtet werden. Wo möglich und sinnvoll, sollten rechenintensive Prozesse in Hyperscale-Rechenzentren ausgelagert werden. Bei sicherheits- oder latenzkritischen Berechnungen werden vermutlich on-Premise Rechenzentren bevorzugt. Da ein Großteil der hierfür eingesetzten Energie in Abwärme gewandelt wird, sind Maßnahmen zur Abwärmenutzung empfehlenswert, sodass diese beispielsweise zur Gebäudeheizung dienen kann.
- Datengetriebene Prozesse und KI werden in der Produktion der Zukunft eine stärkere Rolle einnehmen. Intelligente Datenauswertung kann hierbei auch Potenziale zur Energieeffizienzsteigerung aufzeigen. Damit die notwendigen Werkzeuge nicht nur Großunternehmen, sondern auch KMUs zur Verfügung stehen, sollten Aufklärungs- und Weiterbildungsangebote ausgebaut werden. In diesem Kontext kann auch die Festlegung gemeinsamer Standards, wie bspw. durch GAIA-X vorgesehen, eine wichtige Rolle spielen.
- Auch Geschäftsmodelle werden sich weiter digitalisieren und der Trend zu Service-basierten Vertriebsmodellen wie Pay-per-X wird sich verstärken. Zuverlässige und schnelle Datenverbindungen sind hierfür eine Grundvoraussetzung.
- Die Blockchain-Technologie bietet vielversprechende Entwicklungspotenziale. Wie auch im Bereich der KI existieren zu dieser Technologie nur wenige konkrete Anwendungsfälle, anhand derer ein zentraler Mehrwert für Produktionsinfrastrukturen deutlich wird. An dieser Stelle können Förderprogramme helfen Pilotprojekte zu realisieren, die Potenziale konkretisieren und quantifizieren können.
- Die Energie-Einsparpotenziale durch Digitalisierung sind sehr unternehmens- und prozessabhängig. Hierdurch werden Investitionsentscheidungen der Unternehmen erschwert. Hilfreich wäre es, langfristig öffentliche Datenbanken aufzubauen, in denen (anonymisierte) Anwendungsfälle

ihren jeweiligen Energieeinsparungen entgegengestellt werden. Auch hierfür könnten die GAIA-X Prinzipien angewendet werden.

- Das Thema Cyber- und Datensicherheit besitzt zwar nur einen indirekten Bezug zur Energieeffizienz, es handelt sich hierbei jedoch um einen zentralen Punkt, der Unternehmen vom stärkeren Einsatz von Digitalisierungsmaßnahmen abhält. Auch bei diesem Thema könnte ein Ausbau der Weiterbildungsangebote einen positiven Effekt aufweisen – gerade in Bezug auf KMUs.

Insgesamt kommt auch den Lösungsanbietern und den Unternehmen des produzierenden Gewerbes eine aktive Rolle zu. Von zentraler Bedeutung ist es seitens der Lösungsanbieter, auf eine möglichst nutzerfreundliche Implementierung und Verwendbarkeit der entwickelten Lösungen zu achten. Seitens der Unternehmen ist die Stärkung der Weiterbildungskultur von zentraler Bedeutung, da digitalisierte Prozesse insgesamt eine höhere Innovationsgeschwindigkeit aufweisen als klassische Technologien. Auch dem Aufbau einer geeigneten (und meist kostspieligen) IT-Infrastruktur mit innovationsfreundlichen Datenschutzkonzepten sollte eine hohe Priorität eingeräumt werden.

2.3.11. Raumluftechnik

Für das Themenfeld der Raumluftechnik (RLT) wurde ein Quick-Scan erstellt. Die wesentlichen Erkenntnisse werden nachfolgend dargestellt. Die vollständige Analyse befindet sich im Anhang.

Die Raumluftechnik, als Form der Luftkonditionierung im Gebäude zur Sicherstellung der Behaglichkeit von Personen, macht mit einem Energiebedarf von 30,2 PJ einen nicht unerheblichen Anteil an der Endenergie der Industrie aus [75], [76]. Für das Themenfeld wurden Expertengespräche mit Vertretern aus Industrie und Forschung durchgeführt. Als zentrale Herausforderung sind hierbei mehrere Knowhow-Gefälle zwischen den Akteuren identifiziert worden. In diesem Zusammenhang sind zur potenziellen Lösung der identifizierten Effizienzhemmnisse im Neubau und Bestand vier aufeinander aufbauende Forschungsaspekte definiert worden:

Aufbauend auf einer Studie zur Ermittlung des (realen) quantitativen und qualitativen Bestands raumluftechnischer und prozesstechnischer Anlagen in Deutschland, können raumluftechnische Akteure identifiziert werden, um diese mit geeigneten Maßnahmen zu sensibilisieren und vor dem Hintergrund der Energieeffizienz zielgerichteter zu qualifizieren. Die Datenerhebung zur Prozesslufttechnik, als Luftaufbereitung zur Sicherstellung des Industrieprozesses, ist in diesem Zusammenhang ebenfalls notwendig, da die Abgrenzung bei Mischnutzungen nicht immer eindeutig möglich ist. Auf Basis dieser Erkenntnisse ist eine Analyse von möglichen und erforderlichen Anpassungen der regulatorischen und organisatorischen Rahmenbedingungen notwendig, um energetische Inspektionen und Verbesserungen im Anlagenbestand zu fördern. Begleitet werden diese Maßnahmen durch die Entwicklung und Kommunikation von Planungsgrundsätzen für passive und hybride Klimatisierung, um deren Verbreitung stärker zu fördern.

Ermitteltes Einsparpotenzial: Im Zusammenhang mit den identifizierten Hemmnissen und aufgezeigten Lösungsansätzen ist ein Einsparpotenzial zwischen 15 und 30 % zu erwarten. Aufgrund der komplexen Realisierbarkeit, wie z.B. dem Aufbau einer einheitlichen Bestandsdatenbank und einer breit angelegten Qualifizierungsstrategie, sind die Einsparungen nicht unmittelbar zu quantifizieren und entsprechend durch eine Spanne abgeschätzt worden.

2.3.12. Leichtbau

Für das Themenfeld Leichtbau wurde eine umfangreiche Analyse durchgeführt, welche sich mit ihren ausgearbeiteten Kapiteln an der EDUAR&D-Analyse orientiert. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Die vollständige Analyse befindet sich im Anhang.

Leichtbau bedeutet grundsätzlich, Konstruktionen mit möglichst geringer Masse bei gleichzeitiger Erfüllung der Funktionalität (zulässige Belastungen, Steifigkeit, Temperaturfestigkeit etc.) zu ermöglichen. Darüber hinaus können Leichtbauprodukte gegenüber herkömmlichen Produkten zudem verbesserte Produkteigenschaften aufweisen, wenn bspw. Funktionen in geeigneter Weise integriert werden. Leichtbau ist dadurch eine Schlüsseltechnologie, um den Herausforderungen der Energie- und Materialeffizienz zu begegnen und zugleich die Leistungsfähigkeit und Produktivität von Maschinen und Anlagen zu erhöhen. [77] Es wird zwischen Stoffleichtbau, Formleichtbau und funktionsintegriertem Leichtbau unterschieden, wobei die verschiedenen Arten miteinander kombiniert werden können und sich gegenseitig ergänzen.

Anwendung findet Leichtbau klassischerweise in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Automobil- und Transportindustrie. Jedes eingesparte Kilogramm bedeutet ein Kilogramm mehr möglicher Nutzlast. Aber auch in der Bau-, Freizeit- und Sportindustrie, der maritimen Wirtschaft, der Medizintechnik sowie bei der Konstruktion großer Windkraftanlagen wird diese Zukunftstechnologie immer bedeutsamer. [78]

Marktkontexturierung: Wie beschrieben findet Leichtbau in zahlreichen Branchen Anwendung und es werden viele unterschiedliche Materialien sowie Kombinationen aus diesen eingesetzt. Eine materialseitige Identifizierung der Märkte erweist sich, aufgrund der vielen verschiedenen verwendeten Materialien sowie dem zunehmenden Materialmix, als schwierig. Stattdessen wird nach Branchen unterteilt, wobei Europa in der Transportbranche sowie im Themenfeld Baustoffe, -maschinen und -ausrüstung vor Asien und Amerika führend ist. [46]

Eine Differenzierung der für Leichtbauprodukte deutscher Unternehmen bis 2020 relevanten Anwenderbranchen nach Unternehmen mit weniger als 250 Mitarbeiter:innen sowie Unternehmen mit mehr als 250 Mitarbeiter:innen zeigte in der betrachteten Studie, dass sich kleine Unternehmen auf eine große Breite an Märkten spezialisiert haben. Das Netzwerk Leichtbau BW geht davon aus, dass die Anzahl kleiner Unternehmen, welche sich auf das Thema Leichtbau fokussieren, weiter zunimmt. [46]

Die Transportbranche war in der Studie von 2014 gemessen am Marktvolumen die wichtigste Branche für Leichtbaulösungen. Bis 2020 rechnet Leichtbau BW in der Studie mit einer globalen Marktgröße für Leichtbaumaterialien in dieser Branche von rund 140 Mrd. Euro. Danach folgen die Branchen Maschinenbau und Elektrotechnik mit einem prognostizierten Marktvolumen zwischen 25 und 40 Mrd. Euro und der Windkraft als globaler Leichtbaumarkt mit abgeschätztem Marktvolumen von über 10 Mrd. Euro. [79]

Unternehmen setzen im Materialmix neben faserverstärkten Kunststoffen zunehmend auch auf nachwachsende Rohstoffe. Im Schnitt arbeiten die befragten Leichtbauunternehmen mit durchschnittlich sechs Materialien, so dass ein Trend zu einem hybriden Leichtbau (inkludiert Faserverbundwerkstoffe) festzustellen ist. [80]

Energiebedarf Leichtbau: Leichtbau selbst kann als Mittel gesehen werden, um Energie bspw. beim Transport von Produkten einzusparen. Die Verwendung von Leichtbau kann dabei in unterschiedlichsten

Bereichen zu Effizienz- und Emissionsminderungs-Effekten führen. Das breite Anwendungsfeld erschwert dabei jedoch eine Abschätzung der durch die Verwendung von Leichtbau insgesamt erzielbaren Energieeinsparpotenziale. Aus diesem Grund wurde die Abschätzung des Einsparpotenzials für konkrete Beispiele auf Basis von Literatur und in Expertengesprächen vorgenommen. Für die Anwendung von Leichtbau in der Zerspanungstechnik, konkret beim Einsatz in der Motorspindel, wurde beispielsweise eine Ersparnis von 0,09 TWh/Jahr in Deutschland ermittelt. Beim Einsatz von Konzeptleichtbau in batterieelektrischen Fahrzeugen waren Einspar-Werte zwischen 0,485 und 1,45 TWh/Jahr in Deutschland in der Literatur zu finden [81].

Anzumerken ist in dem Kontext auch, dass Leichtbaumaterialien in der Verarbeitung unter Umständen eines höheren Energieeinsatzes bedürfen als bspw. konventioneller Stahl [82]. Um zu ermitteln, ob über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes ggf. höhere Energiebedarfe in der Fertigung ausgeglichen werden können – durch Energieeinsparungen bspw. in der Nutzungsphase – empfiehlt sich die jeweilige Durchführung einer Lebenszyklusanalyse.

Technikzyklus-Analyse: Für die Einordnung des Themenfelds Leichtbau wird im Folgenden eine Publikations- und eine Patentanalyse für verschiedene Subthemen durchgeführt. Publikationen zu Leichtbauentwicklungen dienen als Indikator für wissenschaftliche/technische Trends und daher langfristige Entwicklungen. Entgegen einem klassischen Ansatz (z. B. gezielte Leichtbaumaterialien und -verfahren) wurde ein markt- bzw. branchenspezifischer Ansatz verfolgt. Branchen bzw. Anwendungsfelder wurden über sogenannte Subjekt-Kategorien in der Publikationsdatenbank *Web of Science* (WoS) zusammengefasst. In Kombination mit dem Stichwort für Leichtbau (im Englischen: *lightweight*) und somit der vorrangigen Funktion, Gewicht zu reduzieren, lassen sich für den Leichtbau relevante Publikationen innerhalb einer jeweiligen Branche identifizieren. Anders als bei Patenten zeigt sich bei den Publikationen ein deutlicher Zuwachs. Bei den Ländern mit den meisten Publikationen liegt Deutschland an erster Stelle.

Patentanmeldungen zu Leichtbauentwicklungen dienen als Indikator für technische/ökonomische Trends und daher mittelfristig relevante Entwicklungen, da hier ein Interesse der Kommerzialisierung bei den Anmeldenden vorliegt. Analog zum Vorgehen wie bei der Publikationsanalyse beschrieben, wurden Branchen des verarbeitenden Gewerbes klassifiziert. Es wurden transnationale Patentanmeldungen analysiert. Zwischen 2000 und 2010 zeigt sich dabei eine Stagnation auf dem Niveau von etwa 40 Patentanmeldungen pro Jahr und anschließend bis 2018 eine Steigerung auf etwa 60 Anmeldungen. Auch bei der Auflistung der wichtigsten Länder für transnationale Patente im Themenfeld Leichtbau ist Deutschland auf Platz 1.

Das Stagnieren der Patentanmeldungen bis 2010 weist auf eine Phase der Neuorientierung im Technikzyklus hin. Aufgrund des anschließenden und aktuell anhaltenden Anstiegs der Patentanmeldungen sowie der stark ansteigenden Publikationszahlen kann die Technologie Leichtbau der Phase des Aufstiegs (Phase 5) zugeordnet werden. Leichtbau ist keine neue Erfindung und weist beispielsweise in der Luft- und Raumfahrt einen hohen Reifegrad auf, gewinnt aber durch sich ändernde Rahmenbedingungen – Notwendigkeit der Reduktion von CO₂-Emissionen, die häufig eng verknüpft sind mit dem Energieverbrauch – in einigen Branchen an Relevanz. Anwendungen, die bisher nicht rentabel waren, werden realisierbar. Die verschiedenen Branchen können sich dabei in unterschiedlichen Phasen des Technologiezyklus befinden, da die Implementierung von Leichtbauansätzen unterschiedlich weit fortgeschritten ist. In der Luft- und Raumfahrt beispielsweise ist der Leichtbau notwendigerweise seit Jahren etabliert und nimmt eine Vorreiterrolle ein, während der Leichtbau in der Transportbranche in eine frühere Phase

des Zyklus eingeordnet wird, da er hier zwar Anwendung findet aber erst in den letzten Jahren in der Breite zunehmend etabliert wird.

Innovationssystem-Analyse: Dem Innovationssystem des Leichtbaus können in Deutschland über 400 Unternehmen sowie knapp 200 Hochschulen und Universitäten zugeordnet werden. Darüber hinaus gibt es 79 außeruniversitäre Forschungseinrichtungen und 69 Netzwerke [83]. Eine Auswertung der EnArgus-Projektdatenbank der vergangenen 20 Jahre zum Stichwort Leichtbau ergab auf Seiten der Forschungseinrichtungen häufige Beteiligungen der Fraunhofer-Institute (13) und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (12) sowie der RWTH Aachen (4) [84].

Forschungspotenziale: Im Folgenden sind ausgewählte Forschungsempfehlungen dargestellt, welche sich als Ergebnis von Expertengesprächen, Literaturrecherchen sowie Projekterfahrungen ergeben. Für eine vollständige Liste wird erneut auf den Anhang verwiesen.

Ein wesentliches Ziel beim Thema Leichtbau ist die Vernetzung der zahlreichen kleinen und mittelständischen Unternehmen in Deutschland untereinander und mit den Forschungseinrichtungen. Aufgrund der Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten und Ausführungen von Leichtbaulösungen ist die Koordination verschiedenster Kompetenzen von besonderer Bedeutung, um die Energieeffizienzpotenziale auszuschöpfen.

LCAs sind ein wichtiges Vorgehen zur Abschätzung der Energieeinsparpotenziale, welche sich mit Leichtbaulösungen erzielen lassen. Eine LCA durchzuführen ist allerdings sehr aufwendig und für kleine Unternehmen nur schwer darstellbar. Daher müssen einheitliche, standardisierte Vorgehensweisen erstellt und zugänglich gemacht werden. Dazu zählt beispielsweise die (kostenlose) Verfügbarkeit von LCIA-Daten (life cycle impact assessment) wie dem Treibhausgaspotenzial in der Einheit CO₂-äq. für verschiedene Roh- und Betriebsstoffe oder die Erstellung von Fallbeispielen. Hier kann es hilfreich sein, Fallbeispiele neben den Vorteilen für bspw. die Produktivität auch mit ihren energetischen Vorteilen zu quantifizieren. Außerdem können virtuelle Prozessketten für den Systemleichtbau sowie computergestützte LCA dazu beitragen, Leichtbau in geeigneten Anwendungen zu etablieren.

2.3.13. Vakuumtechnologie

Für das Themenfeld Vakuumtechnologie wurde ein Quick-Scan erstellt. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Die vollständige Analyse, die aufgrund des fehlenden Experteninterviews als erster Entwurf und nicht als abgeschlossene Analyse zu verstehen ist, ist im Anhang zu finden.

Die Vakuumtechnologie findet in vielfältigen Industriezweigen Anwendung, beispielsweise in der Elektrotechnik, der Metallurgie oder der Lebensmittelindustrie [85]. Der Druck des Gases im Vakuum (dem gasentleerten Hohlraum) ist dabei um mindestens 300 mbar niedriger als außerhalb des Behälters [86]. Je nach Druck kann zwischen verschiedenen Vakuumbereichen, die in Tabelle 1.1 aufgeführt sind, unterschieden werden. Die benötigte Energie variiert dabei abhängig vom Vakuumbereich, aber auch abhängig vom benötigten vakuumierten Volumen. Zur Herstellung eines Vakuums werden Pumpen genutzt, die das Gas aus dem zu evakuierenden Behälter fördern oder es innerhalb der Vakuumanlage binden. Die gasfördernden Pumpen können in Verdrängerpumpen und kinetische Pumpen unterteilt werden, wobei Verdrängerpumpen in der Praxis am häufigsten Anwendung finden [85].

Deutschland gehört mit einem prozentualen Anteil von 15,1 % am weltweiten Export von Pumpen und Systemen zu den wichtigsten Herstellernationen im Jahr 2015 [87]. Zu den wichtigsten Playern in Deutschland im Bereich Vakuumtechnologie zählen Pfeiffer Vacuum Technology AG und Busch Vacuum Solutions. Neben den beiden Top Playern im deutschen Vakuummarkt gibt es weitere Vakuumtechnik-Anbieter, die einen Sitz in Deutschland haben, deren Mutterkonzern jedoch im Ausland ansässig ist, so zum Beispiel die SMC Deutschland GmbH, die Teil der japanischen SMC Corporation ist. Darüber hinaus gibt es viele mittelständische Unternehmen in Deutschland, die Vakuumtechnik produzieren. Ebenso wird an deutschen Universitäten zu Vakuumtechnologie geforscht.

In Deutschland wird der jährliche Endenergiebedarf für die Vakuumtechnik in der Industrie auf 240 GWh (Stand 2013) geschätzt. Aufgrund der gestiegenen Produktions- und Exportzahlen einerseits und Effizienzsteigerungen andererseits wird angenommen, dass der aktuelle Energiebedarf für die Vakuumanwendung immer noch bei 240 GWh pro Jahr liegt. Möglichkeiten zur Energieeinsparung wurden 2014 von Reichmann et al. [88] durch Recherche und Expert:innengespräche mit Vakuumpumpenherstellern und Vakuumanlagenbauern auf durchschnittlich 5 – 15 % beziffert und umfassen beispielsweise die Verbesserung der Geometrie, der Lager und der Strömungsführung oder die Nutzung der Kühlenergie.

Bezüglich der Effizienzsteigerung in der Vakuumtechnologie gibt es einige Hemmnisse, die überwunden werden müssen. Es herrscht zum einen ein Informationsdefizit über mögliche Optimierungsmaßnahmen seitens der Vakuumpumpenhersteller sowie der Anlagenplaner. Ebenso müssen die ermittelten Einsparmaßnahmen immer an die Gegebenheiten der Firmen angepasst werden, was Unsicherheiten mit sich bringt. Spezifische Aussagen über die Wirksamkeit der Maßnahmen beziehungsweise deren Einsparpotenzial lassen sich kaum bis gar nicht treffen. Hinzu kommen Ausfallzeiten, die entstehen, wenn Maßnahmen mit einem Pumpentausch oder Umbauarbeiten an der Anlage einhergehen. [88]

Unter Annahme des Gesamtenergiebedarfs für die Vakuumtechnologie von 240 GWh pro Jahr und einem Einsparpotenzial von durchschnittlich 10 % ergibt sich ein elektrisches Energieeinsparpotenzial von 24 GWh. Dieses Potenzial lässt sich beispielsweise im Rahmen eines Fachgespräches überprüfen, bei dem Expert:innen vom Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA, Bereich Kompressoren, Druckluft- und Vakuumtechnik) sowie Vertreter:innen der oben genannten Firmen, insbesondere Busch Vacuum Solutions als Unternehmen mit größtem Marktanteil in diesem Bereich, und Vertreter:innen aus relevanten Forschungsinstituten teilnehmen sollten.

Anzumerken ist zudem, dass sich die identifizierten Potenziale aufgrund des hohen Anteils der Pumpen am Gesamtenergiebedarf bei Vakuumanwendungen mit den Potenzialen in diesem Themenfeld überschneiden (siehe Kapitel 2.3.6)

2.3.14. Elektrische Antriebssysteme

Für das Themenfeld Elektrische Antriebssysteme wurde ein Quick-Scan erstellt. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Die vollständige Analyse befindet sich im Anhang.

In den Sektoren Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) werden in vielen Prozessen elektrische Antriebssysteme eingesetzt. Hierbei betrug im Jahr 2019 der Endenergieverbrauch elektrisch in mechanisch gewandelter Energie in Deutschland in diesen beiden Sektoren 644,6 PJ [89], was 7,1 % des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland entspricht. Dies zeigt die Relevanz dieses Themenfelds auf, zumal in der Zukunft durch die zunehmende Elektrifizierung sich diese Bedeutung noch steigern wird. Im Rahmen des Quick-Scans konnte zusammengefasst ein Endenergieeinsparpotenzial von

4,5 % ermittelt werden, wobei angenommen wurde, dass die Maßnahmen nur bei der Hälfte aller Antriebssysteme zum Einsatz kommen. Dieses Endenergieeinsparpotenzial setzt sich zusammen aus 0,5 % Einsparpotenzial durch die Erhöhung der Energieeffizienz der Antriebssysteme [90], [91], 1,5 % Einsparpotenzial durch das Vermeiden von überdimensionierten Antriebssystemen [91], 1,5 % Einsparpotenzial durch den Einsatz von (Synchron-)Reluktanzantrieben [91], [92] und 1,0 % Einsparpotenzial durch das Monitoring von Energiedaten in den Antriebssystemen [91].

Ermitteltes Einsparpotenzial: Mit der Annahme, dass der Endenergiebedarf der Branche jährlich um 0,5 % wächst, ergibt sich für das Jahr 2030 ein Einsparpotenzial von 10,74 PJ. Dabei wird eine volle Diffusion der Forschungsimpulse in die Anwendung ab dem Jahr 2040 angenommen. Es ergibt sich ein kumulierter eingesparter Energieeinsatz bis zum Jahr 2050 von 588,77 PJ. Der Verlauf der jährlichen Endenergieeinsparung sowie der kumulierten eingesparten Endenergie ist in Abbildung 2-23 zu sehen.

THG-Minderungspotenzial: Das THG-Minderungspotenzial ergibt sich aus dem Endenergieeinsparpotenzial multipliziert mit dem jeweiligen Emissionsfaktor. Im Bereich elektrischer Antriebssysteme in Industrie und GHD sind Energieeinsparungen im Bereich Strom zu erzielen. Hierbei ergibt sich ein THG-Minderungspotenzial von 0,68 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2030 und 0,18 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2050. Es ergeben sich kumulierte verminderte THG-Emissionen von 14,50 Mio. t CO₂-äq. für den Zeitraum von 2025 bis 2050. Hinsichtlich der kumulierten verminderten THG-Emissionen wird der Schwellenwert von 5 Mio. t CO₂-äq. im Jahr 2034 überschritten. Der Verlauf der jährlichen verminderten THG-Emissionen sowie der kumulierten verminderten THG-Emissionen ist in Abbildung 2-24 zu sehen.

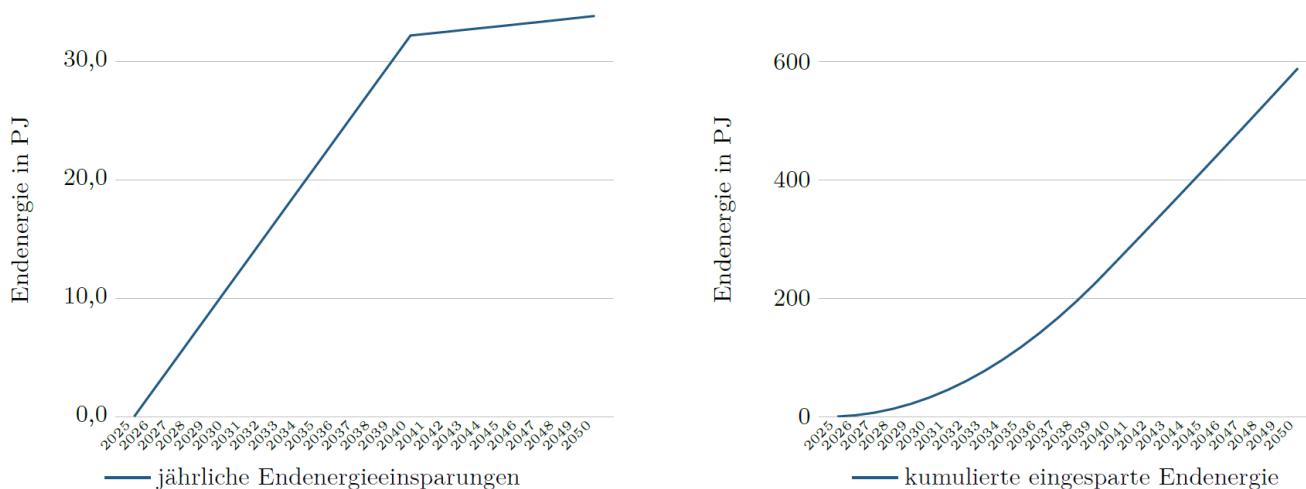


Abbildung 2-23: Jährlich eingesparte Endenergie (links) und kumulierte eingesparte Endenergie (rechts) durch die Forschungsimpulse im Bereich der elektrischen Antriebssysteme von 2025 bis 2050.

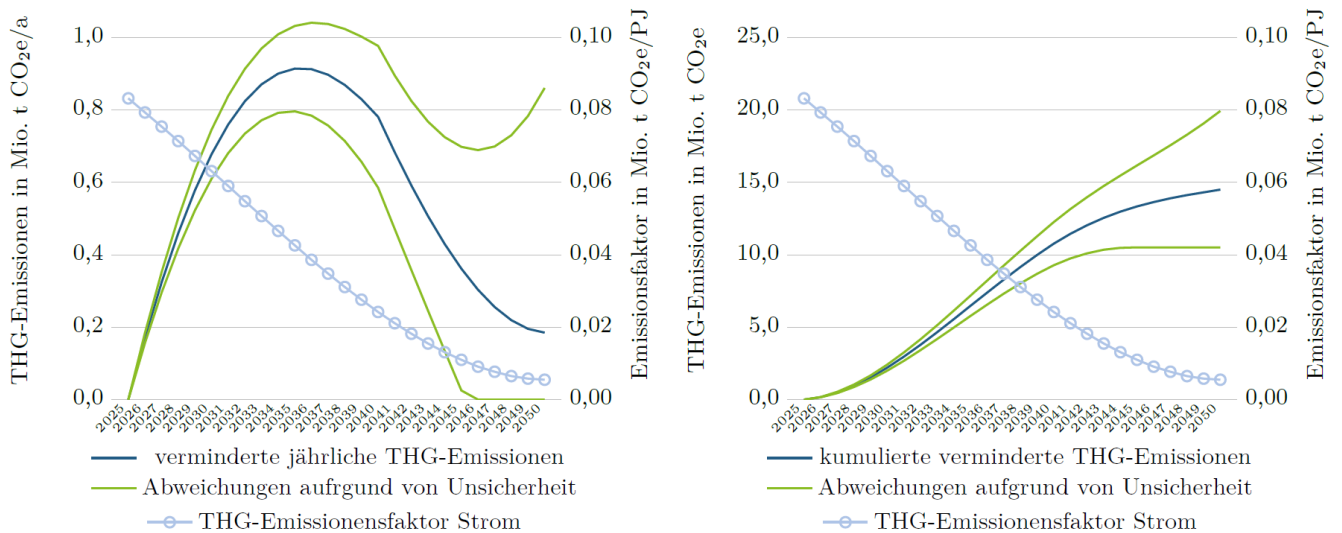


Abbildung 2-24: Jährliche verminderte THG-Emissionen (links) und kumulierte verminderte THG-Emissionen (rechts) durch die Forschungsimpulse im Bereich der elektrischen Antriebssysteme von 2025 bis 2050.

2.3.15. Gleichstromnetze

Für das Themenfeld Gleichstromnetze in den Sektoren Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) wurde ein Quick-Scan erstellt. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Die vollständige Analyse befindet sich im Anhang.

Für elektrische Versorgung in den Sektoren Industrie und GHD wird üblicherweise ein dreiphasiges Wechselstromnetz verwendet. Hier kann durch den Umstieg auf eine Gleichstromversorgung, vor allem im Bereich der elektrischen Antriebstechnik, eine Steigerung der Energieeffizienz erreicht werden. Im Rahmen des Quick-Scans konnte zusammengefasst für den Bereich der elektrischen Antriebstechnik ein Energieeinsparpotenzial von 13,5 % durch den Einsatz von Gleichstromnetzen identifiziert werden. Dieses setzt sich aus 2,5 % Einsparpotenzial durch die reduzierte Anzahl an AC/DC-Wandlern (Gleichrichter) [93], 10,0 % Einsparpotenzial durch die Rekuperation von Bewegungsenergie der elektrischen Antriebe [93] und 1,0 % Einsparpotenzial durch die Vermeidung/Verminderung von kapazitiven Umladeverlusten zusammen [93]. Hierbei wurde für die Betrachtung der möglichen Einsparpotenziale dieser Technik der Endenergieverbrauch elektrisch in mechanisch gewandelter Energie in Deutschland im Jahr 2019 in den Sektoren Industrie und GHD von 644,6 PJ zugrunde gelegt [89].

Ermitteltes Einsparpotenzial: Mit der Annahme, dass der Endenergiebedarf der Branche jährlich nicht wächst, ergibt sich für das Jahr 2030 ein Einsparpotenzial von 17,4 PJ. Dabei wird eine volle Diffusion der Forschungsimpulse in die Anwendung ab dem Jahr 2050 angenommen. Es ergibt sich ein kumulierter eingesparter Energieeinsatz bis zum Jahr 2050 von 1131,3 PJ. Der Verlauf der jährlichen Endenergieeinsparung sowie der kumulierten eingesparten Endenergie ist in Abbildung 2-25 zu sehen.

THG-Minderungspotenzial: Das THG-Minderungspotenzial ergibt sich aus dem Endenergieeinsparpotenzial multipliziert mit dem jeweiligen Emissionsfaktor. Im Bereich Gleichstromnetze in Industrie und GHD sind Energieeinsparungen im Bereich Strom zu erzielen. Hierbei ergibt sich ein THG-Minderungspotenzial von 1,1 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2030 und 0,5 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2050. Es ergeben sich kumulierte verminderte THG-Emissionen von 25 Mio. t CO₂-äq. für den Zeitraum von 2025 bis 2050. Hinsichtlich der kumulierten verminderten THG-Emissionen wird der Schwellenwert von 5 Mio. t CO₂-

äq. im Jahr 2031 überschritten. Der Verlauf der jährlichen verminderten THG-Emissionen sowie der kumulierten verminderten THG-Emissionen ist in Abbildung 2-26 zu sehen.

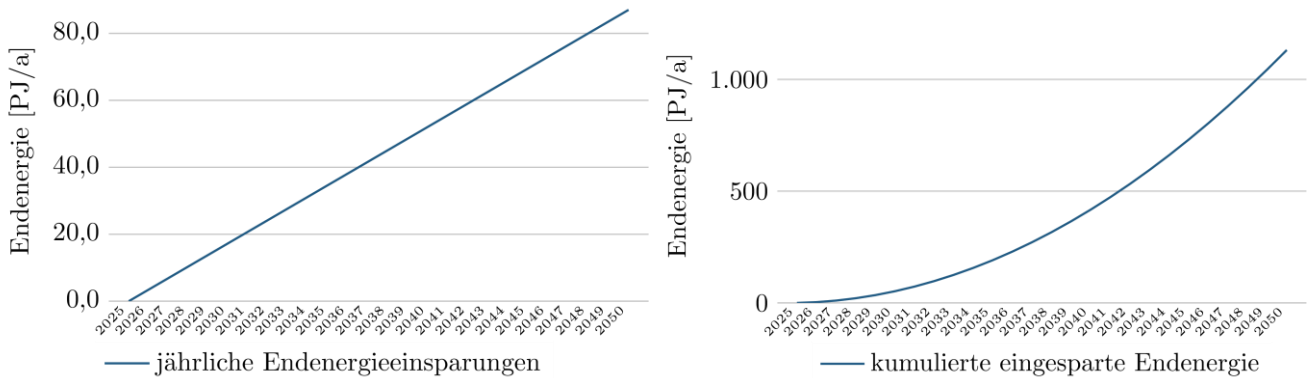


Abbildung 2-25: Jährlich eingesparte Endenergie (links) und kumulierte eingesparte Endenergie (rechts) durch den Einsatz von Gleichstromnetzen in den Sektoren Industrie und GHD von 2025 bis 2050.

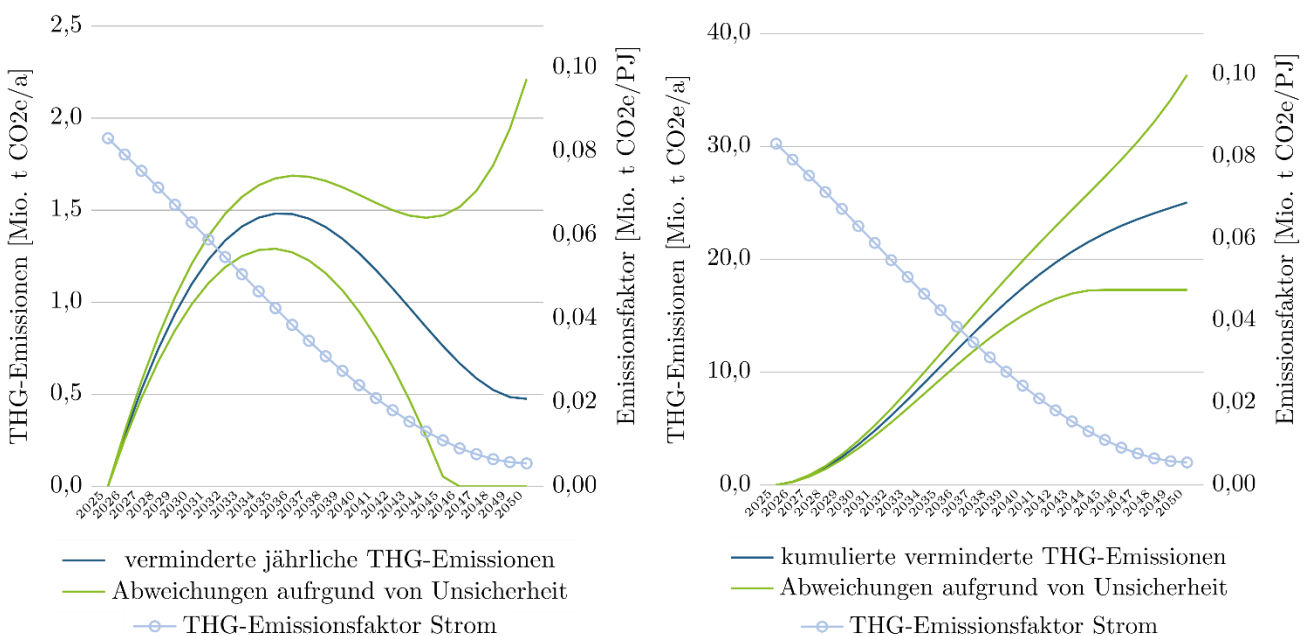


Abbildung 2-26: Jährliche verminderte THG-Emissionen (links) und kumulierte verminderte THG-Emissionen (rechts) durch den Einsatz von Gleichstromnetzen in den Sektoren Industrie und GHD von 2025 bis 2050.

2.3.16. Zusammenfassung für das Forschungsfeld Fertigungstechnik

Im Forschungsfeld Fertigungstechnik wurden die zuvor aufgeführten Themen analysiert. Die Ergebnisse bezüglich der kumulierten verminderten Emissionen bis 2050, die Realisierung der THG-Minderung von 5 Mio. t CO₂-äq. sowie die Form, in der die Themen bearbeitet wurden, sind in Tabelle 2-8 dargestellt. Weitere zusammenfassende Darstellungen der Ergebnisse befinden sich in Kapitel 2.10.

Tabelle 2-8: Übersicht über die betrachteten Themen im Forschungsfeld Fertigungstechnik

Technik	Bearbeitet als (E= EDUAR&D Q= Quick-Scan)	Potenzial kumuliert bis 2050 optimistische Randbedingungen [Mt CO2-äq.]	Potenzial kumuliert bis 2050 Status Quo Policy-Randbedingungen [Mt CO2-äq.]	Risikobetrachtung	
				F&E-Perspektive $\sum D_{R,1}$	Markteinführung und -diffusion $\sum D_{R,2}$
Additive Fertigung	E	0,28	0,28	21	15
Trocknung	E	43,63	30,72	16	11
Kunststoffverarbeitung	E	7,14	5,10	16	13
Pumpen und Systeme	Q	17,78	13,12	15	11
Reifenherstellung	Q	0,96	0,96	15	13
Batteriezellenfertigung	E	-	-	-	-
Kühl- und Kältetechnik	E+Q	9,08	7,47	18	21
Moderne Produktionsinfrastruktur	E	-	-	-	-
Raumlufttechnik	Q	8,1	8,10	-	-
Leichtbau	E	0,22	0,22	20	23
Vakuumtechnologie	Q	-	-	-	-
Elektrische Antriebssysteme	Q	14,5	14,50	21	20
Gleichstromnetze	Q	25,04	18,55	18	18

2.4. Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik

Die chemische Verfahrenstechnik, als Teilgebiet der Verfahrenstechnik, beschäftigt sich mit der technischen Durchführung von Prozessen, bei denen Stoffe (Gase, Flüssigkeiten oder Feststoffe) hinsichtlich ihrer Zusammensetzung, Struktur oder Eigenschaften verändert werden. Dabei nutzt sie chemische, physikalische oder biologische Verfahren. In den einzelnen Industriebereichen laufen dabei stoffwandelnde Vorgänge in großer Zahl in unterschiedlichsten Maßstäben und in einer nahezu unüberschaubaren stofflichen Vielfalt ab [94]. Innerhalb der Produktionstechnik kann so eine Abgrenzung zur Fertigungstechnik abgeleitet werden, die diese chemischen Ausgangsmaterialien zu Waren mit bestimmter geometrischer Form weiterverarbeitet.

Die Abgrenzung der einzelnen Branchen-Forschungsfelder findet anhand der Klassifikation der Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes, laut statistischem Bundesamts, statt und umfasst für die chemische Verfahrenstechnik die Klassen 20 Herstellung von chemischen und 21 Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen [1]. Unter diesen Erzeugnissen versteht man die Produkte der chemischen und pharmazeutischen Industrie, die im Geschäft mit industriellen Kunden (74 % Business-to-Business, Industrie, Landwirtschaft, Handel) und zu kleinerem Umfang auch für den Endverbraucher (23 %, Business-to-Consumer) bereitgestellt werden [95]. Es besteht dabei eine hohe technologische Überschneidung mit der Klasse 19.2 Mineralölverarbeitung, welche die Raffinerietechnik umfasst und damit die Verbindung zur Petrochemie darstellt.

Anhand der Produktionsmengen unterscheidet man zwischen Grund- bzw. Basischemikalien und Spezialitäten. Zu den Grundchemikalien zählen organische und anorganische Grundstoffe, Düngemittel, Stickstoffverbindungen, Polymere (Kunststoffe und synthetischer Kautschuk in Primärformen). Diese werden in World-Scale-Anlagen in kontinuierlichen Prozessen erzeugt, die sich durch hohe Kapital- und niedrige Personalintensität auszeichnen [96]. Es handelt sich bei diesen Massenprodukten um einfache vielfältig anwendbare chemische Substanzen, die für den Weiterverkauf oder die Weiterverarbeitung durch Industriekunden (business-to-business, B2B) bestimmt sind. Die Großanlagen arbeiten dabei bei einer hohen Auslastung kosten- und energieeffizient. Teillastbetriebe hingegen sind technisch nur bedingt möglich und können daher bei fehlender konjunktureller Nachfrage zu einem unrentablen Anlagenbetrieb führen.

Die Herstellung von Fein- und Spezialchemikalien umfasst Wirkstoffe, Pigmente und Funktionsmaterialien [5]. Diese Produkte werden für spezifische Anwendungen hergestellt und verfügen über hohe spezifische Preise. Die Spezialitäten werden sowohl von mittelständischen und Großunternehmen in der Regel in batchweise betriebenen Mehrzweckanlagen hergestellt, die eine flexible Marktversorgung gestatten. Die Umstellung der Produktionsprozesse von Spezialitäten vom satzweisen Betrieb zu einer kontinuierlichen Produktion stellt dabei einen gegenwärtigen Trend dar. Dabei werden bessere Produktqualität, verminderte Rüstzeiten, hohe Raum-Zeit-Ausbeuten und ein geringerer Personalbedarf angestrebt. Zudem können kontinuierliche Anlagen hinsichtlich ihres Auslegungspunktes besser applikationsspezifisch ausgelegt werden [97]. Für das Segment der Spezialitäten spielt die Innovationsfähigkeit und die Kundennähe eine viel wichtigere Rolle als bei den Grundstoffen.

Zu einer der Stärken des deutschen Industriestandorts gehören die Chemieparcs. Diese ermöglichen die intensive Nutzung von Synergie- und Verbundeffekten über Unternehmensgrenzen hinweg. Der Standortbetreiber ist Dienstleister für die ansässigen Unternehmen und betreibt die komplette Infrastruktur sowie die zentralen Umweltschutzeinrichtungen. Dieser Service erlaubt einen engen Verbund der Pro-

duktionsanlagen mit hoher Effizienz für Roh-, Reststoffe und Energie. Einen weiteren Beitrag zur Ressourceneffizienz und Klimaschonung leistet auch die Stromeigenerzeugung durch Kraft-Wärme-Kopplung. So kann eine optimale Versorgung der Industriestandorte nach ihren Wärme- und Strombedürfnissen sichergestellt werden.

2.4.1. Technologiefeldübergreifende Hemmnisse und Engpässe im Forschungsfeld

Die Chemische Verfahrenstechnik zeichnet sich durch eine hohe Intensität bezüglich der Forschungs- und Investitionsaufwendungen aus. Es besteht daher ein aktiver Kosten- und Wettbewerbsdruck bei einer gleichzeitigen Best-Practice-Orientierung, um getätigte Investition sicher zu amortisieren. Neue Technologien im Umfeld der chemischen Verfahrenstechnik müssen sich daher durch eine ausgeprägte Wirtschaftlichkeit auszeichnen. Zusätzlich dürfen Effizienztechnologien den essentiellen Betrieb der Produktionsanlagen nicht beeinflussen. Weiterhin bestehen durch Verbundstrukturen oft komplexe Interaktionen unterschiedlicher Herstellverfahren zueinander. Die Substitution oder Veränderungen an Einzelverfahren innerhalb eines Verbundes können daher komplexe technische Auswirkungen verursachen. Im Speziellen disruptive Produkt- und Prozessinnovationen diffundieren daher deutlich langsamer als inkrementelle Verbesserungen. Weiterhin besteht eine komplexe Herausforderung hinsichtlich der Energieversorgung chemischer Prozesse. 64 % der zugeführten Prozesswärme muss hierbei oberhalb von 540 °C zugeführt werden [28]. Die Auswahl geeigneter Versorgungstechniken ist durch dieses Temperaturniveau limitiert. Gleichzeitig können sich aus den Zielkorridoren der Energiewende Konflikte ergeben. Demnach können Technologien zur Reduzierung von THG-Emissionen (CCS, CCU) deren Ausstoß reduzieren, dabei jedoch den energetischen Bedarf erhöhen. Die Zielpfade der energetischen Effizienzsteigerung und der Dekarbonisierung der Energieversorgung müssen daher stets gemeinsam betrachtet werden. Durch die energieintensive Produktion der Chemieindustrie ist Sie im besonderen Maße abhängig von der zukünftigen Energiepreisentwicklung. Stark fluktuierende Energiepreise oder fehlende politische Rahmenbedingungen können sich daher negativ auf die Investitionsbereitschaft in Effizienztechnologien auswirken. Zuletzt muss bedacht werden, dass die gegenwärtigen Wachstumszentren der Weltchemienachfrage in den Schwellenländern Asiens liegen. Der Ausbau von Produktionskapazitäten und des Produktabsatzes steht dabei gegenwärtig im Vordergrund. Gleichzeitig erfolgt jedoch auch der aktive Aufbau technologischer Innovationssysteme in diesen Ländern. Für die deutsche chemische Industrie resultiert hieraus ein Wettbewerb hinsichtlich der besten verfügbaren Produktionstechniken. Bei unzureichenden F&E-Aktivitäten ist dabei ein Verlust der technologischen Führung und damit auch ein Rückgang der Wettbewerbsfähigkeit zu erwarten. Diese Situation würde ein großes ökonomisches Hemmnis für die zukünftigen Aktivitäten der chemischen Industrie und deren Effizienzforschung darstellen.

2.4.2. Betrachtete Technologien im Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden drei Technologien durch die Anfertigung von Technologieanalysen untersucht. Dabei handelt es sich um die Organophile Nanofiltration (OSN), welche eine effiziente Trenntechnik von Stoffgemischen darstellt. Es wurde weiterhin eine Untersuchung zum Einsatz von Technischen Nanokatalysatoren und der additiven Fertigung im Bereich der chemischen Verfahrenstechnik angefertigt. Die Auswahl der Themen wurde dabei durch Vorrecherchen unterstützt. Jede der vorgestellten Technologien verfügt hierbei über einzigartige Potenziale und Effizienzmechanismen. Durch die Betrachtung der unterschiedlichen Aspekte wird versucht, die komplexe technologische Situation innerhalb der chemischen Verfahrenstechnik zu skizzieren und damit ein möglichst umfangreiches Bild der Effizienzpotenziale darzustellen.

Die organophile Nanofiltration verfügt dabei über ein großes Effizienzpotenzial, stellt jedoch einen disruptiven Ansatz für den Bereich der etablierten thermischen Trenntechnik dar. Der Einsatz von (heterogenen) Katalysatoren ist etabliert und wird für mehr als 90 % aller chemischen Herstellverfahren [98] genutzt. Inkrementelle Optimierungen durch den Einsatz nanostrukturierter Komposite können daher gut in bestehenden Produktionsinfrastrukturen realisiert werden. Gleichzeitig ermöglichen die Nanokatalysatoren jedoch auch neuartige Reaktionsführungen und verfügen damit auch über ein Potenzial als Verfahrensinnovation. Der Einsatz additiv hergestellter Bauteile und Equipment zeichnet sich den Bereich der chemischen Verfahrenstechnik durch seine unterschiedlichsten Anwendungsformen aus. Hierbei können Ventile, Mischer, Rührer, Einbauten oder Wärmetauscher eingesetzt werden und zu inkrementellen Verbesserungen führen. Dabei ist relevant, dass die Vorteile der einzelnen Anwendungen oft Applikationsspezifisch sind und auf den Fertigungseigenschaften der additiven Fertigung basieren. Die Energieeffizienz stellt dabei für die meisten Applikationen nicht den unmittelbaren Einsatzvorteil dar. Dieser Aspekt wird vorrangig bei der Optimierung von Reaktoren oder trenntechnischen Einrichtungen vermutet, welche auf additiv hergestellten Bauteilen beruhen. Diese Applikationen werden jedoch weitreichend von der Verbreitung der additiven Fertigung in sämtlichen Anwendungen profitieren. Die Diffusion kann daher nahezu unabhängig von den Effizienzlösungen der additiven Fertigung erfolgen.

2.4.3. Organophile Nanofiltration

Als OSN wird das Membrantrennverfahren bezeichnet, mit dem ein gelöster Stoff im Molmassenbereich von 200-1000 g/mol durch eine Membran zurückgehalten wird, während das organische Lösungsmittel mit einer Molmasse von 32 - ca.100 g/mol diese passiert. Die eingesetzten Membranen arbeiten im Allgemeinen nach dem physikalischen Prinzip der „Siebung nach Größe“ oder „Lösung-Diffusion“. [99], [100]

Als Triebkraft wirkt die Differenz der chemischen Potenziale, die im realen Prozess als Druckdifferenz über die Membran realisiert wird, die unter industriellen Bedingungen zwischen 2-40 bar betragen kann. Das zu trennende Gemisch wird unter Druck der Membran zugeführt: Sperrige gelöste Moleküle diffundieren langsam durch die Membran. Aus entropischen Gründen neigen diese Moleküle zu einer geringen Sorption durch die Membranmaterialien. Aus diesem Grund werden sie von der Membran zurückgehalten und konzentrieren sich auf der Retentatseite. Die kleineren Lösungsmittelmoleküle durchdringen umgekehrt vorzugsweise die Membran [100]. Während des Prozesses wird die stromabwärts gelegene Seite der Membran auf Atmosphärendruck gehalten, so dass die Druckdifferenz über der Membran die selektive Permeation des Lösungsmittels bezüglich des gelösten Stoffes steuert.

Marktkontexturierung

Trotz einer großen Anzahl von Veröffentlichungen über die Entwicklung neuer Polymermembranen für OSN ist die Anzahl der kommerzialisierten Membranen eher begrenzt.

Im Jahr 2010 übernahm die Evonik Industries AG (Essen, Deutschland) die Membrane Extraction Technology (London, UK). Dabei wurden die Polyimid-Membranen des Unternehmens weiterentwickelt und als PuraMem®-Serie auf den Markt gebracht [101].

SolSep BV (Apeldoorn, Niederlande) bietet sechs NF-Membranen an. Es wird angenommen, dass es sich bei diesen Membranen um TFC-Membranen handelt und einige von ihnen eine Silikon-Deckschicht besitzen [102].

Die GMT Membrantechnik GmbH (Rheinfelden, Deutschland) ist ein Tochterunternehmen der BORSIG-Gruppe (Berlin, Deutschland) und bietet drei verschiedene Membranen für Anwendungen in organischen Lösungsmitteln an. Es handelt sich um Verbundmembranen aus Polydimethylsiloxan (PDMS) auf einem Träger aus Polyacrylnitril (PAN). Die Silikonschicht wird als Coating aufgebracht und anschließend durch Bestrahlung vernetzt, um eine Quellung in organischen Lösemitteln zu vermeiden.

Air Liquide übernahm 2015 die PoroGen Corporation und damit ihr Portfolio im Bereich der PEEK-Hohlfasermembranen übernommen. Diese sind so konzipiert, dass sie bei hohen Temperaturen in aggressiven Umgebungen betrieben werden und dort Moleküle im Nanometerbereich zurückweisen können.

AMS Technologies (Yehuda, Israel) bietet eine umfangreiche Palette innovativer säurebeständiger, alkalibeständiger und lösungsmittelstabiler Nano- und Ultrafiltrationsmembranen mit Elementen für den Einsatz in sauren, alkalischen und organischen Lösungsmitteln. Sie produzieren chemisch und thermisch stabile NanoPro- und UltraPro-Membranen, die für eine Vielzahl von industriellen Trennungen geeignet sind.

Energetische- und -wirtschaftliche Bewertung

Der Endenergieverbrauch für Destillation und Rektifikation in Deutschland kann nach Humphrey und Fair [103] auf 180 bis 260 PJ abgeschätzt werden. Unter der Annahme einer sofortigen Verbreitung in den nächsten 10 Jahren (bis 2030) mit einem Anteil von 10 bis 20 % einnehmen, würde das Verbrauchspotenzial mindestens 20 bis 35 PJ/a betragen. Mit einer Verbesserung des Wirkungsgrads durch den Einsatz der OSN von 80 % würde das Einsparpotenzial in den nächsten 10 Jahren bei sofortiger Verbreitung der OSN damit 16 bis 30 PJ/a betragen. Werden jedoch die hierzu notwendigen Investitions- und Planungsvorläufe dieser disruptiven Innovation bedacht, könnte das mögliche Einsparpotenzial für 2030 auch lediglich 3 PJ/a betragen. Das dabei vorhandene Gesamtpotenzial, welches bis 2050 realisiert werden könnte ist dabei jedoch mit ca. 230 PJ/a sehr groß und sollte als Motivation für zeitnahe Diffusionsaktivitäten verstanden werden.

Technologiezyklusanalyse

Eine Patent- und Publikationsanalyse wurde zur Identifizierung der Technologiezyklusposition angefertigt. Die OSN-Technologie, d.h. Membranen und Membrantrennverfahren im Zusammenhang mit organischen Lösungsmitteln befinden sich in vielen Anwendungsgebieten noch in einem frühen Stadium der Markterschließung. Eine Einordnung erfolgt daher in Phase 5 des Technologiezyklus, d.h. die Technik befindet sich in der Phase des Aufstiegs.

Innovationssystemanalyse

Zentrale Akteure des Innovationssystems sind neben den Membran-, Modul und Anlagenbauern, Forschungsinstituten sowie die industriellen Anwender. Zudem wird das Innovationssystem durch die F&E-Politik beeinflusst und kann von öffentlich geförderten Vorhaben profitieren. Diese ermöglichen es Pilot- und Demonstrationsvorhaben zu realisieren. Dabei wären die folgenden durch das BMWi geförderten Vorhaben zur OSN hervorzuheben:

- „Organophile Nanofiltration für die nachhaltige Produktion in der Industrie“ (2006-2008)
- Verbundprojekt OPHINA (2010-13)
- Verbundprojekt Nanomembrane (2010-13)
- Verbundprojekt ESIMEM (2015-18)

- Thema eines TP des Exzellenzclusters „Tailor Made Fuels from Biomass“ (2007-18)
- 2 Teilprojekte des SFB/Transregio 63 InPROMT (2010-2021)

Ableitung möglicher Entwicklungsziele

Die technischen F&E-Ziele der OSN-Technologie sind derzeit:

- Neue verbesserte Membranmaterialien, siehe oben, für neue Anwendungen und ihre Überführung aus dem Labor- in den industriellen Maßstab unter Beteiligung aller Akteursgruppen des Innovationssystems
- Verbesserung der Prozessentwicklungswerkzeuge, z.B. durch systematische Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen Membran, gelöster Substanz und Lösungsmittel und der Ableitung von Heuristika, um Trennprobleme schneller dem besten OSN-Trennsystem zuzuordnen
- Bereitstellung von Modulmodellen für die Einbindung in kommerzielle Prozesssimulatoren
- Entwicklung von großskaligen Demonstrationsprozessen, um das Vertrauen in die Technologie zu erhöhen und die Marktdiffusion zu beschleunigen
- Erschließung neuer Anwendungsfelder und Überführung neuer Membranen in den industriellen Maßstab, um die Lücke zwischen Entwicklung und Anwendung zu schließen

Identifikation von technologischen und ökonomischen Hemmnissen

OSN ist keine Technologie, die im Sinne von „plug-and-play“ in bestehende Verfahren integriert werden kann. Eine neue Prozessführung ist erforderlich und muss entwickelt werden. Dabei stellt die Umstellung eines funktionierenden Produktionsprozesses immer ein Risiko dar. Da Produktqualität und Liefersicherheit entscheidende Kriterien in der industriellen Produktion sind.

Ein weiteres Hemmnis für die Implementierung neuer Trenntechniken, ist die konservative Haltung der chemischen Industrie bei der Verfahrensauswahl. Die OSN muss gleichberechtigt in die Standardtoolbox der Grundoperationen neben den etablierten Konkurrenztechnologien aufgenommen werden, um bei der Lösung eines Trennproblems, schon während des Prozessdesigns berücksichtigt werden zu können. Auch das Technologie-Wissen ist im Vergleich zu den langjährigen Erfahrungen mit Konkurrenztechnologien noch verhältnismäßig gering, muss ausgebaut und stärker im methodischen Prozessdesigns verankert werden.

Empfehlungen und mögliche Policy-Maßnahmen

Aufgrund der dargelegten Potenziale, Chancen, aber auch Hemmnisse braucht die OSN:

- Eine gezielte grundlagenorientierte Förderpolitik zur Entwicklung von neuartigen verbesserten Membranmaterialien und applikationsspezifischen Fragestellungen des Membranbetriebs (unterschiedliche Feed-Zusammensetzungen, Verunreinigungen, Langzeitstabilität)
- Eine verstärkte marktorientierte Technologieförderung und Investitionen, für die Erschließung neuer Anwendungsfelder, Pilotanwendungen und Verfahrensführungen, um weitere Anwender und Anlagenbauer für die Technologie zu interessieren
- Spezifisch zugeschnittene Qualifizierungskonzepte um KMU über OSN-Anwendungen zu informieren und der Membrantechnologien einen prominenten Platz in der universitären Ausbildung von Ingenieuren sowie in der beruflichen Weiterbildung einzuräumen

2.4.4. Additive Fertigung in der chemischen Verfahrenstechnik

Die Additive Fertigung (AM, 3D-Druck) ist eine zusammenfassende Bezeichnung für Technologien, die ein Bauteil, auf Basis eines digitalen 3D-Modells durch schichtweises Auftragen des Ausgangsmaterials sukzessive aufbauen. Die AM wird als „disruptive Technologie“ eingestuft, es handelt sich bei ihr um einen neuen Fertigungsansatz im Vergleich mit den konventionellen subtraktiven Verfahren. Bei der Entwicklung der Additiven Fertigung kann nicht an bestehende Wissensbestände angeknüpft. Bei breitem Einsatz ist mit erheblichen Strukturveränderungen in der industriellen Serienproduktion zu rechnen, die außerdem zu neuen Geschäftsmodellen und veränderten Wertschöpfungsketten führen. [104]

Chancen und Relevanz

SIEMENS zeigte 2017 in einer peer-reviewed cradle-to-gate-Analyse mit Daten aus der eigenen AM-Fertigung, dass bei geeigneter Bauteilwahl bei Verwendung des 3D-Drucks (LM-PBF) bis zu 46 % der CO₂-Äquivalente (global warming potenzial) und bis zu 70 % des Ressourcenverbrauchs (abiotic depletion potenzial) gegenüber herkömmlicher Fertigung eingespart werden können [105]. Darüber hinaus bestehen Optimierungspotenziale von diskontinuierlichen Produktionsprozessen in der Pharma- und Wirkstoffsynthese oder der Feinchemie. Die Reduzierung thermischer Massen, beispielsweise an Reaktoren von Multi-purpose-Anlagen kann dabei zu einer Abnahme des spezifischen Energiebedarfs und Aufheizphasen führen [106]. Darüber hinaus können durch die additive Fertigung neuartige Apparatekonzepte gefertigt werden und mit zusätzlichen Funktionalisierungen versehen werden. Hierzu zählt die Möglichkeit dünnwandige Strukturen für integrierte Heiz- und Kühllösungen darzustellen [107]. Mittels dieser Konzepte können Reaktionstrajektoren optimiert und die Performance chemischer Reaktoren optimiert werden. Für den Bereich der Grundlagenchemie sind hierdurch hocheffiziente Reaktionssysteme denkbar. Bezüglich der resultierenden Energiebedarfsminderung wird dabei eine gegenwärtige technologische Verbreitung von 3 % angenommen. Bei einem spezifischen Optimierungspotenzial von 5 % und einer jährlich zunehmenden Verbreitung von 5 % kann das mögliche Energieeinsparpotenzial für 2020 auf 0,9 PJ/a und für 2050 auf 17,6 PJ/a abgeschätzt werden. [108], [109]

Akteure im Forschungs- und Entwicklungsbereich

Für 2019 wurde das weltweite Marktvolumen der additiven Fertigung auf 10 Mrd. US\$ geschätzt und umfasst den Verkauf von Hardware, Software, Fertigungsmaterial, Post-Processing-Lösungen und Applikations-Dienstleistungen. Die Hardware-Ausrüster stellen dabei mit 130 aktiven Unternehmen die größte Gruppe der Marktakteure dar [110]. Eine weitere wichtige Gruppe von Akteuren sind die potentiellen Nutzer (BASF, Evonik, Merck) von additiv-hergestelltem Prozessequipment. Die Anwender und Ausrüster agieren dabei aktiv mit Forschungseinrichtungen. Hierbei bestehen Fragestellungen bezüglich des additiven Fertigungsprozesses und der Generierung von Anwendungsvorteilen durch die hergestellten AM-Strukturen. Abschließend muss die öffentliche Forschungsförderung als relevanter Akteur vermerkt werden. Diese initiiert und fördert Forschungsvorhaben zur Entwicklung neuartiger technischer Ansätze und ermöglicht die Demonstration resultierender Effizienzvorteile.

Forschungs- und Entwicklungs-Themen

Die AM besitzt durch ihre vielschichtigen Anwendungsmöglichkeiten ein relevantes Potenzial für die chemische Verfahrenstechnik. Hierbei bestehen jedoch gegenwärtige Forschungs- und Entwicklungsbedarfe. Im Rahmen des EE4InG-Workshops „Effizienzpotenziale der additiven Fertigung in der Prozessindustrie“ wurden daher Perspektiven, Potenziale und Forschungsthemen identifiziert [111].

Die AM hat das Potenzial grundlegend neue Konstruktionsprinzipien für Apparate und Maschinen in die chemische Verfahrenstechnik einzuführen. Hierzu zählt der Einsatz von Multi-Scale-Simulationen und deren Integration in der Entwurfsmethoden der AM. Gleichzeitig müssen dabei Schnittstellen zu den Planungsmethoden der Verfahrenstechnik geschaffen werden. Zudem muss eine Integration der guten Ingenieurpraxis in Design- und Konstruktionssysteme erfolgen (z.B. für Festigkeitsbetrachtung) und Mechanismen für die Freigabe und Zulassung vorgesehen werden. Dabei könnten die Design- und Konstruktionsvorgänge durch eine Individualisierung von Anwendungstemplates erfolgen. Bauteile müssten dann nur noch für den Anwendungsfall individualisiert werden. Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben sollten Lösungen für eine Zertifizierung und Standardisierung bedacht werden. Dabei müssen die eingesetzten Werkstoffe, Fertigungsverfahren und Maschinendaten berücksichtigt werden. Zusätzlich wäre Knowhowtransfer aus dem Bereich der Medizintechnik denkbar, da hierbei bereits etablierte Standardisierungslösungen bestehen. Die VDI-Richtlinie 2776 „Modulare Anlagen“ könnte dabei als Ausgangspunkt für einen Standardisierungsvorgang in der Prozesstechnik dienen.

Die energetischen Vorteile im Bereich des Bauteileinsatzes sind hinsichtlich der Energieeffizienz dominierend gegenüber dem additiven Fertigungsschritt von metallischen Werkstoffen. Trotzdem bestehen bei der additiven Herstellung verfahrenstechnischer Apparate besondere Effizienzpotenziale. Demnach können Hochleitungslegierungen materialsparend und in maßgeschneiderter Form eingesetzt werden. Die AM besitzt eine besondere Eignung zur Fertigung multifunktionaler Apparate (z.B. Heizen und Mischen) und kann modulare Anlagenkonzepte realisieren. Dabei sollten neben kontinuierlichen Prozessen auch Mehrzweckanlagen bedacht werden. Darüber hinaus kann die AM die Entwicklung effizienter Apparate und Verfahren durch den Ansatz des „Rapid Prototyping“ unterstützen und damit Entwicklungszeiten verkürzen.

Die Entwicklung von AM-Konzepten sollte dabei durch Modellierungs- und Bewertungsansätze begleitet werden. Die Abbildung instationärer und mehrphasigen Multikomponentensystemen ist dabei ein relevanter Forschungsgegenstand. Die Entwicklung vereinfachter Modellansätze (Short-Cuts) kann zudem die kurz- bis mittelfristige Verfügbarkeit von technisch-anwendbaren Abschätzungen ermöglichen. Für digitale Methoden und Werkzeugen sollten dabei Lösungen im Rahmen eines Open-source-Ökosystems angedacht werden. Zusätzlich muss die Weiterentwicklung von Bewertungskompetenzen zum Aufzeigen von Energieeinsparpotenzialen berücksichtigt werden. Dabei sollte die Potenziale der AM durch Leuchtturmprojekte gezielt aufgezeigt werden. Die Durchführung entsprechender technischer Demonstration durch geförderte Vorhaben würde dabei die offene Kommunikation und Bewertung der realisierten Vorteile ermöglichen.

Hemmnisse und Risiken

Da zukünftige Design-, Entwicklungs- und Fertigungsverfahren zunehmend digitalisiert und vernetzt werden, könnten sich Knowhow-Defizite im Bereich dieser digitalen Kette als Hemmnis erweisen. Zudem kann ein unzureichender Ausbau der IT-Infrastruktur die Einführung digitalisierter Prozessketten erschweren. Im Bereich der Verfahrenstechnik werden heuristische Auslegungsverfahren durch dimensionslose Kennzahlen langfristig durch Multi-Scalen-Simulationen abgelöst. Dieser Paradigmenwechsel muss über alle relevanten Instanzen (Bildung & Forschung, Planung und Auslegung, Applikation und Optimierung) realisiert werden. Der notwendige Knowhow-Transfer wird hierbei eine Herausforderung für das Innovationssystem darstellen und benötigt Akzeptanz und Ressourcen, welche den Transformationsprozess ermöglichen. Für Hochschulgruppen und KMU besteht zudem eine Herausforderung in der

Verknüpfung von Kompetenzen und der darauf aufbauenden Systemintegration der individuellen Expertisen. Gleichzeitig müssen diese Kompetenzen auch für KMU zugänglich sein, um die Etablierung der neuen Fertigungsstrukturen zu unterstützen.

2.4.5. Technische Nanokatalysatoren

Als technische Nanokatalysatoren werden im Rahmen dieses Dokuments katalytische Systeme bezeichnet, welche über nanoskalige Abmessungen (1-100 nm) verfügen und Bestandteile komplexer technischer Katalysatoren sind. Die Nanomaterialien unterscheiden sich dabei hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung vom Trägermaterial eines Katalysators und können in jeder morphologischen Form (Partikel, Nadeln, Schichten, usw.) vorliegen.

Der Einsatz technischer Nanokatalysatoren wird in skizziert. Hierbei erfolgt die Umwandlung von Reaktanten zu Produkten innerhalb eines chemischen Reaktors durch Heterogenkatalysatoren (hier Pellets). Diese bestehen aus einem hochporösen Trägermaterial auf welchen katalytisch-aktive Nanopartikel fixiert sind. Der resultierende Katalysator verfügt dadurch über eine große katalytische Oberfläche und geringe Anteile kostenintensiver Katalysatormaterialien.

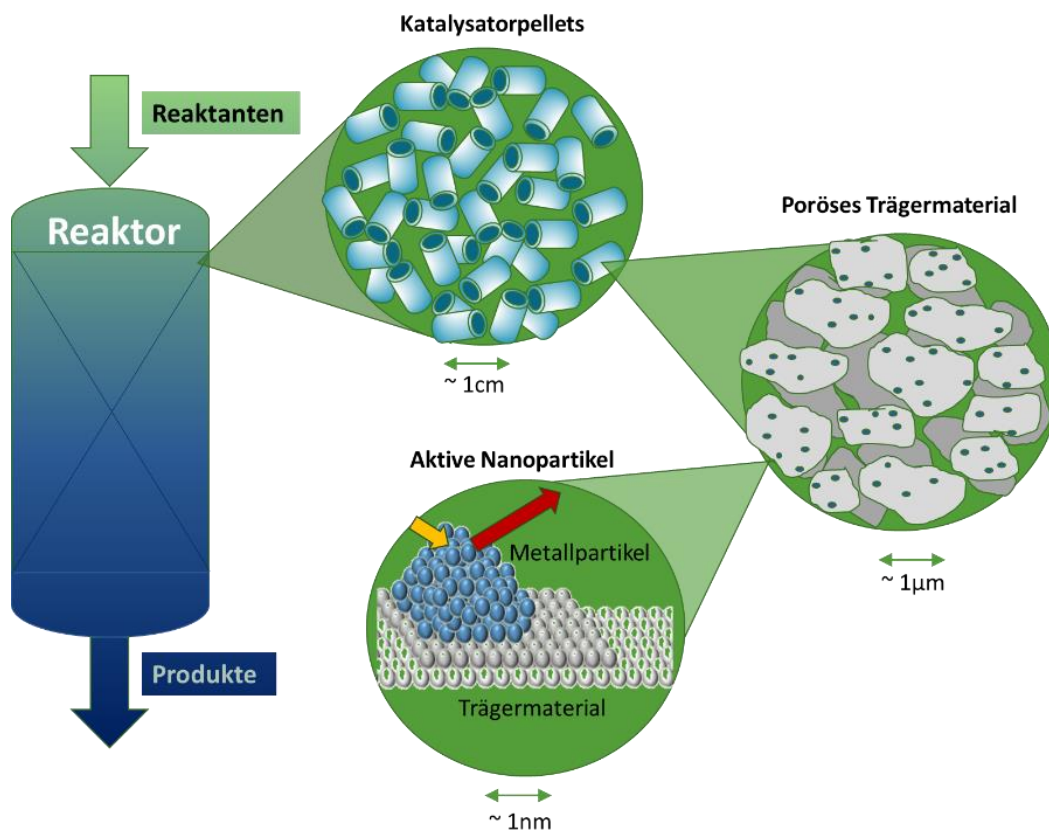


Abbildung 2-27: Reaktorfunktionsweise und Darstellung der unterschiedlichen Skalen einer Katalyse mit Nanokompositen.

Marktkontexturierung

Katalysatoren sind ein Segment des Chemikalienmarkts. Dabei werden sie als eigenständige Produktkategorie geführt oder den Spezialchemikalien zugeordnet. Die genaue Größe des weltweiten Katalysatormarkts kann nur schwierig abgeschätzt werden. Dies liegt an der etablierten business-to-business-Charakteristik (B2B) des Markts und an Überschneidungen von Katalysatoren, Spezial- und Basischemikalien hinsichtlich ihrer Verwendung. Bestehende Schätzungen ergeben weltweite Volumina von 29.0

Mrd.\$ (2010,[112]), 13.0 Mrd.\$ (2011,[113]), 33.5 Mrd.\$ (2014, [114]), 28.6 Mrd.\$ (2014, [115]) und 24.2 Mrd.\$ (2017, [116]). Unabhängig von der genauen Größe des weltweiten Katalysatormarktes, kann dessen Volumen gegenüber dem weltweiten Chemikalienmarkt von 3347 Mrd.\$ (2018, [117]) als verhältnismäßig klein ($< 1\%$) angesehen werden.

Bemerkenswert ist daher die Rolle der heterogenen Katalyse, welche in etwa 90 % der chemischen Herstellungsprozesse verwendet wird und damit signifikant zur chemischen Produktion beiträgt. Hierdurch werden rund 35 % des weltweiten Bruttoinlandsproduktes beeinflusst. [118]

Energetechnische- und -wirtschaftliche Bewertung

Als Grundlage zur Abschätzung möglicher Energieeinsparungen wird der Wärmeaufwand für Rektifikation und Destillation von 183 PJ/a zugrunde gelegt [30], [103]. Dieser Energiebedarf kann nicht durch Wärmeintegration innerhalb von Verbundbetrieben nutzbar gemacht werden. Die Abschätzung berücksichtigt daher nicht die Konditionierungen von Strömen (Temperatur und Druck), Wärmeeinsätze anderer Unit-Operations und elektrische Energieeinsparungen (Pumpen und Verdichter). Die Abschätzung kann daher als sehr konservativ angesehen werden. Inkrementelle Optimierungen von industriellen Katalysatoren durch neue Produktgenerationen sind aller 10 bis 15 Jahren verfügbar. Dabei können Effizienzsteigerungen von 2 bis 5 % gegenüber der Vorgängergeneration als realistisch angesehen werden. Kleinere Optimierungen erscheinen hinsichtlich des Risikos, welches der Einsatz eines neuen Prozesskatalysators für den Betreiber birgt nicht ausreichend attraktiv. Höhere Optimierungspotenziale sind wünschenswert, können jedoch nur in seltenen Fällen aufgrund der chemischen und technischen Prozessanforderungen realisiert werden. Durch die Einführung neuer Verfahrensführungen besteht ein zusätzlicher Effizienzgewinn von 1 %. Auch dieses Potenzial kann durch die zukünftige Notwendigkeit von neuen Verfahren zur Schließung von Stoffkreisläufen als konservativ betrachtet werden. Aus dem kumulierte Gesamtpotenzial von 2 bis 6 % würde sich für einen Energieeinsatz von 183 PJ/a ein Optimierungspotenzial von 3,7 bis 11 PJ/a innerhalb eines Entwicklungszyklus von 10 Jahren ergeben. Für die Perspektive bis 2050 wären demnach Einsparungen von 33 PJ/a denkbar.

Technologiezyklusanalyse

Die Bestimmung der Technologiezyklusposition erfolgte durch die Anfertigung von Patent- und Publikationsanalysen. Die Datenerhebung erfolgte durch eine Recherche in der Literaturdatenbank Scifinder (<https://scifinder.cas.org>). Seit dem Jahr 2000 liegt eine starke Zunahme der wissenschaftlichen Veröffentlichungen vor. Die Steigerung erfolgt bis 2012 exponentiell und geht anschließend in einen linearen Trend über. Trotzdem besteht weiterhin eine signifikante Zunahme der wissenschaftlichen Publikationen mit mehr als 5500 Publikationen im Jahr 2019. Circa 50 bis 60 % der Publikationen von 2000 bis 2016 können als „vielzitiert“ angesehen werden und verfügen über mehr als 10 Zitationen in der wissenschaftlichen Fachliteratur. Neben einem hohen Publikationsoutput indizieren die wissenschaftlichen Veröffentlichungen damit auch eine aktive Wahrnehmung neuer Beiträge. Die Verwendung von nanostrukturierten Katalysatorkompositen kann dadurch als aktuelles Forschungsgebiet betrachtet werden.

Hinsichtlich des Patentaufkommens erfolgte eine deutliche Zunahme der Patentanmeldungen seit dem Jahr 2000. Hierdurch stellt sich ab 2002 (105 Anmeldungen) eine hohe annähernd konstante Anzahl von jährlichen Patentierungen ein. Es besteht daher seit dem Jahr 2000 ein gesteigertes Interesse an dem Aufbau schutzrechtlicher Ansprüche für nanoskalige Katalysatorkompositen. Hierbei können zahl-

reiche Aktivitäten der USA, Chinas, Südkoreas und Japans vermerkt werden. Frankreich ist die europäische Nation mit der höchsten Anmeldungsanzahl, gefolgt von den Niederlanden, Deutschland und Spanien. Weitere Aktivitäten können für Israel und Saudi-Arabien verzeichnet werden.

Durch die gegenwärtige Stagnation der Patentanmeldung bei gleichzeitiger Zunahme des Publikationsaufkommens erfolgt die Zuordnung der Technologiezyklusposition „Neuorientierung“. Dies wird auch durch die aktive Auseinandersetzung mit publiziertem Wissen (vielzitiert) und einer Analyse von Netzwerkaktivitäten bestätigt.

Innovationssystemanalyse

Für den Einsatz technischer Nanokatalysatoren wurde eine Innovationssystemanalyse anhand des Kompetenzatlasses der Deutschen Gesellschaft für Katalyse [119] durchgeführt. Demnach nimmt die öffentliche Forschung zur Nanokatalyse in Forschungseinrichtungen und Hochschulen eine wichtige Funktion wahr. Ein wichtiges Instrument der öffentlichen Forschung stellt die Förderung von Drittmittelvorhaben dar. Diese werden in Projekten organisiert und durch Projektträger von Bundes- oder Landesministerien getragen.

Industrielle Forschungsaktivitäten zeichnen sich durch ihre Marktorientierung aus und haben als Zielstellung die Kommerzialisierung neuer Katalysatoren oder katalytischer Verfahren. Weiterhin bestehen Unternehmen, welche als Ausrüster spezialisiertes Equipment bereitstellen. Der Katalysatormarkt stellt die Bedarfsseite des Innovationssystems dar und ist für technische Katalysatoren ein B2B-Markt. Eine besondere Rolle nehmen regulatorische Akteure ein, welche den Markteintritt und die Diffusion durch die jeweiligen Chemikalien- und Zulassungsregulation beeinflussen. Abschließend wären Verbände und Netzwerke aufzuführen. Diese wirken als übergeordnete Organisationen und vertreten die Interessen ihrer Mitglieder aus Forschung und Industrie.

Ableitung möglicher Entwicklungsziele

Für den effizienten Einsatz von nanostrukturierten Katalysatoren bestehen wichtige übergeordnete Entwicklungsziele, welche im Folgenden dargestellt werden. Eine detaillierte Aufstellung von abgeleiteten Schwerpunktthemen kann der EDUAR&D-Analyse entnommen werden.

- Durch die zunehmend forcierte Treibhausgasreduzierung wird die Nutzung von biogenen oder sekundären Rohstoffen für die Chemieproduktion an Relevanz gewinnen. Damit verbunden werden auch neuartige katalytische Verfahren benötigt.
- Der Bereich der Nanokatalyse zeichnet sich durch eine breite Grundlagenforschung aus. Maßnahmen, welche den Transfer aus der akademischen Aktivitäten in die industrielle Produktentwicklung unterstützen, sollten gezielt initiiert und gefördert werden.
- Vorhaben zur Standardisierung von Datenformaten und experimentellen Methoden (z.B. NFDI4Cat) können einen wichtigen Beitrag zur beschleunigten Entwicklung und Etablierung neuartiger Katalysatoren leisten.
- Analog zu den hergestellten chemischen Produkten sollten Prozesskatalysatoren für einen zirkulären Einsatz designt werden. Dabei ist auf eine gesamtsystemische Effizienz im Spannungsfeld zwischen Katalysatorperformance und Effizienz ihrer Wiederaufarbeitung zu beachten.

Identifikation von technologischen und ökonomischen Hemmnissen

Für die zukünftige Verfügbarkeit effizienter Nanokatalysatoren bestehen relevante Risiken hinsichtlich technologischer und ökonomischer Engpässe bzw. diffusionshemmende Aspekte:

- Bezüglich des Einsatzes von nanostrukturierten Katalysatoren und Elektroden bestehen Anforderungen hinsichtlich der akzeptablen Katalysatorkosten und der Lebensdauer (Standzeiten) der resultierenden Prozesskatalysatoren. Weiterhin können Engpässe im Bereich der Rohstoffversorgung mit katalytisch aktiven Materialien (z.B. seltenen Erden) auftreten.
- Die Einführung neuer Katalysatorsysteme kann aufgrund von Verunreinigungen oder variabler Feed-Zusammensetzungen zukünftiger Konversionsverfahren technische Probleme aufweisen. Die Berücksichtigung dieser Effekte in der experimentellen Charakterisierung erhöht die zeitliche und finanzielle Intensität der katalytischen Produktentwicklung und wirkt sich damit nachteilig auf die Chancen zum Markteintritt aus.
- Hinsichtlich einiger Aspekte der Entwicklung von technischen Katalysatoren existiert gegenwärtig nur ein begrenztes empirisches Knowhow. Dieses trifft im speziellen auf die Formulierung von Katalysatormatrizen, die Formgebung katalytischer Systeme und die Herstellung von Musterchargen zu.

Empfehlungen und mögliche Policy-Maßnahmen

Für die Etablierung neuartiger Wertschöpfungsketten einer nachhaltigen chemischen Industrie sollten fördernde und technologieoffene Rahmenbedingungen geschaffen werden. Der Übergang von Erkenntnissen der Grundlagenforschung in die angewandte Forschung und in die industrielle Katalysatorentwicklung muss hierfür beschleunigt werden. Dafür wären geförderte Vorhaben mit unterschiedlichen Formaten (Laufzeiten, Fördergegenständen), aber auch Kompetenzzentren zur Untersuchung derzeitiger *bottle-necks* (Formgebung, Matrizen, Scaleup) geeignet. Die öffentliche Forschungsförderung sollte dabei weiterhin ein breites Förderspektrum von der Risikoforschung im Grundlagenbereich bis zur Produktentwicklung anbieten. Im Bereich fundamentaler Arbeiten sollten verbesserte Strukturen zur Initiierung von Nachfolgeprojekten oder der Marktdiffusion geschaffen werden. Es werden neue digitale Strukturen zur Verfügbarkeit von Forschungsdaten benötigt, um Stoffdaten, elektronische Laborbücher und No-Effect-Studien zugänglich zu machen. Für Start-ups im Bereich der Katalyse sollten Unterstützungsmöglichkeiten etabliert werden, um verbesserte Rahmenbedingungen für eine Kommerzialisierung akademischer Forschungsergebnisse zu schaffen. Aus der Etablierung von Stoffkreisläufen könnte ein erhöhter Bedarf nach dezentralen und modularen Anlagen zur verfahrenstechnischen Aufarbeitung von Stoffströmen (z.B. Polymerabfällen) bestehen. Diese Entwicklung sollte gefördert, aber auch hinsichtlich genehmigungsrechtlicher Aspekte bedacht werden.

2.4.6. Zusammenfassung für das Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik

Die Zusammenfassung des Forschungsfelds Chemische Verfahrenstechnik durch die Portfolioanalysen ist --in Tabelle 2-9 dargestellt.

Tabelle 2-9: Zusammenfassung für das Forschungsfeld Chemische Verfahrenstechnik

Technik	Kumulierte verminderte Emissionen [Mio. t CO ₂ -äq.]	Realisierung der THG-Minderung von 5 Mio. t CO ₂ -äq.	Risikobetrachtung	
			F&E-Perspektive $\sum D_{R,1}$	Markteinführung und -diffusion $\sum D_{R,2}$
Organophile Nanofiltration	4,94	-	23/40	26/40
Technische Nanokatalysatoren	13,17	2033	18/40	17/40
Additive Fertigung in der CVT	3,97	-	13/40	17/40

Wie beschrieben unterliegen die Einsparpotentiale einer erheblichen Unsicherheit. Das kumulierte CO₂-Minderungspotential wird für organophile Nanofiltration (OSN) und additive Fertigung in der chemischen Verfahrenstechnik in der Größenordnung von 4-5 Mio. t CO₂-äq. bis 2050 angegeben. Für den Einsatz technischer Nanokatalysatoren werden bis 2033 mit der Erreichung der Schwelle von 5 Mio. t CO₂-äq. gerechnet. Das Gesamtpotential wird dann mit 13 Mio. t CO₂-äq. beziffert.

2.5. Forschungsfeld Eisen und Stahl (bzw. Metallherstellung)

Die Herstellung von Roheisen und Rohstahl sowie deren erste Bearbeitung sind Grundpfeiler der deutschen Volkswirtschaft. Es wurde im Jahr 2018 noch an 20 Standorten in Deutschland Rohstahl hergestellt (integrierte Hütten und Elektrostahlwerke). Insgesamt wurden im Jahr 2018 42,4 Millionen Tonnen Rohstahl in Deutschland produziert. Gegenüber dem Vorjahr 2017 (43,3 Mio. Tonnen Rohstahl) sank die Rohstahlproduktion somit nur unerheblich um 2 % [120], [121]. Damit ist die deutsche Stahlindustrie Spitzenreiter in Europa, während sie global auf Platz 7 liegt. Gleichzeitig erzielte die Stahlindustrie in Deutschland im Jahr 2018 Umsatzerlöse von gut 44 Mrd. Euro [121]. Im Vergleich dazu findet circa 50 % der globalen Rohstahlproduktion heute in China statt, mit einem beachtlichen Aufwuchs seit Beginn des 21. Jahrhunderts [122]. Stahl ist für den Aufbau von Infrastrukturen, insbesondere im Gebäude- und Mobilitätsbereich, derzeit unverzichtbar. Darüber ist die Stahlindustrie zentraler Lieferant für eine der bedeutendsten Branchen der deutschen Wirtschaft, die Kfz-Industrie.

Die Stahlerzeugung in Deutschland lässt sich im Wesentlichen auf zwei verschiedenen Produktionsrouten differenzieren:

- Hochofen-Konverter-Route (Primärroute) und
- der Elektrostahl (Sekundärroute).

Rund 30 Mio. Tonnen Rohstahl (~ 70 % des gesamten Rohstahls) wurden in Deutschland im Jahr 2018 über die Hochofen-Konverter-Route (Primärroute) in integrierten Hüttenwerken als Oxygenstahl und

knapp 13 Mio. Tonnen Rohstahl (30 %) über die Elektrolichtbogenofenroute erzeugt. Die Elektrostahlproduktion (Sekundärroute) hat sich somit gegenüber 1990 verdoppelt. Bei knapp 94 % der Stahlproduktion die das Stahlwerk verlässt handelt es sich um Walzstahl. Die Höhe und Struktur des Energieverbrauchs sowie die hieraus resultierenden Treibhausgasemissionen unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Produktionsroute erheblich. Bei der integrierten Hochofenroute dominiert Steinkohle als Ausgangsstoff für Koks, der verfahrenstechnisch als Reduktionsmittel erforderlich ist, sowie geringere Mengen anderer Kohlen und fester und flüssiger fossiler Energieträger. Gleichzeitig werden in den integrierten Hüttenwerken die bei der Kokerei, am Hochofen und am Konverter entstehenden Prozessgase weitestgehend zur Eigenstromversorgung genutzt, weshalb der Fremdstrombezug gering ausfällt. Elektrostahlwerke hingegen nutzen vor allem Strom, um Stahlschrotte im Elektrolichtbogenofen aufzuschmelzen. [122]

Nach der Herstellung des Rohstahls schließt sich die sekundärmetallurgische Weiterverarbeitung, das Vergießen und für die überwiegende Menge die Weiterverarbeitung zu Walzstahlprodukten (wie z.B. Flachband für die Automobilbranche oder lange Produkte für den Bausektor) im Walzwerk des integrierten Hüttenwerkes an. Die weiteren Behandlungsschritte sind notwendig, um gezielte Festigkeits- und Materialeigenschaften bzw. Stahlqualitäten zu erzielen, d. h. die Schmelze wird durch entsprechende metallurgische Maßnahmen verbessert. An die Sekundärmetallurgie schließt sich der Urformprozess des Vergießens des Stahls (Strangguss oder Blockgussverfahren) an. Die Sekundärmetallurgie dient hauptsächlich der Homogenisierung der Schmelzen, dem Einstellen von Temperaturgrenzen sowie der Einstellung von exakten Gehalten mit einer Genauigkeit von Tausendstel Prozentwerten an Kohlenstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Phosphor sowie von Legierungselementen im Stahl. Letztendlich werden im Rahmen der Sekundärmetallurgie die gewünschten Eigenschaften der hergestellten Produkte eingestellt bzw. festgelegt. [123]

Im Rahmen von EE4Ing wurde eine Auswertung der EnArgus Datenbank (EnArgus Projektdatenbank 2020a) zu geförderten F&E-Vorhaben in der Stahlindustrie durchgeführt. Es konnten insgesamt 193 abgeschlossene oder laufende Förderprojekte aus dem Bereich der Energieforschung, die einerseits einen Bezug zur Eisen- und Stahlindustrie aufweisen und deren Projektbeginn zwischen den Jahren 2000 bis 2018 lag, identifiziert werden. Diese wurden jeweils eindeutig bestimmten Themenfeldern / Anwendungsbereichen im Kontext „Eisen- und Stahlerzeugung“ zugeordnet. Die prozentuale Verteilung der 193 identifizierten Projekte auf diese Themenfelder / Anwendungsbereiche zeigt Abbildung . Anhand dieser themenspezifischen Verteilung der geförderten Projekte lässt sich als erste Vermutung ableiten, dass im Rahmen der derzeitigen Forschungslandschaft inkrementellen Verfahrensverbesserungen zur Steigerung der Energieeffizienz bzw. Energieträgersubstitution eine höhere Beachtung geschenkt wird als grundlegenden Verfahrensinnovationen. Jedoch wurde hier nur die Anzahl an Forschungsprojekten, nicht jedoch die Verteilung von Fördermitteln untersucht.

Da sich sowohl der große Energiebedarf als auch die resultierenden Treibhausgasemissionen der Eisen- und Stahlindustrie zu einem Großteil auf die Rohstahlerzeugung zurückführen lassen, wurde hierauf der Schwerpunkt der Technologieanalysen gelegt.

Laufzeitbeginn von 2000 bis 2018

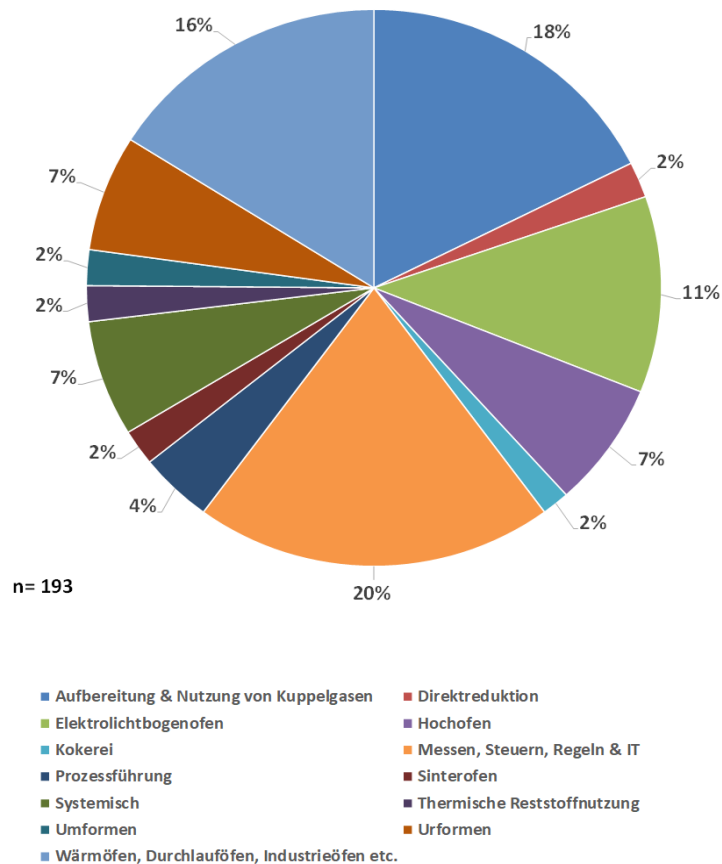


Abbildung 2-28: Anteilige Verteilung (nach Themenfeldern/Anwendungsbereichen) identifizierter Förderprojekte im Energieforschungsprogramm (Laufzeitbeginn 2000-2018) im Bereich Eisen- und Stahlerzeugung

2.5.1. Betrachtete Technologien im Forschungsfeld Eisen und Stahl (bzw. Metallherstellung)

Im Forschungsfeld Eisen und Stahl / Metallherstellung wurde einerseits die Direktreduktion als Produktionsprozess zur Substitution der Hochofenroute, andererseits die Hochtemperaturelektrolyse als Effizienztechnologie im Anwendungsumfeld der Grundstoffindustrie analysiert. Die sogenannte Direktreduktionsroute ist die derzeit technisch plausibelste Option für den Ersatz der Hochofenroute und verdient aufgrund der hohen Relevanz der Primärstahlerzeugung für den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen der deutschen Industrie besondere Beachtung.

Die Hochtemperaturelektrolyse hingegen stellt eine vielversprechende, wenn auch technisch nicht ausgereifte, Option zur effizienten Wasserstofferzeugung bei gleichzeitiger Nutzbarmachung industrieller Abwärme dar und ist daher insbesondere für das industrielle Anwendungsumfeld von Interesse.

Darüber hinaus wurde damit begonnen, die Querschnittsthematik „Zukunft der Stahlerzeugung“ sowie „Industrielle Abwärmenutzung“ zu betrachten. Zum einen wurden erste Überlegungen angestellt, wie sich der Abwärmeanfall beim Übergang von der Hochofenroute zur Direktreduktionsroute ändert, zum anderen wurde begonnen, das Thema Nutzung der Abwärme von heißen Produkten am Beispiel der Elektroofenschlacke zu betrachten. Diese Arbeiten konnte im Rahmen von EE4InG leider nur in ersten

Ansätzen begonnen werden; eine Fortsetzung dieser Analysen wird als sehr sinnvoll eingeschätzt aufgrund der hohen spezifischen und absoluten Energiemengen, die hiervon betroffen sind.

2.5.2. Direktreduktionsroute (Primärstahlherstellung)

Für das Produktionssystem „Direktreduktionsroute“ wurde eine detaillierte EDUAR&D-Analyse erstellt, siehe Anhang.

Technologiebeschreibung

Die Direktreduktion ist ein Prozess zur Gewinnung von Eisenschwamm (bzw. DRI - direct reduced iron) aus Eisenerz, der anschließend in einem Elektrolichtbogenofen (EAF) zu Rohstahl weiterverarbeitet werden kann, und somit eine Alternative zur dominierenden Hochofenroute. Im Gegensatz zur Hochofenroute wird das Eisenerz „direkt“, d.h. ohne Schmelzprozess im festen Aggregatzustand und damit bei geringeren Temperaturen, reduziert. Verschiedene Verfahrensausprägungen sind bekannt, in der vorliegenden Analyse wurden nur die marktnahen bzw. technologisch weit ausgereiften gasbasierten Gegenstromverfahren betrachtet.

Die zentralen Technologiekomponenten / Aggregate des Produktionssystems sind der Schachtofen, in dem die Reduktion des Erzes stattfindet, der Wasserelektrolyseur, sowie der Elektrolichtbogenofen. Zentral für das hier untersuchte Produktionssystem ist die Option, nicht nur aus Erdgas gewonnenes Synthese-/Reduktionsgas (Wasserstoff und Kohlenmonoxid), sondern auch Wasserstoff für den Reduktionsprozess im Schachtofen zu nutzen. Sofern für die Wasserelektrolyse elektrischer Strom aus erneuerbaren Quellen zum Einsatz kommt, ist dieses Verfahren zur Produktion von Wasserstoff emissionsfrei („grüner Wasserstoff“). Es ist darüber hinaus möglich sowohl reinen Wasserstoff als auch Mischungen in beliebigen Anteilen aus Synthesegas und Wasserstoff zu nutzen. Dies wiederum ermöglicht eine bzgl. der Zusammensetzung des Reduktionsgases flexible Fahrweise des Schachtofens und somit ein Optimieren des Produktionsprozesses, z.B. bzgl. der Verfügbarkeit erneuerbaren Stroms oder relativer Energieträgerpreise. [124]

Zentraler Anreiz für die weitere Technologieentwicklung und die Einführung des beschriebenen Produktionssystems sind die sehr hohen Treibhausgasemissionen der Primärstahlherstellung, die sich bei der marktdominanten Hochofenroute verfahrensbedingt nicht in einem Umfang reduzieren lassen, der zur Erreichung der Klimaziele im Industriesektor erforderlich ist.

Im Gegensatz zu den anderen realisierten Arbeiten im Rahmen von EE4InG wurde hier keine Einzeltechnologie, sondern ein Produktionssystem betrachtet. Dies ist bei der Einordnung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Marktkontexturierung

Bei Stahl handelt es sich um ein weltweit gehandeltes und weitgehend standardisiertes Produkt. Viele Stahlhersteller sind dementsprechend global tätig. Bei den Stahlherstellern selbst handelt es sich um ein Polypol. Trotz der sehr großen Produktionsmengen einzelner Unternehmen, z.B. 96,4 Mio. t (2019) für den global größten Hersteller ArcelorMittal, kann angesichts einer jährlichen Gesamtproduktion von 1.807 Mio. t (2019) nicht von einer dominierenden Stellung einzelner Unternehmen gesprochen werden [125]. Die Absatzmärkte für Stahl sind ebenfalls global, da Stahl ein zentraler Grundstoff für die Baubranche (inkl. Infrastrukturen), sowie den Automobilsektor und die Herstellung von Maschinen, Anlagen und Weißer Ware ist.

Die Direktreduktion hat derzeit (2018) eine globale jährliche Produktionsmenge von ca. 100 Mio. t, mit stark steigender Tendenz auf relativ geringem Niveau (Anteil an Gesamtstahlproduktion). Dabei dominieren die gasbasierten Verfahren deutlich gegenüber den kohlebasierten Verfahren, die vor allem im Iran eingesetzt werden. Bzgl. der Schachtöfen als zentrales Aggregat für die gasbasierte Reduktion des Eisenerzes lässt sich feststellen, dass ein globales Duopol aus lediglich zwei Anbietern existiert: Midrex (Hauptsitz USA) und Hyl Technologies (Mexiko, Tochter von tenova), wobei Midrex derzeit den Markt deutlich dominiert. [125]

Bei den Elektrolyseuren unterscheidet sich die Marktsituation abhängig von der konkreten Technologie. Es lassen sich drei wesentliche technologische Ansätze unterscheiden: alkalische Elektrolyse (AEL), Protonenaustauschmembranelektrolyse (PEM) und feststoffoxid-/Hochtemperaturelektrolyse (HTE). Sowohl bei der AEL als auch bei der PEM ist herstellerseitig ein sich entwickelndes Polypol festzustellen. Für die AEL lassen sich z.B. ThyssenKrupp Uhde Chlorine Engineers, McPhy, und NEL Hydrogen anführen. Auf die PEM setzt unter anderem Siemens. Die HTE hingegen ist, aufgrund derzeit noch fehlender technischer Reife und industrieller Skalierbarkeit, noch auf Pilotprojekte beschränkt und es sind nur wenige Akteure am Herstellermarkt zu erkennen; hier sind vor allem Sunfire (Deutschland) und Haldor Topsoe (Dänemark) zu nennen.

Konkurrenztechnologien

Da die Direktreduktionsroute ein Produktionssystem ist, kann sich die Betrachtung von Konkurrenztechnologien sowohl auf einzelne Technologiekomponenten des Systems, oder auf das gesamte System beziehen. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit wurden in der Analyse exemplarisch die Eisenerzelektrolyse und die Methanpyrolyse betrachtet.

Eisenerzelektrolyse

Unter „Eisenerzelektrolyse“ werden hier mögliche Verfahren subsummiert, welche Roheisen durch eine direkte elektrochemische Aufspaltung der eingesetzten Eisenerze gewinnen. Derzeit werden zwei Verfahrensvarianten diskutiert bzw. in Piloten getestet: einerseits die Eisenerzelektrolyse unter Nutzung eines alkalischen Elektrolyts, z.B. Natriumhydroxidlösung. Hierbei wird ultrafein ($\sim 10\mu\text{m}$) pulverisiertes Eisenerz mit der Lösung vermischt. Andererseits das Pyro-Elektrolyseverfahren bei welchem das Eisenerz in einer heißen ($1.600\text{ }^\circ\text{C}$) Oxidschmelze, die als Elektrolyt dient, gelöst wird. Der potenzielle Vorteil der elektrochemischen Verfahren liegt insbesondere in der Vermeidung von Umwandlungsverlusten, da elektrische Energie direkt eingesetzt werden kann zur Ermöglichung der Redox-Reaktion und kein Zwischenspeicher in Form chemischer Energie (z.B. Wasserstoff) erforderlich ist. Potenziell ist die Eisenerzelektrolyse daher sehr energieeffizient. Die Eisenerzelektrolyse wird bislang allerdings nur im Labormaßstab realisiert. In der Literatur wird eine mögliche Markteinführung jedoch aufgrund der derzeit mangelnden technologischen Reife nicht vor 2040 erwartet. [124], [126], [127]

Methanpyrolyse

Eine mögliche Konkurrenztechnologie zur Wasserelektrolyse zur Gewinnung von Wasserstoff ist die Methanpyrolyse. Hierbei wird Methan bei über $1.000\text{ }^\circ\text{C}$ unter Ausschluss von Sauerstoff thermisch in Wasserstoff und reinen Kohlenstoff gespalten, dabei entstehen zunächst keine CO_2 -Emissionen. Der technologische Reifegrad liegt derzeit bei etwa TRL 4-5. Der klare Vorteil der Methanpyrolyse gegenüber der Wasserelektrolyse liegt im niedrigeren Energiebedarf zur Spaltung des Ausgangsmoleküls, da die aufzubringende Energie (Reaktionsenthalpie) für die Zerlegung des Wassermoleküls deutlich höher ist als für

das Methanmolekül. Es ist unklar, ob und wie auch eine verstärkte Nutzung von Erdgas zur Gewinnung von Wasserstoff zielkompatibel sein kann. Entscheidend ist insbesondere die Verwendung des anfallenden Kohlenstoffs, in Form von CO, CO₂ oder reinem Kohlenstoff.

Energietechnische und -wirtschaftliche Bewertung

Spezifische Energieverbräuche und Emissionen

Die spezifischen Energieeinsätze und Emissionen der Direktreduktionsroute hängen von den jeweiligen Anteilen an Eisenschwamm/DRI und Stahlschrott im EAF ab, darüber hinaus von den Nutzungsanteilen von Wasserstoff und Erdgas als Reduktionsgas sowie dem Emissionsfaktor des genutzten Stroms für die direkte Nutzung insbesondere im EAF und den Nebenanlagen, sowie des Strombedarfs für die Herstellung des Wasserstoffs.

Unter Annahme eines Schrottanteils von 20% lässt sich der spezifische Gesamtenergiebedarf für die vollständig erdgasbasierte Direktreduktionsroute mit 3,36 MWh pro Tonne Rohstahl (Definition Rohstahl hier: Brammen vor dem Walzen) abschätzen. Für eine vollständig wasserstoffbasierte Direktreduktionsroute lässt sich dieser Wert mit 3,67 MWh pro Tonne Rohstahl abschätzen. In beiden Fällen wurden idealtypisch die wesentlichsten Anlagen berücksichtigt, daher kann davon ausgegangen werden, dass dieser Wert eher die untere Grenze einer jeweils plausiblen Bandbreite darstellen. Die spezifischen Emissionen der vollständig erdgasbasierten Direktreduktionsroute, unter Annahme der Nutzung von erneuerbarem Strom für insbesondere den Elektrolichtbogenofen und alle Nebenanlagen, lassen sich mit 0,6 t CO₂ pro Tonne Rohstahl abschätzen. Bei der vollständig auf grünem Wasserstoff basierten Direktreduktionsroute verbleiben lediglich geringe Restemissionen, die sich mit ca. 0,07 t CO₂ pro Tonne Rohstahl abschätzen lassen und aus dem Einsatz von Schlackeschäummitteln, Graphitelektroden sowie der Aufkohlung im EAF resultieren. [128], [129]

Modellierung eines Diffusionspfades der Direktreduktion für Deutschland

Es wurde ein plausibler Diffusionspfad der Direktreduktion für Deutschland modelliert. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst dargestellt, für die Details wird auf die ausführliche Analyse im Anhang verwiesen.

Entscheidend für die Wirkungen im Hinblick auf Emissionsvermeidung sowie Energieeinsatz eines solchen Diffusionspfades sind einerseits die Annahmen zu den substituierten Hochofenstahlmengen, andererseits die Annahmen zu den Anteilen von Erdgas und Wasserstoff als Reduktionsgas. Diese Annahmen sind in Abbildung wiedergegeben. Sie unterstellen, dass die Primärstahlmenge perspektivisch etwas zurückgeht (Materialeffizienz, Leichtbau, Verschiebung hin zur Sekundärproduktion), und der Wasserstoffanteil am Reduktionsgas sich schrittweise erhöht.

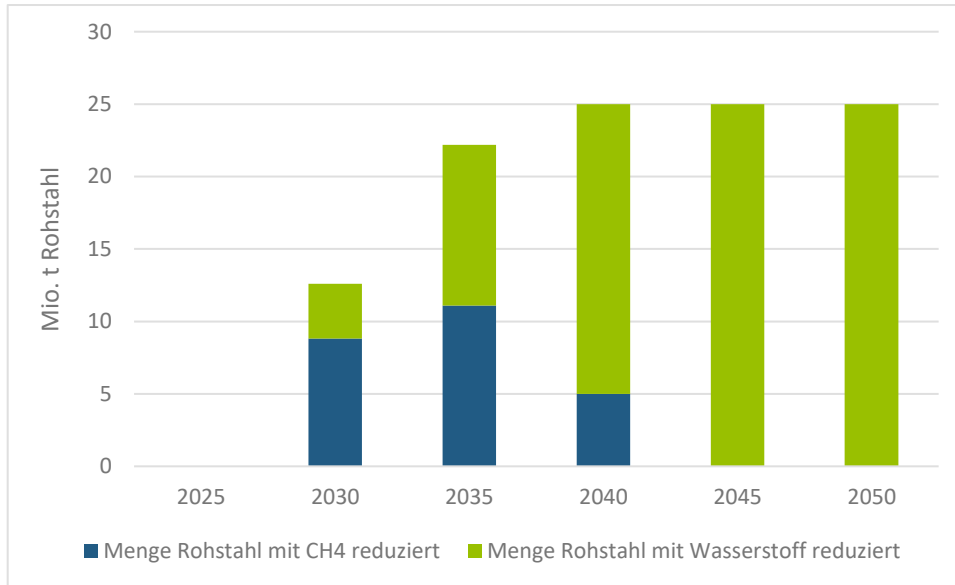


Abbildung 2-29: Diffusionspfad der substituierten Rohstahlmengen, differenziert nach unterstellter anteiliger Nutzung von Erdgas und grünem Wasserstoff als Reduktionsgas

Es wurden zwei Szenarien betrachtet: zum einen die Nutzung von Netzstrom mit einem Emissionsfaktor größer Null, der über die Zeit entsprechend der Dekarbonisierung des Stromangebots sinkt, und zum anderen die Nutzung von 100% erneuerbarem Strom. Die aus dem Diffusionspfad unter den getroffenen Annahmen resultierenden Einsparungen bzgl. Treibhausgasemissionen und Energieeinsatz zeigt Abbildung für den Fall einer vollständigen Nutzung von erneuerbarem Strom. Es zeigt sich, dass eine relevante Diffusion der Direktreduktionsroute in Deutschland zu erheblichen Emissions- und Energieeinsparungen führt: bis zu 42 Mio. t weniger jährliche CO₂-Emissionen ggü. dem Status Quo wären unter den getroffenen Annahmen im Jahr 2045 zu erwarten. Das entspricht knapp einem Drittel der derzeitigen (2020) Gesamtemissionen des Industriesektors von 178 Mio. t CO₂-äq.. Mit dem hier aufgezeigten Diffusionspfad für die Primärstahlherstellung, unter Annahme einer Substitution von 50% der Rohstahlkapazitäten, könnte ein erheblicher Minderungsbeitrag von ca. 16,7 Mio. t CO₂-äq. zum Sektorziel Industrie 2030 geleistet werden.

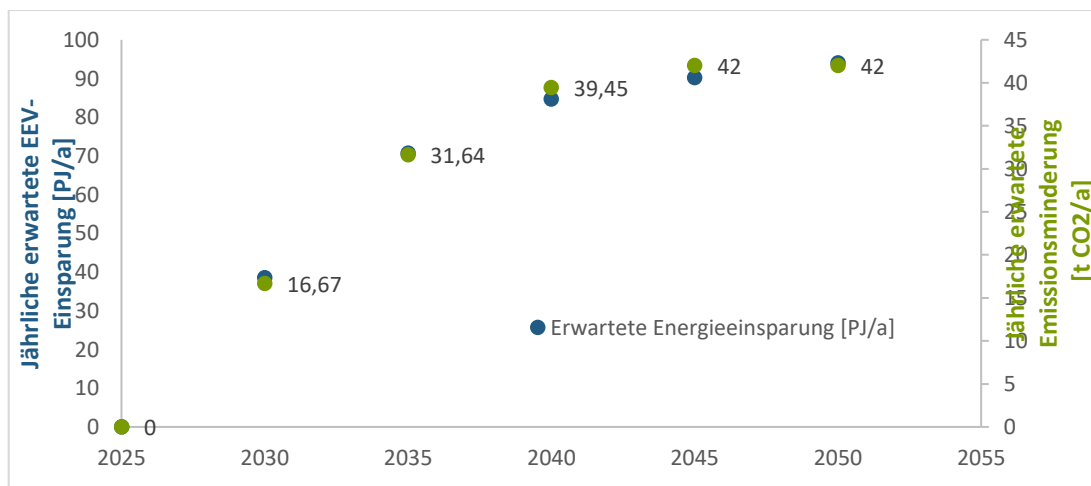


Abbildung 2-30: Jährliche erwartete Emissionsminderung und Energieeinsparung des modellierten Diffusionspfades für die Direktreduktion - Nutzung von 100% Grünstrom

Technikzyklusanalyse

Während der Elektrolichtbogenofen insbesondere zur Herstellung von Sekundärstahl bereits weitverbreitet ist und daher im Technikzyklus ganz rechts einzuordnen ist, ist der Schachtofen (unter Nutzung von Erdgas) zwar marktgängig, oftmals aber nicht wettbewerbsfähig. Die Wasserelektrolyse, unabhängig von ihrer technologischen Ausprägung, kann zwischen Euphorie und Ernüchterung eingeordnet werden. Einerseits wird grüner Wasserstoff als Kernelement der zukünftigen Energiewirtschaft angesehen und mit erheblichen Fördermitteln bedacht, andererseits ist die Wettbewerbsfähigkeit von Elektrolyse-Wasserstoff ggü. den auf Erdgas basierenden Verfahren derzeit weiterhin nicht gegeben.

Innovationssystemanalyse

Zentrale Komponenten des betrachteten technologischen Innovationssystems sind als Akteure insbesondere die Stahlhersteller, deren Technologielieferanten sowie Wissenschaft und Forschung. Die Politik agiert sowohl als Regulierer wie auch als Fördermittelgeber für F&E- sowie Pilot- und Demonstrationsvorhaben. Bislang steht hierbei der Gedanke einer Förderung klar im Vordergrund.

Die Relationen der Akteure/Komponenten sind vielfältig, im Mittelpunkt eines technologischen Innovationssystems, das aus dem Blickwinkel einer wünschenswerten Markteinführung des Produktionssystems „Direktreduktionsroute“ betrachtet wird, steht jedoch der Stahlhersteller als Akteur, der letztlich die Technologie am Markt im Wettbewerb mit anderen Optionen zum Erfolg führen muss.

Ableitung möglicher Entwicklungsziele

Für den Gesamtprozess der Direktreduktionsroute steht die Optimierung des Zusammenspiels der Technologiekomponenten sowie die optimierte Anlagenführung im Vordergrund. Dies betrifft insbesondere die Optimierung der energetisch und ökonomisch optimalen Integration der Wärmeströme (einschließlich einer verstärkten Nutzung von Abwärme), abhängig von dem gewählten Prozessdesign und den Inputfaktoren. Letztlich sind dafür Demonstrationsanlagen im industriellen Maßstab erforderlich, um diese Optimierung im laufenden Betrieb durchführen zu können.

Bzgl. der zentralen Technologiekomponenten gibt es insbesondere bei den Wasserelektrolyseuren noch technologisches Entwicklungspotenzial und damit einhergehend auch Möglichkeiten zur Kostensenkung. Das Entwicklungspotenzial ist naheliegenderweise für die PEM und SOE Elektrolyseure noch höher als für die AEL, allerdings handelt es sich hierbei nicht zwangsläufig nur um einen „Annäherungsprozess“ der beiden erstgenannten Technologien gegenüber der AEL, sondern es ist durchaus denkbar, dass die AEL bzgl. ihrer Leistungsparameter künftig überholt wird. Jedoch sind sämtliche Schätzungen hierzu mit erheblichen Unsicherheiten behaftet

Empfehlungen und mögliche Politikmaßnahmen

Notwendigkeit einer energiewirtschaftlichen Gesamtstrategie. Derzeit gibt es kein politisch-energiewirtschaftliches Gesamtkonzept für die Elektrifizierung der Stahlherstellung (und auch nicht für andere Branchen bzw. die deutsche Industrie als Ganzes). Bei der Betrachtung unterschiedlicher Studien zeigt sich, z.B. anhand des zukünftigen Wasserstoffbedarfs, dass die Unsicherheiten enorm sind und es daher einer klaren politischen Rahmensetzung bedarf – auch und gerade um Planungssicherheit für die Unternehmen zu gewinnen.

Politikinstrumente zur Optimierung der ökonomischen Rahmenbedingungen. Mit Hilfe von Carbon Contracts for Difference / Klimaschutzverträgen könnten insbesondere Betriebskostenrisiken (Differenzkosten zur Hochofenroute, Preisvolatilitätsrisiken) abgedeckt werden und somit ein wesentliches Investitionshemmnis deutlich reduziert werden. Auch ein höherer effektiver CO₂-Preis für Stahl, verbunden mit einem Grenzausgleichsmechanismus (CBAM) ist bereits seit längerem in der Diskussion. Ein solcher CBAM ist Teil des Fit for 55 Pakets der Europäischen Kommission, das im Sommer 2020 vorgelegt wurde. Auch Nachfragequoten für grüne Grundstoffe (wie Stahl aus der Direktreduktionsroute) wären denkbar. Analysen zeigen, dass mit steigender Wertschöpfungstiefe materialbezogene Kostenbestandteile stark zurückgehen und daher die Weitergabe eines (auch deutlich höheren) CO₂-Preissignals durchaus tragbar erscheint.

Weitere F&E Förderung. Derzeit sind bereits erhebliche, seitens staatlicher Geldgeber geförderte F&E-Aktivitäten zu grünem Wasserstoff zu beobachten, von der Grundlagenforschung bis zur Pilotanlage. Beispielweise seien Kopernikus, FONA, sowie das 7. Energieforschungsprogramm genannt. Inwieweit Forschungsthemen im Detail, wie beispielsweise die Degradation von Elektroden bei der Feststoffoxid-/Hochtemperaturelektrolyse bereits in ausreichendem Maße adressiert werden oder verstärkt angegangen werden sollten, ist noch zu klären.

2.5.3. Hochtemperaturelektrolyse im Anwendungsumfeld Grundstoffindustrie

Für die Hochtemperaturelektrolyse im Anwendungsumfeld Grundstoffindustrie wurde eine detaillierte EDUAR&D-Analyse durchgeführt. Diese findet sich im Anhang und wird im Folgenden verkürzt und zusammengefasst wiedergegeben.

Technologiebeschreibung

Die Wasserelektrolyse ist die elektrochemische Aufspaltung von Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff mit Hilfe elektrischen Stroms. Der zunehmende Bedarf an klimaneutralem Wasserstoff rückt diese Technologie mehr und mehr in den Fokus – dies gilt insbesondere für die Grundstoffindustrie und ist für die Stahlindustrie von essenzieller Bedeutung (siehe Abschnitt 2.5.2). Derzeit können drei verschiedene technologische Ansätze bei der Wasserelektrolyse unterschieden werden: mittels alkalischem Elektrolyseur (AEL), Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEM) sowie Feststoffoxid-Elektrolyse (SOE), wobei letztere oftmals auch synonym als Hochtemperatur-Elektrolyse (HTE) bezeichnet wird.

Zentrales Charakteristikum der SOE im Hinblick auf potenzielle Anwendungen in der Industrie ist ihr Vermögen, unter Hochtemperatur (und auch unter Druck) betrieben zu werden. Es wird also nicht flüssiges Wasser, sondern Wasserdampf an der reaktiven Grenzfläche zwischen Kathode und Elektrolyt gespalten. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, neben Wasserdampf auch Kohlenstoffdioxid als Feed/Edukt einzuspeisen und die Elektrolyse damit als Co-Elektrolyse von H₂O und CO₂ zu betreiben. Das Produkt ist ein durch das Verhältnis der Edukte sowie weiterer Parameter determiniertes Synthesegasgemisch, bestehend aus CO und H₂. Hierbei handelt es sich um einen Verfahrensansatz, der für die Stahlerzeugung potenziell von erheblichem Interesse ist, wenn sowohl Erdgas als auch Elektrolysewasserstoff als Reduktionsgase bei einer Direktreduktion von Eisenerz zum Einsatz kommen sollen, da er eine (mindestens teilweise) Kreislaufführung von Kohlenstoff im Produktionssystem ermöglichen würde. Die Co-Elektrolyse ist ein Alleinstellungsmerkmal der HTE gegenüber AEL und PEM Systemen.

Im Gegensatz zur AEL und PEM, die bereits am Markt etabliert sind, befindet sich die Festoxid-Elektrolyse noch im Forschungs-, bzw. Entwicklungsstadium. Allerdings sind die energetischen Vorteile der Hochtemperaturelektrolyse unbestreitbar und lassen die weitere Entwicklung dieser Technologie als vielversprechend erscheinen.

Marktkontexturierung

Die „Nationale Wasserstoffstrategie“ der Bundesregierung spricht von einem jährlichen Bedarf von derzeit rund 1,65 Millionen Tonnen für Deutschland [130]. Damit die Stahlindustrie einen (relativ zu ihrer Emissionsintensität) relevanten Beitrag zur Einhaltung der Klimaziele bis 2050 liefern kann, ist sie auf wasserstoffbasierte Verfahren zur Reduktion von Eisenerz angewiesen, um Kohle ersetzen zu können. Verglichen mit heute würde der Wasserstoffbedarf der Stahlindustrie somit um ein Vielfaches steigen. Siehe hierzu im Detail auch die EDUAR&D-Analyse zur Direktreduktion im Anhang.

Konkurrenztechnologien

Die Wettbewerbstechnologien lassen sich drei Gruppen zuordnen:

1. Konkurrenztechnologien zur Produktion von Wasserstoff auf fossiler Basis
2. Verfahrensalternativen der Wasserelektrolyse
3. Weitere alternative Technologien, wie z.B. Photokatalyse, die sich im Wesentlichen noch im Stadium der Grundlagenforschung befinden

Konkurrenztechnologien auf fossiler Basis. Hierzu gehören insbesondere die etablierte und sehr emissionsintensive Dampfreformierung von Erdgas sowie die Methanpyrolyse. Die Dampfreformierung von Erdgas ist das heute dominierende Produktionsverfahren zur gezielten Gewinnung von Wasserstoff und äußerst emissionsintensiv. Zur Methanpyrolyse siehe Abschnitt 2.5.2 .

Verfahrensalternativen der Wasserelektrolyse. Die Wasserelektrolyse mittels alkalischem Elektrolyseur (AEL) ist technisch aufgrund der weitverbreiteten Anwendung der nach dem gleichen Funktionsprinzip arbeitenden Chloralkalielektrolyse in der Grundstoffchemie schon sehr weit fortgeschritten. Die Elektroden werden in durch Zugabe von Säuren, Basen oder Salzlösungen ionisch leitend gemachtes Wasser getaucht. Dabei leitet 30%-ige Kalilauge (KOH) den elektrischen Strom am besten [131]. Der überwiegende Teil der Wasserstoffproduktion mittels alkalischem Elektrolyseur fällt bislang in der Chemiebranche als Nebenprodukt der Chlorproduktion an. Bei der Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEM) ist der Elektrolyt eine protonendurchlässige Polymermembran. Das anodenseitig anströmende Wasser wird an der Edelmetallelektrode katalytisch zersetzt, wodurch Elektronen, elementarer Sauerstoff und Wasserstoffionen entstehen. Obwohl die PEM-Elektrolyse noch nicht die gleiche technologische Reife hat wie die Alkalielektrolyse, setzen immer mehr Unternehmen bereits in der Anwendung auf diese Technologie. Die erste SOE-Pilotanlage (SOE – solid oxid electrolysis) wurde bereits in den 1980er Jahren von Dornier in Kooperation mit Lurgi und der Robert Bosch GmbH entwickelt [132]. Dabei läuft die Festoxid-Elektrolyse im Gegensatz zu den beiden anderen Technologien im Optimalfall bei hohen Temperaturen (z.B. bei 800°C) und dementsprechend mit gasförmigem Wasser ab. Die Bezeichnung Hochtemperatur-Elektrolyse wird für die Festoxid-Elektrolyse daher auch synonym verwendet, dies gilt auch für die vorliegende Studie. SOE Modul- und Systemhersteller sowie Anwender sind bisher rar, obwohl erste Produkte verfügbar sind (z.B. Sunfire GmbH). An Forschungsvorhaben gekoppelte Pilotanlagen sind zum Beispiel in Salzgitter und Karlsruhe in Betrieb.

Energetische und -wirtschaftliche Bewertung

Aus fundamentalen thermodynamischen Zusammenhängen ergibt sich der zentrale Vorteil der HTE gegenüber ihren Konkurrenztechnologien: eine deutliche Steigerung der (elektrischen) Energieeffizienz durch eine teilweise Substitution des elektrischen Energiebedarfs durch thermische Energie, im Optimalfall sowieso vorhandene und bislang ungenutzte Abwärme. Bei einer Betriebstemperatur von 900 °C ergibt sich aus den grundlegenden thermodynamischen Zusammenhängen, siehe für Details die EDUAR&D-Analyse im Anhang, ein erhebliches Effizienzpotenzial von 22,8 % bezüglich des spezifischen elektrischen Energiebedarfs pro Einheit hergestellten Wasserstoffs. In Tabelle 2-10 ist ein exemplarischer Vergleich von Systemeffizienzen (Strombedarf für das Gesamtsystems Elektrolyseur bezogen auf den Heizwert (LHV) des produzierten Wasserstoffs) auf Basis von Literaturwerten [133] sowie einer exemplarischen Analyse bei Herstellerfirmen dargestellt. Die deutlich höheren Systemwirkungsgrade der SOE ist klar zu erkennen.

Tabelle 2-10: Systemeffizienzen von Elektrolysesystemen, exemplarische Auswahl am Markt erhältlicher Systeme sowie Literaturwerte

Technologie	Systemeffizienz (Smolinka u. a. 2018)	Hersteller	Systemeffizienz (LHV, Unternehmensangaben)
AEL	64,3%	thyssenkrupp Uhde Chlorine Engineers	63,9% ⁵
		McPhy	61,4% ⁵
		Nel hydrogen	62,6% ⁵
PEM	61,7%	H-Tec	61,2%
		iGas Energy	63,8%
SOE	78,8%	Sunfire	82%

Energiewirtschaftliche Betrachtung

Für die Herstellungskosten für Wasserstoff findet sich in der Literatur, bezogen auf die alkalische Elektrolyse, ein Wert von 7,6 €/kg_{H2} bei Stromkosten von 35 €/MWh [134]. [135] beziffert die Kosten für Westeuropa mit 5-6 €/kg_{H2}. Damit liegen diese deutlich über den typischen Herstellkosten der Dampfreformierung von Erdgas von 1,9 €/kg_{H2} [134] beziehungsweise 1,5 €/kg_{H2} [135].

Die Herstellkosten von Elektrolyse-Wasserstoff werden konkret von den Systemkonfigurationen und von Faktoren des Betriebs (z.B. den Volllaststunden) abhängen, darüber hinaus erheblich von den jeweiligen Strompreisen. Die CAPEX der Hochtemperaturelektrolyseure liegen derzeit noch deutlich über den AEL und PEM-Systemen, [133] gibt für 2017 eine Bandbreite von 1.350 bis 3.250 € pro kW Nennleistung, mit einem zentralen Wert von 2.300 € an. Die im Rahmen der vorliegenden Analyse befragten Experten

⁵ Systemeffizienz aus Stackeffizienz ermittelt, Abschlag von 8%

von Sunfire [136] geben den Status Quo mit 2.500 € pro kW Nennleistung an. Zur Entwicklungsperspektive der CAPEX sowie der Kostenrelation zwischen grünem und grauem Wasserstoff siehe die Analyse im Anhang.

Exemplarische Betrachtung eines Anwendungsfalls – HTE in der zukünftigen Primärstahlherstellung

Die gesamtwirtschaftlichen Potenziale zur Energieeinsparung und THG-Vermeidung sind derzeit nur schwer einzuschätzen, allerdings kann mit Hilfe einer exemplarischen Betrachtung für einen plausiblen Anwendungsfall für HTE die Relevanz der Technologie (bzgl. Energieeinsparung und THG-Vermeidung) relativ zu den Niedertemperatur-Technologien (AEL oder PEM) in Deutschland deutlich gemacht werden. Hierzu wird auf den Anwendungsfall der Primärstahlerzeugung mit Wasserstoff (Direktreduktion von Eisenerz) zurückgegriffen.

Ausgehend von dem in Abschnitt 2.5.2 und der ausführlichen EDUAR&D-Analyse zur Direktreduktion dargestellten modellierten Diffusionspfad für die Direktreduktionsroute können die zusätzlichen erwartbaren Effekte durch die Nutzung von Hochtemperaturelektrolyseuren ermittelt werden, indem ein Teil des benötigten grünen Wasserstoffs nach und nach durch HTE-Kapazitäten zur Verfügung gestellt wird. Hierfür wurden Annahmen zu den Anteilen der Wasserstofferzeugung durch AEL und SOE Systeme in den jeweiligen Stützjahren getroffen.

Die zentralen Ergebnisse zeigt Abbildung . Es ist wichtig zu betonen, dass es sich bei den hier gezeigten Energie- und Emissionseinsparungen um Minderungswirkungen zusätzlich zu dem in Abschnitt 2.5.2 genannten handelt. Wie die Ergebnisse zeigen, handelt es sich bei der HTE im Anwendungsfall Primärstahlerzeugung im Wesentlichen um eine Technologie zur Energieeinsparung, während der Aspekt der Treibhausgaseinsparung bei dieser Betrachtung nicht im Vordergrund steht. Die bei voller Diffusion erzielbaren Energieeinsparungen sind jedoch erheblich. Dabei wurde unterstellt, dass die von den SOE-Systemen genutzte Wärme als Abwärme vor Ort vollständig zur Verfügung steht.

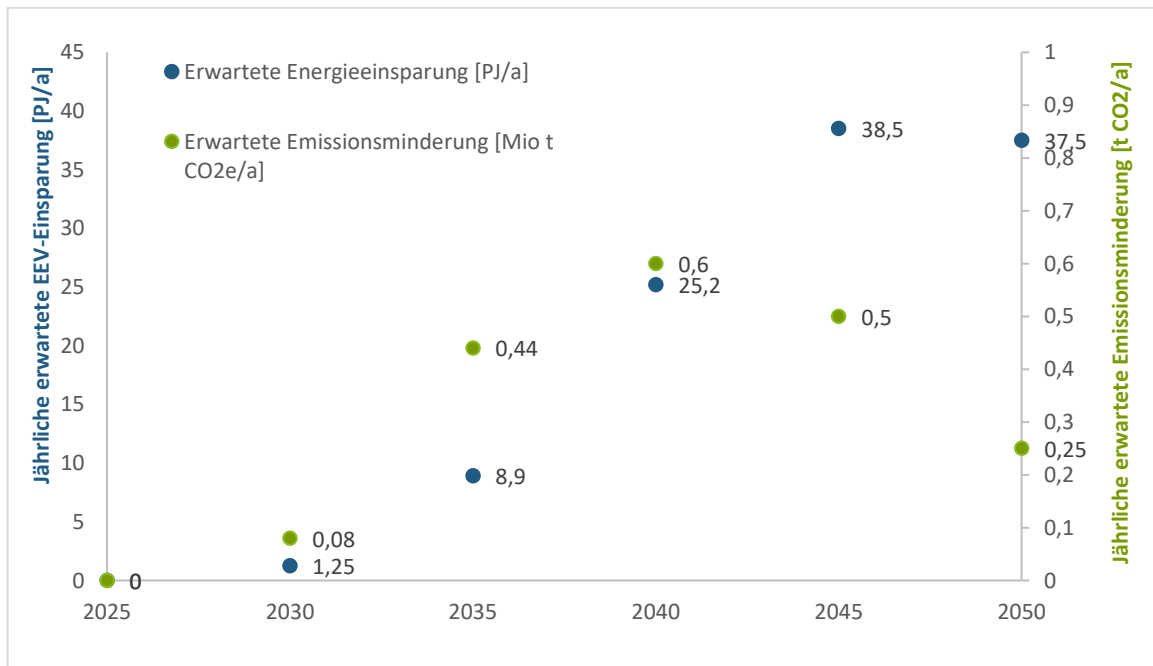


Abbildung 2-31: Erwartete zusätzliche Energie- und THG-Einsparungen durch die anteilige Nutzung von SOE-Kapazitäten zur Bereitstellung von grünem Wasserstoff für einen Diffusionspfad der Direktreduktionsroute zur Primärstahlherstellung in Deutschland

Technikzyklusanalyse

Ausgehend von den durchgeführten Patent- und Publikationsanalysen, die in der EDUAR&D-Analyse im Anhang im Detail dargestellt werden, kann von einem deutlich ansteigenden Interesse der Akteure in Wissenschaft und Forschung sowie bei Hersteller- und Anwenderunternehmen für das Thema Hochtemperaturelektrolyse gesprochen werden. Erste transnationale Patente konnten ab dem Jahr 2005 festgestellt werden. Bei den Publikationen zeigt sich wenige Jahre früher eine deutliche Zunahme der Publikationszahlen. Siehe den in Abbildung dargestellten Verlauf.

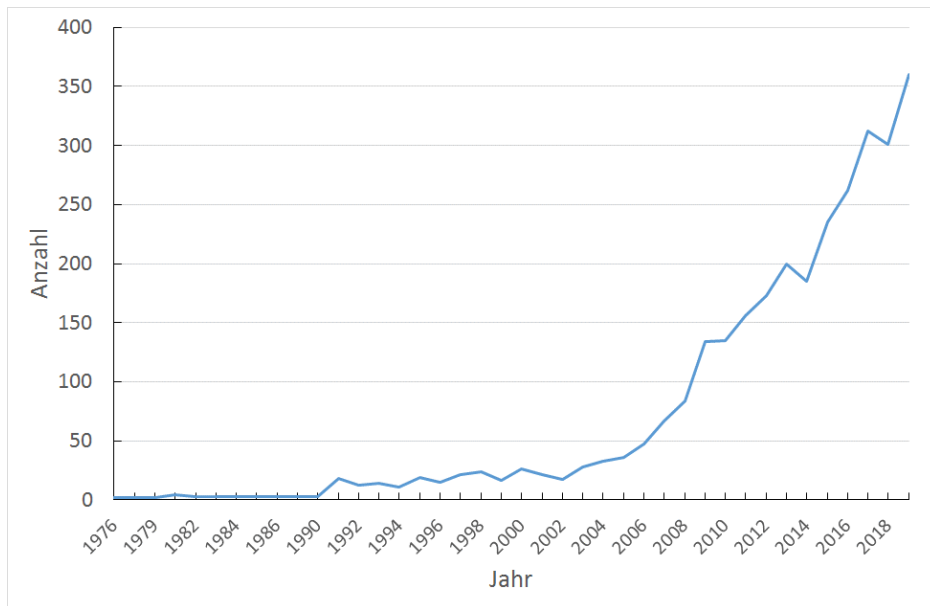


Abbildung 2-32: Ermittelte Publikationen zur Hochtemperaturelektrolyse im Zeitverlauf, 1976-2019

Aufgrund des in den zurückliegenden ca. 15 Jahren stark und kontinuierlich gestiegenen Aktivitätsniveaus lässt sich, im Zusammenhang mit der noch nicht gegebenen technologische Reife und ökonomischen Marktgängigkeit, die Technologie daher im Technikzyklus in Phase 2 „Euphorie“ verorten.

Innovationssystemanalyse

Zentrale Akteure des technischen Innovationssystems sind derzeit, im Hinblick auf die Verortung der Technologie im Technikzyklus, insbesondere die Forschungsinstitute und forschenden Unternehmen, sowie in Deutschland das Energieforschungsprogramm des Bundes als Fördermittelgeber. Dies zeigt auch eine Analyse der durch das Energieforschungsprogramm des Bundes geförderten Projekte. Hierbei wurde die Datenbank ENARGUS nach Projekten zur Feststoffoxid-/Hochtemperaturelektrolyse von Wasser für den Zeitraum 2000 – 2019 durchsucht. Hierbei fiel sofort auf, dass im Zeitraum 2000 – 2009 kein Projekt gefördert wurde. Für den Zeitraum ab 2010 bis 2019 (Projektstart) konnten insgesamt 26 Einzelvorhaben identifiziert werden, die durch das Energieforschungsprogramm des Bundes gefördert wurden. Es fällt auf, dass insbesondere im letzten erfassten Jahr (2019) eine ganze Reihe von Projekten neu begonnen wurden.

Aus der Zusammenstellung der Akteure in Deutschland seit 2010 lassen sich erste Rückschlüsse über das Innovationssystem ziehen. Bezogen auf die Akteursgruppen zeigt sich, dass einige wenige forschende Technologielieferanten – hervorzuheben ist hier insbesondere die Sunfire GmbH aus Dresden als Her-

steller von SOE/FC-Zellen und -stacks, aber auch die KERAFOIL GmbH & CO. KG aus Eschenbach/Oberpfalz als Hersteller von keramischen Elektrolytschichten – mit verschiedenen Forschungsinstitutionen kooperieren. Auch bei den beteiligten Forschungsinstituten ist klar zu erkennen, dass sich die Aktivitäten dieser Akteursgruppe in Deutschland auf wenige, dafür aber sehr aktive Institutionen beschränken. Hier sind insbesondere das Forschungszentrum Jülich, das Institut für Technische Thermodynamik des DLR in Stuttgart, sowie das Europäische Institut für Energieforschung (EIFER) in Karlsruhe zu nennen.

Ableitung möglicher Entwicklungsziele

Derzeit sinkt die Leistung der HTE-Systeme während des anspruchsvollen Betriebs (hohe Temperaturen, ~800°C) aufgrund von Materialproblemen, insbesondere bei höheren Stromdichten, erheblich ab [131]:

- Die direkt auf den Elektrolyten aufgebrachten Elektroden lösen sich ab (Delamination) und werden durch die Migration von Legierungs-/Dotierungselementen zwischen den Elektroden und dem Elektrolyten deaktiviert.
- Nickel von der Kathode diffundiert in den Elektrolyten. Zusätzlich agglomeriert Nickel in der Kathode und reduziert so die Reaktionsoberfläche, was wiederum zu einem höheren Überpotenzial führt.
- Der Festelektrolyt verändert seine Kristallstruktur und verliert dadurch erheblich an Ionenleitfähigkeit.

Die Hochskalierung der Module/Systeme wird von Experten nur teilweise als Problem gesehen. Während ein von Sunfire hergestelltes SOE/HTE-Modul heute eine Nennleistung von 150kW hat, wird ein Upscaling auf 1 MW-Module als unproblematisch angesehen [136]. Smolinka [137] hingegen gibt zu bedenken, dass die Integration des elektrischen Stroms wie auch der Wärme- und Stoffströme über eine Kopplung einer großen Anzahl an Stacks eine Herausforderung sei und hohe Qualitätsanforderungen an die Vernetzung (piping) als auch die zugehörige Isolierung stellt.

Für die Studie [133] wurden verschiedene Stakeholder nach möglichen Entwicklungspfaden für die CAPEX verschiedener Elektrolyseur-Technologien befragt. Wie zu erwarten, unterscheiden sich die Einschätzungen für SOE/HTE aufgrund mangelnder Marktpräsenz und daher Informationslage am stärksten. Die SOE-Technologie scheint jedoch auch das größte Kostenreduktionspotenzial durch technologische Weiterentwicklung zu bieten. Nach dieser Einschätzung würde diese bereits 2030 die niedrigsten CAPEX in allen drei Entwicklungspfaden haben. Letztlich handelt es sich jedoch um Expertenschätzungen, die mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind. Dennoch verdeutlicht dies das zumindest plausible erhebliche Entwicklungspotenzial der Technologie im Hinblick auf ihre Kostenkurve.

Empfehlungen und mögliche Politikmaßnahmen

Die Analyse hat gezeigt, dass deutlich zunehmende F&E-Aktivitäten bei SOE/HTE Themenstellungen zu beobachten sind. Nationale Forschungsfördermittel sind vorhanden und werden auch angenommen.

Die Technologie ist bereit, den Labormaßstab zu verlassen. Das Testen des Betriebsverhaltens in industriellem Maßstab hat nun hohe Priorität. Die Zellmaterialien bleiben allerdings weiterhin Gegenstand notwendiger Optimierung und daher auch weiterhin von F&E-Fördermaßnahmen.

Derzeit sehen sich die Forschungsnehmer bei Projekten der nationalen Forschungsförderung teilweise gezwungen, Anlagendimensionierungen herunterzuskalieren, um den Projektbudgets entsprechen zu können. Der Pilotbetrieb solcher verkleinerter Anlagen lässt allerdings nur bedingt Rückschlüsse auf das Betriebsverhalten der Anlagen im industriellen Maßstab zu. Hier scheint ein Bedarf nach verstärkter Förderung von Demonstrationsprojekten in nationalen Programmen im Industriemaßstab (SOE/HTE-Systeme: Nennleistung von 1 MW und mehr) vorhanden zu sein. Dementsprechend wird empfohlen, die Budgetierung von Projekten zu prüfen und ggf. anzupassen. Die Hochskalierung ist laut [137] v.a. auch in Bezug auf eine automatisierte Fertigung und den damit verbundenen großen Kosteneinsparungen relevant.

Ein weiterer Punkt in diesem Zusammenhang ist eine verstärkte Förderung für dezidierte SOE/HTE-Systemkomponenten, wie beispielsweise auf Wasserstoff ausgelegte Kompressoren.

2.5.4. Weitere begonnene Analysen im Forschungsfeld Eisen und Stahl

Zukünftige Entwicklung der Abwärmenutzungspotenziale der Primärstahlherstellung

Die naheliegende, da technologisch für eine Markteinführung hinreichend ausgereifte Direktreduktionsroute, ist absehbar der Weg, den die Primärstahlherstellung in Deutschland und Europa in den kommenden zwanzig Jahren nehmen wird (siehe Abschnitt 2.5.2).

Die Direktreduktionsroute unterscheidet sich verfahrenstechnisch von der Hochofenroute, beispielsweise erfolgt das Schmelzen vollständig im Stahlreaktor (Elektrolichtbogenofen) und nicht bereits bei der Eisenerzreduktion. Die Direktreduktionsroute nutzt andere Energieträger / Reduktionsmittel. Daraus lässt sich ableiten, dass auch die Energie- und insbesondere Wärmeströme sowie Abwärmen sich hinsichtlich ihrer Menge, ihrer Temperaturniveaus, ihrer Quellen und potenziellen Senken, sowie ihrer Medien unterscheiden. Daher wird sich das Abwärmepotenzial der Stahlindustrie insgesamt ändern, und auch seine Struktur. Es stellt sich die Frage, ob und wie sich diese absehbaren Veränderungen auch auf die in der Stahlindustrie nutzbaren Abwärmenutzungstechnologien auswirken könnten. Hieraus könnten sich spezifische Fragen entwickeln, die durch F&E-Vorhaben zu beantworten wären.

Hierzu war eine verfahrensspezifische Analyse der Entwicklung der Abwärmepotenziale in der Stahlindustrie in Verbindung mit möglichen Auswirkungen auf die anwendbaren Abwärmenutzungstechnologien vorgesehen. Zielsetzung war es, durch diese Analyse einen Beitrag zu einer möglichst frühzeitigen Betrachtung von Optionen zur Optimierung der Energieverwendung in der Primärstahlherstellung der Zukunft zu leisten. Es sollte ein Gesamtbild plausibler prozessspezifischer Optionen sichtbar werden, das es erlaubt, Forschungsfragen zu spezifizieren, die dann zu konkreten F&E-Projekten hinsichtlich einer energieeffizienten Stahlherstellung im Energieforschungsprogramm führen könnten.

Der dafür vorgesehene Ansatz basiert auf der Ermittlung von Material-, Energie- und Emissionsbilanzen für die Bezugsgröße Rohstahl, jeweils für das Produktionsverfahren auf Basis des Hochofens und für das Produktionsverfahren auf Basis der Direktreduktion. Letztere zeichnet sich durch einen hohen Grad an Designoptionen aus (z.B.: Elektrolyse vor Ort oder Zukauf von Wasserstoff; Nutzung von Erdgas und Wasserstoff, oder beiden; und weitere), daher sollen hier auch mehrere Varianten für das Prozessdesign untersucht werden. Diese Untersuchung kann nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erheben, sie soll vielmehr die Bandbreite des technologisch Denkbaren aufzeigen, und daraus abgeleitet welche Bandbreite an Auswirkungen sich hieraus dies insbesondere auf die Wärmeströme, Abwärmepotenziale, sowie anwendbare Abwärmenutzungstechnologien ergeben könnten.

Aus Ressourcengründen, sowie der Arbeit an zunächst nicht geplanten anderen Themen, konnte diese absehbar aufwendige Analyse leider nicht wie geplant im Rahmen von EE4Ing durchgeführt werden. Wir empfehlen, die Thematik weiter zu verfolgen.

Nutzung sensibler Wärme aus heißen Produkten am Beispiel der Elektrolightbogenofenschlacke

Sensible Wärmen heißer Produkte werden heute kaum genutzt, die Wärme geht durch Dissipation ungenutzt verloren. In der Stahlherstellung wäre theoretisch, aufgrund der zunehmenden Relevanz des Elektrolightbogenofens, die Schlacke dieses Aggregats ein vielversprechender Ansatzpunkt zur Identifikation von weiterem F&E-Bedarf.

Bei der Herstellung von Roheisen und Stahl fallen Schlacken an, in Europa waren es 44,4 Mio. t/a in 2012 [138], hiervon 23 Mio. t Roheisenschlacke und 21,4 Mio. t Stahlwerksschlacken aus den verschiedenen Reaktoren. Für die Zukunft der Stahlherstellung in Deutschland und Europa ist eine wachsende Relevanz des Elektrolightbogenofens absehbar, einerseits durch eine Verschiebung von der Primär- zur Sekundärroute, andererseits durch einen (zumindest partiellen) Ersatz der Hochofenroute durch die Direktreduktionsroute. Da bei der letzteren Eisenerzpellets im Schachtofen im festen Zustand reduziert werden, fällt dort keine Schlacke an, die Begleitminerale finden sich im EAF wieder. Daher ist insgesamt mit einer deutlichen Zunahme der EAF-Schlacken zu rechnen.

Nach Angaben von [139] beträgt der Energieverlust aus dem heißen Nebenprodukt Schlacke beim EAF ca. 52,8kWh/t_Rohstahl, dies entspricht ~7,6% des gesamten Energieeinsatzes. Da die spezifische Schlackemenge pro Tonne Rohstahl beim Einsatz relevanter DRI-Anteile deutlich zunehmen dürfte (ggü. dem Einsatz von Stahlschrott als Eisenträger), ist dieser Wert als konservativ anzusehen. Es stellt sich daher die Frage, ob und wie diese Abwärmemengen (Abstichtemperatur der Schlacke: ~1.600°C) zukünftig genutzt werden könnten.

Die für die Stahlherstellung wichtige und als Nebenprodukt anfallende Schlacke wird in verschiedenen Anwendungsbereichen, je nach chemischer Zusammensetzung und Weiterverarbeitung (Art der Abkühlung), eingesetzt. So kann der hochwertige Hüttensand aufgrund seiner Fähigkeit durch Hydratation auszuhärten als Zementrohstoff eingesetzt werden, während stückige Schlacken im Straßenbau verwendet werden.

Die Nutzung von Schlacken aus der Eisen- und Stahlherstellung als Hauptbestandteil bestimmter Zementsorten führt zu einer Reduktion des Klinkerbedarfs und damit zu einer Vermeidung von CO₂-Emissionen in erheblichem Umfang in der Zementindustrie. Dies trägt erheblich zur Relevanz der Frage bei, ob und wie zukünftig auch aus der Nutzung von DRI resultierende EAF-Schlacken als Klinker-Substitut genutzt werden könnten, da sonst dieser Substitutionseffekt zu entfallen droht.

Die Abwärmenutzung von Roheisen- und Stahlschlacken befindet sich noch im Bereich der F&E. Vielversprechende Ideen, wie bspw. die Wärmerückgewinnung im Gegenstromverfahren mittels des rotary cup atomizers (RCAT), scheitern zum einen an den Investitionskosten aber auch an dem sich einstellenden Produkt, das verfahrenstechnisch nicht die nötige Korngröße (>32mm) aufweist, um im Straßenbau Verwendung zu finden [140]. Im Gegensatz dazu findet Hüttensand in kleinen Korngrößen als Zementbestandteil bzw. Betonzusatz Gebrauch und wird teilweise sogar gemahlen. Prinzipiell eignet sich, von verfahrenstechnischer Seite her, der RCAT denkbar günstig für eine effiziente Wärmerückgewinnung: Die durch das Verteilen mit einem Rotierteller entstehenden Schlacketröpfchen

sorgen für ein hohes Oberfläche/Volumen Verhältnis der Schlacke und eignen sich somit optimal für den Wärmeübergang (in diesem Fall an im Gegenstromverfahren durchströmende Luft).

Eine Kombination der beiden Verfahren: Schlackenbehandlung für ein hochwertiges Produkt gekoppelt mit maximal effizienter Wärmerückgewinnung scheint demnach zumindest denkbar, wenn auch die bisher recherchierten Ansätze noch nicht den Sprung in die Anwendung geschafft haben.

Wichtige Fragestellungen, die für weitere F&E Projekte verfolgenswert erscheinen, sind:

- Ist ein hochwertiger Produktnutzen („DRI-EAF-Hüttensand“) und eine relevante Wärmerückgewinnung gemeinsam erzielbar?
- Kann die Schlacke schnell genug abgekühlt werden, um glasartig zu erstarren und ginge das auch ohne Wasserkontakt (trockene Granulation)?
- Ist eine Konditionierung der EAF-Schlacke (Einstellung des SiO₂-Gehalts) bei zugleich schneller glasartiger Erstarrung möglich, z.B. direkt nach dem Abstich?
- Wie sind weitergehende Ideen zur Verfahrensintegration zu bewerten, beispielsweise die Nutzung der sensiblen Wärme von Schlacke für die Erzeugung von Synthesegas oder zum CO₂-Recycling im Stahlwerk?
- Welchen ökonomischen Mehrwert hat der Hüttensand ggü. Stückschlacken und unter welchen Bedingungen rechnen sich Investitionen in Anlagen zur Konditionierung der EAF-Schlacken und zur Abwärmenutzung?

2.6. Forschungsfeld Abwärme

In vielen industriellen und gewerblichen Produktionsprozessen fällt Abwärme an. Der niedrige Temperatur-Bereich bis etwa 120°C (Heißwasser) hat seinen anwendungsseitigen Schwerpunkt bei Warmwasserbädern, Galvaniken und Trocknern. Im mittleren Temperaturbereich (MT) zwischen 130°C und rund 600°C sind dies meist Abwärmeströme von Rauchgasen (z.B. von Kupolöfen), von Trocknungsprozessen (z.B. der Lackierung), die sensible Wärme von industriellen Zwischenprodukten (z.B. der Metall- und Glasformgebung und -verarbeitung, der Petrochemie) oder von Endprodukten (z.B. Brotherstellung), aber auch die Abwärme von Querschnittstechniken (z.B. BHKWs) oder Umweltschutztechniken. Berechnungen und Schätzungen aktueller Studien zu den Abwärmepotenzialen (z.B. [8]) zufolge liegt das technisch nutzbare Abwärmepotenzial⁶ in der deutschen Industrie derzeit im

- Temperaturbereich bis 120°C bei knapp 20 PJ/a allein für Niedertemperatur-Wärmenetze
- Temperaturbereich 120 bis 300°C bei etwa 150 PJ/a und
- Temperaturbereich zwischen 300 Grad bis 500°C bei etwa 120 PJ/a.

Das davon wirtschaftlich erschließbare Potenzial ist derzeit nicht genau begründbar zu bestimmen, da viele Informationen zu den erforderlichen Investitionen und den nutzbaren Abwärmemengen nicht vorhanden sind. Hinzu kommt, dass die Investitionen in Wärmetauscher im Kontext von Abwärmenutzungssystemen zu bewerten sind, z.B. als Wärmespeicheranlage, als ORC-Anlage oder als Abwärmenutzung aus Nachverbrennungsanlagen. Schließlich werden sich die Abwärmemengen in den kommenden 10 bis

⁶ Nicht zum technisch nutzbaren Abwärmepotenzial zählt hier u.a. sensible Wärme von Produkten bzw. Zwischenprodukten.

30 Jahren bei den Thermoprozessen oftmals vermindern, wenn die Wärmeerzeugung elektrisch erfolgt oder einige Prozesse ersetzt werden.

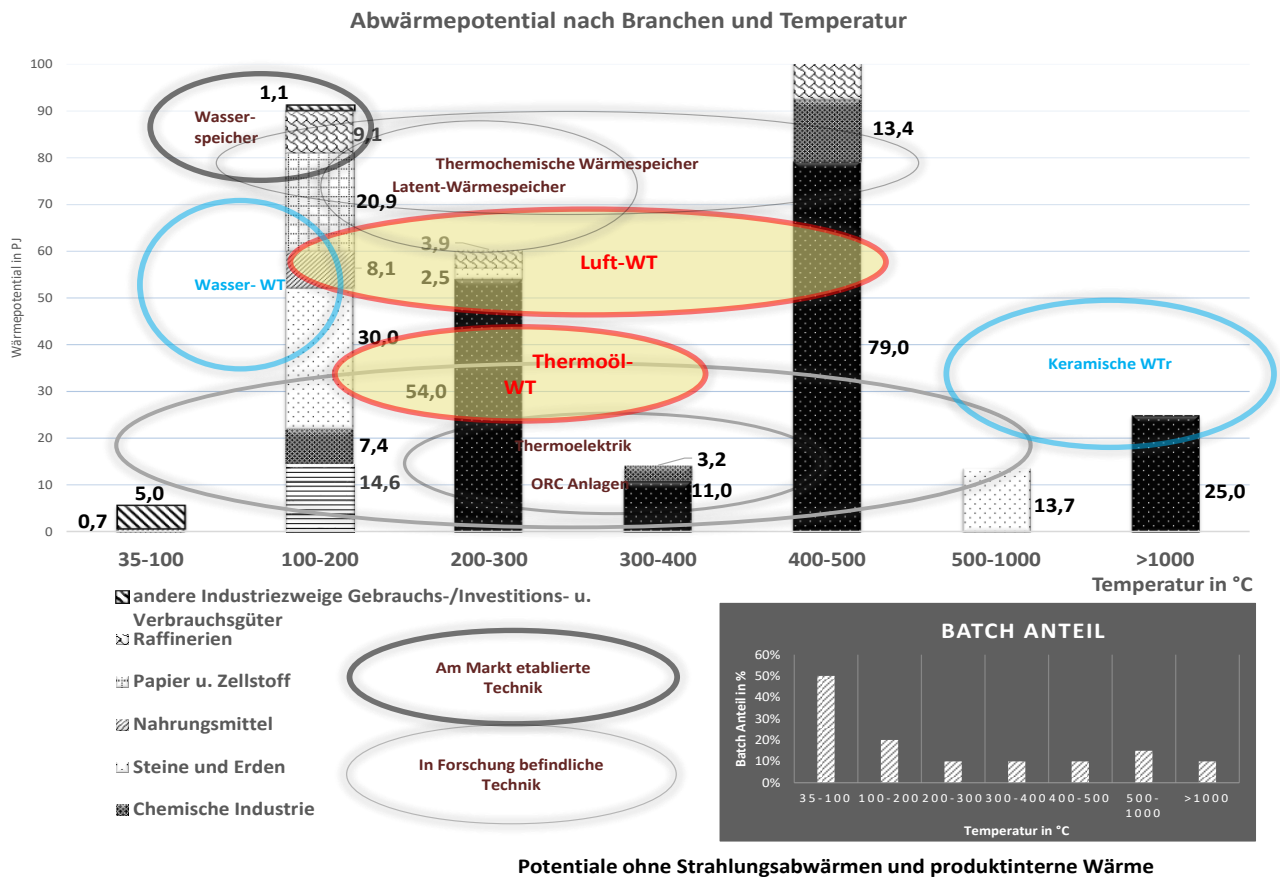


Abbildung 2-33: Technisches Abwärmepotenzial von stationären Anlagen in Deutschland, unterteilt nach Branchen und Temperatur (nur mediengedundene Abwärmeströme)

Quelle: [8], [141]

Bezüglich der Niedertemperatur-Abwärme wurden in diesem Projekt die Potenziale der NT-Wärmenetze als auch die Abwärmern der thermischen Nachverbrennung untersucht. Im Temperaturbereich zwischen etwa 100°C und gut 800°C wurden spezielle Analysen für die Wärmeübertrager, Stromerzeuger - ORC-Technik und thermoelektrische Generatoren - sowie für Latentwärmespeicher erstellt. Bei Letzteren ist eine mögliche Nutzung insbesondere bei Abwärmern aus Batch-Prozessen von Bedeutung, um die Wärme entweder kontinuierlich weiter nutzen oder ebenfalls wieder in Batch-Prozessen mit fluktuierendem Wärmebedarf einspeisen zu können (vgl. folgende Abschnitte zu den betrachteten Techniken).

2.6.1. Technologiefeldübergreifende Hemmnisse und Engpässe im Forschungsfeld

Neben allgemeinen Hemmnisse neuer energieeffizienter Lösungen (vgl Abschnitt 2.10.2) gibt es spezifische Hemmnisse für die Nutzung von industrieller Abwärme:

- Wärmeübertrager sollte man direkt in einen Abwärmestrom eines Produktionsprozesses (z.B. eines Kupolofens oder Warmbades) integrieren. Dies stößt auf verschiedene Schwierigkeiten:
 - (1) Bei Nachrüstungen schreckt man davor zurück, Prozess und nachfolgende Umweltschutzanlagen (z. B. die Rauchgasbehandlung) zu trennen;

- (2) Man befürchtet Korrosion oder Fouling; oder
- (3) der zusätzlich benötigte Platz - auch für die Reinigung des Wärmetauschers - ist nicht vorhanden.
- Im Gegenstrom eingesetzte Wärmetauscher haben thermodynamische Vorteile; aber die hohen Temperaturdifferenzen bringen große Wärmespannungen mit dem Risiko von Rissbildung.
- Es gibt zunehmend weniger junge Fachingenieure, die Wärmeübertrager-Systeme praxisgerecht dimensionieren und auslegen können. Die durch Optimierung von Wärmeübertragern erzielbaren Verbesserungen können daher infolge mangelnder Fachkenntnisse häufig nicht umgesetzt werden.

Aufgrund dieser Hemmnisse kommt es bei Herstellern und Anwendern zu Unsicherheiten, ob sie einen voll funktionsfähigen, effizienten und wartungsarmen Wärmetauscher geliefert bekommen. Bei Interviews mit Herstellern und Kontraktoren wurde zudem bemängelt, dass energieintensive Unternehmen, denen die Regierung Ausnahmen bei Energiesteuern und -Abgaben gewährt, im Gegenzug keine Effizienz-Verpflichtungen erfüllen müssten (z.B. die Nutzung von Abwärme). Pflicht-Audits nach ISO 50.001 oder EMAS führten zu unverbindlichen Maßnahmenlisten, die trotz hoher Profitabilität keine Verpflichtung zur Umsetzung nach sich zögen.

2.6.2. Thermische Nachverbrennung

Bei der Bearbeitung der Thermische Nachverbrennung wurde das komplette EDUAR&D-Vorgehen verwendet. Nachfolgend werden die relevantesten Ergebnisse zusammengefasst. Eine vollständige Analyse befindet sich im Anhang.

Einführung: Die thermische Nachverbrennung (TNV) ist ein Verfahren, um prozessbedingte Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) in der Industrie so weit zu vermindern, dass die gesetzlichen Bestimmungen der Grenzwerte eingehalten werden. Aus der TNV entwickelten sich über die Jahre die energieeffizienteren Varianten der katalytischen (KNV) und regenerativen Nachverbrennung (RNV). Diese haben die klassische TNV weitestgehend verdrängt und sind technologisch bereits ausgereift.

Der grundlegende Unterschied zwischen der TNV und der KNV ist der Einsatz eines Katalysators bei der KNV, welcher die Aktivierungsenergie erniedrigt und somit die benötigte Verbrennungstemperatur (auf ca. 300 – 600 °C) reduziert. Dieser Katalysator (siehe Abbildung 2-34) führt jedoch zu einem begrenzteren Anwendungsfeld, sodass die TNV das universellere Verfahren darstellt.

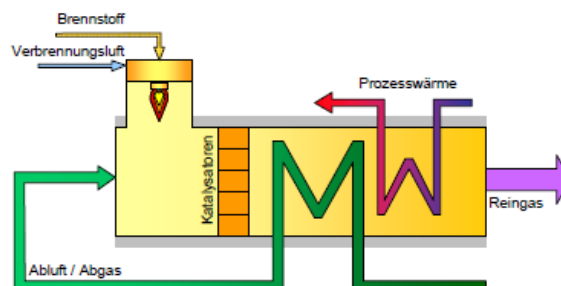


Abbildung 2-34: Schematische Darstellung der Katalytischen Nachverbrennung (KNV) [142]

Beiden Verfahren der Nachverbrennung ist gleich, dass das zu reinigende Abgas (Rohgas) in einem ersten Schritt durch das gereinigte Abgas (Reingas), welches aufgrund der Verbrennungstemperaturen in der Brennkammer (Brennkammertemperatur bei der TNV ca. 700 - 900°C) stark erhitzt wird, vorgewärmt wird. In Abhängigkeit von dem eingesetzten Wärmetauscher werden beide Verfahren noch einmal in die rekuperative (siehe Abbildung 2-35, seit 60/70er Jahre) und die regenerative (RNV, siehe Abbildung 2-36, Verfahrensart seit 80er Jahre) unterteilt.

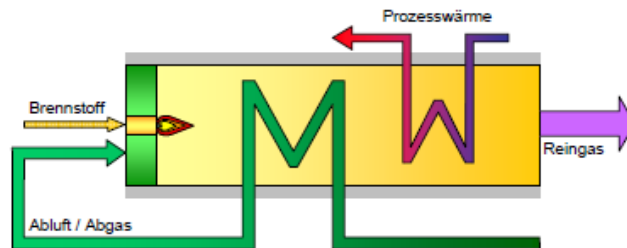


Abbildung 2-35: Schematische Darstellung der rekuperativen Thermischen Nachverbrennung [142]

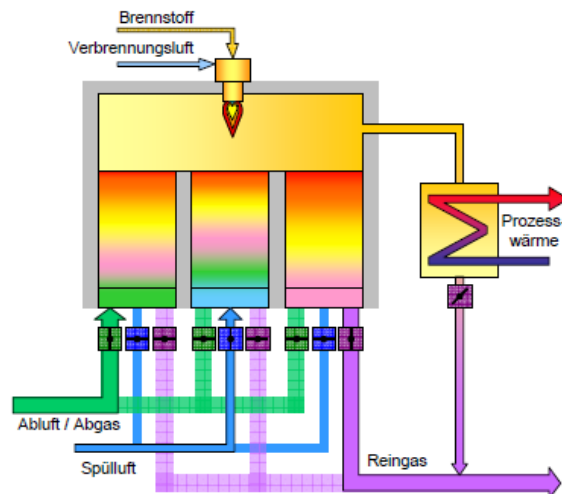


Abbildung 2-36: Schematische Darstellung der regenerativen Thermischen Nachverbrennung [142]

Marktkontexturierung: Das Verhältnis von RNV zu KNV wird in Deutschland auf ca. 70:30 geschätzt. „Klassische“ TNV-Anlagen werden zum Teil nur noch in der chemischen Industrie oder in Form von Altanlagen betrieben. Anhand der Industrieemissionsrichtlinie und BImSchV lässt sich der Gesamtanlagenbestand von Nachverbrennungsanlagen in Deutschland in einem hohen vierstelligen Bereich verorten.

Energietechnische und –wirtschaftliche Bewertung: Bei der Auslegung von Produktionsanlagen hat die Vermeidung von VOCs die höchste Priorität, weshalb eine ganzheitliche Systembetrachtung unerlässlich ist. Sollte eine thermische Nachverbrennung notwendig werden, sollte die Wärme der gereinigten Abluft durch Energierückgewinnung genutzt werden, indem sie z.B. in den Produktionsprozess im Unternehmen zurückgeführt wird. Oftmals liegen aber keine Bedarfe vor, weshalb Energie ungenutzt an die Umwelt abgegeben wird. Aufgrund eines fehlenden Energie-Katasters für Nachverbrennungsanlagen lässt sich bislang auch nicht abschätzen, wieviel Bestandsanlagen durch Nachrüstungen zukünftig energieeffizienter betrieben werden könnten. Fraglich ist, sofern Daten einzelner Anlagen überhaupt vorhanden sind, ob die einzelnen Unternehmen und Anlagenbauer dazu bereit wären, diese für einen Kataster

bereitzustellen. Die Hemmnisse hierfür können datenrechtlicher, personeller oder unternehmenspolitischer Natur sein. Das ungenutzte Potenzial wird seitens der Beteiligten der Einzelgespräche und des Fachgesprächs sehr hoch vermutet.

Handlungsbedarf: Neben den einzelnen Energierückgewinnungsmethoden kann die Energieeffizienz durch Adsorptionsräder und Molekularsiebe erhöht werden. Hierbei werden die VOC-beladenen Abluftströme durch erstere aufkonzentriert und zweitere geglättet. Die Folge ist ein leichter erreichbarer bzw. stabilerer autotherme Bereich, wodurch weniger zusätzlicher fossiler Brennstoff nötig ist und die damit verbundenen Kosten sowie zusätzlichen CO₂-Emissionen entfallen. Beiden Technologien sind abhängig von den verwendeten Lösungsmittelgemischen kombinierbar und werden als Beste-verfügbare-Techniken empfohlen. Im Vergleich zu Adsorptionsrädern werden Molekularsiebe bislang noch selten eingesetzt.

Empfehlungen und mögliche Politikmaßnahmen: Der beste Umgang zur Vermeidung unnötiger Emissionen erfolgt durch die ganzheitliche Systembetrachtung. So gilt es Bedarfe für Energierückführung zu schaffen. Sollte ein Betreiber einer Anlage hierfür nicht in der Lage sein, muss Unterstützung durch Beratung erfolgen. Die erforderlichen Stellschrauben sind besonders bei Bestandsanlagen oftmals schwierig zu identifizieren. Hier können umfangreiche Voruntersuchungen oder Messkampagnen nötig sein, welche mit hohen Kosten verbunden sind. Durch geeignete Förderinstrumente, die Beraterkosten übernehmen, würden die betreibenden Unternehmen entlastet werden. Bei der Planung neuer Produktionsanlagen sollte die Reinigung und ggf. mögliche Rückführung von Energie von Beginn an berücksichtigt werden. Hierfür könnte ein branchenspezifischer Leitfaden zielführend sein, welcher dem Anlagenbetreiber trotz Komplexität und Überforderung eine schnelle Ableitung sinnvoller Maßnahmen ermöglicht. Der Fokus muss aber zunächst immer auf der Vermeidung vor der Verbrennung der VOCs liegen. Der Aufwand zur Erstellung solcher Leitfäden wird seitens eines Anlagenbauers auf wenige Monate redaktionelle Arbeit geschätzt inkl. Reisetätigkeit und Gesprächen mit Herstellern. Bisher scheiterte eine Ausarbeitung an den begrenzten Mitteln der Unternehmen, welche solche Leitfäden gerne konzipieren würden.

Ein Ansatzpunkt zur Klärung der Transparenz der Gesamtsituation bzw. der gesamtwirtschaftlichen Bewertung bezüglich möglicher Energiepotenziale in der Abgasreinigung wäre die Erstellung eines TNV-Katasters mit möglichen Daten zu Volumenstrom, Gasbedarf, Anlagengröße, Temperatur-Niveaus. Hierfür existiert bereits ein Emissionskataster, welcher aber ausgewertet und um den Gasbedarf erweitert werden müsste. Jedoch fehlen zum Teil Gaszähler an den Anlagen, oder diese können nur vor Ort abgelesen werden. Außerdem zeigen einige Gaszähler nicht nur den Verbrauch der Nachverbrennungsanlage an, sondern beinhalten auch den Verbrauch anderer Maschinen und Anlagen. Des Weiteren gilt es auch weitere Aspekte wie Wetter, Rohrführung und generell deren Ausmaße zu berücksichtigen. Auch lassen sich die Ergebnisse von Anlage A nicht so einfach auf Anlage B übertragen, sofern diese nicht exakt baugleich sind. Somit ist die Schaffung einer Übersicht sehr komplex. Ein erster Schritt könnte durch Schaffung eines „use case“ mit Annahmen sein, wobei hierfür die Definition eines solchen zunächst noch diskutiert werden müsste. Sofern möglich und datenschutzrechtlich erlaubt könnten aber bereits vorhandene Daten bei den größten Anlagenbauern, welche einen Großteil der in den letzten Jahrzehnten gebauten Nachverbrennungsanlagen *abdecken*, für eine Datengrundlage sorgen.

2.6.3. Nutzung von Niedertemperaturabwärme

Für die Niedertemperaturabwärme wurde eine umfangreiche Analyse durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Die vollständige Analyse befindet sich in Anhang.

Einführung: Der Bereich der Niedertemperaturabwärme (NT-Abwärme) bezieht sich auf einen Temperaturbereich der Abwärme von unterhalb 100°C. Höhere Bereiche der Abwärmemetemperaturen (>100°C) bleiben im Kontext dieses Factsheets unberücksichtigt.

Grundsätzliche Möglichkeiten einer Abwärmenutzung unterscheiden sich in die Bereiche Wärme-, Kälte- und Strombereitstellung und sind u.a. abhängig von dem Temperaturniveau der Abwärme. So erfordern beispielsweise die Prozesse zur Stromerzeugung aus Abwärme Mindesttemperaturniveaus von oberhalb etwa 110°C. Im Hinblick auf die Wärmebereitstellung aus Abwärme ist insbesondere die Integrationsmöglichkeit von Wärmepumpen zu berücksichtigen, um das nutzbare Temperaturniveau der Abwärme zu erhöhen. Gerade vor dem Hintergrund der Nutzbarmachung von Niedertemperaturabwärme, welche sich auch auf einem Temperaturniveau von 25-30°C (z.B. kühlwassergebundene Abwärme) bewegen kann. Aufgrund der als hoch erwarteten Verfügbarkeit und Verbreitung von kühlwassergebundener Abwärme, wird dieser im Kontext der NT-Abwärme eine besondere Relevanz zugeschrieben.

Studienlage: Dieser zu erwartenden Relevanz steht allerdings ein Mangel an belastbaren Potenzialabschätzungen für den (Industrie-) Abwärmemetemperaturbereich unterhalb 100°C in Deutschland entgegen. Mitunter wird der Temperaturbereich im Rahmen verschiedener Datenerhebungen und Veröffentlichungen vergrößert, d.h. auch Temperaturbereiche oberhalb 100°C in den Bereich der NT-Abwärme einbezogen, oder die Stichprobengröße wird als nicht ausreichend groß erachtet, um repräsentative Aussagen ableiten zu können. Eine unmittelbare Vergleichbarkeit bzw. Aussagekraft der Datengrundlage wird daher als nicht gegeben bzw. ungenau eingeschätzt. Dennoch können aus den verfügbaren Daten unterschiedliche Tendenzen aber auch grundsätzliche Größenordnungen abgeleitet werden.

Möglichkeiten Potenzialausschöpfungen: Die Möglichkeiten zur Nutzung von industrieller NT-Abwärme werden aus verschiedenen Perspektiven betrachtet. Einerseits aus einer unternehmensinternen Perspektive und andererseits aus einer unternehmensexternen Perspektive im Verbund mit der das Unternehmen umgebenden Infrastruktur (quartiersübergreifender Kontext). Im unternehmensinternen Kontext werden Potenziale ebenfalls aus zwei Perspektiven heraus betrachtet. Einerseits wird ein Potenzial gesehen, vorhandene (bisher ungenutzte) NT-Abwärme zur Rückgewinnung in bestehenden (internen) Prozessen zu nutzen. Andererseits wird ein zweites Potenzial gesehen, Prozesswärme-, Raumwärme- und Warmwasserbereitstellungen hinsichtlich einer Temperaturabsenkung zu ertüchtigen, um die Integrationsmöglichkeit von NT-Abwärme zu steigern. Die auf diese Weise intern aufgebauten NT-Wärmenetze können auch werksgrenzenübergreifend im quartiersübergreifenden Ansatz fortgeführt werden.

Betrachtet man das Wärmenetz aus einer noch größeren Dimension heraus, so kann die Integration von industrieller (NT-) Abwärme auch vor dem Hintergrund von Nah-/Fernwärmenetzen betrachtet werden. Hierbei wird oftmals Schweden als positives Beispiel genannt, wenn es darum geht industrielle Abwärme in Fernwärmenetze einzuspeisen bzw. geeignete Geschäftsmodelle zu entwickeln. Auch in Deutschland existieren Ansätze und Erfolgsbeispiele zur Integration von Abwärme in Wärmenetze.

Energiebedarf: Wenn es um die Fragestellung der Potenziale im Bereich der NT-Abwärmenutzung geht, so ist eine Information über den grundsätzlichen Energiebedarf für Wärmeanwendungen in der Industrie

unerlässlich und gleichzeitig eine Abschätzung des Anteils des Energiebedarfs für die wesentlichen Wärmesenken einer solchen Abwärme am Gesamtenergiebedarf. Die wesentlichen Wärmesenken stellen die Bereiche der Prozesswärme <100°C sowie Raumwärme und Warmwasser dar.

Der Endenergiebedarf für Wärmeanwendungen in der Industrie beläuft sich für das Jahr 2019 auf insgesamt ca. 517 TWh und teilt sich auf in 472 TWh für Prozesswärmeanwendungen sowie 45 TWh für Raumwärme/Warmwasser [143]. Der Prozesswärmebedarf bezieht sich hierbei auf das gesamte Temperaturniveauspektrum. Schätzungen beziffern den Anteil der Bereiche Prozesswärme <100°C sowie Raumwärme und Warmwasser auf bis zu 30 % des Gesamtwärmebedarfs.

Die Deckung dieses Wärmebedarfs erfolgt in großen Teilen durch den Einsatz von (fossilen) Brennstoffen. Diese machen für die Prozesswärme etwa 92 % aus und für die Bereiche der Raumwärme und Warmwasser ca. 97,5 %. In Summe erfolgt Deckung des Gesamtwärmebedarfs zu etwa 93 % durch den Einsatz von (fossilen) Brennstoffen. [143]

Aus diesen Strukturen folgt die Annahme, dass eine weitreichende Dekarbonisierung des industriellen Wärmebedarfs neben der (reinen) Elektrifizierung auch auf dem Weg eines effizienten Brennstoffeinsatzes erfolgen kann. Dieser kann einerseits durch Temperaturniveauabsenkungen bei der Prozesswärme <100°C sowie Raumwärme und Warmwasser oder Substitution von Wärmeprozessen (z.B. Trockenfertigung) erfolgen und andererseits über die Integration und Nutzbarmachung von NT-Abwärme für diese Wärmeanwendungen.

Forschungsempfehlung: Die im folgenden genannten Forschungsempfehlungen wurden im Kontext von Literaturrecherchen abgeleitet. Aus den Ergebnissen wurde zudem ein konkreter Forschungsimpuls im Sinne eines Quick-Scan ausgearbeitet. Die Empfehlungen richten sich von der Ermittlung grundsätzlicher Potenzialbestimmungen bis hin zur Weiterentwicklung von bestehenden Datenerhebungsgrundlagen:

- Erstellung aussagekräftiger Potenzialbestimmung von NT-Abwärme in Deutschland
- Analyse und Ausschöpfung des Dekarbonisierungspotenzials für Wärmeanwendungen unterhalb 100°C
- Analyse und Ausschöpfung des Temperaturabsenkungspotenzials für Prozess- und Raumwärme- sowie Warmwasseranwendungen
- Einheitliche, bundesweite Erstellung und Regelung von (Ab-)Wärmeatlanten
- Forcierung und Erstellung von kommunalen und regionalen Wärmeplänen
- Steigerung Integration von industrieller Abwärme in Wärmenetzen im Sinne vernetzter Quartiere
- Weiterentwicklung und Ausbau von LowEx-Wärmenetzen
- Weiterentwicklung im Rahmen von Dissertation erhobener Daten (Durchführung von Untersuchung anhand BImSchV-Emissionserhebung)
 - Aufschlüsselung des Abwärmeangebots und Wärmebedarfs nach räumlichen Aspekten unter Berücksichtigung der maximal möglichen Transportdistanz
 - Fokus auf Absenkung der Investitionskosten der Technologien zur Abwärmenutzung
 - Untersuchung der Abgaszusammensetzung
 - Abgleich der angegebenen Emissionsdaten mit den realen Werten (breit angelegte Studie mit verschiedenen Fallstudien in jedem Sektor notwendig)

- Untersuchung der Entwicklung der Abwärmemengen (Zeitreihe entwickeln für Auskunft über Entwicklung des Temperaturniveaus der Abwärme über die Zeit)
- Dauer der Emissionen

Für das Themenfeld Niedertemperaturabwärme wurde im Rahmen des Projekts ein Quick-Scan erstellt. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Die vollständige Analyse finden Sie in Anhang.

Ausgehend von Literaturrecherchen und Projekterfahrungen ist davon auszugehen, dass in der industriellen Praxis ein hohes Dekarbonisierungspotenzial für Wärmeanwendungen im Bereich unterhalb von 100°C vorliegt. Prozesswärme-, Raumwärme- und Warmwasserbereitstellungen könnten oftmals auf zu hohen Temperaturniveaus oder mittels ungeeigneter Wärmeträger (z.B. Dampf) versorgt werden. Gleichzeitig wird ein Potenzial zur Temperaturniveauabsenkung gesehen. Aufgrund einer unzureichenden Verbreitung von systemischen Optimierungen im Vergleich zu reinen Ersatzinvestitionen wird der im Folgenden dargestellte Forschungsimpuls vorgeschlagen:

1. Studie zum qualitativen und quantitativen Aufkommen von NT-Abwärme in der Industrie in Deutschland
2. Untersuchung verfügbarer, technischer Realisierungsmöglichkeiten zur CO₂-reduzierten Wärmeversorgung im Bereich Prozesswärme <100°C, Raumwärme und Warmwasser
3. Analyse der zu erfüllenden technischen Voraussetzungen für die Realisierung einer Temperaturniveauabsenkung im Bereich Prozesswärme <100°C, Raumwärme und Warmwasser
4. Identifikation geeigneter Branchen und Prozesse mit einem übertragbaren Potenzial zur Temperaturniveauabsenkung und/oder Substitution von Wärmeträgern
5. Identifikation und Definition allgemeingültiger Anforderungen und Kriterien zur systematischen und einfachen Analyse des Dekarbonisierungspotenzials im individuellen Einzelfall
6. Entwicklung von Lösungsansätzen, um systemische Potenzialanalysen statt reiner Ersatzinvestitionen zu etablieren

Ermitteltes Einsparpotenzial: Das Energieeinsparpotenzial von Niedertemperaturwärmenetzen und der zusammenhängenden Dekarbonisierung des industriellen Wärmebedarfs wird auf ca. 15,5 PJ pro Jahr beziffert. Unter einem angenommenen Einsparpotenzial i.H.v. 3 % für das Jahr 2030 und einer potenziellen Potenzialsteigerung von 10 % der genannten 15,5 PJ/a je 10 Jahre (z.B. aus Ausweitung auf weitere Temperaturbereiche) ergibt sich für das Jahr 2030 ein Einsparpotenzial i.H.v. 3,72 PJ und für das Jahr 2050 ein Potenzial i.H.v. 20,64 PJ/a.

THG-Minderungspotenzial: Mit den Emissionsfaktoren im Jahr 2030 und einer angenommenen Energieträgerzusammensetzung ergibt sich ein THG-Minderungspotenzial i.H.v. 0,21 Mio. t CO₂-äq. für das Jahr 2030.

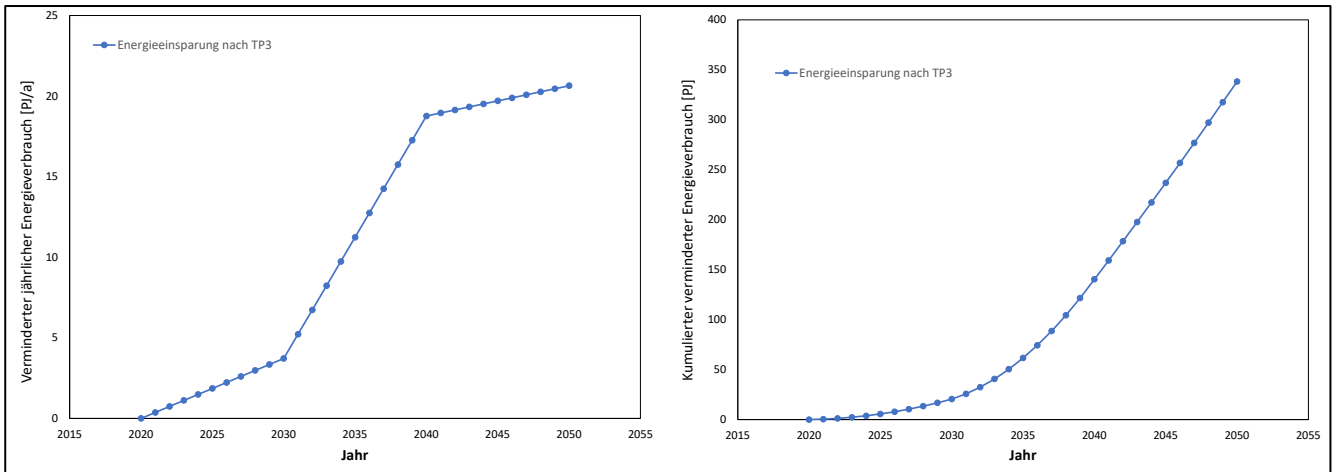


Abbildung 2-37: Jährliche eingesparte Energie (links) und kumulierte eingesparte Energie (rechts) im Kontext Niedertemperaturabwärme

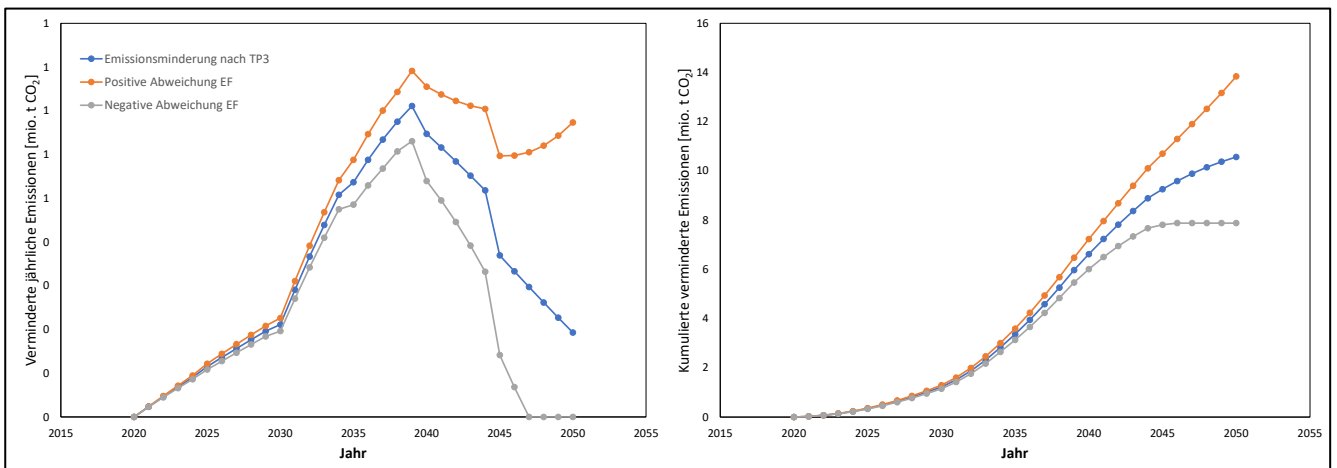


Abbildung 2-38: Jährliche eingesparte Emissionen (links) und kumulierte eingesparte Emissionen (rechts) im Kontext Niedertemperaturabwärme

Hemmnisse: Hemmnisse im Kontext der NT-Abwärme bzw. NT-Wärmenetzen, wie sie im Quick-Scan thematisiert werden, ergeben sich vor unterschiedlichen Hintergründen. Klassische Effizienzhemmnisse, wie die Investitionskosten oder Unsicherheiten bei Technologiewechseln gehören ebenso zu den Hemmnissen wie die Komplexität und der (Mehr-)Aufwand, welcher mit dem Aufbau von NT-Wärmenetzen einhergeht. (Über-)Versorgungen auf hohen Temperaturniveaus ermöglichen die Versorgung auf nur einem Temperaturniveau und einem Verteilsystem, auch als Folge gewachsener Strukturen. Diese Strukturen aufzubrechen, wird als großes Hemmnis im Bereich der NT-Abwärmenutzung gesehen.

2.6.4. Thermische Energiespeicher: Latentwärmespeicher

Latentwärmespeicher wurden im Kontext der industriellen Abwärmenutzung mit einer detaillierten EDUAR&D-Analyse untersucht. Diese befindet sich im Anhang, zentrale Aspekte der Analyse werden im Folgenden zusammengefasst wiedergegeben.

Technologiebeschreibung

Bei einem thermischen Energiespeicher wird immer entweder Wärme oder Kälte gespeichert. Folgende drei Prinzipien lassen sich unterscheiden: Sensible, latente und thermo-chemische Speicher. Die durchgeführte Analyse enthält Informationen über Latentwärmespeicher und thermochemische Speicher mit Fokus auf Latentwärmespeicher und den Temperaturbereich zwischen 100 und 600°C.

Durch die Phasenumwandlung eines Materials, wie z.B. Paraffin, Eis oder eines Salzhydrats, erfolgt die Speicherung der Wärmemengen. Der Einsatz verschiedener organischer und anorganischer Medien deckt den Nieder- und Hochtemperaturbereich von etwa -50°C bis über 600°C ab. Latentwärmespeicher besitzen gegenüber sensiblen Speichern den Vorteil, Wärme stets bei einer wohldefinierten Temperatur abzugeben. Nachteilig ist die Tatsache, dass die Wärmeübertragung zwischen dem erstarrenden Speichermedium und der Wand, über die der Wärmestrom aus dem Speicher abfließt, zeitabhängig ist und der Wärmestrom beim Entladeprozess immer schwächer wird [144], [145]. Da das erstarrte Speichermedium die Wärme in der Regel schlechter leitet als das flüssige Speichermedium, wächst der Wärmeleitwiderstand zwischen der Erstarrungsfront und der Wand mit der Entladezeit an. Eine der wichtigen Herausforderungen für die Forschung besteht deshalb darin, die Grenzfläche zwischen Speichermedium und Wandmaterial mit verästelten Wärmeübertragungsstrukturen zu versehen, die einen möglichst zeitunabhängigen Wärmestrom gewährleisten.

Die potenziellen Anwendungsmöglichkeiten von Latentwärmespeichern und thermochemischen Speichern sind vielfältig und sind in der Industrie bei verschiedenen Prozessen und in der Regel bis zu einer Temperatur der Abwärme von bis zu 500°C zu finden. Nitratsalze und -mischungen werden bei Abwärmemetemperaturen von etwa 130 bis etwa 400°C eingesetzt und sind zur Prozesswärmespeicherung gut geeignet. Hochtemperaturspeicher bis über 1000°C könnten bei der Eisen- und Stahlerzeugung, in der chemischen Industrie, in der Papierindustrie, in der Nahrungsmittelindustrie, im Maschinenbau und in der Steine-und-Erden Industrie angewandt werden.

Marktkontexturierung

Der Bedarf thermischer Speicher in der Industrie dürfte in Zukunft erheblich steigen. Dies ist auf die Notwendigkeit zurückzuführen, fossile Primärenergie in der Industrie durch den Einsatz von erneuerbaren Energien, oft fluktuierend anfallende Abwärme und strombedarfsgeführte Kraft-Wärme-Kopplung zu ersetzen und die Wärmelasten zeitlich zu verlagern.

Das Vorhandensein großer Abwärmeströme im Hochtemperaturbereich in der Grundstoffindustrie ist ein wichtiger Treiber für die Forschung, Entwicklung und Diffusion thermischer Wärmespeicher, insbesondere von Latentwärmespeichern und thermo-chemischer Speicher. Sowohl die hohen Material- und Herstellungskosten der Speicher als auch die spezifischen Eigenschaften der Phasenwechselmaterialien, wie z.B. eine hohe Korrosivität oder Toxizität, wirken andererseits hemmend auf den großflächigen Markteintritt dieser Techniken.

Latentwärmespeicher für hohe Temperaturanwendungen in der Industrie sind derzeit noch nicht am Markt etabliert. Der derzeitige Markt für Wärmespeicher konzentriert sich aufgrund der Rolle der Wärme- und Stromversorgung und teilweise aufgrund der in der Industrie vorhandenen Abwärmepotenziale auf die hoch-industrialisierten Regionen Nordamerikas, Zentraleuropas und auf den asiatisch-pazifischen Raum. Nordamerika und Westeuropa werden bis 2030 aufgrund ihrer klimapolitischen Verpflichtungen als wichtigste Märkte von thermischen Energiespeichern betrachtet, allerdings fehlen spezifische Marktdaten für Latentwärmespeicher bzw. thermo-chemische Speicher.

Aufgrund der verschiedenen potenziellen Hersteller und unterschiedlichen Nutzungsarten dieser Technik kann der Markt für Latentwärmespeicher als Polypolmarkt sowohl auf der Herstellerseite wie Anwenderseite angesehen werden. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass es sich um einen fragmentierten Markt handelt, d.h., es ist tendenziell ein sehr wettbewerbsintensiver Markt ohne dominante Akteure. Die Hauptproduzenten von Latentwärmespeichern sowie thermochemischen Materialien bzw. Komponentensystemen für Latentwärmespeicher in Deutschland sind Rubitherm und Axiotherm GmbH [146], [147].

Energietechnische und -wirtschaftliche Bewertung

Im Rahmen der vorliegenden Analyse wurde ein rentables Effizienzpotenzial bis 2030 für Latentwärmespeicher in der Industrie von 25 PJ/a (bis 600°C) abgeschätzt. Der Einsatz der Latentwärmespeicher ist bei der Mittel- und Hochtemperatur Wärmespeicherung (überwiegend bei Batch-Prozessen) von Bedeutung, insbesondere bei Gießereien, der Pharma-Industrie, der Nahrungsmittelindustrie, im Maschinenbau, sowie den Steine-und-Erden Industrien. Das rentable Effizienzpotenzial berücksichtigt die teilweise Einführung von Nanomembranen und Nanofiltration als Ersatz für thermische Trennverfahren der o.g. Industriezweige; dies wird die nutzbaren Abwärmemengen bis 2050 deutlich reduzieren (Haltenort und Jochem, 2021).

Die Bewertung der erwarteten Emissionsminderung für das abgeschätzte rentable Potenzial zeigt, dass die Wärmeenergieeinsparungen mittels Latentwärmespeicher bis 2050 zunehmen. Es zeigt sich, dass eine Diffusion der Latentwärmespeicher in der Industrie in Deutschland zu merklichen Emissionsminderungen und Energieeinsparungen führen kann. Zur Berechnung der vermiedenen CO₂-Emissionen wurden für den vermiedenen Erdgas- und Strombezug durchschnittliche projizierte Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes gewählt. Dabei wird ab 2035 eine allmähliche Substitution zum Wasserstoff und synthetischen flüssigen Kohlewasserstoffen angenommen. Der Anteil der erneuerbaren Energien (Holzbrennstoffe, Biogas und Solarthermie) zeigt eine langsame Zunahme bis zu 7,5 % an den insgesamt genutzten Abwärmern bis 2050 - d.h., eine Verdopplung gegenüber der heutigen Nutzung.

Die so abgeschätzte Emissionseinsparung bis 2050 in Deutschland beträgt:

- etwa 11,5 Mio. t CO₂-äq. (kumuliert, bei Berücksichtigung der oben beschriebenen Substitutionseffekte und systemischer Betrachtung) und
- gut 16 Mio. t CO₂-äq. ohne die Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen.
- Um das Jahr 2036 erreichen die kumulierten THG-Minderungen 5 Millionen Tonnen CO₂-äq. und verdoppeln sich (10,4 Mio. Tonnen) bis 2045 ggü. dem Status Quo.

Technikzyklusanalyse

Hochtemperatur-Latentwärmespeicher sind derzeit mit Ausnahme von Dampfspeichern nicht kommerziell verfügbar. In der Technikzyklus-Skala werden Hochtemperatur-Latentwärmespeicher daher zwischen 2 bis 4 eingestuft. Kommerziell verfügbare Latentwärmespeicher im Niedrigtemperaturbereich sowie Eisspeicher für die Gebäudeklimatisierung werden wie folgt eingeschätzt: Technikzyklus 5-6 (TRL 9). Hochtemperatur-Latentwärmespeicher mit Phasenwechselmaterial aus anorganischen Materialien oder Salzhydraten oder Nitraten werden in der Technikzyklusanalyse mit 4 sowie TRL 6 eingestuft. Speicher mit organischen Materialien wie Paraffinen (TRL 9) oder Kunststoffen erreichen im Technikzyk-

lus die Phase 5 bis Anfang 6 bzw. einen TRL zwischen 6-9. Latentwärmespeicher mit integrierten Rippenrohrwärmeüberträgern wurden mit unterschiedlichen Phasenwechseltemperaturen zwischen 140 °C und 305 °C in der Industrie aufgebaut und betrieben. Diese Technik wird im Technikzyklus mit 4 bis 6 eingeordnet und mit TRL 6 bis 7 eingestuft.

Thermo-chemische Wärmespeicher sind derzeit nicht kommerziell verfügbar. Für Speichertechniken basierend auf Adsorption konnte die technische Machbarkeit im Labor nachgewiesen werden (Technikzyklus 2 bis 4).

Zur besseren Einordnung der thermischen Wärmespeicher in den Technikzyklus wurde sowohl eine Patent- als auch eine Publikationsanalyse durchgeführt. Für deren Ergebnisse wird auf die ausführliche Analyse im Anhang verwiesen.

Innovationssystemanalyse

Die zentralen Akteure auf nationaler und teilweise auf internationaler Ebene wurden für Latentwärmespeicher identifiziert. Darunter fallen aktuelle und potenzielle Anwender, Technologiehersteller und Institutionen aus Wissenschaft und Forschung von LWS im Hochtemperaturbereich. Eine Auswahl der zentralen Akteure des Innovationssystems für Latentwärmespeicher in Deutschland ist in Abbildung dargestellt.

<p>(Potenzielle) Anwender</p> <ul style="list-style-type: none"> • Badische Stahl Engineering • Gießerei Heunisch GmbH • Automobilhersteller • Fein-Chemie und Pharmazeutische Industrie • Wärmeprozesse im Batchbetrieb in weiteren Industrie-Branchen • Kraftwerksbetreiber • KWK-Anlagen-Betreiber • Fernwärme-Unternehmen 	<p>Technologie- und Komponentenhersteller</p> <p>Die Hauptproduzenten weltweit sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rubitherm und Axiotherm • Cryopak A TCP Company, • Microtek Laboratories, Inc., • Henkel AG & Co. KGaA, • Parker Hannifin Corp., • Croda International PLC • WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH • KIESELSTEIN International GmbH • Firma Wolf GmbH • STEAG New Energies
<p>Forschungsfördernde Institutionen</p> <ul style="list-style-type: none"> • DFG • BMBF und BMWi (EFP) • EU-Kommission • Wissenschaftsministerien der Länder <p>Beispiele von Forschungsprojekten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modulare PCM-Speicher mit hoher Leistungsdichte auf Basis von 3D-Drahtstrukturen (MOSPEDRA) • Erweiterung der Forschungsaktivitäten im CeraStorE • BERTI: „Bewegtes Reaktionsbett zur thermochemischen Energiespeicherung“ • BERTI: „Entwicklung eines luftgeführten thermochemischen Flüssigsorptionsspeichersystems für Kühl-, Heiz- und Trocknungsanwendungen“ 	<p>Wissenschaft und Forschung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) • Lehrstuhl Metallische Werkstoffe (MW) • Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) – Dresden • Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. - Standort Stuttgart – Tech. Thermodynamik • Universität Siegen • Hochschule für Technik Stuttgart • KIT Karlsruhe • Fraunhofer ISE, IEE • ZAE Bayern • ZSW

Abbildung 2-39: Zentrale Akteure des Innovationssystems für Latentwärmespeicher in Deutschland sowie exemplarische Forschungsprojekte

Ableitung möglicher Entwicklungsziele

In der detaillierten EDUAR&D-Analyse zur Latentwärmespeichern (siehe Anhang) wurde eine ausführliche Liste von möglichen Forschungs- und Entwicklungszielen identifiziert, die im Folgenden nur auszugsweise wiedergegeben werden können.

Material-bezogene Themen / Phasenwechselmaterialien:

- PCM haben häufig noch materialspezifische Qualitätsprobleme (z.B.: sie schmelzen zu schnell, nicht hinreichende Zyklenstabilität – Entmischungs- und Verunreinigungsverfahren) – dies sind Ansatzpunkte für weitere F&E
- Weitere F&E bzgl. der Stabilität der Verkapselung von Speichern ist erforderlich – auch um spezifische Kosten zu senken
- Die Schmelzfähigkeiten von Zuckeralkoholen, Salzhydraten und Kunststoffen in einem Temperaturbereich bis 200°C sollten weiter untersucht werden

Spezifische Themen der Speicherung von Hochtemperaturwärme

- Im Hochtemperaturbereich muss der Wärmeübergang (zwischen Speichermaterialien und Wärmeträgermedien) bei latenten Speichern verbessert werden, darüber hinaus die Bestimmung des Ladezustandes

Ökonomische Entwicklungsthemen

- Untersuchung von LWS und thermochemischen Speichern als Tagespufferspeicher in Kombination mit ORC-Anlagen für eine effizientere Abwärmenutzung. Evtl. ergibt sich durch die Kombination der beiden Techniken durch erhöhte Jahresnutzungsstunden eine bessere Wirtschaftlichkeit der ORC-Systeme [148].
- Im Bereich bis 200 °C sollten die Wirtschaftlichkeit und die Kosten der Behälter für Salzhydrate und der Wärmetauscherbau genau untersucht werden. Diese beiden Komponenten sind sehr kostenintensiv bei LWS.
- Regulatorische und marktliche Rahmenbedingungen spielen eine wichtige Rolle für die Rentabilität von Investitionen bei Latentwärmespeichern und thermochemischen Speichern. Beide Systeme haben hohe Investitionen sowie hohe Betriebskosten, die sich nur bei günstigen Rahmenbedingungen als rentabel bewerten lassen. Hierbei mag neben dem Nutzen der Effizienzsteigerung (vermiedene Kosten für Primärwärme) auch der Nutzen der Flexibilisierung von Wärme- oder Stromnachfrage einen Beitrag leisten.

Empfehlungen und mögliche Politikmaßnahmen

Beim Einsatz von thermischen Speichern in energieintensiven industriellen Prozessen und zur Nutzung von Abwärme müssen die branchenspezifischen Potenziale in Zusammenarbeit mit den Betreibern entsprechender Industrieanlagen wegen der technischen Probleme der Wärmeübertragung bei hohen Temperaturen stark verunreinigter Rohabgase noch genauer untersucht werden.

Ein absehbar wichtiger Aspekt zur Erweiterung des zukünftigen Marktvolumens für LWS ist die Entkopplung von Wärmeerzeugung vom Bedarf und somit die Flexibilisierung der Wärmenachfrage seitens der Industrie. Hier können die LWS eine merkliche Rolle bei der Flexibilisierung von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und als Kurz- und Mittelfristspeicher von solarthermischer Wärme spielen.

Für Latentwärmespeicher und ihre technischen Wettbewerber, die thermochemischen Speicher, sollte die ökonomische Vorteilhaftigkeit unterschiedlicher Anwendungen im industriellen Bereich wie im energiewirtschaftlichen Sektor genauer untersucht werden.

Ein wichtiger Schritt für die weitere Förderung der F&E Aktivitäten der Latentwärmespeicher und ihrer erforderlichen Akzeptanz bei den Unternehmen geeigneter Prozesse und Branchen ist die Entwicklung von Demonstrationsprojekten in unterschiedlichen Industriebranchen und für gut geeignete Anwendungen. Erfolgreiche Demonstrationsprojekte könnten manche Risiken der LWS-Anwendungen klarer umreißen und die Entscheidungen von Erst-Investoren positiv beeinflussen.

Das Förderprogramm für Energieeffizienz in der Wirtschaft („Modellprojekte Industrie“), das am 22.1.2020 gestartet wurde [149], eignet sich im Grundsatz gut für Demonstrationsprojekte. Die Ergebnisse von Demonstrationsvorhaben könnten auch dazu genutzt werden, Leitfäden für energietechnische Berater und Energiemanager zu entwickeln, die in einer ersten überschlägigen Betrachtung zu einem Ergebnis kommen, ob ein LWS sich wahrscheinlich für den konkreten Fall rentieren würde oder nicht.

2.6.5. Mitteltemperatur-Wärmeübertrager

Technikbeschreibung: In vielen industriellen und gewerblichen Produktionsprozessen fällt Abwärme an. Im mittleren Temperaturbereich (MT) zwischen 120°C und rund 600°C sind dies meist Abwärmeströme von Rauchgasen (z.B. von Kupolöfen), von Trocknungsprozessen (z.B. der Lackierung), die sensible Wärme von industriellen Zwischenprodukten (z.B. der Metall- und Glasformgebung und -verarbeitung, der Petrochemie) oder von Endprodukten (z.B. Brotherstellung), aber auch die Abwärme von Querschnittstechniken (z.B. BHKWs) oder Umweltschutztechniken (z.B. Nachverbrennungsanlagen; vgl. Abschnitt 2.6.2).

Bevor die Abwärme an anderer Stelle genutzt werden kann, muss sie technisch verfügbar gemacht werden. Dies geschieht meist mittels Wärmetauschern (WT, auch Wärmeübertrager genannt), die ein Grundelement der meisten Abwärmennutzungssysteme sind. MT-Wärmetauscher können in sehr verschiedener Bauform und aus sehr unterschiedlichen Materialien (Edelstahl, Aluminium, Titan, Tantal, Kupfer, Glas etc.) hergestellt werden. Bauformen und Materialwahl hängen von einer Fülle von Prozessparametern und Entscheidungsfaktoren ab; wichtige Aspekte hierbei sind:

- Temperaturbereich, Wärmetransfer von einem Stoffstrom zu einem anderen, die geforderte Wärmetauscherleistung, Druckverhältnisse, zulässige Druckverluste;
- Massenströme, Zusammensetzung der Medien, Lastfälle und -wechsel;
- Korrosivität der Medien (z.B. säurehaltige Bestandteile), Tendenz des Foulings der Wärmetauscherflächen, hygienische Anforderungen, Wartungs-, Sicherheits- und Austauschbarkeits-Aspekte;
- Kapital- und Raumbedarf, geforderte Lebensdauer, Reinigungs- sowie andere Betriebskosten.

Marktkontexturierung: Scheinbar gleiche Produktionsprozesse mit Mitteltemperatur-Abwärme sind oft bei den Produktionsstandorten leicht unterschiedlich im Temperaturniveau, im Abwärmestrom und in ihrer zeitlichen Dynamik. Zum Teil haben sie auch unterschiedliche Umweltschutztechniken bei den Rauchgasen oder Abflotten. Damit scheidet oft eine weitgehende Standardisierung von Wärmetauschern an individuellen Prozessgegebenheiten oder auch an speziellen Wünschen und Anwendungsfällen der Kunden.

Die Vielfalt der Anwendungsfälle, kleine Produktions-Serien und individuelle Lösungen führen zu oft mittelständischen Herstellern, die auf bestimmte Anwendungsfälle, Branchen bzw. bestimmte WT-Bau-

arten, Materialien und Leistungen spezialisiert sind [150]). Teilweise sind die Hersteller nur in begrenzten Regionen als Anbieter präsent, zum Teil aber auch auf relativ vielen Auslandsmärkten mit einem sehr speziellen Produkt. Zudem gibt es auch weltweit agierende Hersteller mit Konzernstruktur.

Oberflächlich betrachtet kann man den Markt für MT-Wärmetauscher als ein bilaterales Polypol ansehen, welches sowohl auf der Ebene der WT-Anbieter als auch auf der Nachfrageseite eine relativ große Anzahl von unterschiedlichen Marktteilnehmern aufweist. Differenzierungskriterien für MT-Wärmetauscher bzw. deren Hersteller sind Erfahrung, Servicetreue und -schnelligkeit sowie Produktqualität, wobei der Preiswettbewerb sehr bestimmend ist. Durch die Spezialisierung von Wärmeübertrager-Bauarten und Oberflächen kommt es aber auch zu Angebots-Oligopolen.

Technische Wettbewerber: Abwärme $> 120^{\circ}\text{C}$ im Industrie- und Gewerbebereich stammt zum größten Teil aus thermischen Prozessen wie Trocknern, thermischen Trennverfahren, Öfen sowie der internen Wärme der Produkte und entstehender Abfallstoffe (z.B. Schlacken), wobei letztere kaum genutzt wird. Ein Teil diese Prozesse könnte substituiert werden und den gleichen Output bei geringeren Temperaturen erzielen (z. B. Nanomembran-Techniken, Adsorption oder Extraktion ersetzen thermische Trennverfahren). Bei stückigen Gütern könnte auch eine direkte Wärmeübertragung auf einen Gasstrom erfolgen. Bei Synthesen könnten neue Katalysatoren die anfallende Abwärmemenge und/oder deren Temperatur vermindern.

Hinzu kommt, dass die heute meist mit Erdgas betriebenen Prozesse (entweder direkt oder indirekt mit Erdgas erzeugtem Dampf) zukünftig teilweise durch elektrisch betriebene Prozesse substituiert werden können. Die bislang anfallenden Abwärmemengen werden sich dann reduzieren aufgrund des nicht mehr erwärmten Luft-Stickstoffs (soweit nicht bestimmte Prozessbedingungen erhebliche Falschlufmengen erforderlich machen).

Energetechnische und -wirtschaftliche Bewertung: Ein Teil des oben genannten technischen Gesamt-Abwärmepotenzials (270 PJ/a für Temperaturen zwischen 120 und 500°C) ist mit heutigen MT-Wärmetauschern rentabel zu nutzen. Wie groß das zusätzliche Potenzial durch weitere F&E ausfallen könnte, wenn man die Wärmeübertragungsrate, die Korrosionsfestigkeit und die Antifouling-Eigenschaften deutlich verbessert, lässt sich sehr schwer und nur sehr grob abschätzen. Hinzu kommt die Verminderung des Potenzials infolge plausibler, zukünftiger technischer Alternativen, wie oben beschrieben.

Berücksichtigt man alle das Potenzial mindernden Faktoren, d.h., man zieht die Abwärmennutzungs-Potenziale für die Stromerzeugung durch ORC-Technik und thermoelektrische Generatoren vom Gesamtpotenzial ab und ebenso die verschwindenden Abwärmepotenziale durch neue Prozesstechniken, dann bleibt für die neuen, durch Forschung und Entwicklung eröffneten Anwendungen der MT-Wärmetauscher ein Potenzial von etwa 30 PJ/a bis 2040 und von etwa 40 PJ/a bis 2050. Die höchsten CO_2 -Emissionsminderungen der neuen, durch F&E verbesserten Wärmeübertrager werden mit gut 1 Mio. t/a in den 2030er Jahren erwartet. Obwohl ihr Energieeffizienz-Beitrag in den 2040er Jahren weiter zunimmt - und damit die Energiekosten weiter senken wird -, nehmen die vermiedenen CO_2 -Emissionen bis 2045 wegen der klimaneutralen Wärmeerzeugung auf fast Null ab. Die ersten 5 Mio. vermiedenen kumulierten t CO_2 -äq. könnten bis Ende der 2020er Jahre erreicht werden.

Die erzielbaren Kostenreduktionen durch Skaleneffekte in der Serienfertigung könnten durch Exporte in andere Industrie- und Schwellenländer verstärkt werden.

Technikzyklus-Analyse: Bei der Analyse der transnationalen Patente für die Wärmeübertrager für die Zeit der 2010er Jahre nimmt Deutschland bei sieben von acht Patent-Untergruppen nach den USA oder Japan den 2. oder 3. Platz ein. Allerdings ändert sich das Bild der "Oberliga" bei der bibliometrischen Analyse: hier liegen die deutschen Autoren bei den internationalen Veröffentlichungen in der Gesamtwertung auf Platz 5 (mit 73 Publikationen) hinter Tabellenführer China (mit 446 Publikationen), USA (188), gefolgt vom Iran und Indien. Lediglich bei keramischen Wärmetauschern und der Reinigung von Wärmetauschern stehen deutsche Autoren auf Platz 2. Hier scheint sich nicht nur eine Spezialisierung der deutschen Forscher abzuzeichnen, sondern auch insgesamt ein Verlust an technologischer Kompetenz relativ zu Autoren in anderen Ländern.

Sowohl die enorm gestiegenen Anmeldezahlen der transnationalen Patente als auch die Publikationszahlen englischsprachiger Artikel führen zu dem Schluss, dass infolge der erheblichen Dynamik über etwa 15 Jahre mit erheblichen Marktneuheiten im Bereich der MT-Wärmetauscher in den kommenden Jahren zu rechnen ist. Der Markterfolg dieser neuen Wärmetauscher-Angebote ist noch offen; ob sie sich gegenüber den traditionellen Wärmetauscher-Angeboten aus technischen und/oder Kostengründen durchsetzen können, bleibt abzuwarten.

Aufgrund der analysierten Einzelfaktoren kommen die Autoren zu dem Schluss, dass sich einige der hochspezialisierten MT-Wärmeübertrager bzw. ihre Beschichtungen oder Oberflächenbeschaffenheit noch in der Phase 3 bzw. meist in Phase 4 des Technikzyklus befinden.

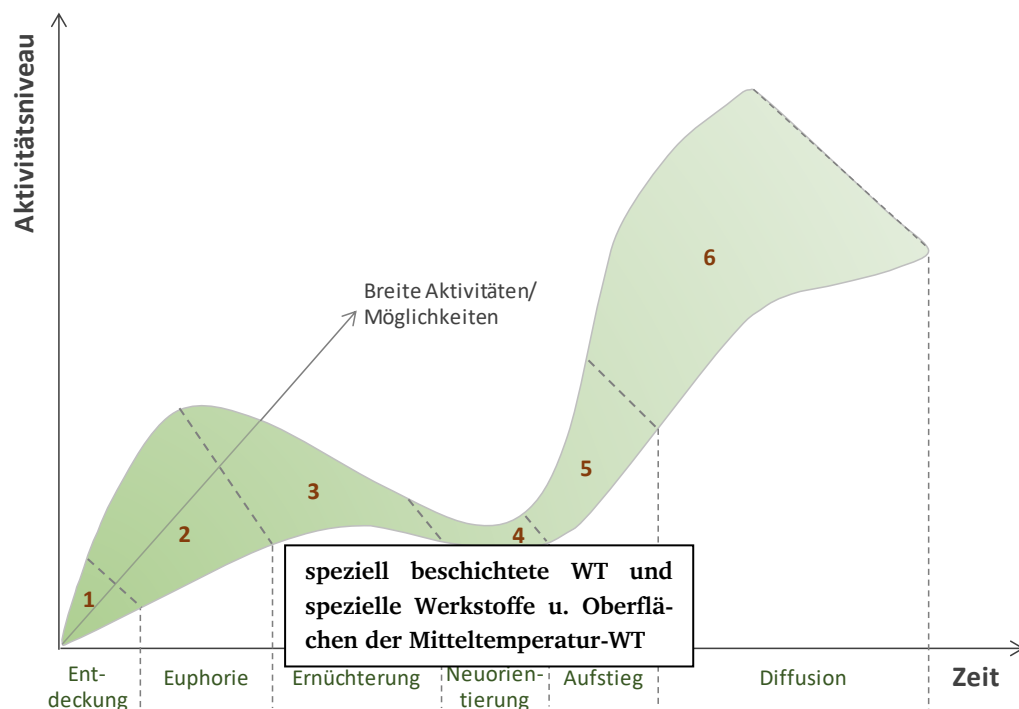


Abbildung 2-40: Der Technikzyklus und seine sechs verschiedenen Phasen angewandt auf die Mitteltemperatur-Wärmetauscher

Quelle: angelehnt an (Mayer-Krahmer & Dreher 2004), Abbildung IREES

Innovationssystemanalyse: Das Innovationssystem der MT-Wärmetauscher ist ähnlich heterogen und komplex wie die Vielfalt der MT-Wärmetauscher-Bauarten, ihrer verschiedenen Materialien und speziellen Oberflächen für die Fülle ihrer heute und für die nahe Zukunft angestrebten Anwendungen.

- Die F&E-Aktivitäten sind infolge der Heterogenität sehr breit auf verschiedene Einrichtungen von Forschung und Entwicklung bis hin zu branchenspezifischen Forschungsgemeinschaften der AIF verteilt. Grundlegende Forschungs- und Materialfragen werden durch einige spezialisierte Forschungseinrichtungen von Universitäten, Fraunhofer- und Leibniz-Instituten durchgeführt. Dabei erfolgen viele Arbeiten anwendungsorientiert in Konsortien aus Forschungsinstituten sowie Herstellern oder Anwendern.
- Die Spezialisierung auf bestimmte Bauarten, Leistungen, Materialien und Anwendersituationen führt zu einer gewissen Vielfalt von Herstellerunternehmen, was auch einen Ideen- und Kostenwettbewerb befördert; es gründete sich auch ein Herstellerverband für diese Technik.
- Für die angemessene Auslegung von MT-Wärmetauschern sind für bestimmte Anforderungen auch Vorschriften oder Empfehlungen von DIN oder VDI von Nutzen.

Die Arbeitsbeziehungen zwischen den verschiedenen Akteuren des Innovationssystems der MT-Wärmetauscher sind sehr vielfältig. Deshalb ist es kaum möglich, ein vereinfachendes, klares Bild der Arbeitsbeziehungen dieses Innovationssystems zu zeichnen. Dennoch sind Muster der Kooperation und der Innovationsprozesse zu erkennen:

- Die verschiedenen WT-Hersteller haben oft eingespielte und feste Kooperationen mit angewandten Forschungseinrichtungen. Regionale Nähe und Vertraulichkeit bzw. Geheimhaltung scheinen dabei eine prägende Rolle zu spielen, was den Wissenstransfer erschwert.
- Die konzernzugehörigen WT-Hersteller sind meist international und in den größeren WT-Leistungsklassen am Markt; die KMU-Hersteller haben eher bei speziellen Branchen und Prozessen mit kleineren WT-Leistungsklassen ihre Nischen. Diese Spezialisierungsmuster sind einerseits effizient, andererseits führen sie zu einem Energieeffizienz-Knowhow-Gefälle zwischen Branchen und Unternehmen (vgl. Abschn. 2.11 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Hemmende Faktoren: Technik-spezifische Hemmnisse sind bei den Mitteltemperatur-Wärmeübertragern ins-besondere fehlende Erfahrungen bei Anwendern und beratenden Ingenieuren, die Abwärmennutzung bei möglichst hohen Temperaturen durchzuführen, sowie fehlendes Auslegungs- und Erfahrungs-Knowhow für komplexere Wärmetauscher-Planungen. Die Investition in Abwärme-Nutzungssysteme bedeutet eine Kapital-intensivierung des Betriebes, die kleinere Betriebe wegen mangelnder finanzieller Flexibilität oft nicht schultern können. Hier bieten Kontraktoren oder Hersteller Lösungen an, die aber häufig an Risiko-Überlegungen dieser Anbieter scheitern. Zuweilen fällt auch der Mangel an Venture Capital auf, sodass kleinere Hersteller-Unternehmen wegen Zeitmangel und finanzieller Flexibilität einer F&E-Idee nicht nachgehen können.

Empfehlungen: Diese Hemmnisse, die verschiedene Akteursgruppen im Innovationssystem der Wärmeübertrager betreffen, sollten möglichst abgestimmt und simultan durch geeignete Maßnahmen (Demonstrationsprojekte, Aus- und Fortbildung, Risikofonds) beseitigt werden. Nur auf diese Weise wird es möglich sein, die erheblichen und rentablen Potenziale der MT-Wärmeübertrager schnell in der deutschen Industrie und im Gewerbe zu realisieren, sowie mit Exporten erfolgreich im internationalen Wettbewerb zu sein.

Die Empfehlungen für verschiedene Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bei den Wärmetauschern (korrosionsfeste Materialien, turbulente Strömung auch bei Teillast zur Verbesserung des Wärmetrans-

fers, Beschichtungen, Reinigungsprozesse, 3D-Fertigung etc.) durchlaufen derzeit unterschiedliche Phasen des Technikzyklus (von Euphorie bis Nischenmärkte). Es wäre aus Klimaschutz- und Wettbewerbsperspektive wünschenswert, dass die F&E-Arbeiten zu schnellen Erfolgen kommen und die Diffusionsphase für die neuen Generationen der Wärmeübertrager erreicht wird.

2.6.6. ORC-Anlagen (Organic Rankine Cycle)

Zur Bewertung der ORC-Anlagen wurde eine ausführliche EDUAR&D-Analyse angefertigt (siehe Anhang), die hier in Auszügen und zusammengefasst wiedergegeben wird.

Technikbeschreibung: Die ORC-Technik ist schon seit einigen Jahrzehnten für die Nutzung von Abwärme

(< 550°C bis zu etwa 80°C) zur Stromerzeugung (Nutzung der Exergie von Abwärmeströmen) bekannt [152]. Oberhalb dieses Temperatur-Niveaus sind konventionelle Dampfkraftwerke (auch als KWK-Anlagen) aus thermodynamischen, technischen und Kostengründen der ORC-Technik überlegen. Je tiefer diese Vorlauftemperaturen und je kleiner die Leistung der Arbeitsmaschine (Turbinen, Kolbenmaschinen, Schrauben-expander) sind, desto geringer ist der elektrische Wirkungsgrad (zwischen 21 % und 7 %; vgl. Abbildung). Im kleineren Leistungsbereich hat die modular aufgebaute Technik der Thermo-elektrischen Generatoren (TEG) mit ca. 10 % Wirkungsgrad und Moduleinheiten von etwa 1 kW einen ihr angemessenen Markt- und Anwendungs-bereich (vgl. Abschnitt 2.6.7). Wegen der hohen Kapitalintensität setzt die Nutzung der ORC-Technik einen kontinuierlichen Abwärmeeinfall voraus, um über hohe Jahresnutzungsstunden ihre Rentabilität zu erreichen.

Wärmeträger im Primärkreislauf sind i.A. Thermo-Öl (>130°C) oder Heißwasser (<130°C), welche die Wärme an die meist organischen Arbeitsmedien abgeben bzw. entnehmen. Die Arbeitsmedien in der ORC-Anlage hängen von den Vorlauf- und Kondensations-Temperaturen ab; meist sind es Kohlenwasserstoffe (z. B. Ethanol, aromatische Kohlenwasserstoffe, Silikon-Öle) oder Fluorkohlenwasserstoffe.

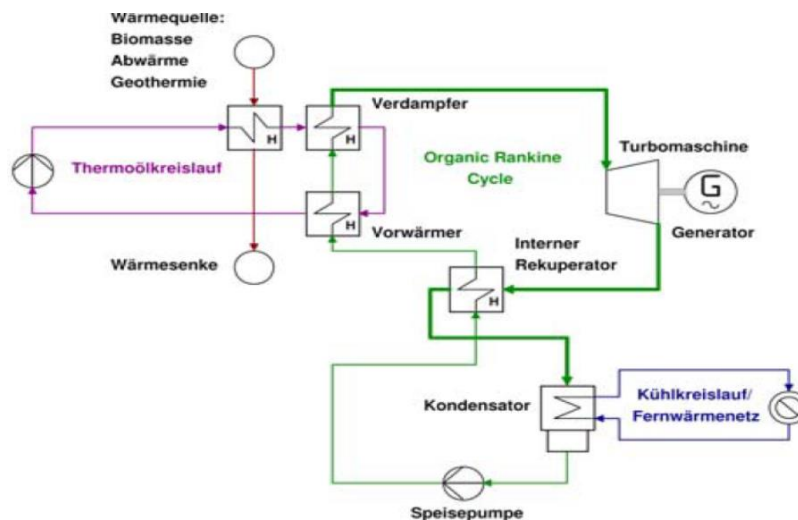


Abbildung 2-41: Schema einer ORC-Anlage mit Thermoölkreislauf (Quellenseitig) und Warmwasservorlauf eines Fernwärmenetzes auf Seiten der Abwärmesenke

Bei Anwendungen in der Industrie (derzeit knapp 200 Anlagen mit elektrischen Leistungen von mehr als 50 kW_{el} und weniger als 2.500 kW_{el}) müssen oft 30 bis 50 % der ORC-Anlage an die jeweiligen prozesstechnischen oder räumlichen Gegebenheiten angepasst werden; dies bedeutet höhere Investitionssummen gegenüber Standard-Lösungen (z.B. an Bio-BHKW angeschlossene ORC-Anlagen). Die ORC-

Anlagen können auch bei geothermischen Systemen vor Abgabe der Wärme an Fernwärmenetze in Zukunft eine Rolle spielen, wenn die Vorlauftemperaturen der Fernwärme hinreichend niedrig sind. Die Anwendungen haben gute Chancen der Marktdiffusion - auch weltweit - insbesondere in der Grundstoffindustrie und anderen energieintensiven Branchen.

Marktkontexturierung: Für die geringe Zahl der denkbaren Investitionen in ORC-Anlagen war die Anzahl der Hersteller in Europa Anfang der 2010er Jahre relativ groß, wahrscheinlich auch bedingt durch die euphorische Phase dieser Technik-Entwicklung damals. Denn von den im Jahre 2012 anbietenden 12 deutschen Herstellern (darunter Bosch, Siemens) sind Ende 2021 noch drei deutsche Hersteller aktiv am Markt (Dürr Cyplan, INTEC GMK und Orcan). Der ORC-Verband musste im Jahre 2018 seine Arbeit einstellen.

Die verbliebenen Anbieter von ORC-Anlagen vermarkten Anlagen ab einer thermischen Leistung von 250 kW_{th} und Vorlauftemperaturen für die ORC-Anlage von 90 °C bis 520 °C. Anlagen mit einer Leistung kleiner als 20 kW_{el} werden bisher nur als Pilotanlagen betrieben. Im Bereich <150°C Abwärme-Eingangstemperatur hat ein Hersteller ein modulares Anlagenkonzept entwickelt, das sehr viel mit konventionellen Bauteilen arbeitet und damit die Investitionssumme senkt. Der große Nachteil liegt darin - ähnlich wie die Nutzung über Abhitzekeessel -, dass viel Exergie nicht genutzt werden kann und die Anlagen nicht mehr im KWK-Betrieb arbeiten.

Angesichts der Spezialisierung der ORC-Anlagen-Anbieter in den letzten Jahren könnte man von einem Anbieter-Oligopol bei einem Nachfrage-Polypol sprechen. Allerdings kann dieses Oligopol seitens der Hersteller wegen sehr geringer Nachfrage nach diesen Anlagen seine Vorteile nicht realisieren.

Technische Wettbewerber: Die technischen Wettbewerber der ORC-Anlagen sind insbesondere:

- die Verwertung der Abwärmern in anderen Prozessschritten als Wärmequelle ohne Abschöpfung des Exergiegehaltes (z.B. Vorerwärmung von Rohstoffen der betroffenen Grundstoff-Produktionen) oder von Verbrennungszuluft (Begrenzung der Temperatur auf 80°C);
- die Substitution thermischer Prozesse durch andere Techniken (z.B. Nano-Membrantechnik);
- die geringeren Abwärmeströme bei Wechsel der erdgasbetriebene Wärmeerzeugung auf Strombasis;
- die direkte Abwärme-Einspeisung in Nah- oder Fernwärmenetze. Dennoch könnte man oft die ORC-Technik zur Nutzung der Exergie zwischenschalten.
- Im kleinen Leistungsbereich haben Thermoelektrische-Generatoren (TEG) in Zukunft eine Chance infolge ihres modularen Aufbaus und möglicher Skaleneffekte (vgl. Abschnitt 2.6.7).
- Hinzu kommt der Kosten-Wettbewerb der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (allerdings hat ORC-erzeugter Strom Grundlast-Eigenschaften).

Energetechnische und -wirtschaftliche Bewertung: Von den rund 150 PJ/a Abwärme, die im Temperaturbereich zwischen 90°C und 500°C in der deutschen Industrie als technisch-wirtschaftlich nutzbar anfallen, sind Abstriche zu machen (siehe oben). Hinzu kommt: in bestimmten Branchen und Prozessbereichen sind die Abwärmeströme prozessbedingt intermittierend und damit für die ORC-Anlagen nur mit einem entsprechenden Wärmespeicher geeignet. Dies verteuert die ORC-Stromerzeugung, bringt aber auch Vorteile, intermittierende Wärmenachfrage gleichzeitig bedienen zu können.

Das rentabel nutzbare Abwärmepotenzial 2045 wird nach Berücksichtigung der Wettbewerber mit rd. 24 PJ/a geschätzt, davon ca. 2,4 PJ/a als Strom und der Rest als nutzbare Abwärme. Die ersten 5 Mio.

vermiedenen kumulierten t CO₂-äq. werden etwa im Jahre 2033 erreicht. Die Anzahl der Anlagen läge bei etwa 600 bis 700 mit einem Invest von etwa 300 Mio. €, d.h. vielleicht bei etwa 50 in Deutschland investierten Anlagen pro Jahr. Durch Exporte in andere Industrie- und Schwellenländer mit Grundstoffindustrien könnte die Stückzahl erhöht werden, um durch größere Serienfertigung die spezifischen Investitionen zu senken.

Technikzyklus-Analyse: Bei der Patentanalyse für die 2010er Jahre führt Deutschland die Liste der transnationalen Patente vor den USA und Italien an. Aber bei der bibliometrischen Analyse liegen die deutschen Autoren von internationalen Veröffentlichungen abgeschlagen auf Platz 6 (mit 174 Publikationen) hinter dem Tabellenführer China (mit 1110 Publikationen), gefolgt von Italien, USA, Großbritannien und Iran (vgl. Tabelle 2-11). Die Dynamik von Patentanmeldungen und internationalen Veröffentlichungen deuten klar auf die beginnende Marktdiffusion dieser Technik hin, aber auch auf vermutlich verpasste Chancen der deutschen Hersteller infolge ungünstiger energiepolitischer Bedingungen auf ihrem Binnenmarkt. Dadurch fehlen auch Referenzanlagen in Deutschland.

Die ORC-Technik ist aufgrund der o.g. Erkenntnisse am Ende der Neuorientierungsphase und - bei einigen Anwendungen - am Beginn der Diffusionsphase angelangt (z.B. derzeit die Biogas-BHKWs). Bei den bestehenden technischen konkurrierenden Optionen ist eine Investitionssumme für mittelgroße Anlagen von etwa 1.200 €/ kW_{el} erforderlich. Eine Strategie der Kostenreduktion wäre ein modulares Serienkonzept, d.h. der Bau eines Basismodells von z.B. 50 kW_{el} per Modul, das bei höheren erforderlichen Leistungen durch Vervielfachung der Basismodule zu einer entsprechenden Anlage paketierrt wird, um damit höhere Stückzahlen zu erzielen.

Tabelle 2-11: Länderrangfolge für ORC-Patentanmeldungen und Anzahl der Internationalen Publikationen

Patentanalyse (transnationale Patente, 2009-2018)		Bibliometrische Analyse (Nationalität des 1. Autors)	
Land	Anzahl	Land	Anzahl
Deutschland	84	China	1.110
USA	66	Italien	395
Italien	40	USA	319
Saudi-Arabien	17	Großbritannien	304
China	17	Iran	269
Schweden	13	Deutschland	174
Großbritannien	9	Süd-Korea	133

Analyse des Innovationssystems: Bis Mitte der 2010er Jahre schien die ORC-Technik auf eine erfolgreiche Diffusion in Phase 5 und dann Phase 6 ihres Technikzyklus zuzusteuern. Dazu erwarteten Hersteller und Forscher langsam steigende Preise für Energie und Emissionszertifikate und eine staatliche Förderung der CO₂-freien Stromerzeugung und Abwärmenutzung. Das Gegenteil trat ein.

Die auf drei geschrumpfte Zahl deutscher *Hersteller* steht im Gegensatz zu Hersteller-Erfolgen in Japan und Italien: Die Fa. Turboden in Mailand, die sich wesentlich dynamischer entwickelte, wurde inzwi-

schen von Mitsubishi Heavy Industries aufgekauft, um deren Anlagen-Portfolio zu ergänzen. *Contracting-Unternehmen*, insbesondere größere Unternehmen, sind auch im ORC-Markt tätig, stoßen aber auf erhebliche Hemmnisse (siehe unten). *Stadtwerke* sind in dieser Technik noch kaum aktiv, obwohl sie oft als Fernwärme- und Stromlieferant am Contracting von ORC-Anlagen ein besonderes Interesse haben sollten. *Hersteller von Industrieöfen* und BHKWs sind sich dieses zusätzlichen Aggregats als neues Geschäftsfeld kaum bewusst oder zögern, in dieses neue Geschäftsfeld zu investieren.

Fazit: Das Innovationssystem ist auf die ORC-Technik bis Mitte 2022 nicht hinreichend vorbereitet, kaum aktiv und seitens einer Förderpolitik nicht speziell beachtet, wenngleich die Technik als CO₂-freie Grundlast-Strom-erzeugung von allen Akteuren des Innovationssystems hohe Beachtung haben sollte.

Hemmende Faktoren: Die Marktdiffusion wurde in Deutschland durch die erheblichen Ausnahmen der Energiebesteuerung von energieintensiven Unternehmen, freien Emissions-Zertifikatzuteilungen und einer 40 %-igen Beteiligung an der EEG-Umlage für selbstgenutzten ORC-Strom in erheblichem Umfang finanziell ausgebremst. Drei Viertel der Hersteller mussten ihre Produktion einstellen, zum Teil auch in Insolvenz gehen.

Empfehlungen: Neben detaillierten Vorschlägen für weitere Forschung und Entwicklung einzelner Komponenten (Wärmeübertrager, Arbeitsmaschinen, Arbeitsmittel) werden aufgrund der beobachteten Hemmnisse Hinweise gegeben, wie die Akteursgruppen in dem Innovationssystem der ORC-Technik - möglichst abgestimmt und simultan - handeln könnten. Wichtige Aspekte sind: die CO₂-Abgabe auf fossile Brennstoffe und die Emissionszertifikate machen die Abwärme wertvoller, Kenntnisse zur ORC-Technik müssen breit angelegt über Universitäten, Fortbildungseinrichtungen, Hersteller- und Anwender-Verbände, Contractoren sowie Energie- und Klima-Agenturen vermittelt werden; Referenz-Anlagen sind dabei sehr wichtig. Wegen der hohen Kapitalintensität und des hohen Knowhow-Bedarfs haben Contractoren eine wichtige Rolle.

2.6.7. Thermoelektrische Generatoren (TEG)

Auch für die Thermoelektrischen Generatoren wurde eine umfangreiche EDUAR&D-Analyse durchgeführt, siehe Anhang.

Technikbeschreibung: Die Stromerzeugung aus Abwärme macht sich den thermoelektrische Effekt (der sogenannte Seebeck-Effekt) zunutze: zwischen zwei Enden aus miteinander verbundenen elektrischen Leitern, die aus zwei verschiedenen, jeweils homogenen bzw. isotropen Metallen bestehen und mit unterschiedlichen Temperaturen beaufschlagt sind, entsteht eine elektrische Spannung. TEG erzeugen mittels des Seebeck-Effektes Gleichstrom (vgl. Abbildung). Ein TEG mit einem vergleichsweise hohen Wirkungsgrad muss prinzipiell aus einem Halbleitermaterial aufgebaut sein, welches über eine möglichst hohe elektrische Leitfähigkeit verfügt, gleichzeitig aber eine möglichst niedrige Wärmeleitfähigkeit besitzt.

Die TEG bestehen ausschließlich aus statischen Komponenten; sie benötigen selbst keine Arbeitsfluide oder beweglichen Teile - im Gegensatz zu der ORC-Technik (vgl. Abbildung). Daher ist keine Wartung der TEG notwendig. Die erzeugte elektrische Gleichspannung hängt von der genutzten Temperaturdifferenz, der Anzahl der in Reihe geschalteten TE-Elemente und der Auswahl entsprechender thermoelektrischer Materialien ab.

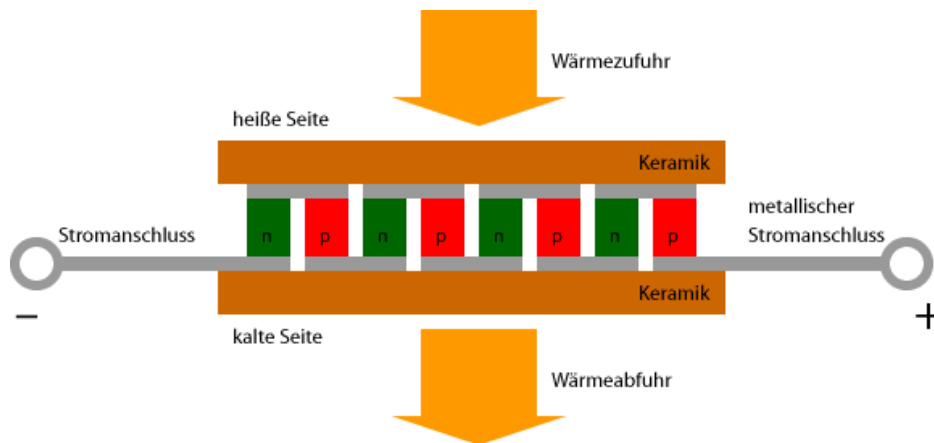


Abbildung 2-42: Schematischer Aufbau eines thermoelektrischen Generators (TEG)
Quelle: [153]

Die Vorteile der TEG liegen in ihrer Bauart (keine bewegten Teile), geringen Betriebskosten, ihrem Potenzial hoher Kostendegression (Skaleneffekte) aufgrund ihrer Modularität (ähnlich wie die Photovoltaik). Die Kosten für handelsübliche TEG mit einer maximalen Betriebstemperatur von rund 200 - 250 °C liegen derzeit noch bei über 5.000 € pro kW_{el}, wobei die spezifischen Investitionen für Prototypen von Hochtemperatur-TEG noch dar-über liegen.

Bisher angewandt wurden TEG bei speziellen Nischenanwendungen wie z.B. elektrische Versorgung von mobilen Anwendungen (z.B. Raumfahrzeugen, Satelliten, Militäranwendungen), dezentraler Stromerzeugung mit Abwärmefall (z.B. bei Gaspipelines, Abgaskaminen, industriellen Anlagen) oder von Geräten an entlegenen oder schwer zugänglichen Positionen (z.B. Telekommunikationsknoten, Wetterstationen, Offshoreanlagen etc.).

Marktkontexturierung: In Deutschland ist bei Unternehmen und Forschungseinrichtungen ein hohes Knowhow im Bereich der Thermoelektrik vorhanden. So gibt es einerseits sowohl herausragende Produzenten von thermo-elektrischem Material und TEG-Modulen als auch hochkarätige Akteure im Bereich der Forschung, Aufbau- und Verbindungstechniken sowie geeigneter Anwendungen von Thermoelektrik (günstige Voraussetzungen des Innovationssystems). Die Kfz-Industrie war in den 2000er Jahren an der Entwicklung der TEG für die PKW-Anwendung sehr interessiert, sie verlor aber durch die Entwicklung zum Elektro-Fahrzeug das Interesse (mit Ausnahme von LKWs). Heute sind es Hersteller von Wärmeenergieerzeugungsanlagen (BHKWs, Heizkessel, Trockner und Brennöfen geringerer Prozesstemperaturen). Anwender in den Demonstrationsprojekten von TEG sind häufig große Industrieunternehmen, welche z.B. aus der Stahlbranche oder dem Maschinenbau kommen [154].

Auf der Materialseite der TEG startete die Isabellenhütte Heusler GmbH & Co. KG mit der norwegischen Firma TEGma A.S. in 2020 ein F&E-Projekt für eine kommerzielle Herstellung von thermoelektrischem Halb-Heusler-Material. In 2016 starteten bereits 13 Firmen eines von der EU geförderten F&E-Projekts (INTEGRAL). Ziel ist die industrielle Produktion thermoelektrischer Werkstoffe.

Technische Wettbewerber: Zur Nutzung von Abwärme stehen dem Anwender in Industrie und Gewerbe generell verschiedene technische Lösungen zur Verfügung, wie z.B. die ORC-Anlagen, Stirlingmotoren, Sorptions-Wärmepumpen und -kälte-Anlagen oder die Einspeisung in Fern- und Nahwärmenetze. Diese technischen Optionen sind im Vergleich zu TEG weiter entwickelt und in bestimmten Anwender-

märkten eingeführt. Die ORC-Technik ist im Bereich der einstelligen KW-Leistungsklasse ein klarer technischer Wettbewerber für die TEG-Technik; so sind in Deutschland bislang knapp 200 ORC-Anlagen zur Abwärmenutzung – vor allem für Temperaturen zwischen 80 bis 400 Grad – installiert.

Energietechnische und -wirtschaftliche Bewertung: Längerfristig könnte die TEG-Technik in industrielle Anwendungen und eventuell in ausgewählte mobile Anwendungen (Schwerlast-Kraftwagen, Landmaschinen, dieselelektrische Bahnen, Busse und Schiffe) diffundieren. Ihr Potenzial wird bis 2050 auf etwa 24 PJ/a Abwärmenutzung und einer Stromerzeugung um die 2 PJ/a geschätzt. Nach einer ersten Marktanlaufphase in den 2020er Jahren wäre der Zuwachs in den 2030er und 2040er Jahren etwa 1 PJ/ a Energieeinsparung und 0,24 Mio. Tonnen CO₂-Emissionsminderung pro Jahr. Wegen der absehbar hoch bleibenden spezifischen Investitionen sind hohe Jahresnutzungsstunden und Langzeitstabilität der Materialien sowie möglichst ein KWK-Betrieb (d.h. anschließende Wärmenutzung) Voraussetzung für die Marktdiffusion in Gewerbe und Industrie.

Bei batch-betriebenen Thermoprozessen könnte die zusätzliche Integration von Latentwärme-Speichern zur kleineren Bauart und Leistung sowie zu hohen Jahresnutzungsstunden beitragen. Wegen der hohen Kapital-Intensität und des hohen Knowhow-Bedarfs haben Contractoren für die Marktdiffusion eine wichtige Rolle. Inwieweit es nach erfolgreicher Phase der Demonstratoren genügen wird, die bestehenden Investitionsförderprogramme für die Investition von TEG-Anlagen zu nutzen, oder eine besondere Förderung entsprechend der Photovoltaik-Förderung in den 2000er Jahren nützlich sein könnte, ist später zu entscheiden.

Technikzyklus-Analyse: Auch außerhalb des Automobilbereichs liegen die USA im Länderranking von Ländern mit transnationalen Patenten zu TEG im Zeitraum 2015 bis 2017 mit 43 Patenten deutlich vor Deutschland (21) und Frankreich (15). Im Gegensatz zur Patentanalyse liegt China bei den internationalen Publikationen mit 196 mit weitem Abstand auf Rang 1, gefolgt von den USA (96) und Indien (48). Allerdings scheint es in diesem Fachgebiet unterschiedliche Publikationsstrategien zu geben, denn selbst deutliche Fortschritte im Bereich der Thermoelektrik werden von bestimmten Konsortien in OECD-Ländern in der Regel nicht publiziert.

Die technisch-wirtschaftlichen Potenziale der TEG sind zwar theoretisch erkannt, aber die zurzeit noch hohen spezifischen Investitionen, unerprobte Materialien - insbesondere bei höheren Temperaturen und hinsichtlich ihrer Langzeitstabilität - sind zentrale Ansatzpunkte für empfohlene Forschungs- und Entwicklungs-Arbeiten. Aufgrund dieser Situation ist die TEG in der Phase 4 („Neuorientierung“) des Technikzyklus. Große Chancen für ihren Einsatz werden von Fachleuten im Bereich von kleinen und mittleren Systemgrößen (zwischen 3 und 10 kW je Einheit) gesehen, wenn die Abwärme, die das TEG-Modul verlässt, für weitere Wärmenutzungen eingesetzt wird, d.h. das TEG-Modul im KWK-Betrieb gefahren wird.

Analyse des Innovationssystems: Zwar gibt es zahlreiche Patente zur Abwärme-Verstromung mittels TEG, es fehlt jedoch zumeist die Systemintegration der TEG in geeignete industrielle Produktionsprozesse, was im Wesentlichen auf die derzeit noch sehr hohen spezifischen Investitionen zurückzuführen sein dürfte. So gibt es in Deutschland - weltweit betrachtet - herausragende Produzenten von thermoelektrischem Material und TEG-Modulen (z.B. Gentherm GmbH) als auch hochkarätige Player im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechniken oder der Anwendungsforschung von Thermoelektrik (z.B. Fraunhofer IPM, VDEh-Forschungsinstitut, Salzgitter Flachstahl).

Hemmende Faktoren: Eine mechanische, thermische und thermoelektrische Langzeitstabilität der TEG-Module von 6.000 Stunden pro Jahr und 10 Jahren bei einer Betriebstemperatur von $> 400\text{ °C}$ wird heute nicht erreicht. Ursachen dafür liegen u.a. in der chemischen Degradation durch Oxidationsprozesse oder thermomechanische Spannungen, welche insbesondere bei Temperaturen $> 400\text{ °C}$ zu einer Zerstörung von Fügestellen oder Strukturen führen können. Ansätze, den Degradationsprozessen entgegenzuwirken, werden u.a. in einer keramischen Beschichtung der Funktions- und Konstruktionswerkstoffe von TEG-Modulen gesehen [155].

Potentielle Anwender sehen neben den zu hohen spezifischen Investitionskosten (Rentabilität $< 5\%$ interne Verzinsung) die TEG-Technik kritisch, da sie zu wenig Pilot- und Demonstrations-Informationen erhalten können. Dies gilt auch für die Nutzung von Strahlungsabwärme bei sehr hohen Oberflächentemperaturen von Industrie-öfen. Die Hersteller von TEG können infolge mangelnder Nachfrage nur Einzelfertigung oder Kleinserien produzieren. Somit bleibt das typische Innovationshemmnis einer modularen Technik - das "Henne und Ei-Dilemma" - , wie es auch die Photovoltaik in den 1980er Jahren hatte.

Empfehlungen: Der Fokus der nächsten Schritte sollte - neben Forschung und Entwicklung - auf konkreten Anwendungsfällen mittels Demonstratoren für zwei, drei Branchen im Gewerbe (Bäckereien, Fleischereien, Chemisch-Reinigungen) oder in Industriebetrieben mit hohen Ofentemperaturen liegen. Der Aufbau entsprechender Demonstratoren sollte mit bereits heute verfügbarer Techniken und Materialien (z.B. Halb-Heusler-Materialien) erfolgen, um eine möglichst rasche Übertragbarkeit der spezifischen Anwendungsfälle auf andere Anwendungsfälle bzw. -felder zu ermöglichen - und damit erste Skaleneffekte zur Reduktion der spezifischen Investitionen zu erzielen.

Der Einbau in bereits bestehende Abwärmenutzungssysteme würde die ansonsten erforderliche Investition in Wärmeübertrager erübrigen, auch wenn dadurch die thermodynamischen Verhältnisse downstream etwas verschlechtert würden. Auch ist die Frage zu klären, ob es bei speziellen Rohstoffen hinreichend Verfügbarkeiten zu den heutigen Preisen gibt, was von einigen Fachleuten bezweifelt wird.

Bei den Herstellern von TEG-Materialien ist ein erheblicher Entwicklungsaufwand bei den Produktionsverfahren für die thermoelektrischen Halbleitermaterialien zu rechnen, um entsprechende jährliche Tonnagen zu erreichen. Gerade bei einer Produktion von TEG in großen Stückzahlen muss die verfügbare Menge an thermoelektrischem Material ausreichen, um weltweit die angestrebten Skaleneffekte zu erreichen.

Auch wäre dann durch die Diffusion dieser Querschnittstechnik und der entstehenden Erfahrungen möglich, die berufliche Fortbildung von energietechnischen Beratern vorzubereiten und die Integration der TEG-Technik in geeignete Neuanlagen durch die Hersteller voranzutreiben.

2.7. Forschungsfeld Tribologie

Da es sich bei der Tribologie um eine Querschnittstechnologie handelt, welche in allen Bereichen merklichen Einfluss hat, stützt sich EDUAR&D vorwiegend auf die zahlreichen und ergebnisoffen geführten Einzelgespräche mit Expertinnen und Experten aus Industrie, Forschung und Verbänden. Die beschriebenen Erkenntnisse und Empfehlungen wurden abschließend in einem großen Fachgespräch mit 27 Teilnehmenden diskutiert und erarbeitet. Die vollständige Analyse befindet sich im Anhang.

Einführung: Die Tribologie beschäftigt sich mit Reibung, Schmierung und Verschleiß und erfordert tiefgehende Kenntnisse aus den Bereichen Physik, Chemie sowie weiteren Ingenieurwissenschaften. Nur durch eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit können tribologische Systeme für ihren Anwendungsfall umfassend optimiert und Phänomene der dort stattfindenden Vorgänge verstanden werden.

Aus der Industrie, Forschung und Verbänden werden zwei Stoßrichtungen in der Tribologie gesehen. Zum einen reduziert eine geringere Reibung den Energiebedarf und damit direkt die CO₂-Emissionen, zum anderen kann eine erhöhte Lebensdauer sowie erhöhte Verschleißbeständigkeit von Materialien und Bauteilen den Ressourcenbedarf und -verbrauch mindern und somit indirekt zu weniger CO₂-Emissionen führen. Derzeit liegt der Fokus lediglich auf den „direkten“ CO₂-Footprints, jedoch wird die Relevanz eines nachhaltigeren Umgangs mit Ressourcen zukünftig weiter zunehmen. Die Verfügbarkeit der Materialien, der benötigten Energie bei der Herstellung und steigende Preise werden hier einen großen Einfluss auf die Produktentwicklung haben.

Forschung: Das BMWK (vormals BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) hat in den letzten 12 Jahren tribologische Fragestellungen mit mehreren Verbundprojekten gefördert, wobei mit den Forschungsprojekten PEGASUS I+II, POSEIDON I+II sowie CHEOPS3 zunächst tribologische Zustände im Vordergrund standen. Mit den Projekten PROMETHEUS (2019 – 2021) und dem im September 2021 gestarteten CHEPHREN werden nun vermehrt globale Lösungsansätze verfolgt, da zunehmend festgestellt wurde, dass Einzelmaßnahmen schnell an ihre Grenzen stoßen und antagonistische Effekte aufweisen. Für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten steht somit die Anwendung bzw. das Produkt im Vordergrund.



Abbildung 2-43: Einteilung tribologischer Fragestellungen [156]

Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Projekten PEGASUS und POSEIDON werden seitens der teilnehmenden Schmierstoff- und Schichthersteller bereits in der Serienfertigung eingesetzt und reduzieren die CO₂-Emissionen im Betrieb bereits bis zu 2 %. Eingesetzt im Flugzeugbau kann sogar bis zu 16 % Treibstoff eingespart werden [157].

Studienlage: Der Fokus der Forschung lag in den letzten Jahren vermehrt auf der Reduzierung der Reibung. Die von der Gesellschaft für Tribologie (GfT) im Jahr 2019 veröffentlichte Studie [158] zeigt, dass eine Reibungsminderung von 40% möglich wäre und den Primärenergieverbrauch um 8,6% senken könnte. Für Deutschland bedeutet das ein Einsparpotenzial von ca. 208 Milliarden Tonnen CO₂-äq./Jahr. Während sich die Reibungsreduzierung direkt in niedrigeren CO₂-Emissionen bemerkbar macht, kann der Einfluss durch verbesserten Verschleißschutz und Lebensdauererlängerung bislang nicht in präzisen

Zahlen ausgedrückt werden. Mit ihrer zweiten Studie Anfang des Jahres 2021 [159] schätzte die GfT das Energieeinsparpotenzial und die damit verbundene Emissionsreduzierung grob ab, welches bei ca. dem Doppelten des Potenzials der Reibungsreduzierung vermutet wird. Somit ist neben der Verringerung der Reibung auch die Rohstoffeffizienz für eine nachhaltigere Zukunft von entscheidender Bedeutung. Deshalb empfiehlt es sich durch weitere Studien die Einsparpotenziale zu präzisieren, um darauf aufbauend frühzeitig durch gezielte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten den Verschleißschutz sowie die Lebensdauer zu erhöhen und Bauteile optimal auszunutzen.

Um die Bedeutung der Tribologie als Querschnittstechnologie genauer verstehen zu können, wurden eine Publikations- und Patentanalyse durchgeführt. Die Anzahl der transnationalen Patentanmeldungen stieg ab dem Jahr 2000 mit ca. 1200 Anmeldungen pro Jahr bis 2012 stark an und schwankt seither auf einem hohen Niveau im Bereich von 2800 bis 3200 Anmeldungen pro Jahr. Hierbei liegen für das Jahr 2019 die USA mit 749 Anmeldungen an erster Stelle, gefolgt von Deutschland (506), Japan (353), China (350) und Südkorea (192). Entgegen der Stagnation der Patente nahm die Anzahl der Publikationen seit dem Jahr 2000 kontinuierlich zu. In zwanzig Jahren versechsfachten sich die Publikationen von anfangs ca. 2.300 auf ca. 14.800. Bei der Länderbetrachtung für das Jahr 2019 sticht besonders China mit 5251 heraus. Die USA folgen mit 2045 – dahinter Indien (1777), England (821) und Deutschland (746).

Möglichkeiten Potenzialausschöpfungen: Die größten Energieeffizienzpotenziale werden in den Bereichen Kompressoren, Kühl- und Kältetechnik, Hydraulik, Wärmepumpen und Elektroantrieb sowie E-Mobilitätskomponenten vermutet. Gerade für Hub-Kolben-Anwendungen, welche der Technik im Verbrennungsmotor sehr ähneln, können bisherige Errungenschaften aus dem Automobilbau mit Hilfe weiterer Forschungs- und Entwicklungsprojekte adaptiert werden. Das BMWK (vormals BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) hat bereits durch die Projekte PEGASUS I+II und PROMETHEUS erste Grundvoraussetzungen geschaffen, welche den entwickelten technischen Lösungen eine baldige Marktdiffusion ermöglichen. Generell sind Technologien zu priorisieren, die für Anwendungen mit großer Stückzahl und durch Vernetzung auch branchenübergreifend einsetzbar sind.

Eine Art Schmierstoff-Leitfaden bzw. -Handbuch könnte Energieeffizienzpotenziale für Anwendende von Maschinen direkt nutzbar machen. Hier ist nicht die Komplexität der Tribologie selbst das Hindernis, sondern vielmehr die Unkenntnis bzw. fehlende Ansprechpersonen. Schon allein durch die Verwendung qualitativ hochwertiger Öle in den in der Industrie weit verbreiteten Aggregaten könnten kurzfristig ohne großen Aufwand Energieeinsparungen im Bereich von 2-5% erreicht werden. Zum einen werden weniger Strom oder fossile Energieträger benötigt, zum anderen reduziert sich die Betriebstemperatur. Kürzere Anlaufzeiten ermöglichen Prozessänderungen und bessere Bauteilqualität. Dieses Potenzial scheint im Maschinenbau noch ungenutzt zu sein. In der Regel werden höherwertige Schmierstoffe nur aus Zwang aufgrund von notwendigen hohen Betriebstemperaturen verwendet. Solche Industrierichtlinien und Leitfäden könnten durch Zusammenarbeit von Industrieverbänden geschaffen werden.

Forschungs- und Handlungsempfehlung: Zwar wird zum Teil bereits Interesse und Bedarf seitens verschiedenster Industriebereiche signalisiert bestehende Technologien (z.B. aus der Automobilindustrie) zu adaptieren, eine vertiefte Zusammenarbeit über die Absichtserklärungen hinaus bleibt allerdings oftmals aus. Explizit wurde in diesem Zusammenhang ein interdisziplinäres Projekt gewünscht, welches die einzelnen Branchen und Forschungszweige im Bereich Tribologie weiter vernetzt. Hierdurch soll der Austausch untereinander vereinfacht und weitere Kontakte zu Industrieunternehmen, welche bislang

nur wenig von den Möglichkeiten durch tribologische Maßnahmen wissen, aufgebaut bzw. vertieft werden. Vorbehalte, welche bisher den Umstieg auf energieeffizientere Maßnahmen oder die Entwicklung besserer tribologischer Systeme verhindert und gehemmt haben, können hierdurch ausgeräumt werden.

Zudem gibt es weitere Forschungsideen in der Tribologie, welche jedoch in der Grundlagenforschung zu verorten und noch nicht anwendungsorientiert ausgerichtet sind. Diese sollten von Fördergemeinschaften wie z.B. der DFG unterstützt werden. Des Weiteren sind weitere vertiefende Studien bzgl. der Bedeutung des Verschleißes notwendig, um das tribologische Potenzial der Rohstoffeffizienz gezielt mit geeigneten Maßnahmen heben zu können.

2.7.1. Technologiefeldübergreifende Hemmnisse und Engpässe im Forschungsfeld

Neben der geringen branchenübergreifenden Vernetzung existieren zum Teil auch Vorbehalte bei Einführung neuer Technologien, unter anderem aufgrund negativer Erfahrungen in der Vergangenheit. Die Entwicklungsarbeiten (Auslegung, Werkstoff, Schmierstoff, Beschichtung) sind aufwendig sowie zeitintensiv und scheitern oft an der geringen Risikobereitschaft der Unternehmen, was sowohl personell als auch durch die hohe Komplexität tribologischer Maßnahmen bedingt sein kann. Bei größeren Projekten mit mehreren Beteiligten ist es nicht unüblich, dass es mehrere Jahre dauert, bis der Idee die Umsetzung folgt. So steigen zunächst begeisterte Partner eines potenziellen Verbundprojekts aufgrund des langwierigen Planungsprozesses oder der eigenen Unternehmenspolitik oftmals verfrüht aus. Neue Technologien sind zusätzlich mit sehr hohen Investitionskosten verbunden, welche sich, sofern sie später tatsächlich erfolgreich eingesetzt werden können, erst in ein paar Jahren amortisieren – eine Beschichtungsentwicklung kann z.B. schnell eine Größenordnung von Millionen Euro erreichen. Die Kosten-Nutzen-Rechnung fällt erst langfristig positiv aus, weshalb eine Entwicklung mit hohen Investitionskosten erst bei zunehmender Stückzahl wirtschaftlich wird. Dies ist auch ein Grund dafür, weshalb die Automobilindustrie bisher die Rolle des Vorreiters bei tribologischen Entwicklungen einnehmen konnte. Bislang rentierte sich zudem für viele Unternehmen sowie ihre Kundschaft eine energieeffizientere Lösung unter anderem aufgrund der vergleichsweise günstigen Energiepreise der letzten Jahre nicht in dem Maße sich merklich zu mehr Sparsamkeit zu bewegen. Die fehlenden Anreize könnten nun durch den steigenden Rohstoff- und CO₂-Preise sowie dem gesellschaftlichen Druck zu mehr Nachhaltigkeit und Umweltschutz entstehen.

2.8. Forschungsfeld Hochtemperatur-Supraleitung

Die Hochtemperatur-Supra/-Leitung (HTS / HTSL) wurde 1986 durch Müller und Bednorz entdeckt und ermöglicht die Übertragung hoher Stromdichten mit vernachlässigbarem Widerstand bei einer Kühlung mit flüssigem Stickstoff bei -196 °C [160]. Durch die hohe Stromtragfähigkeit von HTS-Leitern bei nahezu widerstandsfreier Übertragung haben sich zahlreiche technische Applikationen entwickelt. Hierzu zählen Industriestromschienen, Strombegrenzer, hochpolige Elektromotoren, Magnetresonanzanwendungen, Magnetheizer oder Levitationssysteme [161].

Viele der potenziellen Anwendungen befinden sich dabei noch in der Entwicklung und sind Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben. Eine besondere Rolle nehmen dabei öffentlich geförderte Großprojekte ein. Diese ermöglichen durch ihren Bedarf an HTS-Materialien eine Skalierung der Produktionskapazitäten und damit eine Reduzierung der spezifischen Kosten. Als besondere Projekte können dabei Vorhaben in Verbindung zur Kernfusion betrachtet werden. Das SPARC-Experiment des MIT Plasma Science

und Fusion Centers hat für seine erste Projektphase 500 km REBCO-Bandleiter bestellt [162] und benötigt im Rahmen weiterer Chargen bis zu 20.000 km Suprabandleiter. Auch Kabelprojekte von Energieversorgern, wie z.B. AMPACITY (1 km) [163], [164] oder SWM SuperLink (12 km) [165] stellen wichtige technische Demonstrationen dar.

2.8.1. Technologiefeldübergreifende Hemmnisse und Engpässe im Forschungsfeld

Aufgrund des niedrigen Entwicklungsstands vieler potentieller Anwendungen der HTSL bestehen einige technologieübergreifende Hemmnisse des Forschungsfelds bezüglich der Materialverfügbarkeit und Produktentwicklung.

- Der Markt von HTS-Leitermaterialien und HTS-Leitern beschränkt sich für zahlreiche Produkte auf die Ausrüstung von Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten. Eine Skalierung der entsprechenden Fertigungsprozesse erscheint daher, ohne eine bestehende Marktnachfrage, nicht attraktiv. Gleichzeitig besteht dadurch kein Degressionseffekt hinsichtlich der Herstellkosten von HTS-Materialien oder HTS-Leitern.
- Die HTSL ermöglicht technologische Vorteile im Bereich von elektrischen Versorgungsinfrastrukturen mit hohen Leistungsaufnahmen (20 bis 200kVA). Die langwierige Untersuchung, Testung und Demonstration entsprechender Versorgungstechnologien bedarf dabei einer geeigneten Testinfrastruktur. Da entsprechende Einrichtungen nur durch Kooperation mit Netzbetreibern und EVU dargestellt werden können, ist die Applikationsforschung in diesem Bereich hinsichtlich ihrer Test- und Demonstrationsmöglichkeiten stark limitiert.

2.8.2. Betrachtete Technologien im Forschungsfeld Hochtemperatur-Supraleitung

Im Forschungsfeld Hochtemperatur-Supraleitung wurde eine EDUAR&D-Analyse für die Verwendung von HTS-Industriestromschienen angefertigt. Die Auswahl des Themas begründet sich aus der unmittelbaren technologischen Nähe zu industriellen Produktionen, einem breiten Feld denkbarer Anwendungen und dem erwarteten Vorliegen eines relevanten Energieeinsparpotenzials.

2.8.3. HTS-Industriestromschienen

Supraleitende Stromschienen dienen zur Übertragung von Gleichströmen im zwei- bis dreistelligen Kiloampere-Bereich. Die Anwendung von supraleitenden Materialien ermöglicht den nahezu verlustfreien Transport von Strom ohne Leitungswiderstände und Wärmeentwicklung [160].

Das Gesamtsystem umfasst die Stromzuführung, die Stromschiene und eine Kälteversorgung und wird in Abbildung 2-44 skizziert. Die Stromzuführung, Abbildung 2-44 c-1, verbindet die supraleitende Stromschiene mit dem normalleitenden Stromnetz. Die Stromschiene ist dabei aus Bündeln von Supraleitern aufgebaut. Es werden Stapel von 100 parallelen HTS-Bändern benötigt, um einen Nennstrom von 20 kA zu transportieren [166]. Diese Bündel werden in einem Kryostaten thermisch verkapselt, um Kälteverluste zu begrenzen bzw. zu minimieren. Dabei kommt Vakuumtechnologie und Superisolierung zum Einsatz. Der Hauptteil des nötigen Kühlaufwands wird beim Übergang zwischen „warmen“ normalleitenden Stromnetz und dem bei -200 °C betriebenen Supraleiter benötigt.

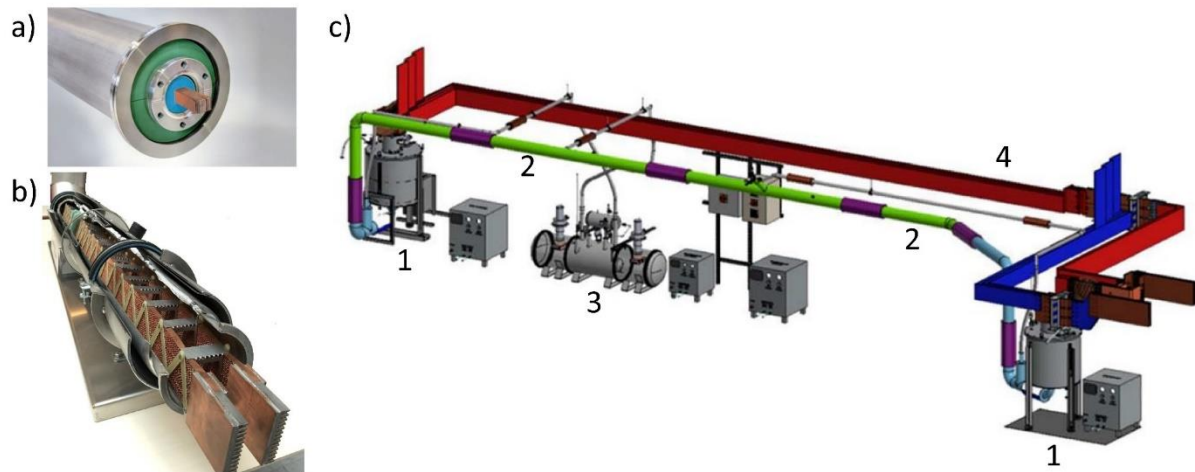


Abbildung 2-44: a) Modul einer supraleitenden Stromschiene (Quelle: VESC GmbH), b) Einblick in das Innere der Stromschiene (Quelle: eigene Aufnahme, ZIEHL 2020), c) Modell des Aufbaus einer HTS-Stromschiene im Projekt 3S bei der BASF, 1) Stromzuführung, 2) Stromschiene, 3 Kälteversorgung mit LN₂-Kreislauf, 4) in Rot überbrückte konventionelle Stromschiene [166].

Marktkontexturierung

Weltweit gibt es einige Hersteller von HT-Supraleitern [167]. Dabei handelt es sich um Produzenten von HTS-Bandleitern, Stromschiene und anderen Leittechnischen Anwendungen (z.B. Strombegrenzern). Im Rahmen einer Recherche wurden hierbei 15 relevante Unternehmen identifiziert. Aktivitäten zu HTS-Leitern innerhalb von Deutschland erfolgen dabei durch Bruker, Theva Dünnschicht und Vision electric Superconductors. Auch BASF beteiligte sich durch seine Unternehmenstochter „Deutsche Nanoschicht“ im Bereich HTSL, hast diese Aktivitäten jedoch eingestellt. Eine Besonderheit für das deutsche Innovationsystem stellt die Vision Electric GmbH dar. Diese verfügte über eine langjährige Erfahrung mit konventionellen Stromschiene aus Aluminium oder Kupfer. Im Jahr 2014, erfolgte die Gründung des Start-Ups, Vision Electric Superconductors, um die erste modulare supraleitende Stromschiene für die Industrie zu entwickeln. Die Vision Electric Superconductors arbeitet dabei mit Partnern aus dem Bereich der Supraleiter-Materialherstellung und der Wissenschaft zusammen, um das Produkt der supraleitenden Industriestromschiene zur Marktreife zu entwickeln und neue Applikationen zu erschließen.

Potentielle Anwendungen von HTS-Industriestromschiene sind im Bereich chemischer Elektrolyseprozesse, der Aluminiumherstellung und in Rechenzentren denkbar. Für elektrochemischen Verfahren erfolgte ein Demonstrationsbetrieb einer Chlor-Kali-Elektrolyse im Projekt 3S-SupraStromSchiene als Kooperation von Vision Electric Super Conductors GmbH, dem Institut für Technische Physik des KIT und dem Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH bei BASF in Ludwigshafen [166]. Eine weitere wichtige Demonstration erfolgte im Rahmen des Vorhabens Demo200 durch den Einsatz eines HTS-Systems zur elektrischen Versorgung einer Schmelzflusselektrolyse in der Primäraluminiumherstellung [168].

Energetechnische- und -wirtschaftliche Bewertung

Bei der Betrachtung einer einzelnen Industriestromschiene bestehen applikationsspezifische Verlustreduzierung bis zu 86 % durch den vernachlässigbaren ohmschen Widerstand der HTS-Leiter. Wird zusätzlich der Energiebedarf der Kühl- und Kältetechnik berücksichtigt, kann das gesamte Energieeinsparpotenzial auf ca. 60 % der Leitungsverluste einer konventionellen Stromschiene abgeschätzt. [169]

Für das Energieeinsparpotenzial von HTS-Industriestromschienen im gesamten industriellen Umfeld erfolgte eine Abschätzung durch die Netzbilanz 2018. Dabei werden industrielle Verteilnetzverluste ausgewiesen. Bei einer partiellen Substitution von Höchst-, Hoch- und Mittelspannungsversorgungen durch HTS-Systeme ergibt sich daraus ein Energieeinsparpotenzial von 2,98 TWh/a bzw. 10,73 PJ/a für Deutschland. Wichtig ist hierbei, dass aufgrund der eingesparten elektrischen Endenergie eine verhältnismäßig hohe Reduzierung des resultierenden Primärenergieverbrauchs und des THG-Emissionsaufkommens vorliegt. [170]

Technologiezyklusanalyse

Für die Zuordnung der Technologiezyklusposition erfolgte eine Patentanalyse zum Thema der HTS-Industriestromschienen. Dabei wurden lediglich 11 internationale Patent mit teilweise nachrangiger technischer Relevanz identifiziert. Im Rahmen des Technologiezyklus wären die HTS-Industriestromschienen daher der Position „Entdeckung und Entwicklung“ zuzuordnen und befinden sich damit vor der ersten umfassenden Markterschließung. Dennoch muss berücksichtigt werden, dass aufgrund einzelner technologischer Vorreiter (z.B. Vision Electric Superconductors) bereits aktive Marktteilnehmer verzeichnet werden können.

Innovationssystemanalyse

Die Akteure des Innovationssystems können in verschiedene Gruppen eingeteilt werden. Dabei sind industriellen Anwender von HTS-Systemen, sowie Materialhersteller und Anlagenbauer zu verzeichnen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass neben den spezialisierten Unternehmen der HTS-Ausrüster auch maßgeschneiderte Lösungen der Kühl- und Kältetechnik benötigt werden. Weiterhin werden wichtige Forschungsaktivitäten an Forschungseinrichtungen und Universitäten durchgeführt. Hierbei erfolgen Untersuchungen an grundlagenorientierten Fragestellungen und im Bereich der Applikationsforschung. Zudem besteht eine aktive Verbandsarbeit im Bereich der HTS-Systeme, welche es ermöglicht, aktuelle Entwicklungen und Erkenntnisse zu kommunizieren und themenübergreifend zu vernetzen. Der vierte Akteur des Innovationssystems ist die öffentliche Forschungsförderung. Innerhalb der letzten Jahre konnten sechs größere Verbundprojekte mit Bezug zu HTS-Leitern in Deutschland verzeichnet werden. Die Vorhaben verfügten über Laufzeiten von drei bis vier Jahren und wurden von Konsortien aus industriellen und akademischen Partnern ausgeführt.

Ableitung möglicher Entwicklungsziele

Hinsichtlich der gegenwärtig verfügbaren HTS-Materialien sollten Verbesserungen der Stromtragfähigkeit, der Lötbarkeit und reduzierter Sprungtemperaturen angestrebt werden. Dabei muss eine Kostensenkung der HTS-Materialien als wichtiger Aspekt bei der Materialauswahl und berücksichtigt werden. Diese Optimierung würde sich auch auf die Preise der resultierenden HTS-Bandleiter und Stromschienen auswirken. Darüber hinaus müssen herstellungsspezifische Eigenschaften der Bandleiter weiterhin optimiert werden. Hierzu zählen die Homogenität der kritischen Stromdichte im Einzelband und eine Minimierung lokaler Einbrüche in den Einzelbändern. Gleichzeitig sollte dabei natürlich auch ein Scaleup der Bandleiterfertigung betrachtet werden. Die eingesetzte Kryotechnik benötigt innovative Lösungen, um effektive Kopplungen der kryotechnischen HTS-Komponenten mit den Leitersträngen der konventionellen Stromzuführung zu ermöglichen. Für HTS-Industriestromschienen besteht ein ausgeprägter Bedarf an Demonstrationen. Dabei muss eine ausreichende Langlebigkeit von HTS-Systemen aufgezeigt werden. Hierfür existieren gegenwärtig nur wenige Erfahrungen bei den industriellen Anwendern.

Identifikation von technologischen und ökonomischen Hemmnissen

Als bestehende Markthemmnisse zur Einführung von HTS-Stromschienen können die hohen Preise für supraleitende Materialien und fehlende Scale-up-Erfahrungen bei deren Produktion angesehen werden. Zudem besteht ein Kommunikationsdefizit, welches die Verfügbarkeit von geeigneter Kühltechnik betrifft. Weiterhin muss eine technologische Konkurrenz zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) bedacht werden. Die HGÜ hat sich im Bereich der Netztechnik etabliert und wird auch im deutschen Netzentwicklungsplan als innovative Technologie angesehen [171]. Obwohl HTS-Stromschienen über vorteilhafte technische Eigenschaften verfügen, stellt die Verbreitung der HGÜ und die damit verbundenen Betriebserfahrungen einen klaren Vorteil im technologischen Vergleich dar.

Empfehlungen und mögliche Policy-Maßnahmen

Für die Etablierung von HTS-Stromschienen können Policy-Empfehlungen im Bereich der Technologie- und Forschungsförderung formuliert werden. Demnach wären Anreizprogramme zur Installation von HTS-Stromschienen denkbar. Hierbei könnten neben industriellen Applikationen auch Priorisierungen und Förderungen von Netzinfrastrukturen in kommunalen und überregionalen Versorgungsnetzen vorgesehen werden. Zusätzlich könnten für stromintensive Produktionsprozesse die Prüfung von HTS-Optionen, beispielsweise im Rahmen einer Energie- und Umweltmanagementzertifizierung, als Grundlage für eine Reduzierung der EEG-Beiträge herangezogen werden.

Gleichzeitig wäre die Initiierung von geförderten Forschungsvorhaben in Betracht zu ziehen. Dabei sollten vorrangig applikationsspezifische Aspekte untersucht werden, welche sich aus dem Einsatz in der Betriebsumgebung ($TRL \geq 5$), zum Beispiel der Langlebigkeit von HTS-Systemen, ergeben. Eine Besonderheit für den Bereich der HTS stellt der Bedarf an Suprabandleitern durch internationale Großprojekte dar. Diese können im Zusammenhang mit der Entwicklung von Fusionsreaktoren stehen [162]. Alternativ wäre auch eine Integration von HTS-Stromschienen in aktuelle Vorhaben im Bereich der Wasserstoffherzeugung denkbar. Initiativen wie H2Giga oder die Reallabore des BMWi mit der Ausrichtung auf die nachhaltige Wasserstoffherstellung (Energiepark Bad Lauchstädt, H2-Whylen, NRL und Westküste100) könnten daher auch zum Einsatz von HTS-Technik genutzt werden.

2.9. Forschungsfeld Industrie- und Gasmotoren

Im ehemaligen Forschungsfeld Industrie- und Gasmotoren wurde das Thema synthetische Kraftstoffe betrachtet. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Die vollständige Analyse befindet sich im Anhang.

Synthetische Kraftstoffe sind gasförmige oder flüssige Energieträger, die aus Konversionsprozessen fossiler oder erneuerbarer Ressourcen hergestellt werden können [172]. Dabei erfolgt innerhalb der Prozessketten das charakteristische Vorliegen von intermediären Synthesegasen, welches im Folgenden zu den gewünschten Produkten konvertiert wird. Synthetische Kraftstoffe gelten dabei als Drop-in-Lösung, da sie in ein bestehendes Kraftstoffsystem eingespeist werden können. Der Mechanismus der THG-Minderung erfolgt dabei durch eine Substitution von fossilen Energieträgern. Für Biokraftstoffe (Biodiesel, Ethanol, Biogas) konnte dieser Effekt bereits im Mobilitätssektor demonstriert werden [173].

Analyse zu Forschungsaktivitäten

Für den Bereich der Industrie- und Gasmotoren (im Umfeld von Industrie und Gewerbe) stellen synthetische Kraftstoffe eine Möglichkeit zur Reduzierung des THG-Ausstoßes dar. Neben der vorteilhaften Drop-in-Charakteristik ermöglichen einige synthetische Kraftstoffe jedoch auch Performancevorteile im

Bereich ihrer Effizienz und Emissionscharakteristik (Härtl u. a. 2017; Gill u. a. 2011; Damyanov u. a. 2018). Für das ehemalige Forschungsfeld Industrie- und Gasmotoren wird daher eine Perspektive für die gegenwärtigen Forschungsaktivitäten zu synthetischen Kraftstoffen entwickelt. Es erfolgt zunächst eine bibliometrische Analyse zu synthetischen Kraftstoffen. Die Recherche wurde auf *Scifinder.cas.org* durchgeführt und nutzte die Suchbegriffe *synthetic fuel*, *synfuel* und *e fuel*. Das Ergebnis dieser Recherche ist in Abbildung 2-45 dargestellt und zeigt die Anzahl der Publikation von 2000 bis 2020 in grün sowie den Anteil der vielzitierten Publikationen (mehr als 10 Zitierungen) in blau. Die grüne Kurve indiziert dabei die generellen Forschungsaktivitäten. Die blaue Kurve zeigt an, ob die Publikationen auch aktiv gelesen und im Kontext weiterer Arbeiten behandelt werden. Dabei ist zu beachten, dass die vielzitierten Publikationen immer einen gewissen Nachlauf von 2 bis 3 Jahren zu den Publikationen haben. Dies ist ebenfalls mit einem Abflachen der Kurve in Abbildung 2-45 für die Jahre 2018 bis 2020 zu sehen.

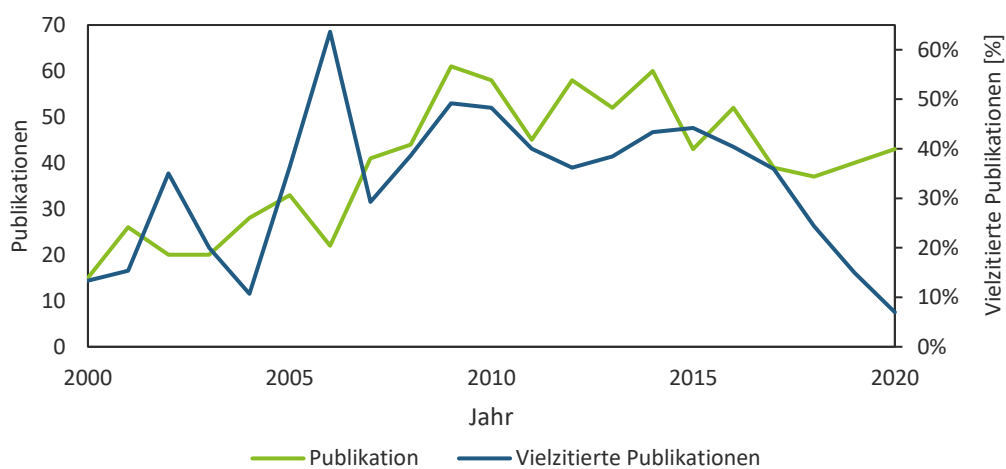


Abbildung 2-45: Ergebnis der bibliometrischen Analyse zu synthetischen Kraftstoffen in Scifinder.

Aus Abbildung 2-45 ist zu entnehmen, dass die Anzahl der jährlichen Publikationen von 2000 bis 2010 zugenommen hat. Seitdem werden jedes Jahr zwischen 40 bis 60 Fachartikel publiziert. Entsprechend der starken Zunahme an Publikationen erscheint die Anzahl der vielzitierten Publikationen zwischen 2000 und 2010 hochvolatil. Für den Zeitraum von 2010 bis 2018 kann dieser Anteil aber auf 35 bis 50 % abgeschätzt werden. Zu synthetischen Kraftstoffen bestehen daher aktive Forschungstätigkeiten. Dabei werden neue Erkenntnisse entwickelt und veröffentlicht. Gleichzeitig erfolgt eine aktive Auseinandersetzung mit den publizierten Ergebnissen.

Zur Interpretation der bibliometrischen Analyse müssen jedoch einige Aspekte berücksichtigt werden. Zunächst unterscheiden sich synthetische Kraftstoffe hinsichtlich ihres molekularen Aufbaus voneinander. Hierdurch existiert eine große Anzahl von denkbaren Wertschöpfungsketten mit unterschiedlichen Herstellungsverfahren. Dabei verfügt auch der motorische Einsatz der verschiedenen Kraftstoffe zu spezifischen Vor- und Nachteilen. Synthetische Kraftstoffe sollten daher nicht pauschal betrachtet werden, sondern entsprechend ihrer individuellen Herstellung und motorischen Verbrennung. Weiterhin befinden sich zahlreiche Kraftstoffkonzepte noch im Bereich rein konzeptioneller Betrachtungen. Untersuchungen an diesen Konzepten zielen auf eine Kraftstoffnutzung ab, werden jedoch nicht direkt mit einem Einsatz als synthetischer Kraftstoffe assoziiert. Es kann daher angenommen werden, dass die Suchbegriffe *synthetic fuel*, *synfuel* und *e fuel* nicht das gesamte Forschungsgeschehen aufgefasst haben. Die Analyse nach Abbildung 1 kann daher als grundsätzlicher Überblick verstanden werden.

Forschungsperspektive

Der Betrieb von Industrie- und Gasmotoren mit synthetischen Kraftstoffen ist ein gegenwärtiger Forschungsgegenstand und wird durch unterschiedlichste Perspektiven in einer großen Anzahl von Applikationen betrachtet. Für eine Erfassung aktueller und relevanter Forschungsthemen erfolgten daher Experteninterviews. Hierbei wurden vier Hauptcluster für die Betrachtung des Einsatzes synthetischer Kraftstoffe identifiziert. Demnach stellt die **systemische Effizienz** einen wichtigen Aspekt dar. Hierbei werden die Ressourcennutzung, Prozessketten und die Antriebs-effizienz unterschiedlicher technologischer Optionen auf der Mikroebene einer Applikation analysiert. Hinsichtlich der makroskopischen Betrachtung muss jedoch auch die notwendige **Infrastruktur und Verfügbarkeit** von Kraftstoffen berücksichtigt werden, da hierdurch die praktische Umsetzbarkeit einer Energieversorgung beeinflusst wird. Daraus ergeben sich **Applikationen**, in welchen verbrennungsmotorische Anwendungen über besondere Vorteile und Eigenschaften verfügen. Der Einsatz von synthetischen Kraftstoffen kann dann zur **Optimierung der Gesamtperformance** beitragen. Im Folgenden werden die einzelnen Cluster näher beschrieben.

2.10. Forschungsfeldübergreifende Zusammenfassung

In den letzten beiden Jahrzehnten war die Endenergieintensität der Industrie von 2,7 auf 2,3 GJ/1.000€ Bruttoproduktionswert zwar rückläufig, aber ihr Endenergieverbrauch stieg absolut von 2.421 PJ im Jahre 2000 auf 2.512 PJ im Jahre 2019 (Normaljahr ohne Corona- und außergewöhnliche Konjunkturfekte) um knapp 4 %. Kaum besser sieht es im Sektor Gewerbe und Dienstleistungen aus, wo die Endenergieintensität von 0,9 auf 0,6 GJ/1.000 € Bruttowertschöpfung zurückging (-30 %), der Endenergieverbrauch aber lediglich um 11 % von 1.478 in 2000 auf 1.315 PJ/a im Jahr 2019 (bei Abzug von Raumwärme und Militär verbleiben etwa 565 PJ; vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Die Vorstellungen der EU, die bis Ende 2022 von Rat und Europäischem Parlament beschlossen werden sollen, gehen für die Zeit bis 2030 von einer 20 %-igen Reduktion des Endenergiebedarfs aus. Verteilt man dieses Ziel gleichmäßig auf alle vier Sektoren, wäre für die Industrie bis 2030 eine Absenkung des Endenergiebedarfs um rund 500 PJ erforderlich. Unterstellt man ein moderates Wachstum von durchschnittlich 1,1 % jährlich (Böhmer u.a. 2016), müsste die Endenergieintensität der Industrie um jährlich gut 3 % abnehmen, eine gigantische Herausforderung für alle Beteiligten. Dieses Ziel macht Sinn, weil bis 2045 (oder Ende der 2040er Jahre) der gesamte Primär- und Endenergiebedarf in der EU von erneuerbaren Energien gedeckt werden soll, deren Gestehungskosten oftmals noch höher sind als jene für fossile Energieträger.

Die Ergebnisse der hier behandelten Teile der Sektoren Industrie und Gewerbe decken etwa zwei Drittel ihres Endenergieverbrauchs in 2019 ab (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Für die Entwicklung des Energiebedarfs bis 2030 und 2045 wird auf die Ergebnisse der Politikszenerien X (und dort das Mit-Maßnahmen-Szenario, als Referenzszenario) zurückgegriffen [174]; für 2050 handelt es sich dabei um eine eigene Extrapolation.

Tabelle 2-12: Endenergiebedarf von Industrie und Gewerbe 2019, durch die Studie abgedeckter EE-Bedarf sowie rentable Energieeffizienz-Potenziale 2030 und 2050

	EEV 2019	von EE4InG abgedeckt	EEV 2030	von EE4InG abgedeckt	EEV 2050	von EE4InG abgedeckt
	PJ/ a	PJ/ a	PJ/ a**	PJ/ a	PJ/ a***	PJ/ a
Industrie	2.512	1.685 (67%)	2.160	1.425	2.000	1.300
Gewerbe*	565	350 (62 %)	490	310	440	290
Summe	3.077	2.035	2.650	1.735	2.440	1.590
*ohne Raumwärme und Militär			** Politik-Szenarien 10; Mit-Maßnahmen-Szenario			
			*** Mit-Maßnahmen-Szenario extrapoliert			
			2030 (normale Diffusion)	2030 (schnelle Diffusion)	2050 (Potenziale realisiert)	
			PJ/ a	PJ/ a	PJ/ a	
Rentables Effizienz-Potenzial			155	233	583	
Anteil des abgedeckten EE-Bedarfs			8,9%	13%	37%	

Quelle: eigene Berechnungen; [175];

Daraus ergibt sich, dass ohne weitere Maßnahmen und neue Effizienztechniken die für 2030 angestrebte Reduktion des industriellen Endenergiebedarfs um 500 PJ nicht erreicht wird (sondern nur etwa 350 PJ). Auch im Gewerbe (ohne Raumwärme und Militär) würde eine erforderliche Endenergiebedarfsmin- derung von etwa 115 PJ nicht erreicht.

Ein nicht unerheblicher Potenzialzuwachs erfolgt erfahrungsgemäß immer wieder über neue energieeff- zientere Lösungen, seien es Verbesserungsinnovationen oder disruptive neue Techniken (wie z.B. die Nanomembran-Technik, die thermische Trennverfahren ersetzen wird). Diese neuen Effizienztechniken kommen mit einer gewissen zeitlichen Unschärfe auf den Markt; und auch beim Umfang der Marktdif- fusion gibt es eine Reihe von Unsicherheiten, wie z.B.:

- die Schnelligkeit, mit der die neuen effizienten Lösungen in Phase 5 des Technikzyklus in den Take-off eintreten können,
- unter welchen energiepolitischen Rahmenbedingungen dies erfolgt, die die neue Regierung für die kommenden 4 Jahre festlegt,
- welche Energiepreise in den 2020er Jahren wirksam sind (z.B. die Verfügbarkeit von Erdgas und grünem Strom und anderer erneuerbaren Energien kann die Energiepreise sehr beeinflussen, wie man ab Februar/ März 2022 (in der Kriegssituation) in extremer Form beobachten konnte),
- welche Wirkungen von der Transformation der Industrie zu einem klimaneutralen Kapitalstock binnen knapp 30 Jahren ausgehen, die u.U. auch zu verkürzten Re-Investitionszyklen in manchen Branchen führen könnten.

Diese Unsicherheiten wurden durch zwei Varianten der Potenzial-Realisierung "optimistische Rahmen- beding-ungen" und "Status Quo-Policy-Rahmenbedingungen" zunächst für die Effizienzpotenziale ge- spiegelt. Bei der ersteren Variante werden die add-on-Effizienzlösungen sehr schnell realisiert und die an Re-Investitionen gebundenen Effizienztechniken durch verkürzte Re-Investitionszeiten zügiger als gewohnt umgesetzt.

Summiert man die Endenergie-Minderungspotentiale der in dieser Studie behandelten neuen Effizienz- techniken, so könnte sich der industrielle und gewerbliche Endenergiebedarf bis 2030 um weitere

- gut 230 PJ in der optimistischen Variante
- etwa 155 PJ in der Status-quo-Policy-Variante und

- bis 2050 um gut 580 PJ reduzieren (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Dies setzt allerdings voraus, dass diese neuen, noch in der F&E-Phase oder am Beginn der Marktdiffusion stehenden Effizienztechniken dieser Studie sich auch in der unterstellten Diffusionsgeschwindigkeit realisieren lassen. Dazu gehört u.a. die Überwindung der allgemeinen Hemmnisse (vgl. Abschn. 2.10.2) als auch der in den einzelnen Status-Berichten / Eduard-Analysen (siehe Anhang) genannten technikspezifischen Hemmnisse.

Da der Projektionszeitraum mit 28 Jahren noch erheblich ist, muss man die Zahlen dieser Effizienzpotentiale als Orientierungswerte verstehen, deren Größenordnung vom zeitlich unterstellten Erfolg der F&E-Arbeiten und dem Erfolg der Markteinführung und -Diffusionsgeschwindigkeit abhängig ist. Die insgesamt 21 untersuchten Effizienztechniken wurden unter technologischen Gesichtspunkten zu zehn Clustern zusammengefasst (vgl. Abbildung 2-46, Abbildung 2-47 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

- Die höchsten Potentiale liegen im Bereich der Direktreduktion zur Erzeugung von Rohstahl und der Erzeugung von dazu benötigtem Wasserstoff über die Hochtemperatur-Elektrolyse (in Summe ca. 130 PJ in 2050)⁷; beides sind disruptive Innovationen.
- es folgen die betrieblichen Gleichstrom-Netze und die Hochtemperatur-Supraleitung für Industriestrom mit knapp 100 PJ/a Potenzial in 2050 (ebenfalls disruptive Techniken).
- Die Abwärmenutzung bei mittleren Temperaturen durch verbesserte Wärmeübertrager (inkl. Latentwärmespeichern) und bei niedrigen Temperaturen in betrieblichen Netzen folgt mit 70 PJ in 2050 (eher den Verbesserungs-Innovationen zuzurechnen).
- Es folgen weitere Effizienztechnik-Bereiche mit ca. 50 bis 60 PJ Einsparpotential in 2050: Trocknungs-Technik sowie elektrische Antriebe und Pumpensysteme als Verbesserungs-Innovationen und Nanofiltration und Nanokatalyse in der Prozesstechnik sowie die ORC-Technik und thermoelektrische Generatoren als disruptive Effizienztechniken);
- vielfältige Effizienzverbesserungen gibt es auch bei der aufkommenden additiven Fertigung und Leichtbau (disruptiv) und als Beispiel einer Gebrauchsgüter-Branche die Verarbeitung von Kunststoffen und Reifen bzw. einer Querschnittstechnik die Kühl-/Kälte- und Reinraumtechnik (Verbesserungs-Innovationen).

⁷ Wichtig ist hier nochmals zu betonen, dass es sich hierbei um die Substitution eines ganzen Produktionsverfahrens handelt, nicht um eine einzelne Effizienztechnik

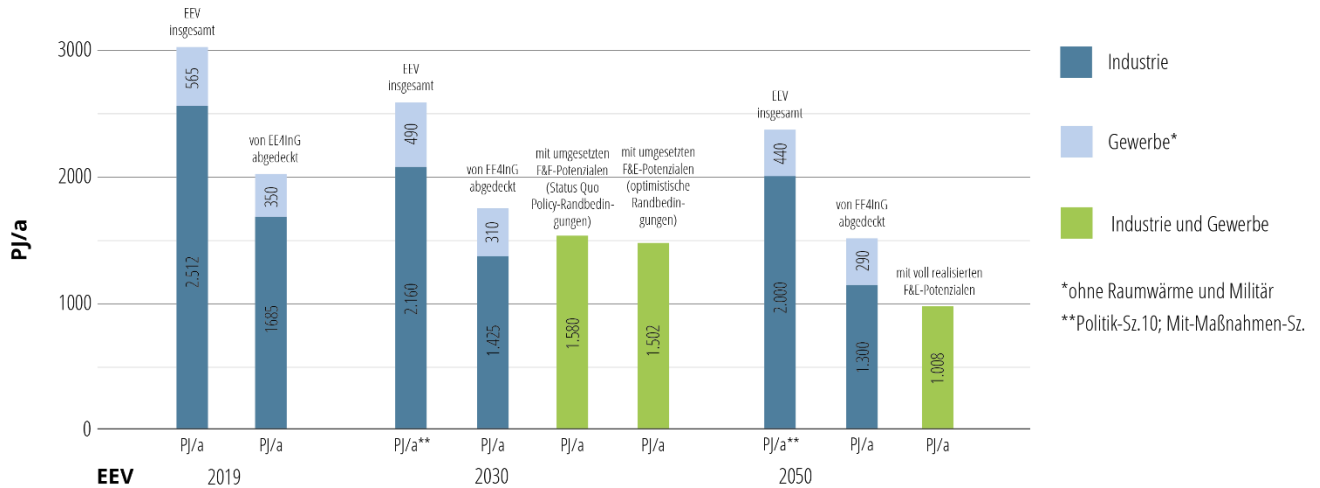


Abbildung 2-46: Potenzial des verminderten Endenergiebedarfs bis 2050 durch den Einsatz der betrachteten Effizienztechniken

Tabelle 2-13: Zusammenführung der analysierten Effizienz-Techniken zu 10 Technik-Clustern mit ihren Effizienzpotentialen 2030 und 2050

Energieeffizienz-Technik-Cluster	Potenzial bis 2030 [PJ/a] - status quo Policy-Randbedingungen	Potenzial bis 2030 [PJ/a] - optimistische Randbedingungen	Potenzial bis 2050 [PJ/a]
elektrische Antriebe sowie Pumpen und -Systeme*	21	36	60
Kühl- und Kältetechnik sowie Raumluftechnik*	9	13	22
ORC-Anlagen und thermo-elekt. Generatoren (inkl. Wechselwirk.)**	19	21	49
Niedertemp.-Wärmenetze, Mitteltemp.-Wärmetauscher u. -Speicher*	16	19	70
Reifenherstellung und Kunststoffverarbeitung*	5	12	10
Additive Fertigung: Bereich Fertigung u. chem. Verfahrenstechnik und Leichtbau in der Zerspanung**	3	4	19
betriebsinterne Gleichstrom-Netze, HT-Supraleitung Industriestrom**	16	22	98
Direktreduktion bei Rohstahlerzeugung und Hochtemp.-Elektrolyse**	40	40	132
Nanomembran-Filtration und Nanokatalysatoren**	14	17	63
Thermische Trocknung*	11	50	61
Summe	155	233	582
*Verbesserungs-Innovationen **Disruptive Effizienztechniken			

Quelle: EE4InG-Team

Technologie

Cluster 1 Elektrische Antriebe und Pumpensysteme

- elektrische Antriebe
- Pumpen und Systeme

Cluster 2 Kühl-, Kälte- und Raumlufttechnik

- Kühl- und Kältetechnik
- Raumlufttechnik

Cluster 3 ORC-Anlagen und Thermoelctrische Generatoren

- Thermo-elctrische Generatoren, inkl. Wechselwirkungen
- ORC-Technik, inkl. Wechselwirkungen

Cluster 4 MT-Wärmeüberträger, NT-Wärmenetze und Latentwärmespeicher

- Mitteltemperaturwärmeüberträger inkl. Wechselwirkungen
- Niedertemperaturwärmenetze
- Latentwärmespeicher, inkl. Wechselwirkungen

Cluster 5 Kunststoff- und Reifenherstellung

- Kunststoffverarbeitung
- Reifenherstellung

Cluster 6 Additive Fertigung und Leichtbau

- Additive Fertigung - Anwendung in der chemischen Verfahrenstechnik
- Leichtbau in der Zerspaltung
- Additive Fertigung - Fertigung selbst

Cluster 7 HT-Supraleitung und betriebl. Gleichstromnetze

- betriebsinterne Gleichstromnetze
- Hochtemperatursupraleitung

Cluster 8 Direktreduktion und Hochtemperaturelektrolyse

- Direktreduktion
- Hochtemperaturelektrolyse

Cluster 9 Nanofiltration und Nanokatalysatoren

- Nanofiltration
- Nanokatalysatoren

Cluster 10 Trocknung

- Trocknung

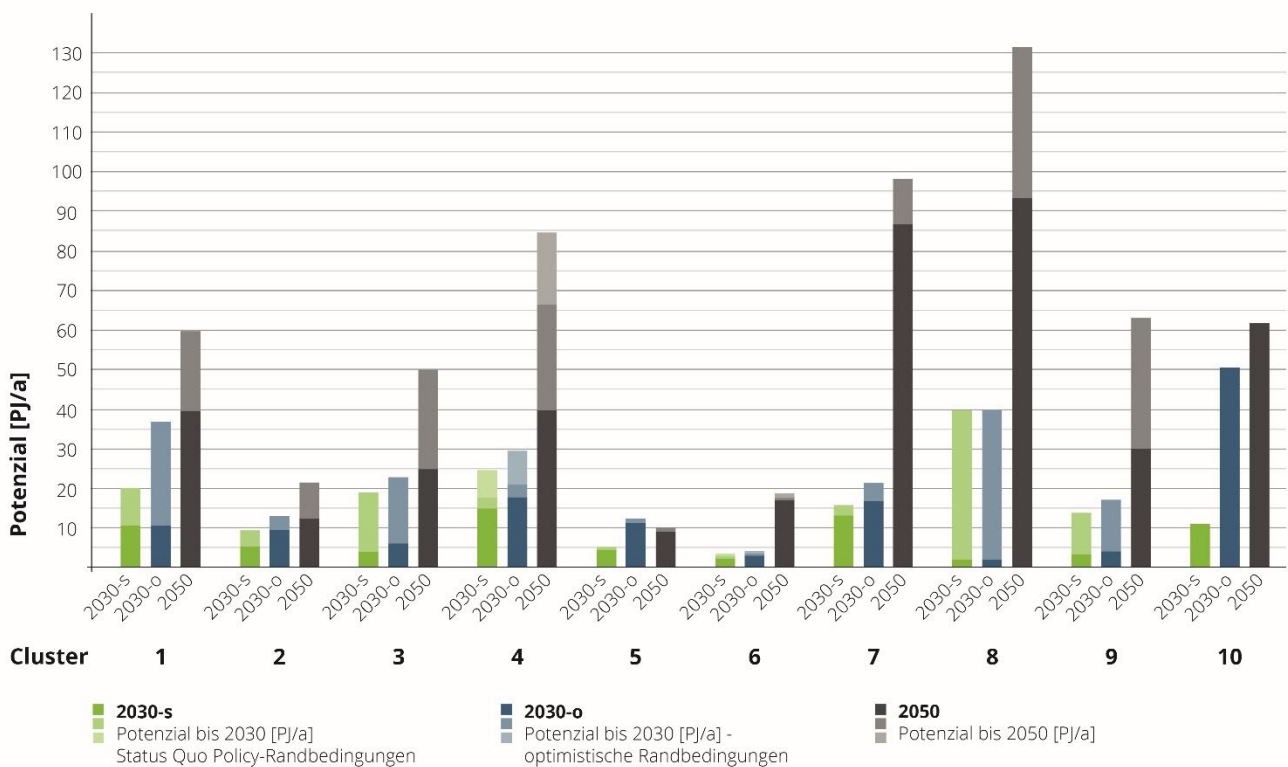


Abbildung 2-47: Zusammenführung der analysierten Effizienz-Techniken zu 10 Technik-Clustern mit ihren Effizienzpotentialen 2030 und 2050 - grafische Darstellung

Bei diesen Potentialen handelt es sich nicht nur um neue, durch Forschung und Entwicklung in den kommenden Jahren auf den Märkten erscheinenden disruptiven Innovationen, sondern teilweise auch um technisch-wirtschaftliche Verbesserungs-Potentiale von heute bereits genutzten Techniken.; sie wur-

den aber von den jeweiligen Anwender-Betrieben und -Branchen bislang noch kaum oder nur sehr zögerlich aufgegriffen - auch wegen bestehender Hemmnisse (vgl. Abschn. 2.10.2) (z.B. elektrische Antriebe, effiziente Trocknungsverfahren, ORC-Anlagen).

Durch die neuen energieeffizienten Lösungen könnte den Trends steigender Energiepreise entgegenge wirkt werden, was für die internationale Wettbewerbsfähigkeit der betroffenen Branchen von Bedeutung ist. Hinzu kommt der Aspekt einer sehr exportorientierten deutschen Industrie, die nur durch ein Angebot sehr energieeffizienter und innovativer Maschinen und Anlagen ihre Position erhalten kann (Zweifel daran vgl. Abschnitt 2.10.2).

Die klimapolitische Sicht

Bis zum Jahr 2030 müssen die Emissionen des Industriesektors entsprechend den Vorgaben des Klimaschutzgesetzes des Bundes um etwa 60 auf 118 Mio. t CO₂-äq./a reduziert werden (-33 %). Dies bedeutet, dass neben einer absoluten Verminderung des Endenergiebedarfs auch eine Substitution von fossilen Endenergieträgern durch erneuerbare Energien erforderlich ist. Auch liegt der Klimapolitik ein jedem Land zugeordnetes maximales Budget an Treibhausgasemissionen zugrunde, das für Deutschland mit derzeit 7.400 Mio. t CO₂-äq.. verbleibenden Restemissionen beziffert wird. Bei den heute als konstant für die Zukunft vorausgesetzten Treibhausgasemissionen wäre dieses Budget für Deutschland bereits im Jahre 2030 erschöpft.

Die bis 2030 durch die neuen Energieeffizienz-Techniken erreichbaren kumulierten vermiedenen CO₂-Emissionen wurden - je nach Policy-Variante - auf etwa 71 bis 83 Mio. t CO₂ berechnet. Unterstellt man, dass die Industrie ein unter den Energiesektoren gleichverteiltes Budget in einer Größenordnung von 1.500 Mio. t CO₂äq. hat, dann verlängern die kumulierten CO₂-Potenziale der hier untersuchten Energieeffizienz-Techniken das verfügbare Budget um etwa ein halbes Jahr, d.h. bis Mitte 2031.

Zwar sind die bis 2050 vermiedenen kumulierten CO₂-Emissionen der in dieser Forschungsarbeit analysierten Energieeffizienz-Techniken mit rund 920 Mio. t CO₂-äq. gegenüber 2030 mehr als verzehnfacht (vgl. Abbildung 2-49), aber ihre Realisierung käme zu spät, um das Emissionsbudget der Industrie wesentlich strecken zu können. Die einzelnen Effizienz-Techniken zeigen hierbei, ähnlich wie bei dem vermeidbaren Endenergiebedarf, eine große Spanne der kumulierten vermeidbaren CO₂-Emissionen bis 2050 zwischen wenigen Hunderttausend Tonnen bis zu 670 Millionen Tonnen. Letztere kumulierte Zahl betrifft die Anwendung der Direktreduktion zur Roheisenherstellung). Man sieht hier den dominierenden Einfluss der Substitution der koksbetriebenen Hochöfen durch die Direktreduktion von Eisenerz mit grünem Wasserstoff im Rahmen des untersuchten Technikportfolios.

Aufgrund der Dekarbonisierung von Energieversorgung und der industriellen Produktion in den kommenden drei Jahrzehnten nimmt die CO₂-mindernde Wirkung aller Energieeffizienztechniken ab, obwohl ihre Markt-durchdringung sich oft linear in den 2040er Jahren fortsetzt. Von bleibender Bedeutung ist damit ihre Wirkung der Energiekostensenkung (einschließlich gelegentlicher weiteren Wirkungen wie Wärmespeicherung oder Stromerzeugung aus Abwärme als Grundlaststrom).

Diese Ergebnisse demonstrieren die große klimapolitische Bedeutung der noch in der F&E-Phase befindlichen oder noch nicht realisierten Effizienzpotenziale. Hierbei muss betont werden, dass wichtige Bereiche der Grundstoffindustrie und der Investitions- und Verbrauchsgüterindustrie aufgrund des Projektrahmens nicht durch EE4InG behandelt wurden. Dies sind insbesondere die Prozess- und Produktionstechniken der Steine- und Erdenindustrie, der NE-Metall-Industrie, der Sekundärstahlherstellung und ihrer Weiterverarbeitung, der Gießereien, der Papier- und Zellstoffherstellung, der Metallverarbeitung

und der Verbrauchsgüterindustrie mit insgesamt gut 800 PJ Endenergieverbrauch pro Jahr, entsprechend einem Drittel des industriellen Energiebedarfs.

Technologie

Cluster 1 Elektrische Antriebe und Pumpensysteme

- elektrische Antriebe
- Pumpen und Systeme

Cluster 2 Kühl-, Kälte- und Raumlufttechnik

- Kühl- und Kältechnik
- Raumlufttechnik

Cluster 3 ORC-Anlagen und Thermoelektrische Generatoren

- Thermo-elektrische Generatoren, inkl. Wechselwirkungen
- ORC-Technik, inkl. Wechselwirkungen

Cluster 4 MT-Wärmeüberträger, NT-Wärmenetze und Latentwärmespeicher

- Mitteltemperaturwärmeüberträger inkl. Wechselwirkungen
- Niedertemperaturwärmenetze
- Latentwärmespeicher, inkl. Wechselwirkungen

Cluster 5 Kunststoff- und Reifenherstellung

- Kunststoffverarbeitung
- Reifenherstellung

Cluster 6 Additive Fertigung und Leichtbau

- Additive Fertigung - Anwendung in der chemischen Verfahrenstechnik
- Leichtbau in der Zerspaltung
- Additive Fertigung - Fertigung selbst

Cluster 7 HT-Supraleitung und betriebl. Gleichstromnetze

- betriebsinterne Gleichstromnetze
- Hochtemperatursupraleitung

Cluster 8 Direktreduktion und Hochtemperaturelektrolyse

- Direktreduktion
- Hochtemperaturelektrolyse

Cluster 9 Nanofiltration und Nanokatalysatoren

- Nanofiltration
- Nanokatalysatoren

Cluster 10 Trocknung

- Trocknung

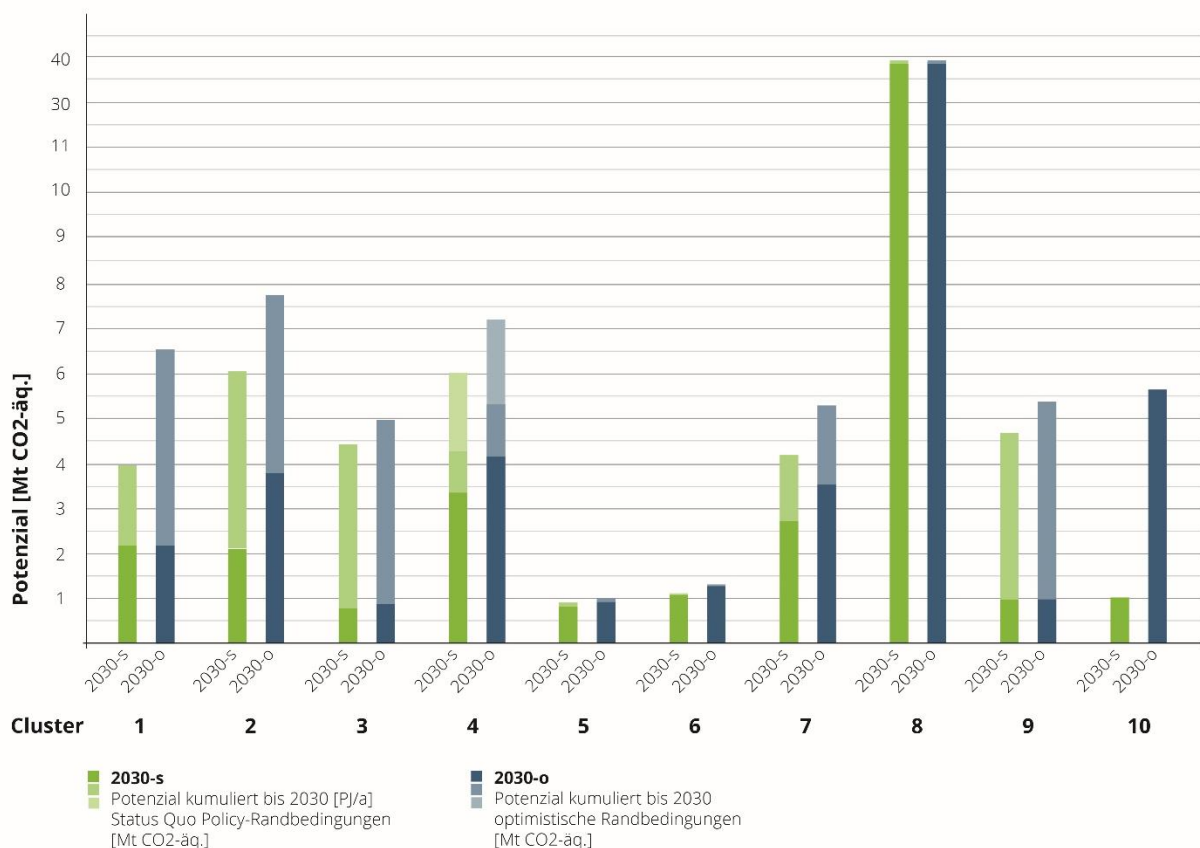


Abbildung 2-48: Kumulierte vermiedene CO2-Emissionen bis 2030 der betrachteten Energieeffizienz-Techniken

Technologie

Cluster 1 Elektrische Antriebe und Pumpensysteme

- elektrische Antriebe
- Pumpen und Systeme

Cluster 2 Kühl-, Kälte- und Raumlufttechnik

- Kühl- und Kältetechnik
- Raumlufttechnik

Cluster 3 ORC-Anlagen und Thermoelektrische Generatoren

- Thermo-elektrische Generatoren, inkl. Wechselwirkungen
- ORC-Technik, inkl. Wechselwirkungen

Cluster 4 MT-Wärmeüberträger, NT-Wärmenetze und Latentwärmespeicher

- Mitteltemperaturwärmeüberträger inkl. Wechselwirkungen
- Nieder temperaturwärmenetze
- Latentwärmespeicher, inkl. Wechselwirkungen

Cluster 5 Kunststoff- und Reifenherstellung

- Kunststoffverarbeitung
- Reifenherstellung

Cluster 6 Additive Fertigung und Leichtbau

- Additive Fertigung - Anwendung in der chemischen Verfahrenstechnik
- Leichtbau in der Zerspanung
- Additive Fertigung - Fertigung selbst

Cluster 7 HT-Supraleitung und betriebl. Gleichstromnetze

- betriebsinterne Gleichstromnetze
- Hochtemperatursupraleitung

Cluster 8 Direktreduktion und Hochtemperaturelektrolyse

- Direktreduktion
- Hochtemperaturelektrolyse

Cluster 9 Nanofiltration und Nanokatalysatoren

- Nanofiltration
- Nanokatalysatoren

Cluster 10 Trocknung

- Trocknung

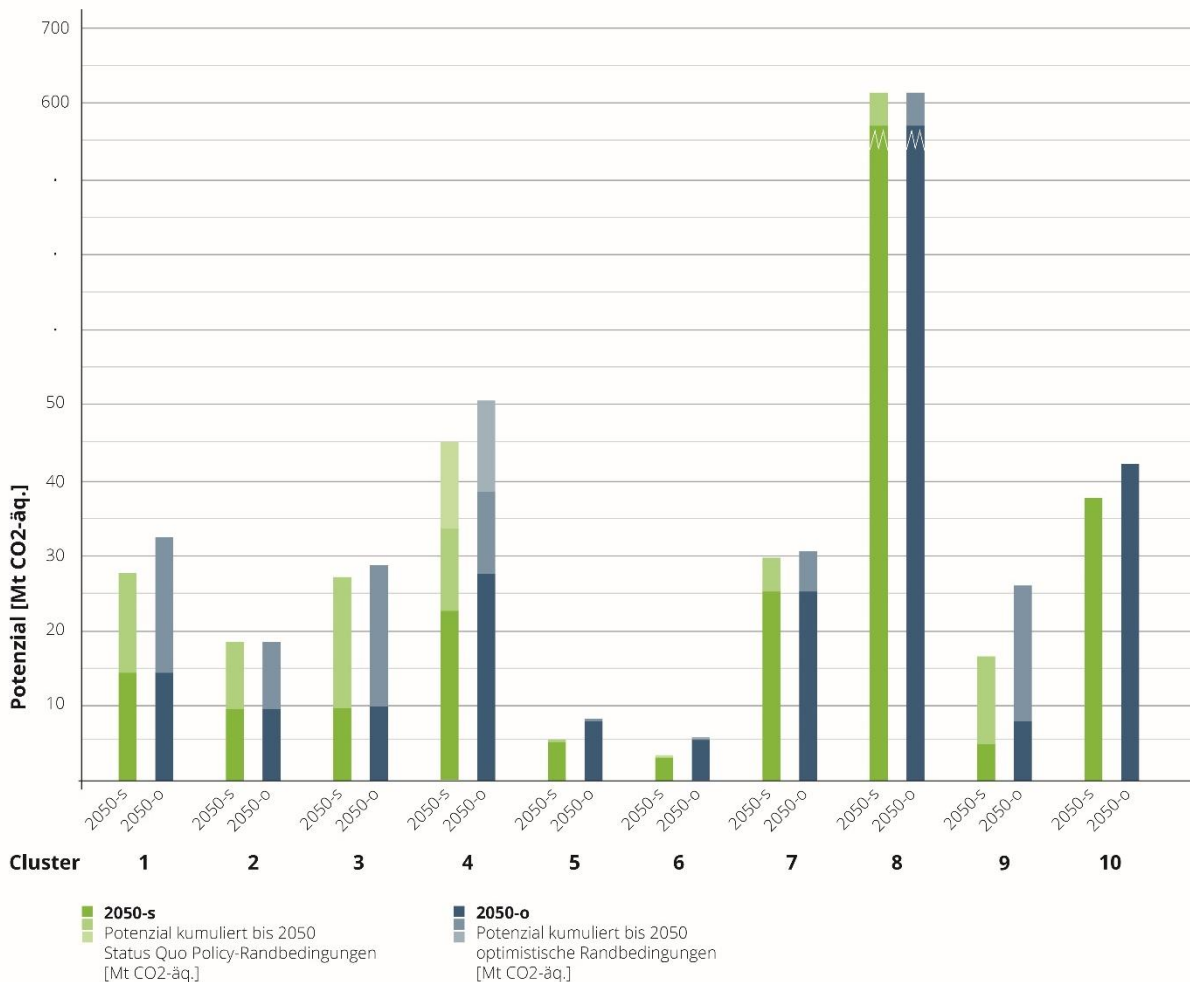


Abbildung 2-49: Kumulierte vermiedene CO₂-Emissionen bis 2050 der betrachteten Energieeffizienz-Techniken

Unsicherheits- und Risiko-Betrachtungen zu den berichteten quantitativen Ergebnissen

Die oben genannten quantifizierten Wirkungen der analysierten Effizienztechniken hinsichtlich vermindertem zukünftigem Endenergiebedarf und vermiedener kumulierter Treibhausgas-Emissionen bis 2050 sind in verschiedener Hinsicht unsicher:

- Zunächst wurde unterstellt, dass die deutsche Industrie noch ein geringes Wachstum in diesen drei Jahrzehnten hat, nicht zuletzt durch zunehmende Exporte in Schwellen- und Entwicklungsländer; zudem wird unterstellt, dass energieintensive Produktionen wie die Roheisenerzeugung, die Erzeugung von Basischemikalien oder Primär-Nichteisenmetallen in Deutschland bleiben, d.h. nicht teilweise in andere Länder verlagert werden. Dies würden bestehende Standortvorteile anderer Länder bzgl. Rohstoffnähe und/oder günstigeren Kosten zur Erzeugung von grünem Strom und Wasserstoff durchaus nahelegen (Gries/ Hentschel 1996; Böhmer u.a. 2016).
- Die Komplexität der Transformation einer Industrie binnen 25 Jahren zu einer klimaneutralen Industrie-Struktur ist so groß, dass die hier berichteten Ergebnisse zu den Annahmen der Marktdiffusion der 20 Effizienztechniken erhebliche Fehlerbreiten haben können, die für einen zukünftigen Zeitpunkt durch-aus plus/minus 20 bis 30 % für jede der betrachteten Technik betragen können (vgl. Anhang 1).
- Hinzu kommt das *F&E-Risiko einer neuen Technik*, das in zwei Stufen aufgeteilt wurde: die Phase 2 des Technikzyklus (Euphorie) bis Phase 4 (Re-Orientierung) einerseits und die Phase 5 (Aufstieg) und die letzte Phase 6 (Marktdiffusion) andererseits. Die F&E-Risiken können nicht nur deshalb groß sein, weil eine Technik sich z.B. noch in der Phase 3 (Ernüchterung) befindet (also noch genauer herausgefunden werden muss, wo sich die entwickelte Technik im Wettbewerb behaupten könnte, z.B. die Thermo-elektrischen Generatoren), sondern auch dann, wenn sie sich schon in Phase 5 (Aufstieg) befindet, aber sie unerwartet auf nicht beachtete Wettbewerber oder Markt-Diffusionshemmnisse stößt. Dies bedeutet, dass jene in F&E-befindlichen Effizienztechniken ein hohes F&E-Risiko haben, die
 - (1) noch in Phase 3 oder 4 sind und
 - (2) absehbar erhebliche technische Wettbewerber haben (wie z.B. die Mitteltemperatur-Wärmetauscher bei den thermischen Trennverfahren durch Prozess-Substitution mittels Nanomembrantechnik, oder bei direktem Wärmetausch fest-stückig/gasförmig). Für diese Risiko-bewertung der beiden Stufen wurde eigens ein Bewertungsschema mit einer Punktezahl zwischen 1 und 40 entwickelt (vgl. Anhang 2).

Die Risiken eines F&E-Misserfolgs für die beiden Stufen (2-4 und 5-6) wurden jeweils anhand von acht Fragen ermittelt, wobei die Fragen von 1 bis 5 bewertet werden konnten (vgl. **Fehler! V erweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Eine Summe der Punkte bis zu 15 wurde mit Gruppe A als relativ geringes F&E-Risiko eingeschätzt, zwischen 16 und 20 Punkten als Gruppe B mit mittlerem Risiko bezeichnet und über 20 Punkte der Kategorie C mit deutlichem F&E-Risiko.

Nach der derzeitigen Einschätzung liegen 14 der 20 Energieeffizienztechniken in Gruppe B und jeweils 3 Techniken in Gruppe A und C (vgl. Abbildung 2-50). Die Techniken in Gruppe C haben somit das höchste Risiko, dass sie die Phase 5 (Aufstieg) nicht erreichen.

Tabelle 2-14: Risiken der F&E-Phase und der Marktdiffusionsphase - Beispiel: ORC-Technik

Risikoperspektive	Fragestellung und Teilaspekte	D_R
F&E-Risiko-Per- spektive (besonders rele- vant in Tech- nikzyklus-Phasen 2-4)	Fragestellung: Welche Risiken sind mit einer aktiven Forschungs- und Entwicklungsphase der jeweiligen Energieeffizienz-Technik verbunden? Die Teilaspekte sind: (8 Risiken)	
	- (klare/unscharfe) Position im Technikzyklus,	1
	- Kostenintensität der Forschung & Entwicklung (<i>Summe der F&E-Aufwendungen insgesamt relativ zu jährlicher Energieeinsparung bei voller Marktdiffusion in D</i>) Beispiel ORC: 2 Mio. € / 2 PJ/ a,	2
	- Wahrscheinlichkeit einer früheren Patentanmeldung einer konkurrierenden Forscher- oder Entwickler-Gruppe,	2,5
	- angemessene Ausstattung von Personal-, Kompetenz- und Finanz-Ressourcen für die F&E-Aufgabe, um voraussichtlich in angemessener Zeit die angestrebte Effizienz-Technik entwickelt zu haben,	3
	- eine ebenfalls in der F&E-Phase befindliche Wettbewerbs-Effizienz-technik, deren Marktanteil erheblich werden könnte (direkte Abwärmenutzung bzw. Wärme-Recycling als Konkurrenz für ORC-Anlagen),	3
	- Einschätzung der Aufmerksamkeit und Leistungsfähigkeit des betroffenen Innovationssystems,	2
	- absehbares Henne-Ei-Problem der erforderlichen Kostendegression durch hohe Produktionszahlen, aber ungeklärter Weg von Nischen- zu Massen-Märkten (wirtschaftliche Anschlussfähigkeit) und	1,5
- benötigte Werkstoffe, welche ein Engpass-Risiko darstellen könnten.	1	
Bewertung der Risikolage in Technikzyklus- Phase 3 bis 4:	Risiko-Summe in den Phasen 3 und 4: Von 40 max. Punkten werden 16 erreicht; die F&E-Risiken sind überschaubar; am riskantesten werden mit Stufe 3 eingeschätzt: <ul style="list-style-type: none"> eine unzureichende Ausstattung von Personal-, Kompetenz- und Finanz-Ressourcen für die F&E-Aufgabe, um voraussichtlich in angemessener Zeit die angestrebte Effizienz-Technik entwickelt zu haben; eine ebenfalls in der F&E-Phase befindliche Wettbewerbs-Effizienz-technik, deren Marktanteil erheblich werden könnte, (direkte Abwärmenutzung bzw. Wärme-Recycling) 	$\sum D_F$ 16

Risikoperspektive	Fragestellungen und Teilaspekte	D_R
Risiko-Perspektive der Markteinführung und -diffusion (besonders von Bedeutung in Technikzyklus-Phase 5 und 6 (Prospektive Risiken))	Fragestellung: Welche Risiken sind für Hersteller und Anwender bei Markteintritt und der späteren Marktdiffusion bekannt oder zu erwarten? Die Teilaspekte sind: (8 Risiken)	
	<ul style="list-style-type: none"> • konkurrierende Effizienztechniken, welche nicht in dem Umfang ihres Marktanteils erwartet wurden, 	3
	<ul style="list-style-type: none"> • eine ungestörte Marktdiffusion mit entsprechenden erwarteten Kostendegressionen für Herstellung und Betrieb, 	2
	<ul style="list-style-type: none"> • Eintritt der erwarteten Rentabilität, 	2
	<ul style="list-style-type: none"> • Auftreten eines Lebensdauer-Risikos (zu schnelle Ermüdung, zu schnelle technologische Veränderung), 	2
	<ul style="list-style-type: none"> • bestehende Anwender-Akzeptanz-Probleme (z.B. größere bauliche Maßnahmen erforderlich, oder Erneuerung von Genehmigungen), 	2
	<ul style="list-style-type: none"> • Veränderung politischer Rahmenbedingungen (negativ: „Lock-in“ oder „stranded investment“ / positiv: höhere CO₂-Abgaben als unterstellt), 	2
	<ul style="list-style-type: none"> • Vorliegen günstigerer Produktionsbedingungen im globalen Ausland, • Umweltgefahren durch die Effizienztechnik oder Einsprüche seitens der Gewerbeaufsicht oder von Umwelt-NGOs. 	3 1
Bewertung der Risikolage in Technikzyklus-Phase 5 bis 6:	Risiko-Summe in den Phasen 5 und 6: Von 40 max. Punkten werden 17 erreicht; die Risiken der Marktdiffusion sind überschaubar; am riskantesten wird mit Stufe 3 eingeschätzt: <ul style="list-style-type: none"> • es könnte eine konkurrierende Effizienz-Technik auftauchen, die nicht - nicht in dem Umfang des Marktanteils - erwartet worden war. • es sind günstigere Produktionsbedingungen im globalen Ausland, insbesondere China, denkbar. 	$\sum D_M$ 17

Risiko-Betrachtung der in EE4InG untersuchten Effizienztechniken- F&E-Risiko-Perspektiven

- | | | |
|--|---|---|
| <p>A (bis 15)</p> <ul style="list-style-type: none"> A Direktreduktion EE B Direktreduktion Basis C ORC-Technik, inkl. Wechselwirkungen D Additive Fertigung - Anwendung in der chemischen Verfahrenstechnik E Pumpen und Systeme F Hochtemperaturelektrolyse G Reifenherstellung | <p>B (bis 20)</p> <ul style="list-style-type: none"> H Trocknung I Kunststoffverarbeitung J Latentwärmespeicher, inkl. Wechselwirkungen K Mitteltemperaturwärmeüberträger inkl. Wechselwirkungen L betriebsinterne Gleichstromnetze M Nanokatalysatoren N Kühl- und Kältetechnik O Hochtemperatur-Supraleitung Industriestrom P Leichtbau in der Zerspannung | <p>C (bis 23)</p> <ul style="list-style-type: none"> Q elektrische Antriebe R Additive Fertigung - Fertigung selbst S Niedertemperaturwärmenetze T Thermo-elektrische Generatoren, inkl. Wechselwirkungen U Nanofiltration |
|--|---|---|

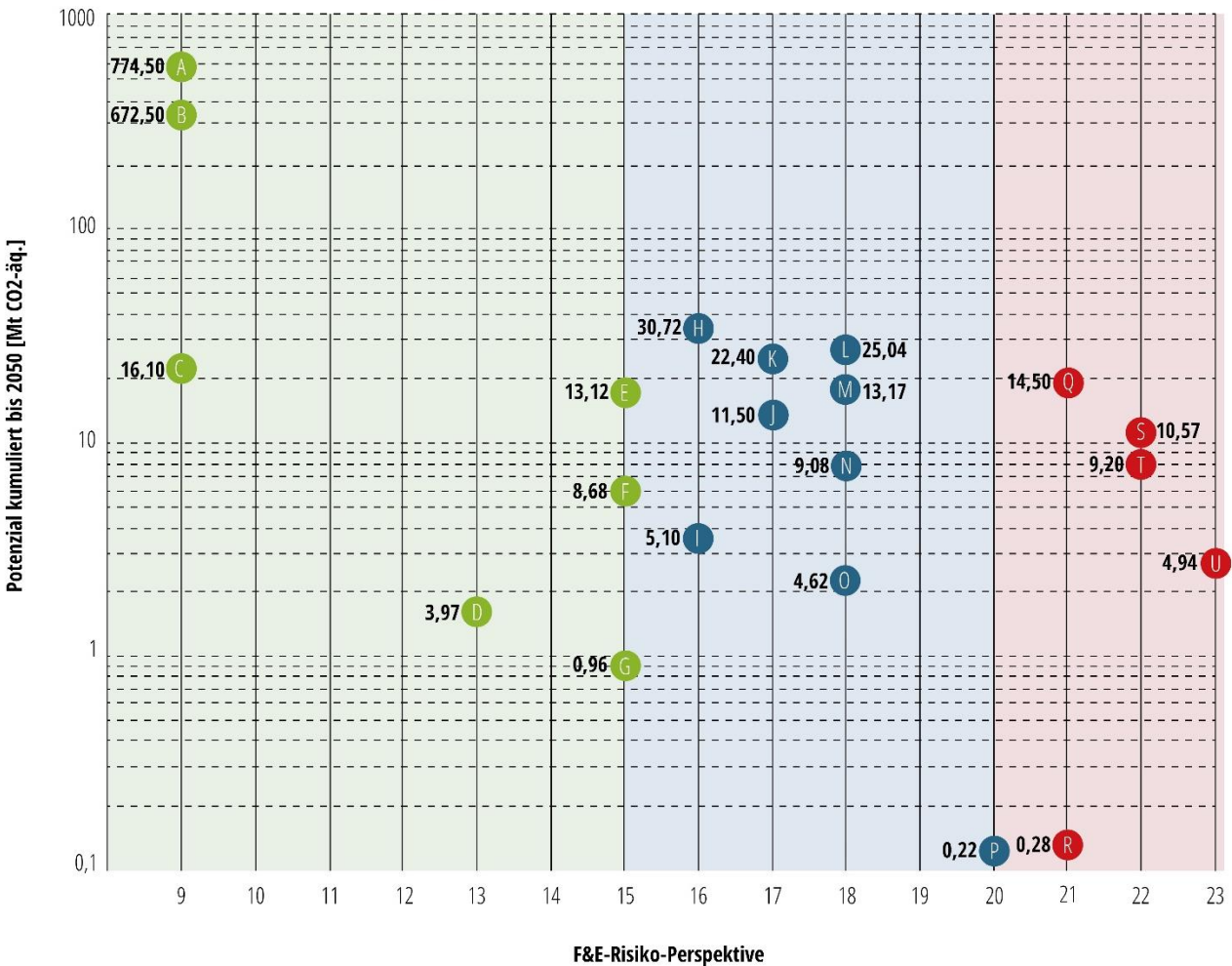


Abbildung 2-50: Risiko-Betrachtung der in EE4InG untersuchten Energieeffizienz-Techniken – das F&E-Risiko

Die Einschätzung für die Phase 5 und 6, d.h. den Markteinstieg und die Marktdiffusion, gleicht die Risiko-Bewertung für die Gruppe C derjenigen der F&E-Phase, aber bei den übrigen Effizienztechniken vermindert sich das Risiko der Marktdiffusion: Neun Techniken - und vielleicht auch die Direktreduktion als heute von der Stahlindustrie als alleinige Alternative zur klimaneutralen Produktion von Roheisen betrachtet [176] - sind der Gruppe A zugeordnet (vgl. Abbildung 2-51).

Auch hier ist die Gruppierung der betrachteten Energieeffizienztechniken in eine Risikoklasse nicht statisch zu verstehen, vielmehr dürfte sie wegen neuer Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung oder neuen Rahmenbedingungen der Energie- und Klimapolitik im Zeitverlauf Änderungen unterliegen.

Risiko-Betrachtung der in EE4InG untersuchten Effizienztechniken - Markteinführung und -diffusion

- | | | |
|--|--|--|
| A (bis 15) | B (bis 20) | C (bis 26) |
| A Trocknung | H Latentwärmespeicher, inkl. Wechselwirkungen | P Kühl- und Kältetechnik |
| B Mitteltemperaturwärmeüberträger inkl. Wechselwirkungen | I Hochtemperaturelektrolyse | Q Niedertemperaturwärmenetze |
| C ORC-Technik, inkl. Wechselwirkungen | J Nanokatalysatoren | R Leichtbau in der Zerspannung |
| D Pumpen und Systeme | K Additive Fertigung - Anwendung in der chemischen Verfahrenstechnik | S Hochtemperatur-Supraleitung Industriestrom |
| E Kunststoffverarbeitung | L betriebsinterne Gleichstromnetze | T Thermo-elektrische Generatoren, inkl. Wechselwirkungen |
| F Reifenherstellung | M Direktreduktion EE | U Nanofiltration |
| G Additive Fertigung - Fertigung selbst | N Direktreduktion Basis | |
| | O elektrische Antriebe | |

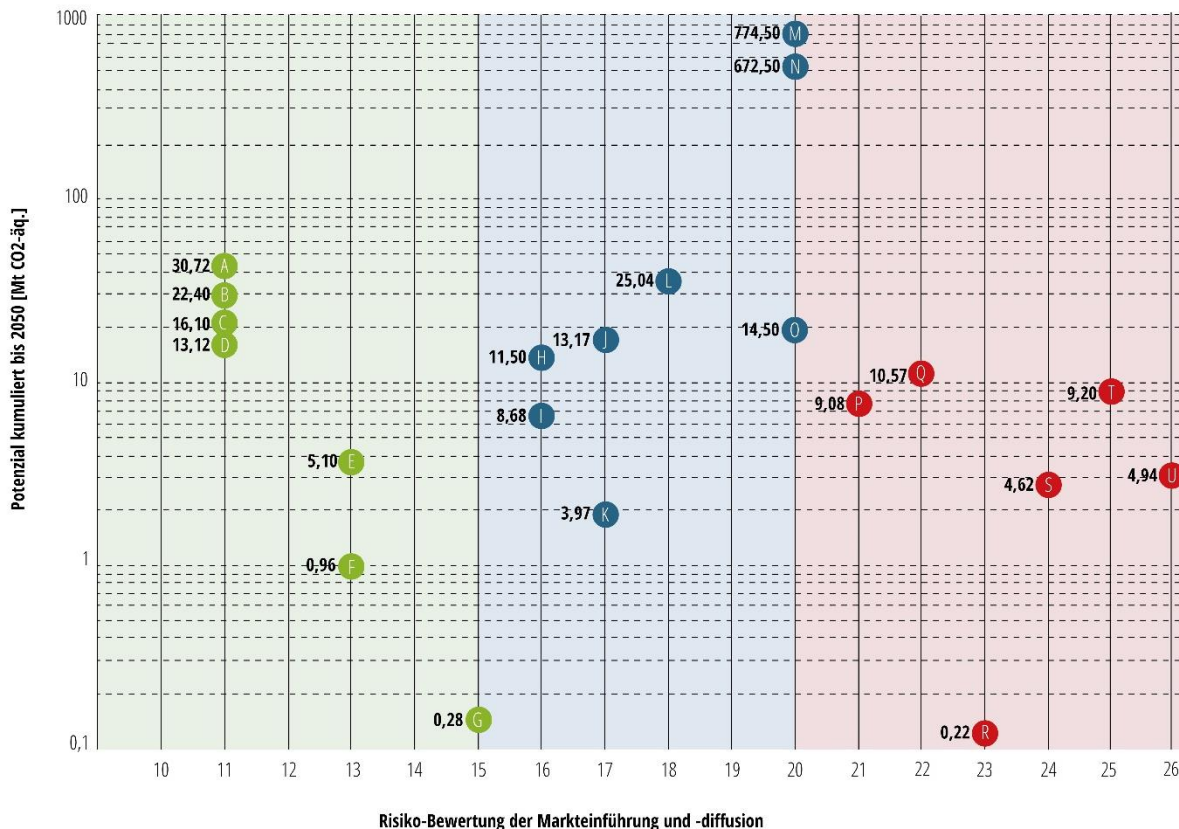


Abbildung 2-51: Risiko-Betrachtung der in EE4InG untersuchten Energieeffizienztechniken – Perspektive des Risikos bzgl. Erreichen der Marktdiffusion

Diese drei Quellen von Unsicherheiten der erarbeiteten Ergebnisse schmälern nicht ihre Bedeutung, sondern sollten vielmehr Anlass geben, in regelmäßigen Abständen (z.B. im Zweijahresrhythmus) die jeweils größten Unsicherheits- und Schätzfehler-Ursachen für die Techniken mit großen Potenzialen neu zu betrachten und die bestehenden Zahlen mit den neuen Erkenntnissen zu korrigieren.

2.10.1. Zusammenfassende Beobachtungen aus Forschungspolitischer Sicht

Wenngleich nur für einen Teil der 20 Energieeffizienz-Techniken eine Publikations- und Patentanalyse erfolgte, so lassen sich aus diesen doch eine Reihe interessanter Beobachtungen ableiten, die für die F&E-Politik in Deutschland (und auch Europa) bedenkenswert sind bzw. in Zukunft weiterer Analysen bedürfen. Aufgrund der geringen Fallzahl der untersuchten Effizienztechniken werden die Beobachtungen lediglich beschrieben.

Patentanalysen

In den meisten Fällen der hier untersuchten Effizienztechniken liegen bei den international angemeldeten Patenten die drei Länder USA, Japan und Deutschland auf den ersten drei Plätzen mit jeweils unterschiedlichen Positionen je nach Energieeffizienz-Technik (vgl. Tabelle 2-15). Zuweilen taucht auch ein anderes europäisches Land sowie China und Süd-Korea in der Spitzengruppe der ersten drei Positionen auf, so beispielsweise bei 18 Patentgruppen der untersuchten Techniken:

- China in Position 2 im Bereich Nano-Katalyse, in Position 3 (Wärmeübertrager-Korrosion, gleichauf mit Deutschland mit 4 Patenten) und in Position 4 mit bei den Bereichen Tribologie, Leichtbau und Additive Fertigung und in Position 5 bei den Bereichen ORC, Latentwärmespeicher, HT-Supraleitung und Nano-membrantechnik-Anwendungspatente.
- Italien mit zwei Patenten auf Position 3 (ORC-Technik und Graphit-Wärmeübertrager) sowie Frankreich auf der gleichen Position mit ebenfalls zwei Patenten (elektrothermische Generatoren (TEG) und Additive Fertigung),
- Süd-Korea mit zwei Grundpatenten bei der Nanomembrantechnik auf Position 1 und Nano-Katalyse auf Position 3; dann auf Position 4 bei der HT-Supraleitung und auf Position 5 bei den drei Bereichen Wärmeübertrager (Korrosion und Beschichtung) sowie Tribologie.
- Neben weiteren westeuropäischen Ländern findet man in der Mittelklasse der internationalen Patent-anmeldungen zu den 18 Effizienzklassen auch Saudi-Arabien auf Position 4 bei zwei Bereichen (thermische Nachverbrennung und ORC-Technik).

Tabelle 2-15: Häufigkeit bei den fünf Spitzenplätzen der internationalen Patentanmeldungen zu 18 Energieeffizienztechniken nach Ländern, verschiedene Zeitabschnitte für einzelne Techniken

Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5
6 USA	8 USA	4 Jap	3 China	5 GB
6 DE	7 DE	3 USA	3 Italien	4 China
4 Jap	1 Jap	2 DE	2 FRA	3 S-Korea
1 S-Korea	1 China	2 Italien	2 Österr..	2 CH
1 GB	1 Österr.	2 FRA	2 S-Arab.	1 Schwed
1 FRA	1 NL	1 S-Korea	1 USA	1 Irland
		1 GB	1 DE	1 Portug
		1 China	1 Jap	1 Algerien
		1 CH	1 S-Korea	
		1 Dk	1 NL	
		1 Belgien	1 Schwed	

Quelle: eigene Auswertungen

Diese Rangfolge zwischen USA, Japan und Deutschland besteht seit Jahrzehnten mit kleineren Wechslen der Positionen in den Spitzengruppen der jeweiligen Energieeffizienz-Techniken. Wirft man aber einen Blick auf die Analyse der internationalen Publikationen, ändert sich das Bild ganz erheblich (siehe Tabelle 2-16).

Bibliometrische Analysen internationaler Publikationen zu den betrachteten Effizienztechniken

Ein völlig anderes Bild ergibt sich bei den internationalen Veröffentlichungen zu den gleichen Energieeffizienz-Techniken. Hier dominieren chinesische Autoren in 15 Effizienzklassen auf Platz 1 die Publikations-Szene, gefolgt von US-amerikanischen Autoren in zwei Energieeffizienz-Bereichen (Keramik-Wär-

meübertrager und additive Fertigung) (vgl. Tabelle 2-16). Wie sehr sich die internationalen Publikationen im letzten Jahrzehnt verschoben haben, lässt sich gut am Beispiel bei Hochtemperaturelektrolyse (HTE) erläutern:

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

Bei der Analyse fällt weiterhin auf, dass nicht nur China in der Spitzengruppe fachlich sehr breit aufgefächert eindeutig dominiert, sondern auch andere nicht-europäische Länder häufiger auf Platz 3 und 4 zu sehen sind, so beispielsweise insbesondere Indien und der Iran:

- Indien liegt viermal auf Position 3 in den Bereichen Latentwärme-Speicher, HT-Supraleitung, Tribologie und thermische Nachverbrennung und in je zwei weiteren Bereichen in Position 4 und 5 (beschichtete und metallische Wärmeübertrager, Plattenwärmetauscher und Nanokatalyse);
- Iran (im Jahre 2019) bei den beschichteten Wärmeübertragern (Platz 3), bei den Platten-Wärmetauschern und der Positionierung von Wärmeübertragern nach Öfen (jeweils Platz 4) sowie bei ORC-Technik auf Platz 5;
- Auf Platz 5 tauchen je einmal russische Autoren im Bereich HT-Supraleitung und brasilianische Autoren bei keramischen Wärmeübertragern auf.

Tabelle 2-16: Häufigkeit bei den fünf Spitzenplätzen der internationalen Publikationen zu 20 Energieeffizienztechniken nach Ländern, verschiedene Zeitabschnitte für einzelne Techniken

Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Pos. 5
15 China	13 USA	5 DE	5 GB	3 S-Korea
3 USA	3 China	4 Indien	3 S-Korea	2 DE
1 DE	2 DE	3 China	2 DE	2 Italien
1 GB	1 Italien	2 China	2 Indien	2 Japan
	1 Belgien	2 Jap	2 Iran	2 Indien
		2 S-Korea	2 Italien	2 FRA
		1 FRA	1 FRA	1 USA
		1 Iran	1 Canada	1 China
			1 Österr.	1 Iran
			1 Spanien	1 Österr.
				1 Brasil
				1 RUS
				1 DK

Quelle: eigene Auswertungen

Gewiss haben diese rein quantitativen Analysen zu den internationalen Patent-Anmeldungen und den Publikationen noch keine eindeutige Aussagekraft über die Technologieführerschaft und spätere Außenhandels-stärken der betroffenen Länder, da letztlich

- die inhaltliche Analyse mit der Identifikation der Hauptpatente (das wurde für die Nanomembran-Technik gemacht) und der Schlüsselveröffentlichungen mit zentralen Erkenntnissen das Bild abrunden würden;

- die Bevölkerungszahl (und damit die Wissenschaftlerzahl) eine Rolle spielen dürfte (China: 1.398 Mio. versus Deutschland 82 Mio. versus Schweiz 8,7 Mio. Personen),
- die Patent- und Veröffentlichungsstrategie von Unternehmen in OECD-Ländern und von zentral gelenkten Volkswirtschaften sehr unterschiedlich sein können, zumal wenn die ersteren befürchten, dass "Blaupausen" von neuen technischen Lösungen durch die zweite Gruppe erstellt werden.

Man wird inhaltlich prüfen müssen, wenn auf den ersten sechs Plätzen der quantitativen Auswertungen der Veröffentlichungen pro Institution (wie z.B. Universitäten) der ORC-Technik nur chinesische Universitäten zu finden sind (mit einer durchschnittlichen Anzahl der Publikationen von 115 je chinesischer Universität) und deutsche Exzellenz-Universitäten auf Platz 30 (TU München mit 27 Publikationen) und auf Platz 42 (RWTH Aachen mit 22 Publikationen) liegen. Zum Teil übertreffen die chinesischen Autoren auch die Pro-Kopf-Anzahl an Publikationen diejenigen der USA (z.B. bei der Beschichtung von Flächen von Wärmeübertragern oder bei Platten-Wärmetauschern).

Fazit:

Damit bestätigt sich der schon in den Patenten abzeichnende Trend, dass die chinesische F&E-Community mittlerweile auch im Bereich des energieeffizienten Maschinen- und Anlagenbaus einen hohen Wissensstand in großer fachlicher Breite erreicht hat, wenngleich tiefergehende Analysen sicherlich wünschenswert wären. Zu erwarten ist damit, dass die chinesischen F&E-Autoren auch mit wachsenden Patentanmeldungen in Zukunft zunehmend in der Spitzengruppe bei den Patenten zu finden sein werden. Zweifellos stammen wichtige Impulse und Ressourcen für die Wissensakkumulation und Technologieentwicklung in China aus dem Ausland. Aber längerfristig besteht - auch angesichts der Pläne der chinesischen Regierung, bis Mitte dieses Jahrhunderts die globale Technologieführerschaft übernommen zu haben - die Gefahr, von chinesischen Akteuren verdrängt zu werden, die aus der Kombination von absorbiertem, ausländischem Wissen, staatlicher Protektion und Förderung sowie eigenem smartem Unternehmertum und einem sehr großen Binnenmarkt eine erhebliche Konkurrenzkraft auf den globalen Märkten entwickeln könnten [177].

Bei vielen europäischen Ländern sind es meist begrenzte Technikgebiete, auf die sich die jeweiligen Effizienz-Forscher spezialisiert haben. Dies wirft langfristig Fragen für die deutschen Maschinen- und Anlagenhersteller auf, wie sie ihre Innovations-Anstrengungen in der Breite erhalten oder/ und sich auf ausgewählte Gebiete energieeffizienter Techniken spezialisieren. Denn nicht selten haben die Autoren den Eindruck, dass die deutschen Maschinen- und Anlagenhersteller - aber auch die Anwenderbranchen - zu sehr von kurzfristigen Gewinninteressen geleitet sind (vgl. Abschnitt 2.10.2) und zu wenig von längerfristig orientierten innovativen Entwicklungen ihrer Produktpalette bzw. ihrer Produktionsanlagen.

Nach Aussagen von Gesprächspartnern aus dem Mittelmanagement hängt dies auch mit der Besetzung von Vorständen der Unternehmen mit Kaufleuten und Juristen zusammen, während Führungskräfte mit akademischem Hintergrund im Ingenieurwesen oder naturwissenschaftlichen Fachgebieten zunehmend häufig fehlen oder unzureichend im Vorstand vertreten sind. Nach Einschätzung von [178] birgt dies zunehmend die Gefahr des Verlustes spezifischer Vorteile der deutschen Industrie.

Weniger verbreitet ist das kurzfristige Gewinndenken üblicherweise bei den familiengeführten Unternehmen, was auch ein Anknüpfungspunkt für die F&E-politischen Überlegungen sein könnte. Dabei wird man natürlich unterscheiden müssen zwischen großtechnischen Lösungen (z.B. der Direktreduktion von

Roheisen oder der Herstellung von Zementklinker) oder kleinteiliger technischer Lösungen wie die verbesserten Oberflächen von Wärmeübertragern.

Insgesamt scheint sich aufgrund der Veränderungen bei den ersten Plätzen internationaler Publikationen abzuzeichnen, dass der Wettbewerb um innovative Energieeffizienz-Techniken sich länderspezifisch verbreitert (neuer sehr breit aufgestellter Player China in der Spitzengruppe einerseits und Spezialisierung auf bestimmte Effizienztechniken andererseits, darunter auch Süd-Korea, Indien, Iran und Saudi-Arabien). Dabei ist zu vermuten, dass durch die höhere Anzahl der aktiven Länder auch die deutschen Maschinen- und Anlagenhersteller unter Druck kommen, unabhängig von ihrer Patentanmelde- oder Publikationsstrategie (Intensivierung des Wettbewerbs). Hieraus resultieren Fragen, wie z.B.:

- Gibt es Branchen in der deutschen Industrie, in denen die Innovationsanstrengungen (F&E-Ausgaben) abnehmen und der Umsatz mit neuen Produkten pro Beschäftigtem sich vermindert? Wenn ja, aus welchen Gründen?
- Müsste eine zielorientierte (missions-orientierte) F&E-Politik angesichts der absehbar sich verschärfenden Wettbewerbssituation bei den energieeffizienten Lösungen verstärkt werden? (z.B. durch je ein Demonstrationsprojekt für jeden wichtigen Prozesstechnikbereich mit den neuesten technischen Erkenntnissen, insbesondere in der Grundstoffindustrie mit vorwiegend mittelständischer Struktur wie z.B. Gießereien, Ziegelindustrie, Glasindustrie?).

Hierauf sollten die deutschen Maschinen- und Anlagenhersteller und die Forschungspolitik der Bundesregierung Antworten haben.

Hinzu kommt die Frage der erfolgreichen Markteinführung neuer technischer Lösungen als letzter Schritt im Technikzyklus. Hier werden bloße Investitionsanreize nicht hinreichend sein; es geht um ein Bündel von Maßnahmen nicht nur seitens der Energieeffizienz- und Klimapolitik, sondern vieler Akteursgruppen des Innovations-systems einer neuen Energieeffizienz-Technik [179].

2.10.2. Zusammenfassende Beobachtungen aus energie- und industriepolitischer Sicht

Sowohl im Bereich der Forschung und Entwicklung (in den Phasen 2 bis 4 des Technikzyklus) als auch bei Markteintritt und -Diffusion (Phase 5 und 6) wurden von den Autoren erhebliche Hemmnisse beobachtet oder in den Workshops ausdrücklich von den Teilnehmern benannt, die das Innovationsgeschehen von energie-effizienten Techniken verlangsamen oder blockieren.

Hemmnisse in der F&E-Phase (*Technikzyklus-Phase 2 bis 4 - Enttäuschung - Re-Orientierung - Aufbau*)

Folgende Hemmnisse für das Aufgreifen von F&E-Ideen wurden seitens der Autoren in den letzten drei Jahren beobachtet bzw. von den Workshop-Teilnehmern oder Interview-Partnern genannt:

Das Aufgreifen von Verbesserungsinnovationen seitens der Anwenderunternehmen stößt auf folgende Situationen:

- Nicht wenige ingenieur- oder naturwissenschaftliche Lehrstühle widmen sich zunehmend Randgebieten im Bereich der Informatik, Mathematik oder deutlichen Randphänomenen des jeweiligen Wissenschaftsgebietes, sodass die wissenschaftlichen Mitarbeiter für "triviale" Verbesserungsinnovationen weder das Wissen, die Laboreinrichtungen noch das Interesse haben. Denn die wissenschafts-internen Belobigungsmechanismen (bei Dissertation, Habilitation) honorieren derartige anwendungs-orientierte Forschung und Entwicklung nicht mehr oder nur noch nachrangig.

- Auf der anderen Seite fehlen den - mehr anwendungsorientierten - Fachhochschulen oft die Forschungs-kapazitäten und das Forschungspersonal, was sie zum Teil durch Kooperation mit Unternehmen ausgleichen können. Ein hohes Vorlesungsdeputat der Lehrenden kann auch hemmend für die Forschungsaktivitäten an Fachhochschulen sein.
- Anregungen für Verbesserungsinnovationen seitens der Anwenderunternehmen - oftmals auch KMU - werden von den zuliefernden Hersteller-Unternehmen häufiger nicht aufgegriffen. Die Ursachen liegen in der guten Absatzsituation der Hersteller sowie ihrer Befürchtung, ihre Serienfertigung führe durch Differenzierung der Produkte in normal-effiziente und hocheffiziente Produkte zu Kostensteigerungen; oder sie schätzen die Entwicklungs- und Planungskosten zu hoch ein, um sie schultern zu wollen (kurzfristige Gewinne) oder zu können (scharfer bestehender Preiswettbewerb).
- Ingenieur- und Naturwissenschaftler scheuen sich häufiger in der Technikzyklusphase der Enttäuschung, sich den Kostenwettbewerb oder die technische Vorteilhaftigkeit gegenüber einer technischen Effizienz-alternative in den beabsichtigten Anwendungen vor Augen zu halten. Dieses Beharren lässt sich insbesondere im Bereich der institutionellen Forschungsförderung beobachten.
- Andererseits kann es sein, dass in der Phase der Re-Orientierung (Phase 4) die finanziellen Ressourcen bei einer Projektförderung nicht ausreichen und die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten "kurz vor dem Durchbruch" abgebrochen werden müssen, weil keiner der an dem F&E-Projekt Beteiligten hin-reichend finanzielle Ressourcen hat oder besorgen kann, um bis zum Markteintritt zu gelangen (u.a. auch wegen fehlendem Venture Capital, oder fehlendem Business Angel (nicht für Gründungen, sondern für neue Techniken)).
- Zuweilen mögen auch fehlende betriebliche Erfahrungen bei den Forschenden eine Rolle spielen, indem sie bestimmte Betriebsbedingungen wie Staub, korrosive Umgebung, ungewöhnliche Temperaturen, Erschütterungen, neu erforderliche Standard-Maße, fehlenden Raum oder hohe Produktqualitäts-gleichheit nicht hinreichend berücksichtigen.

Diese allgemeingültigen, übergreifenden Hemmnisse für die F&E-Phasen bei energieeffizienten Maschinen und Anlagen machen eine bewusstere F&E-Politik im Bereich der Energieeffizienz in der Industrie erforderlich, um das Innovationsgeschehen intensiv und fachlich breit zu halten [179]. Die industrielle Forschung profitiert auf dem Gebiet der energieeffizienten Maschinen und Anlagen von einem starken akademischen Forschungsstandort Deutschland durch Kooperationen, durch immer wieder zu aktualisierende Curricula bei der Ausbildung und durch Spill-over-Effekte aus der Forschung von Hochschulen, Fraunhofer-, AIF- und Helmholtz-Instituten.

Da es sich bei der industriellen Energieeffizienz-Forschung im Ergebnis um das Erreichen gesellschaftlich relevanter Ziele geht (Klimaschutz, geringere spezifische Energiekosten, Erhalt von Wettbewerbsfähigkeit und Exportstärke), erscheint eine *missionsorientierte Innovationspolitik* [180] zur Minimierung des Energiebedarfs in den Branchen der Industrie und Verfügbarkeit hochenergieeffizienter Lösungen für die Exportwirtschaft (inkl. produktbegleitender Dienstleistungen) das Gebot der Stunde - angesichts der hohen Reduktionsziele für die Treibhausgasemissionen für 2030 und 2045, der inzwischen hohen Energiepreise und des zunehmenden Wettbewerbs auf den internationalen Märkten energieeffizienter Lösungen).

Einige konkrete Hinweise seien hier gegeben:

- Langfristige Beteiligung an europäischen und internationalen Forschungsprojekten und -Kooperationen, dabei möglichst führende Rollen seitens deutscher Forschergruppen übernehmen;
- Die Förderung von ausgewählten disruptiven Innovationen durch die öffentliche Hand (z.B. Nanomembrantechnik substituiert thermische Trennverfahren; HT-Supraleitung substituiert Hochleistungs-Elektronetze; etc.) Wo hat sie Aussicht auf große Erfolge? (Bei der Direktreduktion für die Roh-eisenherstellung ist dies bereits Konsens). Sind die Rückflüsse in Form von Unternehmens-Gewinnen, Steuergeldern und gesamtwirtschaftlichen Nutzen bei disruptiven Innovationen wesentlich höher als bei inkrementellen Verbesserung-Innovationen?
- Entwicklung geeigneter Sektor- oder Regional-Innovationsförderpolitiken für risikoreiche, aber zukunftsorientierte Industriebereiche und deren Produktionstechniken. Damit würden Unternehmen – oft besonders KMU – ermutigt, ihre reduzierte oder suboptimale F&E-Tätigkeit wieder/weiter auszubauen.

Hemmnisse für die Marktdiffusion (*Technikzyklus-Phase 5 und 6 - Aufbau und Markt-Diffusion*)

Zunächst sei an das zentrale Hemmnis aller Energieeffizienzinvestitionen erinnert: gut 80 % der Unternehmen orientieren immer noch ihre Energieeffizienzinvestitionen an dem Risikomaß "Amortisationszeit" mit einer Erwartung des Kapitalrückflusses durch die Energiekosteneinsparungen binnen weniger als drei Jahre. Dies entspricht bei Lebensdauern von typischen Energieeffizienzinvestitionen von 10 und mehr Jahren einer internen Verzinsung von rd. 30 %, eine Rentabilität, die die meisten Unternehmen bei ihrer Gesamtrentabilität ihrer Geschäftstätigkeit bei weitem nicht erreichen.

Hintergründe dieser "Gewinn-verweigernden" Entscheidungsroutine sind, neben weiteren Aspekten, bei Aktien- und großen Kapitalgesellschaften die kurzfristigen Arbeitsverträge des Vorstands, die kurzfristig wirksamen Boni und die kurzfristigen Gewinnerwartungen der Aktionäre bzw. Kapitaleigner. Dieses zentrale Hemmnis, das bei etwa 80 % der Unternehmen in den OECD-Staaten anzutreffen ist, wird seit Jahrzehnten kritisiert [181], aber seitens der Politik, der Wirtschaftsverbände und der Fortbildungseinrichtungen kaum beachtet, als handle es sich um ein Tabu.

Neben diesem Zentralhemmnis für die Marktdiffusion energieeffizienter Lösungen gibt es die typischen Hemmnisse einer neuen, innovativen Energieeffizienztechnik:

- hohe spezifische Investitionen infolge (zunächst) relativ kleiner Serien bei innovativen Produkten, die die Rentabilität für die Anwender in Frage stellen,
- zu wenige Kenntnisse und Erfahrungen über die neuen Energieeffizienztechniken bei beratenden Ingenieuren, Installationsfirmen und Genehmigungsbehörden,
- zu wenige Kenntnisse bei den potenziellen Anwendern neuer Energieeffizienztechniken, so dass die betriebliche Situation zu Prozessveränderungen oft nicht aktiv nachgefragt wird. Wo erste Erfahrungen seitens der Anwender vorliegen, werden sie - aus Wettbewerbsgründen - kaum kommuniziert; oder die Verbände kümmern sich zu wenig um die Knowhow-Diffusion in ihrer Branche. In einigen Branchen (z.B. der Eisen- und Stahlindustrie oder der NE-Metallindustrie etc.) erfolgt im Gegensatz dazu eine sehr offene Kommunikation über neue Effizienztechniken, insbesondere dann, wenn nicht die Kernkompetenz der Unternehmen betroffen ist;
- zu wenig Kenntnisse und Kompetenz zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung bei den potenziellen Anwendern, insbesondere bei den nicht-energieintensiven Branchen.

- Außerdem: Die Dienstleistungen von Contractoren werden häufig nicht in Anspruch genommen, weil die Investition nach internationalen Bilanzierungsregeln in die Bilanz des Anwenders eingestellt werden muss und dadurch der Anteil des Eigenkapitals verschoben wird.

Aus diesen Hemmnissen resultieren *Maßnahmen für die Akteursgruppen des jeweiligen Innovationssystems*, um die Innovationsaktivitäten im Bereich energieeffizienter Lösungen zu halten oder zu steigern [179]:

- Die technischen Ausschüsse der jeweils anzusprechenden Branchenverbände, um über diesen Kanal die technischen Leiter und die Energiemanager der Betriebe der betroffenen Branche für die schnelle Informierung über die neuen energieeffizienten Lösungen zu erreichen (Technologische Wissensbasis auf breiter Front stärken und den Transfer beschleunigen!)
- Die energietechnischen Berater über die neuen Möglichkeiten unterrichten, die insbesondere für diese Branchen Energieeffizienzberatung und Audits sowie Energieeffizienznetzwerke bieten.
- Fortbildungseinrichtungen, die die energietechnischen Berater mit Angeboten zur beruflichen Fortbildung adressieren.
- Fachjournalisten der betroffenen Branchen, um in den Fachzeitschriften der betroffenen Branchen oder in übergreifenden Fachzeitschriften (z.B. BWK, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, VDI-Nachrichten, Energie & Management) zu berichten.
- Zugang zu hochqualifiziertem Personal über die Aus- und Fortbildungssysteme und Halten von guten ausländischen Studienabgängern in Deutschland (Effizienz des Bildungssystems erhöhen!).
- Entwicklung eines revolvingenden Risikofonds für Contractoren, der zunächst mit öffentlichem Geld gefüllt werden könnte.
- Für einige neue energieeffiziente Techniken ist es absehbar, dass die Nachfrage über geeignete Maßnahmen (z.B. spezielle Abschreibungen, spezifische Demonstratoren in einem Anwendungsbetrieb) angestoßen werden müsste oder Vorreiter-Unternehmen oder -märkte sehr nützlich wären.

Um die enormen Innovations- und Beschäftigungspotenziale neuer energieeffizienter Lösungen auszuschöpfen, ist es klug, am Standort Deutschland bestehende Schwächen abzubauen und vorhandene Stärken weiter zu pflegen oder zu erweitern. Punktuell ansetzende Maßnahmen (wie z.B. die Fokussierung auf Investitionsanreize) greifen hier zu kurz. Vielmehr ist ein »ganzheitliches systemisches Denken« erforderlich, das möglichst alle Akteursgruppen des jeweiligen Innovationssystems erfasst und möglichst zeitgleich aktiviert.

2.11. Energieeffizienz-Knowhow-Gefälle zwischen Branchen und Unternehmen

Zum Thema des Knowhow-Gefälles zwischen Branchen und Unternehmen wurde eine umfangliche Analyse durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Das vollständige Ergebnispapier befindet sich im Anhang.

Beobachtungen beratender Ingenieure und Auditoren zeigen, dass Wissen zu neuen technischen und methodisch-organisatorischen Energieeffizienz-Lösungen nicht gleichmäßig in alle Branchen, Unternehmen, Planungsbüros und Hersteller diffundiert. Diese Asymmetrie von Wissen und Erfahrungen zwischen Branchen, Unternehmen und Energiedienstleistern wird als Knowhow-Gefälle bezeichnet.

Im wesentlichen wurden neun Fälle identifiziert, welche in Tabelle 2-17 zusammenfassend dargestellt sind.

Summiert man die ungenutzten Effizienzpotenziale der neun beschriebenen Fälle, so liegt die Summe bei 55 bis 91 PJ pro Jahr oder 2 bis 3,5 % des gesamten Endenergie-Bedarfs der deutschen Industrie (vgl. Tabelle 2-17). Damit hat das Energieeffizienz-Knowhow-Gefälle eine energiewirtschaftliche und klimapolitische Bedeutung. Die Wirtschaftlichkeit ist meist hervorragend (zwischen >25 % bis < 80 % interne Verzinsung), manchmal mitbedingt durch bestehende Investitions-Förderprogramme.

Tabelle 2-17: Realisierbare Effizienz-Potenziale durch beschleunigten Knowhow-Transfer

Art des Energieeffizienz-Knowhow-Gefälles	Mögliches Effizienz-Potenzial durch beschleunigten Ausgleich in PJ/a
Leichtes Gehänge von Kettentransport-Anlagen (insbes. bei Öfen und Trocknern)	6 bis 15 PJ
Wärmedämmung von Industriehallen-Dächern durch Isolierschaum-Spritzen	8 PJ
Verschattung von Dächern von Industriehallen durch Solarkollektorflächen	2 PJ
Pinch-Methode auf alle geeigneten Prozesse und Branchen ausgeweitet	10 - 20 PJ
Energie-Scouts für alle Azubis in Industrie und Gewerbe durch alle IHKs	25 - 40 PJ
Verstärkte Wärmedämmung von Industrieöfen mit Temperaturbereichen bis zu 550°C	0,07 - 0,2 PJ
Wärmerückgewinnung bei Kleinstanlagen zur thermischen Nachverbrennung	3 PJ
Kühl-, Kälte-, Wärmepumpentechnik – Monitoring und Regelung	0,3 - 3 PJ
Summe	55 bis 91 PJ/a

Soweit es sich hier bei den Effizienz-Knowhow-Gefällen um organisatorische oder klein-investive Maßnahmen handelt, könnte man sehr schnell die damit verbundenen Energieeffizienz-Potenziale heben (vgl. Abschnitt 2.11.1).

Die Gründe für dieses Effizienz-Knowhow-Gefälle sind vielfältig: Spezialisierung von Investitionsgüter-Herstellern und energietechnischen Beratern auf Branchen und Prozesse, mangelnde Bereitschaft von Herstellern zur Produkt-Innovation und -Differenzierung, enge Fachausbildung der Ingenieure mit zu wenig Anknüpfungs-Kompetenz zu anderen Disziplinen und fehlende Fortbildungsangebote für neue Effizienz-Techniken. Entscheidend für die Einebnung der Effizienz-Knowhow-Gefälle ist eine für die jeweils betroffenen Zielgruppen entwickeltes Maßnahmen-Portfolio. Dies wird im Folgenden kurz erläutert (vgl. Abschnitt 2.11.1).

2.11.1. Handlungsempfehlungen

Empfehlungen zur Überwindung oder Vermeidung von Energieeffizienz-Knowhow-Gefälle zwischen Branchen müssen eine Antwort geben auf die zahlreichen Hemmnisse, die derartige Gefälle verursachen können. Auch sind dabei verschiedene Akteursgruppen (des Innovationssystems) zu adressieren:

an die Bundesregierung, auch Landesregierungen

- vorhandene und eventuell entstehende Knowhow-Gefälle sollten durch geeignete Formen der Befragung und Erhebung bei beratenden Ingenieur:innen und innovativen Unternehmen (z.B. durch die Bundesstelle für Energieeffizienz, BFEE) identifiziert und beobachtet werden.
- Curricula für die Fortbildung energietechnischer Berater und Energiemanager in den als asymmetrisch identifizierten Themenbereichen "neue Energieeffizienz-Lösungen" und "Wirtschaftlichkeitsbewertung" sollten entwickelt und den Fortbildungsinstitutionen, Hochschulen und Energie-Agenturen zur Verfügung gestellt werden.
- Für Beraterlisten der dena und des BAFA wäre auch die Nennung der speziellen Fachgebiete und -Techniken im Industrie-Kontext wichtig, um die Transparenz für die Unternehmen deutlich zu erhöhen und Enttäuschungen bei den Ratsuchenden zu vermeiden.

an die Investitionsgüter-Industrie, die Anwenderbranchen und ihre Verbände

- Die Verbände der Investitionsgüter-Hersteller und der Beratungswirtschaft sollten das Thema des Knowhow-Gefälles aufgreifen und in ihren technischen Ausschüssen und ihren Fachzeitschriften ansprechen als ungenutzte Chancen zur Markt- und Umsatzerweiterung sowie Skaleneffekte und Image als Technologie-Unternehmen (bzw. exzellentes Ingenieur-Büro).
- Die Verbände der Energieanwender sollten auf qualifizierte Fortbildungsangebote drängen und hinweisen, um auf diese Weise nicht nur das Knowhow bei ihren Mitgliedsunternehmen durch berufliche Fortbildung zu vergrößern. Vielmehr sollte auch eine entsprechende Nachfrage bei den Investitionsgüter-Herstellern und ihren energietechnischen Beratern erreicht werden. Hauptargument müsste sein: "ungenutzte Chancen zur Verminderung der Energiekosten und Erhöhung von betrieblichen Begleitnutzen".

an die beruflichen Aus- und Fortbildungsträger sowie Energieeffizienz-Netzwerkträger und Energie-Agenturen

- Die technischen Universitäten und Hochschulen sollten ihre Studiengänge überprüfen, inwieweit durch Masterstudiengänge und Aufbau-Studiengänge die engen fachlichen Grenzen der klassischen Ingenieur-Ausbildung durch Entwicklung von Ankopplungs-Kompetenzen an wichtige Fachdisziplinen erweitert werden könnten, ohne den erforderlichen Tiefgang in den einzelnen Fachbereichen aufzugeben.
- Die Fortbildungsträger für energietechnische Berater und Energiemanager sollten sowohl die Inhalte der Knowhow-Gefälle-Themen an entsprechende Zielgruppen anbieten als auch neue Fortbildungsformate (Webinare, Praxis-Projekte, Energieeffizienz-Netzwerke) entwickeln.
- Die Träger von Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerken und Energie-Agenturen sollten das Thema des Effizienz-Knowhow-Gefälles genau kennen und bei Beobachtung derartiger Gefälle die inhaltliche Unterstützung anbieten.
- energietechnischen Berater das Thema für eines der Treffen vorzusehen.

an die Fachmedien

- die allgemeinen Fachmedien (z.B. VDI-Nachrichten, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Energie & Management, BWK etc.) sollten dieses Thema in seiner Breite aufgreifen, um ein erstes Bewusstsein für diese Thematik und ihre Chancen für alle Beteiligten zu erzeugen. Bei den einzelnen identifizierten Knowhow-Gefällen sind Veröffentlichungen in entsprechenden Branchen- und Technik-Fachjournalen sehr wichtig.

2.12. Dialogprozess Wärme

Im Rahmen der Projektarbeit wurde das Konsortium gebeten zum Dialogpapier „Klimaneutrale Wärme“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) eine Stellungnahme zu verfassen [182]. Diese ist in Gänze dem Anhang zu entnehmen.

Das Dialogpapier „Klimaneutrale Wärme“ des BMWi berichtet sowohl über den aktuellen Stand der Wärmeversorgung in Deutschland als auch über aktuelle und zukünftige denkbare Entwicklungen mit dem Ziel der klimaneutralen Wärmeversorgung 2050.

Eine kurzgefasste strategische und sektorenübergreifende Betrachtung der Wärmenutzung und -versorgung sowie deren Zukunftsperspektiven lässt sich in zwei große Bereiche unterteilen (vgl. Abbildung 1):

- Der Gebäudebereich (Raumwärme, Warmwasser und Klimakälte) benötigt Wärme in einem sehr engen Temperaturbereich (bis ca. 90°C) mit wenigen Wärmeträgern (z.B. Wasser, Luft, Kältemittel). Der Endenergieeinsatz für die Raumwärme in den privaten Haushalten, in den Dienstleistungsbereichen und in der Industrie beträgt insgesamt rd. 660 TWh pro Jahr (linker Balken in Abbildung 1).
- Der Bereich der industriellen und gewerblichen Prozesswärme ist dagegen sehr vielfältig: die Produktionsprozesse haben Temperaturen zwischen 50°C und 2.200°C; teilweise wird Abwärme zurückgewonnen zur Nutzung für Wärmeprozesse oder für die Strom- oder Kälteerzeugung. Für die Wärmeerzeugung kommen sehr verschiedene Wärme- und Energieträger zum Einsatz, deren Wahl von Anforderungen des Produktionsprozesses, dessen Sicherheit sowie der Produktqualität abhängt.

Der Endenergiebedarf für die industrielle Prozesswärme beträgt rund 530 TWh pro Jahr (davon 85 % Brennstoffe, 9,5 % Strom und 5,5 % erneuerbare Energien). Der Prozesswärmebedarf von Industrie und Gewerbe liegt somit in der gleichen Größenordnung wie die Raumwärme für Gebäude, verteilt sich aber technisch auf sehr unterschiedliche Temperaturniveaus.

Die Vielfalt der industriellen Wärmeprozesse eröffnet bei ihrer Dekarbonisierung auch Chancen für kostengünstigere Produktionsstrukturen und für die exportorientierten Investitionsgüter-Branchen. Denn durch Vernetzung von Forschung und Unternehmen (bspw. über die bestehenden Forschungsnetzwerke) entstehen neue Prozesse mit geringerem Wärmebedarf und zuweilen auch niedrigerem Temperaturniveau. Um diese Potenziale zu erschließen, bedarf es Forschung und Entwicklung konkreter energieeffizienter Lösungen und angepasste Rahmenbedingungen für deren Marktdiffusion:

- Neue Effizienztechniken erfordern inhaltliche Ergänzungen bei der Aus- und beruflichen Fortbildung.
- Neue Effizienztechniken können auf rechtliche Hemmnisse stoßen, weil die Rechtssetzung verständlicherweise stets an neue Situationen angepasst werden muss.
- Wenn rentable Chancen effizienter Nutzung von Prozesswärme - und damit ihr Beitrag zu verminderten energiebedingter CO₂-Emissionen - wenig beachtet und genutzt werden, besteht das

Risiko, dass kostenintensive Alternativen der Wärmeerzeugung verfolgt werden (z.B. Wasserstoff zur Wärmeerzeugung); dann bedarf es der energiewirtschaftlichen Reflexion aus gesamtwirtschaftlicher Sicht.

- In der Prozessindustrie besteht die Gefahr von Lock-in-Effekten: Durch lange Anlagenlaufzeiten (> 40 Jahre) legen heutige Investitionsentscheidungen CO₂-Emissionen für lange Zeiträume fest. Für Unternehmen in diesem Bereich sollte es Anreize oder ordnungspolitische Maßnahmen geben, rechtzeitig in CO₂-arme oder -freie Prozesstechniken zu investieren.

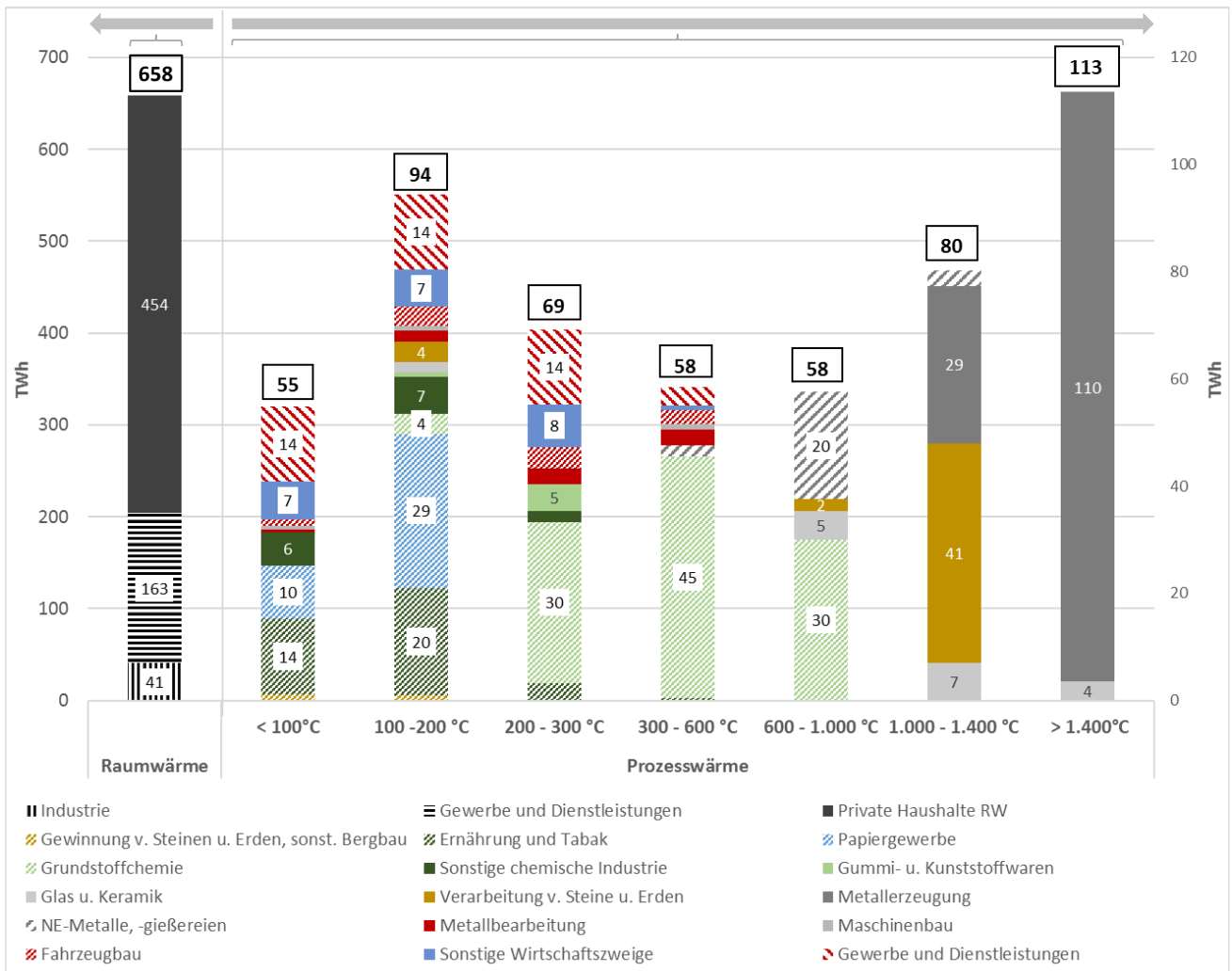


Abbildung 2-52: Endenergieeinsatz für Raumwärme aller Sektoren und für Prozesswärme von Industrie und Gewerbe nach Temperaturniveaus für 2019 [175], [183], [184]

Die seitens der Bundesregierung in den vergangenen 10 Jahren geförderten Energieeffizienz-Techniken in Industrie und Gewerbe haben jeweils kleine, aber in der Summe erhebliche Wärme- und CO₂-Minderungspotenziale: durch Substitution von wärmeintensiven Prozessen (z.B. thermische Trennverfahren und Nachverbrennung), sowie durch die Nutzung von Abwärme (Hochtemperatur-Wärmepumpen, ORC-Technik oder Latentwärmespeicher) und durch verlustarme Hochtemperatur-Supraleitung (verlegt in Essen, geplant in München).

2.13. Stellungnahme zur rationalen Anwendung von Wasserstoff

In der öffentlichen Debatte, insbesondere auch im politischen Raum, gibt es derzeit widerstreitende Auffassungen über die Relevanz und die Rolle von klimaneutral produziertem Wasserstoff in einem zukünftigen Energiesystem. Teilweise ist von Wasserstoff als dem „Champagner der Energiewende“ die Rede, andere Akteure sprechen vom „Mineralwasser der Energiewende“.

Im Rahmen von EE4InG wurde eine kurze Stellungnahme zum Thema rationale Anwendung von Wasserstoff in den Nachfragesektoren verfasst, um einerseits aufzuzeigen, wo eine Nutzung von grünem Wasserstoff mehr oder weniger prioritär ist. Zum anderen sollte die Stellungnahmen insbesondere für den Industriesektor genauer darstellen, wo Wasserstoff unverzichtbar ist, wo er klar keine besondere Relevanz haben wird, und wo eine solche Einschätzung derzeit noch schwierig erscheint.

Im Folgenden wird die Kurzzusammenfassung und das Fazit aus der Stellungnahme im Anhang wiedergegeben. Darüber hinaus zeigt Abbildung auf einen Blick die Differenzierung bzgl. einer priorisierten Anwendung von Wasserstoff, wie sie in der Kürze der Erarbeitungszeit vorgenommen werden konnte.

Wasserstoff erforderlich / sinnvoll?	Industrie	Verkehr	Gebäude
Alternativlos / Unumstritten	<ul style="list-style-type: none"> • Primärstahl: Reaktionsmittel • Chemie: stoffliche Nutzung (Ammoniak, Methanol, SynFuels ...) • Raffinerien: Hydrierung, Entschwefelung, Hydrocracker... 	<ul style="list-style-type: none"> • Luftverkehr (Langstrecke) • Schiffsverkehr (Langstrecke) <p>--> SynFuels oder Ammoniak</p>	
Unsicher / Analysebedarf	<ul style="list-style-type: none"> • Industrielle Hochtemperaturwärme (Industrieöfen, Brenner, Feuerungsanlagen, ...): Konkurrenz zu direktelektrischen Verfahren / Hochtemperatur-WP 	<ul style="list-style-type: none"> • Luftverkehr (Kurzstrecke) • Schiffsverkehr (Kurzstrecke) • Schienenverkehr (Konkurrenz zu Elektrifizierung bei geringer Nutzungsintensität) • Nutzfahrzeuge (LKW, Busse), Konkurrenz zur Elektrifizierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Evtl. vereinzelt für residuale Wärmelast (nicht über Abwärmern und Umgebungswärmen abdeckbar) für Fernwärme
Nicht erforderlich / Nicht Prioritär	<ul style="list-style-type: none"> • Niedertemperaturwärme-Anwendungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Individuelle Mobilität /Kfz 	<ul style="list-style-type: none"> • Niedertemperatur-Gebäudewärme: vorteilhaftere Optionen vorhanden (Wärmepumpe, Solarthermie, Fernwärme, ...)

Abbildung 2-53: Differenzierte Einschätzung der erforderlichen Nutzung von Wasserstoff in den Nachfragesektoren

Kurzzusammenfassung und Fazit

Als zentrales Ergebnis der vorliegenden, knappen Untersuchung potenzieller Anwendungsfälle für Wasserstoff in den Nachfragesektoren lässt sich festhalten, dass eine detaillierte und differenzierte Betrachtung von Anwendungsfällen zwingend erforderlich ist, um sinnvolle Entscheidungen hinsichtlich des Wasserstoffeinsatzes sowie entsprechender politischer Maßnahmen (auch bzgl. Forschungsförderung) treffen zu können. Pauschalisierte, verkürzende und vereinfachende Schlussfolgerungen sind vor dem Hintergrund der anstehenden kapitalintensiven Transformation der deutschen Wirtschaft hin zur Klimaneutralität mit Blick auf mögliche Lock-In Effekte durch frühzeitige Fehlentscheidungen wo immer möglich zu vermeiden.

Da die Anwendung von Wasserstoff immer mindestens einen Umwandlungsschritt (von Strom zu Wasserstoff), ggf. auch mehrere (CCU, Plattformchemikalien), erfordert, geht diese grundsätzlich mit einem

energetischen Mehraufwand ggü. der direkten Nutzung von elektrischem Strom für die Dekarbonisierung einher. Dort, wo eine direkte Elektrifizierung von bisher auf fossilen Brennstoffen basierenden Energieanwendungen technologisch bzw. verfahrenstechnisch möglich und potenziell wirtschaftlich darstellbar ist, wird diese in der Regel vorzuziehen sein. Eine pauschale Nutzung von Wasserstoff in allen erdenklichen Anwendungsfeldern, die grundsätzlich Wasserstoff nutzen könnten, würde daher zu erheblichen Ineffizienzen und zu einem deutlich höheren gesamtwirtschaftlichen Strombedarf (und/oder Wasserstoffimportbedarf) führen, mit entsprechenden Mehraufwänden insbesondere bei der Netzinfrastruktur.

Insbesondere in dem anwendungs- und technologieseitig sehr heterogenen Feld der Bereitstellung von industrieller Prozesswärme (Industrieöfen, Brenner und Feuerungsanlagen), vor allem in den energieintensiven Hochtemperaturprozessen der Grundstoffindustrien, bestehen noch erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Notwendigkeit der Anwendung von Wasserstoff einerseits und der verfahrenstechnisch / technologischen Verfügbarkeit bzw. Umsetzbarkeit direktelektrischer Alternativen für den Ersatz fossiler Brennstoffe.

Hier sehen die Autoren auch einen wichtigen Ansatzpunkt für eine thematische Weiterentwicklung des Forschungsnetzwerkes Energie in Industrie und Gewerbe bzw. für die Suche nach möglichen neuen Schwerpunkten für die Forschungsförderungspolitik. Denn nicht nur bestehen erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Frage direkte Elektrifizierung vs. Nutzung von Wasserstoff; die Nutzung von Wasserstoff als Brennstoff und absehbar teures Substitut für Erdgas kann auch die Relevanz von Energieeffizienzmaßnahmen, insbesondere bzgl. der Nutzung von Abwärmeströmen, wieder in den Vordergrund rücken. Denn die Reduktion des Brennstoffbedarfs für Prozesswärmeanwendungen durch innovative Abwärmennutzungstechnologien könnte bei einer Nutzung von Wasserstoff als Brennstoff (relativ zu Erdgas) eher rentabel sein.

In manchen spezifischen Produktionsprozessen der Grundstoffindustrien wird die Nutzung von Wasserstoff künftig unumgänglich sein, um die angestrebte Dekarbonisierung des Energiesystems zu erreichen. Dies betrifft insbesondere die Stahlindustrie (Primärstahlherstellung, Wasserstoff als Reduktionsmittel) sowie die Grundstoffchemie (stoffliche Nutzung von Wasserstoff für Plattformchemikalien, Ersatz von grauem Wasserstoff aus der Dampfreformierung, Kreislaufführung von Kohlenstoff). Für die Eisenerzreduktion gibt es keine absehbare verfahrenstechnische Alternative, die ohne ein Reduktionsmittel auskäme. Siehe hierzu auch die Darstellung in Abschnitt 2.5.2. In der Grundstoffchemie ergibt sich die Notwendigkeit des Einsatzes von Wasserstoff direkt aus dem stofflichen Bedarf. In der Petrochemie werden bereits heute erhebliche Wasserstoffmengen benötigt.

In der industriellen Fertigungstechnik kommt Wasserstoff bereits heute zum Einsatz, insbesondere in der Elektroindustrie ist Wasserstoff relevant. Konkret wird Wasserstoff hier beispielsweise zum Glühen z.B. von Silizium-Wafern, sowie als Reduktions- und Hilfsmittel in materialbezogenen Verfahren (z.B. Epitaxie) eingesetzt werden.

Für den Gebäudesektor kann das klare Fazit gezogen werden, dass derzeit keine sinnhafte prioritäre Anwendung von Wasserstoff gesehen wird. Für die vier in der Stellungnahme dargestellten Nutzungspfade gibt es jeweils wirtschaftlichere und energetisch effizientere Optionen, insbesondere Wärmepumpen und verschiedenste Lösungen zur Bereitstellung einer klimaneutralen Fernwärmeversorgung.

Im Mobilitätsbereich zeigt sich ein differenziertes Bild. Für den Individualverkehr lässt sich recht sicher sagen, dass, aufgrund der bereits angesprochenen Umwandlungsverluste, die direkte Nutzung erneuerbaren Stroms (Elektromobilität) klar effizienter ist als die Nutzung von Wasserstoff. Eine mögliche Rolle könnte Wasserstoff (und kohlenstoffhaltige Derivate) jedoch dort haben, wo eine hohe Reichweite und/oder eine hohe Energiedichte erforderlich ist. Dies sind der Schwerlastverkehr, sowie der Flug- und Schiffsverkehr.

Die Autoren möchten auch betonen, dass zukünftige Wasserstoffanwendungen und Maßnahmen zur Energieeffizienz nicht in Konkurrenz, sondern komplementär zueinander verstanden und betrachtet werden sollten. Eine möglichst effiziente Anwendung von Strom (Direktelektrifizierung) und grünem Wasserstoff (indirekte Elektrifizierung), forciert durch eine vorausschauende Forschungsförderungspolitik, vereinfacht die Transformation, da bei hoher Energieeffizienz der innovativen Energieanwendungen der ohnehin erforderliche enorme Kapazitäts- und Infrastrukturaufbau auf das absolut notwendige Maß beschränkt werden kann, und somit sowohl einzelwirtschaftliche als auch gesamtwirtschaftliche Kostenvorteile erzielt werden können.

3. Voraussichtlicher Nutzen der Arbeitsergebnisse

Ein wesentlicher Aspekt für die erfolgreiche Durchführung des Projekts ist die Öffentlichkeitsarbeit, um die relevanten Personengruppen für die inhaltlichen Workshops zu gewinnen. Um diese Personengruppen auf die Arbeiten im Projekt aufmerksam zu machen, wurde eine optisch ansprechende Webseite sowie ein Flyer für Messebesuche erstellt. Auf der Website des Projektes sind die durchgeführten Analysen und Stellungnahmen für jeden zugänglich zu finden.

Durch das Projekt EE4InG konnten zahlreiche neue Kontakte in die Wirtschaft. Im Bereich der Additiven Fertigung hat das Projekt bereits erste Ideen für ein neues Projekt hervorgebracht, die mit potenziellen Industriepartnern zurzeit diskutiert werden. Weiterhin konnte das erworbene Wissen im Bereich „Energiebedarf der modernen Produktionsinfrastruktur“ bereits jetzt in das Beratungs- und Schulungsprogramm des PTWs überführt werden.

Ein Ziel des Projekts EE4InG ist der Ausbau bestehender sowie der Aufbau neuer Kooperationen im Themenfeld Energieeffizienz mit der Intention, weitere Forschungsprojekte mit interessierten Partnern und zu folgerichtigen Forschungsfragestellungen zu lancieren. Hier konnten durch das Projekt neue Kontakte zu Unternehmen der Pulverherstellung für die Additive Fertigung und der Kunststofftechnik sowie zum Arbeitskreis Abwärmenutzung geknüpft werden. Auf Basis des im Projekt aufgebauten Knowhows zeichnen sich neue Ideen für Nachfolgeprojekte ab. Basierend auf den Erkenntnissen soll 2022 ein neues Forschungsprojekt platziert werden, welches insbesondere die wissenschaftliche Weiterentwicklung der Ergebnisse vorantreibt. Hier ist bspw. die Entwicklung technologischer Lösungen und Methoden zur Hebung identifizierter Energieeffizienzpotenziale denkbar.

Die Gründer der ETA-Solutions GmbH haben mit dem Produkt der Energiesystemplanung einen innovativen Beratungsansatz für die Industrie entwickelt. Hiermit wurde gleichzeitig die intensive Auseinandersetzung mit einer Vielzahl von Einzeltechnologien notwendig, die im Rahmen von einzelnen Modellen abgebildet wurden. Dieses umfassende und tiefgreifende technische Know-how bietet eine hervorragende Möglichkeit der wissenschaftlichen Vernetzung sowie Bewertung potenzieller Forschungsbedarfe. Die erzielten Ergebnisse werden grundsätzlich auf die Eignung bezüglich einer Schutzrechtsanmeldung

geprüft. Außerdem sollen die Erkenntnisse bis 2023 in einen erweiterten Energiesystemplanungsansatz überführt werden.

Insbesondere in den Bereichen Kältetechnik und Kunststofftechnik konnte in diesem Kontext ein Zugewinn an wissenschaftlichen Erkenntnissen erreicht werden. Dieser wird dazu beitragen, dass das Konzept der Energiesystemplanung innerhalb der nächsten drei Jahre branchenspezifisch weiterentwickelt werden kann. Darüber hinaus können neue Perspektiven auf Technologieentwicklungsbedarfe geschaffen werden, die im Kundengespräch sowie im Dialog mit Komponenten- und Maschinenherstellern eingebracht werden können. Mithilfe des Begleitforschungsprojekts soll somit das wissenschaftliche Profil der ETA-Solutions GmbH weiter geschärft werden, um dem vielseitigen Kundenkreis bestehend aus Akteuren mit eigener Produktion, Technologieanbietern, Planern und Architekten sowie Maschinenherstellern und Entscheidern in der öffentlichen Verwaltung und Politik anzusprechen. Bis 2023 sollen so die gewonnenen Erkenntnisse in ein erweitertes Dienstleistungsangebot zur Energiesystemplanung überführt werden. Auch der Branchenblick über die Fertigungstechnik hinaus trägt zur wissenschaftlichen Weiterentwicklung der Energiesystemplanung bei. Somit kann das zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprofil weiter geschärft und zielgerichtet fortgeschrieben werden.

Adressaten der Energiesystemplanung sind hierbei Akteure mit eigener Produktion, darüber hinaus jedoch auch Technologieanbieter, Planer und Architekten sowie Maschinenhersteller. Basierend auf den Erkenntnissen soll bis 2022 die Partizipation an einem weiteren Forschungsprojekt angestrebt werden, welches insbesondere die Weiterentwicklung der Ergebnisse vorantreibt. Hier ist die Entwicklung einer Softwarelösung (APP) angedacht, welche die Industrie unterstützt die erkannten Energieeffizienzpotenziale zu quantifizieren.

Die Arbeiten in den beiden Forschungsfeldern „Eisen-/Stahlherstellung“ sowie „Abwärmennutzung“ als auch die erneute Anwendung vorhandener Methoden (insbesondere der Patent- und Publikationsanalysen) und Weiterentwicklung der Risikoanalysen nach Phasen des Technikzyklus dienen auch der weiteren wissenschaftlichen Profilbildung der beteiligten Mitarbeiter des IREES und somit der Akquise und Qualitätsverbesserung zukünftiger Forschungsbegleit-Projekte in diesen und vergleichbaren FuE-Bereichen.

Die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit für das IREES selbst ist zum einen durch die Nutzung des erzielten Kenntnissgewinns bzgl. der betrachteten Technologien und Branchen für weitere Projekte des IREES, beispielsweise in der wissenschaftlichen Politikberatung, gegeben. Zum anderen dienen die Vernetzungsaktivitäten neben dem eigentlichen Projektzweck auch der besseren Sichtbarkeit des IREES in den jeweiligen fachlichen Netzwerken und somit auch der besseren Diffusion anderer wissenschaftlicher Arbeiten des IREES. Schließlich werden zwei FuE-Projekte in ihrer Initiierung mit Anwender- und Hersteller-Unternehmen sowie Forschungsinstituten im Bereich der Abwärme verfolgt.

Seitens der Akteure in der Stahlindustrie kann davon ausgegangen werden, dass die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit der in diesem Vorhaben bislang und im weiteren Verlauf zu erarbeitenden Ergebnisse aus ureigenem Interesse gegeben ist. An den Forschungstätigkeiten der Stahlunternehmen im Hinblick auf die Rohstahlerzeugung zeigt sich, dass die zwangsläufigen Konsequenzen der Klimapolitik (mangelnde Zukunftsfähigkeit des Hochofens als zentraler Prozesstechnologie der Stahlherstellung) zunehmend wahrgenommen werden.

Die Ergebnisse des Vorhabens werden durch die erstellten Analysen und Beiträge für industrielle Entscheidungsvorgänge zur Verfügung gestellt. Zudem können die erlangten Erkenntnisse für die Ausrichtung von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Industrie und Akademia genutzt werden. An den untersuchten Themen dieses Vorhabens besteht ein großes Interesse, welches sich durch die zahlreiche Beteiligung von Industrievertretern an Workshops und Fachgesprächen zeigte.

Dabei erfolgten neben dem Informationsaustausch auch Vernetzungen für Folgeaktivitäten. Die Ergebnisse des Vorhabens werden daher durch industrielle Akteure rezipiert und damit in eine wirtschaftliche Verwendung überführt. Insbesondere die Erkenntnis zur Additiven Fertigung im Anlagen- und Reaktorbau, in der Katalysatorforschung als auch zur Circular Economy in Verbindung mit dem Schließen des anthropogenen Kohlenstoffkreislaufs werden Arbeiten am KIT kurzfristig weiter voranbringen. Die Projekt-Ergebnisse/-Arbeit ermöglichen mittelfristig die Vertiefung von Wissen zur Kompetenzerhaltung/Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit. Die Arbeiten erleichtern mittelfristig die Einwerbung von Drittmitteln und die damit verbundene Einbindung der Industrie. Im Rahmen der Auftritte des KIT und des KIT-Zentrum Energie werden die erzielten Ergebnisse auf Messen (z.B. Hannover Messe) mittelfristig präsentiert. Zudem stellen die erarbeiteten Erkenntnisse eine wichtige Grundlage für Argumentationen im Bereich der Energie- und Ressourceneffizienz dar. Dieses Knowhow soll in gegenwärtige und zukünftige Vorhaben eingebracht werden und ermöglicht damit die Initiierung weiterer Forschungsvorhaben.

Die Forschungstätigkeiten wurden – und werden auch im Laufe des Jahres 2022 – durch Publikationen und Vorträge präsentiert. Dabei konnte das Interesse von industriellen Anwendern geweckt werden. Dies führte zu einem aktiven Austausch in Workshops und Fachgesprächen. Die dabei etablierte Vernetzung wurde durch Teilnehmer als wichtige Errungenschaft wahrgenommen und sollte fortgeführt werden. Hierdurch können die bereits identifizierten wissenschaftlichen Fragestellungen in Forschungsprojekte überführt werden. Auch konzertierte Perspektiventwicklungen und Technologieempfehlungen sind hierdurch denkbar.

4. Veröffentlichung der Ergebnisse

4.1. Wissenschaftliche Veröffentlichungen

- B. Schäfer, J. Sauer, *Trends der chemischen Prozessindustrie*, Chem. Ing. Tech. 2020, 92, No. 3, 183–191, DOI:10.1002/cite.201900178, Eingegangen: 29.11.2019; akzeptiert: 14.01.2020, Issue Online: 21.02.2020.
- Haltenort, P., Lösch, O., Schäfer, B., Sauer, J.; *Energieeffizienz in der Prozessindustrie – Technologieoptionen des Forschungsnetzwerks Energie in Industrie und Gewerbe*, Chemie Ingenieur Technik, 92 (9), 1268, 2020, ISSN: 0009-286X.
- Schäfer, B., Toro Chacón, F. A., Brinkmann, T., Drews, A., Jochem, E., Sauer, J., Fachartikel „Bewertung von Energieeffizienz-Technologien mit der Methodik EDUAR&D an zwei Beispielen“, Chemie Ingenieur Technik (CIT), Article ID: CITE3675, Article DOI: 10.1002/cite.202000251, publiziert: 13.05.2021

4.2. Teilnahme an Tagungen, Messen o.Ä

- Kuratoriumstreffen Fertigungstechnik, Frankfurt, 13.03.2019
- Teilnahme an dem Workshop „Policy Day: Transition to fossil-free basic industries: technology pathways and policy“, Brüssel, 18.03.2019
- Unternehmensbesuch Kunststofftechnik Hahn, 04.04.2019
- Besuch der DENEFF-Jahresauftaktkonferenz 2019, Berlin, 10.04.2019
- Treffen des AWT Fachausschuss 16 – Nachhaltigkeit und Effizienz, Essen, 16.05.2019
- Auf Einladung des BMU Teilnahme des IREES an einem Workshop zur Vorstellung und Diskussion des Konzepts des derzeit im Aufbau befindlichen „Kompetenzzentrums Klimaschutz in der energieintensiven Industrie (KEI)“, Cottbus, 28.05.2019
- Workshop zur Erstellung eines Standpunktapiers: Digitalisierung elektrochemischer Prozesse (InnoEMat – Innovative Elektrochemie mit neuen Materialien), Frankfurt, 28.05.2019
- Teilnahme an der Konferenz ECEEE, Juni 2019
- Vortrag auf dem 7. Workshop des LVI-Energieeffizienz-Netzwerkes, Karlsruhe, 05.06.2019
- 17th International Conference on Carbon Dioxide Utilization - ICCDU 2019, Aachen, 23. Bis 27.06.2019
- 3. FORUM Chemie 4.0 - Ressourceneffizienz durch Digitalisierung in der Prozessindustrie, Veranstalter von Chemie-Verbände BW, Thinktank Industrielle Ressourcenstrategien, KIT und UM BW, Karlsruhe, 18.09.2019
- Vortrag EE4InG – auf dem Herbsttreffen des ProcessNet-Lenkungsausschusses, dem Kuratorium des Forschungsfeldes chemische Verfahrenstechnik, Projektvorstellung, Vorbereitung der Telefoninterviews mit den Experten aus den Fachgemeinschaften bzgl. spezifischer Energieeffizienztechnologie sowie einer anschließenden Validierung beim nächsten Treffen, 26.09.2019
- KEEN-Ergebnisworkshop der Wettbewerbsphase: Künstliche-Intelligenz-Inkubator-Labore in der Prozessindustrie, Vorbereitung eines großen Verbundprojekts mit Schwerpunkten: KI-basierte Modellierung, KI-basiertes Engineering, KI-basierte Optimierung; DECHEMA-Haus, Frankfurt, 14.10.2019
- Teilnahme an der K-Messe (führende Brancheleitmesse für Kunststofftechnik), 18.10.2019
- Forschungsfeldtreffen Hochtemperatursupraleitung, Miltenberg bei der Oswald Motorenfabrik, Schwerpunktthema: Zuverlässige und bezahlbare Kryo- und Kältetechnik, 23.10.2019
- Teilnahme an der Konferenz „Wasserstoff und Energiewende – Stakeholder-Konferenz zur nationalen Wasserstoffstrategie“, Berlin, November 2019
- PAAT: Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaften "Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik" unterstützt von „Sustainable Production, Energy and Resources“, Dortmund, 4. und 05.11.2019
- Durchführung Fachgespräch Kühl- und Kältetechnik, Darmstadt, 27.11.2019
- Gespräch mit der Fa. Riegler (mittelständischer Kunststoffverarbeiter), 18.02.2020
- Kongress "Herausforderungen 2020 für Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik, Darmstadt, 18.02.2020
- Forum Thermische Speicher, Dresden, 03.03.2020
- Ziehl-Konferenz, Berlin, Zukunft und Innovation in der Energietechnik mit Hochtemperatursupraleitern (Präsenzveranstaltung), 05. und 06.03.2020

- Energie-Kolloquium "Wasserstoff in der Grundstoffindustrie" im DECHEMA-Haus, 12.03.2020 (Präsenzveranstaltung)
- Onlinesymposium – Additive Manufacturing for Process Engineering, Institute for Micro Process Engineering (IMVT), KIT, Teil 1, 17.06.2020, Teil 2, 24.06.2020
- Teilnahme Konferenz ECEEE Industrial Efficiency 2020, digital, 14.-18.09.2020
- Teilnahme an mehreren digitalen Workshops (Veranstalter: DIW, Agora Energiewende, AG Emissionshandel, UBA) zu neuen Politikinstrumenten (CCfDs / Klimaschutzverträge) zur Markteinführung klimaneutraler Produktionsverfahren für die Grundstoffindustrie
- 10. ProcessNet-Jahrestagung und 34. DECHEMA-Jahrestagung der Biotechnologen 2020, Online, 21. bis 24.09.2020 (mit Posterpräsentation)
- Auftaktveranstaltung Forschungsnetzwerk Wasserstoff, digital, 30.09.2020
- Teilnahme am KongRESS BW zu den Themen Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft, 07. und 08.10.2020
- Digital Conference on Industrial Technologies 2020, DECHEMA – Symposium: Catalysis for fossil-free fuels and chemicals in Europe, Online, 27. und 28.10.2020
- Building Technology Experts „Die Brennstoffzelle in unseren Gebäuden: Heizen wir zukünftig mit Wasserstoff?, digital, 05.11.2020
- Erfahrungsaustausch der Energienetzwerker 2020: mit Themen zur Abwärmenutzung mittel Mitteltemperatur-Wärmeübertragern und thermische Nachverbrennung, digital, 05.11.2020
- DECHEMA Virtual Talks: CHEM|ampere, Online, 05. bis 19.11.2020
- Zukunftsforum Energie & Klima 2020, Online, 15. bis 20.11.2020
- Online Infotag Digitales Design im 3D-Druck – der kurze Weg von der Idee zum Produkt, Online, 16.11.2020
- 6. BMU-Fachtagung "Klimaschutz durch Abwärmenutzung", Fachvortrag von E. Jochem: Zwischen 100° und 1000°C: Neueste Erkenntnisse zur Erschließung ungenutzter Abwärmepotenziale in Industrie und Gewerbe digital, 17.11.2020
- Cleanzone: Reinraumtechnologie, digital, 18. & 19.11.2020
- saarland.innovation: Vortrag Kühl- und Kältetechnik, digital, 24.11.2020
- Webinar: Klimaneutrales Deutschland: In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050. Agora Energiewende, 15.12.2020
- Digitaler Energieforschungskongress „Alles ist Energie“. Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie (MWIDE), 02. und 03.12.2020
- Virtual Battery Exhibition: European Engineering Solutions for Battery Production. VDMA Batterieproduktion, 30.06. bis 06.07.2020
- Energy Informatics 2020: The 9th DACH+ Conference on Energy Informatics, online, 29. und 30.10.2020
- Symposium der Energieeffizienz-Netzwerke - Zielorientiertes Netzwerken im Detail für Profis. Konzipierung eines Abwärmeteils des Symposiums durch E. Jochem zu den Themen: Kälteerzeugung über Adsorption, ORC-Technik, Hochtemperatur-Wärmepumpen, digital, 4.11.2020
- 13. Darmstädter Energiekonferenz, digital, 23.02.2021
- Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Energieverfahrenstechnik, digital, 03. und 04.03.2021
- PIUS-Länderkonferenz, digital, 03. und 04.03.2021

- DKV-IZW Veranstaltung: "Herausforderungen 2021 für Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik", digital, 09.03.2021
- Webinar: „Der Weg zur klimaneutralen Produktion - zukunftsfähig oder abgehängt?“, digital, 10.03.2021
- DGMK / IGF - Projekte im Brennstoff- und Kraftstoffbereich, digital, 16.03.2021
- METAV Digital: Intelligente Produktion, 07.04.2021
- 2. Treffen des Stakeholder-Dialogs "Klimaneutrale Wärme", digital, 13.4.2021
- DENA Workshop: „Energieeffizienz durch Digitalisierung in der Industrie Hemmnisse & Lösungsansätze“, digital, 14.04.2021
- BMWi Energiewende-Plattform Forschung und Innovation, Berlin, 20.04.2021
- Sitzung des Forschungsfelds Fertigungstechnik, digital, 20.04.2021
- AGEEN – Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke anlässlich der Berliner Energietage 2021, digital, 22.04.2021
- Arbeitsgruppe Aus- und Weiterbildung, Roadmap Energieeffizienz 2050, digital, 27.04.2021
- 3. Treffen des Stakeholder-Dialogs "Klimaneutrale Wärme", digital, 21.05.2021
- Roadmap Effizienz 2050, 3. Plenarveranstaltung, digital, 01.06.2021
- DENEFF Arbeitsgruppen-Treffen Industrie, digital, 08.06.2021
- ACHEMA Pulse, 15.-16.06.2021, Online; mit Vortrag: Energy Efficiency and Additive Manufacturing – Evaluation Approaches for the Process Industry, 16.06.2021
- World Sustainable Energy Days, digital, 21. bis 25.06.2021
- Sitzung des Forschungsfelds Abwärme, digital, 25.6.2021
- Dena-Praxisworkshop Chemieindustrie: Perspektiven für eine energieeffiziente und CO₂-arme Produktion; mit Vortrag: Trends der Forschung zu Energieeffizienz in der chemischen Industrie, digital, 22.11.2021

Literatur

- [1] Statistisches Bundesamt, „Klassifikation der Wirtschaftszweige : mit Erläuterungen / Statistisches Bundesamt, Wiesbaden“, 2008.
- [2] Statistisches Bundesamt, „Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden“, 2020.
- [3] Statistisches Bundesamt, „Produzierendes Gewerbe: Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Stein und Erden“, 2018.
- [4] Wirtschaftsvereinigung Stahl, „Fakten Stahlindustrie 2017“, S. 20, 2017.
- [5] VCI, „Chemiewirtschaft in Zahlen 2018“, Aug. 2018.
- [6] DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., „ENPRO - Energieeffizienz und Prozessbeschleunigung für die Chemische Industrie“, 2014. <http://enpro-initiative.de> (zugegriffen 13. April 2018).
- [7] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „Leitstudie Integrierte Energiewende“. 2018.
- [8] M. Papapetrou, G. Kosmadakis, A. Cipollina, U. La Commare, und G. Micale, „Industrial waste heat. Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country.“, *Applied Thermal Engineering* 138, Bd. 138, S. 207-216., 2018, doi: DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.043.
- [9] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Konsultationsprozess für das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung. - Zusammenfassung der Expertenempfehlungen und Positionspapiere aus den Bundesländern sowie aus Wirtschaft und Wissenschaft“. 2018.
- [10] E. Jochem, Hrsg., *Improving the Efficiency of R&D and the Market Diffusion of Energy Technologies*. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2009. doi: 10.1007/978-3-7908-2154-3.
- [11] B. Carlsson, S. Jacobsson, M. Holmén, und A. Rickne, „Innovation Systems: Analytical And Methodological Issues“, *Research Policy*, Bd. 31, Nr. 2, S. 233–245, 2002.
- [12] J. Lässig, T. Schütte, und W. Riesner, *Energieeffizienz-Benchmark Industrie*. Springer, 2017.
- [13] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., „Dynamis Hauptbericht - Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems“, 2019.
- [14] Sachverständigenrat für Umweltfragen, „Pariser Klimaziele erreichen mit dem CO2-Budget“, 2021.
- [15] E. Abele und G. Reinhart, *Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011. doi: 10.3139/9783446428058.
- [16] G. Müller, Hrsg., *Lexikon Technologie, 2.*, verb. Aufl. Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer, 1992.
- [17] B. Awiszus, J. Bast, H. Dürr, und P. Mayr, *Grundlagen der Fertigungstechnik*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016. doi: 10.3139/9783446448216.
- [18] A. H. Fritz und G. Schulze, „Einführung“, in *Fertigungstechnik*, Bd. 0, A. H. Fritz und G. Schulze, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, S. 1–3. doi: 10.1007/978-3-642-12879-0_1.
- [19] Deutsches Institut für Normung e.V., „Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung“, Beuth Verlag GmbH, DIN 8580, 2003.
- [20] E. Klett, *Vortrag: Additive Fertigung: Grundlagen und Ausblick*. ISH Frankfurt, Kuratoriumssitzung Fertigungstechnik, 2019.
- [21] T. T. Wohlers, *Wohlers Report 2019. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*. Fort Collins: WOHLERS ASSOCIATES, 2019.
- [22] D. Bauer u. a., *Handlungsfelder Additive Fertigungsverfahren*, 1. Auflage. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2016.
- [23] K. Kellens, M. Baumers, T. G. Gutowski, W. Flanagan, R. Lifset, und J. R. Dufloy, „Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications“, *Journal of Industrial Ecology*, Bd. 21, Nr. S1, S. S49–S68, 2017, doi: 10.1111/jiec.12629.

- [24] Robin Langner, „Energie und Ressourcenbetrachtung eines additiven Fertigungsverfahrens (Selective Laser Melting - SLM)“, Bachelor Thesis, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2015.
- [25] P. Basiliere und M. Shanler, „Hype Cycle for 3D Printing, 2019“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gartner.com/en/documents/3947508/hype-cycle-for-3d-printing-2019>
- [26] U. Schmoch, „Bericht zur Patentanalyse Lasersintern“, Aug. 2019, [Online]. Verfügbar unter: <https://worldwide.espacenet.com/patent/>
- [27] U. Schmoch, „Bericht zur Publikationsanalyse Lasersintern“, Aug. 2019.
- [28] M. Blesl und A. Kessler, *Energieeffizienz in der Industrie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. doi: 10.1007/978-3-662-55999-4.
- [29] Prognos AG, „Potenziale für Energieeinsparung und Energieeffizienz im Lichte aktueller Preisentwicklungen“. Basel und Berlin, 2007.
- [30] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, „Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2017“, S. 98, 2019.
- [31] S. Frisch, M. Pehnt, P. Otter, und M. Nast, „Prozesswärme im Marktanreizprogramm: Zwischenbericht zu Perspektivische Weiterentwicklung des Marktanreizprogramms“. 2010. [Online]. Verfügbar unter: https://elib.dlr.de/82173/1/Prozessw%C3%A4rme_im_MAP.pdf
- [32] Bayerisches Landesamt für Umwelt, *Energieeinsparung in Lackierbetrieben - Langfassung*. Augsburg, 2006. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdma.org/documents/266765/8655727/Energie+sparen+bei+der+Lackierung+Langfassung.pdf/01266aeb-145d-4a65-b373-609bb5284f0b>
- [33] K. Kröll und W. et al Kast, *Trocknungstechnik. - Band 3: Trocknen und Trockner in der Produktion*. Berlin: Springer, 1989.
- [34] A. S. Mujumdar, Hrsg., *Handbook of industrial drying*, 4. ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2015.
- [35] EE4InG, „Fachgespräch Trocknung - durchgeführt am 11.03.2021“. 2021.
- [36] C. Strumillo, P.L. Jones, und R. Žyglis, „Energy Aspects in Drying“, in *Handbook of Industrial Drying*, A. S. Mujumdar, Hrsg. CRC Press, 2014, S. 947–966. doi: 10.1201/b17208-59.
- [37] P. Goodman, A. Skarstein, L. Lyons, S. Pahal, und C. Robertson, „Sustainable Industrial Policy – Building on the Eco-design Directive – Energy-Using Products Group Analysis / 2: Lot 4: Industrial and Laboratory Furnaces and Ovens – Tasks 1 – 7 Final Report“. 2012. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ecee.org/static/media/uploads/site-2/ecodesign/products/industrial-ovens/043122753-entr-lot-4-final-report-v6.pdf>
- [38] V. Minea, *Industrial Heat Pump-Assisted Wood Drying*. CRC Press, 2018. doi: 10.1201/9780429463914.
- [39] J. Lässig, T. Schütte, und W. Riesner, Hrsg., *Energieeffizienz-Benchmark Industrie: Energiekennzahlen für kleinere und mittlere Unternehmen*, 2. Auflage 2017. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH and Springer Vieweg, 2017.
- [40] A. Thielmann, A. Sauer, und M. Wietschel, „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“, 2015.
- [41] A. Thielmann, A. Sauer, und M. Wietschel, „Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030“, 2015.
- [42] A. Thielmann, A. Sauer, und M. Wietschel, „Gesamt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030“, 2015.
- [43] A. Thielmann, *Energiespeicher-Roadmap (Update 2017): Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2017.
- [44] VDMA, „Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030“, 2018.
- [45] VDMA, „Schlüssel zur Batterieproduktion“, 2019.
- [46] A. Thielmann, M. Meister, A. Sauer, C. Lerch, und A. Jäger Zanker, Christoph, „Leichtbau - Trends und Zukunftsmärkte“, 2014.
- [47] D. A. Notter u. a., „Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles“, *Environmental science & technology*, Bd. 44, Nr. 17, S. 6550–6556, 2010, doi: 10.1021/es903729a.

- [48] M. A. Cusenza, S. Bobba, F. Ardente, M. Cellura, und F. Di Persio, „Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 215, S. 634–649, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.056.
- [49] G. Majeau-Bettez, T. R. Hawkins, und A. H. Strømman, „Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles“, *Environmental science & technology*, Bd. 45, Nr. 10, S. 4548–4554, 2011, doi: 10.1021/es103607c.
- [50] Q. Dai, J. C. Kelly, L. Gaines, und M. Wang, „Life cycle analysis of lithium-ion batteries for automotive applications“, *Batteries*, Bd. 5, Nr. 48, S. 1–15, 2019.
- [51] C. Yuan, Y. Deng, T. Li, und F. Yang, „Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles“, *CIRP Annals*, Bd. 66, Nr. 1, S. 53–56, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.109.
- [52] L. A.-W. Ellingsen, G. Majeau-Bettez, B. Singh, A. K. Srivastava, L. O. Valøen, und A. H. Strømman, „Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack“, *Journal of Industrial Ecology*, Bd. 18, Nr. 1, S. 113–124, 2014, doi: 10.1111/jiec.12072.
- [53] J. B. Dunn, L. Gaines, J. Sullivan, und M. Q. Wang, „Impact of recycling on cradle-to-gate energy consumption and greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion batteries“, *Environmental science & technology*, Bd. 46, Nr. 22, S. 12704–12710, 2012, doi: 10.1021/es302420z.
- [54] M. Zackrisson, L. Avellán, und J. Orlenius, „Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles – Critical issues“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 18, Nr. 15, S. 1519–1529, 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2010.06.004.
- [55] RECHARGE, „PEFCR - Product Environmental Footprint Category Rules“, 2018, [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_Batteries.pdf
- [56] H. C. Kim, T. J. Wallington, R. Arsenault, C. Bae, S. Ahn, und J. Lee, „Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis“, *Environmental science & technology*, Bd. 50, Nr. 14, S. 7715–7722, 2016, doi: 10.1021/acs.est.6b00830.
- [57] C. Pillot, „Lithium ion battery raw material supply & demand 2016-2025“, 2017, Bd. 30.
- [58] O. Sapunkov, V. Pande, A. Khetan, C. Choomwattana, und V. Viswanathan, „Quantifying the promise of ‘beyond’ Li-ion batteries“, *Transl. Mater. Res.*, Bd. 2, Nr. 4, S. 045002, 2015, doi: 10.1088/2053-1613/2/4/045002.
- [59] J. Gombert und E. Maes, „A ban on the internal combustion engine by 2030. An economic utopia“, 2018.
- [60] D.-S. Kourkoumpas, G. Benekos, N. Nikolopoulos, S. Karellas, P. Grammelis, und E. Kakaras, „A review of key environmental and energy performance indicators for the case of renewable energy systems when integrated with storage solutions“, *Applied Energy*, Bd. 231, S. 380–398, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.09.043.
- [61] Engineering National Academies of Sciences and Medicine, *The Power of Change: Innovation for Development and Deployment of Increasingly Clean Electric Power Technologies*. Washington, DC: The National Academies Press, 2016. doi: 10.17226/21712.
- [62] VDMA - Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., *Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland*. Frankfurt am Main, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://tun.vdma.org/documents/105873/51194974/K%C3%A4lte-Energie%202018_Auszug_1599226152795.pdf/e1eb2f05-570f-2f1d-7503-ace589e4b5bd
- [63] European Commission, „European data strategy: Making the EU a role model for a society empowered by data“. [Online]. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-data-strategy>
- [64] D. Westrom, „Data Driven Manufacturing: Benefits, Challenges, and Strategies“, 2020. Zugegriffen: 2. Juli 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.machinometrics.com/blog/data-driven-manufacturing>
- [65] E. Sarikaya u. a., „Data Driven Production – Application Fields, Solutions and Benefits“. UNSPECIFIED, 2021. doi: 10.26083/TUPRINTS-00017874.
- [66] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Schwerpunktstudie Digitalisierung und Energieeffizienz: Erkenntnisse aus Forschung und Praxis“. 2020.

- [67] S. Lange, J. Pohl, und T. Santarius, „Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand?“, *Ecological Economics*, Bd. 176, S. 106760, 2020, doi: 10.1016/j.ecolecon.2020.106760.
- [68] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Project GAIA-X: A Federated Data Infrastructure as the Cradle of a Vibrant European Ecosystem“. 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Digitale-Welt/project-gaia-x.html>
- [69] Deutsche Energie-Agentur GmbH, „Blockchain in der integrierten Energiewende“. 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-Studie_Blockchain_Integrierte_Energiewende_DE4.pdf
- [70] Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, „Vertrauen 4.0: Die Hyperledger Fabric-Blockchain sorgt für Datensicherheit in der additiven Fertigung.“ Zugegriffen: 26. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ipk.fraunhofer.de/de/publikationen/futur/futur-online-exklusiv/vertrauen40.html>
- [71] E. Masanet, A. Shehabi, N. Lei, S. Smith, und J. Koomey, „Recalibrating global data center energy-use estimates“, *Science (New York, N.Y.)*, Bd. 367, Nr. 6481, S. 984–986, 2020, doi: 10.1126/science.aba3758.
- [72] W. Knight, „AI Can Do Great Things—if It Doesn’t Burn the Planet“, *WIRED*, Jan. 2020, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wired.com/story/ai-great-things-burn-planet/>
- [73] N. Jones, „How to stop data centres from gobbling up the world’s electricity“, *Nature*, Bd. 561, Nr. 7722, S. 163–166, 2018, doi: 10.1038/d41586-018-06610-y.
- [74] Olaf Sauer und Jürgen Jasperneite, „Artificial Intelligence For Manufacturing“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/98264/8-Seiter%20Artificial%20Intelligence.pdf?command=downloadContent&filename=8-Seiter%20Artificial%20Intelligence.pdf>
- [75] M. Hörner, M. Rodenfels, H. Cischinsky, M. Behnisch, R. Busch, und G. Spars, „Der Bestand der Nichtwohngebäude in Deutschland ist vermessen“, S. 17, 2021.
- [76] R. Mai und H. Schiller, „Potenziale von Klima- und Lüftungstechnik als Beitrag zur Umsetzung des klimaneutralen Gebäudebestandes 2050“, S. 241, 2018.
- [77] Fraunhofer IPA, „Leichtbau“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ipa.fraunhofer.de/de/ueber_uns/Leitthemen/leichtbau.html
- [78] BMWi, „Leichtbau“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/leichtbau.html>
- [79] Leichtbau BW GmbH, „Trends und Märkte im Leichtbau“, 2015.
- [80] B. Klein und T. Gänsicke, *Leichtbau-Konstruktion*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. doi: 10.1007/978-3-658-26846-6.
- [81] Leichtbau BW GmbH, „Mit Konzeptleichtbau Ungenutzte Potenziale Heben“, 2019.
- [82] M. Zottler, *Life-Cycle Analyse von Leichtbaukonzepten für den Automobilbau*. 2014.
- [83] BMWi, „Leichtbauatlas“, 2020.
- [84] enArgus Projektdatenbank, „Förderprojekte“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.enargus.de/search/?q=leichtbau>
- [85] K. Jousten, *Handbuch Vakuumtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. doi: 10.1007/978-3-658-13386-3.
- [86] Deutsches Institut für Normung e.V., „Vakuumtechnik“, Beuth Verlag GmbH, 28400–1, Mai 1990.
- [87] S. Brodersen und A. Peters, „Pumpen und Kompressoren für den Weltmarkt 2020“, 2019.
- [88] C. Reichmann, A. Kessler, und V. Siegismund, „Energieeffizienz in der Vakuumtechnik“, *Vakuum in Forschung und Praxis*, Bd. 26, Nr. 1, S. 18–22, 2014, doi: 10.1002/vipr.201400545.
- [89] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Zahlen und Fakten: Energiedaten, Nationale und internationale Entwicklung, Stand: 05.03.2021“. 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt-xls.html>
- [90] Binder, A., „Technische Optimierungspotentiale bei elektrischen Antriebssystemen“. 2009. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/rd/ew_vortraege/090120_binder_optimierungspotentiale.pdf
- [91] Fachgespräch mit Prof. Griepentrog, 20. Juli 2021.

- [92] Sielaff, T., *Zum Einsatz von Synchronreluktanzmotoren in Motorspindeln für Universal-Bearbeitungszentren*. Aachen: Shaker Verlag, 2017.
- [93] Sauer, A., Hrsg., *Die Gleichstromfabrik*. München: Carl Hanser Verlag, 2020.
- [94] K. Hertwig, L. Martens, und C. Hamel, *Chemische Verfahrenstechnik*. Berlin, Boston: De Gruyter, 2018. doi: 10.1515/9783110501025.
- [95] VCI, „Branchenporträt der deutschen chemisch-pharmazeutischen Industrie 2017“, Aug. 2018.
- [96] H. Mothes, „No-Regret-Lösungen - Modulare Produktionskonzepte für komplexe, unsichere Zeiten“, *Chemie Ingenieur Technik*, Bd. 87, Nr. 9, S. 1159–1172, 2015, doi: 10.1002/cite.201400133.
- [97] A. Behr, D. W. Agar, und J. Jörissen, *Einführung in die Technische Chemie*. Heidelberg: Spektrum, Akad. Verl., 2010.
- [98] J. Hagen, *Technische Katalyse: Eine Einführung*. Weinheim: Wiley-VCH, 1996.
- [99] W. J. Koros, Y. H. Ma, und T. Shimidzu, „Terminology for membranes and membrane processes (IUPAC Recommendations 1996)“, *Pure and Applied Chemistry*, Bd. 68, Nr. 7, S. 1479–1489, 1996, doi: 10.1351/pac199668071479.
- [100] P. Marchetti, M. F. Jimenez Solomon, G. Szekely, und A. G. Livingston, „Molecular separation with organic solvent nanofiltration: a critical review“, *Chemical reviews*, Bd. 114, Nr. 21, S. 10735–10806, 2014, doi: 10.1021/cr500006j.
- [101] Evonik, „Kompositmembran für die organophile Nanofiltration“, Bd. 2013, Nr. 4, S. 21, 2013.
- [102] B. Van der Bruggen, J. C. Jansen, A. Figoli, J. Geens, K. Boussu, und E. Drioli, „Characteristics and Performance of a “Universal” Membrane Suitable for Gas Separation, Pervaporation, and Nanofiltration Applications“, *J. Phys. Chem. B*, Bd. 110, Nr. 28, S. 13799–13803, Juli 2006, doi: 10.1021/jp0608933.
- [103] J. L. Humphrey und J. R. Fair, „Low-Energy Separations for the Process Industry“, *Separation Science and Technology*, Bd. 18, Nr. 14–15, S. 1765–1789, 1983, doi: 10.1080/01496398308056126.
- [104] C. Caviezel, R. Grünwald, S. Ehrenberg-Silies, S. Kind, T. Jetzke, und M. Bovenschulte, „Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung: Additive Fertigungsverfahren „3-D-Druck“, Aug. 2017, [Online]. Verfügbar unter: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/134/1813455.pdf>
- [105] F. Walachowicz u. a., „Comparative Energy, Resource and Recycling Lifecycle Analysis of the Industrial Repair Process of Gas Turbine Burners Using Conventional Machining and Additive Manufacturing“, *Journal of Industrial Ecology*, Bd. 21, Nr. S1, S. S203–S215, 2017, doi: 10.1111/jiec.12637.
- [106] J. Schütz, J. Beck, M. Schmiedeck, und C. Emmelmann, „Druckfrisch in die Zukunft der Partikelschaumverarbeitung“, *Kunststoffe*, Nr. 8, S. 70–73, 2018.
- [107] S. H. Breuer, „Die Zukunft der Fertigung: Evolution im Schnelldurchgang“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://new.siemens.com/global/de/unternehmen/stories/forschung-technologien/digitaler-zwilling/die-zukunft-der-fertigung-fenchelfackel.html>
- [108] P. Haltenort, „Einsatz der additiven Fertigung im Apparatebau: Onlinerecherche des Projekts EE4InG“. 2020.
- [109] Metal Additive Manufacturing, Hrsg., „Additive Manufacturing market forecast to reach \$51 billion by 2030“. 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.metal-am.com/am-market-forecast-to-reach-51-billion-by-2030/>
- [110] V. Akinsowon und M. Nahirna, „The Additive Manufacturing Landscape 2020“, 2020.
- [111] EE4InG, „Effizienzpotentiale der additiven Fertigung in der Prozessindustrie“, OInLine, 21. Januar 2021.
- [112] Acmite Market Intelligence, Hrsg., „Market Report: Global Catalyst Market: 2nd Edition“. Ratingen, Germany, 2010.
- [113] H. Abdelghani, „Top 10 Catalyst Companies“. 2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oilandgasmiddleeast.com/article-9496-top-10-catalysts-companies>

- [114] Acmite Market Intelligence, Hrsg., „Global Catalyst Market“. Ratingen, Germany, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.acmite.com/market-reports/environmentals/global-catalyst-market.html>
- [115] Allied Market Research, Hrsg., „Global Catalyst Market: Opportunities and forecasts 2014-2022“. 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.alliedmarketresearch.com/catalysts-market>
- [116] Fior Markets, Hrsg., „Global Catalyst Market is Expected to Reach USD 35.63 Billion by 2025: Fior Markets“. 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.globenewswire.com/news-release/2019/07/29/1892686/0/en/Global-Catalyst-Market-is-Expected-to-Reach-USD-35-63-Billion-by-2025-Fior-Markets.html>
- [117] European Chemical Industry Council, Hrsg., „2020 Facts & Figures of the European chemical Industry“, 2019.
- [118] The American Chemical Society, Hrsg., „Technology Vision 2020“, S. 77, Dez. 1996.
- [119] Deutsche Gesellschaft für Katalyse, Hrsg., „Kompetenzatlas Katalyse“. 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://gecats.org/Kompetenzatlas-category-2.html>
- [120] Wirtschaftsvereinigung Stahl, „Stahlerzeugung in Deutschland“, 2019. <https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2019/03/Folie1.png>
- [121] Wirtschaftsvereinigung Stahl, „Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland 2019“. 2019.
- [122] O. Lösch, „Trends und Einflussfaktoren für die energie- und emissionsbezogene Innovationstätigkeit der Eisen- und Stahlherstellung“. 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://irees.de/2020/06/15/irees-working-paper-no-2-2020-trends-und-einflussfaktoren-fuer-die-energie-und-emissionsbezogene-innovationsfaehigkeit-der-eisen-und-stahlherstellung-2020/>
- [123] Wirtschaftsvereinigung Stahl, „Schaubild - Wege zum Stahl“. n.d. [Online]. Verfügbar unter: https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/10/D519_Schaubild_Wege_zum_Stahl.pdf
- [124] O. Lösch, F. A. Toro, N. Ashley-Belbin, F. Reitze, und M. Schön, „Prozessemissionen in der deutschen Industrie und ihre Bedeutung für die nationalen Klimaschutzziele – Problemdarstellung und erste Lösungsansätze“, 2018, [Online]. Verfügbar unter: <http://www.irees.de/irees-de/inhalte/publikationen/print-Publikationen/projektbericht-report/2018-Klimaschutz-Prozessemissionen.php>
- [125] Worldsteel Association, „Fact sheets“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.worldsteel.org/publications/fact-sheets.html>
- [126] M. Fishedick, J. Marzinkowski, P. Winzer, und M. Weigel, „Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 84, S. 563–580, Dez. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.05.063.
- [127] T. Fleiter, Hrsg., *Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien*. Stuttgart: Fraunhofer-Verl., 2013. [Online]. Verfügbar unter: <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-234719.html>
- [128] P. Cavaliere, *Clean Ironmaking and Steelmaking Processes*. Springer, 2019.
- [129] M. Hölling, M. Weng, und S. Gellert, „Bewertung der Herstellung von Eisenschwamm unter Verwendung von Wasserstoff“, 2017.
- [130] BMWi, „Die Nationale Wasserstoffstrategie“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Juni 2020. Zugegriffen: 27. September 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=16
- [131] P. Kurzweil, *Elektrochemische Speicher. Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen.*, 2. Auflage. Heidelberg: Springer, 2018.
- [132] M. Heddrich und M. Riedel, „Druckaufgeladene Hochtemperatur elektrolyse (Projektbericht DruHEly)“. Institut für Technische Thermodynamik DLR Stuttgart, 2018.
- [133] T. Smolinka, N. Wiebe, P. Sterchele, und A. Palzer, „Studie IndWEDe. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme.“ Im Auftrag der NOW GmbH., 2018.

- [134] O. Machhammer, A. Bode, und W. Hormuth, „Ökonomisch/ökologische Betrachtung zur Herstellung von Wasserstoff in Großanlagen“, *Chemie Ingenieur Technik*, Bd. 4, Nr. 87, S. 409–418, 2015, doi: 10.1002/cite.201400151.
- [135] S. Bukold, „Blauer Wasserstoff“, Greenpeace Energy, 2020.
- [136] H. Wolf und K. Hauptmeier, „Experteninterview zur Hochtemperaturelektrolyse“, 2020.
- [137] Tom Smolinka, „Experteninterview zur Hochtemperaturelektrolyse“, 2020.
- [138] M. Skaf, J. Manso, A. Aragon, und J. Fuente-Alonso, „EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use“, *Resources, Conservation and Recycling*, Nr. 120, S. 176–185, 2017.
- [139] Verbundvorhaben DEWEOS, „Verbundvorhaben: Erforschung eines Verfahrens zur gezielten Erstarrung von schmelzflüssiger Elektroofenschlacke kombiniert mit einer Wärmerückgewinnung (DEWEOS)“, FKZ: 03ET1141 (-A,-B,-C), 2016.
- [140] D. Mudersbach und H. Motz, „Wärmerückgewinnung aus Stahlwerksschlecken“, in *Schlacken aus der Metallurgie Band 3*, Neuruppin: TK Verlag, 2014.
- [141] Brückner, S. (2016):, „Industrielle Abwärme in Deutschland. Dissertation an der TU München. München 2016. Lehrstuhl für Energiesysteme“.
- [142] T. Reindorf, *Modellierung und Analyse des betriebsverhaltens von thermischen Nachverbrennungsanlagen mit regenerativer Abluftvorwärmung*. Clausthal: Papierflieger Verlag GmbH, 2015.
- [143] C. Rohde, „Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2018 bis 2020 für die Sektoren Industrie und GHD“. Fraunhofer ISI. Karlsruhe., 3. September 2021.
- [144] Tamme, R. (2005), „Speicherung für Hochtemperaturwärme, pp. 126–130.“ [Online]. Verfügbar unter: https://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2005/th2005_06_02.pdf
- [145] Seitz, A.; Zunft, S.; Hoyer-Klick, C. (2018):, „Technologiebericht 3.3b Energiespeicher (thermisch, thermo-chemisch und mechanisch) innerhalb des Forschungsprojekts TF\ Energiewende. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Wuppertal.“ [Online]. Verfügbar unter: https://e-pub.wupperinst.org/files/7056/7056_Energiespeicher.pdf
- [146] Fraunhofer IFAM (2020b):, „Workshop Thermischer Speicher am 03.04.2020 und Expertengespräch mit Hr. Torsten Seidel am 09.04.2020.“
- [147] ZAE Bayern (2020), „Expertengespräch mit Dr. Stefan Hilber am 06.03.2020.“
- [148] DLR (2020), „Expertengespräch mit Dr. Dan Bauer am 26.2.2020.“
- [149] BMWi, 2020, „Richtlinie zur Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft – Förderwettbewerb vom: 22.01.2020. Bundesanzeiger v. 31.1.2020“.
- [150] Grote, L., Hoffmann, P. & Tänzer, G. (2015), „Abwärmenutzung – Potenziale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschläge. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Auftragnehmer: IZES GmbH. Online verfügbar unter: http://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/20150901_BMUB_Studie_Abwaerme_V.1.1.pdf. Zuletzt abgerufen am 11. Februar 2020.“
- [151] Mayer-Krahmer & Dreher 2004, „Neuere Betrachtungen zu Technikzyklen und Implikationen für die Fraunhofer-Gesellschaft. In: Spath, D.: Forschungs- und Technologiemanagement -Potenziale nutzen – Zukunft gestalten Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Hans-Jörg Bullinger, München. Hanser Verlag 2004“.
- [152] Maier, W., Angerer, G. (Hrsg.) et al. (1986)., „Rationelle Energieverwendung durch neue Technologien. Kap.B.3: Neue Technologien der Abwärmenutzung.“, *Praxis-wissen aktuell*, S. S.69-116.
- [153] R. Paschotta, „RP-Energie-Lexikon - thermoelektrischer Generator, Seebeck-Effekt, Thermovoltaik, Stromerzeugung, Wirkungsgrad, Effizienz, Anwendungen.“, 2019. https://www.energie-lexikon.info/thermoelektrischer_generator.html
- [154] Stiewe, C.; Müller, E. (2015a), „Anwendungspotenzial thermoelektrischer Generatoren in stationären Systemen – Chancen für NRW. Studie im Auftrag des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen.“
- [155] Kühn, R.; Koeppen, O. (2015):, „TEG2020 - Entwicklung modularer leistungsstarker und flexibel einsetzbarer thermoelektrischer Generatoren zur thermischen Rekuperation in Verbrennungs-

kraftmaschinen und -anlagen. Abschlussbericht, Förderkennzeichen: 03X3552F. Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2011 – 31.12.2014. TU Berlin, Institut für Energietechnik, Fachgebiet für Maschinen- und. Berlin.“

- [156] V. Weihnacht, „Forschungsfeld Tribologie und BMWi-Projekte“, 01.09.2021.
- [157] V. Weihnacht, „Zwischenfazit Forschungsfeld Tribologie“. 10. Januar 2020.
- [158] M. Woydt, T. Gradt, T. Hosenfeldt, R. Luther, A. Rienäcker, F.-J. Wetzel, C. Wincierz, „Tribologie in Deutschland – Querschnittstechnologie zur Minderung von CO₂-Emissionen und zur Ressourcenschonung“, 2019.
- [159] M. Woydt, T. Hosenfeldt, R. Luther, C. Scholz, M. Bäse, C. Wincierz, J. Schulz, „Tribologie in Deutschland – Verschleißschutz und Nachhaltigkeit als Querschnittsherausforderung“, 2021.
- [160] W. Buckel und R. Kleiner, *Supraleitung*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. doi: 10.1002/9783527668670.
- [161] P. Seidel, *Applied Superconductivity*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015. doi: 10.1002/9783527670635.
- [162] W. Walter, *Supraleitung International*. Berlin, 2020. Zugegriffen: 6. März 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://ivsupra.de/ziehl/>
- [163] F. Merschel, „Verbundvorhaben: Ampacity - 10kV-Supraleiter-System für Hochenergietrassen; Teilvorhaben: Implementierung und technische Evaluation des Kabelsystems: Schlussbericht (Teil I + II): Berichtszeitraum: 1. September 2011 bis 29. Februar 2016“, 2016, doi: 10.2314/GBV:872411443.
- [164] M. Stiller, *Hochtemperatur Supraleiter AmpaCity - Betriebserfahrungen*. Berlin, 2020. Zugegriffen: 6. März 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://ivsupra.de/wp-content/uploads/2020/03/9_Stiller-ZIEHL-VII-Netzausbau-mit-Supraleitung-II.pdf
- [165] Stadtwerke München, *Von der Hochspannungsfreileitung zum Supraleiter*. Berlin, 2020. Zugegriffen: 5. März 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://ivsupra.de/wp-content/uploads/2020/03/2_Michalek-ZIEHL-VII-Energiewende-Energieeffizienz.pdf
- [166] J. Klier, W. Reiser, und M. Noe, „Vorhabenbezeichnung: 3S-SupraStromSchiene: Supraleitendes Hochstromsystem für DC-Anwendungen: Gemeinsamer Abschlussbericht zur Veröffentlichung: Laufzeit des Vorhabens: 01.05.2015 - 31.10.2018: Berichtszeitraum: 01.05.2015-31.10.2018“, 2018, doi: 10.2314/KXP:1669017168.
- [167] THEVA Dünnschichttechnik GmbH, *Supraleiter für die Energietechnik - Überblick Technologie und Stand der Technik*. Berlin, 2020. Zugegriffen: 5. März 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://ivsupra.de/wp-content/uploads/2020/03/2_Bauer-ZIEHL-VII-Tutorial.pdf
- [168] enArgus Projektdatenbank, „DEMO200 - Supraleitendes Hochstromsystem für 200 kA DC mit modularem Aufbau“, FKZ: 03ET1670 A-C, 15. April 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/26?op=enargus.eps2&m=0&v=10&p=0&s=0&q=03ET1670>
- [169] B. Holzapfel, *Energieeffizienzsteigerung mit Supraleitung*. Eggenstein-Leopoldshafen, 2019.
- [170] Bundesnetzagentur, Hrsg., „Monitoringbericht 2019“. 2019.
- [171] TransnetBW GmbH, Hrsg., „Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung | Netzentwicklungsplan“. 18. Oktober 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.netzentwicklungsplan.de/de/wissen/hochspannungs-gleich-strom-uebertragung>
- [172] C. J. Cleveland, Hrsg., *Dictionary of energy*, 1. ed., Repr. Amsterdam and Heidelberg: Elsevier, 2006.
- [173] D. Fritz, H. Heinfellner, G. Lichtblau, W. Pölz, und B. Schodl, *Ökobilanz alternativer Antriebe: Fokus Elektrofahrzeuge*, Bd. REP-0572. Wien: Umweltbundesamt GmbH, 2016. [Online]. Verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.at/aktuell/publikationen/publikationssuche/publikationsdetail/?pub_id=2177
- [174] Umweltbundesamt, „Projektionsbericht 2021 (Politiksznarien X)“, Dessau, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/projektionsbericht_2021_bf.pdf

- [175] AG Energiebilanzen e. V. (AGEB), Hrsg., „Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2018“. 3. Mai 2021.
- [176] I. Hartbrich, „Stahlindustrie: Die letzte Ofenreise“, *VDI Nachrichten*, 2022, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdi-nachrichten.com/wirtschaft/rohstoffe/stahlindustrie-die-letzte-ofenreise/>
- [177] F. Kunze und T. Windels, „»Made in China 2025«: Technologietransfer und Investitionen in ausländische Hochtechnologiefirmen - Chinas Weg zum Konkurrenten um die Zukunftstechnologien“. ifo Schnelldienst, Vol 71, Iss. 14, 2018.
- [178] R. Münch und T. Guenter, „Der Markt in der Organisation - Von der Hegemonie der Fachspezialisten zur Hegemonie des Finanzmanagements“, in *Finanzmarkt-Kapitalismus: Analysen zum Wandel von Produktions-Regimen*, Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaft, 2005, S. 294–417.
- [179] M. Nusser, „Optionen zur Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit forschungs- und wissensintensiver Branchen in Deutschland“. TAB-Brief Nr. 32, KIT, 2007.
- [180] R. Lindner u. a., „Missions-orientierte Innovationspolitik - Von der Ambition zur erfolgreichen Umsetzung“. ISI Policy Brief 02 2021, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/policy-briefs/policy_brief_missionsorientierung.pdf
- [181] Schröder, M.; Weißfloch, U.; Buschak, D. (2009): „Energieeffizienz in der Produktion –Wunsch oder Wirklichkeit? Energieeinsparpotenziale und Verbreitungsgrad energieeffizienter Techniken. Mitteilungen aus der ISI-Erhebung. No. 51, Karlsruhe“.
- [182] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Hrsg., „Dialog Klimaneutrale Wärme“. Februar 2021.
- [183] AG Energiebilanzen e. V. (AGEB), Hrsg., „Satellitenbilanz ‚Erneuerbare Energieträger‘ zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2018“. 2. April 2020.
- [184] C. Rohde, „Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2018 bis 2020 für die Sektoren Industrie und GHD“. Karlsruhe, 2019.

Anhang

Anhangsverzeichnis

Übergeordnete Anhänge

1. Analyse von Trends und Megatrends in der Industrie
2. Ergebnispapier zum Know-How-Gefälle
3. Stellungnahme zur rationalen Anwendung von (grünem) Wasserstoff in den Nachfragesektoren
4. Stellungnahme des Forschungsnetzwerks Energie – Industrie und Gewerbe: Dialog Klimaneutrale Wärme

Analysen, Quick-Scans und Fact-Sheets - Fertigungstechnik

1. Additive Fertigung EDUAR&D
2. Additive Fertigung Fact-Sheet
3. Trocknung EDUAR&D
4. Trocknung Fact-Sheet
5. Kunststoffverarbeitung EDUAR&D
6. Kunststoffverarbeitung Fact-Sheet
7. Pumpen und Systeme Quick-Scan
8. Pumpen und Systeme Fact-Sheet
9. Reifenherstellung Quick-Scan
10. Reifenherstellung Fact-Sheet
11. Batteriezellenfertigung EDUAR&D
12. Batteriezellenfertigung Fact-Sheet
13. Kühl- und Kältetechnik EDUAR&D
14. Kühl- und Kältetechnik Quick-Scan
15. Moderne Produktionsinfrastruktur EDUAR&D
16. Moderne Produktionsinfrastruktur Fact-Sheet
17. Raumluftechnik Quick-Scan
18. Leichtbau EDUAR&D
19. Leichtbau Fact-Sheet
20. Vakuumtechnologie Quick-Scan
21. Elektrische Antriebe Quick-Scan
22. Elektrische Antriebe Fact-Sheet
23. Gleichstromnetze Quick-Scan
24. Gleichstromnetze Fact-Sheet

Analysen, Quick-Scans und Fact-Sheets – Chemische Verfahrenstechnik

1. Organophile Nanofiltration EDUAR&D
2. Organophile Nanofiltration Fact-Sheet
3. Technische Nanokatalysatoren EDUAR&D

Analysen, Quick-Scans und Fact-Sheets – Eisen und Stahl

1. Direktreduktion EDUAR&D

2. Direktreduktion Fact-Sheet
3. Hochtemperaturelektrolyse EDUAR&D
4. Hochtemperaturelektrolyse Fact-Sheet

Analysen, Quick-Scans und Fact-Sheets – Abwärme

1. Thermische Nachverbrennung EDUAR&D
2. Nutzung von Niedertemperaturabwärme EDUAR&D
3. Nutzung von Niedertemperaturabwärme Quick-Scan
4. Latentwärmespeicher EDUAR&D
5. Latentwärmespeicher Fact-Sheet
6. Mitteltemperatur-Wärmeübertrager EDUAR&D
7. Mitteltemperatur-Wärmeübertrager Fact-Sheet
8. ORC-Anlagen EDUAR&D
9. ORC-Anlagen Fact-Sheet
10. Thermoelektrische Generatoren EDUAR&D
11. Thermoelektrische Generatoren Fact-Sheet

Analysen, Quick-Scans und Fact-Sheets – Sonstige

1. Tribologie EDUAR&D
2. Hochtemperatursupraleitung EDUAR&D
3. Analyse Wechselwirkungen Abwärme – Kühl-und Kältetechnik
4. Forschungsperspektive Synthetische Kraftstoffe