

Dekarbonisierungsoptionen für die Sächsische Wirtschaft

Untersuchung zum Stand der Dekarbonisierung in
ausgewählten Schlüsselbranchen der sächsischen Wirtschaft

Vorwort

Der klimabewusste Umbau unserer Wirtschaft ist eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Deutschland hat sich mit dem Klimaschutzgesetz verpflichtet, bis 2045 treibhausgasneutral zu wirtschaften. Dieses Ziel betrifft alle Lebensbereiche – und damit auch den Freistaat Sachsen mit seiner stark klein- und mittelständisch geprägten Wirtschaftsstruktur. Die Frage ist längst nicht mehr, ob wir diesen Weg gehen, sondern wie wir ihn gestalten. Dabei ist mir besonders wichtig, dass dieser Umbau wirtschaftlich tragfähig, technologisch realistisch und gemeinsam mit den Unternehmen erfolgt.

Während große energieintensive Industrien bereits seit einigen Jahren konkrete Dekarbonisierungsfahrpläne verfolgen, stehen viele kleine und mittlere Unternehmen noch am Anfang dieses Prozesses. Gerade sie bilden jedoch das Rückgrat der sächsischen Wirtschaft. Sie sichern Wertschöpfung, Beschäftigung und Innovationskraft in unserem Land. Für viele von ihnen ist Dekarbonisierung mit Unsicherheiten verbunden – etwa mit Blick auf geeignete Technologien, sinnvolle Investitionen oder die Rolle von Strom, Wasserstoff und Effizienzmaßnahmen. Hinzu kommen Fragen nach rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen.

Vor diesem Hintergrund hat das Sächsische Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit, Energie und Klimaschutz die Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH beauftragt, den Stand der Dekarbonisierung in ausgewählten Branchen der sächsischen Wirtschaft systematisch zu untersuchen

Erstmals liegt damit für Sachsen ein umfassender Überblick über den Status quo der Dekarbonisierung zentraler mittelständischer Branchen vor. Auf Basis von Unternehmensbefragungen, Experteninterviews und wissenschaftlichen Analysen werden konkrete Transformationspfade aufgezeigt. Die Studie bewertet relevante Technologien hinsichtlich technischer Reife, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit und macht sichtbar, welche Auswirkungen unterschiedliche Pfade auf den künftigen Energiebedarf haben können. Sie verdeutlicht zugleich, dass es keine pauschalen Lösungen gibt – jede Transformation muss im konkreten betrieblichen Kontext betrachtet werden.

Besonders wertvoll ist der praxisnahe Ansatz der Studie. Neben Branchensteckbriefen beleuchtet sie rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen, etwa im Planungs- und Genehmigungsrecht oder in Fragen der Netzinfrastruktur. Ergänzt wird dies durch methodische Hilfsmittel zur Wirtschaftlichkeitsbewertung von Investitionen. Damit wird die Studie zu einem praktischen Arbeitsinstrument – für Unternehmen ebenso wie für Beraterinnen und Berater, Kammern, Energieversorger, Netzbetreiber und die Verwaltung.

Gerade jetzt gilt es, die gewonnenen Erkenntnisse zu nutzen. Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind herausfordernd, Investitionsentscheidungen müssen wohlüberlegt getroffen werden. Gleichzeitig steigen die Anforderungen der Märkte. Wer frühzeitig plant und realistische Transformationsschritte einleitet, sichert seine Wettbewerbsfähigkeit für die kommenden Jahre. Der Freistaat Sachsen wird diesen Weg aktiv begleiten – mit Beratung, Förderung und verlässlichen Rahmenbedingungen.

Ich wünsche mir, dass dieser Abschlussbericht als Einladung verstanden wird: zur Auseinandersetzung mit den eigenen Prozessen, zum Dialog zwischen Wirtschaft, Energiewirtschaft und Politik und zur gemeinsamen Weiterentwicklung der sächsischen Transformationsstrategie. Die Dekarbonisierung der Wirtschaft ist kein Selbstzweck. Sie ist Voraussetzung dafür, Wohlstand, Arbeitsplätze und industrielle Stärke in Sachsen langfristig zu sichern.

Dirk Panter

Sächsischer Staatsminister für Wirtschaft, Arbeit, Energie und Klimaschutz

Fachliche Einleitung

Die Transformation hin zu einer treibhausgasneutralen Wirtschaftsweise stellt Unternehmen, Politik und Gesellschaft gleichermaßen vor tiefgreifende strukturelle Veränderungen. Diese Belastungen treten in einer Phase auf, in der die Industrie ohnehin unter starkem Druck steht. Aktuelle Insolvenzen und Standortschließungen – auch in energieintensiven Branchen – verdeutlichen die angespannte Lage der sächsischen Wirtschaft. Hinzu kommen hochdynamische geopolitische Veränderungen, steigende Energiepreise sowie Unsicherheiten bei Rohstoff- und Lieferketten, die die Transformationsaufgabe zusätzlich verschärfen.

Der vorliegende Abschlussbericht ist das Ergebnis einer über zwei Jahre durchgeführten Untersuchung der sächsischen Wirtschaft. Im Mittelpunkt steht die Frage, wie mittelständisch geprägte Wertschöpfungsstrukturen konkret auf dem Weg zur Dekarbonisierung unterstützt werden können. Der Übergang zu klimaneutralen Produktions- und Geschäftsmodellen erfordert eine realistische Einordnung technologischer Optionen, eine klare Bewertung wirtschaftlicher Auswirkungen und ein präzises Verständnis der jeweiligen branchenspezifischen Gegebenheiten.

Im Rahmen der Untersuchung wurden zahlreiche Unternehmen befragt. Weiterhin wurde eine vertiefende wissenschaftliche Studie an die Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE) in München vergeben. Diese analysiert für 19 ausgewählte sächsische Wirtschaftszweige sowie das Handwerk den aktuellen Stand der am Markt verfügbaren Dekarbonisierungstechnologien. Betrachtet werden sowohl die technische Reife als auch die wirtschaftlichen Auswirkungen und die Wechselwirkungen zwischen Technologieeinsatz, Energiebedarf und Kostenentwicklung.

Darüber hinaus untersucht die Studie die technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen, die in der vorgelagerten Energieinfrastruktur zu erfüllen sind. Dazu zählen insbesondere die Strom- und Gasverteilnetze sowie die Erzeugungsebene. Ziel ist es, die Voraussetzungen zu identifizieren, unter denen CO₂-freie Energieträger in ausreichender Menge und zu wettbewerbsfähigen Preisen bereitgestellt werden können, um den Fortbestand bestehender Geschäftsmodelle zumindest mit einer realistischen Wahrscheinlichkeit zu ermöglichen.

Zentrales Ergebnis der Untersuchung sind 13 branchenspezifische Steckbriefe. Diese wurden gemeinsam mit den sächsischen Kammern und den relevanten Dachverbänden ausgewählt. Drei Steckbriefe beziehen sich auf das Handwerk, zehn auf unterschiedliche Industrie- und Wirtschaftszweige.

Mit dem vorliegenden Bericht erhalten Unternehmen, Handwerksbetriebe und Netzbetreiber eine fundierte fachliche Grundlage.

Mit dieser fachlichen Grundlage soll der Bericht dazu beitragen, Unsicherheiten zu reduzieren und Entscheidungsprozesse im Transformationsgeschehen zu unterstützen. Die Ergebnisse bieten Unternehmen Orientierung, schaffen Transparenz über technologische und wirtschaftliche Optionen und können als Basis für individuelle Strategien, betriebliche Roadmaps und politische Steuerungsinstrumente dienen. Damit bildet die Studie nicht nur ein analytisches Fundament, sondern auch ein praxisnahes Werkzeug zur weiteren Ausgestaltung der Dekarbonisierung in Sachsen.

Dr. Tilman Zimmermann-Werner

Geschäftsführer Sächsische Energieagentur - SAENA GmbH

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
Fachliche Einleitung	3
1 Ziel ist eine praxistaugliche Unterstützung der sächsischen Wirtschaft bei der Dekarbonisierung	8
2 Dekarbonisierung in der Praxis: Papierfabrik Louisenthal, Werk Königstein	10
2.1 Unternehmensvorstellung	10
2.2 Techno-ökonomische Betrachtung der Dekarbonisierungsoptionen	11
2.3 Rechtliche Einordnung	13
2.3.1 Verweigerung des Netzanschlusses als Dekarbonisierungshindernis	13
2.3.2 Rechtliche Zwangspunkte im Planungs- und Genehmigungsrecht	19
2.3.3 Finanzielle Entlastung durch den Industriestrompreis	20
2.4 Planungs- & Investitions-sicherheit: Forderungen aus Industrieperspektive	22
2.5 Literaturverzeichnis zum rechtlichen Teil	22
3 Status quo der sächsischen Wirtschaft	24
3.1 Sächsische Fokusbranchen der Dekarbonisierung	24
3.2 Weitere Bearbeitung in Branchensteckbriefen	25
4 Allgemeiner Aufbau und Handhabung der Steckbriefe	26
4.1 Steckbrief: Branchen-übergreifende Technologien	26
4.2 Branchen- und Handwerks-steckbriefe	26
5 Steckbrief: Branchenübergreifende Technologien und Prozesse	30
5.1 Technologieübersicht: Branchen-übergreifende Technologien	31
5.2 Efficiency First: Übergreifende Energieeffizienzmaßnahmen	31
5.3 Transformationsmaßnahmen für Prozess- & Raumwärme, Warmwasser & Mobilität	32
5.3.1 Wärmebereitstellung	33
5.3.2 Mobilität	34
5.3.3 Allgemeine infrastrukturelle Anforderungen	34
6 Branchensteckbrief: Glas, Keramik, Verarbeitung von Steinen & Erden (WZ 23)	43
6.1 Branchenübersicht: Glas, Keramik, Verarbeitung von Steinen & Erden	43
6.2 Prozesse im Status Quo: Glas, Keramik, Verarbeitung von Steinen & Erden	45
6.3 Transformationstechnologien: Glas, Keramik, Verarbeitung von Steinen & Erden	46
6.4 Transformationspfade: Glas, Keramik, Verarbeitung von Steinen & Erden	47

7	Branchensteckbrief: Papier (WZ 17)	50
7.1	Branchenübersicht: Papier	50
7.2	Prozesse im Status quo: Papier	52
7.3	Transformationstechnologien: Papier	52
7.4	Transformationspfade: Papier	54
8	Branchensteckbrief: DV-Geräte & Uhren (WZ 26)	58
8.1	Branchenübersicht: DV-Geräte und Uhren	58
8.2	Prozesse im Status quo: DV-Geräte & Uhren	60
8.3	Transformationstechnologien: DV-Geräte & Uhren	60
8.4	Transformationspfade: DV-Geräte & Uhren	61
9	Branchensteckbrief: Textilien (WZ 13)	62
9.1	Branchenübersicht: Textilien	62
9.2	Prozesse im Status quo: Textilien	64
9.3	Transformationstechnologien: Textilien	64
9.4	Transformationspfade: Textilien	65
10	Branchensteckbrief: Chemie & Pharma (WZ 20 und 21)	69
10.1	Branchenübersicht: Chemie und Pharma	69
10.2	Prozesse im Status quo: Herstellung von chemischen und pharmazeutischen Erzeugnissen	73
10.3	Transformationstechnologien: Herstellung von chemischen und pharmazeutischen Erzeugnissen	74
10.4	Transformationspfade: Chemie II und Pharma	75
11	Branchensteckbrief: Gummi & Kunststoffe (WZ 22)	81
11.1	Branchenübersicht: Gummi und Kunststoffe	81
11.2	Prozesse im Status quo: Gummi und Kunststoffe	83
11.3	Transformationstechnologien: Gummi und Kunststoffe	84
11.4	Transformationspfade: Gummi und Kunststoffe	85
12	Branchensteckbrief: Metallverarbeitung (WZ 25)	89
12.1	Branchenübersicht: Metallverarbeitung	89
12.2	Prozesse im Status quo: Metallverarbeitung	91
12.3	Transformationstechnologien: Metallverarbeitung	93
12.4	Transformationspfade: Metallverarbeitung	93
13	Branchensteckbrief: Maschinenbau (WZ 28)	97
13.1	Branchenübersicht: Maschinenbau	97
13.2	Prozesse im Status quo: Maschinenbau	99
13.3	Transformationstechnologien: Maschinenbau	100
13.4	Transformationspfade: Maschinenbau	101

14 Branchensteckbrief: Ernährung (WZ 10 und 11)	104
14.1 Branchenübersicht: Ernährung	104
14.2 Prozesse im Status quo: Ernährung (Lebensmittel-produktion)	107
14.3 Transformationstechnologien: Ernährung (Lebensmittel-produktion)	109
14.4 Transformationspfade: Ernährung	109
15 Handwerkssteckbrief: Bäcker	113
15.1 Branchenübersicht: Bäcker	113
15.2 Prozesse im Status quo: Bäcker	115
15.3 Transformationstechnologien: Bäckereien	115
16 Handwerkssteckbrief: Fleischer	117
16.1 Branchenübersicht: Fleischer	117
16.2 Prozesse im Status quo: Fleischer	118
16.3 Transformationstechnologien: Fleischer	119
17 Handwerkssteckbrief: Textilreiniger	122
17.1 Branchenübersicht: Textilreiniger	122
17.2 Prozesse im Status quo: Textilreiniger	123
17.3 Transformationstechnologien: Textilreiniger	124
18 Break-Even-Rechnungen: Beispielhafte Wirtschaftlichkeitsberechnungen	128
18.1 Überblick zu Methoden der Wirtschaftlichkeitsbewertung	128
18.2 Kapitalwertberechnung nach der VALERI-Norm	128
18.3 Beispielhafte Break-Even-Rechnungen	129
18.3.1 Wärmepumpe bei variablem Zinssatz	129
18.3.2 Hochtemperatur-Wärmepumpe – Variation der Investitionszeitpunkt	132
18.3.3 Wasserstoffkessel – Unsicherheiten im Wasserstoffpreis	133
18.3.4 Anmerkungen Investitionskosten	134
19 Interaktionsprozesse mit der vorgelagerten Netzinfrastruktur: Rechtlich-regulatorische Einordnung	135
19.1 Vorgelagerte Netzinfrastruktur: Strom	135
19.1.1 Reform der Netzentgelte im Strombereich	135
19.1.2 Netzanschluss	142
19.1.3 Rechtliche Einordnung des Kundenanlagenbegriffs	143
19.2 Vorgelagerte Netzinfrastruktur: Gas/Wasserstoff	145
19.2.1 Planungsverantwortlichkeit der Verteilernetzbetreiber	146
19.2.2 Anschlussverweigerung und -kündigung: Gasverteilernetze	150
19.2.3 Finanzierung von Wasserstoffnetzen außerhalb des Kernnetzes	152
19.2.4 Bestehende Konzessionsverträge als Dekarbonisierungshindernis	153
19.3 CCU/CCS	154
19.4 Literaturverzeichnis zum rechtlichen Teil	155

20 Fazit & Ausblick: Dekarbonisierung der Wirtschaft als Gemeinschaftsaufgabe	158
20.1 Fazit der techno-ökonomischen und regulatorischen Betrachtung	158
20.2 Ausblick und Handlungsfelder	159
21 Literaturverzeichnis	161
22 Abbildungsverzeichnis	169
23 Tabellenverzeichnis	172
Anhang	175
23.1 Branchenzuordnung	175

1 Ziel ist eine praxistaugliche Unterstützung der sächsischen Wirtschaft bei der Dekarbonisierung

Die Dekarbonisierung der Industrie und des Handwerks stellt eine zentrale Voraussetzung für die Erreichung der Klimaziele dar. Sie ist verbunden mit prozesstechnischen und infrastrukturellen Aufgaben – auch für die sächsische Wirtschaft. Um tragfähige Dekarbonisierungspfade zu entwickeln, müssen techno-ökonomische Optionen identifiziert und bewertet, sowie Wechselwirkungen mit der Energieinfrastruktur analysiert werden.

Die Verringerung der CO₂-Emissionen zur Begrenzung der Klimaerwärmung ist eine globale, gesamtgesellschaftliche Aufgabe, zu deren Lösung alle Bereiche beitragen müssen. Eine vollständige Dekarbonisierung der Wertschöpfungsketten in Industrie und Handwerk nach den europäischen und nationalen Zielstellungen bedeutet eine enorme Herausforderung und hohen Handlungsdruck für die industriellen Akteure. Zusätzlich zu den regulatorischen Zielsetzungen des europäischen Klimagesetzes [1] und des deutschen Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) [2] wird die Transformation des Industriesektors vor allem von der Entwicklung des EU-Emissionshandels (ETS) getrieben. Diese Vorgaben gelten auch für die sächsische Wirtschaft und stellen diese vor große Hürden in der Praxis.

Die beschriebenen regulatorischen Zwangsbedingungen erfordern wirtschaftlich tragfähige Konzepte zur CO₂-Vermeidung in der gesamten Wirtschaft und Industrie. Die Umsetzung dieser regulatorischen Vorgaben steht jedoch unter dem Vorbehalt technischer und betriebswirtschaftlicher Zwangsbedingungen. Die diversen Dekarbonisierungsoptionen sowohl für die verschiedensten spezifischen Produktionsprozesse als auch für branchenübergreifende Technologien müssen rechtzeitig für die entsprechenden Investitionszyklen am Markt verfügbar und wirtschaftlich umsetzbar sein. Neben den Investitionskosten (CAPEX) sind auch die Betriebskosten (OPEX), und dabei insbesondere die zukünftigen Energieträgerpreise und -verfügbarkeiten ausschlaggebend, um ideale Investitionszeitpunkte zu bestimmen und aus Unternehmenssicht die Entscheidung für konkrete Dekarbonisierungspfade zu treffen.

Vor allem die Energieträgerverfügbarkeit hängt dabei stark von infrastrukturellen Voraussetzungen, wie dem Anschluss an eine Wasserstoffinfrastruktur, ab. Damit steht die Transformation der Wirtschaft in Wechsel-

wirkung mit und in Abhängigkeit von der vorgelagerten Energieinfrastruktur. Diese hat wiederum ebenfalls eigene technische, betriebswirtschaftliche und regulatorische Anforderungen zu bewältigen.

Zielstellung

Eine erfolgreiche Transformation der sächsischen Wirtschaft erfordert das wissenschafts- und faktenbasierte Herausarbeiten von Tendenzen, Zusammenhängen, Schwierigkeiten und Hindernissen, sowie ein öffentlichkeitswirksame Präsentation dieser Erkenntnisse. Daraus resultieren Handlungsbedarfe und die nächsten Schritte für die Akteur:innen aus Industrie, Energiewirtschaft und Politik.

Dazu werden die relevanten Branchen und die wichtigsten Prozesse in diesen Branchen identifiziert, mögliche Dekarbonisierungspfade aufgezeigt und berechnet. Anschließend können die Auswirkungen auf und die Anforderungen an die Energieinfrastruktur formuliert werden. Effiziente Dekarbonisierungspfade müssen dabei auch Möglichkeiten sogenannter XX-ready Technologien, Teiltransformationen und die Wechselwirkung mit vorgelagerter Energieinfrastruktur betrachten. Für eine robuste Datengrundlage und zur Sicherstellung der Akzeptanz der Studienergebnisse, muss der gesamte Prozess begleitend die verschiedenen Interessen und beteiligten Stakeholder einbinden.

Wir präsentieren mit dieser Studie Dekarbonisierungsoptionen der sächsischen Wirtschaft und ziehen Rückschlüsse auf die notwendigen Interaktionsprozesse mit den Betreibern der vorgelagerten Energieinfrastruktur.

Dabei stehen vier Ziele im Vordergrund:

1. Identifizierung und techno-ökonomische Bewertung von Dekarbonisierungsoptionen für die sächsische Wirtschaft.
2. Aufzeigen der Auswirkung von Dekarbonisierungspfaden auf Energiebedarfe und Anschlussleistungen.
3. Präsentation und Diskussion der Ergebnisse mit den sächsischen Akteuren aus Industrie, Handwerk, Politik und Energiewirtschaft.
4. Schaffung einer Grundlage zur Ableitung von Handlungsbedarfen für die weitere Dekarbonisierung der sächsischen Wirtschaft.

Aufbau der Studie

Diese Studie startet mit einer anschaulichen Darstellung der Transformationsbemühungen in der Praxis anhand des **Fallbeispiels** der Papierfabrik Louisenthal (Kapitel 2). Dieses Kapitel gibt einen exemplarischen Einblick und zeigt die Notwendigkeit dafür, dass bei der Umsetzung von Dekarbonisierungsoptionen immer auch die zugehörige vorgelagerte Infrastruktur berücksichtigt werden muss.

Anschließend gibt Kapitel 3 anhand statistischer Kenngrößen einen Überblick über den **Status quo** der sächsischen Wirtschaft und begründet die Auswahl der weiteren Fokusbranchen.

Kapitel 4 zeigt den methodischen Aufbau der einzelnen **Steckbriefe**, bevor zunächst der für alle Branchen geltende Steckbrief zu branchenübergreifenden Technologien und Prozessen (Kapitel 5) folgt. Anschließend zeigen die Steckbriefe der Kapitel 6 bis 14 branchenspezifische Dekarbonisierungsoptionen für die ausgewählten Fokusbranchen bzw. für die betrachteten Handwerke in Kapitel 15 bis 17.

Kapitel 18 gibt sowohl eine Einführung in Methoden der **Wirtschaftlichkeitsbewertung**, als auch beispielhafte Rechnungen, um Unternehmen zu befähigen, anhand ihrer eigenen, standortspezifischen Rahmenbedingungen robuste Grundlagen für ihre Investitionsentscheidungen erstellen zu können.

Die **rechtliche Einordnung** der Interaktionsprozesse mit der vorgelagerten Netzinfrastruktur folgt in Kapitel 19. Schwerpunkte bilden dabei die Energieträger Strom, sowie Gas und Wasserstoff. Der Bereich der CO₂-Abscheidung (CCUS) wird überblicksmäßig dargestellt.

Im abschließenden **Fazit mit Ausblick** fasst Kapitel 20 die Kernergebnisse zusammen und setzt Anreize für die möglichen nächsten Schritte auf dem Dekarbonisierungspfad der sächsischen Wirtschaft.

2 Dekarbonisierung in der Praxis: Papierfabrik Louisenenthal, Werk Königstein

Die Papierfabrik Louisenenthal in Königstein verfolgt sowohl aufgrund unternehmensinterner Zielsetzungen als auch aus den Anforderungen der Kunden heraus eine ambitionierte Dekarbonisierungsstrategie. Die dafür notwendige Elektrifizierung der Prozesse geht in der Praxis mit Hürden einher, die exemplarisch und sehr spezifisch zeigen, welche Randbedingungen bei der Umsetzung von Dekarbonisierungsmaßnahmen im Wege stehen können.

Die Betrachtung des Fallbeispiels der Papierfabrik Louisenenthal zeigt plakativ die Notwendigkeit der vorliegenden Studie auf. Die technischen Möglichkeiten für eine Dekarbonisierung der Papierfabrik sind vorhanden, jedoch erschweren bzw. verhindern wirtschaftliche und infrastrukturelle Rahmenbedingung eine Umsetzung in der Praxis.

Zunächst erfolgt eine Unternehmensvorstellung sowie die Beschreibung der techno-ökonomischen Anforderungen und der schrittweisen Abfolge auf dem Weg zur Dekarbonisierung des Standortes. Anschließend werden die fallspezifischen regulatorischen Zwangspunkte mit Blick auf die Netzanschlussverweigerungen, das Planungs- und Genehmigungsrecht, sowie die Möglichkeiten eines Industriestrompreises aufgezeigt.

2.1 Unternehmensvorstellung

Am Standort Königstein ist bereits seit einigen Jahrhunderten eine Papierproduktion angesiedelt. Nach Eingliederung in die G+D Gruppe wird seit 1997 unter dem heutigen Namen Papier hergestellt.

Unternehmensprofil:

Die Papierfabrik Louisenenthal GmbH als Hersteller von Banknoten- und Sicherheitspapier

Die Papierfabrik Louisenenthal GmbH ist ein Tochterunternehmen des Konzerns Giesecke + Devrient (G+D), welcher in den Bereichen Digital Security, Financial Platforms und Currency Technology global aufgestellt ist, und stellt Banknoten- und Sicherheitspapiere sowie Sicherheitselemente her. Sie ist damit Lieferant für mehrere Regierungen und Zentralbanken (u. a. die EZB). In Deutschland betreibt das Unternehmen zwei Standorte: Eine namensgebende Papierfabrik in Gmund am Tegernsee (Louisenenthal) und eine in

Königstein (Sachsen). An beiden Standorten arbeiten insgesamt ca. 1.100 Mitarbeiter:innen und die jährliche Gesamtkapazität beläuft sich auf über 20.000 Tonnen Rundsiebpapier. Während am Standort Königstein zwei Papiermaschinen zur Herstellung von Sicherheits- und Passpapieren betrieben werden, wird in Gmund am Tegernsee mit einer Papiermaschine Papier für Banknoten von ca. 200 Währungen hergestellt. [37] [38]

Das Unternehmen steht dabei **nicht** repräsentativ für die klassische Papierindustrie. Viele Papierhersteller haben derzeit wirtschaftliche Schwierigkeiten aufgrund hoher Energiepreise. Die abweichende Kundenstruktur aus Zentralbanken und staatlichen Organen hingegen fordert aktiv die Dekarbonisierung der Herstellungsprozesse ein und weist die entsprechende Zahlungsbereitschaft auf.

Der Standort im Königstein

Bereits seit über 450 Jahren wird am Standort Königstein Papier produziert – zunächst mit einer Papiermühle und seit Mitte des 19. Jahrhunderts per Papiermaschine. Bereits zwischen 1914 und 1944 wird am Standort Banknotenpapier produziert, bevor im Rahmen der Reparationszahlungen nach dem zweiten Weltkrieg die Maschinen demontiert und in die Sowjetunion verlagert werden.

Der Standort wird als „VEB Feinpapierfabrik Königstein“ wieder aufgebaut und ab 1969 produziert er Papier für Banknoten und Ausweisdokumente der DDR. Nach der Wende wird das Werk in die G+D Gruppe eingegliedert und die Produktpalette an das internationale Banknoten- und Sicherheitspapiersortiment angepasst. 1997 erhält der Standort den Namen „Papierfabrik Louisenenthal, Werk Königstein“. Mit Inbetriebnahme einer neuen Papiermaschine im Jahr 2009 hat der Standort die schnellste und modernste Banknoten-Papiermaschine der Welt. [39]

2.2 Techno-ökonomische Betrachtung der Dekarbonisierungsoptionen

Die Vorgehensweise auf dem Dekarbonisierungspfad des Standortes Königstein kann in drei Schritten von der Erfassung des Status quo, über die Identifizierung und Auswahl von Dekarbonisierungstechnologien bis zur praktischen Umsetzung beschrieben werden.

Schritt 1: Erfassung des Status quo

Für die Prozesse der Papierherstellung ist Heißdampf notwendig (siehe Branchensteckbrief Papier, Kapitel 0), zum einen um die Rohstoffe (bspw. in der Faserdispersion) zu erwärmen und zum anderen um die Papierbahnen über direkte und/oder indirekte Verfahren zu trocknen. Dieser Dampf wird am Standort Königstein derzeit über ein erdgasbefeuertes Kraftwerk bereitgestellt. Die Papierfabrik wird ganzjährig mit ca. 8.000 Betriebsstunden nahezu durchgängig betrieben.

Der jährliche Gasbedarf liegt bei ca. 64 GWh, der Strombedarf bei ca. 40 GWh. Derzeit hat der Standort eine Netzanschlusskapazität von 11 MW_{el} in der Mittelspannung. Bereits heute wird der Strombezug des Standortes über Zertifikate (Herkunftsnachweise) bilanziell CO₂-neutral gestellt.

Schritt 2: Transformationstechnologien und Entscheidung für einen Dekarbonisierungspfad

Der Antrieb zur Dekarbonisierung des Standortes hat drei Ursachen: Neben den unternehmenseigenen Zielsetzungen fordern auch die Kunden zunehmend CO₂-freie Herstellungsprozesse ein. Hinzu kommt der EU-ETS I: Im Jahr 2022 mussten am Standort Emissionszertifikate für 12 kt CO₂ nachgewiesen werden. Für 9 kt davon stammten diese aus der freien Zuteilung, die jedoch bis 2034 auslaufen wird.

Um die CO₂-Emissionen am Standort zu senken, muss insbesondere der Erdgaskessel zur Dampferzeugung ersetzt werden. Dazu wurden in einer intern durchgeführten Studie verschiedene Dekarbonisierungstechnologien geprüft:

- **Brennstoffwechsel zu Wasserstoff:**
Vor 2035 wird am Standort kein Anschluss an ein Wasserstoffnetz erwartet. Damit können die unternehmenseigenen Zielsetzungen jedoch nicht rechtzeitig erreicht werden.
- **Geothermie:**
Anders als beim zweiten Standort in Gmund gibt es keine geeigneten Geothermievorkommen in der Region, weshalb diese Option für den Standort Königstein nicht in Frage kommt.

- **Elektrodenkessel:**

Die Umstellung auf einen reinen Elektrodenkessel ist im Ergebnis in der internen Studie die sinnvollste Variante zur CO₂-freien Dampferzeugung. Die Kombination mit einer (Groß-)Wärmepumpe war zum Zeitpunkt der Berechnung für den notwendigen Leistungs- und Temperaturbereich nicht sinnvoll, kann aber ggf. erneut in Betracht gezogen werden.

Fazit: In der Praxis sollen aus Redundanzgründen zwei Elektrodenkessel mit jeweils 5 MW installierter Leistung die Dampferzeugung übernehmen.

Die internen Berechnungen zeigen, dass damit der bisherige Gasbedarf nahezu identisch als Strombedarf anfällt. Somit steigt der gesamte Strombedarf des Standortes auf ca. 104 GWh. Um diesen Mehrbedarf zu decken, wurden zunächst diverse Optionen geprüft:

- **PV-Eigenerzeugung am Standort:**
Auch unter Ausnutzung aller verfügbaren Dach- und Freiflächenpotenziale können in Summe max. 8 % des erwarteten Strombedarfs gedeckt werden.
- **(Beteiligung an) Windenergieanlagen (WEA):**
Durch die Tallage des Standorts sind keine günstigen Bedingungen für WEA gegeben. Hinzu kommt, dass Unsicherheiten bei der Preisbindung keine zuverlässige Planung erlauben.
- **Power Purchase Agreements (PPAs):**
Die direkte Stromabnahme beim Erzeuger über PPAs wurde ebenfalls geprüft und verworfen.

Fazit: Um den Strombedarf zu decken, verbleibt die Erhöhung des externen Strombezugs.

Schritt 3: Idealvorstellung vs. praktische Hürden des Transformationspfads – Sonderweg der Papierfabrik

Von den vorhandenen 11 MW Anschlussleistung am Standort werden ca. 8 MW genutzt. Es bleibt demnach ein Puffer von ca. 3 MW, um bereits jetzt theoretisch die elektrische Last erhöhen zu können. Für die vollständige Elektrifizierung ist die verbleibende Kapazität jedoch nicht ausreichend. Daher ist der Neubau einer Mittelspannungszuleitung zwischen der Papierfabrik in Königstein (3) und der Netzanschlussstelle des Verteilnetzbetreibers SachsenNetze in Leupoldishain (2) notwendig, um die Anschlussleistung des Standorts auf 22 MW zu erhöhen. Die SachsenNetze wiederum wird am Netzanschlusspunkt Dresden Süd (1) an das Übertragungsnetz (380 kV) des Übertragungsnetzbetreibers 50Hertz angeschlossen (siehe Abbildung 2-1).



Abbildung 2-1: Übersicht der für die Papierfabrik relevanten Hoch- und Höchstspannungsleitungen.

Idealerweise gibt es bereits in der Planungs- und später auch in der Ausführungsphase einen beidseitig verbindlichen Maßnahmenplan zwischen Netzbetreiber und Unternehmen inklusive enger Abstimmung, um nach der Anmeldung der notwendigen Netzkapazitäten und unter Beteiligung mittels Baukostenzuschuss eine rechtzeitigen Anschluss an das Netz sicherzustellen.

Der zuständige Verteilnetzbetreiber (SachsenNetze) rechnete im konkreten Fall für die Erweiterung der Netzanschlusskapazitäten zunächst mit 7 Jahren. Trotz zwischenzeitlicher Beschleunigung ist nach derzeitigem Stand mit einer Netzanschlusserweiterung für den Standort Königstein nicht vor 2028/29 zu rechnen.

Um die Elektrifizierung des Standortes umsetzen zu können, hat sich die Papierfabrik dazu entschieden, eine eigene Stromleitung bis zur Netzanschlussstelle in Leupoldishain zu verlegen. In Zusammenarbeit mit dem Verteilnetzbetreiber wurden dafür die

notwendigen Genehmigungen der Baubehörden eingeholt, um entgegen des üblichen Vorgehens eine Strominfrastruktur durch ein privates Unternehmen verlegen zu können. Dies muss außerdem zeitnah durchgeführt werden, bevor die dafür aufzubaggernde Straße als Umleitung für ein weiteres Bauvorhaben gilt und somit einen Bau verhindern würde.

Das entsprechende Grundstück der SachsenNetze in Leupoldishain wird vom Netzbetreiber vollständig selber beansprucht, weshalb die Papierfabrik aktuell einen Anteil eines Grundstücks (ca. 80 m²) im Gewerbepark Leupoldishain erwirbt. Andere in Frage kommende Ausweichflächen sind zu weit weg vom Anschlusspunkt der SachsenNetze. Um auf dem gewählten Grundstück bauen zu können, muss aktuell der Bebauungsplan unter Federführung der Gemeinde angepasst werden.

Summa summarum: Kosten des Transformationspfades und Wirtschaftlichkeit

Für das gesamte Vorhaben kalkuliert die Papierfabrik derzeit mit Gesamtkosten von rund 14 Mio. €. Nach aktuellem Stand ist eine Amortisation unter den aktuellen Rahmenbedingungen nach interner Bewertung nicht absehbar, solange die Strompreise deutlich über den Gaspreisen liegen. Die Kosten setzen sich aus Planung, Genehmigungen, Gebühren, Energiekosten sowie CO₂-Zertifikatskosten zusammen. Insbesondere die Stromkosten stellen einen kritischen Faktor dar: Sie liegen aktuell beim Drei- bis Vierfachen der Gaskosten. Zusätzlich ist für den Stromeinkauf mittelfristig weiterhin die Beschaffung von Herkunftsnachweisen erforderlich.

Exkurs: Energieflexibilitätpotenziale und hybride Energieversorgung

Eine **flexible Fahrweise** der Produktion – beispielsweise orientiert an den Strompreisen am Spotmarkt – wurde intern geprüft mit dem Ergebnis, dass eine flexible Produktion im konkreten Fall zum Zeitpunkt der Bewertung höhere Mehrkosten als finanziellen Nutzen verursacht. Ursache dafür sind unter anderem zeitlich begrenzte Vertragskonzepte mit dem Energieversorger, die keine langfristige Planung erlauben, sowie fehlende Wirtschaftlichkeit und zu hoher Platzbedarf von Batteriespeichern, um damit die Energieversorgung am Standort zu decken. Eine regelmäßige Aktualisierung bei sich ändernden Rahmenbedingungen ist dennoch zu empfehlen.

Ein **hybrider Betrieb** – also die parallele Möglichkeit sowohl Gas als auch Strom als Energieträger einsetzen zu können – wurde insbesondere für die Übergangszeit bis zum „all electric“ Zielbild ebenfalls geprüft. Jedoch verhindern auch in diesem Fall die Vertragskonditionen mit den Energieversorgern die Umsetzung: Für einen hybriden Betrieb würden sowohl Gas- als auch Stromversorger eine vollständige Versorgung mit nur einem der beiden Energieträger vorhalten müssen. Damit steigen die spezifischen Energiekosten – abhängig u.a. von Maximallast und durchschnittlichem Bezug.

Die bereits beauftragten Investitionen umfassen den Grundstückskauf, die Mess- und Übergabeeinrichtung sowie den Bau der Mittelspannungsleitung und haben ein Volumen von etwa 3,5 Mio. €.

Für die Gebäudekosten, Anlagentechnik, werksinterne Infrastruktur und die beiden Elektrodenkessel liegen Angebote vor, die sich insgesamt auf rund 10,5 Mio. € belaufen. Damit ist dieser Kostenpunkt etwa doppelt so hoch wie zunächst in einer Machbarkeitsstudie zu Jahresbeginn angenommen. Grund dafür ist die aktuell starke Nachfrage nach elektrischen Betriebsmitteln wie Schaltanlagen und ähnlichem, was zu höheren Preisen und längeren Lieferzeiten führt.

2.3 Rechtliche Einordnung

Bei der zuvor beschriebenen Umsetzung von Dekarbonisierungsmaßnahmen müssen rechtlich-regulatorische Rahmenbedingungen beachtet werden. Von diesen werden

- die Verweigerung des Netzan schlusses (Kapitel 2.3.1),
- das Planungs- und Genehmigungsrecht (Kapitel 2.3.2) und
- finanzielle Entlastungsmöglichkeiten durch den Industriestrompreis (Kapitel 2.3.3)

im Folgenden genauer beleuchtet.

2.3.1 Verweigerung des Netzan schlusses als Dekarbonisierungshindernis

Der Netzan schluss umfasst die technische Anbindung an ein Netz, d. h. die Abzweigstelle oder den Ausspeisepunkt, an dem Energie aus einem Netz eines Netzbetreibers entnommen, eingespeist oder an ein anderes Netz übergeben wird.¹ Als physische Anbindung der jeweiligen Anlage des Kunden an das Netz² ist der Netzan schluss mithin die „**tatsächliche und rechtliche Voraussetzung für einen Netzzugang**“³. Da der An schluss an das Netz folglich zwingend notwendig ist, um energiewirtschaftlich tätig werden zu können, bildet der Anspruch auf Netzan schluss eine der grundlegenden Regelungen im deutschen Energierecht.⁴ Die Entscheidung, ob der Netzan schluss gewährt wird,

liegt daher nicht im Ermessen der Netzbetreiber.⁵ Das Energiewirtschaftsgesetz⁶ (EnWG) verpflichtet sie vielmehr grundsätzlich zur Herstellung des Anschlusses für jeden potenziellen Anschlussnehmer, auch Anschlusspetenten genannt.⁷

Gleichwohl kommt es in der Praxis immer wieder zu Konflikten, wenn Netzbetreiber den Anschluss verzögern oder verweigern. Solche Streitfälle betreffen nicht nur die individuelle Rechtsposition der Anschlusspetenten, sondern wirken zunehmend als Hemmnis für die Dekarbonisierung, da insbesondere erneuerbare Energien und neue Verbrauchsanlagen auf zeitnahe Netzan schlüsse angewiesen sind. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden die **gesetzlichen Vorgaben zum Netzan schluss** sowie insbesondere die **rechtlich zulässigen Gründe für eine Anschlussverweigerung** näher erläutert.

Anspruch auf Netzan schluss

Das EnWG regelt den Anspruch auf einen Netzan schluss abhängig von der jeweiligen Spannungs- bzw. Druckebene in unterschiedlichen Vorschriften. Während § 18 EnWG die allgemeine Anschlusspflicht für Niederspannungs- und Niederdruckanschlüsse normiert und insoweit als speziellere Regelung gegenüber § 17 EnWG gilt, betrifft § 17 EnWG den Netzan schluss in den vorgelagerten, höheren Netzebenen.⁸

Papierfabriken werden aufgrund ihres hohen Energiebedarfs typischerweise nicht über das Niederspannungsnetz versorgt, sondern an das Mittelspannungsnetz angeschlossen. Da damit regelmäßig ein Anschluss oberhalb der Niederspannungsebene vorliegt, ist nicht § 18 EnWG, sondern § 17 EnWG einschlägig. Im Folgenden wird daher ausschließlich § 17 EnWG herangezogen, wobei der Fokus – beziehungsweise auf die zuvor dargestellte Umsetzung von Dekarbonisierungsmaßnahmen – auf den **Anschluss an Elektrizitätsnetze** gelegt wird.

Adressaten der Anschlussverpflichtung sind gemäß § 17 Abs. 1 S. 1 EnWG **Betreiber von Energieversorgungsnetzen** (§ 3 Nr. 4 EnWG). Im Elektrizitätsbereich sind davon Betreiber von Elektrizitätsversorgungsnetzen (§ 3 Nr. 2 EnWG) erfasst. Neben den Übertragungsnetzbetreibern (Transport von Elektrizität auf

¹ OLG Düsseldorf, EnWZ 2013, 132 (135); Held/Schäfer-Stradowsky, Energierecht und Energiewirklichkeit, Rn. 415.

² de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 125; Held/Schäfer-Stradowsky, Energierecht und Energiewirklichkeit, Rn. 414.

³ BT-Drs. 15/3917, S. 58.

⁴ Marquering, in: BeckOK EnWG, Vor § 17.

⁵ Held/Schäfer-Stradowsky, Energierecht und Energiewirklichkeit, Rn. 417.

⁶ Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Februar 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 51) geändert worden ist.

⁷ Held/Schäfer-Stradowsky, Energierecht und Energiewirklichkeit, Rn. 417.

⁸ Schnurre, in: BeckOK EnWG, § 18 Rn. 11.

Höchst- und Hochspannungsebene) sind auch Betreiber von Verteilernetzen (Transport von Elektrizität auf Hoch-, Mittel- oder Niederspannungsebene) zum Netzanschluss verpflichtet.⁹

Diese müssen nach § 17 Abs. 1 S. 1 EnWG insbesondere **Letztverbraucher** zu technischen und wirtschaftlichen Bedingungen an ihr Netz anschließen, die angemessen, diskriminierungsfrei, transparent und nicht ungünstiger sind, als sie von den Betreibern der Energieversorgungsnetzen in vergleichbaren Fällen für Leistungen innerhalb ihres Unternehmens oder gegenüber verbundenen oder assoziierten Unternehmen angewendet werden. Letztverbraucher werden in § 3 Nr. 25 EnWG legaldefiniert als natürliche oder juristische Personen, die Energie für den eigenen Verbrauch kaufen. Zu den Anschlussberechtigten im Elektrizitätsbereich zählen darüber hinaus gleich- oder nachgelagerte Elektrizitätsversorgungsnetze sowie -leitungen, Ladepunkte für Elektromobile, Erzeugungsanlagen und Anlagen zur Speicherung elektrischer Energie.

Sobald der Anschluss hergestellt wurde, ergibt sich aus dem mit dem Anschlusspetenten geschlossenen **Netzanschlussvertrag** eine Dauerverpflichtung des Netzbetreibers.¹⁰

Verweigerung des Netzanschlusses

Die Verpflichtung zur Herstellung des Netzanschlusses stellt einen Eingriff in die Grundrechte der Netzbetreiber dar.¹¹ Damit dieser verhältnismäßig ist, darf der Netzanschluss unter bestimmten – engen – Voraussetzungen abgelehnt werden¹²: So sind Netzbetreiber nach § 17 Abs. 2 S. 1 EnWG berechtigt, den Netzanschluss zu verweigern, soweit sie nachweisen, dass ihnen die Gewährung des Netzanschlusses aus **betriebsbedingten** oder sonstigen **wirtschaftlichen oder technischen Gründen nicht möglich oder nicht zumutbar** ist. Es handelt sich hierbei um **Ausnahmegründe**.¹³ Der Netzbetreiber trägt die Beweislast.¹⁴

Die Verweigerungsgründe werden durch den Gesetzgeber nicht näher definiert.¹⁵ Daher wird im Rahmen

der Auslegung im Folgenden auf Rechtsprechung und Literatur zurückgegriffen.¹⁶ Allgemein ist festzustellen, dass der Netzbetreiber grundsätzlich verpflichtet ist, den gewünschten Bedingungen des Anschlusspetenten zu entsprechen.¹⁷ Dabei gilt: Nicht nur die vollständige Verweigerung des Netzanschlusses, sondern auch das Angebot, den Anschluss lediglich zu anderen als den begehrten Bedingungen herzustellen – etwa auf einer anderen Spannungsebene –, stellt eine Verweigerung im Sinne des § 17 Abs. 2 EnWG dar.¹⁸

Technische und betriebsbedingte Gründe

Grundsätzlich gilt, dass technische und betriebsbedingte Verweigerungsgründe nicht trennscharf voneinander abgegrenzt werden können.¹⁹ Für die Frage, ob technische Gründe eine Verweigerung des Netzanschlusses rechtfertigen können, können die Vorgaben der §§ 19, 49 EnWG herangezogen werden.²⁰ Nach § 19 Abs. 1 S. 1 EnWG sind Betreiber von Elektrizitätsversorgungsnetzen verpflichtet, unter Berücksichtigung der nach § 17 EnWG festgelegten Bedingungen für den Netzanschluss, technische Mindestanforderungen an deren Auslegung und deren Betrieb (technische Anschlussbedingungen) festzulegen und im Internet zu veröffentlichen. Dabei haben Betreiber von Elektrizitätsversorgungsnetzen gemeinsam allgemeine technische Mindestanforderungen zu erstellen (§ 19 Abs. 4 S. 1 EnWG). Diese Mindestanforderungen über die technischen Anschlussbedingungen werden sodann in den Netzanschlussvertrag oder in das sonstige dem Netzanschluss zugrunde liegende Schuldverhältnis einbezogen (§ 19 Abs. 1 S. 2 EnWG). § 49 Abs. 1 S. 1, 2 EnWG sieht überdies vor, dass Energieanlagen – unter Beachtung der allgemein anerkannten Regeln der Technik – so zu errichten und zu betreiben sind, dass die technische Sicherheit gewährleistet ist.

Technische Gründe können insbesondere dann vorliegen, wenn der Anschlusspetent einen Anschluss auf einer „falschen“ Netzebene begehrt.²¹

⁹ de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 128.

¹⁰ de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 130.

¹¹ Marquering, in: BeckOK EnWG, § 17 Rn. 44.

¹² Marquering, in: BeckOK EnWG, § 17 Rn. 44.

¹³ Marquering, in: BeckOK EnWG, § 17 Rn. 44.

¹⁴ de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 165.

¹⁵ de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 166.

¹⁶ de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 166.

¹⁷ Marquering, in: BeckOK EnWG, § 17 Rn. 46.

¹⁸ Marquering, in: BeckOK EnWG, § 17 Rn. 46.

¹⁹ de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 167.

²⁰ de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 167.

²¹ Bourwieg, in: Bourwieg/Hellermann/Hermes, EnWG, § 17 Rn. 80.

Technische Unmöglichkeit ist gegeben, wenn der Anschluss von dem Netzbetreiber dauerhaft unter den begehrten Voraussetzungen nicht ausgeführt werden kann.²² Da § 1 Abs. 1 EnWG insbesondere vorsieht, dass eine sichere Energieversorgung gewährleistet werden muss, kann technische Unmöglichkeit vorliegen, wenn der Netzanschluss dazu führen würde, dass die Sicherheit des Netzbetriebs nicht mehr aufrechterhalten werden könnte.²³ Ausreichend ist, dass es dem Netzbetreiber im konkreten Fall nicht möglich ist, den Anschluss durchzuführen (sogenannte subjektive Unmöglichkeit).²⁴ Zu beachten ist, dass im Falle technischer Gründe hohe Hürden an die Darlegungslast des Netzbetreibers gestellt werden.²⁵ Es reicht nicht aus, dass eine Anlage neu ist oder möglicherweise Anpassungen im Betriebsablauf erforderlich werden.²⁶

Sofern die Umsetzung des begehrten Netzanschlusses mit einem unverhältnismäßig hohen technischen Aufwand für den Netzbetreiber im Vergleich zu dem potenziellen Vorteil für den Anschlusspetenten verbunden ist, kann von **technischer Unzumutbarkeit** ausgegangen werden.²⁷ Diese kann beispielsweise angenommen werden, wenn der gewünschte Netzanschluss eine erhebliche Modifizierung der Netzstruktur bedingen würde.²⁸ In derartigen Fällen kann keine trennscharfe Abgrenzung zwischen der technischen und der wirtschaftlichen Unmöglichkeit erfolgen.²⁹

Netzbetreiber können insbesondere aufgrund **fehlender Anschlusskapazität am Anschlusspunkt** die Herstellung des begehrten Netzanschlusses verweigern.³⁰ Dies ergibt sich aus einem Rückschluss aus § 17 Abs. 2 S. 3 EnWG, wonach die Begründung im Falle eines Kapazitätsmangels auf Verlangen des Anschlusspetenten auch aussagekräftige Informationen darüber enthalten muss, welche Maßnahmen und damit verbundene Kosten zum Ausbau des Netzes im Einzelnen erforderlich wären, um den Netzanschluss

durchzuführen. Umstritten ist, ob bzw. unter welchen Umständen der Netzbetreiber verpflichtet ist, sein Netz auszubauen bzw. zu verstärken, um den begehrten Anschluss umsetzen zu können.³¹ Ob aus dem erweiterten Begründungsaufwand geschlossen werden kann, dass den Netzbetreiber keine Ausbaupflichtung trifft, um den gewünschten Anschluss zu realisieren, wird unterschiedlich beurteilt.³² So wird zum Teil argumentiert, aus der erweiterten Begründungspflicht in § 17 Abs. 2 S. 3 1. Teilsatz EnWG lasse sich entnehmen, dass Netzbetreiber grundsätzlich nicht verpflichtet sind, ihr Netz auszubauen.³³

Ein Fall mangelnder Anschlusskapazität kann sich ergeben, wenn die Netzkurzschlussleistung oder der Abfuhrquerschnitt nicht ausreichen.³⁴ Ein möglicher Hintergrund kann darin liegen, dass eine Erweiterung der vorhandenen Anschlussanlagen technisch nicht möglich oder baurechtlich unzulässig ist.³⁵

Es entspricht der gängigen Praxis, den zeitlich früher geschlossenen Netzanschlussverträgen Vorrang gegenüber später geschlossenen zu gewähren, sofern nicht ausreichend Anschlusskapazität besteht (sogenanntes **Windhundprinzip**).³⁶ Nicht erforderlich im Sinne einer „angemessenen und diskriminierungsfreien Behandlung aller Anschlussnehmer“ nach § 17 Abs. 1 EnWG ist hingegen ein Ausschreibungsverfahren zur Verteilung begrenzter Anschlusskapazitäten.³⁷ Beim Anschluss von EE-Anlagen hingegen sieht § 8 Abs. 1 S. 1 Hs. 1 Gesetz über den Ausbau erneuerbarer Energien³⁸ (EEG 2023) vor, dass Netzbetreiber Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien und aus Grubengas unverzüglich vorrangig an der Stelle an ihr Netz anschließen müssen, die im Hinblick auf die Spannungsebene geeignet ist und die in der Luftlinie kürzeste Entfernung zum Standort der Anlage aufweist, wenn nicht dieses oder ein anderes Netz einen technisch und wirtschaftlich günstigeren

²² Bourwieg, in: Bourwieg/Hellermann/Hermes, EnWG, § 17 Rn. 80; Gerstner, in: Nk-EnWG, § 17 Rn. 50.

²³ Bourwieg, in: Bourwieg/Hellermann/Hermes, EnWG, § 17 Rn. 80; Gerstner, in: Nk-EnWG, § 17 Rn. 50.

²⁴ Gerstner, in: Nk-EnWG, § 17 Rn. 50.

²⁵ Bourwieg, in: Bourwieg/Hellermann/Hermes, EnWG, § 17 Rn. 80.

²⁶ Bourwieg, in: Bourwieg/Hellermann/Hermes, EnWG, § 17 Rn. 80.

²⁷ Gerstner, in: Nk-EnWG, § 17 Rn. 51.

²⁸ Gerstner, in: Nk-EnWG, § 17 Rn. 51.

²⁹ Gerstner, in: Nk-EnWG, § 17 Rn. 51.

³⁰ Bourwieg, in: Bourwieg/Hellermann/Hermes, EnWG, § 17 Rn. 78; de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 169; Marquering, in: BeckOK EnWG, § 17 Rn. 49; Gerstner, in: Nk-EnWG, § 17 Rn. 52.

³¹ Gerstner, in: Nk-EnWG, § 17 Rn. 52.

³² Bourwieg, in: Bourwieg/Hellermann/Hermes, EnWG, § 17 Rn. 78 mwN.

³³ Gerstner, in: Nk-EnWG, § 17 Rn. 52.

³⁴ de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 Rn. 169.

³⁵ de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 Rn. 169.

³⁶ Hartmann/Wagner, in: Theobald/Kühling, Energierecht, § 17 EnWG Rn. 169; de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 Rn. 170.

³⁷ Hartmann/Wagner, in: Theobald/Kühling, Energierecht, § 17 EnWG Rn. 169; de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 170.

³⁸ Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Februar 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 52) geändert worden ist.

Verknüpfungspunkt aufweist. Es besteht folglich ein **Anschlussvorrang für EE-Anlagen**. Um dem nachzukommen, sind Netzbetreiber gemäß § 12 Abs. 3 S. 1 EEG 2023 verpflichtet, ihre Netze zu optimieren, zu verstärken und auszubauen, es sei denn, dies ist wirtschaftlich unzumutbar.

Fehlende Netzkapazität betrifft hingegen die Frage, ob der Netzzugang nach § 20 EnWG verweigert werden kann, und ist für die Verweigerung des Netzan schlusses grundsätzlich nicht relevant.³⁹ In diesem Zusammenhang ist jedoch zu beachten, dass der Netzan schluss und die Anschlussnutzungsverhältnisse, mithin die Netzzugangsverhältnisse, nicht gänzlich unabhängig voneinander zu betrachten sind. Ein technisch realisierter Netzan schluss entspricht nur dann den Anforderungen des § 17 Abs. 1 EnWG, wenn dieser auch sinnvoll in seiner Auslegungskapazität vom Anschlusspetenten genutzt werden kann.⁴⁰ So wird der Anspruch aus § 17 Abs. 1 EnWG auch dahingehend ausgelegt, dass er ebenso einen Anspruch auf Netzan schlusskapazität vermittelt.⁴¹

Neben technischen Gründen können auch weitere Gründe – etwa **betriebsbedingte Umstände** – dazu führen, dass Netzbetreiber den Anschluss verweigern können.⁴² Im Rahmen der betriebsbedingten Verweigerungsgründe ist die **Organisation des Netzbetriebs** zu beachten.⁴³ Voraussetzung ist jedoch, dass derartige Gründe hinsichtlich ihrer Schwere einer technischen oder wirtschaftlichen Unmöglichkeit oder Unzumutbarkeit gleichkommen.⁴⁴ Zur Verweigerung des Netzan schlusses aus betriebsbedingten Gründen sind Netzbetreiber berechtigt, wenn beispielsweise aus der Herstellung des begehrten Netzan schlusses aufgrund technischer Mängel am Netz eine nachweisbare Gefährdung der Betriebssicherheit oder eine Gefährdung für Leib und Leben resultieren würde.⁴⁵ Betriebsbedingte Gründe können sich auch aus objektiv nicht vermeidbarer Personalknappheit ergeben.⁴⁶

An dieser Stelle ist jedoch zu betonen, dass Betreiber von Energieversorgungsnetzen nach § 11 Abs. 1 S. 1 EnWG verpflichtet sind, ein sicheres, zuverlässiges und leistungsfähiges Energieversorgungsnetz zu betreiben, zu warten und bedarfsgerecht zu optimieren, zu verstärken und auszubauen, soweit es wirtschaftlich zumutbar ist. Daraus folgt, dass Netzbetreiber nicht dauerhaft berechtigt sind, Netzan schlussbegehren aufgrund bestehender technischer oder betriebsbedingter Gründe zu verwehren.⁴⁷ Vielmehr sind sie verpflichtet, etwaige Mängel am Netz zu beheben, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten.⁴⁸

Wirtschaftliche Gründe

Auf **wirtschaftliche Unmöglichkeit** kann sich der anschlusspflichtige Netzbetreiber nur in Ausnahmefällen berufen.⁴⁹ Der Grund dafür ist, dass Netzbetreiber die beim Netzausbau entstehenden Kosten von dem Anschlussnehmer zurückfordern oder über die Netzentgelte auf die Kunden umlegen können.⁵⁰ Ein Fall der wirtschaftlichen Unmöglichkeit könnte anzunehmen sein, wenn der Anschlussverpflichtete zeitweise einer hohen Anzahl an Anschlussbegehren nicht nachkommen kann.⁵¹ In diesem Zusammenhang ist das Spannungsverhältnis zwischen der Betriebspflicht des Netzbetreibers nach § 11 Abs. 1 EnWG und den Zielen des EnWG nach § 1 Abs. 1 EnWG zu beachten.⁵² Das EnWG soll demnach insbesondere eine preisgünstige Energieversorgung sicherstellen, die nicht garantiert werden könnte, wenn der begehrte Netzan schluss sich derart ungünstig auf die Entwicklung der Netzentgelte auswirkt, dass andere Kunden in unverhältnismäßig hohem Maße erhöhte Netzentgelte zu tragen hätten.⁵³

Es ist dem Netzbetreiber **unzumutbar**, dem Anschlussbegehren nachzukommen, wenn er dadurch unverhältnismäßig wirtschaftlich belastet wird.⁵⁴ Anhaltspunkte hierfür bestehen, wenn absehbar ist, dass der Betreiber die ihm entstehenden Kosten nicht

³⁹ de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 172; Bourwieg, in: Bourwieg/Hellermann/Hermes, EnWG, § 17 Rn. 77.

⁴⁰ OLG Düsseldorf, Beschl. v. 15.03.2017 – VI-3 Kart 181/15 (V), BeckRS 2017, 112334, Rn. 110.

⁴¹ OLG Düsseldorf, Beschl. v. 15.03.2017 – VI-3 Kart 181/15 (V), LSK 2017, 112334.

⁴² Gerstner, in: Nk-EnWG, § 17 Rn. 60.

⁴³ de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 167.

⁴⁴ Gerstner, in: Nk-EnWG, § 17 Rn. 60.

⁴⁵ de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 167.

⁴⁶ de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 167.

⁴⁷ de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 167.

⁴⁸ de Wyl/Thole/Bartsch, in: Schneider/Theobald, Recht der Energiewirtschaft, § 17 EnWG Rn. 167.

⁴⁹ Marquering, in: BeckOK EnWG, § 17 Rn. 50; Gerstner, in: Nk-EnWG, § 17 Rn. 55.

⁵⁰ Marquering, in: BeckOK EnWG, § 17 Rn. 50.

⁵¹ Marquering, in: BeckOK EnWG, § 17 Rn. 50.

⁵² Marquering, in: BeckOK EnWG, § 17 Rn. 50.

⁵³ Marquering, in: BeckOK EnWG, § 17 Rn. 50.

⁵⁴ Marquering, in: BeckOK EnWG, § 17 Rn. 51.

vollständig decken kann.⁵⁵ Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn die Instandhaltungskosten des Anschlusses deutlich höher sind als die Einnahmen aus den Netzentgelten.⁵⁶ Auch kann die Zahlungsunfähigkeit des Anschlusspetenten – abhängig von den konkreten Umständen des Einzelfalls – für eine Unzumutbarkeit sprechen.⁵⁷

Abwägung im konkreten Fall

Ob die Gewährung des Netzanschlusses für den Netzbetreiber unzumutbar ist, muss im jeweiligen **Einzelfall** anhand der konkreten Gegebenheiten entschieden werden.⁵⁸ Dabei sind alle relevanten Umstände gegeneinander abzuwägen und die gegenläufigen Interessen des Netzbetreibers auf der einen und die des Anschlussnehmers auf der anderen Seite in einen angemessenen Ausgleich zu bringen.⁵⁹

Für die Beurteilung der Frage, ob ein Anschlussbegehren zu Recht abgelehnt wurde, ist der **Zweck des § 1 EnWG** zu berücksichtigen. Dieser besteht darin, eine möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente, umweltverträgliche und treibhausgasneutrale leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität, Gas und Wasserstoff sicherzustellen, die zunehmend auf erneuerbaren Energien beruht (§ 1 Abs. 1 EnWG). Daneben sind auch die Grundsätze der Elektrizitätsbinnenmarkt-Richtlinie einzubeziehen.

Auf Seiten des Netzbetreibers sind sowohl die Kosten zu berücksichtigen, die bei der Herstellung des Anschlusses entstehen, als auch zukünftig anfallende Kosten – etwa für den Netzausbau oder Engpassbewirtschaftungsmaßnahmen (sogenannte Folgekosten)⁶⁰, aber auch höhere Netzentgelte durch ineffiziente Kapazitätsnutzung.⁶¹

Auf Seiten des Anschlussnehmers ist entscheidend, wie stark er auf den begehrten Anschluss angewiesen ist, ob ihm andere Anschlussmöglichkeiten zur Verfügung stehen oder ob es ihm vorwiegend um eine Kostenersparnis geht.⁶² Ebenfalls in die Abwägung

einbezogen werden kann das Interesse der Allgemeinheit an einer möglichst kostengünstigen Struktur der Energieversorgungsnetze (§ 17 Abs. 3 S. 2 Nr. 3 letzter Teilsatz).⁶³

Sofern die Interessen des Netzbetreibers überwiegen, ist er berechtigt, den gewünschten Anschluss zu verweigern.⁶⁴ Dabei trifft den Netzbetreiber die Beweislast.⁶⁵

Begründung der Verweigerung

Die Ablehnung muss in Textform (§ 126 BGB) begründet werden, § 17 Abs. 2 S. 2 EnWG. Lediglich formelhafte Begründungen sind nicht ausreichend.⁶⁶ Wie bereits oben ausgeführt, kann die Partei, die den Netzanschluss begehrt, verlangen, dass die Begründung im Falle eines Kapazitätsmangels auch aussagekräftige Informationen darüber enthält, welche Maßnahmen und damit verbundene Kosten zum Ausbau des Netzes im Einzelnen erforderlich wären, um den Netzanschluss durchzuführen, § 17 Abs. 2 S. 3 1. Teilsatz EnWG. Dies soll dem Anschlusspetenten ermöglichen, die Vornahme des Anschlusses durchzusetzen, indem er die entstehenden Kosten für den Netzausbau übernimmt.⁶⁷

Aktuelle Diskussionen zur Reform des Netzanschlusses

In den über der Niederspannung liegenden Spannungsebenen stehen immer weniger freie Netzanschlusskapazitäten zur Verfügung.⁶⁸ Eine zentrale Herausforderung für Netzbetreiber besteht folglich darin, angesichts begrenzter Netzanschlusskapazitäten allen Anschlussanfragen gerecht zu werden. Für Anschlusspetenten bedeutet dies, dass sie unter Umständen nicht sofort oder vollständig mit Netzanschlusskapazität versorgt werden können. Durch Anpassungen im Netzanschlussverfahren könnte dem zunehmenden Problem von Kapazitätsengpässen ausgelöst durch die steigende Anzahl an Netzanschlussbegehren Rechnung getragen werden.⁶⁹ Im folgenden Abschnitt werden daher zentrale Überlegungen und Ansätze für

⁵⁵ Marquering, in: BeckOK EnWG, § 17 Rn. 51.

⁵⁶ Marquering, in: BeckOK EnWG, § 17 Rn. 51.

⁵⁷ Gerstner, in: Nk-EnWG, § 17 Rn. 58.

⁵⁸ BGH, Beschl. v. 23.06.2009 – EnVR 48/08, BeckRS 2009, 22855 Rn. 21.

⁵⁹ BGH, Beschl. v. 23.06.2009 – EnVR 48/08, BeckRS 2009, 22855 Rn. 21.

⁶⁰ Bourwieg, in: Bourwieg/Hellermann/Hermes, EnWG, § 17 Rn. 71.

⁶¹ BGH, Beschl. v. 23.06.2009 – EnVR 48/08, BeckRS 2009, 22855 Rn. 21.

⁶² BGH, Beschl. v. 23.6.2009 – EnVR 48/08, BeckRS 2009, 22855 Rn. 21.

⁶³ Marquering, in: BeckOK EnWG, § 17 Rn. 53.

⁶⁴ BGH, Beschl. v. 23.06.2009 – EnVR 48/08, BeckRS 2009, 22855 Rn. 21.

⁶⁵ BGH, Beschl. v. 23.06.2009 – EnVR 48/08, BeckRS 2009, 22855 Rn. 21; BGH, Beschl. v. 11.12.2012 – EnVR 8/12, BeckRS 2013, 3161 Rn. 7.

⁶⁶ BT-Drs. 15/3917, S. 58.

⁶⁷ Gerstner, in: Nk-EnWG, § 17 Rn. 61.

⁶⁸ BNetzA, Verfahren zur Zuteilung von Entnahmeleistungen aus Netzebenen oberhalb der Niederspannung, BK6-24-245, S. 1.

⁶⁹ Bartsch/Voigt, EnWZ 2025, 356 (359).

Reformen des Netzanschlusses skizziert, die derzeit in der Fachpraxis und Politik diskutiert werden.

Die Bundesnetzagentur hat hierzu im November 2024 das „Konsultationspapier zum Verfahren zur Zuteilung von Entnahmeleistungen aus Netzebenen oberhalb der Niederspannung“ veröffentlicht.⁷⁰ Das Verfahren wurde allerdings bereits Anfang 2025 mit der Begründung wieder eingestellt, dass das von der Bundesnetzagentur favorisierte Repartierungsverfahren zur Verteilung von Netzanschlusskapazität als Branchenlösung nicht konsensfähig sei.⁷¹ Ein Kritikpunkt bestand darin, dass eine pauschale Anwendung eines Verfahrens angesichts der vor Ort bestehenden Herausforderungen nicht zielführend sei.⁷²

Die Diskussion über eine Anpassung des Netzanschlussverfahrens ist jedoch seitdem nicht abgerissen: Zum einen wird diskutiert, von der bisher gängigen Praxis des sogenannten **Windhund- oder Prioritätsprinzips** (auch: first come, first served)⁷³ abzuweichen.⁷⁴ Bei der Vergabe von Netzanschlusskapazitäten könnten künftig beispielsweise nicht mehr allein der zeitliche Eingang des Anschlussbegehrens, sondern auch weitere Kriterien berücksichtigt werden.⁷⁵ Auch könnte im Rahmen eines sogenannten **„first ready, first served“**-Verfahrens darauf abgestellt werden, ob Projekte bereits eine gewisse nachgewiesene Planungsreife aufweisen. Vorteilhaft an diesem Verfahren ist, dass spekulatives Reservieren von Kapazitäten erschwert wird, da der erforderliche Reifegrad mit erheblichem Aufwand verbunden ist.⁷⁶ Nachteilig ist jedoch die geringe Planungssicherheit für Petenten, da schneller umsetzbare Projekte auch bereits gestartete, aufwändigere Projekte verdrängen können.⁷⁷ Zudem besteht, ähnlich wie beim Windhundprinzip, das Risiko, dass ein einzelner Petent bei begrenzten Kapazitäten die gesamte Leistung beansprucht, während andere leer ausgehen.⁷⁸ Eine weitere Möglichkeit bestünde in der Einführung eines sogenannten **Kapazitätsreservierungsverfahrens**.⁷⁹ Dabei könnte die gewünschte

Kapazität dem Anschlusspetenten zeitlich befristet reserviert werden.⁸⁰

Zudem kommen **flexible Netzanschlussvereinbarungen** in Betracht.⁸¹ Hierzu sieht § 17 Abs. 2b S. 1 EnWG (parallel zu § 8a EEG 2023) bereits vor, dass Betreiber von Elektrizitätsversorgungsnetzen Anschlussnehmern den Abschluss einer flexiblen Netzanschlussvereinbarung anbieten können. Eine solche gibt dem Netzbetreiber das Recht, vom Anschlussnehmer eine statische oder dynamische Begrenzung der maximalen Entnahme- oder Einspeiseleistung zu verlangen (§ 17 Abs. 2b S. 2 EnWG). Diese Regelung soll den Handlungsspielraum von Netzbetreiber und Anschlussnehmer in Fällen, in denen die vorhandene Netzanschlusskapazität nicht oder vorerst nicht für den gewünschten Netzanschluss ausreicht, erweitern.⁸² Darüber hinaus wird diskutiert, Netzanschlusskapazitäten durch Mehrfachnutzung effizienter zu nutzen, und die netzdienliche Kombination von Anschlusspetenten zu fördern.⁸³

Die Diskussion um eine Reform des Netzanschlussverfahrens verdeutlicht, dass die bestehenden Vergabemechanismen angesichts knapper werdender Netzanschlusskapazitäten an ihre Grenzen stoßen. Zwar hat die Bundesnetzagentur ihr Konsultationsverfahren mangels Branchenakzeptanz eingestellt, doch der Reformbedarf bleibt offensichtlich. Insgesamt zeichnet sich ab, dass Netzbetreiber mehr Gestaltungsspielraum benötigen, um Kapazitätsengpässe differenziert und standortspezifisch zu adressieren.

Zugleich wird deutlich, dass auf politischer Ebene zunehmend Bewegung in das Thema kommt: So hat der Ausschuss für Wirtschaft und Energie des Bundestages die Bundesregierung in seiner Beschlussempfehlung vom 12. November 2025 aufgefordert, im ersten Quartal 2026 einen **Regelungsentwurf** vorzulegen, mit dem Netzanschlussverfahren im Stromnetz für Erzeugungsanlagen, Verbraucher und Speicher grundlegend verbessert und digitalisiert werden, um

⁷⁰ BNetzA, Verfahren zur Zuteilung von Entnahmeleistungen aus Netzebenen oberhalb der Niederspannung, BK6-24-245.

⁷¹ BNetzA, Pressemitteilung vom 05.02.2025: „Konsultation zu einem Verfahren zur Zuteilung von Entnahmeleistungen aus Netzebenen oberhalb der Niederspannung“.

⁷² BNetzA, Pressemitteilung vom 05.02.2025: „Konsultation zu einem Verfahren zur Zuteilung von Entnahmeleistungen aus Netzebenen oberhalb der Niederspannung“.

⁷³ BNetzA, Verfahren zur Zuteilung von Entnahmeleistungen aus Netzebenen oberhalb der Niederspannung, BK6-24-245, S. 2.

⁷⁴ Bartsch/Voigt, EnWZ 2025, 356 (359).

⁷⁵ Bartsch/Voigt, EnWZ 2025, 356 (359).

⁷⁶ BNetzA, Verfahren zur Zuteilung von Entnahmeleistungen aus Netzebenen oberhalb der Niederspannung, BK6-24-245, S. 3.

⁷⁷ BNetzA, Verfahren zur Zuteilung von Entnahmeleistungen aus Netzebenen oberhalb der Niederspannung, BK6-24-245, S. 3.

⁷⁸ BNetzA, Verfahren zur Zuteilung von Entnahmeleistungen aus Netzebenen oberhalb der Niederspannung, BK6-24-245, S. 3.

⁷⁹ Bartsch/Voigt, EnWZ 2025, 356 (360).

⁸⁰ Bartsch/Voigt, EnWZ 2025, 356 (360).

⁸¹ Bartsch/Voigt, EnWZ 2025, 356 (360).

⁸² BT-Drs- 20/14235, S. 57.

⁸³ TenneT, Positionspapier I Politische Impulse zur Weiterentwicklung des Netzanschlussprozesses, Juli 2025, S. 1, 5.

Transparenz und Planungssicherheit zu erhöhen, um den Stau bei Anschlussbegehren insbesondere von Großbatteriespeichern, Industriekunden und Rechenzentren zu lösen sowie um den Netzbetreibern einen gesamtwirtschaftlich sinnvollen Umgang mit der akuten Situation immer knapper werdender Netzan schlusskapazitäten zu ermöglichen.⁸⁴

2.3.2 Rechtliche Zwangspunkte im Planungs- und Genehmigungsrecht

Genehmigungs- und Planungsverfahren sind häufig komplex und langwierig. Sie erfordern die Beachtung zahlreicher gesetzlicher Vorgaben, die Beteiligung verschiedener Behörden und Träger öffentlicher Belange sowie die Prüfung von Umwelt- und Sicherheitsaspekten. Gerade bei größeren Vorhaben oder solchen mit hoher gesellschaftlicher Relevanz können sich solche Verfahren über mehrere Jahre erstrecken. Der folgende Abschnitt gibt einen überblicksartigen Einblick in die zentralen rechtlichen Rahmenbedingungen, die bei **Planungs- und Genehmigungsverfahren für Stromleitungen** zu berücksichtigen sind. Der Ausbau der für die Dekarbonisierung der Industrie erforderlichen Strominfrastruktur berührt eine Vielzahl unterschiedlicher Rechtsbereiche. Maßgebliche Vorgaben ergeben sich insbesondere aus dem Bauordnungs- und Bauplanungsrecht sowie dem EnWG.

Je nach Art und Umfang des Vorhabens kommen unterschiedliche behördliche Verfahren in Betracht, vor allem klassische Baugenehmigungsverfahren oder umfassendere Planfeststellungsverfahren, die eine abschließende Konzentrationswirkung entfalten. Die folgenden Ausführungen sollen daher nicht alle Detailfragen klären, sondern eine Orientierung über die maßgeblichen rechtlichen Anforderungen vermitteln, die im Rahmen der Planung und Genehmigung von Stromleitungen zu beachten sind.

Baurecht

§ 59 Abs. 1 Sächsische Bauordnung⁸⁵ (SächsBO) regelt, dass die Errichtung, Änderung und Nutzungsänderung von Anlagen der Baugenehmigung bedürfen, soweit in den §§ 60 bis 62, 76 und 77 SächsBO nichts anderes bestimmt ist. Für die Errichtung von Stromleitungen sieht die SächsBO keine Ausnahme vor.

Planfeststellungsverfahren

Die Planfeststellungspflicht bzw. -fähigkeit muss in einem Fachgesetz verankert werden. Im EnWG findet sich neben **planfeststellungspflichtigen** Vorhaben (§ 43 Abs. 1 EnWG) auch ein Katalog **planfeststellungsfähiger** Vorhaben (§ 43 Abs. 2 EnWG). Planfeststellungsfähigkeit bedeutet im Gegensatz zur Planfeststellungspflichtigkeit, dass für ein Vorhaben kein gesetzlich zwingendes Planfeststellungsverfahren vorgeschrieben ist. Der Vorhabenträger hat vielmehr die Möglichkeit, freiwillig einen Antrag auf Durchführung eines solchen Verfahrens zu stellen, wodurch ihm ein Wahlrecht eingeräumt wird. Neben den spezialgesetzlichen Vorschriften nach dem EnWG (§§ 43a-43d EnWG) sind die allgemeinen Regelungen zum Planfeststellungsverfahren in §§ 72-78 Verwaltungsverfahrensgesetz⁸⁶ (VwVfG) zu beachten.

Primäre Aufgabe der Planfeststellungsbehörde ist es nicht, eine am Handlungsziel des Vorhabenträgers ausgerichtete optimale Ausgestaltung des Vorhabens zu erreichen, sondern das Vorhaben sachgerecht und ausgewogen in seine Umgebung einzubinden.⁸⁷ Im Planfeststellungsverfahren sollen die Betroffenen der Planungen frühzeitig und umfassend eingebunden werden, um eine möglichst große Akzeptanz für Infrastrukturprojekte zu erreichen.⁸⁸ Zentrales Element der **Öffentlichkeitsbeteiligung** ist nach § 73 Abs. 6 S. 1 VwVfG die mündliche Erörterung der rechtzeitig gegen den Plan erhobenen Einwendungen und Stellungnahmen der Behörden zu dem Plan mit dem Vorhabenträger, den Behörden, den Betroffenen und den Einwendern.

Gasversorgungsleitungen mit einem Durchmesser von mehr als 300 Millimetern unterliegen nach § 43 Abs. 1 Nr. 5 EnWG der Planfeststellungspflicht. Für Stromleitungen enthält das EnWG hingegen keine vergleichbare allgemeine Regelung; vielmehr gelten – abhängig von der jeweiligen Spannungsebene – differenzierte Vorgaben: **Hochspannungsfreileitungen** mit einer Nennspannung von 110 Kilovolt oder mehr sind nach § 43 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 EnWG, vorbehaltlich bestimmter Ausnahmen, planfeststellungspflichtig. Planfeststellungsfähig sind dagegen nach § 43 Abs. 1 S. 1 Nr. 4 EnWG die Errichtung und der Betrieb sowie die Änderung eines **sonstigen Erdkabels** für Hochspannungsleitungen mit einer Nennspannung von 110 Kilovolt oder weniger. Erdkabel stellen das

⁸⁴ BT-Drs. 21/2793, S. 5.

⁸⁵ Sächsische Bauordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 11. Mai 2016 (SächsGVBl. S. 186), die zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 1. März 2024 (SächsGVBl. S. 169) geändert worden ist.

⁸⁶ Verwaltungsverfahrensgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. Januar 2003 (BGBl. I S. 102), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 236) geändert worden ist.

⁸⁷ Kupfer, in: Schoch/Schneider, Verwaltungsrecht, VwVfG, Vorbemerkung zu § 72 Rn. 19.

⁸⁸ Pfannkuch/Schönfeldt, NVwZ 2020, 1557 (1558).

Pendant zu Freileitungen im Sinne des § 43 Abs. 1 S. 1 Nr. 1 EnWG dar⁸⁹, werden im EnWG jedoch nicht legaldefiniert. Erfasst sein soll jedes technische System, das den Anforderungen an ein unterirdisches Energieübertragungssystem entspricht.⁹⁰ Unter den Begriff der „sonstigen Erdkabel“ fallen daher insbesondere Anschlussleitungen für Erzeugungsanlagen und Letztverbraucher sowie Erdkabel von Verteilernetzen.⁹¹ Nach § 43 Abs. 2 S. 1 Nr. 5 EnWG sind darüber hinaus die Errichtung und Änderung von **Freileitungen** mit einer Nennspannung von weniger als 110 Kilovolt planfeststellungsfähig; eine Beschränkung auf den Hochspannungsbereich besteht insoweit nicht.⁹² Gleiches gilt für Erdkabel mit einer Nennspannung von unter 110 Kilovolt, sofern sie in einem räumlichen und zeitlichen Zusammenhang mit der Baumaßnahme eines Erdkabels nach § 43 Abs. 1 S. 1 Nr. 2-4 EnWG oder § 43 Abs. 2 S. 1 Nr. 2-4 EnWG stehen.

Der am Ende des Planfeststellungsverfahrens stehende **Planfeststellungsbeschluss** umfasst alle nachgelagerten Entscheidungsebenen. Er entfaltet **Genehmigungs- und Konzentrationswirkung** (§ 75 Abs. 1 S. 2 VwVfG) und erfordert die Prüfung aller für das beantragte Vorhaben materiell-rechtlich relevanten Fachgesetze. Mit der Möglichkeit, für Errichtung, Betrieb und Änderung der Anlagen ein Planfeststellungsverfahren nach dem EnWG durchzuführen, können alle erforderlichen Planfeststellungs- und sonstigen Gestattungsverfahren in einem energierechtlichen Verfahren zusammengefasst werden.⁹³ Ausschlaggebend für die Erwägung für oder gegen ein Planfeststellungsverfahren ist für den Vorhabenträger in der Regel die Umstrittenheit seines Vorhabens, da das Planfeststellungsverfahren im Gegensatz zum fachrechtlichen Zulassungsverfahren stärkere Durchsetzungsinstrumente enthält. Sie sind gerade bei **großen Infrastrukturvorhaben** sinnvoll.

Beschleunigungsmaßnahmen

In verschiedenen Fachgesetzen finden sich Regelungen, die bestimmten Vorhaben ein „überragendes öffentliches Interesse“ zuerkennen.

§ 43 Abs. 3a S. 1 EnWG⁹⁴ sieht für die Errichtung und der Betrieb sowie die Änderung von **Hochspannungsleitungen** nach § 43 Abs. 1 S. 1 Nr. 1-4 EnWG einschließlich der für den Betrieb notwendigen Anlagen einen Abwägungsvorrang vor, indem bestimmt wird, dass derartige Anlagen im **überragenden öffentlichen Interesse** liegen und der öffentlichen Sicherheit dienen. Bis die Stromversorgung im Bundesgebiet nahezu treibhausgasneutral ist, soll der beschleunigte Ausbau von Hochspannungsleitungen und der für den Betrieb notwendigen Anlagen **als vorrangiger Belang in die jeweils durchzuführende Schutzgüterabwägung eingebracht werden** (§ 43 Abs. 3a S. 2 EnWG). In der Gesetzesbegründung wird dazu ausgeführt, dass der beschleunigte Ausbau von Hochspannungsleitungen die Integration erneuerbarer Energien unterstützt und die Energieversorgung sowie die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands stärkt.⁹⁵

Für Mittel- und Niederspannungsleitungen existiert eine entsprechende Regelung nicht.

2.3.3 Finanzielle Entlastung durch den Industriestrompreis

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) hat mit dem Entwurf eines Eckpunktepapiers⁹⁶ ein Konzept zum Industriestrompreis vorgelegt. Demnach soll der Zielpreis beim Industriestrompreis bei 5 Cent pro Kilowattstunde liegen.⁹⁷ Der Industriestrompreis soll übergangsweise eine finanzielle Entlastung für Unternehmen mit erheblichem Strombedarf liefern und ein Abwandern in Staaten außerhalb der EU verhindern. Dadurch soll die nationale Industrie gestärkt werden. Da geplant ist, dass der Staat die Differenz zwischen dem Zielpreis und dem tatsächlichen Strompreis fördert, ist das Vorhaben beihilfenrechtlich relevant.

Förderungsberechtigte Unternehmen

Zur Beihilfe berechtigt sein sollen nachweislich besonders **stromintensive Unternehmen, die im globalen Wettbewerb stehen**.⁹⁸ Gerade bei derartigen Unternehmen besteht die **Gefahr, dass diese bei unverändert hohen Energiekosten in Drittstaaten**

⁸⁹ Riege, in: BeckOK EnWG, § 43 Rn. 63.

⁹⁰ BT-Drs. 16/3781, S. 5.

⁹¹ Riege, in: BeckOK EnWG, § 43 Rn. 68.

⁹² Riege, in: BeckOK EnWG, § 43 Rn. 69.

⁹³ BT-Drs. 19/9027, S. 13.

⁹⁴ Mit dem Gesetz zur Anpassung des Energiewirtschaftsrechts an unionsrechtliche Vorgaben und zur Änderung weiterer energierechtlicher Vorschriften v. 28.12.2023 (BGBl. 2023 I Nr. 405) neu eingefügt.

⁹⁵ BT-Drs. 20/9187, S. 157.

⁹⁶ BMWE, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf).

⁹⁷ BMWE, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 1.

⁹⁸ BMWE, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 1.

abwandern.⁹⁹ Ein solches Szenario soll durch die geplante finanzielle Unterstützung in Form des Industriestrompreises verhindert werden.¹⁰⁰ Erfasst werden sollen Unternehmen, die den Wirtschaftssektoren der Teilliste 1 des Anhangs I der Leitlinien für staatliche Klima-, Umweltschutz- und Energiebeihilfen (**KUEBLL**)¹⁰¹ zuzurechnen sind.¹⁰² Dabei handelt es sich um Wirtschaftszweige mit erheblichem Risiko der Verlagerung an Standorte außerhalb der Europäischen Union (Ziffer 4.11.3.1 KUEBLL). Davon erfasst sind insgesamt 91 (Teil-)Sektoren, u. a. große Teile der chemischen Industrie, die Metallindustrie, Gummi- und Kunststoffverarbeitung, Glas- und Keramikherstellung, die Produktion von Zement, Batteriezellen und Halbleitern, ebenso wie Teile der Papierindustrie, des Maschinenbaus und der Rohstoffgewinnung. Sofern nach einer Entscheidung durch die Europäische Kommission die Beihilfefähigkeitskriterien nach Rn. 116, 117 des Clean Industrial Deal State Aid Framework (CISAF)¹⁰³ erfüllt werden, sollen noch weitere (Teil-)Sektoren vom Industriestrompreis profitieren.¹⁰⁴

Laufzeit

Der Industriestrompreis ist zeitlich befristet und soll **zwischen den Jahren 2026 und 2028** zur Anwendung kommen.¹⁰⁵ Dabei soll die Beihilfe rückwirkend für das vergangene Jahr ausgezahlt werden.¹⁰⁶

Förderfähige Strommenge

Gefördert werden können **50 % des jährlichen Stromverbrauchs** (ohne degressive Fördermöglichkeit).¹⁰⁷ Die Unternehmen haben jedoch auch die Option, die anrechenbare Strommenge über die Laufzeitlänge von drei Jahren aufzuteilen (sogenannte „optionale degressive Fördermöglichkeit“).¹⁰⁸ Die Unternehmen können so zu Beginn der Förderlaufzeit von einer höheren Entlastung profitieren.¹⁰⁹ Dies soll Investitionen frühzeitig anreizen.¹¹⁰ Entscheidend ist hierbei, dass in der Summe nicht mehr als 50 % des jährlichen Stromverbrauchs gefördert werden.¹¹¹ An dieser Stelle ist zu betonen, dass die konkrete Ausgestaltung beihilfenrechtlich im Rahmen des Notifizierungsverfahrens festgelegt werden muss.¹¹²

Gegenleistung: Beitrag zur Dekarbonisierung

Überdies ist eine Verpflichtung der begünstigten Unternehmen vorgesehen, mindestens 50 % der erhaltenen Beihilfe in neue oder modernisierte Anlagen zu investieren.¹¹³ Diese Investitionen sollen nachweislich dazu beitragen, die Kosten des Stromsystems zu senken, ohne dabei den Einsatz fossiler Brennstoffe zu erhöhen.¹¹⁴ Die Unternehmen müssen folglich als Gegenleistung einen **Beitrag zur Dekarbonisierung** leisten.¹¹⁵ Dieser kann in den in Rn. 121 CISAF aufgelisteten Gegenleistungsoptionen bestehen.¹¹⁶ Dazu zählen die Entwicklung von Kapazitäten zur Erzeugung erneuerbarer Energie, Energiespeicherlösungen, Maßnahmen zur Erhöhung der nachfrageseitigen

⁹⁹ BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 1.

¹⁰⁰ BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 1.

¹⁰¹ Mitteilung der Europäischen Kommission – Leitlinien für staatliche Klima-, Umweltschutz- und Energiebeihilfen 2022 (2022/C 80/01).

¹⁰² BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 1.

¹⁰³ Mitteilung der Europäischen Kommission – Rahmen für staatliche Beihilfen zur Unterstützung des Deals für eine saubere Industrie (Beihilferahmen für den Deal für eine saubere Industrie) (C/2025/3602)

¹⁰⁴ BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 2.

¹⁰⁵ BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 4.

¹⁰⁶ BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 4.

¹⁰⁷ BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 1.

¹⁰⁸ BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 2.

¹⁰⁹ BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 2.

¹¹⁰ BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 2.

¹¹¹ BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 2.

¹¹² BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 2.

¹¹³ BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 2.

¹¹⁴ BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 2 f.

¹¹⁵ BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 2.

¹¹⁶ BMW, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 3.

Flexibilität, Verbesserungen der Energieeffizienz, die sich auf den Strombedarf auswirken, die Entwicklung von Elektrolyseuren für die Erzeugung von erneuerbarem oder kohlenstoffarmem Wasserstoff sowie auf die Elektrifizierung ausgerichtete Investitionen.¹¹⁷

Geplant sind zudem weitere Gegenleistungsoptionen, unter der Bedingung, dass diese einen messbaren Beitrag zur Senkung der Kosten des Stromsystems leisten.¹¹⁸ Auch besteht für die Unternehmen selbst die Möglichkeit, weitere Maßnahmen im Rahmen des Antragsverfahrens anzugeben (sogenannte „**technologieoffene Ausgestaltung der Gegenleistungsoptionen**“).¹¹⁹

Die Unternehmen sind grundsätzlich verpflichtet, die Investitionen innerhalb von 48 Monaten nach Gewährung der Beihilfe zu tätigen.¹²⁰

Der Entwurf des Eckpunktepapiers des BMW-E sieht außerdem eine optionale Erhöhung des gewährten Beihilfebetrags um 10 % vor, wenn nachweislich mindestens 80 % der Gegenleistungsverpflichtung in Maßnahmen zur Erhöhung der Nachfrageflexibilität investiert werden (sogenannter „**Flexibilitäts-Bonus**“).¹²¹ Im Gegenzug sind die Unternehmen verpflichtet, wiederum mindestens 75 % des gewährten Bonus in Gegenleistungen zu investieren.¹²²

2.4 Planungs- & Investitionssicherheit: Forderungen aus Industrieperspektive

Aus den dargestellten Hürden in der Umsetzung von Dekarbonisierungsmaßnahmen leiten sich Forderungen aus Unternehmensperspektive ab, die darauf abzielen, Planungs- und Investitionssicherheit zu schaffen. Ein übergeordnetes und **verlässlich feststehendes Zielbild**, welches den Unternehmen Orientierung auf dem Weg zur CO₂-Neutralität gibt, aber gleichzeitig auch transparent die verbundenen Kosten kommuniziert, ist dabei von oberster Priorität.

Ergänzend dazu können weitere Maßnahmen zusätzliche Planungssicherheit schaffen. Dazu gehören ein

Industriestrompreis – idealerweise bis 2040 gedeckelt –, regulatorische Anpassungen, um notwendige Netzanschlusskapazitäten zeitnah zu erhalten, sowie ein entschlossenes Bekenntnis zum beschlossenen EU-ETS Verlauf.

Schlussbemerkung

Die Betrachtung der Papierfabrik zeigt exemplarisch, welche Hürden in der praktischen Umsetzung von Dekarbonisierungsmaßnahmen auftreten können. Die dargestellten Erfahrungen gelten spezifisch für das gewählte Fallbeispiel. Weder die Hürden noch die Lösungsansätze lassen sich automatisch auf andere Produktionsstandorte übertragen – die jeweiligen Rahmenbedingungen vor Ort sind immer zu berücksichtigen.

2.5 Literaturverzeichnis zum rechtlichen Teil

Assmann, Lukas/Peiffer, Max, Beck'scher Online-Kommentar EnWG, 16. Edition 01.09.2025.

Bartsch, Alexander/Voigt, Julia, Energieversorgungsnetze „unter Spannung“ – Entnahmekapazitäten oberhalb der Niederspannung ein limitiertes Gut?, EnWZ 2025, 356-362.

Bourwieg, Karsten/Hellermann, Johannes/Hermes, Georg, Energiewirtschaftsgesetz, 4. Auflage 2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Entwurf eines Konzepts des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung, abrufbar unter: https://cdn.table.media/assets/251107_bmw_e Entwurf_eckpunkte_industries-trompreis.pdf (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Bundesnetzagentur, Pressemitteilung vom 05.02.2025: „Konsultation zu einem Verfahren zur Zuteilung von Entnahmeleistungen aus Netzebenen oberhalb der Niederspannung“, abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/BK6-

¹¹⁷ BMW-E, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 3.

¹¹⁸ BMW-E, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 3.

¹¹⁹ BMW-E, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 3.

¹²⁰ BMW-E, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 3.

¹²¹ BMW-E, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 4.

¹²² BMW-E, Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Industriestrompreis Eckpunkte zur Abstimmung innerhalb der Bundesregierung (Entwurf), S. 4.

[GZ/2024/BK6-24-245/BK6-24-245_startseite.html](https://www.gz.de/2024/BK6-24-245/BK6-24-245_startseite.html) (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Bundesnetzagentur, Verfahren zur Zuteilung von Entnahmeleistungen aus Netzebenen oberhalb der Niederspannung, BK6-24-245.

Held, Christian/Schäfer-Stradowsky, Simon, Energierecht und Energiewirklichkeit, 2. Auflage 2022.

Kment, Martin, NomosKommentar Energiewirtschaftsgesetz, 3. Auflage

Pfannkuch, Benjamin/Schönfeldt, Mirko, Die Realisierung von Infrastrukturvorhaben im Blickwinkel des Planungs- und Vergaberechts, Erwägungen zur Modifizierung des rechtlichen Rahmens, NVwZ 2020, 1557-1562.

Schneider, Jens-Peter/Theobald, Christian, Recht der Energiewirtschaft, 5. Auflage 2021.

Schoch, Friedrich/Schneider, Jens-Peter, Verwaltungsrecht VwVfG Band III, 4. Ergänzungslieferung November 2023.

TenneT, Positionspapier I Politische Impulse zur Weiterentwicklung des Netzananschlussprozesses, Juli 2025, abrufbar unter: https://tennet-drupal.s3.eu-central-1.amazonaws.com/default/2025-08/2025-07_Positionspapier_Netzanschlussverfahren.pdf (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Theobald, Christian/Jürgen, Kühling, Energierecht Band 1, 130. Ergänzungslieferung Juni 2025.

3 Status quo der sächsischen Wirtschaft

Die ausgewählten sächsischen Fokusbranchen mit einem Endenergieverbrauch von 15,5 TWh sind bereits zu über 40 % elektrifiziert. Dennoch verbleiben mit ähnlichem Anteil fossile Brennstoffe, für deren Substitution eine weitere Umsetzung von Dekarbonisierungstechnologien erforderlich ist.

Bevor mögliche Dekarbonisierungstechnologien identifiziert und bewertet werden, muss der Status quo der sächsischen Wirtschaft – und insbesondere der ausgewählten Fokusbranchen – aufgezeigt werden, um die größten Hebel der Dekarbonisierung zu identifizieren.

3.1 Sächsische Fokusbranchen der Dekarbonisierung

Da für die Großverursacher von Treibhausgasen (Stahl-, Zement- und Chemieindustrie) bereits Transformationspfade bestehen, wurden durch den Auftraggeber der Fokus auf weniger energieintensive Branchen gelegt, welche noch am Anfang der Transformation stehen (siehe Tabelle A). Die Auswahl berücksichtigt diverse Faktoren, wie Energie- und Emissionsintensität, aber auch die Bedeutung für die regionale

Wertschöpfung, sowie den vorhanden Wissensstand zu Transformationspfaden in den jeweiligen Branchen.

Diese Branchen hatten im Jahr 2022 einen Endenergieverbrauch von ca. 15,5 TWh (Abbildung 3-1), wobei mehr als die Hälfte über Strom (42 %), Erneuerbare Energieträger (9 %) oder Fernwärme (8 %) gedeckt wurde und damit keine fossilen Scope 1-Emissionen an den Standorten verursachte. Der verbleibende Energiebedarf wurde zum Großteil über Erdgas (36 %), sowie geringe Anteile an Mineralölen (3 %) und Braunkohlen (2 %) gedeckt und muss damit noch dekarbonisiert werden.

Mit einem jährlichen Endenergieverbrauch von 2,2 TWh stellt die Papierindustrie die energieintensivste der Fokusbranchen dar, gefolgt von Ernährung und Getränke (2,1 TWh), DV-Geräte (2,0 TWh), Glas (1,9 TWh), Holz (1,6 TWh), KFZ (1,4 TWh) und Metall II (1,2 TWh). Die weiteren Fokusbranchen Maschinenbau, Kunststoffe, Chemie II, Textilien und elektrische Ausrüstungen weisen deutlich niedrigere Endenergieverbräuche von 0,7 TWh und weniger auf.

Dennoch haben auch diese, im Vergleich weniger energieintensiven, Branchen eine insbesondere wirtschaftliche Bedeutung in Sachsen, wie Abbildung 3-2 zeigt.

Endenergieverbrauch ausgewählter Branchen
in TWh | Sachsen | 2022

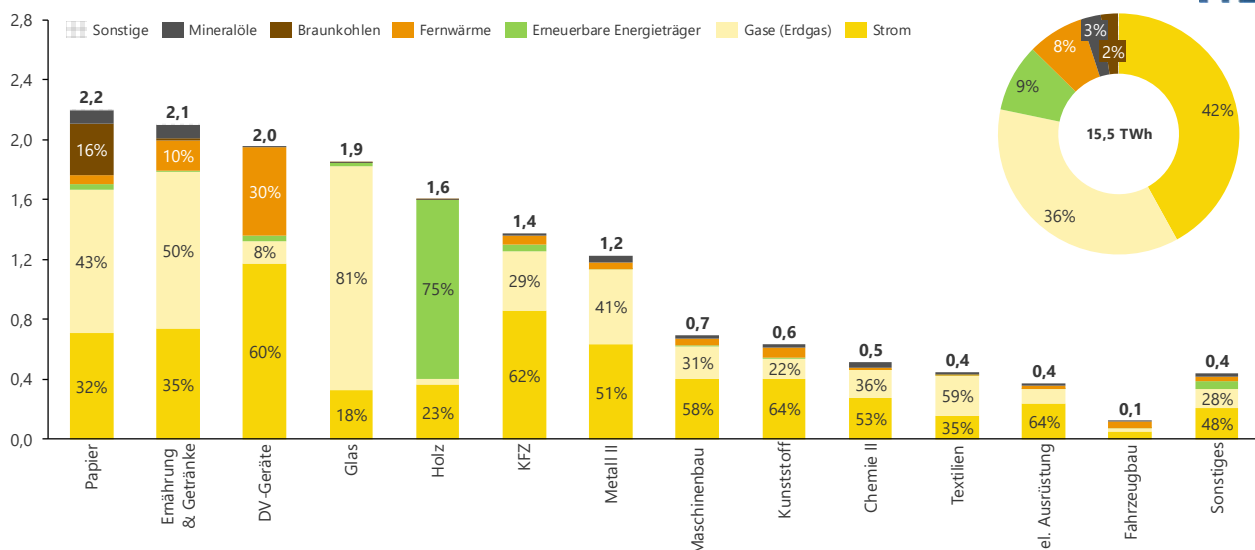


Abbildung 3-1: Endenergieverbrauch in TWh nach Energieträgern ausgewählter Branchen in Sachsen (2022). [40]

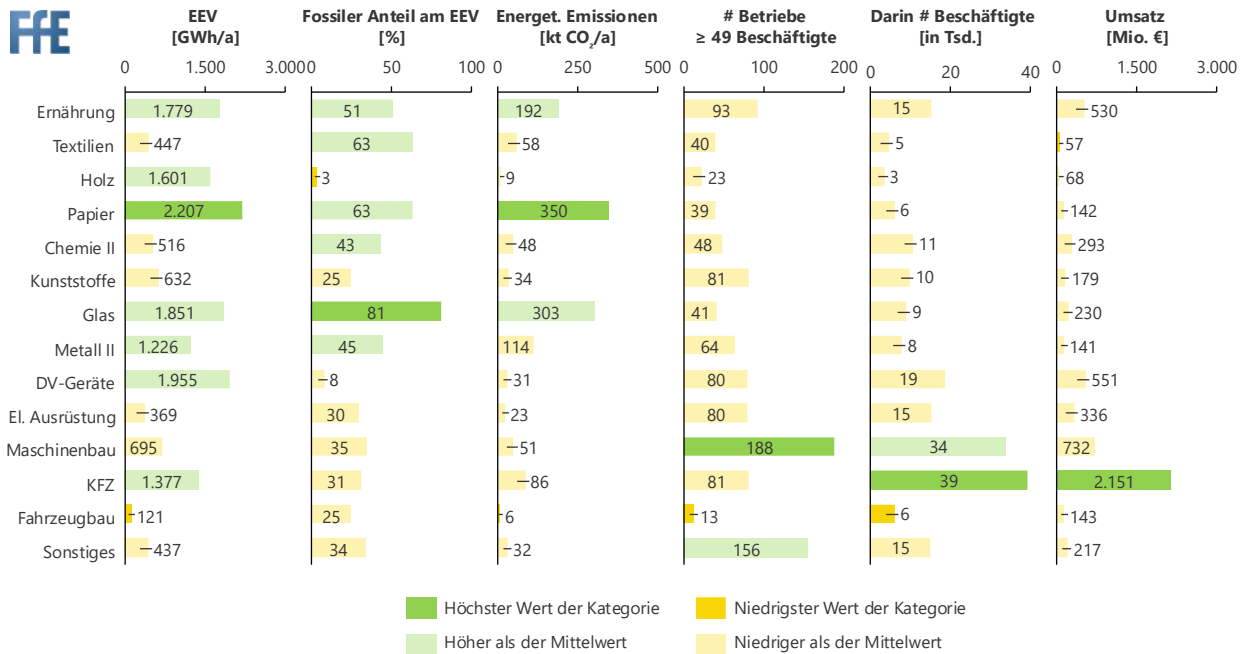


Abbildung 3-2: : Charakterisierung der Fokusbranchen (2022).

So ist beispielsweise der Maschinenbau mit ca. 34.000 Beschäftigten der zweitgrößte Arbeitgeber hinter der KFZ-Branche mit ca. 39.000 Beschäftigten.

3.2 Weitere Bearbeitung in Branchensteckbriefen

Um den Status quo, mögliche Dekarbonisierungstechnologien und die Hürden auf dem jeweiligen Transformationspfad kompakt und praxistauglich darzustellen, wurden im Projekt Branchen- und Technologiesteckbriefe erstellt. Diese dienen vorrangig als Handlungshilfe **für Unternehmen**, um einen ersten Überblick über ihre Dekarbonisierungsoptionen zu erhalten. Weitere Zielgruppen sind die **(Verteil-) Netzbetreiber**, welche dadurch einen Einblick auf die durch die Industrietransformation resultierenden Anforderungen an die Energieinfrastruktur erhalten, sowie **politische Akteure**, als Grundlage zur Unterstützung der Dekarbonisierungsbemühungen der Unternehmen.

Um möglichst viele Prozesse der Fokusbranchen sowie zugehörige Transformationstechnologien abzudecken, wird zunächst ein **Steckbrief der branchenübergreifenden Technologien** gezeigt, der ein möglichst breites Spektrum aus Anwendungen abdeckt. Dieser zeigt für **Unternehmen aus allen Branchen** der sächsischen Wirtschaft relevante Dekarbonisierungstechnologien auf.

Für **ausgewählte Branchen** erfolgt anschließend eine detailliertere Betrachtung in tiefergehenden branchenspezifischen Steckbriefen. Dies sind die Branchen

- Glas, Keramik, Verarbeitung von Steinen & Erden,
- Papier,
- DV-Geräte & Uhren,
- Textilien,
- Chemie & Pharma,
- Gummi & Kunststoffe,
- Metallverarbeitung,
- Maschinenbau,
- Ernährung,
- Bäcker (Handwerk),
- Fleischer (Handwerk) und
- Textilreiniger (Handwerk).

4 Allgemeiner Aufbau und Handhabung der Steckbriefe

Mit einem übergreifenden sowie weiteren branchenspezifischen Steckbriefen soll sächsischen Unternehmen ein erster Anhaltspunkt für deren Transformation und Dekarbonisierung gegeben werden. Dieses Kapitel beschreibt die zugrundeliegende Methodik, statistische Quellen und den Aufbau dieser Steckbriefe.

Die in den Steckbriefen betrachteten Transformationstechnologien zielen vorrangig darauf ab, die **Scope 1-Emissionen der Unternehmen zu reduzieren**. Als Scope 1-Emissionen werden Emissionen bezeichnet, deren Quellen sich im Besitz dieser Unternehmen befinden und direkt von diesen kontrolliert werden. CO₂-Emissionen, die aus der Nutzung biogener Rohstoffe resultieren, werden den Scope 1-Emissionen nicht angerechnet. Da die Biomasse in ihrer Wachstumsphase CO₂ aus der Atmosphäre bindet, welches bei der Verbrennung wieder freigesetzt wird, ist der Einsatz biogener Brennstoffe als bilanziell CO₂-neutral zu bewerten [3].

4.1 Steckbrief: Branchenübergreifende Technologien

Der Steckbrief der branchenübergreifenden Technologien adressiert **Technologien, die in vielen Wirtschaftszweigen relevant sind**. Hierbei werden zunächst die verschiedenen branchenübergreifenden Technologien sowie exemplarische Anwendungsbereiche beschrieben.

Da bei den branchenübergreifenden Technologien die vorgelagerten **Energieeffizienzmaßnahmen und die Abwärmenutzung** in der Praxis eine große Rolle spielen, werden diese im zweiten Teil dieses Steckbriefs ausführlicher beschrieben. Sowohl die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen, als auch die sinnvolle Verschneidung von Abwärmequellen und Wärmesenken können Energiebedarf eines Standortes signifikant senken. Damit sind diese Maßnahmen eine sinnvolle Voraussetzung, bevor es zur Auswahl konkreter Dekarbonisierungstechnologien kommt.

Die zur Dekarbonisierung beitragenden branchenübergreifenden **Transformationsmaßnahmen** fokussieren sich auf die Prozess- und Raumwärmeerzeugung. Im Vergleich dazu ist die Warmwassererzeugung

in Bezug auf den Energieverbrauch von untergeordneter Bedeutung und wird daher nur am Rande betrachtet. Die Beschreibung der Transformationstechnologien erfolgt dabei nach gestaffeltem Temperaturniveau:

- **Niedertemperaturbereich:** < 150 °C
- **Mitteltemperaturbereich:** 150 – 500 °C
- **Hochtemperaturbereich:** > 500 °C

Abschließend werden ausgewählte Transformationstechnologien für den Bereich **Mobilität und Logistik** beschrieben.

4.2 Branchen- und Handwerkssteckbriefe

Mit den Branchen- und Handwerkssteckbriefen werden die in Abschnitt 3 ausgewählten Fokusbranchen der sächsischen Wirtschaft beschrieben. Damit sollen den zugehörigen Unternehmen, Netzbetreibern, Energieversorgern und auch der Politik die Transformation dieser Branchen näher zu bringen. Abbildung 4-1 zeigt den wiederkehrenden Aufbau der Branchen- und Handwerkssteckbriefe.

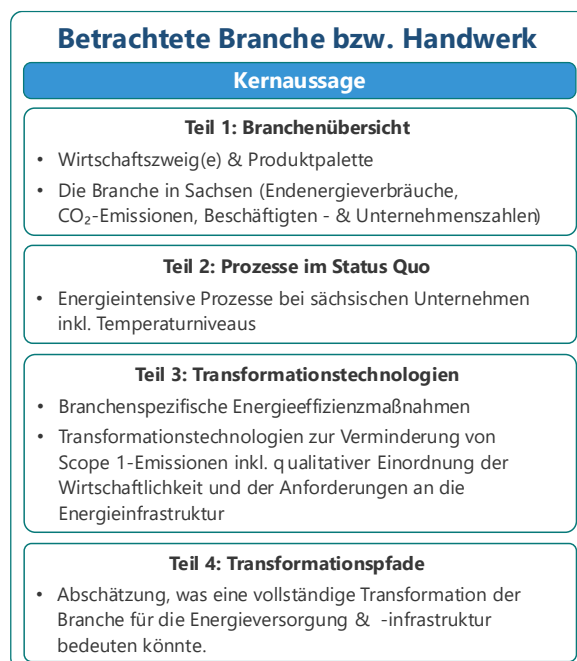


Abbildung 4-1: Aufbau der Branchen- und Handwerkssteckbriefe.

Nach einer zusammenfassenden **Kernaussage** folgt jeweils die tabellarische Übersicht über die **adressierten Wirtschafts- bzw. Gewerbezweige**, Unterklassen und exemplarische Produkte.

Die anschließenden vier Hauptteile der Steckbriefe sind:

- **Teil 1:** Branchenübersicht
- **Teil 2:** Prozesse im Status quo
- **Teil 3:** Branchenspezifische Transformations-technologien
- **Teil 4:** Abschätzung, welche Auswirkung eine Transformation der Branche auf die Endenergieverbräuche haben könnte.

Teil 1: Branchenübersicht

Die Branchenübersicht beginnt mit einem Einblick in die aus der Klassifikation der Wirtschaftszweige [4] abgeleitete Produktpalette. Anschließend folgt die Beschreibung der Branche mit Fokus auf die spezifischen **Gegebenheiten in Sachsen**, und die Relevanz der einzelnen Unterklassen.

Der folgende Abschnitt zum **Status quo** zeigt die Entwicklung der Endenergieverbräuche nach eingesetzten Energieträger auf Basis der sächsischen Energiebilanzen von 2012 bis 2022 [5] [6] [40] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47] [48]. Außerdem werden die energetisch bedingten CO₂-Emissionen gezeigt und, falls relevant, die Bedeutung des EU-Emissionshandelssystems (EU-ETS) für die jeweilige Branche eingeordnet. Abschließend folgen relevante sächsische Branchenkennzahlen, wie Umsatz, Anzahl der Unternehmen und die Entwicklung der Beschäftigten- und Unternehmenszahlen von 2020 bis 2025 auf Basis der Daten des statistischen Landesamts des Freistaats Sachsen [49] [36].

Da das Handwerk in den Statistiken nicht durch eigene Wirtschaftszweige dargestellt wird, sind die oben genannten Auswertungen nicht möglich. Die Einteilung im verarbeitenden Gewerbe hängt wiederum von der Anzahl der Mitarbeiter:innen ab [50]:

- Betriebe mit weniger als 20 Beschäftigten werden dem Bereich „Gewerbe, Handel und Dienstleistungen“ (GHD) zugeordnet.
- Betriebe mit mehr als 20 Beschäftigten hingegen dem entsprechenden Tätigkeitsfeld.

Belastbare Zahlen zum Endenergieverbrauch des Handwerks in Sachsen sind daher aktuell nicht verfügbar. Der Endenergieverbrauch und die CO₂-Emissionen der Handwerkszweige können daher nicht historisch dargestellt werden. Das E-Tool der Mittelstandsinitiative Energiewende und Klimaschutz (MIE) baut jedoch derzeit eine entsprechende Datengrundlage auf [51].

Teil 2: Prozesse im Status Quo

Im zweiten Teil geht der Steckbrief auf die **branchenspezifisch relevanten Prozesse** ein. Ein schematisches Prozessschaubild zeigt energieintensive Prozessschritte (inkl. Temperaturniveaus), die für sächsische Unternehmen in dieser Branche üblicherweise relevant sind und bei denen Transformations- bzw. Dekarbonisierungsbedarf besteht.

Teil 3: Transformationstechnologien

Der dritte Teil der Branchen- und Handwerkssteckbriefe beleuchtet branchenspezifische Transformationstechnologien. Dabei werden zunächst die in der Praxis üblichen **Energieeffizienzmaßnahmen** aufgelistet (siehe Infobox „Effizienz vor Transformation“).

Ansatz: „Effizienz vor Transformation“

1. Effizienz- & Suffizienzmaßnahmen prüfen

Effizienz und Suffizienz sind zentrale Hebel, bevor eigentliche Transformationstechnologien betrachtet werden sollten. Effizienz bedeutet, vorhandene Prozesse und Anlagen so zu optimieren, dass weniger Energie und Ressourcen für den gleichen Produktionsoutput benötigt werden. Suffizienzmaßnahmen hinterfragen den Bedarf an sich und reduzieren überflüssigen Verbrauch, etwa durch Anpassung von Produktionsmengen oder Produktdesign, spielen in der Regel jedoch eine untergeordnete Rolle.

2. Dekarbonisierung verbleibender (fossiler) Energiebedarfe

Beide Ansätze senken nicht nur den Energiebedarf, sondern erleichtern die spätere Umstellung auf Dekarbonisierungstechnologien. Zum einen müssen nach Umsetzung der Energieeinsparmaßnahmen geringere verbleibende fossile Energieverbräuche gedeckt werden, zum anderen können Kapazitäten in den vorhandenen Anschlussleistungen freigesetzt werden.

Es folgen tabellarisch aufbereitete **Transformations-technologien**, die zu einer Verminderung der CO₂-Emissionen in Scope 1 führen können. Grundlage dafür sind insbesondere Transformationspläne und -roadmaps der einschlägigen Branchenverbände, Systemstudien und Technologieberichte.

Diese Transformationstechnologien sind in gruppiert in

- Elektrifizierungsmaßnahmen,
- Brennstoffwechsel und
- CO₂-Abscheidetechnologien

Die mit der Umsetzung von Transformationstechnologien verbundene Ertüchtigung der Anlagenperipherie (z. B. Pufferspeicher für Prozesswärme oder separate Schornsteine) sind in der Betrachtung nicht vertiefend enthalten.

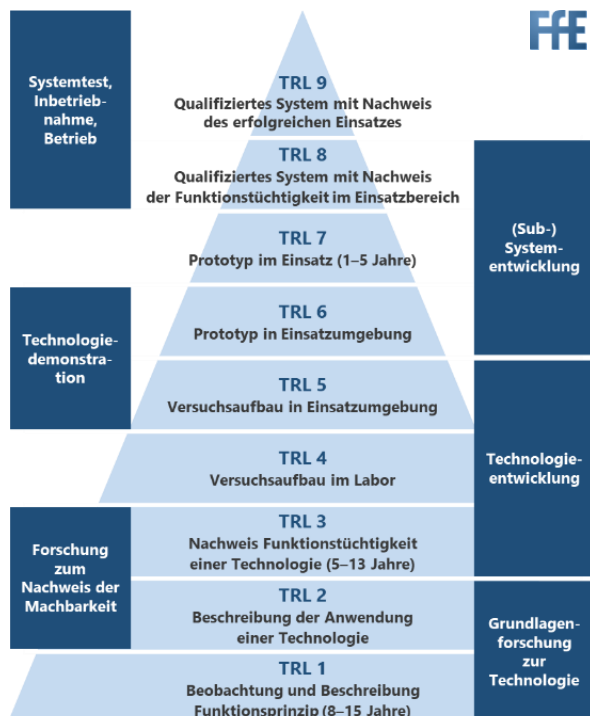


Abbildung 4-2: Hierarchie der Technology Readiness Levels (TRL). Links übergeordnete Beschreibung der Phase, rechts Beschreibung der einzelnen Level. Eigene Darstellung nach [52].

Die Tabellen mit den Transformationstechnologien enthalten neben der kurzen Beschreibung auch den **Technologiereifegrad** (Technology Readiness Level, TRL). Dieser gibt auf einer Skala von eins bis neun an, wie ausgereift bzw. in welchem Entwicklungsstadium eine Technologie aktuell ist [52]. Abbildung 4-2 zeigt die verschiedenen TRL-Stufen und ihre Bedeutung. Die Steckbriefe berücksichtigen in der Regel nur Transformationstechnologien, die bereits TRL 6, den Betrieb eines Prototyps in Einsatzumgebung, erreicht haben. In begründeten Ausnahmefällen werden auch Technologien mit geringerem TRL gezeigt.

Weiterhin werden die **Anforderungen und Auswirkungen an die vorgelagerte Energieinfrastruktur** beschrieben, um den Unternehmen eine Einschätzung zu geben, ob und in welchem Umfang ein Austausch

mit den entsprechenden Netzbetreibern notwendig ist. Die Netzbetreiber und Energieversorger können aus den Steckbriefen ebenfalls eine erste eigene Einschätzung treffen, ob und wie Dekarbonisierungsmaßnahmen der Industriekunden in ihrem Versorgungsgebiet einen Einfluss auf das eigene Geschäftsfeld haben.



Niedrige Wahrscheinlichkeit, dass die Technologie aus heutiger Sicht als wirtschaftliche Maßnahme für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren zukünftigem Dekarbonisierungspfad in Frage kommt.

Mittlere Wahrscheinlichkeit, dass die Technologie aus heutiger Sicht als wirtschaftliche Maßnahme für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren zukünftigem Dekarbonisierungspfad in Frage kommt.

Hohe Wahrscheinlichkeit, dass die Technologie aus heutiger Sicht als wirtschaftliche Maßnahme für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren zukünftigem Dekarbonisierungspfad in Frage kommt.

Abbildung 4-3: Ampelfarben zur indikativen Bewertung der Transformationstechnologien.

Zur qualitativen Einordnung der **Bedeutung der Transformationstechnologien für die jeweilige Branche** wird eine Ampelfärbung (Abbildung 4-3) eingeführt. Die entsprechenden Farben zeigen die Wahrscheinlichkeit dafür an, ob eine Technologie aus heutiger Sicht als wirtschaftliche Maßnahme für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren zukünftigem Dekarbonisierungspfad in Frage kommt. Grün gefärbte Technologien können dabei bereits heute wirtschaftlich eingesetzt werden.

Die Einordnung basiert dabei unter anderem:

- auf den (zu erwartenden) Kosten,
- der technologischen und infrastrukturellen Verfügbarkeit, sowie
- Verbandsrückmeldungen, und
- der Erfahrung aus diversen Praxisprojekten.

Teil 4: Transformationspfade

Zur Abschätzung der aus der Transformation resultierenden Endenergiebedarfe und Änderungen in den Anschlussleistungen, wurde ein Excel-Tool entwickelt.

Durch Verschneidung der Branchen aus der sächsischen Energiebilanz 2022 [40], mit der deutschen Anwendungsbilanz 2022 [7] und einer branchenspezifisch anteiligen Aufteilung der Prozesswärme auf die Temperaturniveaus < 100 °C, 100 bis 500 °C und > 500 °C nach [8] [9] erfolgt eine **branchenscharfe Abschätzung der Energieverbräuche je Energieträger und Anwendung bzw. Temperaturniveau**. Die fossilen Energieverbräuche in der Wärmebereitstellung werden

anschließend je nach Temperaturniveau auf CO₂-neutrale Energieträger transformiert.

Die Steckbriefe zeigen **zwei mögliche Zustände nach erfolgreicher Transformation** der jeweiligen Branche:

- moderate Elektrifizierung und
- starke Elektrifizierung.

Diese beiden Varianten werden durch verschiedene Elektrifizierungsgrade (mit zugehöriger Leistungszahl, COP) für den bisher fossilen Anteil der Wärmebereitstellung charakterisiert (siehe Tabelle 4-2). Die verbleibende Wärmebereitstellung wird in der Berechnung unter Annahme eines gleichbleibenden Nutzungsgrades auf biogene Brennstoffe und/oder Wasserstoff umgestellt.

Der angegebene COP setzt sich dabei aus der im Temperaturniveau eingesetzten Technologie zur elektrischen Wärmebereitstellung (Wärmepumpen und direkte Elektrifizierung wie bspw. Widerstandserwärmung oder Elektrodenkessel) zusammen und gibt an, wie viel MWh Wärme pro eingesetzter MWh Strom erzeugt werden kann. Ein hoher COP ist damit ein Indikator für eine effiziente Wärmebereitstellung, während ein COP von eins einer direktelektrischen Wärmebereitstellung mit 100 %-igem Wirkungsgrad entspricht.

Resultat der Berechnung ist eine **Einschätzung, welche Endenergieverbräuche** die jeweilige sächsische Branche im Status quo und unter Anwendung der beschriebenen Transformationspfade hätte.

Über eine grobe Abschätzung branchentypischer Volllaststunden (siehe Tabelle 4-1) leitet sich weiterhin die notwendigen **Anschlussleistungen für Strom und Wasserstoff** ab.

Tabelle 4-1: Angenommene Volllaststunden basierend auf [8] und eigener Erfahrung für die Berechnung der Anschlussleistung je Branche in den Transformationsberechnungen.

Branche	Jährliche Volllaststunden (Annahme)
Chemie & Pharma	6.000
DV-Geräte & Uhren	3.000
Ernährung	4.000
Glas & Keramik	8.000
Kunststoff & Gummi	5.000
Maschinenbau	3.000
Metallverarbeitung	5.000
Papier	8.000
Textil	4.500

Bei der Interpretation und Anwendung der Ergebnisse ist zu beachten, dass es sich hierbei sowohl in den Anteilen der Transformationstechnologien als auch der Volllaststunden um eine bestmögliche Abschätzung handelt. Die Ergebnisse geben damit einen ersten Indikator für die Entwicklung der Endenergieverbräuche und Anschlussleistungen, stellen jedoch keine abschließende Bewertung dar. Relevante Effekte wie Produktionsmengenentwicklungen, Effizienzgewinne, oder spezifische Verfahrensroutenwechsel werden nicht berücksichtigt. Insbesondere für standortspezifische Einschätzung ist eine detailliertere Betrachtung unter Berücksichtigung der jeweiligen Gegebenheiten erforderlich, um aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten.

Tabelle 4-2: Parameter für die Abschätzung der aus der Transformation resultierenden Endenergiebedarfe. Der Elektrifizierungsgrad bezieht sich auf den bisher fossil gedeckten Anteil der Wärmeerzeugung. Über den COP werden sowohl Wärmepumpen als auch direkt elektrische Wärmeerzeugung abgedeckt.

Temperaturniveau		< 100 °C	100 – 500 °C	> 500 °C
Elektrifizierung durch...		... Wärmepumpe	... Wärmepumpe + direkt elektrisch	... direkt elektrisch
Starke Elektrifizierung	Elektrifizierungsgrad	100 %	90 %	50 %
	„COP“	3,0	2,2	1
Moderate Elektrifizierung	Elektrifizierungsgrad	90 %	50 %	10 %
	„COP“	3,0	2,2	1

5 Steckbrief: Branchenübergreifende Technologien und Prozesse

Die Anwendung **branchenübergreifender Technologien** ist nicht auf einzelne Wirtschaftszweige oder Prozesse beschränkt. Sie kommen in einer Vielzahl an Wirtschaftszweigen zum Einsatz und sind daher gebündelt dargestellt.

Um diese zu dekarbonisieren, sollten zunächst Effizienzpotenziale gehoben werden, bevor anschließend Transformationsmaßnahmen umgesetzt werden. Je niedriger das notwendige Temperaturniveau ist, desto einfacher lässt sich die Wärmebereitstellung elektrifizieren.

Tabelle 5-1: Branchenübergreifende Technologien und exemplarische Anwendungsbereiche dieser.

Technologien & Anwendungsbereiche mit Scope 1-Emissionen (Direkter Verbrauch (fossiler) Brenn- & Kraftstoffe)	
	Prozesswärmeerzeugung (& -verteilung) z. B. Öfen, Schmelzwannen, Härteverfahren
	Raumwärmeerzeugung (& -verteilung) z. B. Heizung von Büros oder Hallen, Luftkonditionierung
	Warmwassererzeugung (& -verteilung) z. B. sanitäre Bereiche, Waschen, Reinigung
	Mobilität z. B. manuelle Flurförderzeuge, Dienstwagen, Nutzfahrzeuge
Fokus: Effizienz- & Transformationsmaßnahmen	
Technologien & Anwendungsbereiche mit Scope 2-Emissionen (Kein (direkter) Verbrauch (fossiler) Brenn- & Kraftstoffe)	
	Elektrische Antriebe z. B. Pumpen, Ventilatoren, Förderbänder
	Beleuchtung z. B. Hallenbeleuchtung, Außenbeleuchtung auf dem Werksgelände
	Lüftungstechnik (Fokus Ventilatoren) z. B. Einhaltung von Grenzwerten an belasteten Arbeitsplätzen, Frischluftzufuhr, Belüftung von Reinräumen
	Druckluft z. B. Reinigungsprozesse, pneumatische Systeme
	Elektronische Datenverarbeitung (EDV) bzw. Information und Kommunikation (IKT) z. B. Büros, Verwaltung, firmeneigene Server
	(Klima-) Kälteerzeugung & -verteilung z. B. Prozesskühlungen (Produkte, Produktionsanlagen), Raumklimatisierung
Fokus: Effizienzmaßnahmen	
Sonstige Technologien & Maßnahmen	
	Erneuerbare Energien z. B. Photovoltaik, Solarthermie
	Gebäudehülle z. B. Wärmedämmung, Dachtragfähigkeit, elektrische Ausstattung

Die in diesem Steckbrief behandelten branchenübergreifenden Technologien werden in allen Wirtschaftszweigen eingesetzt. Dieser Steckbrief bildet somit ein Fundament für die Transformation aller Wirtschaftszweige. Insbesondere ist er relevant für die Fokusbranchen ohne eigenen branchenspezifischen Steckbrief, wie bspw. Holz, elektrische Ausrüstungen, oder Kraftfahrzeuge (Kfz). Spezifische energieintensive Prozesse der Branchen Glas und Keramik, Papier, DV-Geräte und Uhren, Textilien, Chemie und Pharma, Gummi und Kunststoffe, Metallverarbeitung und Ernährung, sowie der Handwerke Bäcker, Fleischer und Textilreiniger werden in den jeweiligen Branchen- bzw. Handwerkssteckbriefen behandelt. Dennoch sind für deren Transformation auch die branchenübergreifenden Technologien aus diesem Steckbrief von Bedeutung.

5.1 Technologieübersicht: Branchenübergreifende Technologien

Branchenübergreifende Technologien decken unterschiedliche Anwendungsbereiche ab und sind daher Bestandteil vieler Branchen und Fertigungsverfahren. Tabelle 5-1 listet ausgewählte Technologien und exemplarische Anwendungsbereiche auf. Bei einigen dieser Technologien können verschiedene Energieträger für die jeweilige Anwendung eingesetzt werden (z. B. Raumwärmeerzeugung per Erdgaskessel oder Wärmepumpe), während bei anderen nur ein Energieträger von Bedeutung ist (z.B. Strom für die Beleuchtung). Die maßgeblich eingesetzten Energieträger sind auch für die zugehörigen Dekarbonisierungspotenziale entscheidend: Werden fossile Brenn-/Kraftstoffe eingesetzt, sind Transformationsmaßnahmen erforderlich.

Werden keine fossilen Brennstoffe genutzt, ist dennoch eine Prüfung von Energieeffizienzmaßnahmen sinnvoll, um Energie- und Kosteneinsparungen zu erzielen.

5.2 Efficiency First: Übergreifende Energieeffizienzmaßnahmen

Grundsätzlich sind Effizienzmaßnahmen für alle gezeigten branchenübergreifenden Technologien verfügbar. Abbildung 5-1 zeigt das in der Praxis durch Energieaudits ermittelte Stromeinsparpotenzial verschiedener Technologien und Anwendungsbereiche. Dieses ist bei der Beleuchtung und Raumwärme durchschnittlich am größten. In nahezu allen Bereichen wurden einzelne Einsparpotenziale von über 60 % erfasst.

In der Industrie sind Effizienzmaßnahmen von Bedeutung, da sie sich oft schneller und einfacher umsetzen lassen als Transformationsmaßnahmen und gleichzeitig rentabel sein können. Die Initiative der Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke (IEEKN) unterscheidet dabei drei Maßnahmenkategorien [54]:

- Bei **personen-orientierten Maßnahmen** folgen die Effizienzverbesserungen aus Verhaltensänderungen von sensibilisierten Mitarbeiter:innen.
- Bei **technisch-orientierten** Maßnahmen spart die Optimierung von bestehenden Anlagen oder Prozessen Energie ein.
- **Gering-investive** Maßnahmen umfassen Veränderungen bzw. den Ersatz vorhandener Anlagen.

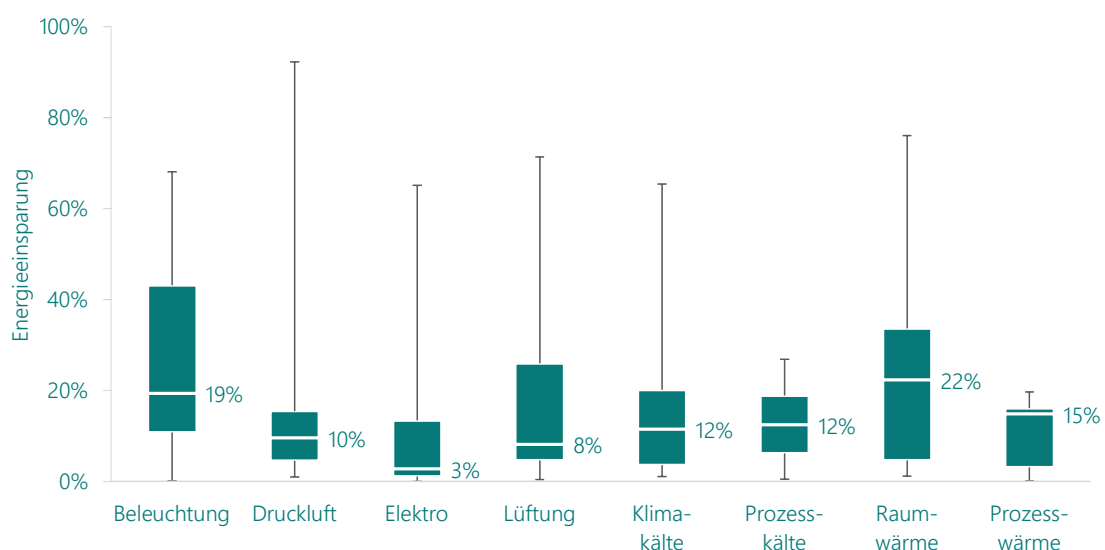


Abbildung 5-1: Stromeinsparpotenzial verschiedener branchenübergreifender Technologien basierend auf zwischen 2018 und 2020 von der FfE durchgeführten Energieaudits [53].

Bereits heute verfügbare Effizienzmaßnahmen sind u.a.:

- Bedarfsorientierte steuerungstechnische Anpassung von Lüftungsanlagen,
- Erhöhung von Temperaturniveaus in Kühlkreisläufen und verstärkte Nutzung freier Kühlung,
- Temperaturanhebung in gekühlten IT-Räumen,
- Absenken des Druckniveaus von Druckluftsystemen,
- Modernisierung der Beleuchtung durch LED,
- Isolierung von Heizungsleitungen und -armaturen,
- Einsatz moderner & effizienter Pumpen,
- Bedarfsgerechte Regelung von Ventilatoren,
- Gebäudeautomation und
- intelligente Steuerungs- bzw. Energiemanagementsysteme.

Eine umfassende Auflistung sowie ausführliche Beschreibungen weiterer Effizienzmaßnahmen ist z.B. als Maßnahmenliste zum Download auf der Website der Effizienznetzwerke [54] zu finden.

Im Kontext der Dekarbonisierung stellt die **Abwärmenutzung** eine besonders relevante Effizienzmaßnahme dar, da sie durch Kopplung verschiedener Prozesse auf unterschiedlichen Temperaturniveaus den Brennstoffbedarf – und damit die Emissionen – an anderer Stelle senken kann. Die Abwärmenutzung wird bereits in verschiedenen Bereichen eingesetzt, u. a.:

- an Druckluftkompressoren,
- an elektrisch beheizten Maschinen,
- an Kältemaschinen,
- an Computerservern und
- an Abluftströmen.

Zentrale Anlagen dazu sind Wärmetauscher, -speicher und -pumpen [10]. Die mit der Abwärmenutzung einhergehenden Einsparpotenziale unterscheiden sich von Unternehmen zu Unternehmen. Ein Papierhersteller konnte beispielsweise durch ein kombiniertes Zu- und Abluftgerät mit einem Rotationswärmeübertrager (113.000 € Investitionskosten, 2013) zur Frischluftvorwärmung 210 MWh Erdgas pro Jahr einsparen [55]. Die Roth Werke GmbH konnte durch drei Sole/Wasser-Wärmepumpen (250.000 € Investitionskosten, 2010) Prozessabwärme für Heizzwecke nutzbar machen und so den Energieverbrauch der Heizung um ca. 1,7 GWh/a senken [55].

Branchenübergreifende Technologien ohne (bzw. mit nur geringem) direktem Verbrauch von Brennstoffen (siehe Tabelle 5-1, zweiter Abschnitt) nutzen nahezu vollständig Strom als Energieträger und verursachen daher keine Scope 1-Emissionen. Aus gesamtsystemischer Perspektive können Effizienzmaßnahmen

für diese Technologien, neben dem CO₂-Faktor des Strommixes, einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung durch Senkung des Energiebedarfes leisten.

Bei Technologien, die im Status quo hingegen maßgeblich fossile Energieträger als Brennstoff verbrauchen, ist die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen allein nicht ausreichend, um eine vollständige Dekarbonisierung zu erreichen, da ein Anteil fossiler Energieträger verbleibt. Der Fokus dieses Steckbriefs liegt daher auf branchenübergreifenden Anwendungsbereichen, in denen Technologien mit direktem Brennstoffverbrauch zum Einsatz kommen (siehe Tabelle 5-1, erster Abschnitt).

5.3 Transformationsmaßnahmen für Prozess- & Raumwärme, Warmwasser & Mobilität

Die vier branchenübergreifenden Anwendungen aus Abschnitt eins von Tabelle 5-1 lassen sich anhand der Nutzenergie noch einmal in zwei Kategorien unterteilen. Bei der Prozesswärme-, Raumwärme- und Warmwassererzeugung (& -verteilung) steht die **Bereitstellung von Wärme** im Vordergrund, während bei **Mobilität** kinetische Energie wesentlich ist.

Im **Status quo** spielen Anlagen mit direktem Verbrauch fossiler Brenn- und Kraftstoffe bei der Bereitstellung dieser vier Anwendungsbereiche noch eine signifikante Rolle. Jedoch stehen bereits zahlreiche Dekarbonisierungstechnologien (Tabelle 5-2) ohne direkten Verbrauch fossiler Brennstoffe zur Verfügung.

Einige Dekarbonisierungsmaßnahmen basieren auf einem Brennstoffwechsel hin zu (bilanziell) emissionsfreien Brennstoffen. Synthetische oder biogene Brennstoffe mit der gleichen chemischen Zusammensetzung wie die fossile Referenz können diese ohne weitere technische Anpassungen ersetzen. **Synthetische Brennstoffe**, wie synthetisches Methan bzw. e-Fuels, können fossiles Erdgas substituieren. Die bisherigen Gasanschlussleistungen bleiben erhalten, sofern der synthetische Brennstoff über das Erdgasnetz bezogen wird. Aufgrund der im Status quo unklaren Situation bezüglich der wirtschaftlichen Herstellung und Verfügbarkeit werden synthetische Brennstoffe im Folgenden nicht weiter betrachtet. Ähnliches kann auch **Biometan** bei entsprechender Reinheit fossiles Erdgas ohne technische Anpassungen ersetzen. Auch hier bleibt die Gasanschlussleistungen erhalten, sofern das Biometan über das Erdgasnetz (auch als Beimischung oder bilanziell möglich) bezogen wird. Für Biomethan ist die langfristige quantitative Verfügbarkeit aufgrund von Nutzungskonkurrenzen und der Vorrang der

stofflichen Nutzung fraglich. Ein rein bilanzieller Bezug von Biomethan kann bereits heute per Vertragsabschluss über das vorhandene Erdgasnetz erfolgen. Nicht aufgereinigtes **Biogas** kann Erdgas nicht immer ersetzen, da es neben (Bio-)Methan zu etwa einem Drittel auch aus CO₂ besteht [56].

Tabelle 5-2: Anwendungen mit direktem Brenn-/Kraftstoffverbrauch und zugehörige Transformationsmaßnahmen.

Anwendung	Transformationsmaßnahmen
Prozesswärme	Elektro-/ Elektrodenkessel, (Hochtemperatur-)Wärmepumpe, Biomasse, Wasserstoff
Raumwärme	Wärmepumpen, Solarthermie, Geothermie, Pellet-/Hackschnitzelheizung
Warmwasser	Heizstäbe (elektr. Warmwasserbereitung), Wärmepumpe, Solarthermie, sonstige dezentrale elektr. Systeme (zum Abschalten der Zentralheizung im Sommer)
Mobilität	Elektrisch angetriebene Fahrzeuge

5.3.1 Wärmebereitstellung

Die Möglichkeiten zur **Prozesswärmebereitstellung** werden neben Produkteigenschaften wie Geometrie (insbesondere Bauteilgröße und -form) und Material (z. B. leitfähige Metalle oder Nicht-Metalle) maßgeblich vom benötigten Temperaturniveau vorgegeben. Dies trifft bei **Raumwärme und Warmwasser** nicht zu, da hier im Vergleich zur Prozesswärme nur geringe Temperaturniveaus benötigt werden.

Eine in verschiedenen Branchen relevante Technologie zur Wärmebereitstellung (v. a. Prozesswärme) ist die **Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)**. Für KWK-Anlagen bestehen verschiedene Anlagenkonzepte:

- Verbrennungsmotoren,
- Dampfturbinen (Gegendruck- und Entnahmekondensationsturbinen),
- Gasturbinen mit Abhitzekessel oder nachgeschalteter Dampfturbine, sowie
- Brennstoffzellen.

Je nach Konzept sind unterschiedliche Leistungsbereiche, Temperaturniveaus und Wirkungsgrade möglich. Die verfügbaren Leistungen reichen von einigen kW (Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen) bis zu ca. 800 MW_{el} (Entnahmekondensationsturbinen). Gasturbinen mit Abhitzekessel erreichen mit bis zu 450 °C Nutzwärme die höchsten Temperaturen. Die Gesamtwirkungsgrade befinden sich überwiegend im Bereich zwischen 80 und 90 %. [56]

Die Kombination mehrerer Technologien zur Wärmebereitstellung stellt häufig eine sinnvolle Option für die Dekarbonisierung – insbesondere bei mittleren bzw. höheren Temperaturniveaus – dar. So kann beispielsweise die Elektrifizierung der thermischen Grundlast über eine (Hochtemperatur-)Wärmepumpe, mit einem nachgeschalteten Heizmodul (z. B. Elektrodenkessel, zusätzliches elektrisches Heizmodul) für Spitzenlasten oder -temperaturen ergänzt werden.

Die Dekarbonisierungstechnologien werden nach Temperaturniveau unterteilt betrachtet:

Niedertemperaturwärme < 150 °C: Prozess- & Raumwärme, Warmwasser

Dieser Temperaturbereich ist für eine breite Menge an Anwendungen relevant. Für eine (nahezu) vollständige Vermeidung der in Scope 1 entstehenden CO₂-Emissionen stehen auf Ebene der branchenübergreifenden Technologien derzeit folgende Transformationsmaßnahmen zur Verfügung:

- (Hochtemperatur-)Wärmepumpen,
- Solarthermie,
- Geothermie,
- Stromdirektheizung,
- Elektrokessel,
- Fernwärme und
- Brennstoffwechsel zu Biomasse.

Tabelle 5-3 beschreibt diese Maßnahmen ausführlicher.

Mitteltemperaturwärme: 150 bis 500 °C:

Prozesswärme

Für Mitteltemperaturwärme stehen weniger Transformationsmaßnahmen als für Niedertemperaturwärme zur Verfügung. Hinzu kommt, dass dieses Temperaturniveau üblicherweise in Sachsen nicht mit Solar- oder Geothermie abgedeckt werden kann. Stattdessen stehen

- Elektrodenkessel,
- elektrische Heizelemente,
- Brennstoffwechsel zu Biomasse,
- Brennstoffwechsel zu Wasserstoff und
- Hochtemperatur-Wärmepumpen (HT-WP)

Zur Verfügung. Tabelle 5-4 gibt einen Überblick über die Transformationsmaßnahmen für diesen Temperaturbereich.

Hochtemperaturwärme > 500 °C:

Prozesswärme

Die Hochtemperaturwärme deckt den absolut gesehen größten Temperaturbereich ab.

- Elektrische Heizelemente,
- Brennstoffwechsel zu Biomasse und
- Brennstoffwechsel zu Wasserstoff

stellen hier die derzeit verfügbaren Transformations-technologien für eine (nahezu) vollständige Vermeidung der CO₂-Emissionen in Scope 1 auf Ebene der branchenübergreifenden Technologien dar. Diese werden in Tabelle 5-5 beschrieben.

5.3.2 Mobilität

Im **Straßenverkehr** (Fuhrpark und Logistik) sind batterieelektrische Fahrzeuge die relevanteste Transformationsmaßnahme, da zunehmend auch batterieelektrische Lösungen im Schwerlastverkehr verfügbar sind

Für die Dekarbonisierung von Logistikprozessen sind auch der **Schiffs- und Luftverkehr** relevant. Für diese kommen derzeit vor allem synthetische Kraftstoffe in Frage (siehe Tabelle 5-6).

5.3.3 Allgemeine infrastrukturelle Anforderungen

Bei den **Elektrifizierungsmaßnahmen** ist die notwendige Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung für das Unternehmen in der Regel über eine Anpassung des bestehenden Vertrages möglich, sofern der bestehende Stromanschluss über die erforderliche Kapazitätsreserve verfügt. Ist die zusätzlich erforderliche Anschlussleistung mit dem bestehenden Stromanschluss nicht darstellbar, muss mit dem zuständigen Verteilnetzbetreiber abgestimmt werden, wie die Erhöhung

der elektrischen Anschlussleistung ermöglicht werden kann. Üblicherweise gehen damit Bauleistungen zur Erächtigung bzw. Erweiterung der elektrischen Betriebsmittel (z. B. neuer Transformator, neue Mittelspannung- bzw. Niederspannung-Einspeisung) einher. Dabei müssen u. a. mögliche technische Lösungen, aber auch der finanzielle Aufwand (ggf. mit Baukostenzuschuss), der Zeithorizont und eventuell nötiger zusätzlicher Platzbedarf berücksichtigt werden.

Tabelle 5-3: Transformationstechnologien für Niedertemperaturwärme (< 150 °C). Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Wärmepumpe (WP) (TRL 9)	- Die hier beschriebenen Wärmepumpen erreichen Vorlauftemperaturen von bis zu 80 °C. und erzeugen bspw. Wärme für die Beheizung von Räumen durch Umweltwärme und elektrischen Strom. - Kompressionswärmepumpen stellen die am weitesten verbreitete Bauform dar. Dabei verdampft ein Kühlmittel (bspw. mittels Umweltwärme aus dem Erdboden, der Luft, der Sonne oder dem Grundwasser). Dieses wird anschließend komprimiert, wodurch es sich weiter erwärmt. In einem Wärmetauscher überträgt es die Wärme dann an das Anwendungssystem. - Wärmepumpen zur Beheizung und Warmwasserbereitung in Nichtwohngebäuden decken ein breites Leistungsspektrum ab. Heizleistungen von > 2 MW sind möglich [57]. - Die Leistungszahl (COP) hängt von der Quellen- und Vorlauftemperatur ab. Der COP von am Markt verfügbaren WP liegt je nach Betriebspunkt im Bereich von 2 bis 5, wobei ein COP von mindestens 3 im Normalbetrieb üblich ist [58]. - Die spezifischen Investitionskosten (Anlagen- & Installationskosten) sind abhängig von Anlagengröße, -leistung und Bauart. Die spezifischen Kosten einer Luft-Wasser-WP liegen im Bereich von 1.080 – 2.240 €/2025/kW_{th} (± 20 %), und nehmen mit steigender Leistung ab. Bei Wasser-Wasser-WP mit Grundwasser als Wärmequelle liegen die Kosten je kW_{th} niedriger (1.300 – ca. 500 €/2025/kW_{th} ± 20 % ab 60 kW_{th} Leistung) [59]. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass je nach vorhandener bzw. zu ertüchtigender Peripherie standortspezifisch zusätzliche Kosten anfallen können.	Der Strombedarf zur Bereitstellung von Raumwärme per Wärmepumpe ist abhängig vom zu beheizenden Raumvolumen und dem energetischen Gebäudezustand. Gegebenenfalls kann eine Erhöhung der Stromanschlussleistung erforderlich sein. Wenn zuvor Erdgas eingesetzt wurde, wird dieses substituiert. Der Strombedarf entspricht ca. dem Erdgasverbrauch geteilt durch den COP.
Solarthermie (TRL 9)	- Benötigt neben Kollektoren auf dem Dach (Flach- oder Vakuumröhrenkollektoren) auch Wärmespeicher - Temperaturbereich bis ca. 100 °C - mit großtechnischen Anlagen sind auch höhere Temperaturen möglich. Die Voraussetzungen dafür sind in Sachsen jedoch nicht günstig. - Die Kosten hängen wesentlich von der Größe der Anlage und der installierten Leistung ab. Im „Technikkatalog Wärmeplanung“ werden für eine Flächenkollektor-Dachanlage mit 5 kW_{th} Investitionskosten von 11.100 €/2025 und für eine Anlage mit 20 kW_{th} 29.000 €/2025 mit Unsicherheiten von ± 25 % angegeben. [59] - Die Amortisationszeit liegt bei günstigen Voraussetzungen im Bereich von drei bis zehn Jahren. Anlagengröße und Temperaturniveau sind hier relevante Einflussgrößen. [60]	Solarthermieanlagen weisen keinen signifikanten Eigenenergieverbrauch auf. Durch Substitution anderer Energieträger für die Wärmebereitstellung sinkt deren Verbrauch. Aufgrund der Wetterabhängigkeit von Solarthermie bleibt jedoch die Anschlussleistung (z. B. für Erdgas) i. d. R. als Redundanz erhalten.

Tabelle 5-3 (Fortsetzung)

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Geothermie (TRL 9)	• Oberflächennahe (8 bis 15 °C) und Grubenwasser (15 bis 50 °C) Geothermie sind in Sachsen möglich [11]. • Bei der oberflächennahen Geothermie wird die Temperatur anschließend durch eine Wärmepumpe angehoben [61]. • Geologische Voraussetzungen für Tiefengeothermie (~100 bis 150 °C) sind in Sachsen nicht optimal, da die am besten geeigneten hydrothermalen Systeme dort kaum vorkommen. Bisher sind nur einzelne Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Kontext der kommunalen Wärmeplanung, die aufgrund geologischer und wirtschaftlicher Risiken teils abgebrochen wurden, bekannt [11]. • Durch die nicht optimalen Voraussetzungen für Tiefengeothermie in Sachsen ist es unwahrscheinlich, dass Geothermie entscheidend zur Dekarbonisierung der sächsischen Industrie beitragen kann.	Geothermieranlagen weisen keinen signifikanten Eigenenergieverbrauch auf. Durch Substitution anderer Energieträger für die Wärmebereitstellung kann z.B. die benötigte Gasanschlussleistung sinken.
Stromdirektheizung (TRL 9)	• Geräte zum direkten Heizen mit Strom bieten Möglichkeit zu Raumwärmeerzeugung, sowie zur Dezentralisierung der Wärmeversorgung (z. B. lokale Warmwasserbereitung mittels elektrischer Untertischboiler (Durchlauferhitzer)). • Bei Stromdirektheizungen stehen Einfachheit und geringe Installationskosten den hohen Verbrauchskosten (im Vergleich zur Wärmepumpe) gegenüber. • Bauformen sind Elektro-Konvektionsheizungen, Elektro-Fußbodenheizungen, Infrarotheizungen & Elektro-Zentralheizungen (E-Kessel). • Elektrische Untertischboiler haben üblicherweise Leistungen im einstelligen kW-Bereich und Kosten im drei- bis niedrigen vierstelligen Bereich.	Die Bereitstellung von Trinkwarmwasser resultiert aufgrund der vergleichsweise geringen Leistungen üblicherweise nicht in zusätzlichen Anforderungen an die Energieinfrastruktur. Wird auch Raum- und/oder Prozesswärme direkt elektrisch bereitgestellt, kann sich die notwendige elektrische Anschlussleistung signifikant erhöhen.
Hochtemperatur-Wärmepumpe (HoT-WP) (TRL 9)	• Mit Hochtemperatur-Wärmepumpe werden hier Wärmepumpen bezeichnet, die bis zu Vorlauftemperaturen von 80 bis 100 °C erreichen. • Am Markt verfügbare HoT-WP besitzen Leistungen von bis zu 100 MW_{th} [62]. • Um das benötigte Temperaturlevel effizient zu erreichen, ist die Nutzung von Abwärme als Wärmequelle von Vorteil, aber nicht zwingend erforderlich. Bei zu hohem Temperaturhub kann die Leistungszahl (COP) jedoch auf ein unwirtschaftliches Niveau sinken [63]. • Die Leistungszahl (COP) von HoT-WP ist abhängig vom Temperaturhub und dem Temperaturlevel auf der Abgabeseite. Bei einem Temperaturhub von 60 K befinden sich der COP von HoT-WP für gewöhnlich im Bereich von drei [63]. Moderne HoT-WP realisieren vereinzelt auch schon höhere Temperaturhübe bei wirtschaftlichen Leistungszahlen. • Die Investitionskosten sind abhängig von der Konfiguration und Heizleistung. Für eine Anlagen die bis 125 °C liefern können, betragen die Investitionskosten bei 0,3 MW_{th}, ca. 282.000 € (2025) und bei 1,5 MW_{th} ca. 1.410.000 € (2025, Unsicherheit jeweils 25 %) [59]. Da solche HoT-WP derzeit noch Sonderanfertigungen darstellen, haben Ingenieurs- und Entwicklungsdienstleistungen einen hohen Anteil an den Gesamtkosten. • Im Allgemeinen sollten jedoch die Gesamtkosten über die Lebensdauer, z.B. durch Berechnung nach der VALERI-Norm (Valuation of Energy Related Investments, DIN EN 17463), betrachtet werden.	Ohne Abwärme mit entsprechendem Temperaturniveau als Wärmequelle ist eine HT-WP derzeit i. d. R. nicht wirtschaftlich. Die Anforderungen an die Stromversorgung sind abhängig von der Heizleistung und dem COP der HoT-WP. Der zusätzliche Strombedarf entspricht ca. dem vorherigen Erdgasverbrauch geteilt durch den COP.

Tabelle 5-3 (Fortsetzung)

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Höchsttemperatur-Wärmepumpe (HöT-WP) (TRL >6)	- Mit Höchsttemperatur-Wärmepumpe werden hier Wärmepumpen bezeichnet, die Vorlauftemperaturen von > 100 °C erreichen. - HöT-WP nutzen oftmals mehrstufige Systeme, bei denen vom Funktionsprinzip her mehrere Wärmepumpen in Reihe hintereinandergeschaltet sind. - HöT-WP können Wärme üblicherweise im Bereich bis ca. 150 °C bereitstellen, wobei ab ca. 100 °C überwiegend Schraubenkompressoren zum Einsatz kommen [63]. Am Markt verfügbare HöT-WP besitzen Leistungen von bis zu 100 MW_{th} [62]	Ohne Abwärme mit entsprechendem Temperaturniveau als Wärmequelle ist der Einsatz einer HT-WP i.d.R. nicht wirtschaftlich. Die Anforderungen an die Stromversorgung sind abhängig von der Heizleistung der HöT-WP.
Elektrokessel (TRL 9)	- Elektrokessel verfügen über einen Heizwiderstand und werden überwiegend mit Niederspannung betrieben. - Gängige Modelle zur Heißwassererzeugung bieten Leistungen im Bereich von 0,1 bis ca. 10 MW bei Betriebsdrücken von 6 bis 25 bar [64]. - Der Umwandlungswirkungsgrad von Strom in Wärme liegt bei nahezu 100 % [65]. - Die Investitionskosten liegen im Bereich von 125 bis 350 €/kW₂₀₁₄ [12], [65]. - Elektrokessel weisen i. d. R. Möglichkeiten zur Hybridisierung und damit Energieflexibilitätpotenziale auf, die zusätzliche Erlöse ermöglichen können.	In der Regel ist eine Erhöhung der Anschlussleistung für Strom notwendig. Die Kosten dafür liegen bei 25 bis 150 €/kW₂₀₁₄ [12].
Biomasse (TRL 9)	- Die energetische Nutzung von Biomasse, z.B. Hackschnitzel, im NT-Bereich ist technisch ausgereift und verfügbar. - Gängige Pelletkessel (10 bis 100 kW_{th}) erfordern Investitionskosten von ca. 35.600 bis 96.000 €₂₀₂₅ [59]. Mit Pellets können jedoch auch höhere Leistungen realisiert werden. - Mit Biomasse-Heizwerken sind deutlich höhere Leistungen (z.B. bis zu 20 MW_{th}) möglich. [59] - Bei der energetischen Nutzung von Biomasse müssen zudem die Platzanforderungen für Erzeugung und Lagerung sowie auch die Biomasseverfügbarkeit berücksichtigt werden. Aus diesen Gründen ist der Einsatz von Biomasse als Dekarbonisierungsmaßnahme in der Breite weniger wahrscheinlich als bei anderen Technologien.	Bei Einsatz fester Biomasse reduziert sich die bisherige Gasanschlussleistung. Es werden unternehmenseigene Vorratsspeicher benötigt.
Fernwärme (TRL 9)	- Das Dekarbonisierungspotenzial ist abhängig von der eingesetzten Wärmeerzeugung. Fernwärme beschreibt grundsätzlich nur eine Art der Wärmeversorgung. - Die Kosten für Fernwärme variieren je nach Anbieter und Netz. 2025 lagen die Preise in Deutschland bei einer angenommenen Benutzungsdauer von 2.000 h/a (bei 1.200 MWh/a und 600 kW) zwischen 81 bis 182 €₂₀₂₅/MWh. Im deutschlandweiten Vergleich sind die Kosten für Fernwärme in Sachsen 2025 im (oberen) Mittelfeld. Die genauen Kosten unterscheiden sich lokal je nach Anbieter. [66] - Die Nutzung von Fernwärme als Dekarbonisierungsmaßnahme hängt auch von der Verfügbarkeit eines Fernwärmenetzes ab. Daher ist der Einsatz von Fernwärme als Dekarbonisierungsmaßnahme in der Breite im Vergleich zu anderen Technologien weniger wahrscheinlich.	Anschluss ans Fernwärmenetz erforderlich. Anschlussleistung ist abhängig vom maximalen Leistungsbezug an Raum- und ggf. Prozesswärme.

Tabelle 5-4: Transformationstechnologien für Mitteltemperaturwärme (150 °C – 500 °C). Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Elektrodenkessel (TRL 9)	- Elektrodenkessel nutzen Wasser als Heizleiter und werden mit bis zu 24 kV Hochspannung betrieben. - Elektrodenheizkessel ermöglichen die Erzeugung von Prozessdampf mit bis zu 30 bar und 230 °C. Mithilfe von Elektrodendurchlauferhitzern kann die Dampftemperatur weiter erhöht werden. So können auch Dampfstromströme von 100 t/h mit 85 bar realisiert werden. - Elektrodenkessel decken einen breiten Leistungsbereich von 50 kW bis zu 60 MW ab [56]. - Der typische Wirkungsgrad liegt bei ca. 99 % [56]. - Im Fernwärme-Bereich (Niedertemperatur) liegen die Investitionskosten bei 75 bis 150 €/2014/kW, im Hochtemperaturbereich bei 100 bis 200 €/2014/kW [12]. Für den Mitteltemperaturbereich können basierend darauf Kosten im Bereich von 100 – 175 €/kW (2014) erwartet werden. - Elektrodenkessel weisen Flexibilisierungspotenzial auf. - Elektrodenkessel können Erdgas-KWK-Anlagen und -kessel ergänzen und dadurch hybridisieren [56].	Durch den Wirkungsgrad von fast 100 % entspricht die benötigte elektrische Anschlussleistung nahezu der thermischen Leistung der Kessel. In der Regel ist eine Erhöhung der Anschlussleistung für Strom notwendig. Die Kosten dafür liegen bei 25 bis 150 €/2014/kWh [12].
Widerstandserwärmung (TRL 9)	- Bei der Widerstandserwärmung (konduktive Erwärmung) wird Strom durch das zu erwärmende Werkstück oder ein Heizelement geleitet. Die Vorteile kurzer Aufheizzeiten und geringer Oxidation stehen der Limitierung auf günstige Werkstückgeometrien (gleichmäßiger Querschnitt, Länge-Querschnitt-Verhältnis) gegenüber. [56] - Bei der indirekten Widerstandserwärmung mit Heizelementen aus intermetallischen Verbindung mit keramischen Zusätzen können auch Temperaturen > 500 °C erreicht werden [67] - Leistung und Kosten sind abhängig von der Ofenkonfiguration.	Der Strombedarf ist abhängig von der Anlagengröße und Temperaturniveau. Gegebenenfalls können daher zusätzliche Stromanschlüsseleistungen benötigt werden.
Höchsttemperatur-Wärmepumpe (HöT-WP) (TRL <6)	- Mit Höchsttemperatur-Wärmepumpe werden hier Wärmepumpen bezeichnet, die Vorlauftemperaturen von > 100 °C erreichen. - HöT-WP nutzen oftmals mehrstufige Systeme, bei denen vom Funktionsprinzip her mehrere Wärmepumpen in Reihe hintereinandergeschaltet sind. - Erste HöT-WP sind in der Lage, Temperaturen > 150 °C bereitzustellen. Die HöT-WP <i>ThermBooster™</i> von SPH beispielsweise ist in der Lage Dampf mit bis zu 160 °C und Heißwasser mit bis zu 165 °C zu erzeugen. [68] - Zukünftig wird mit Vorlauftemperaturen von bis zu 200 °C gerechnet [68]. Wenn in Abhängigkeit der geforderten Dampfparameter möglich, kommen dabei üblicherweise zusätzliche Nachverdichter oder Booster zum Einsatz.	Ohne Abwärme mit entsprechendem Temperaturniveau als Wärmequelle ist der Einsatz einer HöT-WP derzeit i. d. R. nicht wirtschaftlich. Die Anforderungen an die Stromversorgung sind abhängig von der Heizleistung der HöT-WP.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Brennstoffwechsel		
Biomasse (TRL 9)	- Der Einsatz von Biomasse in verschiedenen Formen (z. B. Hackschnitzel oder Pellets) ist möglich. Zu beachten sind Nachhaltigkeitsanforderungen (bspw. bzgl. Herkunft der Biomasse) sowie eine zunehmende Nutzungskonkurrenz um die begrenzten Ressourcen. - Gängige Pelletkessel zur dezentralen Wärmeerzeugung liegen im Bereich von 10 bis 100 kW_{th} und erfordern Investitionskosten von ca. 35.600 bis 96.000 €₂₀₂₅. Hackschnitzelkessel zur dezentralen Wärmeerzeugung liegen in einem ähnlichen Leistungsbereich (20 bis 110 kW_{th}). [59] - Heizwerke, die mit Hackschnitzel, Pellets oder Grünschnitt betrieben werden können, können auch zur zentralen Wärmeerzeugung mit Biomasse genutzt werden. Mit ihnen sind deutlich höhere Leistungen (bis zu 20 MW_{th}) möglich. Ein Biomasse-Heizwerk mit 5 MW_{th} würde bspw. Investitionskosten von ca. 4,2 Mio. €₂₀₂₅ (± 30 %) bedeuten. Die spezifischen Investitionskosten nehmen mit der Leistung der Anlage zu und liegen im Bereich von 570 bis 1.180 €₂₀₂₅/kW_{th} (± 30 %). [59] - Am Markt erhältliche Wasserrohrdampfkessel können überhitzten Dampf mit 90 bar und 480 °C bereitstellen. Der Wirkungsgrad ist abhängig von der eingesetzten Biomasse, wobei ca. 90 % üblich sind. [69].	Bei Einsatz fester Biomasse reduziert sich die bisherige Gasanschlussleistung. Es werden unternehmenseigene Vorratsspeicher benötigt. Deren Größe ist u.a. abhängig vom Versorgungskonzept und der Kesselleistung.
Wasserstoff (TRL 9)	- Die energetische Nutzung von Wasserstoff, der als Nebenprodukt anfällt, ist ein etabliertes Verfahren. Technik und Erfahrungswerte im Betrieb sind daher vorhanden. [70] - Gängige Wasserstoffkessel zur dezentralen Wärmeerzeugung liegen im Bereich von 10 bis 100 kW_{th} und erfordern Investitionskosten von ca. 490 bis 110 €/kW_{th} (2025, Unsicherheit von ca. 28 %). Es kann mit einer Lebensdauer von ca. 20 Jahren gerechnet werden. [59] - Wasserstoff- und erdgasbefeuerte Großwasserraumkessel sind hinsichtlich Temperatur-, Druckbereich, Dampfkapazität und Anschlussleistung vergleichbar [56]. - Der Wirkungsgrad von Wasserstoffkesseln kann (mit Brennwerttechnik) bis zu 98 % betragen [70]. - Für den Einsatz von Wasserstoffkesseln ist die wirtschaftliche Verfügbarkeit von Wasserstoff Voraussetzung. Eine breite Versorgung mit Wasserstoff ist Ende 2025 nicht gegeben und auch die zu erwartenden Kosten sind deutlich höher als vergleichbarer Erdgasbezug. Als Dekarbonisierungstechnologie mit breiter Anwendung kommt Wasserstoff daher frühestens mittelfristig in Frage.	Aufgrund des niedrigeren volumetrischen Energiegehalts (kWh/m³) im Vergleich zu Erdgas sind bestehende Erdgasleitungen u.U. nicht ausreichen, um die benötigte Anschlussleistung mit Wasserstoff bereitzustellen. [70] Aufgrund des Diffusionsverhaltens von Wasserstoff können Ertrüchtigungsmaßnahmen an bestehenden Erdgasleitungen nötig sein, bspw. der Tausch von Zählern und ggf. Filtern. [70] [59].

Tabelle 5-5: Transformationstechnologien für Hochtemperaturwärme (ab 500 °C). Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Widerstandserwärmung (TRL 9)	- Bei der Widerstandserwärmung (konduktive Erwärmung) wird Strom durch das zu erwärmende Werkstück oder ein Heizelement geleitet. Kurze Aufheizzeiten und niedrige Oxidation stehen der Limitierung auf günstige Werkstückgeometrien (gleichmäßiger Querschnitt, Länge-Querschnitt-Verhältnis) gegenüber. [56] - Bei der indirekten Widerstandserwärmung mit Heizelementen aus der intermetallischen Verbindung Molybdändisilizid (MoSi_2) mit keramischen Zusätzen können Temperaturen von bis zu 1.800 °C erreicht werden [67] - Leistung und Kosten sind abhängig von der Ofenkonfiguration. - Beispielhafte Einsatzmöglichkeiten im Hochtemperaturbereich: Sintern in der Keramikindustrie, Halbleiter (Oxidieren von Siliziumoberflächen bei 900 – 1100 °C) oder Spezialgläser (z.B. Borosilikatglas) [71].	In der Regel ist eine Erhöhung der Anschlussleistung für Strom notwendig. Der Umfang ist abhängig von der Ofenkonfiguration.
Brennstoffwechsel		
Biomasse (TRL 9)	- Öfen, die Stäube aus Biomasse (z. B. Holzstaub) verbrennen können Temperaturniveaus bis zu 1.000 °C erreichen. - Leistungsbereich: 1,5 bis 90 MW [59] - Für die Kosten ist aufgrund der bisher begrenzter Verbreitung keine pauschale Aussage möglich. - Verfügbarkeit der benötigten Biomasse muss berücksichtigt werden. Anwendungen bisher primär in hochintegrativen Wertschöpfungsketten oder Forschungsprojekten.	Bei Einsatz fester bzw. staubförmiger Biomasse reduziert sich die bisherige Gasanschlussleistung. Es werden unternehmenseigene Vorratsspeicher benötigt, deren Größe u.a. abhängig vom Versorgungskonzept und der Ofenleistung ist.
Wasserstoff (TRL 9)	- Die energetische Nutzung von Wasserstoff, der als Nebenprodukt anfällt, ist ein etabliertes Verfahren. Technik und Erfahrungswerte sind daher vorhanden. [70] - Gängige Wasserstoffkessel zur dezentralen Wärmeerzeugung liegen im Bereich von 10 bis 100 kW_{th} und erfordern Investitionskosten von ca. 490 bis 110 $\text{€}_{2025}/\text{kW}_{\text{th}}$ ($\pm 28\%$). Es kann mit einer Lebensdauer von ca. 20 Jahren gerechnet werden. [59] - Wasserstoff- und erdgasbefeuerte Großwasserraumkessel sind hinsichtlich Temperatur-, Druckbereich, Dampfkapazität und Anschlussleistung vergleichbar [56]. - Der Wirkungsgrad von Wasserstoffkesseln kann (mit Brennwerttechnik) bis zu 98 % betragen [70]. - Für den Einsatz von Wasserstoffkesseln ist die wirtschaftliche Verfügbarkeit von Wasserstoff Voraussetzung. Eine breite Versorgung mit Wasserstoff ist Ende 2025 nicht gegeben und auch die zu erwartenden Kosten sind deutlich höher als vergleichbarer Erdgasbezug. Als Dekarbonisierungstechnologie mit breiter Anwendung kommt Wasserstoff daher frühestens mittelfristig in Frage.	Aufgrund des niedrigeren volumetrischen Energiegehalts im Vergleich zu Erdgas, können bestehende Erdgasleitungen u. U. nicht ausreichen, um die benötigte Anschlussleistung mit Wasserstoff bereitzustellen. [70] Aufgrund des Diffusionsverhaltens von Wasserstoff können Ertüchtigungsmaßnahmen an bestehenden Erdgasleitungen nötig sein, bspw. der Tausch von Zählern oder ggf. Filtern. [70] Hinzu können Kosten für u.a. Schornsteinertüchtigung oder Pufferspeicher kommen [59].

Tabelle 5-6: Transformationstechnologien für Mobilität. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Batterieelektrische Pkw & leichte Nutzfahrzeuge (TRL 9)	- Batterieelektrische Pkw gibt es für alle Fahrzeugklassen. So sind z. B. auch batterieelektrische Kastenwägen am Markt verfügbar. Signifikante Einbußen der Leistung gibt es dabei nicht, es können jedoch weniger Konfigurationsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. - Die Investitionskosten batterieelektrischer Fahrzeuge liegen über vergleichbaren Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. So ist der Sprinter von Mercedes Benz ab ca. 32.600 € verfügbar, während der Einstiegspreis des eSprinters bei etwa 38.000 € (+17 %) liegt (Stand Oktober 2025) [184] [185]. - Die Reichweite von batterieelektrischen Pkw ist zwischen 2017 und 2025 stark gestiegen. Reichweiten von über 500 km entsprechen dem Stand der Technik [72]. - Der Stromverbrauch beim Fahren ist modellabhängig, liegt jedoch meist im Bereich von 18 bis 20 kWh/100 km [73]. - Die Energiekosten hängen wesentlich davon ab, wie der Ladestrom erzeugt und von wem dieser bezogen wird. Da der Strompreis öffentlicher Schnellladestationen teils deutlich höher liegt, empfiehlt sich die Nutzung von Strom aus Eigenenergieerzeugung (z.B. Photovoltaik) [73].	Pkw mit Verbrennungsmotor sind auf öffentliche Tankstellen angewiesen. Batterieelektrische Pkw können hingegen auch im Unternehmen geladen werden. Die Anforderungen an die Ladeinfrastruktur hier hängen u. a. von der Größe der Fahrzeugflotte und der Ladebetriebsart ab. Weiterführende Informationen hierzu sind im technischen Leitfaden „Ladeinfrastruktur Elektromobilität“ zu finden [74]. Öffentliche Ladeinfrastruktur entlang Hauptverkehrsachsen ist bei längeren Fahrten (z.B. im Außendienst) dennoch wichtig [75].
Elektrische Lkw (TRL 9)	- Die direkte Verlagerung standortübergreifender Transport- und Logistikprozesse auf die Schiene ist häufig nicht möglich, da hierzu an den Unternehmensstandorten z.B. Gleisanschlüsse fehlen. - Für die Elektrifizierung von Nutzfahrzeugen für den Straßengüterverkehr stehen neben batterieelektrischen Antrieben auch Brennstoffzellen und Oberleitungen zur Verfügung. Batterieelektrischen Nutzfahrzeugen wird das größte Potenzial zur Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs zugesprochen. - Moderne Fahrzeuge dieser Art erreichen bereits 500 km Reichweite bei ähnlicher Nutzlast. - Der Durchschnittsverbrauch der eTruck-Flotte von MAN beträgt 106 kWh auf 100 km [76]. - Auf eine Haltedauer von fünf Jahren bezogen weisen batterieelektrische Lkw bereits die niedrigsten Gesamtkosten über die Haltedauer hinweg auf [13]. - Die Investitionskosten hängen bei batterieelektrischen Lkw u.a. von der Kapazität des Akkus ab. Der Kaufpreis von batterieelektrischen Lkw der Klasse N3 beträgt ca. das zwei- bis dreifache eines vergleichbaren Diesel Lkw (schwere batterieelektrische Lkw können im Bereich von 300.000 € (2020) und darüber liegen) [77], [78]. Es wird jedoch bereits bis 2035 mit einer Kostenreduktion, insbesondere bei den Batterien, gerechnet [79]. - Die Energiekosten hängen wesentlich davon ab, wie der Ladestrom erzeugt und von wem dieser bezogen wird. Da der Strompreis öffentlicher Schnellladestationen teils deutlich höher liegt, empfiehlt sich die Nutzung von Strom aus Eigenenergieerzeugung (z.B. Photovoltaik)[73].	Nutzfahrzeuge mit Verbrennungsmotor sind auf das etablierte Netz öffentlicher Tankstellen angewiesen. Elektrifizierte Nutzfahrzeuge können hingegen auch in betrieblichen Depots geladen werden. Öffentliche Ladeinfrastruktur entlang Hauptverkehrsachsen ist dennoch wichtig. Mit der Einführung von Megawatt-Ladestationen ist ein Ausbau der Energieinfrastruktur entlang der Hauptverkehrsachsen alternativlos [75].

Tabelle 5-6 (Fortsetzung)

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Batterieelektrische Flurförderzeuge (TRL 9)	- Für standortinterne Transportprozesse kann auf elektrifizierte Flurförderzeuge zurückgegriffen werden. - Beispielsweise im Bereich Stapler stehen hinsichtlich Nenntragfähigkeit, Hub, Hub-/Senkgeschwindigkeit, Fahrgeschwindigkeit und Einsatzbereich vergleichbare elektrisch und dieselbetriebene Maschinen zur Verfügung. - Allgemein weisen elektrische Flurförderzeuge höhere Anschaffungskosten auf. Die Betriebskosten sind jedoch geringer (bis zu 45%), weshalb sich insbesondere im Indoor-Betrieb elektrische Flurförderzeuge lohnen [80].	Beim werksinternen Einsatz ist die Ladeinfrastruktur vor Ort entscheidend. Diese muss entsprechend der Fahrzeugflotte, des Nutzungsprofils (u.a. Gleichzeitigkeit bei Nutzung und Ladung) und Ladebetriebsart dimensioniert werden. Relevante Richtlinien dazu sind die VDI 2199 und VDI 4482 sowie der technische Leitfaden <i>Ladeinfrastruktur Elektromobilität</i> [81] [74].
Brennstoffwechsel		
Synthetische Kraftstoffe (TRL 9)	- Relevant für schwer zu elektrifizierende Transportmodalitäten wie Schiff und Flugzeug. - Synthetische Kraftstoffe, z.B. Biodiesel, können bei entsprechender Reinheit und (wirtschaftlicher) Verfügbarkeit den fossilen Kraftstoff ohne technische Anpassungen ersetzen.	Die bisherige Kraftstoffinfrastruktur an See- und Flughäfen bleibt erhalten.
Wasserstoff-Lkw (TRL 9)	- Über eine Brennstoffzelle betriebene Lkw stellen eine Alternative zu batterieelektrischen Lkw dar. Für lange Distanzen weisen Lkw mit Brennstoffzelle Vorteile auf [82]. - Derzeit stellen die fehlende Infrastruktur zum Tanken, die Verfügbarkeit von Wasserstoff, sowie Investitions- und Betriebskosten Hürden für den Einsatz von Wasserstoff-Lkw dar [82]. - Derzeit am Markt verfügbare Wasserstoff-Lkw besitzen Reichweiten im Bereich zwischen 400 und 800 km. Der Wasserstoffverbrauch liegt bei 7 bis 10 kg Wasserstoff pro 100 km, hängt wie die Leistung jedoch wesentlich mit dem Fahrzeuggewicht zusammen. [82]	Damit sich Wasserstoff-Lkw am Markt etablieren können, muss das Netz an Wasserstofftankstellen ausgebaut werden. Dies würde einen weitflächigen Ausbau der derzeitigen Infrastruktur erfordern.

6 Branchensteckbrief: Glas, Keramik, Verarbeitung von Steinen & Erden (WZ 23)

Die **Glas & Keramikbranche** ist von energieintensiven Hochtemperaturprozessen geprägt. Während in der **Glasindustrie** die Dekarbonisierung – sowohl mit hybriden als auch vollelektrischen Schmelzwannen – zu einer signifikanten Elektrifizierung führt, ist in der **Keramikherstellung** der Einsatz von Wasserstoff und/oder biogenen Brennstoffen notwendig.

Tabelle 6-1: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte

23 Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden

- 23.1 Herstellung von Glas und Glaswaren
z. B. Flachglas, Hohlglas, Glasfasern, technische Glaswaren ...
- 23.2 Herstellung von feuerfesten keramischen Werkstoffen und Waren
- 23.3 Herstellung von keramischen Baumaterialien
z. B. Wandfliesen, Bodenfliesen, Ziegel, Baukeramik, ...
- 23.4 Herstellung von sonst. Porzellan- und keramischen Erzeugnissen
z. B. keramische Haushaltswaren, Sanitärkeramik, technische Keramik, ...
- 23.5 Herstellung von Zement, Kalk u. gebranntem Gips
- 23.6 Herstellung von Erzeugnissen aus Beton, Zement u. Gips
z. B. Gips-, Kalk-, Betonerzeugnisse für den Bau, Frisch- & Trockenbeton, Mörtel, ...
- 23.7 Be- und Verarbeitung von Naturwerksteinen und Natursteinen a. n. g.
- 23.8 Herstellung von Schleifkörpern und Schleifmitteln auf Unterlage sowie sonst. Erzeugnissen aus nichtmetallischen Mineralien a. n. g.

6.1 Branchenübersicht: Glas, Keramik, Verarbeitung von Steinen & Erden

Die als „Glas, Keramik, Verarbeitung von Steinen & Erden“ zusammengefassten Industrien enthalten neben der Herstellung und Verarbeitung von **Glas**- und Glaswaren auch **Keramik**- und Porzellanerzeugnisse, sowie die Herstellung und Weiterverarbeitung von Zement, Kalk und gebranntem Gips.

Die **Glasindustrie** [14] [15] [16] umfasst dabei eine breite Produktpalette, sowohl an Endprodukten als auch an Vorprodukten beispielsweise für die Automobilindustrie und Baubranche. Dazu gehören u.a.

- die Herstellung, Veredelung und Bearbeitung von Flachglas beispielsweise für Fensterglas, Solarglas oder Windschutzscheiben,
- die Herstellung von Hohlglas z. B. als Behälterglas oder für Trinkgläser,

- die Herstellung von Glasfasern zur Produktion von Glaswolle oder Glasfaserkabeln, sowie die
- Herstellung von Spezialglas und technischem Glas für Elektronikbauteile oder die chemische Industrie.

Auch die **Keramikindustrie** [17] verfügt über sehr heterogene Produkte. Neben feuerfester Keramik für Anlagen zur Stahl- und Glasproduktion zählen beispielsweise keramische Bauteile für die Weiterverarbeitung in Fahrzeugen oder der Kommunikationstechnik dazu. Außerdem kommen diverse Produkte in der Bauindustrie zum Einsatz, z. B. Mauer- oder Dachziegel, Wand- und Bodenfliesen und Sanitärkeramiken.

Die Branche in Sachsen

Mit jeweils über 2.000 Beschäftigten sind insbesondere die *Herstellung von Glas- und Glaswaren (WZ 23.1)* sowie die *Herstellung von Erzeugnissen aus Beton, Zement und Gips (WZ 23.6)* in Sachsen relevant. Aus den Bereichen der Herstellung von Zement, Kalk und gebranntem Gips sowie (WZ 23.5) seit 2024 auch aus Be- und

Verarbeitung von Natur(werk)steinen sind in Sachsen keine Unternehmen vertreten.

Status Quo und Herausforderungen

Die Branche ist mit einem Endenergieverbrauch von 1.851 GWh (2022) eine der energieintensivsten Branchen in Sachsen. Die hohen Temperaturen in verschiedenen Herstellungs- und Verarbeitungsprozessen bedingen den hohen fossilen Energieträgeranteil, so dass die Branchen im Jahr 2022 über 300 kt energetisch bedingte CO₂-Emissionen verursachten. Hinzu kommen weitere, prozessbedingte Emissionen aus der Erhitzung der eingesetzten Rohstoffen der Glas- und Keramikproduktion.

Abbildung 6-1 zeigt den historisch hohen Erdgasanteil, der 2022 erstmalig durch einen geringen Biogaszuschuss substituiert wurde.

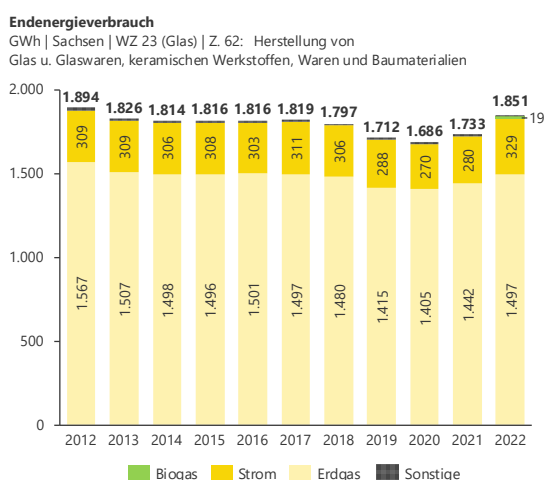


Abbildung 6-1: Entwicklung des EEV zwischen 2018 und 2022 der Branchen „Glas“ nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.

In Sachsen sind weiterhin sechs bzw. neun Unternehmen angesiedelt, die in der Kategorie *Herstellung von Glas* bzw. *Herstellung von Keramik* CO₂-Emissionszertifikate im EU-ETS kaufen müssen. Derzeit decken diese Unternehmen einen Großteil der Emissionszertifikate über die freie Zuteilung für energieintensive Unternehmen ab (siehe Abbildung 6-2). Bei den Unternehmen der Glasindustrie machen die freien Zuteilungen mit 180,4 von 217,5 kt CO₂ einen Anteil von 83 % aus, während die Abdeckung bei der Keramikindustrie mit 111,6 von 145,7 kt CO₂ bei 77 % liegt. Mit Auslaufen der freien Zertifikatzuteilung stehen diese Unternehmen damit unter besonders hohem Dekarbonisierungsdruck.

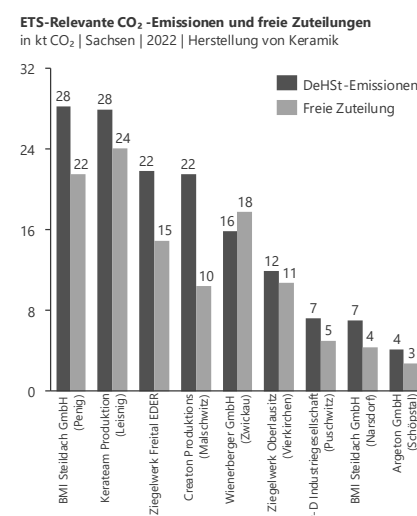
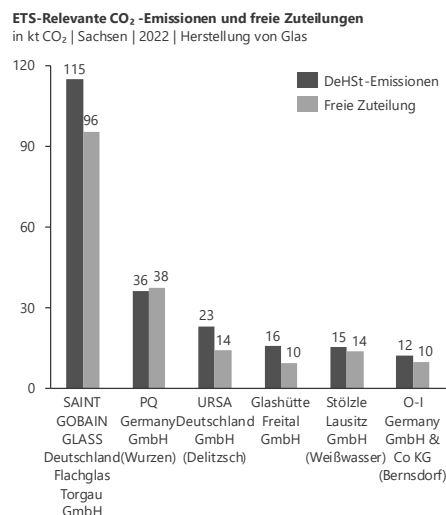


Abbildung 6-2: Emissionen und frei zugeteilte Zertifikate der sächsischen Glas- (oben) und Keramikindustrie (unten).

Tabelle 4-1 gibt einen Überblick der relevanten Kennzahlen der sächsischen Glasbranche (WZ Nr. 23). Nach der Papier- und Ernährungsindustrie weist die Glasindustrie den dritthöchsten Endenergieverbrauch und die zweithöchsten CO₂-Emissionen der sächsischen Industrie auf. Die CO₂-Emissionen resultieren dabei primär aus dem hohen Anteil fossiler Energieträger. Die Mehrzahl der Betriebe (146 von 218) weist weniger als 50 Beschäftigte auf, was einem hohen Anteil im Vergleich zu den anderen Branchen entspricht. Der Anteil des Auslandsumsatzes am Gesamtumsatz ist hingegen ähnlich niedrig wie in den Branchen Metallverarbeitung und Ernährung.

Tabelle 6-2: Kennzahlen der sächs. Glas- & Keramikbranche (2023) [49], [40], [83]

Endenergieverbrauch (2022)	1.851 GWh/a
... davon fossiler Anteil	81 %
... davon Strom	18 %
Anzahl Betriebe (≥20 Besch.)	218
... davon Betriebe ≥50 Beschäftigte	72
Anzahl Beschäftigte (Betriebe ≥20 Beschäftigte)	10.509
... davon in Betrieben ≥50 Besch.	8.382
Gesamtumsatz	2.421 Mio. €/a
... davon Auslandsumsatz	16 %
CO₂-Emissionen (2022)	303 kt CO₂/a
(energetisch bedingt, Scope 1)	

Abbildung 6-3 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) seit 2020. Beide Zahlen sind seit 2020 um über 10% rückläufig.

6.2 Prozesse im Status Quo: Glas, Keramik, Verarbeitung von Steinen & Erden

Die **Glasindustrie** benötigt den Großteil der eingesetzten Energie in Form von Prozesswärme für die Glas-schmelze bei Temperaturen im Bereich von > 1.600 °C. Diese Prozesswärme wird hauptsächlich über fossile Erdgasbefeuerung bereitgestellt. Teilweise können in

diesen erdgasbefeuchten Schmelzwannen über elektrische Zusatzheizungen („Boosting“) ca. 10 bis 20 % des Energiebedarfs mit Strom gedeckt werden. Diese Schmelzwannen haben Produktionskapazitäten von > 1.000 t/d und Lebensdauern von bis zu 20 Jahren. Für kleinere Schmelzwannen, zunächst im Bereich Spezial- und Behälterglas, können zudem bereits voll-elektrische Schmelzwannen mit jedoch deutlich kürze-ren Lebensdauern von bis zu 8 Jahren eingesetzt wer-den. Nach der Formgebung, entweder durch die Eigenschaften der Schmelze oder durch Pressen bzw. Druckluft, kühlt das Glas in einem mit Gas oder elektrisch betriebenen Kühllofen über einen vorgege-benen Temperaturgradienten ab. Abbildung 6-4Abbildung 6-5 gibt einen Überblick über die ge-samte Wertschöpfungskette.

Die **Keramikindustrie** ist eine sehr heterogene Branche. Dennoch können die prinzipiellen Prozessschritte wie in Abbildung 6-5 dargestellt werden. Nach der Rohstoffaufbereitung erfolgt unter Zugabe von Wasser die Formgebung. Im anschließenden Trocknungspro-zess wird dieses bei 90 bis 190 °C wieder ausgetrieben. Der energieintensivste Prozessschritt ist das folgende Sintern in einer (z.B. Baukeramik) oder mehreren Stufen (z.B. Geschirrkera-mik) bei 500 bis 2.500 °C. Die genutz-ten Öfen sind in der Regel mit Gas und nur noch selten mit Öl befeuert. Die dabei anfallende Abwärme wird häufig in einem Wärmeverbund mit dem Trockner ge-nutzt.

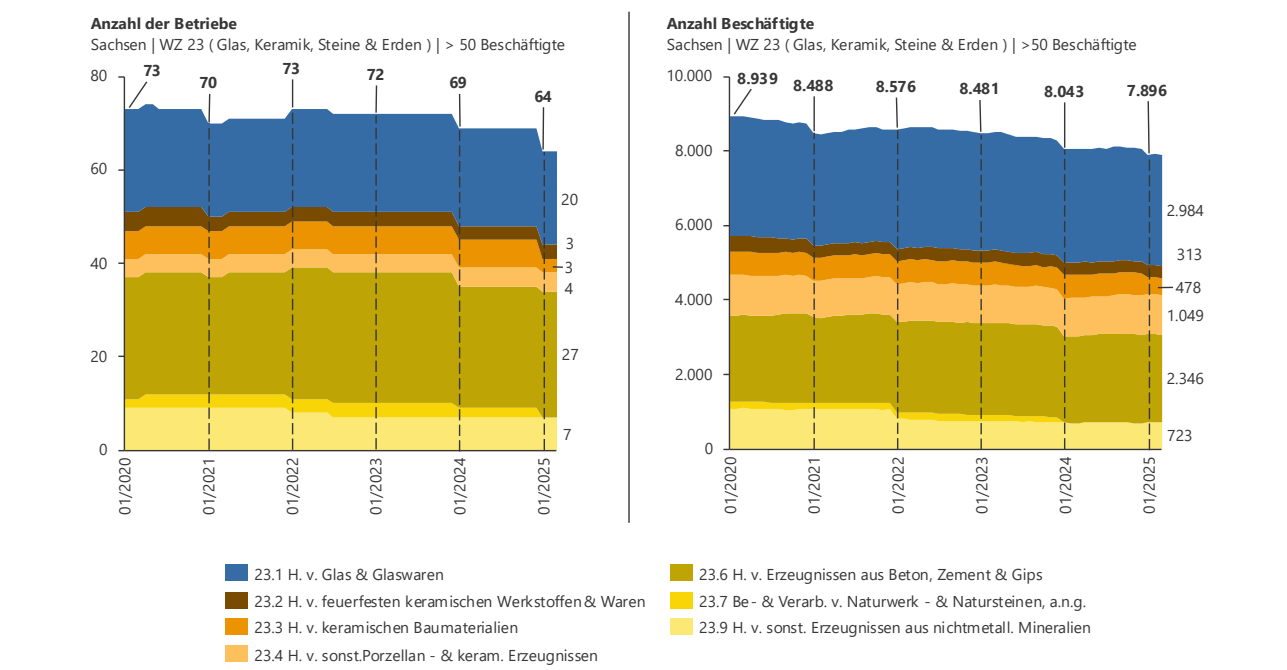


Abbildung 6-3: Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen Glas-branche seit 2020 [49].

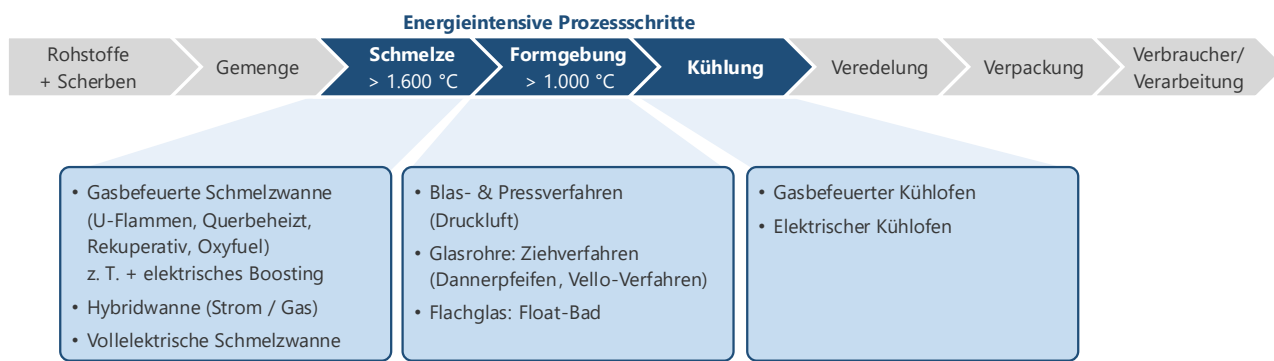


Abbildung 6-4: Energieintensive Prozesse/-schritte in der Glasindustrie im Status quo.

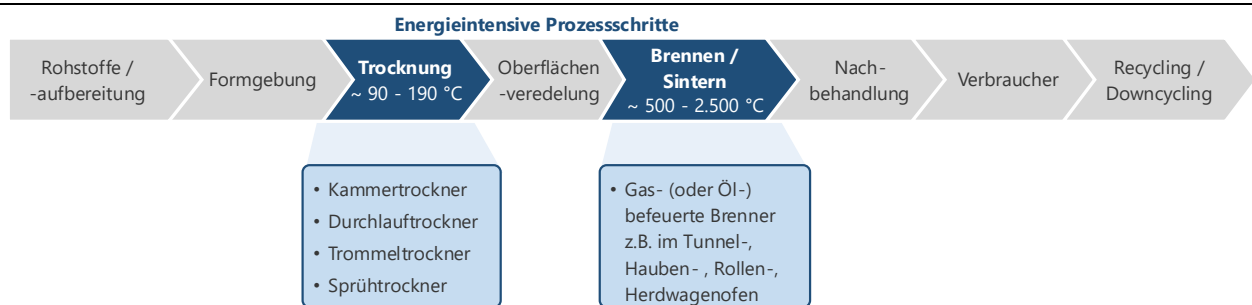


Abbildung 6-5: Energieintensive Prozesse/-schritte in der Keramikindustrie im Status quo.

6.3 Transformationstechnologien: Glas, Keramik, Verarbeitung von Steinen & Erden

Die **Glasindustrie** setzt bereits viele Maßnahmen zur Energieeffizienz und damit zur indirekten Emissionsminderung ein [18] [84]. Dazu gehören bspw.:

- Luftvorwärmung in regenerativen und rekuperativen Schmelzwannen,
- Oxyfuelöfen,
- erhöhter Scherbeneinsatz.

Für eine (nahezu) vollständige Vermeidung der CO₂-Emissionen sind derzeit drei Möglichkeiten absehbar:

- Energieträgerwechsel zu Strom (Elektrifizierung),
- Energieträgerwechsel zu emissionsfreien Brennstoffen (Brennstoffwechsel), oder
- eine CO₂-Abscheidung.

Tabelle 6-3 listet die einzelnen Maßnahmen auf. Bei den Elektrifizierungsmaßnahmen ist die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung für das Unternehmen, sofern der bestehende Stromanschluss über die erforderliche Kapazitätsreserve verfügt, über eine Anpassung des bestehenden Vertrages möglich. Ist die zusätzlich erforderliche Anschlussleistung mit dem

bestehenden Stromanschluss nicht darstellbar, muss mit dem zuständigen VNB abgestimmt werden, wie die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung ermöglicht werden kann. In der Regel gehen damit Bauleistungen zur Ertüchtigung bzw. Erweiterung der elektrischen Betriebsmittel (z.B. neuer Transformator, neue Mittelspannung- bzw. Niederspannung- Einspeisung) einher. Dabei müssen u.a. mögliche technische Lösungen, der finanzielle Aufwand (ggf. mit Baukostenzuschuss), der Zeithorizont und ggf. nötiger zusätzlicher Platzbedarf berücksichtigt werden.

In der **Keramikindustrie** sind die Dekarbonisierungsmaßnahmen ebenfalls in diese drei Kategorien einteilbar und in Tabelle 6-4 aufgelistet. Die Ofenlebensdauern von teilweise über 40 Jahren erfordern in anstehenden Investitionszyklen bereits eine Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen der Energieträgerpreise und -verfügbarkeiten. Auch in dieser Branche werden zusätzliche Effizienzmaßnahmen umgesetzt, um den gesamten Energieverbrauch der Produktion zu senken, z.B.

- verstärktes Recycling,
- (verstärkte) Abwärmenutzung, oder
- Nutzung der BVT (neue Ofenauslegungen, verbesserte Trockner, Automatisierung der Prozesse, ...) bei anstehenden Reinvestitionen.

Die Eingruppierung der Transformationstechnologien erfolgt analog zu Glasindustrie.

Beide Branchen stehen vor der Herausforderung, dass in den Schmelz- bzw. Brennprozessen rohstoffbedingte CO₂-Emissionen (sog. Prozessemissionen) entstehen. Diese können durch einen Energieträgerwechsel nicht vermieden werden und auch mögliche CO₂-Abscheidetechnologien erreichen keine 100 %igen Abscheideraten.

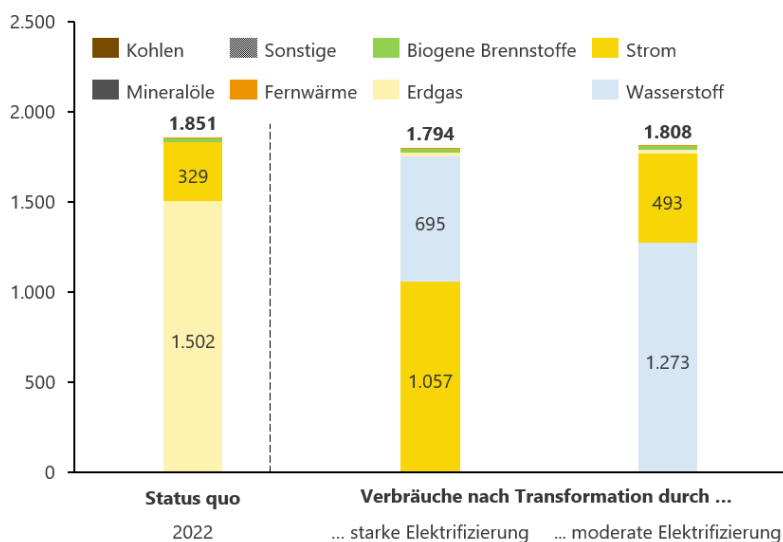
6.4 Transformationspfade: Glas, Keramik, Verarbeitung von Steinen & Erden

Die Glas- und Keramikindustrie (inkl. Verarbeitung von Steinen & Erden) ist mit knapp 1,9 TWh jährlichem Endenergieverbrauch (2022) eine der energieintensivsten Branchen in Sachsen. Gleichzeitig wird dieser hohe Endenergieverbrauch überwiegend über fossiles Erdgas gedeckt, um die notwendigen hohen Temperaturen der Glasschmelze und des Keramikbrennens zu erzielen. Dies schlägt sich auch in vergleichsweise hohen Wasserstoffanteilen in den transformierten Zuständen nieder (Abbildung 6-6). Der Gesamtenergiebedarf sinkt nur leicht, da auch die elektrische Wärmebereitstellung im mittleren Temperaturniveau zunehmend

durch direkt elektrische Erzeugung erfolgt. In beiden betrachteten Varianten, der starken und der moderaten Elektrifizierung, steigt außerdem die notwendige Anschlussleistung sowohl bei Strom von ca. 41 MW auf 62 bis 132 MW, als auch bei Wasserstoff auf 87 bis 159 MW stark an. Die Transformationspfade berücksichtigen dabei keine zusätzlichen Energiebedarfe, die anfallen würden, falls die Branchen eine CO₂-Abscheidung einsetzen würden.

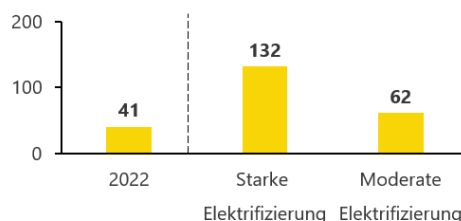
Endenergieverbrauch

in GWh | Sachsen | Glas & Keramik



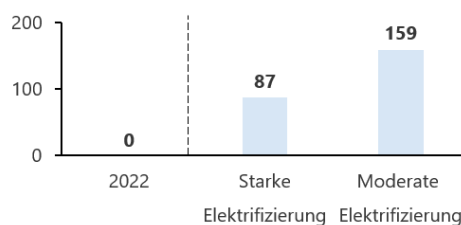
Anschlussleistung Strom

in MW | Sachsen | Glas & Keramik



Anschlussleistung Wasserstoff

in MW | Sachsen | Glas & Keramik



Was wäre, wenn die sächsische Glas- & Keramikbranche dekarbonisiert? Eine Abschätzung anhand verschiedener Elektrifizierungsintensitäten.

Effizienzgewinne und Produktionsanpassungen werden nicht berücksichtigt. Die Abschätzung der Anschlussleistungen erfolgt über eine Einschätzung branchenspezifischer Volllaststunden und ist als Richtwert zu verstehen.

Abbildung 6-6: Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen Glas- & Keramikindustrie.

Tabelle 6-3: Transformationstechnologien der Glasindustrie. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung [18] [84]		
Vollelektrische Schmelzwanne (TRL 9, je nach Glas-typ/-produkt)	- Bisher für Weiß- & Spezialglas umgesetzt, in Einzelfällen auch für Farbglass. Mittelfristig wird ein Einsatz für Behälterglas erwartet, für Flachglas ist keine Anwendung absehbar. - Elektroden ragen von oben in die Schmelze, so dass der Schmelzprozess von oben nach unten abläuft. Die Rohstoffdecke muss dabei geschlossen bleiben („Cold Top“), um einen Wärmeverlust zu vermeiden. - Durch höhere Temperaturen und Konvektionsgeschwindigkeiten in der Schmelze wird die Korrosion verstärkt und die Lebensdauer der Schmelzwanne sinkt. Bei hohen Produktqualitäten kann Elektrodenabbrand die Glas-schmelze beeinträchtigen. - Derzeit werden lediglich geringe Kapazitäten von < 200 t Glas pro Tag erreicht. Angestrebt werden 300 bis 400 t/d, limitiert durch die Mindestabstände der Elektroden und der damit erzielbaren Energiedichtenverteilung.	Der elektrische Wärmeeintrag ist deutlich effizienter (90 %) als der Wärmeeintrag durch die Erdgasbefeuerung (40 bis 60 %). Dennoch muss ein Großteil der bisher durch fossiles Erdgas gedeckten Energie elektrisch bereitgestellt werden, was i. d. R. eine Ertüchtigung sowohl der elektrischen Infrastruktur am Standort als auch der vorgelagerten Stromnetze erfordert. Der Umfang des Rückbaus der Gasinfrastruktur ist abhängig von den verbleibenden Prozessen am Standort und muss in Abstimmung mit dem Netzbetreiber erfolgen.
Hybride Schmelzwanne (TRL 9, je nach Glas-typ/-produkt)	- Hybride Schmelzwannen können in einem gewissen Korridor zwischen der Verbrennung gasförmiger Energieträger (Erdgas, Biogas, [perspektivisch] H₂) und elektrischem Wärmeeintrag durch Elektroden von unten in der Schmelze variieren. - Die Variation ist jedoch nur innerhalb gewisser Grenzen und über Zeiträume von Stunden bis Tagen möglich und wirkt der Energieeffizienz der Schmelze entgegen. - Perspektivisch sollen zwischen 20-80 % des Gesamtenergiebedarfes elektrisch gedeckt werden, wobei bisher ein Stromanteil von 60 % erreicht wird.	Hybride Schmelzwannen erfordern weiterhin eine entsprechende Gasinfrastruktur – für Methan bzw. perspektivisch Wasserstoff, so wie einen Ausbau der Netzanschlusskapazitäten, um die erhöhten elektrischen Energiebedarfe abdecken zu können.
Brennstoffwechsel [18] [84]		
Wasserstoff (TRL 9)	- Eine Beimischung oder ein vollständiger Umstieg auf Wasserstoff ist theoretisch möglich, jedoch noch nicht industriell erprobt. - Der bei der Verbrennung entstehende Wasserdampf verschlechtert die Produktqualität, insbesondere bei hochqualitativen Gläsern (z. B. optischen Produkten)	Die vorhandenen Erdgasanschlüsse müssen parallel zur Umrüstung der Produktionsanlagen auf Wasserstoff umgestellt werden. Dafür müssen ggf. auch Zähler und Filter ersetzt werden.
CO₂-Abscheidung [18] [84]		
Oxyfuel + CCUS (TRL <6)	- In Oxyfuel-Wannen findet die Verbrennung unter Sauerstoffzufuhr/ -atmosphäre statt. Diese kommen vor allem bei qualitativ hochwertigen Spezialgläsern zum Einsatz. - Der durch die vollständige Verbrennung entstehende Abgasstrom enthält hauptsächlich Wasserdampf und CO₂. Durch die Kondensation des Wasserdampfs verbleibt CO₂. - CO₂-Abscheidung spielt in der (deutschen) Glasindustrie bisher eine untergeordnete Rolle und ist noch nicht großskalig erprobt. Geänderte Rahmenbedingungen zu CO₂-Transport und -Speicherung könnten zu einer Neubewertung führen.	Die bisherige Gasinfrastruktur bleibt erhalten und muss ggf. je nach Volumen des abzutransportierenden CO ₂ -Gasstromes durch eine CO ₂ -Infrastruktur ergänzt werden.

Tabelle 6-4: Transformationstechnologien der Keramikindustrie. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung [85] [19]		
Mikrowellen-Trocknung (TRL 6-8)	Ausgewählte Keramikprodukte z. B. im Bereich der Sanitärkeramik können bereits (teilweise auch unterstützend) per industrieller Mikrowellentrocknung getrocknet werden. Für eine breite industrielle Anwendung sind weitere Praxiserfahrungen notwendig. [86] [87]	Die Mikrowellen-Trocknung führt nur teilweise zu einem reduzierten Erdgasbedarf, da dieses hauptsächlich in Brennprozessen eingesetzt wird, während gleichzeitig die elektrische Anlagenperipherie und ggf. auch Anschlussleistungen ertüchtigt werden müssen.
Direkte Elektrifizierung (TRL <6)	Eine direkte Elektrifizierung erfolgt bisher nur in Teilen der Herstellung technischer Keramik oder in einzelnen Projekten, z. B. im Bereich der Fliesenherstellung. Eine vollständige Elektrifizierung ist derzeit noch im Bereich TRL <6. Die erforderlichen Produktqualitäten können bisher nicht im industriellen Maßstab erreicht werden. [88]	Sowohl die Anlagenperipherie am Standort als auch entsprechende Anschlussleistungen müssen geschaffen werden.
Brennstoffwechsel [85] [19]		
Biomasse (TRL 9)	- Die energetische Nutzung von Biomasse (bspw. als Holzpelletstaub) ist technisch ausgereift und verfügbar. - Die Verfügbarkeit von Biomasse kann jedoch deren Einsatzmöglichkeiten beschränken. Zudem hat die stoffliche Nutzung von Biomasse Vorrang gegenüber der energetischen. [89]	Bei Einsatz fester Biomasse reduziert sich die bisherige Gasanschlussleistung.
Wasserstoff (TRL <6)	Eine Beimischung oder ein vollständiger Umstieg auf Wasserstoff ist theoretisch möglich, jedoch noch nicht industriell erprobt.	Die vorhandenen Erdgasanschlüsse müssen parallel zur Umrüstung der Produktionsanlagen auf Wasserstoff umgestellt werden.
CO₂-Abscheidung [85] [19]		
Post-Combustion Verfahren (TRL <6)	- CO₂-Abscheidungsverfahren sind in der Keramikindustrie bisher nicht erprobt und müssten aufgrund der relativ heißen Abgasströme, der enthaltenen Verunreinigungen und der geringen CO₂-Konzentrationen für den Einsatz an Keramikwerken adaptiert werden. - Hinzu kommt, dass die relativ teuren CAPEX von CO₂-Abscheidungsanlagen für die relativ kleinen und geographisch weit verteilten Standorte bisher keinen wirtschaftlichen Betrieb zulassen.	Die bisherige Gasinfrastruktur bleibt erhalten und muss ggf. je nach Volumen des abzutransportierenden CO ₂ -Gasstromes durch eine CO ₂ -Infrastruktur ergänzt werden.

7 Branchensteckbrief: Papier (WZ 17)

Für die energieintensive **Papierherstellung** muss vor allem die Dampfbereitstellung dekarbonisiert erfolgen. Die Elektrifizierung dieser Prozesse bietet zudem Energieflexibilitätspotenziale, mit denen niedrige Strompreise ausgenutzt werden können.

Tabelle 7-1: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]

17 Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus

17.1 Herstellung von Holz- und Zellstoff, Papier, Karton und Pappe

z. B. Papiermasse, Holzschliff aus Altpapier, Krepp- und Faltpapier, Zeitungspapier, Wellpapier und -pappe

17.2 Herstellung von Waren aus Papier, Karton und Pappe

z. B. Reinigungstücher, Taschentücher, Briefumschläge, Durchschreibpapier, Tapeten, Etiketten, Filterpapier

7.1 Branchenübersicht: Papier

Die als „Papier“ zusammengefassten Industrien enthalten neben der Herstellung der Halbstoffe Holz- und Zellstoff sowie Papier, Karton und Pappe auch die Herstellung der daraus gefertigten Waren.

Die **Papierindustrie** umfasst dabei eine breite Produktpalette, sowohl an Endprodukten als auch an Vorprodukten beispielsweise für Druckereien und andere Medien, wie z.B. die Fotografie. Dazu gehören u.a.

- die Herstellung von grafischen Papieren, beispielsweise für Pressemedien und Kataloge,
- die Herstellung von Papier, Karton und Pappe für Verpackungszwecke z. B. Wellpappenrohapiere, Hülsenkarton, Wickelpappe oder Etikettenpapiere,
- die Herstellung von Hygienepapier, sowie die
- Herstellung von Papier, Karton und Pappe für technische und spezielle Verwendungszwecke.

Die Branche in Sachsen

Die Papierindustrie ist in Sachsen tief verwurzelt. Insbesondere in den Ballungszentren Dresden, Leipzig und Chemnitz sind viele mit der Branche verbundene Unternehmen ansässig. Mit über 2.800 (März 2025) Beschäftigten in der *Herstellung von Holz- und Zellstoff, Papier, Karton und Pappe (WZ 17.1)* und knapp über 3.200 (März 2025) tätigen Personen im Bereich der *Herstellung von Waren aus Papier, Karton und Pappe (WZ 17.2)* sind in Sachsen beide Unterklassen relevant.

Die beiden Unterklassen sind damit bezüglich der tätigen Personen etwa gleichbedeutend. Hinsichtlich des Endenergieverbrauchs überwiegt WZ 17.1 aufgrund der im Vergleich zur Verarbeitung energieintensiveren Herstellungsprozesse jedoch deutlich. Die Unternehmen der sächsischen Papierindustrie setzen zwar Holz- und Zellstoff in ihrer Produktion ein, dieser wird jedoch nicht in Sachsen hergestellt, sondern eingekauft.

Status quo und Herausforderungen

Die Branche ist mit einem Endenergieverbrauch von 2.207 GWh (2022) eine der energieintensivsten Branchen in Sachsen. Der Endenergieverbrauch wird überwiegend mit Erdgas (958 GWh in 2022), Strom (707 GWh in 2022) und Braunkohle (344 GWh in 2022) gedeckt. Aus dem hohen Verbrauch fossiler Energieträger resultieren entsprechend hohe energetisch bedingte CO₂-Emissionen. Im Jahr 2022 beliefen sich diese auf 2022 etwa 350 kt.

Abbildung 7-1 zeigt nach Energieträgern aufgeschlüsselten Endenergieverbräuche. Neben fossilen Energieträgern und Strom wird ein geringer Anteil Biomasse und seit 2014 auch Fernwärme eingesetzt.

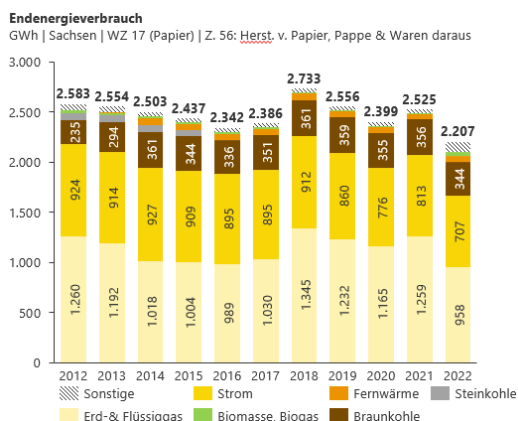


Abbildung 7-1: Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branche „Papier“ nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.

In Sachsen sind Stand 2022 14 Unternehmen angesiedelt, die unter der Kategorie *Herstellung von Papier* CO₂-Emissionszertifikate im EU-ETS kaufen müssen. Derzeit decken diese Unternehmen einen Großteil der Emissionszertifikate über die freie Zuteilung für energieintensive Unternehmen ab (siehe Abbildung 7-2).

Die Unternehmen der Papierindustrie erhielten 2022 für 197,1 von 284,5 kt CO₂ Zertifikate aus der freien Zuteilung. Dies entspricht einem Anteil von 69 %. Der Großteil der Emissionen (68 %) und Zertifikate (55 %) entfiel dabei auf die ModelSachsen Papier GmbH, die Kübler & Niethammer Papierfabrik Kriebstein GmbH und die Julius Schulte Trebsen GmbH & Co KG. Mit Auslaufen der freien Zertifikatszuteilung stehen diese Unternehmen damit unter hohem Dekarbonisierungsdruck.

Tabelle 7-2 zeigt die relevanten Kennzahlen der sächsischen Papierindustrie (WZ Nr. 17). Der Endenergieverbrauch von 2.207 GWh/a ist der höchste aller Wirtschaftszweige in Sachsen. Zudem verursacht die

Papierindustrie auch die meisten CO₂-Emissionen im Freistaat. Die Anzahl der Unternehmen ist dabei vergleichsweise gering, der Anteil der Betriebe mit mehr als 50 Beschäftigten jedoch hoch. Dieser hohe Anteil zeigt sich auch bei den Beschäftigtenzahlen, da über 90 % der Beschäftigten in diesen größeren Betrieben tätig sind.

Tabelle 7-2: Kennzahlen der sächs. Papierbranche (2023) [49], [40], [83]

Endenergieverbrauch (2022)	2.207 GWh/a
... davon fossiler Anteil	63 %
... davon Strom	32 %
Anzahl Betriebe (≥20 Besch.)	57
... davon Betriebe ≥50 Beschäftigte	40
Anzahl Beschäftigte (Betriebe ≥20 Beschäftigte)	6.687
... davon in Betrieben ≥50 Besch.	6.172
Gesamtumsatz	1.629 Mio. €/a
... davon Auslandsumsatz	37 %
CO₂-Emissionen (2022)	349 kt CO₂/a
(energetisch bedingt, Scope 1)	

Abbildung 7-2 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) seit 2020. Im betrachteten Zeitraum sind beide Zahlen nahezu konstant. Nach einem vorübergehenden Anstieg beider Zahlen von 2020 bis 2022, ist insbesondere die Anzahl der Betriebe seitdem wieder rückläufig. Sowohl die Anzahl der Betriebe als auch die der Beschäftigten befindet sich daher wieder nahezu auf dem Niveau von 2020. Die Veränderungen sind damit lediglich geringfügig.

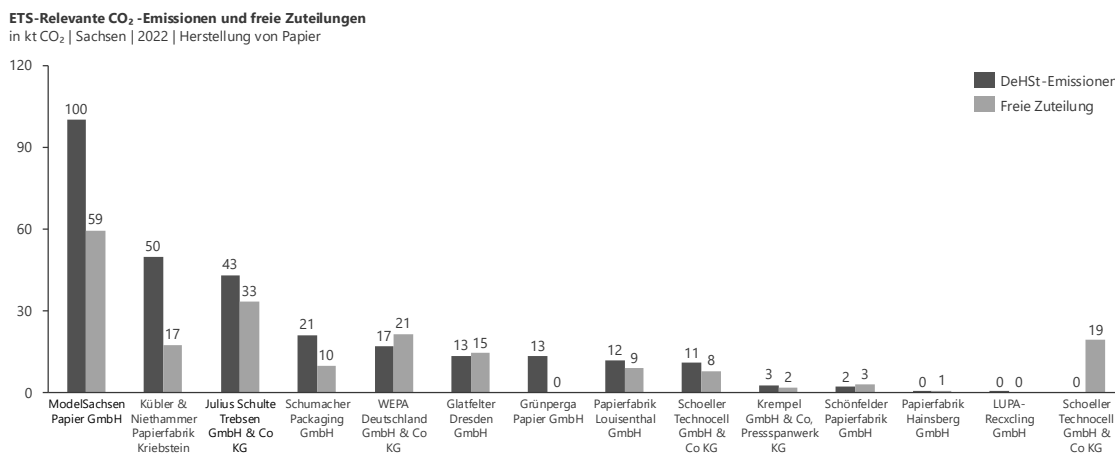
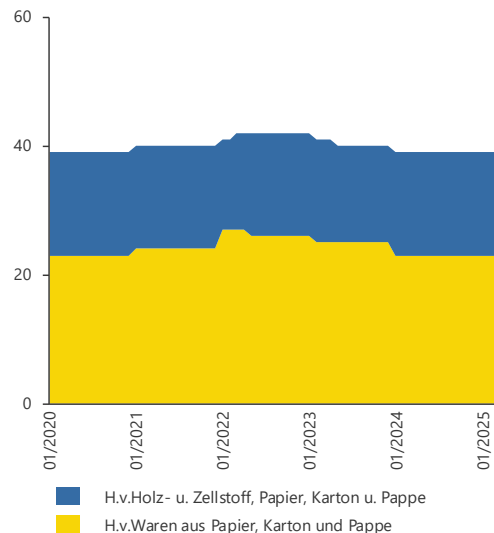


Abbildung 7-2: Emissionen und frei zugeteilte Zertifikate der sächsischen Papierindustrie .

Anzahl der Betriebe
Sachsen | WZ 17 (Papier) | > 50 Beschäftigte | 2020 bis 2025



Anzahl Beschäftigte
Sachsen | WZ 17 (Papier) | > 50 Beschäftigte | 2018 bis 2025

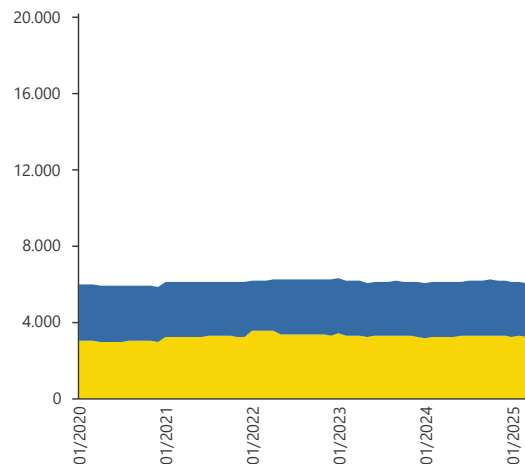


Abbildung 7-3: Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen Papierbranche seit 2020.

7.2 Prozesse im Status quo: Papier

Da die *Herstellung von Holz- und Zellstoff, Papier, Karton und Pappe* (WZ 17.1) deutlich energieintensiver ist als die *Herstellung von Waren aus Papier, Karton und Pappe* (WZ 17.2), liegt erstere im Fokus der folgenden Betrachtungen.

Die **Papierindustrie** benötigt den Großteil der eingesetzten Energie in Form von Prozesswärme. Diese wird hauptsächlich über fossile Erdgasbefeuerung bereitgestellt. Unternehmen der Papierindustrie besitzen dabei oftmals eigene Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)- oder Gas und Dampf (GuD)-Anlagen zur Dampferzeugung. Die benötigten Temperaturlevel hängen von der jeweiligen Prozessroute ab. Abbildung 7-4 gibt einen Überblick über die gesamte Wertschöpfungskette und die verschiedenen Routen. In der für Sachsen und im Sinne einer angestrebten Kreislaufwirtschaft relevanten **Altpapierstoffherstellung** muss die im Auflöser entstandene Fasersuspension teils auf etwa 100 °C erwärmt werden. Wird Verpackungspapier aus der Fasersuspension hergestellt, sind niedrigere Temperaturen im Bereich von 35 – 50 °C ausreichend. Ähnliche Temperaturen werden später in der Papierherstellung zur Trocknung benötigt. Für die Herstellung von Holzstoff stehen zwei Verfahren zur Verfügung: Holzschliff und das thermomechanische **Holzstoff** (Thermo-Mechanical-Pulp, kurz TMP) Verfahren. Die Refiner der Holzstoffherstellung benötigen dabei 120 bis 135 °C, um die Fasern aufzuweichen. Beim Holzschliff findet keine Wärmeverbehandlung statt. Bei der

Zellstoffherstellung erfordern die Kochprozesse Temperaturen von 140 °C (Sulfitverfahren) bzw. 160 bis 180 °C (Sulfatverfahren). Die Holz- und Zellstoffherstellung kommen in Sachsen jedoch nicht zum Einsatz. [20]

Bei der anschließenden **Papierherstellung** wird zunächst ein konstanter Stoffstrom mit definiertem Fasergehalt erzeugt. In der Papiermaschine (bis zu 250 m lang) wird daraus durch Filtration, Pressen und thermische Trocknung ein Blatt erzeugt. Zum Trocknen wird Dampf im Temperaturbereich von 100 °C (teilweise auch 120 bis 150 °C) eingesetzt. Am Ende des Prozesses wird das Blatt aufgerollt. Die Oberflächenbehandlung und Veredelung kann z.B. durch Leimpressen, Streichanlagen und Kalandern erweitert werden und findet entweder vor der Aufrollung oder nachgelagert statt. [20]

7.3 Transformationstechnologien: Papier

Die **Papierindustrie** setzt bereits viele Maßnahmen zur Energieeffizienz und damit zur indirekten Emissionsminderung ein. Dazu gehören bspw.:

- Altpapierrecycling,
- Luftvorwärmung durch eigene Abwärme mit niedrigem Temperaturniveau,
- Flexibilisierung (z.B. Abschalten und Durchblasen von TMP-Anlagen),
- Reduzieren der Papiermaschinengeschwindigkeit,

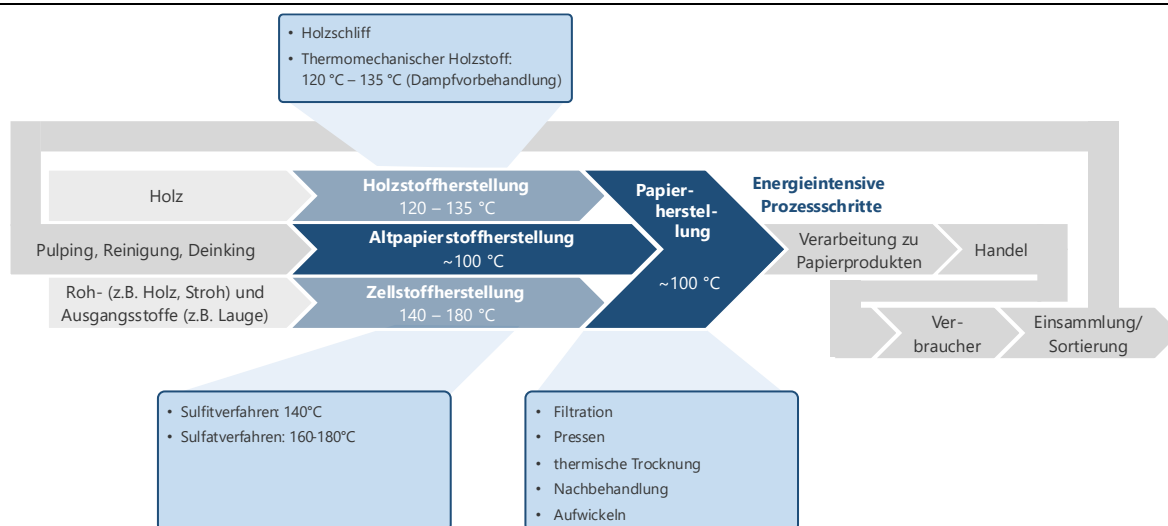


Abbildung 7-4: Energieintensive Prozesse/-schritte in der Papierproduktion im Status quo [20].

- Prozesselektrifizierung (z.B. in Bereichen der Trockenpartie und Dampferzeugung) und
- Erhöhung des Biomasseanteils.

Die Altpapiereinsatzquote betrug in Deutschland 2024 bereits 84 % (bezogen auf die Papier- und Pappeproduktion) [21]. Die Rücklaufquote liegt mit 78 % (2024) ebenfalls schon hoch [21]. Dennoch bestehen nutzbare Restpotenziale. Um diese zu erschließen, bieten die Vorbereitungsprozesse der Altpapierstoffherstellung Möglichkeiten, da beispielsweise beim Entfernen des Drucks (Deinking) auch Fasern entfernt werden. Die enge Zusammenarbeit mit der Logistik (z.B. Emissionsminderung der Fahrzeugflotte zur Altpapiereinsammlung durch Elektrifizierung) und Aufklärung der Verbraucher sind ebenfalls essenziell.

Grundsätzlich ist das Abschalten und Durchblasen von TMP-Anlagen eine Möglichkeit zur Reduktion des Energieverbrauchs im Prozess. Da in Sachsen jedoch keine Holzstoffherstellung stattfindet, ist diese Maßnahme in der sächsischen Papierindustrie nicht einsetzbar. Wird der Vorgang, der bei TMP-Anlagen regelmäßig durchgeführt werden muss und gut planbar ist, angewendet, folgt aus dem Abschalten und Durchblasen eine Lastreduktion und somit ein verringerter Energieverbrauch. Besonders vorteilhaft ist diese Maßnahme, wenn sie in Zeiten der Dunkelflaute bzw. hoher Energiepreise gelegt wird. Erzeugt die TMP-Anlage auch Prozessdampf für Papiermaschinen, muss die Infrastruktur in der Lage sein, den aus der Abschaltung resultierenden zusätzlichen Dampfbedarf zu decken.

Eine weitere Möglichkeit den Energieverbrauch zu senken, ist das Reduzieren der Papiermaschinengeschwindigkeit. Diese kann in einem definierten Betriebsfenster eingestellt werden. Aus dem Reduzieren der Papiermaschinengeschwindigkeit folgt eine Lastreduktion, die den Energieverbrauch senkt. Wird diese zudem in Zeiten der Dunkelflaute bzw. hoher Energiepreise gelegt, wirkt sich dies positiv auf die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme aus.

Für eine (nahezu) vollständige Vermeidung der CO₂-Emissionen sind derzeit drei Möglichkeiten absehbar:

- Energieträgerwechsel zu Strom (Elektrifizierung), oder
- Energieträgerwechsel zu emissionsfreien Brennstoffen (Brennstoffwechsel), oder
- eine CO₂-Abscheidung.

Tabelle 7-3, Tabelle 7-4 und Tabelle 7-5 listen die einzelnen Maßnahmen auf. Bei den Elektrifizierungsmaßnahmen ist die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung für das Unternehmen, sofern der bestehende Stromanschluss über die erforderliche Kapazitätsreserve verfügt, über eine Anpassung des bestehenden Vertrages möglich. Ist die zusätzlich erforderliche Anschlussleistung mit dem bestehenden Stromanschluss nicht darstellbar, muss mit dem zuständigen VNB abgestimmt werden, wie die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung ermöglicht werden kann. In der Regel gehen damit Bauleistungen zur Ertüchtigung bzw. Erweiterung der elektrischen Betriebsmittel (z.B. neuer Transformator, neue Mittelspannung-Einspeisung) einher. Dabei müssen u.a. mögliche technische Lösungen, der finanzielle Aufwand (ggf. mit Baukostenzuschuss), der Zeithorizont und ggfs. nötiger zusätzlicher Platzbedarf berücksichtigt werden.

In der Papierindustrie sind KWK-Anlagen weit verbreitet. Diese sind allgemein in Abschnitt 5.3 beschrieben und werden daher an dieser Stelle nicht noch einmal betrachtet.

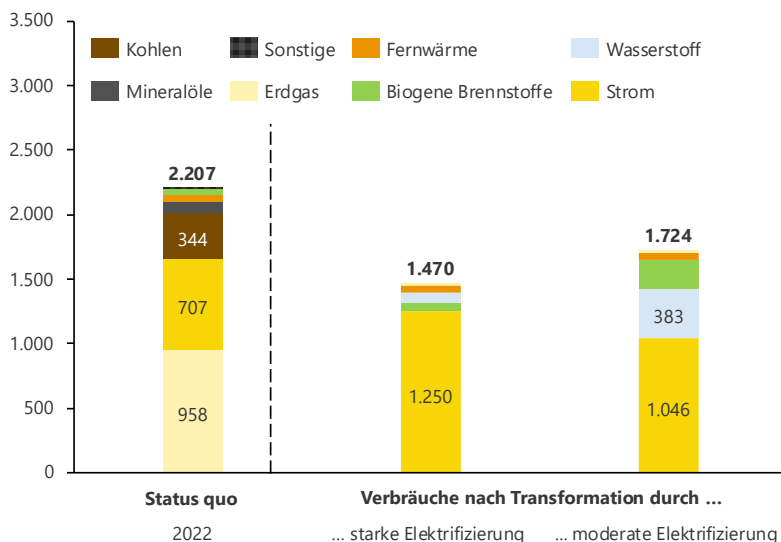
Die Papierindustrie ist zudem damit konfrontiert, dass die hohen Energiekosten international betrachtet einen erheblichen Wettbewerbsnachteil darstellen. Dadurch steht insbesondere das Exportgeschäft unter Druck.

Transformationsbetrachtung gewählten Parametern spielt Wasserstoff nur eine untergeordnete Rolle. Da die Prozesse der Papierindustrie nahezu vollständig im unteren bzw. mittleren Temperaturniveau stattfinden, ist ein Transformationspfad mit nahezu vollständiger Elektrifizierung die derzeit wahrscheinlichste Variante. [89]

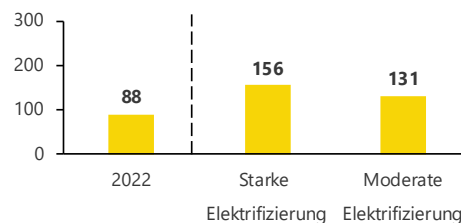
7.4 Transformationspfade: Papier

Der fossile Anteil am Endenergieverbrauch in der sächsischen Papierindustrie ist mit 63 % (Stand 2022) im Vergleich zu anderen betrachteten Branchen relativ hoch. Da Prozesswärme überwiegend im Temperaturbereich von ca. 100 °C benötigt wird, steigt der Stromverbrauch durch elektrifizierte Wärmebereitstellung mittels Wärmepumpen, wie in Abbildung 7-5 zu sehen, sowohl bei starker als auch bei moderater Elektrifizierung deutlich auf 66 % bzw. 58 % des Gesamtenergieverbrauches an. Der absolute jährliche Energiebedarf sinkt jedoch durch die hohen COPs der Wärmepumpen von ca. 2.200 GWh auf etwa 1.400 bis 1.700 GWh. Dies spiegelt sich auch in den Anschlussleistungen für Strom wider. Unter den in der

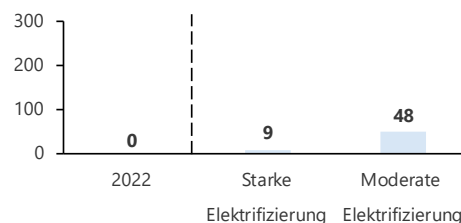
Endenergieverbrauch
in GWh | Sachsen | Papier



Anschlussleistung Strom
in MW | Sachsen | Papier



Anschlussleistung Wasserstoff
in MW | Sachsen | Papier



Was wäre, wenn die sächsische Papierindustrie dekarbonisiert? – Eine Abschätzung anhand verschiedener Elektrifizierungsintensitäten.

Effizienzgewinne und Produktionsanpassungen werden nicht berücksichtigt. Die Abschätzung der Anschlussleistungen erfolgt über eine Einschätzung branchenspezifischer Volllaststunden und ist als Richtwert zu verstehen.

Abbildung 7-5: Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen Papierindustrie.

Tabelle 7-3: Transformationstechnologien der Papierindustrie (Elektrifizierung). Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung [89] [50]		
Elektroden-dampfkessel (TRL 9)	• Elektrifizierung der z.B. über gasbetriebene Großraumwasserkessel stattfindenden Dampfversorgung • Möglichkeiten zur bivalenten Nutzung • Papiermaschinen können einen Dampfbedarf von bis zu 100 t/h aufweisen. Um diesen zu decken, werden Elektrodendampfkessel parallelgeschaltet.	Um einen Dampfbedarf von 100 t/h zu decken, wären beispielsweise 13 Elektrodendampfkessel vom Typ ELSB 6 (Bosch) nötig. Diese hätten insgesamt eine Nennleistung von 68 MW. Durch die Elektrodendampfkessel können zusätzliche Stromanschlussleistungen nötig werden. Sind diese nicht über den bisherigen Netzanschluss darstellbar, ist ein Ausbau der Energieinfrastruktur erforderlich. Die benötigten Gasanschlussleistungen sinken entsprechend.
(Hochtemperatur-) Wärmepumpen zur Dampferzeugung (TRL 9)	• Mit Hochtemperaturwärmepumpen kann z.B. aus der Abwärme der Papierherstellung Prozessdampf für z.B. die Beheizung und Trocknung erzeugt werden. • Elektrisch betriebene Wärmepumpen können auch zur Flexibilisierung der Prozesswärmebereitstellung genutzt werden. • Aufgrund der geringeren Flexibilität sind Hochtemperaturwärmepumpen in der Papierindustrie jedoch gegenüber Elektrodendampfkesseln im Nachteil. • Felix Schoeller plant im Rahmen eines Forschungsprojekts, in Weißenborn eine Hochtemperaturwärmepumpe zur Erzeugung von Prozessdampf mit 124 °C zu projektieren [90].	Durch die HT-WP entsteht eine zusätzliche Stromnachfrage. Abhängig von den lokalen Gegebenheiten kann dies zusätzliche Stromanschlussleistungen und ggf. auch einen Ausbau des Netzan schlusses und der Energieinfrastruktur erfordern. Bei einem Temperaturhub von 100 K weisen industrielle Wärmepumpen einen COP von etwa 2 auf. Um die benötigte Wärmemenge zur Verfügung zu stellen, würde in diesem Fall nur etwa halb so viel elektrische Energie wie zuvor Erdgas benötigt.
Infrarot-trocknung (TRL 9)	• Erzeugung der Infrarotstrahlung durch Strom. • Bei Beschichtungen bereits verbreitet, da kontaktlose Trocknung diese nicht beeinträchtigt. • Aufgrund der höheren spezifischen Energiekosten von Strom gegenüber anderen Energieträgern, ist die Strahlungstrocknung vergleichsweise teuer. • Mit Strahlung ist jedoch eine gleichmäßigere Trocknung möglich, da der Wärmeeintrag nicht nur an der Oberfläche erfolgt. [91]	Da die Wärme zielgerichtet eingebracht wird, ist die Infrarottrocknung vergleichsweise effizient. Beispielsweise führten die von Heraeus bei Tri-Wall Europe Limited installierten mittelwelligen Carbon Infrarot-Strahler (Ersatz für eine dampfbeheizte Rolle) zu einer zusätzlichen Leistungsnachfrage von 56 kW, die auf 70 kW erweitert werden kann [92]. Abhängig von den lokalen Gegebenheiten und dem Umfang der Infrarottrocknung kann die resultierenden Stromnachfrage dennoch zusätzliche Stromanschlussleistungen und ggf. auch einen Ausbau des Netzan schlusses und der Energieinfrastruktur erfordern.

Tabelle 7-4: Transformationstechnologien (Brennstoffwechsel) der Papierindustrie. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Brennstoffwechsel [89] [50]		
Biomasse (TRL 9)	- Die energetische Nutzung von Biomasse ist technisch ausgereift und verfügbar. - In der Papierindustrie, auch in Sachsen, werden bereits erste Projekte zur Nutzung von Biomasse umgesetzt [93]. - Die Verfügbarkeit von Biomasse kann deren Einsatzmöglichkeiten beschränken. Zudem hat die stoffliche Nutzung von Biomasse Vorrang gegenüber der energetischen. [89]	Bei Einsatz fester Biomasse reduziert sich die bisherige Gasanschlussleistung um die Leistung der Anlagen, die auf Biomasse umgestellt werden.
Biogas (TRL 9)	- Biogas kann, wenn es aufbereitet wurde, Erdgas beigemischt werden. Das Gemisch kann anschließend in GuD-Anlagen eingesetzt werden. [89] - Deutschlandweit entfällt bereits etwa 1 % des Brennstoffeinsatzes der Papierindustrie auf Biogas [89]. - Die Verfügbarkeit von Biogas kann dessen Einsatzmöglichkeiten beschränken. In der Papierindustrie kann Biogas bei der der Produktionswasseraufbereitung erzeugt werden und anschließend selbst genutzt werden. Das Biogaspotenzial neuer und optimierter Anlagen liegt in der Papierbranche bei ca. 5 bis 10 % des Wärmebedarfs. [89]	Die bisherigen Gasanschlussleistungen bleiben erhalten, sofern das Biogas dem Erdgas beigemischt wird und das Gemisch über das Erdgasnetz bezogen wird. Der bilanzielle Bezug von Biogas ist über das bestehende Erdgasnetz möglich.
Wasserstoff (zur Dampferzeugung) (TRL 9)	- Umrüstung der Papiermaschinen auf Wasserstoff oder wasserstoffhaltige Brennstoffgemische. - Die vollständige Umstellung auf Wasserstoff erfordert eigene Brenner und eine werksinterne Wasserstoffinfrastruktur. - Die Befeuerung mit Wasserstoff ist denkbar, wird jedoch derzeit lediglich in Pilotanlagen erprobt (z. B. im Werk Mainz-Kostheim der Essity GmbH) [94]. - Für den Einsatz von Wasserstoff spielen zudem dessen Verfügbarkeit und Preis eine große Rolle. Eine breite Versorgung mit Wasserstoff ist Ende 2025 nicht gegeben und die Kosten sind verglichen mit z.B. Erdgas noch deutlich höher. Als Dekarbonisierungstechnologie mit breiter Anwendung kommt Wasserstoff daher erst mittelfristig in Frage.	Die bisherigen Gasanschlussleistungen bleiben erhalten und müssen in Absprache und zeitlicher Übereinstimmung auf Wasserstoff umgestellt werden. Dies kann zusätzliche Investitionen erfordern.

Tabelle 7-5: Transformationstechnologien (CO₂-Abscheidung) der Papierindustrie. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
CO₂-Abscheidung [89] [50]		
BECCS (TRL 9)	• BECCS = Bioenergy Carbon Capture and Storage • Biogene (Abfall-)Stoffe werden energetisch verwertet. Das dabei entstehende biogene CO₂ wird anschließend aus dem Rauch-/Abgas abgeschieden (post-combustion). Anschließend wird das CO₂ abgeschieden und gespeichert. • Die Umsetzbarkeit ist abhängig von regulatorischen Maßnahmen. Wirtschaftlich ist BECCS besonders interessant, wenn durch Abscheidung Negativemissionen generiert werden und diese verkauft werden können. • Skandinavische Länder sind auf dem Gebiet von BECCS und der CO₂-Abscheidung [89] europäische Vorreiter. So scheidet Stockholm Exergi beispielsweise bereits CO₂ an einem Biomasseheizkraftwerk ab [95]. Diese Technologie kann auf die Kraftwerke der Papierindustrie übertragen werden.	Die Auswirkungen auf die Energieinfrastruktur hängen u.a. von der verwendeten Abscheidetechnologie ab. Diese führen i. d. R. zu steigenden Brennstoff- und auch Stromnachfragen, wodurch ein signifikanter Ausbau der jeweiligen Infrastruktur nötig sein kann. Je nach Volumen des abzutransportierenden CO₂-Gasstromes muss eine CO₂-Infrastruktur aufgebaut werden. Abhängig von der zu transportierenden CO₂-Menge können aber auch Lkw (ca. 18 t-CO₂/Trailer) und Züge (ca. 62 t-CO₂/Wagon) in Frage kommen, die keine zusätzliche Energieinfrastruktur erfordern.

8 Branchensteckbrief: DV-Geräte & Uhren (WZ 26)

Die Herstellung von **DV-Geräten & Uhren** ist bereits heute größtenteils elektrifiziert und deckt einen großen Teil des Wärmebedarfes über Fernwärme. Für diese Branchen sind daher vor allem Effizienzmaßnahmen relevant, die zu einer Verringerung des Energiebedarfes und damit einer Senkung der Betriebskosten führen.

Tabelle 8-1: DV-Geräte: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte.

26 Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen

- 26.1 Herstellung von elektronischen Bauelementen und Leiterplatten
z. B. Halbleiter, elektronische Bauteile (Kondensatoren, Widerstände, Prozessoren, ...), bestückte Leiterplatten, Einzelsolarzellen und Solarmodule, ...
- 26.2 Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten und peripheren Geräten
z. B. Computer, Laptops, Monitore, Tastaturen, Drucker, ...
- 26.3 Herstellung von Geräten und Einrichtungen der Telekommunikationstechnik
z. B. Telefon-/Faxgeräte, Kabel-TV-Geräte, Modems, Mobiltelefone, ...
- 26.4 Herstellung von Geräten der Unterhaltungselektronik
z. B. Videorecorder, Fernsehbildschirme, Videokameras, Musikboxen, ...
- 26.5 Herstellung von Mess-, Kontroll-, Navigations- u.ä. Instrumenten und Vorrichtungen;
Herstellung von Uhren
z. B. Regelungstechnik für Heizungen/Klimaanlagen, Navigationssysteme, elektrische und nicht-elektrische Messgeräte, Klein-/Großuhren, Parkuhren, ...
- 26.6 Herstellung von Bestrahlungs- und Elektrotherapiegeräten und elektromedizinischen Geräten
z. B. Computertomografen, Magnetresonanztomografiegeräte, Ultraschallgeräte, ...
- 26.7 Herstellung von optischen und fotografischen Instrumenten und Geräten
z. B. optische Spiegel, Tageslichtprojektoren, optische Mikroskope, ...
- 26.8 Herstellung von magnetischen und optischen Datenträgern
z. B. magnetische Ton-/Videobänder, Disketten, Festplatten, ...

8.1 Branchenübersicht: DV-Geräte und Uhren

Der Wirtschaftszweig „Datenverarbeitungsgeräte und Uhren“ umfasst die Herstellung von elektronischen Geräten wie Computern, Telekommunikationsgeräten sowie entsprechende zugehörige Produktkomponenten, aber auch weitere Geräte bspw. der Unterhaltungselektronik oder magnetische bzw. optische Datenträger. Dabei werden integrierte Schaltungen (IC) sowie hoch spezialisierte Miniaturisierungstechnologien erstellt und angewandt.

Die Branche in Sachsen

Der Wirtschaftszweig „DV-Geräte & Uhren“ (WZ 26) ist in Sachsen mit über 22.000 Beschäftigten vertreten, wovon über 20.000 in Betrieben mit über 50 Beschäftigten angestellt sind. Die überwiegende Mehrheit davon ist in der *Herstellung von elektronischen Bauelementen und Leiterplatten* (WZ 26.1) angestellt, gefolgt von der *Herstellung von Mess-, Kontroll-, Navigations- u. ä. Instrumenten und Uhren* (WZ 26.5). Die Bereiche der *Herstellung von DV-Geräten und peripheren Geräten* (WZ 26.2), *von Geräten der Unterhaltungselektronik* (WZ 26.4) und *von Bestrahlungs-, Elektrotherapie- und elektromedizinischen Geräten* (WZ 26.6) spielen in Sachsen keine bzw. nur eine untergeordnete Rolle.

Status quo und Herausforderungen

Die Branche ist mit einem Endenergieverbrauch von 1.955 GWh (2022) eine der energieintensivsten Branchen in Sachsen. Jedoch auch historisch bereits der Großteil davon elektrisch bereitgestellt, aktuell ca. 60 % des gesamten Energiebedarfs. Der Anteil fossiler Energieträger ist daher mit ca. 10 % relativ niedrig. Abbildung 8-1 zeigt die historische Entwicklung und den, wenn auch nicht kontinuierlichen, Anstieg des Endenergieverbrauchs seit 2012. Dieser ist in den dargestellten 10 Jahren um ca. 20 % gestiegen.

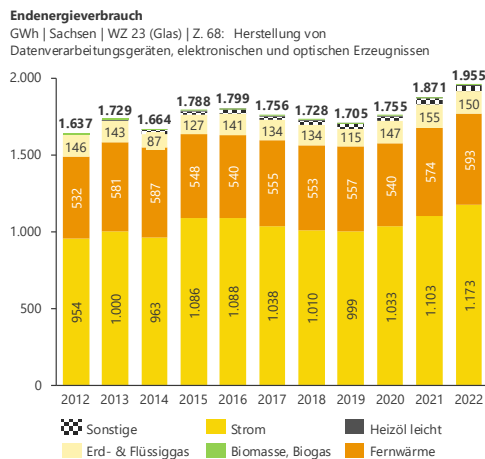


Abbildung 8-1: Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branchen „DV-Geräte & Uhren“ nach eingesetzten Energieträgern.

Die Unternehmen der Branche DV-Geräte und Uhren sind nicht zertifizierungspflichtig unter dem EU-ETS I. Die Prozesse verursachen keine stofflich bedingten Prozessmissionen, so dass jährlich lediglich 31 kt CO₂

energetisch bedingter Scope 1-Emissionen aus den geringen Anteilen fossiler Energieträger für eine CO₂-Neutralität der Branche vermindert werden müssen.

Tabelle 8-2 gibt einen Überblick der relevanten Kennzahlen der sächsischen DV-Geräte- und Uhrenbranche. Verglichen mit den anderen Wirtschaftszweigen in Sachsen weisen die DV-Geräte und Uhren mit über 50 % einen hohen Anteil des Auslandsumsatzes am Gesamtumsatz auf. Auch bei der absoluten Beschäftigtenzahl und beim Anteil der Beschäftigten, die in großen Unternehmen tätig sind, liegt die Branche im vorderen Bereich. Der Umsatz ist vergleichbar mit dem der metallverarbeitenden Industrie, während der Endenergieverbrauch nur von den Branchen Ernährung und Papier übertroffen wird. Die CO₂-Emissionen sind aufgrund des niedrigen fossilen Anteils vergleichsweise gering.

Tabelle 8-2: Kennzahlen der sächs. DV-Geräte- & Uhrenbranche (2023) [49], [40], [83]

Endenergieverbrauch (2022)	1.955 GWh/a
... davon fossiler Anteil	10 %
... davon Strom	60 %
Anzahl Betriebe (≥20 Besch.)	129
... davon Betriebe ≥50 Beschäftigte	73
Anzahl Beschäftigte (Betriebe ≥20 Beschäftigte)	22.110
... davon in Betrieben ≥50 Besch.	20.143
Gesamtumsatz	6.461 Mio. €/a
... davon Auslandsumsatz	54 %
CO ₂ -Emissionen (2022) (energetisch bedingt, Scope 1)	31 kt CO ₂ /a

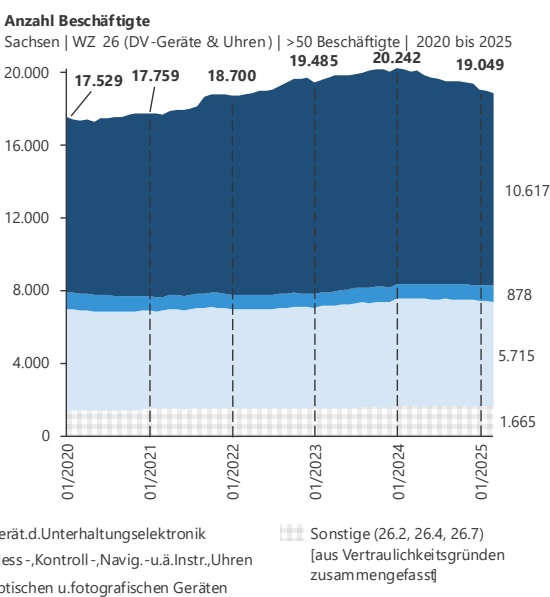
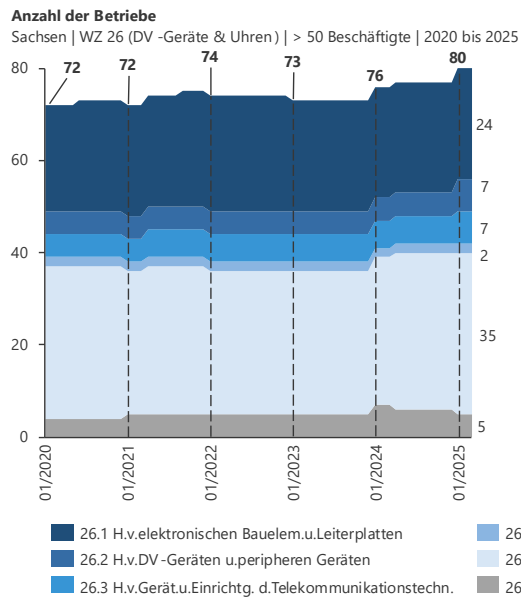


Abbildung 8-2: Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen DV-Geräte und Uhrenbranche seit 2020 [49].

Abbildung 8-2 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) seit 2020. Beide Zahlen sind seit 2020 um ca. 10 % gestiegen. Über die Hälfte der ausgewiesenen Betriebe ist in der *Herstellung von elektronischen Bauelementen und Leiterplatten* (24 Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten, WZ 26.1) und in der *Herstellung von Mess-, Kontroll-, Navigationsinstrumenten und Uhren* (35 Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten, WZ 26.5) angesiedelt. Beide Teilbranchen stellen auch den Großteil der Beschäftigten, wobei allein der WZ 26.1 über die Hälfte der insgesamt im Wirtschaftszweig Beschäftigten ausmacht. Dies zeigt sich auch in der hohen Zahl von durchschnittlich >400 Beschäftigten pro Unternehmen in dieser Teilbranche.

8.2 Prozesse im Status quo: DV-Geräte & Uhren

Sowohl die Herstellung von Uhren als auch die Herstellung von DV-Geräten erfolgt bereits überwiegend elektrisch. Die verbleibenden fossilen Verbräuche, hauptsächlich Erdgas, stammen aus branchenübergreifenden Technologien (Raumwärme, Wärmebehandlung) und werden in Kapitel 5 betrachtet.

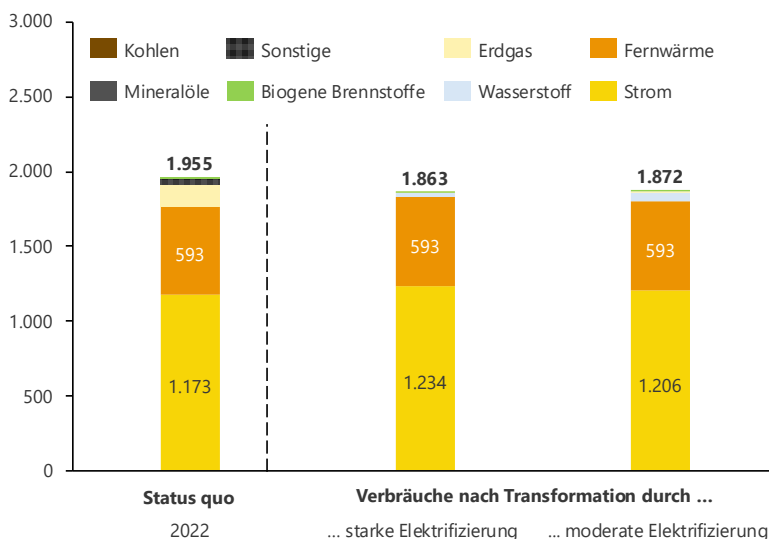
Einzelne große Produktionsstandorte betreiben Kraftwerke zur Strom- und Wärmeversorgung, die in der Regel mit Erdgas betrieben werden.

8.3 Transformationstechnologien: DV-Geräte & Uhren

Aufgrund der geringen fossilen Verbräuche stehen in der Uhren- und DV-Geräte-Industrie keine spezifischen Transformationstechnologien zur Verfügung. **Energieeffizienzmaßnahmen** werden hauptsächlich aus wirtschaftlichen Gründen umgesetzt. Verbleibende fossile Verbräuche können über die Umstellung der branchenübergreifenden Technologien (bspw. Wärmepumpen) oder in Einzelfällen durch die Umrüstung der standorteigenen Kraftwerke vermieden werden.

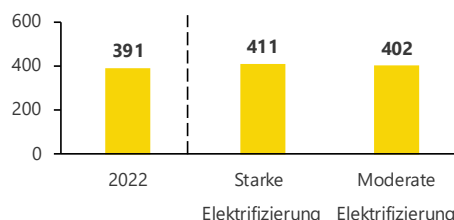
Endenergieverbrauch

in GWh | Sachsen DV -Geräte & Uhren



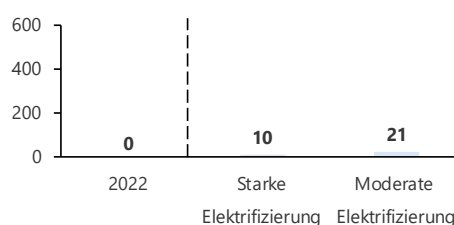
Anschlussleistung Strom

in MW | Sachsen | DV -Geräte & Uhren



Anschlussleistung Wasserstoff

in MW | Sachsen | DV -Geräte & Uhren



Was wäre, wenn die sächsische DV -Geräte - & Uhrenbranche dekarbonisiert? Eine Abschätzung anhand verschiedener Elektrifizierungsintensitäten

Effizienzgewinne und Produktionsanpassungen werden nicht berücksichtigt. Die Abschätzung der Anschlussleistungen erfolgt über eine Einschätzung branchenspezifischer Volllaststunden und ist als Richtwert zu verstehen.

Abbildung 8-3: Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen Glas- & Keramikindustrie.

8.4 Transformationspfade: DV-Geräte & Uhren

Der bereits im Status quo hohe Anteil an Strom bzw. Fernwärme am Gesamtenergieverbrauch führt dazu, dass die transformierten Zustände sich kaum vom Status quo unterscheiden (Abbildung 8-3) und auch der Anstieg der Anschlussleistungen relativ gering ausfällt. Da die Prozesse der DV-Geräte- und Uhren-Branche nahezu vollständig im unteren bzw. mittleren Temperaturniveau stattfinden, ist eine nahezu vollständige Elektrifizierung parallel zur Fernwärmeebenutzung sehr wahrscheinlich.

9 Branchensteckbrief: Textilien (WZ 13)

Bei der Herstellung von **Textilien** bieten insbesondere Wasch- und Trocknungsprozesse Potenziale zur Dekarbonisierung. Für die dabei nötige Heißwasser- und Dampferzeugung kommen sowohl Elektrifizierungsmaßnahmen (z.B. Strahlungstrocknung) als auch Energieträgerwechsel in Frage.

Tabelle 9-1: Textilien: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]

13 Herstellung von Textilien

- 13.1 Spinnstoffaufbereitung u. Spinnerei
z.B. Haspeln und Waschen von Seide, Entfetten und Karbonisieren von Wolle und Färben von Wollvlies oder Schwingen von Flachs
- 13.2 Weberei
z.B. Herstellung von Geweben nach Art von Baumwoll-, Streich-, Kamm- oder Seidengarnweberei, auch aus Misch-, künstlichen oder synthetischen Garnen (Polypropylen usw.)
- 13.3 Veredelung v. Textilien u. Bekleidung
z.B. Bleichen, Färben und Siebdrucken von textilen Spinnstoffen, Textilwaren, Garnen, Stoffen und Textilien einschließlich Bekleidung
- 13.9 H. v. sonst. Textilwaren
z.B. -Technische Textilien, Gestricke und Gewirke, Bett-, Tisch und andere Hauswäsche, Teppiche und Seilerwaren

9.1 Branchenübersicht: Textilien

Der Wirtschaftszweig „Textilien“ umfasst die Spinnstoffaufbereitung und Spinnereien sowie Webereien, die Veredelung von Textilien und Bekleidung und die Herstellung von sonstigen Textilwaren. Nach Angaben des Verbands der Nord-Ostdeutschen Textil- und Bekleidungsindustrie e. V. (vti) stammen deutschlandweit über 60 % des Umsatzes der Branche aus der Herstellung technischer Textilien [96].

Die Branche in Sachsen

Im Wirtschaftszweig „Textilien“ (WZ 13) sind in Sachsen über 7.000 Personen beschäftigt. Davon sind über 4.500 in Betrieben mit über 50 Beschäftigten angestellt (Stand Mai 2025) [49]. Die überwiegende Mehrheit ist in der *Herstellung von sonstigen Textilwaren (WZ 13.9)* tätig, gefolgt von den *Webereien (WZ 13.2)*. Die Bereiche der *Spinnstoffaufbereitung u. Spinnerei (WZ 13.1)* und *Veredelung von Textilien und Bekleidung (WZ 13.3)* spielen in Sachsen eine kleinere Rolle. Insgesamt ist die Textilindustrie in Sachsen als relevant einzustufen, auch da im Vergleich zu anderen Bundesländern viel Textilindustrie ansässig ist.

Status quo und Herausforderungen

Die Branche zählt mit einem Endenergieverbrauch von 447 GWh (2022) zu den weniger energieintensiven Fokusbranchen. Mit über 60 % ist der Anteil fossiler Energieträger, insbesondere Erd- und Flüssiggas, jedoch vergleichsweise hoch. Zudem ist, wie in Abbildung 9-1 zu sehen, der Energieverbrauch an Erd- und Flüssiggas in den zehn letzten Jahren auf nahezu konstantem Niveau verblieben, während die Strom- und Fernwärmenachfrage sowie auch der Endenergieverbrauch insgesamt zurückgingen. Aus diesem Grund sanken auch die energiebedingten CO₂-Emissionen, welche 2022 ca. 58 kt betrugen, kaum.

Die Unternehmen der Textilienbranche sind nicht zertifizierungspflichtig unter dem EU-ETS I und die Prozesse verursachen keine stofflich bedingten Prozessemissionen, sodass lediglich energetisch bedingte Emissionen in Höhe von ca. 58 kt CO₂ (2022) aus den fossilen Energieträgern für eine CO₂-Neutralität der Branche vermindert werden müssen.

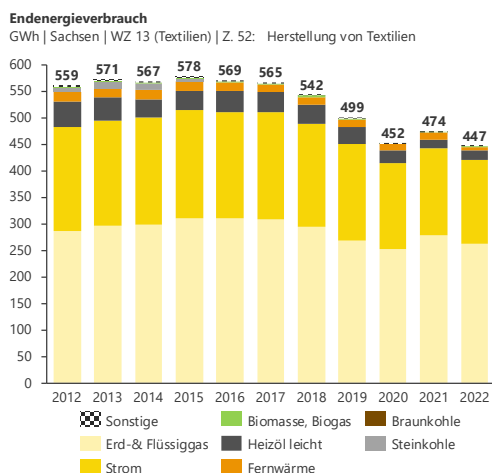


Abbildung 9-1: Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branche „Textilien“ nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.

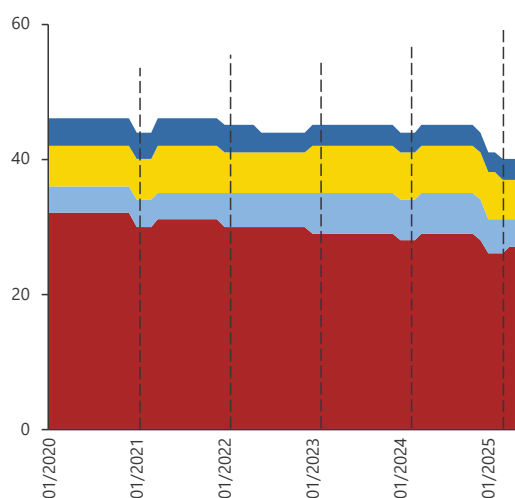
Tabelle 9-2 gibt einen Überblick der relevanten Kennzahlen der sächsischen Textilbranche (WZ 26). Der Gesamtumsatz ist auf einem ähnlichen Niveau wie der der pharmazeutischen Industrie und am unteren Ende der energieintensiven Branchen in Sachsen. Bezüglich der anderen Kennzahlen bewegt sich die sächsische Textilindustrie überwiegend im Mittelfeld.

Tabelle 9-2: Kennzahlen der sächs. Textilbranche (2023) [49], [40], [83]

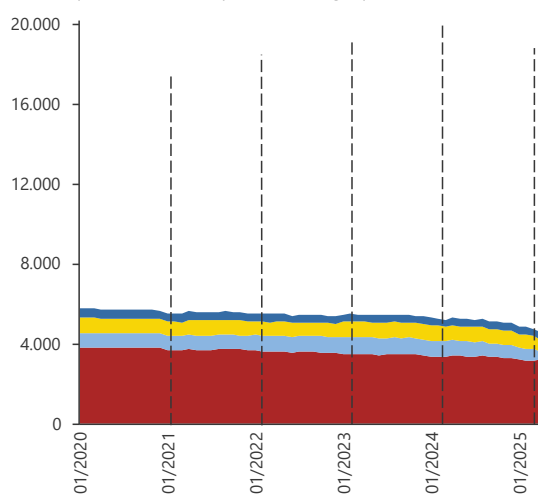
Endenergieverbrauch (2022)	447 GWh/a
... davon fossiler Anteil	63 %
... davon Strom	35 %
Anzahl Betriebe (≥20 Besch.)	101
... davon Betriebe ≥50 Beschäftigte	45
Anzahl Beschäftigte (Betriebe ≥20 Beschäftigte)	7.060
... davon in Betrieben ≥50 Besch.	4.594
Gesamtumsatz	1.011 Mio. €/a
... davon Auslandsumsatz	41 %
CO₂-Emissionen (2022) (energetisch bedingt, Scope 1)	58 kt CO₂/a

Abbildung 9-2 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) seit 2020. Über 3.200 davon sind in der *Herstellung von sonstigen Textilwaren* (WZ 13.9) angestellt. Die Zahl der durchschnittlich Beschäftigten pro Unternehmen in dieser dabei mit ca. 119 jedoch nicht signifikant höher als in den anderen betrachteten Teilbranchen (WZ 13.1, WZ 13.2, und WZ 13.3). Mit über 600 Beschäftigten machen folgen in der sächsischen Textilindustrie die Webereien (WZ 13.2).

Anzahl der Betriebe
Sachsen | WZ 13 (Textilien) | > 50 Beschäftigte | 2020 bis 2025



Anzahl Beschäftigte
Sachsen | WZ 13 (Textilien) | > 50 Beschäftigte | 2020 bis 2025



13.1 Spinnstoffaufbereitung und Spinnerei
13.2 Weberei
13.3 Veredlung v. Textilien u. Bekleidung
13.9 H.v.sonst.Textilwaren

Abbildung 9-2: Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen Textilbranche seit 2020 [49].

9.2 Prozesse im Status quo: Textilien

Die Textilindustrie benötigt einen signifikanten Teil der eingesetzten (fossilen) Energie in Form von Prozesswärme. Abbildung 9-3 zeigt, wo diese im Bereich der für die deutsche und sächsische Textilindustrie wichtigen Funktionalisierung bzw. Veredelung benötigt wird. Besonders energieintensiv sind hier Wasch- und Trocknungsprozesse, die bis zu 18 kWh Energie je Kilogramm Textil erfordern [97].

Beim **Waschen** (oftmals Teil eines übergeordneten Färbeprozesses) entfällt ein erheblicher Teil der eingesetzten Energiemenge auf das Erhitzen des benötigten Wassers, wobei Wassertemperaturen von 80 °C und mehr nötig sein können.

Für den **Trocknungsprozess** stehen verschiedene Arten von Beheizsystemen zur Verfügung. Hier bestimmen jedoch oftmals Material- und Qualitätsanforderungen die Wahl der Beheizung und weniger der Energieverbrauch, weshalb beispielsweise bei hohen Weißgraden auch Systeme mit niedrigeren Wirkungsgraden zum Einsatz kommen [98]. Die zum Trocknen eingesetzten Spannrahmen werden auch zum **Thermofixieren**, z. B. von Maschenware, eingesetzt. Ziel des Prozesses ist es das unter Wärmeeinwirkung auftretende Schrumpfen zu unterbinden, damit die Textilien auch bei hohen Einsatztemperaturen formbeständig bleiben, und visko-elastische Effekte zu reduzieren [99] [100]. Aus Polymerfasern bestehenden Textilien werden dafür zunächst erwärmt und anschließend gespannt [99]. Die Fixiertemperaturen liegen üblicherweise im Bereich von 100 bis 200 °C, bei Hochtemperaturfasern aber auch über 200 °C [99]. Um die benötigten Temperaturen bereitzustellen, werden neben Dampf auch Heißwasser und Heißluft eingesetzt [186] [187].

Die wärmeintensiven Prozesse (Waschen, Trocknen und Färben) nutzen derzeit noch maßgeblich fossile Energieträger, allen voran Erdgas [101].

Die **mechanischen Bearbeitungsschritte**, wie z. B. das Weben, weisen hingegen hohe Stromverbräuche auf. Beim Weben (WZ 13.2) ist das Luftdüsenweben aufgrund seiner Produktivität verbreitet. Mit der Produktivität geht jedoch ein hoher Druckluft- und somit hoher Stromverbrauch einher [103]. Aufgrund der Materialbeanspruchung und limitierten Gewebebreite ist das Luftdüsenweben jedoch nicht für alle Textilien geeignet. Andere Schusseintragsverfahren mit geringerer Produktivität sind daher ebenfalls verbreitet.

Die anschließenden **Logistikprozesse** in der Textilindustrie umfassen in der Regel den Transport von Textilherstellern zu Veredlern und weiter zu Kunden bzw. Verbrauchern.

9.3 Transformationstechnologien: Textilien

Die **Textilindustrie** setzt bereits Maßnahmen zur Energieeffizienz und damit zur indirekten Emissionsminderung ein. Dazu gehören bspw.:

- Kombination von Konvektions- und Kontakttrocknung [98],
- Strahlungstrocknung,
- Abwasserwärmetauscher in Verbindung mit Speicherbecken [98],
- Nutzung der Abwärme von z. B. Spannrahmen,
- Wiederverwendung gering belasteter Bäder (z.B. letzte Spülbäder) [98],
- Weiterentwicklung der Fertigungsverfahren (z.B. energie- und produktionseffizientere Hauptdüse für mehrfarbigen Schusseintrag beim Luftdüsenweben) [104].

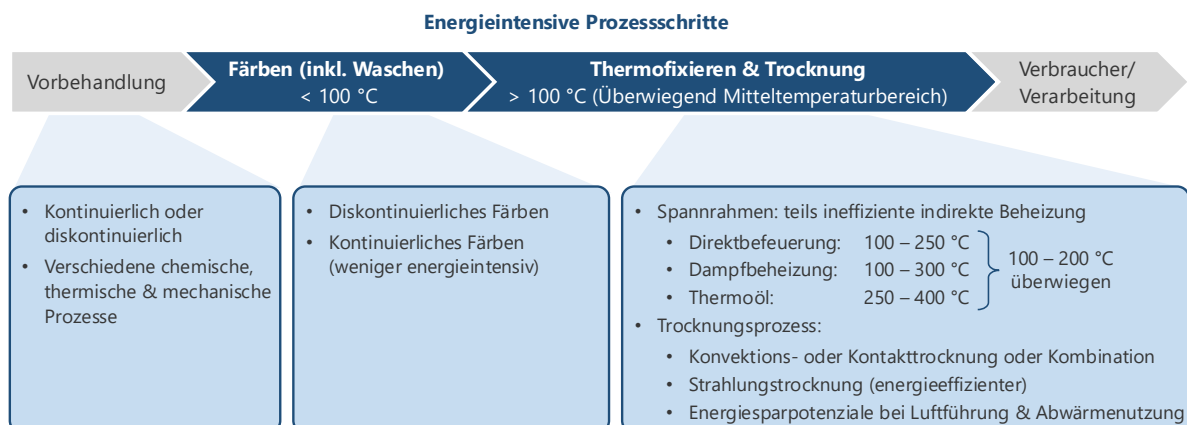


Abbildung 9-3: Energieintensive Prozesse/-schritte in der Herstellung technischer Textilien im Status quo [98], [102].

- Digital- statt Siebdruck zur Einsparung von Wasser, Chemikalien und Abfällen [105].

Grundsätzlich ist insbesondere die Abwärmenutzung in der Textilindustrie relevant. Um verschiedene Temperaturniveaus bedienen zu können, kommen daher üblicherweise Wärmespeicher zum Einsatz.

Für eine (nahezu) vollständige Vermeidung der CO₂-Emissionen sind derzeit zwei Möglichkeiten absehbar:

- Energieträgerwechsel zu Strom (Elektrifizierung), oder
- Energieträgerwechsel zu emissionsfreien Brennstoffen (Brennstoffwechsel)

Tabelle 9-3 listet die einzelnen Maßnahmen auf. Bei den Elektrifizierungsmaßnahmen ist die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung für das Unternehmen, über eine Anpassung des bestehenden Vertrages möglich, sofern der bestehende Stromanschluss über die erforderliche Kapazitätsreserve verfügt. Ist die zusätzlich erforderliche Anschlussleistung mit dem bestehenden Stromanschluss nicht darstellbar, muss mit dem zuständigen Verteilnetzbetreiber abgestimmt werden, wie die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung ermöglicht werden kann. In der Regel gehen damit Bauleistungen zur Ertüchtigung bzw. Erweiterung der elektrischen Betriebsmittel (z.B. neuer Transformator, neue Mittelspannung- bzw. Niederspannung- Einspeisung) einher. Dabei müssen u.a. mögliche technische Lösungen, der finanzielle Aufwand (ggf. mit Baukostenzuschuss), der Zeithorizont und ggfs. nötiger zusätzlicher Platzbedarf berücksichtigt werden.

Die **Kombination von mehreren Transformations-technologien** stellt ebenfalls eine Option dar. In der Textilbranche wäre beispielsweise die Elektrifizierung der thermischen Grundlast über eine (Hochtemperatur-) Wärmepumpe, die durch ein nachgeschaltetes Heizmodul (z.B. Elektrodenkessel mit zusätzlichem elektrischen Heizmodul) für Spitzenlasten oder -temperaturen ergänzt wird, denkbar.

Die Transformationsmöglichkeiten für **Logistikprozesse** sind in Abschnitt 5.3 aufgeführt.

Die Textilbranche steht vor der Herausforderung, dass der internationale Wettbewerbsdruck auch im Bereich technischer, funktionalisierter Textilien mit hoher Wahrscheinlichkeit zunehmen wird. Da in den Prozessen der Textilindustrie keine rohstoffbedingten CO₂-Emissionen (sog. Prozessemissionen) entstehen, ist der Weg zur CO₂-Neutralität in Scope 1 einfacher als in anderen Industriezweigen. Die Branche richtet ihr Augenmerk daher auch auf die Emissionen in Scope 3, welche

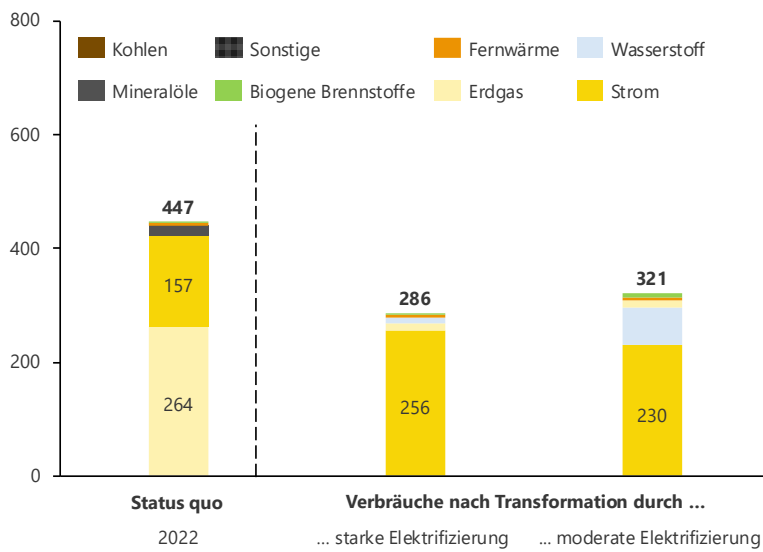
durch das verstärkte Recycling von Textilien und die Kreislaufwirtschaft reduziert werden sollen.

9.4 Transformationspfade: Textilien

Der fossile Anteil am Endenergieverbrauch in der sächsischen Textilindustrie ist mit 63 % (Stand 2022) im Vergleich zu den anderen betrachteten Branchen relativ hoch. Da keine Prozesswärme im Temperaturbereich über 500 °C benötigt wird [22], bestehen hohe Elektrifizierungspotenziale. Dadurch erhöht sich der Stromverbrauch, wie in Abbildung 9-4 zu sehen, sowohl bei starker als auch bei moderater Elektrifizierung. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den Anschlussleistungen von Strom. Unter den in der Transformationsbetrachtung gewählten Parametern spielt Wasserstoff nur bei der moderaten Elektrifizierung eine Rolle. Hier würden jährlich 67 GWh Wasserstoff benötigt. Da die Prozesse der Papierindustrie nahezu vollständig im unteren bzw. mittleren Temperaturniveau stattfinden, ist ein Transformationspfad mit nahezu vollständiger Elektrifizierung die derzeit wahrscheinlichste Variante.

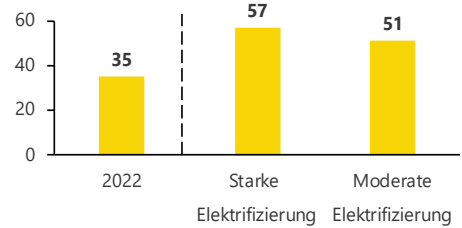
Endenergieverbrauch

in GWh | Sachsen | Textil



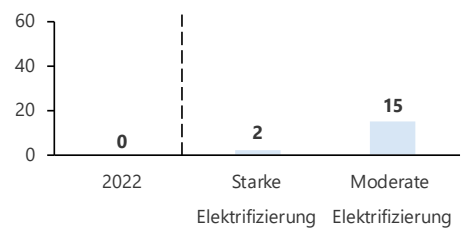
Anschlussleistung Strom

in MW | Sachsen | Textil



Anschlussleistung Wasserstoff

in MW | Sachsen | Textil



Was wäre, wenn die sächsische Textilindustrie dekarbonisiert? – Eine Abschätzung anhand verschiedener Elektrifizierungsintensitäten.

Effizienzgewinne und Produktionsanpassungen werden nicht berücksichtigt. Die Abschätzung der Anschlussleistungen erfolgt über eine Einschätzung branchenspezifischer Volllaststunden und ist als Richtwert zu verstehen.

Abbildung 9-4: Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen Papierindustrie.

Tabelle 9-3: Transformationstechnologien der Textilindustrie. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Brennstoffwechsel		
Biomasse (TRL 9)	- Die energetische Nutzung von Biomasse ist technisch ausgereift und verfügbar. Zu beachten sind Nachhaltigkeitsanforderungen (bspw. bzgl. Herkunft der Biomasse) sowie eine zunehmende Nutzungskonkurrenz um die begrenzten Ressourcen. - Die Verfügbarkeit von Biomasse kann deren Einsatzmöglichkeiten beschränken [89]. Zudem muss vor Ort beim Unternehmen ausreichend Platz zur Zwischenlagerung der z.B. Pellets vorhanden sein. - In der Textilindustrie wird Biomasse z.B. zur Dampferzeugung bereits eingesetzt, ist aber noch nicht weit verbreitet. Das Unternehmen Natural Fire hat 2024 in einer argentinischen Textilfabrik einen 2 MW Brenner zur Dampfproduktion installiert [106].	Bei Einsatz fester Biomasse reduziert sich die bisherige Gasanschlussleistung um die Leistung der Anlagen, die auf Biomasse umgestellt werden.

Tabelle 9-3 (Fortsetzung)

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Strahlungstrocknung (TRL 9)	- Bei der Strahlungstrocknung von Textilien kann Mikrowellen-, Infrarot- oder Hochfrequenzstrahlung zum Einsatz kommen [98]. Infrarotstrahlung ist dabei am weitesten verbreitet. - Einsatz der Technologie ist herausfordernd, da ein konstanter Abstand zwischen Strahler und dem zu trocknenden Textil eingehalten werden muss [98]. - Die Textilindustrie bietet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, z.B. im Bereich des Fixierens [98], [101]. - Bei der Strahlungstrocknung wird die Wärme im Trockengut auf molekularer Ebene erzeugt, was den Feuchtigkeitsabtransport beschleunigt. Zudem entsteht kaum Wärmeverlust über die Abluft [98]. - Der Wirkungsgrad von beispielsweise Mikrowellenanlagen liegt im Bereich von 40 bis 60 %. Durch die lokal begrenzte Erwärmung ist der spezifische Energiebedarf vergleichsweise gering. Zudem sind die Anlagen meist platzeffizient. /ISI-04 23P, LUH-04 11/	Die Strahlungstrocknung kann den Erdgasbedarf reduzieren. Die elektrische Anlagenperipherie und ggf. auch Anschlussleistungen müssen jedoch ertüchtigt werden.
Hoch- & Höchsttemperatur-Wärmepumpe (TRL 9)	- Mit Hoch- und Höchsttemperaturwärmepumpen (HT-WP) kann z.B. aus Abwärme Prozessdampf – je nach notwendigen Dampfparametern – oder Heißwasser für erzeugt werden. - Erzeugter überhitzter Dampf kann für Spannräumen oder die Trocknung eingesetzt werden, das Heißwasser beim Waschen. - HT-WP können Wärme im Bereich bis ca. 150 °C (Heißwasser) bereitstellen, wobei ab 100 °C überwiegend Schraubenkompressoren zum Einsatz kommen [63]. Am Markt verfügbare Hochtemperaturwärmepumpen besitzen Leistungen von bis zu 100 MWth [62]. - Elektrisch betriebene Wärmepumpen können theoretisch auch zur Flexibilisierung der Prozesswärmebereitstellung genutzt werden.	Durch die HT-WP entsteht eine zusätzliche Stromnachfrage, die in Abhängigkeit von den lokalen Gegebenheiten zu zusätzlicher Stromanschlussleistungen und ggf. auch einem Ausbau des Netzanschlusses und der Energieinfrastruktur erfordern kann. Bei einem Temperaturhub von 100 K weisen industrielle Wärmepumpen einen Coefficient of Performance (COP) von etwa 2 auf. Um die benötigte Wärmemenge zur Verfügung zu stellen, würde in diesem Fall nur etwa halb so viel elektrische Energie wie bei einem vergleichbaren Erdgaskessel benötigt.
Elektrokessel (TRL 9)	- Elektrokessel verfügen über einen Heizwiderstand und werden überwiegend mit Niederspannung betrieben. - Gängige Modelle zur Heißwassererzeugung bieten Leistungen im Bereich von 0,1 bis ca. 10 MW bei Betriebsdrücken von 6 – 25 bar [64]. - Der Umwandlungswirkungsgrad von Strom in Wärme liegt bei 100 % [65]. - Die Investitionskosten liegen im Bereich von 125 bis 350 €/2014/kW (2014) [12], [65]. - Zudem weisen Elektrokessel Möglichkeiten zur Hybridisierung und Flexibilisierungspotenzial auf.	In der Regel ist eine Erhöhung der Anschlussleistung für Strom notwendig. Die Kosten dafür liegen bei 25 bis 150 €/2014/kWh [12].

10 Branchensteckbrief: Chemie & Pharma (WZ 20 und 21)

Eine dekarbonisierte Dampferzeugung in der **Chemie- und Pharmaindustrie** wird nach heutiger Einschätzung vor allem elektrisch erfolgen. Tiefergehende prozessspezifische Verfahrensroutenwechsel befinden sich heute häufig noch auf einem niedrigen TRL.

Tabelle 10-1: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]

20 Herstellung von chemischen Erzeugnissen

- 20.1 Herstellung von chemischen Grundstoffen, Düngemitteln und Stickstoffverbindungen, Kunststoffen in Primärformen und synthetischem Kautschuk in Primärformen
z. B. Industriegase, Farbstoffe, Pigmente, Düngemittel, synthetischer Kautschuk, ...
- 20.2 Herstellung von Schädlingsbekämpfungsmitteln, Pflanzenschutz- und Desinfektionsmitteln
- 20.3 Herstellung von Anstrichmitteln, Druckfarben und Kittungen
z. B. Farben, Lacke, Lackharze, Druckfarben, Farb- und Lackentferner, ...
- 20.4 Herstellung von Seifen, Wasch-, Reinigungs- und Körperpflegemitteln sowie von Duftstoffen
z. B. grenzflächenaktive Stoffe, Geschirrspülmittel, Lederpflegemittel, Wasch- und Reinigungsmittel...
- 20.5 Herstellung von sonstigen chemischen Erzeugnissen
- 20.6 Herstellung von Chemiefasern
z. B. synthetische oder künstliche Filamente, Stapelfasern, Filamentgarnen oder Monofilamenten, ...

21 Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen

- 21.1 Herstellung von pharmazeutischen Grundstoffen
z. B. chemisch reiner Zucker oder aktive Substanzen für Antibiotika, Vitamine, Salicyl- und o-Acetylsalicylsäure
- 21.2 Herstellung von pharmazeutischen Spezialitäten und sonstigen pharmazeutischen Erzeugnissen
z. B. Impfstoffe, Antisera und sonstige Blutbestandteile

Die Petrochemie (Kokerei und Mineralölverarbeitung, WZ 19) ist nicht Teil dieses Steckbriefs.

10.1 Branchenübersicht: Chemie und Pharma

Die „Chemie und Pharma“-Branche lässt sich in drei Teile einteilen:

- die Herstellung von chemischen Grundstoffen (WZ 20.1),
- die sonstige Herstellung von chemischen Erzeugnissen (WZ 20 ohne WZ 20.1) (Chemie II) und
- die Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen (WZ 21).

Die Grundstoffchemie produziert neben chemischen Grundstoffen und Düngemitteln auch Stickstoffverbindungen, Kunststoffe und synthetischen Kautschuk in Primärformen. Zu Chemie II gehören Schädlingsbekämpfungsmittel, Pflanzenschutz- und Desinfektionsmittel, sowie Anstrichmittel, Druckfarben und Kittungen. Auch die Herstellung von Seifen, Wasch-, Reinigungs- und Körperpflegemitteln sowie von Duftstoffen, sonstiger chemischer Erzeugnisse und Chemiefasern zählt zur Chemie II. Die Pharmaindustrie stellt pharmazeutische Grundstoffe und Spezialitäten sowie sonstige pharmazeutische Erzeugnisse her.

Die Grundstoffchemie (WZ 20.1) umfasst eine breite Produktpalette, sowohl an Vorprodukten, die sie teils selbst weiterverwendet, als auch an Endprodukten. Dazu gehören u.a.

- Elementargase, Flüssig- oder Druckluft, gasförmige Kühlmittel und Isoliergase (Industriegase),
- Farbstoff- und Pigmentkonzentrate, fluoreszierende Aufheller oder Luminophore (Farbstoffe und Pigmente),
- anorganische Säuren mit Ausnahme von Salpetersäure, Eisenkies und destilliertes Wasser (sonstige anorganische Grundstoffe und Chemikalien),
- azyklische Kohlenwasserstoffe, Alkohole oder Mono- und Polycarbonsäuren einschließlich Essigsäure (sonstige organische Grundstoffe und Chemikalien),
- Stickstoff-, phosphat- oder kaliumhaltige Düngemittel, Harnstoff oder Gartenerde (Düngemittel und Stickstoffverbindungen),
- Ethylen, Propylen, Styrol, Vinylchlorid, Vinylacetat und Acryl, Polyamide, oder Phenol- und Epoxidharze (Kunststoffen in Primärformen), oder
- synthetischer Kautschuk und Faktis (synthetischer Kautschuk in Primärformen)

Bei den chemischen Erzeugnissen (Chemie II) überwiegen gebrauchsfertige Produkte. Diese werden sowohl von anderen Unternehmen, z.B. in der Landwirtschaft oder im Baugewerbe, als auch von Endverbrauchern verwendet. Beispiele hierfür sind

- Schädlingsbekämpfungsmittel-, Pflanzenschutz- und Desinfektionsmitteln,
- Farben, Lacke, sowie Farb- und Lackentferner,
- Seifen, Duftstoffe, sowie Wasch-, Körperpflege-, Geschirrspül- und Lederpflegemittel und
- synthetische oder künstliche Filamente.

Die Herstellung von pharmazeutischen Grundstoffen (WZ 21.1), sowie Spezialitäten und sonstigen Erzeugnissen (WZ 21.2) umfasst ebenfalls verschiedene Zwischen- und Endprodukte, aber auch die Verarbeitung verschiedener Substanzen. Dazu zählen die

- Herstellung aktiver Substanzen für pharmazeutische Präparate,
- Verarbeitung von Blut und Drüsen,
- Herstellung von pharmazeutischen Präparaten,
- Herstellung von chemischen und hormonellen Empfängnisverhütungsmitteln,
- Herst. v. Stoffen für die medizinische Diagnostik,
- Herstellung von medizinischer Ausrüstung wie Verbandszeug,
- Herstellung biotechnischer pharmazeutischer und Aufbereitung botanischer Erzeugnisse.

Die Branche in Sachsen

Mit über 3.800 Beschäftigten (Stand März 2025) ist insbesondere die *Herstellung von chemischen Grundstoffen, Düngemitteln und Stickstoffverbindungen, Kunststoffen in Primärformen und synthetischem Kautschuk in Primärformen (WZ 20.1)* in Sachsen relevant. Ebenfalls relevant ist die *Herstellung von pharmazeutischen Spezialitäten und sonstigen pharmazeutischen Erzeugnissen (WZ 21.2)* mit um die 3.000 Beschäftigten. Aus den Bereichen der *Herstellung von Schädlingsbekämpfungsmitteln, Pflanzenschutz- und Desinfektionsmitteln (WZ 20.2)* sowie der *Herstellung von Chemiefasern (WZ 20.6)* sind in Sachsen keine Unternehmen vertreten. In den verbleibenden Gruppen (WZ 20.3, WZ 20.4, WZ 20.5 und 21.1) sind insgesamt noch einmal etwa 4.000 Menschen beschäftigt, wobei etwa drei Viertel davon auf die *Herstellung von Seifen, Wasch-, Reinigungs- und Körperpflegemitteln sowie von Duftstoffen (WZ 20.4)* und *Herstellung von sonstigen chemischen Erzeugnissen (WZ 20.5)* entfallen.

Status quo und Herausforderungen

Die Branche „Herstellung chemischer Erzeugnisse“ (WZ 20) zählt mit einem Endenergieverbrauch von 398 GWh (2022) ebenso wie die Branche „Herstellung pharmazeutischer Erzeugnisse“ mit 118 GWh (2022) zu den weniger energieintensiven Fokusbranchen.

Abbildung 11-1 zeigt oben die Entwicklung des Endenergieverbrauchs der Branche „Grundstoffchemie“ von 2012 bis 2022. Im Jahr 2022 ist diese für über 90 % des gesamten Endenergieverbrauchs der Branchen „Chemie & Pharma“ verantwortlich. Bei der Entwicklung des Endenergieverbrauchs in der Grundstoffchemie muss berücksichtigt werden, dass Raffineriegas (ebenso wie andere Mineralölprodukte) erst seit 2020 als Energieträger erfasst wird. Dieses entsteht in den Prozessen der Grundstoffchemie und wird dort auch wieder energetisch verwendet. Es wurde bereits vor 2020 eingesetzt, jedoch nicht in den Statistiken erfasst.

Bei Chemie II ist der Einbruch von 2014 auf 2015 um 30 %, der im Wesentlichen durch den Rückgang des Stromverbrauchs verursacht wird, auffällig. Die Verbräuche der anderen Energieträger haben sich kaum verändert. Insgesamt blieb der Endenergieverbrauch der Branche vergleichsweise konstant. Der Endenergieverbrauch der Branche „Pharmazeutische Erzeugnisse“ ging von 2013 bis 2015 ebenfalls um 35 % zurück.

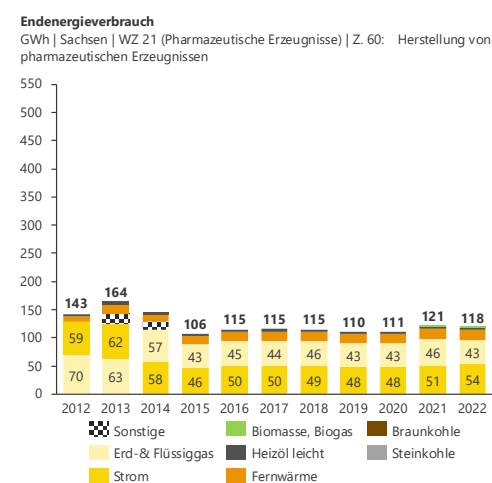
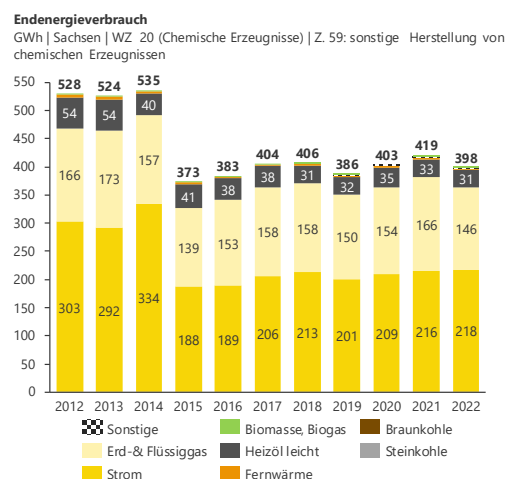
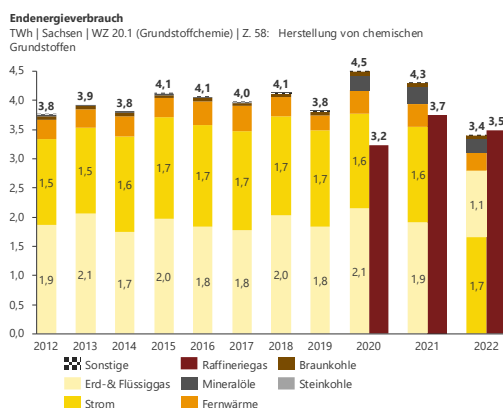


Abbildung 10-1: Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branchen „Grundstoffchemie“ (oben, in TWh), „Chemie II“ (mittig, in GWh) und „Pharmazeutische Erzeugnisse“ (unten, in GWh) nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.

Die Hersteller von chemischen Grundstoffen, Düngemitteln und Stickstoffverbindungen, Kunststoffen in Primärformen und synthetischem Kautschuk (WZ 20.1) in Primärformen sind zertifikatspflichtig unter dem EU-ETS I. In Sachsen betrifft dies die Herstellung von Salpetersäure und organischen Grundchemikalien. Wie Abbildung 10-2 zeigt, sind diese größtenteils auf die

Produktionsaktivitäten der Dow Olefinverbund GmbH zurückzuführen. Insgesamt waren 2022 in Sachsen 1.063 kt CO₂ zertifikatspflichtig, wovon 827 kt CO₂ (78 %) über freie Zertifikate abgedeckt wurden. Dieses Bild wird sich mit der Ankündigung der Dow Olefinverbund GmbH, ihre Ethylenanlage in Böhlen Ende 2027 schließen zu wollen [107], in den kommenden Jahren jedoch stark verändern.

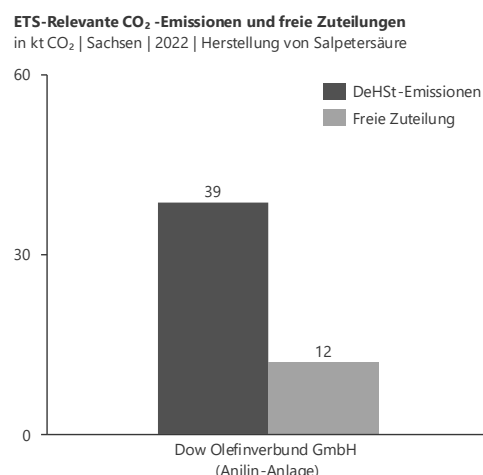
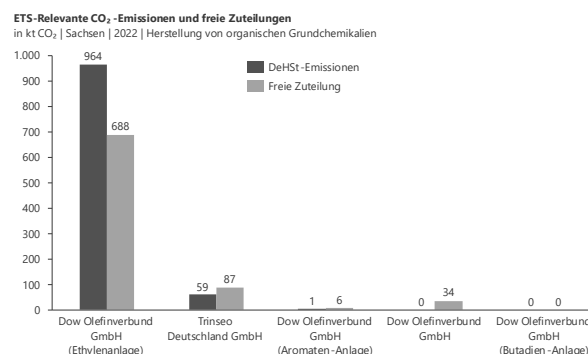


Abbildung 10-2: Emissionen und frei zugeteilte Zertifikate der sächsischen Hersteller von chemischen Erzeugnissen.

Die aus den Produktionsaktivitäten resultierenden energetisch bedingten CO₂-Emissionen beliefen sich im Jahr 2022 auf 38 kt CO₂. Im Bereich Chemie II (WZ 20 ohne WZ 20.1) 10 kt CO₂ im Bereich Pharma (WZ 21). Tabelle 10-2 gibt einen Überblick der relevanten Kennzahlen der Industrie Chemie II, Tabelle 10-4 über die pharmazeutische Industrie. Die beiden Industrien zählen bzgl. des Endenergieverbrauchs nicht zu den energieintensivsten Branchen in Sachsen. Mit Blick auf die Beschäftigtenzahlen befinden sich Chemie II und Pharma zusammen auf einem ähnlichen Niveau wie die Gummi- und Kunststoffbranche. Die Beschäftigten verteilen sich jedoch auf weniger Unternehmen. Insbesondere im Bereich Pharma ist der Anteil der Betriebe mit mehr als 50 Beschäftigten hoch. Von den betrachteten Industrien in Sachsen ist keine so abhängig vom Exportgeschäft wie die chemische

und pharmazeutische Industrie, was sich an den hohen Anteilen der Auslandsumsätze zeigt. Bezüglich des Gesamtumsatzes überwiegt die chemische Industrie gegenüber dem Bereich Pharma. Allgemein weist die Pharmaindustrie in Sachsen im Vergleich zu den anderen energieintensiven Industrien einen geringeren Gesamtumsatz auf.

Tabelle 10-2: Kennzahlen der Branche Grundstoffchemie (WZ 20.1) in Sachsen (2023) [49], [40], [83]

Endenergieverbrauch (2022)	6.895 GWh/a
... davon fossiler Anteil	71 %
... davon Strom	24 %
Anzahl Betriebe (≥20 Besch.)	22
... davon Betriebe ≥50 Beschäftigte	12
Anzahl Beschäftigte (Betriebe ≥20 Beschäftigte)	4.001
... davon in Betrieben ≥50 Besch.	3.776
Gesamtumsatz	2.337 Mio. €/a
... davon Auslandsumsatz	70 %
CO₂-Emissionen (2022) (energetisch bedingt, Scope 1)	1.063 kt CO ₂ /a

Tabelle 10-3: Kennzahlen der Branche Chemie II (WZ 20 ohne WZ 20.1) in Sachsen (2023) [49], [40], [83]

Endenergieverbrauch (2022)	398 GWh/a
... davon fossiler Anteil	45 %
... davon Strom	55 %
Anzahl Betriebe (≥20 Besch.)	45
... davon Betriebe ≥50 Beschäftigte	24
Anzahl Beschäftigte (Betriebe ≥20 Beschäftigte)	4.158
... davon in Betrieben ≥50 Besch.	3.382
Gesamtumsatz	1.475 Mio. €/a
... davon Auslandsumsatz	61 %
CO₂-Emissionen (2022) (energetisch bedingt, Scope 1)	38 kt CO ₂ /a

Tabelle 10-4: Kennzahlen der sächs. pharmazeutischen Industrie (2023) [49], [40], [83]

Endenergieverbrauch (2022)	118 GWh/a
... davon fossiler Anteil	39 %
... davon Strom	46 %
Anzahl Betriebe (≥20 Besch.)	26
... davon Betriebe ≥50 Beschäftigte	17
Anzahl Beschäftigte (Betriebe ≥20 Beschäftigte)	3.864
... davon in Betrieben ≥50 Besch.	3.536
Gesamtumsatz	979 Mio. €/a
... davon Auslandsumsatz	52 %
CO₂-Emissionen (2022) (energetisch bedingt, Scope 1)	10 kt CO ₂ /a

Abbildung 10-3 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) seit 2020. In der der Herstellung von chemischen Erzeugnissen sind etwa doppelt so viele Betriebe und Beschäftigte tätig, wie in der pharmazeutischen Industrie. In der Chemiebranche ist die Anzahl der Betriebe zwischen 2020 und 2022 zwar deutlich zurückgegangen, seitdem allerdings konstant. Die Entwicklung der Betriebe. In der pharmazeutischen Industrie war die Entwicklung bei den Betrieben im Zeitraum von 2020 bis 2022 hingegen positiv. In der Unterklasse *Herstellung von pharmazeutischen Spezialitäten und sonstigen pharmazeutischen Erzeugnissen* (WZ 21.2) kamen Betriebe hinzu oder haben die Grenze von 50 Beschäftigten überschritten. Dies spiegelt sich auch in der Zahl der Beschäftigten wider. Diese ist bis 2024 kontinuierlich gewachsen. In der *Herstellung von pharmazeutischen Grundstoffen* sind heute vergleichbar viele Personen beschäftigt wie 2020. Der zwischenzeitige leichte Anstieg, der bei den Betrieben deutlicher zu sehen ist, hielt nicht an.

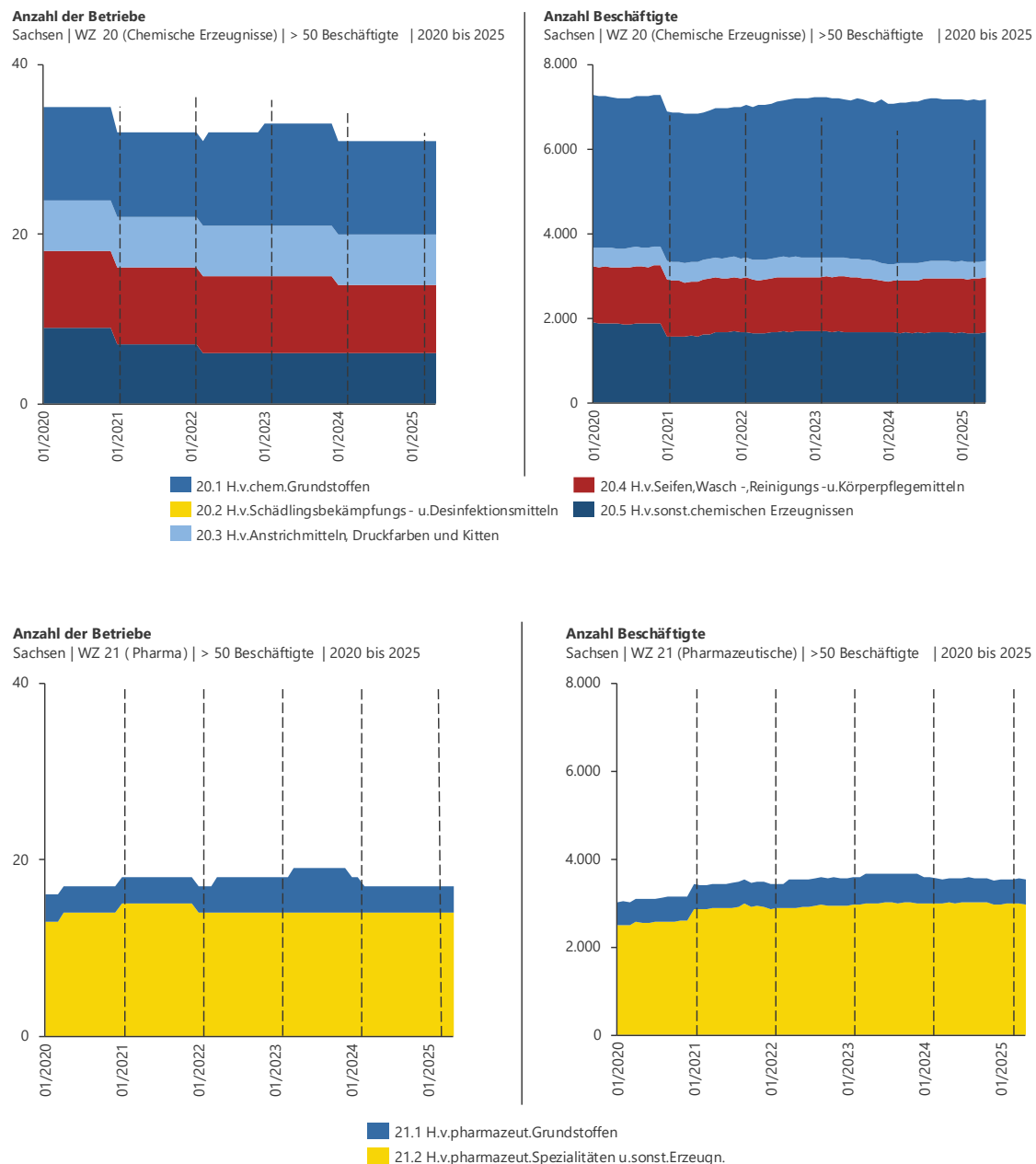


Abbildung 10-3: Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen Chemie-(oben) und Pharmabranche (unten) seit 2020 [49].

10.2 Prozesse im Status quo: Herstellung von chemischen und pharmazeutischen Erzeugnissen

Die **Herstellung von chemischen Erzeugnissen** umfasst eine heterogene Produktpalette, mit der unterschiedliche Produktionsprozesse und Wertschöpfungsketten einhergehen. Ein zentraler Prozess dabei ist das thermische oder katalytische Cracken (Aufspalten) von Kohlenwasserstoffketten in den sogenannten „Steamcrackern“. Diese fallen in die Unterklasse *Herstellung von sonstigen organischen Grundstoffen* (WZ 20.14). Beim Cracken werden langkettige

Kohlenwasserstoffe, v.a. Naphtha und Rohbenzin, bei ca. 850 °C thermisch gespalten [108]. Dadurch entstehen Olefine und Aromaten sowie Nebenprodukte (Methan, Wasserstoff und Schweröl). Diese Nebenprodukte werden im Cracker selbst energetisch verwertet, um den zum Cracken benötigten Wasserdampf zu erzeugen. Die Mengenanteile der Olefine und Aromaten hängen maßgeblich von den Einstellungen des Steamcrackers und dem eingesetzten Rohstoff ab. [23]

In Sachsen spielt auch die Herstellung von Polystyrol eine Rolle. Glasklares Polystyrol wird dabei durch Homopolymerisation von Styrol hergestellt, während schlagzähes Polystyrol durch Propfpolymerisation von Styrol auf Polybutadien entsteht [109]. Beide

Polymerisationsprozesse verlaufen exotherm bei Reaktortemperaturen zwischen 110 und 180 °C [24] und werden üblicherweise als Batch-Reaktion durchgeführt.

Die **Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen** ist ebenfalls eine heterogene Branche. Die Herstellung von Arzneimitteln beginnt in der Regel mit den Wirkstoffen. Bei deren Herstellung kommen verschiedene Verfahren, wie z.B. Fermentation, Synthesen und Aerobe sowie Anaerobe Gärung, zum Einsatz. Prozessparameter wie Temperatur, pH-Wert und Nährstoffverfügbarkeit sind dabei entscheidend, damit die eingesetzten Mikroorganismen die benötigten chemischen Verbindungen effizient und mit der geforderten Qualität produzieren [110]. Gemeinsam mit Bindemitteln, Farb-, Geschmacks- oder Füllstoffen wird anschließend das Arzneimittel formuliert. Aufgrund der Hygieneanforderungen sind bei pharmazeutischen Erzeugnissen auch Verpackungsprozesse von entscheidender Bedeutung. Da Wertschöpfungsketten oftmals stark internationalisiert sind und insbesondere die Wirkstoffe oft aus Asien importiert werden, sind auch die Transport- und Logistikprozesse relevant für die Branche. [111]

In Sachsen werden beispielsweise Impfstoffe gegen Grippe oder Hepatitis produziert [112].

Enthält die Abluft eines Prozesses zur Herstellung eines chemischen oder pharmazeutischen Erzeugnisses Schadstoffe oder Rückstände solcher, erfordert die Abluftreinigung i.d.R. eine **Nachverbrennung** zur Umsetzung der Schadstoffe. Dafür sind Temperaturen im Bereich von 750 °C üblich [113]. Sofern die Lösemittelkonzentration nicht ausreichend hoch für einen autothermen Betrieb ist, ist eine Stützfeuerung nötig. Für diese kommt meist Erdgas zum Einsatz. Im Bereich der Grundstoffchemie kommen Fackelanlagen auch aus Sicherheitsgründen zum Einsatz. Damit können bei Produktionsstörungen chemische Stoffe aus dem Produktionsprozess ausgeleitet werden. Damit diese Sicherheitsfackeln im Falle einer Störung sofort einsatzbereit sind, werden die Fackelanlagen auch im

Dauerbetrieb gehalten, wozu vor allem Erdgas eingesetzt wird.

Exkurs: Elektrolyse

Elektrolyseprozesse sind für chemische Erzeugnisse ebenfalls von großer Bedeutung, z.B. bei der Herstellung von Chlor oder Wasserstoff. Mit der Chlor-Alkali Elektrolyse werden Wasser und Steinsalz in Chlor und die Nebenprodukte Wasserstoff und Natronlauge umgewandelt. Die Chlor-Alkali Elektrolyse ist ein sehr stromintensiver Prozess und i. d. R. hochintegriert in die Folgeprozesse. Von den drei Prozessvarianten der Chlor-Alkali Elektrolyse weist das Membranverfahren mit Sauerstoffverzehrkathode den niedrigsten spezifischen Energieverbrauch auf, ist in Deutschland jedoch weniger verbreitet als das Membranverfahren ohne eine solche Kathode. Das Diaphragma-Verfahren weist zwar ebenfalls einen niedrigen spezifischen Stromverbrauch auf, liefert jedoch Natronlauge mit geringerer Konzentration. Das ursprüngliche Amalgam-Verfahren spielt in der gesamten EU keine Rolle mehr. [23]

10.3 Transformationstechnologien: Herstellung von chemischen und pharmazeutischen Erzeugnissen

Auch die **Chemieindustrie** setzt bereits viele Maßnahmen zur Energieeffizienz und damit zur indirekten Emissionsminderung ein. Dazu gehören:

- Wärmerückgewinnung,
- Regelmäßige Wartung und Reinigung von z.B. Filtern und Wärmetauschern,
- Regelmäßiger Tausch von Verschleißteilen (z.B. Membrane),
- Drehzahlregelung bei elektrischen Antrieben von u.a. Pumpen, Ventilatoren und Rührwerken,
- Effizienzmaßnahmen in verschiedenen Querschnittstechnologien.

Für eine (nahezu) vollständige Vermeidung der CO₂-Emissionen sind derzeit drei Möglichkeiten absehbar:

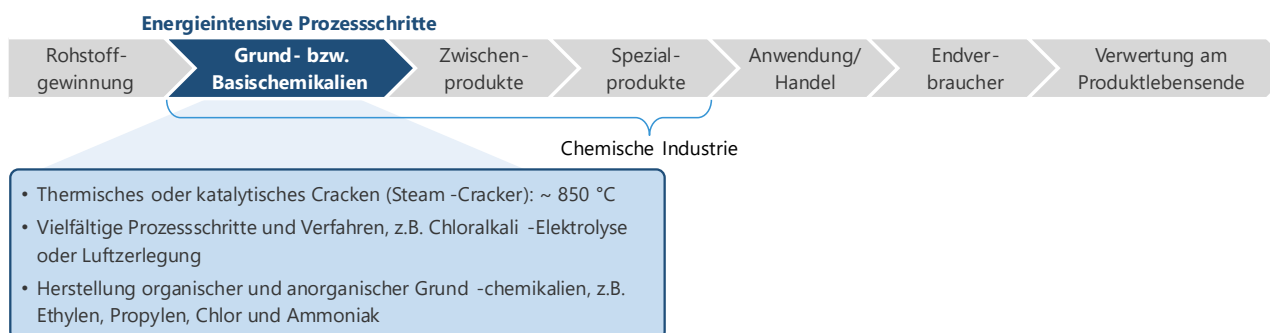


Abbildung 10-4: Energieintensive Prozesse/-schritte in der Wertschöpfungskette chemischer Erzeugnisse im Status quo.

- Energieträgerwechsel zu Strom (Elektrifizierung),
- Energieträgerwechsel zu emissionsfreien Brennstoffen (Brennstoffwechsel) oder
- CO₂-Abscheidung und Nutzung von CO₂ (CCU).

Tabelle 10-5 listet eine Auswahl verschiedener Maßnahmen auf. Bei den Elektrifizierungsmaßnahmen ist die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung für das Unternehmen, sofern der bestehende Stromanschluss über die erforderliche Kapazitätsreserve verfügt über eine Anpassung des bestehenden Vertrages möglich. Ist die zusätzlich erforderliche Anschlussleistung mit dem bestehenden Stromanschluss nicht darstellbar, muss mit dem zuständigen VNB abgestimmt werden, wie die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung ermöglicht werden kann. In der Regel gehen damit Bauleistungen zur Ertüchtigung bzw. Erweiterung der elektrischen Betriebsmittel (z.B. neuer Transformator, neue Mittelspannung-Einspeisung) einher. Dabei müssen u.a. mögliche technische Lösungen, der finanzielle Aufwand (ggf. mit Baukostenzuschuss), der Zeithorizont und ggfs. nötiger zusätzlicher Platzbedarf berücksichtigt werden.

Die Kombination von mehreren Transformationstechnologien bzw. Elektrifizierung und Brennstoffwechsel stellt ebenfalls eine Option dar. Möglich ist beispielsweise eine Elektrifizierung der thermischen Grundlast über eine (Hochtemperatur-) Wärmepumpe, die durch ein nachgeschaltetes Heizmodul (z.B. Elektro- oder Biomassekessel) für Spitzenlasten oder -temperaturen ergänzt wird.

Aufgrund des allgemeinen Handlungsbedarfs in der chemischen Industrie werden auch noch weitere Technologien (z. B. Methanol-to-Olefins) erforscht. Die Wasserstoffproduktion an sich wird im Rahmen dieses Steckbriefs nicht als Transformationstechnologie der chemischen Industrie betrachtet. Jedoch stellt sie auch für sächsische Unternehmen ein neues, wachsendes Geschäftsfeld innerhalb der Dekarbonisierung der Industrie und Energiewirtschaft dar.

Auch in der **pharmazeutischen Industrie** werden Effizienzmaßnahmen umgesetzt, um den gesamten Energieverbrauch der Produktion zu senken, z. B.

- bedarfsgerichtete Temperaturabsenkung,
- Abwärmenutzung,
- optimierte Produktionsplanung sowie intelligente Steuerung von Produktionsanlagen,
- bedarfsgerichtete Raumdimensionierung, um Lüftungs- und Klimatisierungsbedarfe von beispielsweise Laboren zu reduzieren.

Für eine (nahezu) vollständige Vermeidung der CO₂-Emissionen sind derzeit zwei Möglichkeiten absehbar:

- Energieträgerwechsel zu Strom (Elektrifizierung),
- Energieträgerwechsel zu emissionsfreien Brennstoffen (Brennstoffwechsel)

Tabelle 10-8 listet eine Auswahl verschiedener Maßnahmen auf. Dabei muss berücksichtigt werden, dass explizit auf die Herstellungsprozesse der Pharmaindustrie bezogene Transformationsmaßnahmen bisher jedoch kaum betrachtet wurden.

Beide Branchen stehen in Sachsen vor der Herausforderung, dass aus der Anlagenschließung der Dow Olefinverbund GmbH weitreichende Folgen für die lokalen Wertschöpfungsketten resultieren. Die in diesem Zuge notwendige Umgestaltung bietet aber auch Chancen, die Transformation voranzutreiben, z. B. indem neue, dekarbonisierte Rohstoffe in die Wertschöpfung eingebunden und/oder Anlagen zur Erzeugung von grünem Wasserstoff aufgebaut werden.

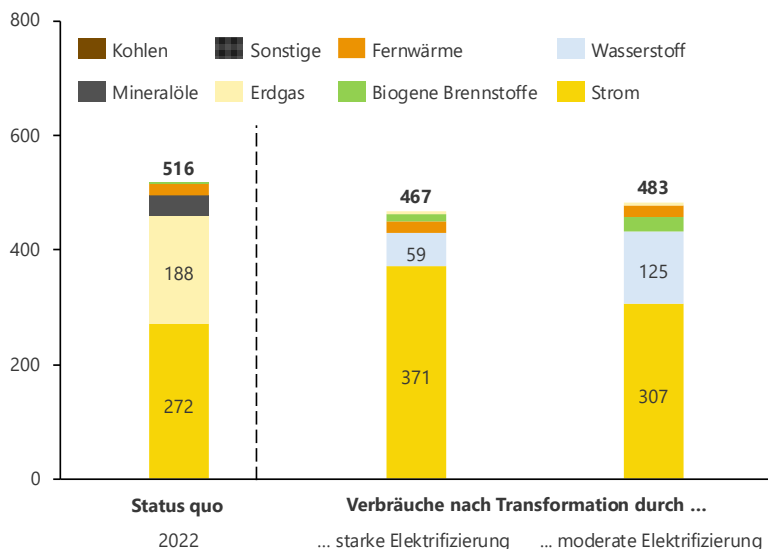
10.4 Transformationspfade: Chemie II und Pharma

Die Grundstoffchemie wird an dieser Stelle nicht betrachtet, da bereits ausführliche Roadmaps und Transformationsrechnungen für diese Branche existieren. Stattdessen wird die Veränderung des Endenergieverbrauchs durch Elektrifizierung bei der Herstellung chemischer und pharmazeutischer Erzeugnisse zusammengefasst dargestellt.

In Sachsen sind fossile Energieträger in beiden Branchen bzgl. des Endenergieverbrauchs nicht dominierend. Prozesswärme wird überwiegend im Temperaturbereich über 500 °C benötigt [8]. Aus diesem Grund tritt, wie in Abbildung 10-5 zu sehen, bei moderater und starker Elektrifizierung ein relevanter Bedarf an Wasserstoff und biogenen Brennstoffen auf. Im Falle der moderaten Elektrifizierung macht dieser 26 % des Endenergieverbrauchs aus. Das Temperaturniveau begrenzt auch die Einsatzmöglichkeiten für Wärmepumpen, deren COP dadurch weniger stark ausgenutzt werden können. Aus diesem Grund sinkt der Endenergieverbrauch im Bereich Chemie II & Pharma unter den gewählten Parametern auch weniger stark.

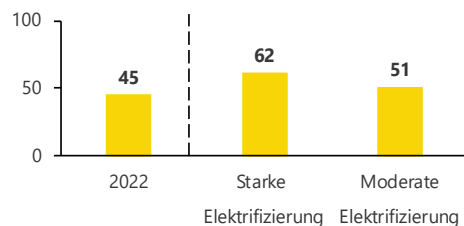
Endenergieverbrauch

in GWh | Sachsen | Chemie II & Pharma



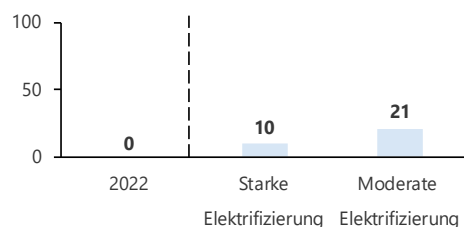
Anschlussleistung Strom

in MW | Sachsen | Chemie & Pharma



Anschlussleistung Wasserstoff

in MW | Sachsen | Chemie & Pharma



Was wäre, wenn die sächsische Chemie - & Pharmabranche dekarbonisiert? Eine Abschätzung anhand verschiedener Elektrifizierungsintensitäten.

Effizienzgewinne und Produktionsanpassungen werden nicht berücksichtigt. Die Abschätzung der Anschlussleistungen erfolgt über eine Einschätzung branchenspezifischer Volllaststunden und ist als Richtwert zu verstehen.

Abbildung 10-5: Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung des sächsischen Industriezweigs Chemie II & Pharma.

Tabelle 10-5: Transformationstechnologien der chemischen Industrie: Elektrifizierung. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Wasserstoffelektrolyse (TRL 9)	- Wasserstoff wird bisher überwiegend durch Dampfreformierung aus Erdgas hergestellt, wobei prozessbedingt CO₂ entsteht. - Bei der Wasserstoffelektrolyse entfällt Erdgas als Rohstoff. Dadurch ist im Prozess kein Kohlenstoff mehr enthalten. - Für die Wasserstoffelektrolyse stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung: alkalische Elektrolyse (unter Druck oder drucklos), PEM-Elektrolyse oder Hochtemperaturelektrolyse.	Mit der Wasserstoffelektrolyse würden stromseitig erhebliche Mehrbedarfe einhergehen, für die entsprechende Anschlussleistungen müssen geschaffen werden müssten. Die bisherige Gasanschlussleistung reduziert sich.
Methanpyrolyse (TRL <6)	- Alternative zur Wasserstoffelektrolyse für die Wasserstoffherstellung. - Methan wird dabei bei hohen Temperaturen und nicht-katalytisch in Wasserstoff und Kohlenstoff gespalten. Erfolgt die Wärmebereitstellung elektrisch, werden ca. 52 MWh Strom pro Tonne Wasserstoff benötigt. [23] - Derzeit nur Pilotanlagen. Mit technischer Einsatzreife wird nicht vor 2040 gerechnet [23].	Sowohl die Anlagenperipherie am Standort als auch entsprechende Anschlussleistungen für Strom müssen geschaffen werden. Die bisherige Gasanschlussleistung reduziert sich.
Elektroden-dampfkessel (TRL 9)	- Elektrifizierung der z.B. über gasbetriebene Großraumwasserkessel stattfindenden Dampfversorgung. - Möglichkeiten zur Hybridisierung und bivalenten Nutzung. - Elektroden-dampfkessel werden bereits im Infraserb Höchst Industriepark in Frankfurt am Main (20 MW, 208 °C) oder im Chemiepark Leverkusen (7 MW, 380 – 400 °C durch zusätzlichen Überhitzer) zur Dampferzeugung eingesetzt [114].	Zusätzliche Stromanschlussleistungen werden benötigt. Die benötigten Gasanschlussleistungen können sinken.
Höchsttemperatur-Wärmepumpe (HöT-WP) zur Dampferzeugung (TRL 9)	- Mit HöT-WP kann z.B. aus Abwärme Prozessdampf für z.B. Trocknung oder Behälterbeheizung erzeugt werden. - In der chemischen Industrie gibt es neben endothermen Prozessen, denen Wärme zugeführt werden muss, auch exotherme Prozesse bei denen Wärme frei wird. Zweitere eignen sich als Abwärmequelle, woraus über HöT-WP Heißwasser oder Dampf erzeugt werden kann. Dieser kann anschließend für die endothermen Prozesse genutzt werden. - Hochtemperatur-Wärmepumpen (HT-WP) können Wärme im Bereich bis ca. 150 °C bereitstellen wobei ab 100 °C überwiegend Schraubenkompressoren zum Einsatz kommen [63]. Am Markt verfügbare HöT-WP besitzen Leistungen von bis zu 100 MW_{th} [62]. - Elektrisch betriebene Wärmepumpen können auch zur Flexibilisierung der Prozesswärme- bzw. Dampfbereitstellung, z.B. in Kombination mit Elektrodenkessel, genutzt werden.	Durch die HT-WP entsteht eine zusätzliche Stromnachfrage. Abhängig von den lokalen Gegebenheiten kann dies zusätzliche Stromanschlussleistungen und ggf. auch einen Ausbau des Netzanschlusses und der Energieinfrastruktur erfordern. Bei einem Temperaturhub von 100 K weisen industrielle Wärmepumpen einen Coefficient of Performance (COP) von etwa 2 auf. Um die benötigte Wärmemenge zur Verfügung zu stellen, würde in diesem Fall nur etwa halb so viel elektrische Energie wie Gas benötigt.

Tabelle 10-6: Transformationstechnologien der chemischen Industrie: Brennstoffwechsel. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Elektrisch beheizter Steamcracker (TRL <6)	• Weiterhin Einsatz von Erdöldestillation. • Kohlenstoffhaltige Nebenprodukte des Crack-Prozesses (Methan und Schweröl) werden nicht mehr zur Wärmeerzeugung im Steamcracker verbrannt. Eine Möglichkeit ist durch Vergasung Synthesegas herzustellen und dieses einem Fischer-Tropsch-Prozess zuzuführen. [23] • Die Bereitstellung der benötigten Energiedichte ist die zentrale Herausforderung [23]. • Die Investitionskosten liegen bei 250 € (2019) pro Tonne Produkt (High Value Chemicals, HVC) [23]. Fokus: Umrüstung bestehender Steamcracker	Zusätzliche Stromanschlussleistungen sind erforderlich. Pro Tonne Produkt (HVC) benötigt ein elektrisch beheizter Cracker ca. 4,9 MWh Energie [23]. Über die Jahresproduktion des Crackers kann so die erforderliche Anschlussleistung abgeschätzt werden.
Brennstoffwechsel		
Biomasse (TRL 9)	• Die energetische Nutzung von Biomasse ist technisch ausgereift und verfügbar. • Biomasse kann auch vergast und anschließend in Form von Synthese- bzw. Biogas genutzt werden [23].	Bei Einsatz fester Biomasse reduziert sich die bisherige Gasanschlussleistung.
Wasserstoff (TRL 7-9)	• Eine Beimischung oder ein vollständiger Umstieg auf Wasserstoff ist theoretisch möglich und entsprechende Brenner verfügbar. Aus wirtschaftlichen Gründen ist die vollständige Umstellung, jedoch bisher noch nicht im industriellen und langfristigen Einsatz. • In der chemischen Industrie besteht zudem ein stofflicher Wasserstoffbedarf für die Produktionsprozesse, der derzeit noch aus fossilen Rohstoffen gewonnen wird. Vor der energetischen Wasserstoffnutzung steht in der chemischen Industrie daher die stoffliche Versorgung [115]. • Durch die Transformation könnte sich der Wasserstoffbedarf der chemischen Industrie zur stofflichen und chemischen Nutzung bis 2050 etwa verachtfachen [115].	Die vorhandenen Erdgasanschlüsse müssen parallel zur Umrüstung der Produktionsanlagen auf Wasserstoff umgestellt werden. Dazu müssen u.a. Filter und Zähler erneuert werden. Wird Wasserstoff nicht mehr vor Ort aus fossilen Rohstoffen gewonnen sondern extern bezogen oder z.B. mittels Elektrolyse vor Ort hergestellt, erfordert dies zusätzliche Wasserstoff- oder Strominfrastruktur.

Tabelle 10-7: Transformationstechnologien der chemischen Industrie: Kunststoffrecycling. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Kunststoffrecycling		
Mechanisches Kunststoffrecycling (TRL 9)	• Das mechanische Recycling von Kunststoffen erzeugt Sekundärrohstoffe für die chemische Industrie ohne chemische Struktur des Abfallmaterials zu verändern und eignet sich für Thermoplaste [116]. • Der Prozess umfasst mehrere Schritte, die unterschiedlich eingeteilt werden. Eine mögliche Einteilung ist: Sammlung, erste Sortierung, Zerkleinern, Waschen, zweite Sortierung einschließlich Kontrolle und Extrusion in homogene Pellets [116]. • Die Prozessschritte bis zur Extrusion benötigen vor allem elektrische Energie für Antriebe und Pumpen. Der Energiebedarf der Schritte von erster bis zweiter Sortierung hängt auch vom eingesetzten Kunststoff ab. So benötigt bspw. die Verarbeitung von Folien zwischen 400 und 1.100 kWh/t Energie [117]. • Bei der Extrusion wird auch Prozesswärme benötigt, die jedoch überwiegend elektrisch erzeugt wird.	Für das mechanische Kunststoffrecycling sind in der Regel eigene Anlagen bzw. Produktionslinien mit entsprechender eigener Energieinfrastruktur nötig.
Chemisches Kunststoffrecycling (TRL >6)	• Kann das mechanische Recycling bei der Gewinnung von Rohstoffen für die chemische Industrie ergänzen, da das chemische Recycling auch für verunreinigte Kunststoffe geeignet ist [23]. • Unter den derzeitigen Rahmenbedingungen kann auch mit chemischem Recycling die Kunststoffnachfrage nicht zu 100 % über Recyclingkunststoff gedeckt werden, da dessen Anwendung in bestimmten Bereichen (z.B. aus hygienischen Gründen in der Lebensmittelbranche) bisher nicht zugelassen ist. • Ist energie- und emissionsintensiver als das mechanische Recycling [118]. • Kunststoffe werden durch Verölung, Pyrolyse oder Gasifizierung in ihre Bestandteile zerlegt [119]. • Je nach Verfahrensrouten können zwischen 30 und 50 % der Abfallmasse in chemische Rohstoffe umgewandelt werden [118]. Die Zusammensetzung des als Prozessinputs verwendeten Abfalls beeinflusst neben der Produktqualität des Rezyklats auch den Energiebedarf des Recyclingprozesses [119]. • Kann das mechanische Recycling bei der Gewinnung von Rohstoffen für die chemische Industrie ergänzen, ist jedoch energie- und emissionsintensiver [118].	Die Anforderungen an die Energieinfrastruktur sind abhängig davon, welches Verfahren gewählt wird und welcher Energieträger zur ggf. notwendigen Wärmeerzeugung eingesetzt wird.

Tabelle 10-8: Transformationstechnologien der pharmazeutischen Industrie. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Elektrisch beheizte Fermenter (Bioreaktor) (TRL <6)	- Die zur Wirkstoffherstellung in den Fermentern eingesetzten Mikroorganismen benötigen exakt eingestellte Temperaturen. - Um die Temperaturen zu erreichen, werden die Bioreaktoren zunächst aufgeheizt und später ggf. gekühlt. - Besonders relevant ist der Betrieb im pH-Bereich von 5 bis 7 bei 20 bis 50 °C [120]. - Typische Ausführungsgrößen liegen zwischen 5 und 5.000 Liter Reaktorvolumen [121].	Sowohl die Anlagenperipherie am Standort als auch entsprechende Anschlussleistungen für Strom müssen ggf. nachgerüstet werden. Die bisherige Gasanschlussleistung reduziert sich.
Direkt-elektrische Erwärmung (TRL 9)	- Hochfrequenz- und Mikrowellenerwärmung - Anwendungen in der pharmazeutischen Industrie: Pasteurisieren und Sterilisieren /ISI-04 23P, LUH-04 11/ - Der Wirkungsgrad von beispielsweise Mikrowellenanlagen liegt im Bereich von 40 bis 60 %. Durch die lokal begrenzte Erwärmung ist der spezifische Energiebedarf vergleichsweise gering. Zudem sind die Anlagen meist platzeffizient. [56]	Die Strahlungstrocknung kann den Erdgasbedarf reduzieren. Die elektrische Anlagenperipherie und ggf. auch Anschlussleistungen müssen jedoch ertüchtigt werden.
Hoch- & Höchsttemperaturwärmepumpen (TRL 9)	- Mit Hoch- und Höchsttemperaturwärmepumpen (HT-WP) kann z.B. aus Abwärme Prozessdampf für z.B. Trocknungsprozesse erzeugt werden. - Hochtemperatur-Wärmepumpen (HT-WP) können Wärme im Bereich bis ca. 150 °C bereitstellen wobei ab 100 °C überwiegend Schraubenkompressoren zum Einsatz kommen [63]. Am Markt verfügbare HöT-WP besitzen Leistungen von bis zu 100 MW_{th} [62]. - Hochtemperatur-WP eignen sich zur Bereitung von Heißwasser, Höchsttemperatur-WP auch zur Dampferzeugung. - Die Investitionskosten sind abhängig von der Konfiguration und Heizleistung. Für eine Anlage, die bis 125 °C liefern kann, werden bei 0,3 MW_{th} Investitionskosten von 282.000 € (2025) und für eine Anlage mit 1,5 MW_{th} 1.410.000 € (2025) angegeben [59]. Im Allgemeinen sollten jedoch die Gesamtkosten über die Lebensdauer betrachtet werden. - Die Leitungsverlegung kann die Wirtschaftlichkeit ggf. negativ beeinflussen. Abwärmenutzung und Wärmerückgewinnung hingegen positiv. - Elektrisch betriebene Wärmepumpen können auch zur Flexibilisierung der Prozesswärmebereitstellung genutzt werden.	Durch die HT-WP entsteht eine zusätzliche Stromnachfrage. Abhängig von den lokalen Gegebenheiten kann dies zusätzliche Stromanschlussleistungen und ggf. auch einen Ausbau des Netzanschlusses und der Energieinfrastruktur erfordern. Bei einem Temperaturhub von 100 K weisen industrielle Wärmepumpen einen Coefficient of Performance (COP) von etwa 2 auf. Um die benötigte Wärmemenge zur Verfügung zu stellen, würde in diesem Fall nur etwa halb so viel elektrische Energie wie Gas benötigt.
Brennstoffwechsel		
Biomasse (TRL 9)	Die energetische Nutzung von Biomasse ist technisch ausgereift und verfügbar.	Bei Einsatz fester Biomasse reduziert sich die bisherige Gasanschlussleistung.

11 Branchensteckbrief: Gummi & Kunststoffe (WZ 22)

Die Prozesswärmeerzeugung in der **Gummi- und Kunststoffindustrie** ist bereits zu einem hohen Teil elektrifiziert. In der **Gummiindustrie** bietet der Vulkanisierungsprozess noch Möglichkeiten zur Dekarbonisierung, beispielsweise durch Mikrowellen- und UV-Strahlung.

Tabelle 11-1: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]

22 Herstellung von Gummi und Kunststoffwaren

22.1 Herstellung von Gummiwaren

z. B. *Gummireifen für Fahrzeuge, Geräte, fahrbare Anlagen, Flugzeuge, Spielwaren, Möbel, ...*

22.2 Herstellung von Kunststoffwaren

z. B. *Schläuche und Rohre, Form-, Verschluss- und Verbindungsstücke, Beutel, Säcke, Container, Kisten, Ballons, Flaschen, ...*

11.1 Branchenübersicht: Gummi und Kunststoffe

Die als „Gummi und Kunststoffe“ zusammengefassten Industrien enthalten neben der Herstellung und Runderneuerung von Bereifungen sowie sonstigen Gummiwaren auch die Herstellung von Platten, Folien, Schläuchen, Profilen, Verpackungsmitteln, Baubedarfsartikeln und sonstigen Waren aus Kunststoff.

Die **Kunststoffindustrie** deckt dabei sowohl Endprodukte als auch Vorprodukte beispielsweise für die Automobilindustrie und Baubranche ab. Dazu gehören u.a.

- die Herstellung von Halbfertigerzeugnissen wie z.B. Tafeln, Platten, Blöcke, Filme, Folien und Streifen aus Kunststoffen,
- die Herstellung von Fertigerzeugnissen wie z.B. Schläuche und Rohre, Form-, Verschluss- und Verbindungsstücke aus Kunststoffen,
- die Herstellung von Verpackungsmitteln wie z.B. Beutel, Säcke, Container, Kisten, Ballons und Flaschen aus Kunststoffen
- die Herstellung von Baubedarfsartikeln wie z.B. Türen, Fenster, Rahmen, Rollläden, Jalousien und Randleisten aus Kunststoffen, sowie die
- Herstellung von sonstigen Kunststoffwaren.
-

Die **Gummiindustrie** verfügt im Vergleich dazu über eine homogenere Produktpalette. Diese besteht zum einen aus der Herstellung und Runderneuerung von Luft-, Vollgummi- und Hochelastikreifen. Zum anderen umfasst die Industrie sonstige Gummiwaren aus nicht-vulkanisiertem, vulkanisiertem oder gehärtetem natürlichem oder synthetischem Kautschuk, sowie Hygieneartikel, Reparaturmaterial oder Freizeitartikel aus Gummi.

Die Branche in Sachsen

Mit über 8.600 Beschäftigten (Stand Mai 2025, nur Betriebe mit mehr als 50 Mitarbeitern) ist insbesondere die *Herstellung von Kunststoffwaren (WZ 22.2)* in Sachsen relevant [49]. Über 5.000 davon sind im Bereich *Herstellung von sonstigen Kunststoffwaren (WZ 22.29)* tätig. Die Verteilung über die anderen Bereiche ist ähnlich, wobei in der *Herstellung von Verpackungsartikeln (WZ 22.22)* am wenigsten Beschäftigte verzeichnet werden. Mit dem Schwerpunkt auf sonstigen Kunststoffwaren bedient die sächsische Kunststoffindustrie folglich eine breite Produktpalette an Kunststoffprodukten.

In der *Herstellung von Gummiwaren (WZ 22.1)* sind in sächsischen Betrieben mit mehr als 50 Mitarbeitern (Stand Mai 2025) 1.153 Menschen beschäftigt. Mit über 880 ist der Großteil der Beschäftigten hier in der *Herstellung und Runderneuerung von Bereifungen (WZ 22.11)* tätig.

Status quo und Herausforderungen

Die Branche zählt mit einem Endenergieverbrauch von 632 GWh (2022) zu den weniger energieintensiven Fokusbranchen in Sachsen. Da bereits etwa zwei Drittel des Endenergieverbrauchs auf Strom und weitere ca. 10 % auf Fernwärme entfallen, sind auch die energetisch bedingten CO₂-Emissionen vergleichsweise gering. Im Jahr 2022 betrugen diese 33,5 kt CO₂. Abbildung 11-1 zeigt den historisch hohen Stromanteil. Der Einsatz von Fernwärme ist bereits seit längerer Zeit in der Branche etabliert.

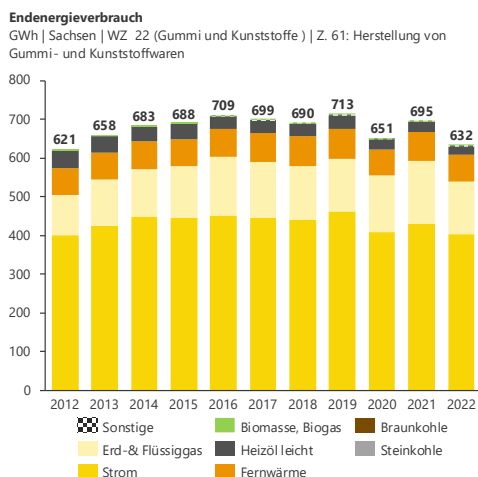


Abbildung 11-1: Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branche „Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren“ nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.

Prozessbedingte Emissionen treten bei der Weiterverarbeitung von Kunststoff- und Gummiwaren nicht mehr auf, sondern nur bei der Herstellung der in der Kunststoffbranche benötigten Grundstoffe. Eine Herausforderung stellen jedoch die CO₂-Emissionen am Lebensende der Gummi- und Kunststoffwaren dar, da hier aufgrund niedriger Recyclingraten die energetische Verwertung der Produkte überwiegt [50].

Die Hersteller von Gummi- und Kunststoffwaren sind nicht zertifizierungspflichtig unter dem EU-ETS I. Tabelle 11-2 gibt einen Überblick der relevanten Kennzahlen der sächsischen Kunststoffbranche (WZ Nr. 22). Der Endenergieverbrauch der Branche ist mit 632 GWh/a schon eher gering, aufgrund des niedrigen Anteils fossiler Energieträger von lediglich 25 % verursacht die Gummi- und Kunststoffindustrie jedoch die geringsten CO₂-Emissionen unter den energieintensiven Industrien in Sachsen. Gleichzeitig befinden sich die Unternehmens- und Beschäftigtenzahlen im branchenübergreifenden Vergleich im Mittelfeld. Der Gesamtumsatz liegt auf einem ähnlichen Niveau wie der der Glasindustrie, der Anteil des Auslandsumsatzes ist mit 29 % jedoch etwa doppelt so hoch.

Tabelle 11-2: Kennzahlen der sächs. Gummi- und Kunststoffbranche (2023) [49], [40], [83]

Endenergieverbrauch (2022)	632 GWh/a
... davon fossiler Anteil	25 %
... davon Strom	64 %
Anzahl Betriebe (≥20 Besch.)	160
... davon Betriebe ≥50 Beschäftigte	81
Anzahl Beschäftigte (Betriebe ≥20 Beschäftigte)	13.037
... davon in Betrieben ≥50 Besch.	10.797
Gesamtumsatz	2.397 Mio. €/a
... davon Auslandsumsatz	29 %
CO₂-Emissionen (2022) (energetisch bedingt, Scope 1)	33 kt CO₂/a

Abbildung 11-2 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) seit 2020. Die Zahl der Betriebe mit mehr als 50 Beschäftigten und die der Beschäftigten selbst blieben in der Gummibranche in diesem Zeitraum konstant. Bei den Herstellern von Kunststoffwaren ist jedoch ein Rückgang zu verzeichnen. Dies gilt besonders für die Anzahl der Beschäftigten seit Mitte 2022. Der Rückgang beträgt bis 2025 etwa 12 %.

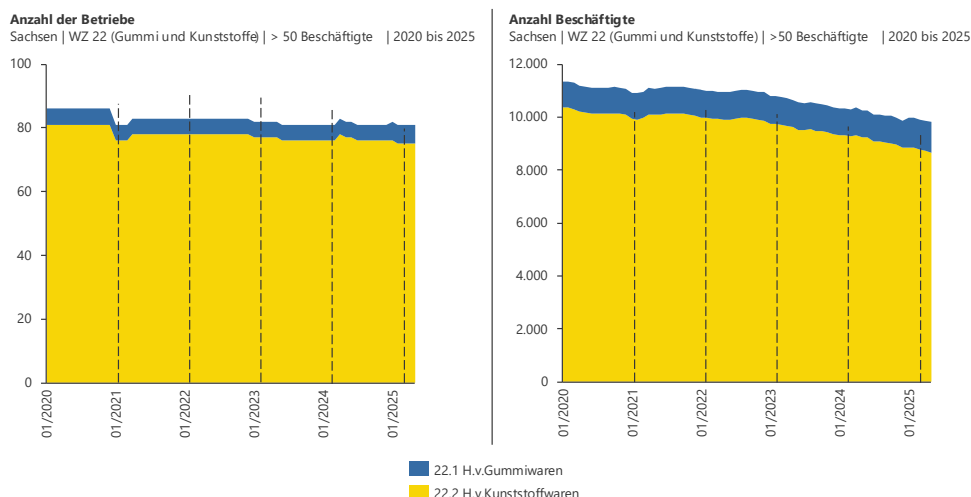


Abbildung 11-2: Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen Gummi- und Kunststoffbranche seit 2020 [49].

11.2 Prozesse im Status quo: Gummi und Kunststoffe

Der hohe Anteil elektrischer Energie wird bei der Herstellung von Kunststoff- und Gummiwaren für elektrische Antriebe benötigt [7]. Mit Erdgas wird sowohl Raum- als auch Prozesswärme bereitgestellt, wobei der Anteil an Prozesswärme im Vergleich zu anderen Industrien geringer ausfällt [50].

In beiden Branchen kommen Formgebungsprozesse mit unterschiedlichen Temperaturniveaus zum Einsatz. Hoch- ($> 500\text{ °C}$), Mittel- ($150\text{ °C} - 500\text{ °C}$) und Niedertemperaturprozesse ($< 150\text{ °C}$) sind dabei bzgl. des Endenergieverbrauchs von jeweils ähnlicher Relevanz [7], [29]. Bei der Herstellung von Kunststoffwaren sind **Spritzgießmaschinen** besonders relevant, weshalb diese auch einen hohen Anteil am Stromverbrauch der Kunststoffindustrie aufweisen. Abbildung 11-3 zeigt die Wertschöpfungskette eines solchen Spritzgießprozesses. Die energieintensiven Prozessschritte sind dabei aufgrund der benötigten Wärme und Kälte sowie mechanischen Energie das Aufschmelzen, die Formgebung, sowie das Kühlen & Entformen [50]. Die Temperaturen des Werkzeugs zum Spritzgießen (Formgebung) liegen dabei höher als die der Plastifiziereinheit (bei Duroplasten beispielsweise bis zu 100 K höher) [122].

Ebenfalls relevant sind **Extrusionsanlagen**. Diese werden bei der Herstellung von Stangen- bzw. Endlosprodukten, wie z.B. Folien oder Kabelummantelungen aus Thermoplasten, eingesetzt. Zunächst wird dabei Kunststoffgranulat oder -pulver in den Extrusionszylinder

gegeben. Dort fördern, je nach Art des Extruders ein oder zwei Schnecken den Kunststoff durch üblicherweise drei Zonen bis zur formgebenden Düse. Nach der Einzugszone wird der Kunststoff zunächst vorgewärmt (Vorwärmzone) und anschließend durch externe und Reibungswärme aufgeschmolzen (Aufschmelz- bzw. Kompressionszone). Dort können bei Temperaturen zwischen 60 und 300 °C Drücke von 10 bis 300 bar entstehen. Nach dem Durchlaufen der Düse wird das heiße Extrudat ausgerichtet und abgekühlt. [123]

Die thermisch initiierte Erzeugung von Bindungsreaktionen ist auch in der Gummiindustrie von Bedeutung. Bei der Herstellung von Gummiwaren sind hierbei der **Vulkanisierungsprozess** und dessen Erdgasverbrauch besonders relevant [50], [124]. Bei der Vulkanisation werden die Polymerketten miteinander vernetzt. Dies ist mithilfe von Schwefel (Bildung von Schwefelbrücken), welches noch immer das am weitesten verbreitete Verfahren darstellt, aber u.a. auch Peroxiden oder Bestrahlung (Erzeugung radikalischer Stellen) möglich. Unabhängig vom Verfahren wird Prozesswärme, meist im Bereich von 100 bis 200 °C , benötigt. Diese hat einen wesentlichen Anteil am Erdgasverbrauch der Gummiindustrie [50] [124]. Aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Kautschuk muss die erforderliche Temperatur bei Formteilen oft über einen längeren Zeitraum gehalten werden. Dazu werden je nach Produkt beheizte Kompressionsformen, Spritzgussformen oder in selteneren Fällen auch Heißluftöfen und Mikrowellenstrahlung verwendet. [188] [189]

Die Reifenherstellung ist Teil der Gummiindustrie und der wichtigste Abnehmer für Industrieruß. Dieser

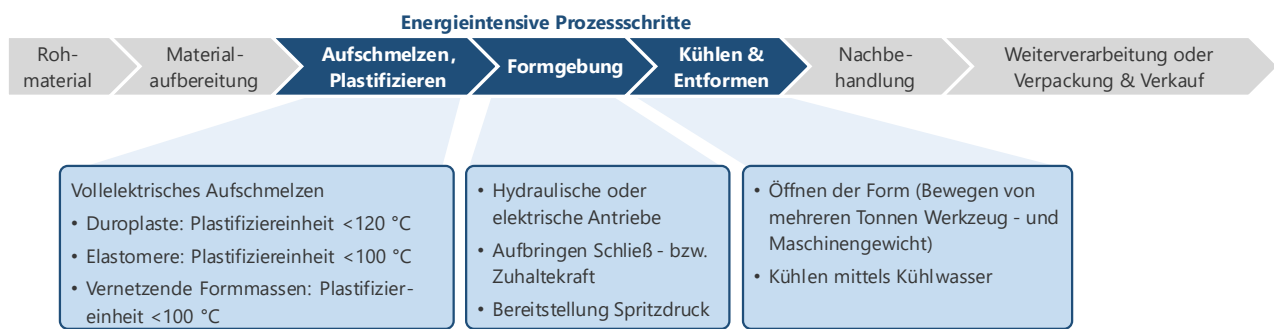


Abbildung 11-3: Energieintensive Prozessschritte beim Spritzgießen in der Kunststoffindustrie nach [122].

stammt aus unvollständigen Verbrennungsprozessen von fossilen Reststoffen und ist daher energieintensiv [50], [25]. Die Reifenherstellung kann in drei Schritte eingeteilt werden: das Mischen der Gummibestandteile sowie die Produktion der Gummipplatten, die Herstellung der weiteren Reifenbestandteile (u.a. Gürtel und Karkasse) und Vulkanisieren des Grünlings [124]. Beispielhafte Prozessparameter für die Vulkanisierung von Autoreifen sind 190 °C, 14,5 bar Druck und 10 Minuten Haltezeit [124]. Dies führt zu einem thermischen Energiebedarf von ca. 13 kWh_{th} pro Reifen [124].

Enthält die Abluft eines Kunststoffherstellungsprozesses (z.B. durch Bedrucken) oder der Vulkanisation Schadstoffe oder Rückstände solcher, erfordert die Abluftreinigung i.d.R. eine **Nachverbrennung** zur Umsetzung der Schadstoffe. Dafür sind Temperaturen im Bereich von 750 °C üblich [113]. Sofern die Lösemittelkonzentration nicht ausreichend hoch für einen autothermen Betrieb ist, ist eine Stützfeuerung nötig. Für diese kommt meist Erdgas zum Einsatz.

11.3 Transformationstechnologien: Gummi und Kunststoffe

Die **Kunststoffindustrie** setzt bereits viele Maßnahmen zur Energieeffizienz und damit zur indirekten Emissionsminderung ein. Dazu gehören bspw.:

- Umstellung auf freie Kühlung,
- Umstellung auf Kühlmittel mit reduzierter Treibhauswirkung [50],
- Einsatz von vollelektrischen Spritzgussmaschinen mit High-Torque-Direktantrieb [122],
- Optimierung der Prozessparameter von Spritzgießmaschinen,
- Regenerative statt thermischer Nachverbrennung bei der Abluftreinigung,
- Verschiedene Maßnahmen im Bereich der Druckluftversorgung, z.B. effiziente Erzeugung, geringes Druckniveau und regelmäßige Leckageidentifikation und -behebung, sowie

- Abwärmenutzung zur Granulat- oder Werkzeuvortemperierung und Hallenheizung [122]

Für eine (nahezu) vollständige Vermeidung der CO₂-Emissionen in Scope 1 sind derzeit zwei Möglichkeiten absehbar:

- Substitution des verbleibenden Bedarfs fossiler Energieträger zu Strom (Elektrifizierung), oder
- Energieträgerwechsel zu emissionsfreien Brennstoffen (Brennstoffwechsel)

Tabelle 11-3, Tabelle 11-4 und Tabelle 11-5 listet die einzelnen Maßnahmen auf. Bei den Elektrifizierungsmaßnahmen ist die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung für das Unternehmen, sofern der bestehende Stromanschluss über die erforderliche Kapazitätsreserve verfügt, über eine Anpassung des bestehenden Vertrages möglich. Ist die zusätzlich erforderliche Anschlussleistung mit dem bestehenden Stromanschluss nicht darstellbar, muss mit dem zuständigen VNB abgestimmt werden, wie die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung ermöglicht werden kann. In der Regel gehen damit Bauleistungen zur Erächtigung bzw. Erweiterung der elektrischen Betriebsmittel (z.B. neuer Transformator, neue Mittelspannungseinspeisung) einher. Dabei müssen u.a. mögliche technische Lösungen, der finanzielle Aufwand (ggf. mit Baukostenzuschuss), der Zeithorizont und ggfs. nötiger zusätzlicher Platzbedarf berücksichtigt werden.

In der Gummiindustrie sind die Dekarbonisierungsmaßnahmen ebenfalls in diese beiden Kategorien einteilbar (siehe Tabelle 11-4 und Tabelle 11-5). Branchenspezifische Effizienzmaßnahmen und -technologien sind im Vergleich zur Kunststoffindustrie jedoch weniger erforscht und publiziert [50].

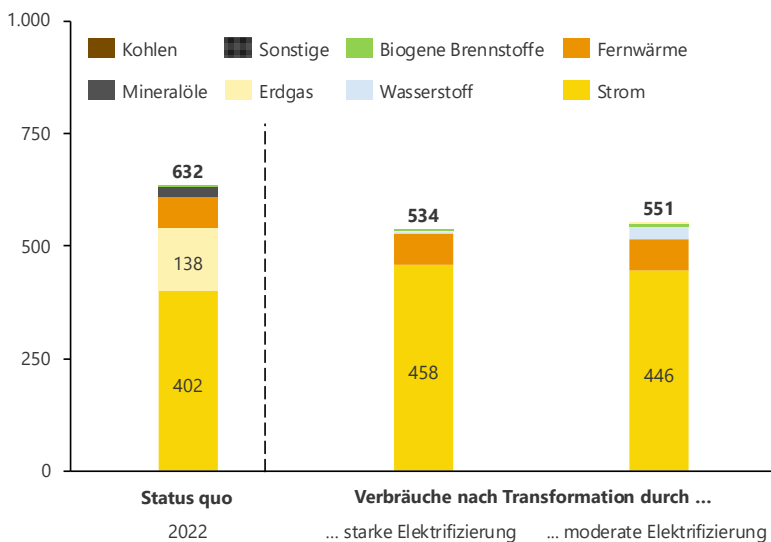
In beiden Branchen stehen die Herausforderungen zur Reduktion der CO₂-Emissionen am Lebensende ihrer Waren im Vordergrund. Die Reduktion der energetisch bedingten Emissionen erfährt im Vergleich dazu deutlich weniger Aufmerksamkeit.

11.4 Transformationspfade: Gummi und Kunststoffe

In der sächsischen Gummi- und Kunststoffbranche weist Strom mit 64 % (Stand 2022) bereits einen hohen Anteil am Endenergieverbrauch auf. Zudem ist der Temperaturbereich unter 100 °C von besonderer Bedeutung für die Branche, während Temperaturen über 500 °C nicht benötigt werden [8]. Aus diesem Grund wird unter den gewählten Parametern, wie in Abbildung 11-4 Abbildung 7-5 zu sehen, der derzeit noch durch fossile Energieträger abgedeckte Energiebedarf bei moderater und starker Elektrifizierung maßgeblich durch Strom ersetzt. Aufgrund des absolut gesehen nicht allzu hohen fossilen Endenergiebedarfs steigt die Anschlussleistung stromseitig jedoch nur um 10 bzw. 15 %. Der Endenergieverbrauch sinkt insgesamt infolge der Elektrifizierungsmaßnahmen.

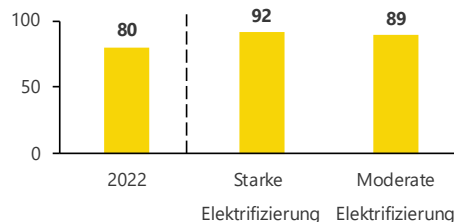
Endenergieverbrauch

in GWh | Sachsen | Gummi & Kunststoffe



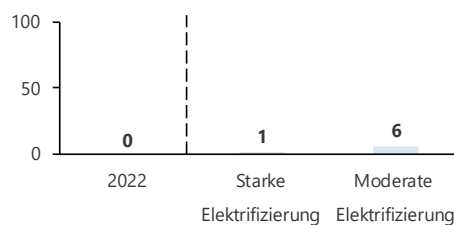
Anschlussleistung Strom

in MW | Sachsen | Gummi & Kunststoffe



Anschlussleistung Wasserstoff

in MW | Sachsen | Gummi & Kunststoffe



Was wäre, wenn die sächsische Gummi - & Kunststoffindustrie dekarbonisiert? Eine Abschätzung anhand verschiedener Elektrifizierungsintensitäten

Effizienzgewinne und Produktionsanpassungen werden nicht berücksichtigt. Die Abschätzung der Anschlussleistungen erfolgt über eine Einschätzung branchenspezifischer Volllaststunden und ist als Richtwert zu verstehen.

Abbildung 11-4: Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen Gummi- und Kunststoffindustrie.

Tabelle 11-3: Transformationstechnologien der Kunststoffindustrie. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Elektrisches Aufschmelzen (TRL 9)	- Elektrische Beheizung (Widerstandsbeheizung, induktive Beheizung) von Kunststoffextrudern ist marktreif verfügbar. - Im Gegensatz zur Widerstandsbeheizung, hat die Induktive Beheizung einen hohen Wirkungsgrad und vergleichsweise wenig Wärmeverluste [125].	Erhöhung der notwendigen Stromanschlussleistungen bei gleichzeitiger Reduzierung der Gasanschlusskapazität.
Prozesswärme durch Strahlung (TRL 9)	- Hochfrequenz- und Mikrowellenerwärmung - Der Wirkungsgrad von beispielsweise Mikrowellenanlagen liegt im Bereich von 40 bis 60 %. Durch die lokal begrenzte Erwärmung ist der spezifische Energiebedarf vergleichsweise gering. Zudem sind die Anlagen meist platzeffizient. [56] - Strahlung kann in der Kunststoffindustrie auch zum Erwärmen von Thermoplasten für Umformprozesse oder Schrumpfen, dem Tempern zum Spannungsabbau in Duroplasten oder dem thermischen Aufbringen von z.B. Folien genutzt werden [126].	Die Strahlungserwärmung kann den Erdgasbedarf reduzieren. Die elektrische Anlagenperipherie und ggf. auch Anschlussleistungen müssen jedoch ertüchtigt werden.

Tabelle 11-4: Transformationstechnologien der Gummiindustrie: Elektrifizierung. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Vulkanisierung per Infrarotstrahlung (TRL 9)	- Vulkanisieren überführt Kautschuk durch Temperatur und Zeit vom plastischen in den elastischen Zustand. Die Vulkanisierung findet im Allgemeinen zwischen 100 und 200 °C statt. - Bei der Infrarotstrahlung wird der Kautschuk kontaktlos durch elektrische Energie erwärmt. Dünnwandige Elemente eignen sich dafür besser als dickwandige. - Bei der Aushärtung durch Strahlung sind die hohen Leistungsdichten und die Regelbarkeit von Vorteil, weshalb diese eine schnelle und gleichmäßige Erwärmung ermöglichen und auch in Hochgeschwindigkeitsextrusionsanlagen eingesetzt werden [189], [190]	Abhängig von der Anschlussleistung des Infrarot-Systems kann eine Ertüchtigung der elektrischen Infrastruktur am Standort und des vorgelagerten Stromnetzes nötig
Mikrowellen-, UV-Strahlung (TRL 9)	- Anwendungen in der Gummiindustrie: Mikrowellen-Durchlauferwärmung zur Vulkanisation [56], [26]. - Der Wirkungsgrad von beispielsweise Mikrowellenanlagen liegt im Bereich von 40 bis 60 %. Durch die lokal begrenzte Erwärmung ist der spezifische Energiebedarf vergleichsweise gering. Zudem sind die Anlagen meist platzeffizient. [56]	Die Strahlungstrocknung kann den Erdgasbedarf reduzieren. Die elektrische Anlagenperipherie und ggf. auch Anschlussleistungen müssen jedoch ertüchtigt werden.
Elektrodendampfkessel (TRL 9)	- Elektrifizierung der z.B. über erdgasbetriebene Großraumwasserkessel stattfindenden Dampfversorgung - Um den benötigten Dampfbedarf flexibel zu decken, können mehrere dezentrale Elektrodendampfkessel parallelgeschaltet werden. Große zentrale Elektrodendampfkessel (bis zu 60 MW) sind ebenfalls verfügbar [56]. - Elektrodendampfkessel verfügen über Wirkungsgrade von bis zu 99,9 % [124]. Der typische Wirkungsgrad liegt bei ca. 99 % [56]. - Die Investitionskosten liegen bei ca. 60 €₂₀₁₅ pro kW_{th} [124].	Durch die Elektrodendampfkessel können zusätzliche Stromanschlüsse nötig werden. Sind diese nicht über den bisherigen Netzanschluss darstellbar, ist ein Ausbau der Energieinfrastruktur erforderlich. Die benötigten Gasanschlussleistungen können sinken.
Hybride Dampfkessel (TRL 9)	- Hybride Dampfkessel können in einem gewissen Korridor zwischen der Verbrennung gasförmiger Energieträger (Erdgas, Biogas, [perspektivisch] Wasserstoff) und elektrischem Wärmeeintrag durch Elektroden variieren. - Die Investitionskosten liegen bei ca. 170 €₂₀₁₈ pro kW_{th}. Die Lebensdauer beträgt zwischen 12 und 30 Jahre, die Effizienz bis zu 99 % [124].	Hybride Dampfkessel erfordern weiterhin eine entsprechende Gasinfrastruktur – für Methan bzw. perspektivisch Wasserstoff, so wie einen Ausbau der Netzanschlusskapazitäten, um die erhöhten elektrischen Energiebedarfe abdecken zu können.
Induktion (TRL 9)	- Ein Magnetfeld induziert in einem leitfähigen Werkstück eine Spannung, die zu einem Wirbelstrom und infolge des elektrischen Widerstands auch zu einer Erwärmung führt [56]. - Die induktive Erwärmung ist allgemein platz- und material-effizient, jedoch auch wenig flexibel, da die Anlagen im Allgemeinen speziell auf eine zu erwärmende Geometrie abgestimmt sind [56].	Der Strombedarf ist abhängig von der Anlagen- und Werkstückgröße. Gegebenenfalls können daher zusätzliche Stromanschlüsse benötigt werden.

Tabelle 11-5: Transformationstechnologien der Gummiindustrie: Brennstoffwechsel. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Brennstoffwechsel		
Biomasse (TRL 9)	- Die energetische Nutzung von Biomasse ist technisch ausgereift und verfügbar und stellt einen möglichen Ersatz für fossil befeuerte Dampfkessel dar. - Im Bereich der industriellen Autoreifenproduktion werden thermische Leistungen im ein- bis niedrigen zweistelligen MW-Bereich benötigt. Ein beispielhafter Biomassekessel, der 9 MW_{th} bei einem Wirkungsgrad von 90 % abgibt, erfordert Investitionskosten von ca. 5,3 Mio.€ (2019). [124]	Bei Einsatz fester Biomasse reduziert sich die bisherige Gasanschlussleistung.
Wasserstoff (zur Dampferzeugung) (TRL 9)	- Umrüstung der Dampfkessel auf Wasserstoff oder wasserstoffhaltige Brennstoffgemische. - Ersatz fossil befeuerter Dampfkessel. - Die vollständige Umstellung auf Wasserstoff erfordert eigene Brenner und eine werksinterne Wasserstoffinfrastruktur. - Die Investitionskosten für Wasserstoffdampfkessel liegen bei ca. 120 - 160 € (2019) pro kW_{th}. Die Lebensdauer beträgt ca. 25 Jahre, die Effizienz ca. 90 % [124].	Die bisherigen Gasanschlussleistungen bleiben erhalten und müssen in Absprache und zeitlicher Übereinstimmung auf Wasserstoff umgestellt werden. Dies kann zusätzliche Investitionen erfordern und es müssen bspw. Filter und Zähler getauscht werden.

12 Branchensteckbrief: Metallverarbeitung (WZ 25)

Der **Metallverarbeitung** steht durch die elektrische Leitfähigkeit ihrer Produkte die Induktion als zentrale Transformationstechnologie zur Verfügung. Speziell bei der Oberflächenveredelung haben jedoch die Prozesscharakteristika und Bauteilgröße wesentlichen Einfluss und können die Transformationsmöglichkeiten einschränken.

Tabelle 12-1: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]

25 Herstellung von Metallerzeugnissen

- 25.1 Stahl- und Leichtmetallbau
Herstellung von Metallkonstruktionen und Ausbauelementen aus Metall
- 25.2 Herstellung von Metalltanks und -behältern; Herstellung von Heizkörpern und -kesseln für Zentralheizungen
Herstellung von Heizkörpern und -kesseln für Zentralheizungen, sowie Sammelbehältern, Tanks u. ä. Behältern aus Metall
- 25.3 Herstellung von Dampfkesseln (ohne Zentralheizungskessel)
- 25.4 Herstellung von Waffen und Munition
- 25.5 Herstellung von Schmiede-, Press-, Zieh- und Stanzteilen, gewalzten Ringen und pulvermetallurgischen Erzeugnissen
z. B. Freiformschmiedestücke, Gesenkschmiedeteile, Kaltfließpressteilen und Press-, Zieh- und Stanzteilen
- 25.6 Oberflächenveredelung und Wärmebehandlung; Mechanik a. n. g.
- 25.7 Herstellung von Schneidwaren, Werkzeugen, Schlössern und Beschlägen aus unedlen Metallen
z. B. Schneidware, Bestecke, Schlösser und Beschläge aus unedlen Metallen, sowie Werkzeuge, Handwerkezeuge und Sägen
- 25.9 Herstellung von sonstigen Metallwaren
z. B. Fässer, Trommeln, Dosen, Eimer u. ä. Behälter aus Metall, sowie Verpackungen und Verschlüsse aus Eisen, Stahl und NE-Metall

12.1 Branchenübersicht: Metallverarbeitung

Die als „Metallverarbeitung“ zusammengefassten Industrien bieten eine breite Produktpalette, sowohl an Endprodukten aber insbesondere auch an Vorprodukten (beispielsweise für die Automobilindustrie oder den Maschinenbau). Dazu gehören u.a.

- der Stahl- und Leichtmetallbau von z.B. Metallkonstruktionen und Ausbauelementen,
- die Herstellung von Metalltanks und -behältern, Heizkörpern und -kesseln, Sammelbehältern und Tanks,
- die Herstellung von Dampfkesseln (ohne Zentralheizungskessel)

- die Herstellung von Waffen und Munition,
- die Herstellung von Schmiede-, Press-, Zieh- und Stanzteilen, gewalzten Ringen und pulvermetallurgischen Erzeugnissen, wie z.B. Freiformschmiedestücke, Gesenkschmiedeteile und Kaltfließpressteilen
- die Oberflächenveredelung und Wärmebehandlung,
- die Herstellung von Schneidwaren, Werkzeugen, Schlössern und Beschlägen aus unedlen Metallen, wie z.B. Bestecke, Schlösser und Beschläge, Werkzeuge und Handwerkezeuge, sowie
- die Herstellung von sonstigen Metallwaren, wie z.B. Verschlüsse, Dosen, Eimer u. ä. Behälter aus Metall

Im Gegensatz zum Maschinenbau steht bei der Metallverarbeitung die Herstellung von Komponenten und

Geräten ohne eigenen Antrieb oder direkten Energieverbrauch im Vordergrund.

Die *Metallerzeugung und -bearbeitung* (WZ 24) wird im Rahmen dieses Steckbriefs nicht betrachtet. Deren Transformation ist bereits eingehend betrachtet worden.

Die Branche in Sachsen

Mit über 7.000 Beschäftigten (Stand März 2025, nur Betriebe mit mehr als 50 Mitarbeitern) weist der *Stahl- und Leichtmetallbau* (WZ 25.1) in Sachsen den höchsten Anteil der Unterklassen des WZ 25 auf. Darauf folgt die *Oberflächenveredlung und Wärmebehandlung; Mechanik a. n. g.* (WZ 25.6) mit über 6.100 Beschäftigten. Zusammen sind in den beiden Unterklassen ca. die Hälfte der Beschäftigten der sächsischen Metallverarbeiter (nur Betriebe mit mehr als 50 Mitarbeitern) tätig. Die andere Hälfte verteilt sich auf die Unterklassen WZ 25.5, WZ 25.7 und WZ 25.9. Hier sind jeweils zwischen 3.400 und 4.350 Beschäftigte tätig. Für WZ 25.2 und WZ 25.3 werden aus Geheimhaltungsgründen keine separaten Beschäftigtenzahlen veröffentlicht. In beiden Unterklassen zusammen sind Stand März 2025 etwas mehr als 900 Personen beschäftigt. Die *Herstellung von Waffen und Munition* (WZ 25.4) spielt in Sachsen keine Rolle.

Status quo und Herausforderungen

Die Metallverarbeitung ist mit einem Endenergieverbrauch von 1.226 GWh (2022) eine der energieintensivsten Fokusbranchen in Sachsen. Strom und Erdgas (inkl. Flüssiggas) sind dabei mit 51 % (Strom) und 42 % (Erd- und Flüssiggas) die beiden maßgeblichen Energieträger. Die Anteile anderer Energieträger, wie z.B. Heizöl oder Fernwärme, haben sich von 2012 bis 2022 kaum verändert, wie Abbildung 12-1 zeigt. Insgesamt ist der Endenergieverbrauch der sächsischen metallverarbeitenden Industrie von 2014 bis 2018 kontinuierlich leicht gestiegen. Seit 2018 ist der Endenergieverbrauch (auch infolge der Corona Pandemie 2020) jedoch rückläufig und liegt 2022 7 % unter dem Niveau von 2014.

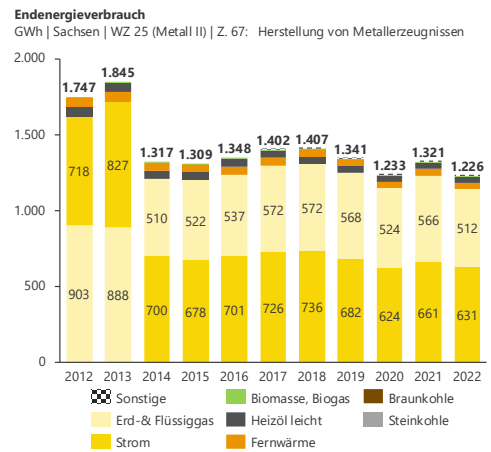


Abbildung 12-1: Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branche „Herstellung von Metallerzeugnissen“ nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.

Die aus fossilen Energieträgern resultierenden energetischen CO₂-Emissionen in Scope 1 betrugen im Jahr 2022 113 kt CO₂ und resultieren überwiegend aus der Erdgasnutzung. Prozessbedingte Emissionen treten in der Metallverarbeitung nicht auf. Die Hersteller von Metallerzeugnissen sind nicht zertifizierungspflichtig unter dem EU-ETS I. Tabelle 12-2 gibt einen Überblick der relevanten Kennzahlen der sächsischen Metallverarbeiter (WZ Nr. 25). Diese beschäftigen nach dem Maschinenbau die meisten Personen in den betrachteten sächsischen Industriezweigen. Anders als im Maschinenbau verteilen sich die Beschäftigten aber auf mehr Unternehmen (die metallverarbeitende Industrie weist absolut die höchste Zahl an Unternehmen in der sächsischen Industrie auf), wobei der Anteil an Unternehmen mit weniger als 50 Beschäftigten jedoch höher ist. Dies verdeutlicht die mittelständische Prägung dieses Wirtschaftszweigs in Sachsen. Auch der Anteil des Auslandsumsatzes ist im Vergleich zum Maschinenbau deutlich geringer und befindet sich auf einem ähnlichen Level wie in der Glas- und Ernährungsbranche.

Tabelle 12-2: Kennzahlen der sächs. Metallverarbeiter (2023)
[49], [40], [83]

Endenergieverbrauch (2022)	1.226 GWh/a
... davon fossiler Anteil	45 %
... davon Strom	51 %
Anzahl Betriebe (≥20 Besch.)	572
... davon Betriebe ≥50 Beschäftigte	234
Anzahl Beschäftigte (Betriebe ≥20 Beschäftigte)	37.602
... davon in Betrieben ≥50 Besch.	27.690
Gesamtumsatz	6.584 Mio. €/a
... davon Auslandsumsatz	18 %
CO₂-Emissionen (2022)	113 kt CO₂/a
(energetisch bedingt, Scope 1)	

Abbildung 12-2 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) seit 2020. Beide Zahlen sind im betrachteten Zeitraum rückläufig. Bei den Betrieben ist dies primär auf die Unterklassen *Stahlbau und Leichtmetallbau* (WZ 25.1) und *Oberflächenveredlung und Wärmebehandlung; Mechanik a. n. g.* (WZ 25.6) zurückzuführen. Hier ist ein Rückgang um 17 % (WZ 25.1) bzw. 24 % (WZ 25.6) zu verzeichnen. Bei der Zahl der Beschäftigten fällt dieser in der *Oberflächenveredlung und Wärmebehandlung; Mechanik a. n. g.* (WZ 25.6) mit 30 % sogar noch größer aus. Der Rückgang hier ist auch hauptverantwortlich für die Abnahme der Gesamtzahl an Beschäftigten im WZ 25. Im WZ 25.1 steht im betrachteten Zeitraum ein Minus von 7 %, wodurch

dieser Unterklassen nun die meisten Beschäftigten der metallverarbeitenden Industrie zugeordnet werden.

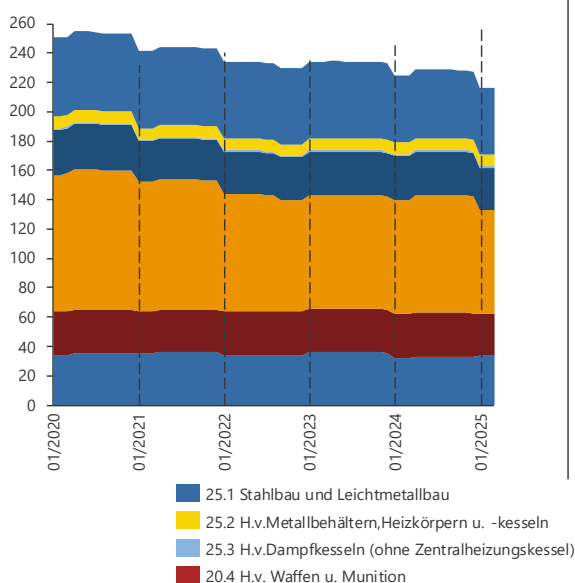
Die Beschäftigtenentwicklung für die Unterklassen *Herstellung von Metalltanks und -behältern; Herstellung von Heizkörpern und -kesseln für Zentralheizungen* (WZ 25.2) und *Herstellung von Dampfkesseln (ohne Zentralheizungskessel)* (WZ 25.3) kann aus statistischen Geheimhaltungsgründen nur gemeinsam erfasst werden. Die Zahl ist mit ca. 900 im Betrachtungszeitraum jedoch annähernd konstant geblieben.

12.2 Prozesse im Status quo: Metallverarbeitung

In der metallverarbeitenden Industrie spielen verschiedene Prozesse eine wichtige Rolle. Besonders relevant dabei sind die mechanische Bearbeitung (von z.B. Stahl- und Aluminiumteilen), sowie die Oberflächen- und Wärmebehandlung.

Klassische **mechanische Bearbeitungsprozesse** lassen sich in spanende (z.B. Bohren oder Drehen) und spanlose Verfahren (z.B. Massivumformung oder Biegen) einteilen. Beim Bohren wird i.d.R. ein rotierender Bohrer in ein fixiertes Bohrstück eingeführt. Das Rund-, Schraub-, Profil- und Formbohren stellen verschiedene Verfahrensausprägungen dar. Beim Drehen wird das Rohmaterial abgetragen, indem ein sich drehendes rotationssymmetrisches Werkstück durch eine geometrisch bestimmte Schneide bearbeitet wird. Damit können beispielsweise Flansche, Achsen oder Wellen

Anzahl der Betriebe
Sachsen | WZ 25 (Metallerzeugnisse) | > 50 Beschäftigte | 2020 bis 2025



Anzahl Beschäftigte
Sachsen | WZ 25 (Metallerzeugnisse) | > 50 Beschäftigte | 2018 bis 2025

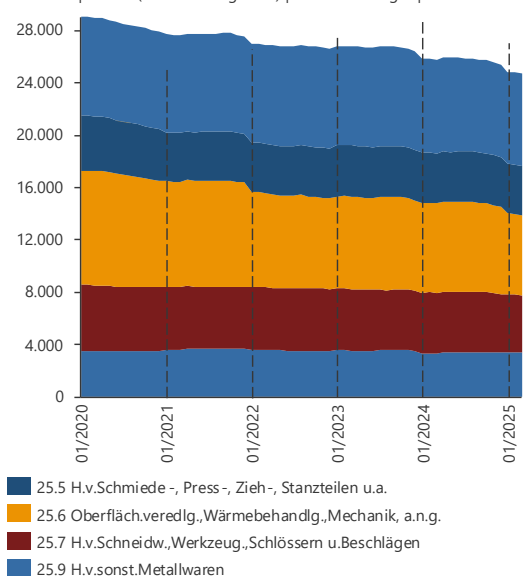


Abbildung 12-2: Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen metallverarbeitenden Industrie seit 2020 [49].

gefertigt werden. Auch hier gibt es verschiedene Unterformen, wie beispielsweise das Plan- oder Runddrehen. Für die spanenden Fertigungsverfahren wird v.a. mechanische Energie, die i.d.R. über Elektromotore bereitgestellt wird, benötigt. Prozesswärme spielt eine untergeordnete Rolle. Stattdessen werden oftmals Kühlschmierstoffe benötigt, um die Abwärme von Werkstück und Werkzeug während der Bearbeitung abzuführen. [191] [192]

Bei Umformprozessen spielt neben der mechanischen Energie für Vorschub und Werkzeugbewegung auch Prozesswärme eine Rolle [127]. So gliedert sich die Massivumformung abhängig von der Temperatur des Halbzeugs zu Prozessbeginn in das Kaltumformen (Raumtemperatur), die Lauwarmumformung (Temperaturbereich unterhalb der Blausprödigkeit, die bei gehärteten Stählen im Bereich von 200 – 350 °C liegt [128]), die Halbwarmumformung (750 – 950 °C) und die Warmumformung (950 – 1200 °C) [127]. Verfahren, die der Massivformung zugeordnet werden, sind das Gesenk- und Freiformschmieden oder das Ringwalzen. In diesen Verfahren, die Kaltumformung ausgenommen, werden die Halbzeuge durch Induktion oder konduktiv auf bis zu 1.300 °C erwärmt, bevor sie anschließend in teils mehreren Schritten umgeformt werden [56].

Im Bereich der **Oberflächenbehandlung** bzw. des Beschichtens geht es darum, die Eigenschaften eines Grundmaterials zu verbessern, neue Eigenschaften hinzuzufügen oder die Oberfläche zu schützen [27].

Von besonderer Bedeutung im Bereich der Oberflächenbehandlung ist die Härtereitechnik. Diese lässt sich in thermische (Glühen, Anlassen, Härten), thermochemische (Einsatzhärten, Nitrieren) und

thermomechanische Verfahren einteilen. Im Folgenden werden das Einsatzhärten und Vergüten exemplarisch beschrieben. Ziel des Einsatzhärtens ist es, die Bauteiloberfläche mit Kohlenstoff (und im Sonderfall des Carbonitrierens auch mit Stickstoff) anzureichern und anschließend zu härten. In Abbildung 12-3 ist die Prozesskette des Einsatzhärtens mit abgebildet. Die Schritte Vorwaschen, Vorwärmen und Nachwaschen sind dabei optional. Das häufig durch Wärmerückgewinnung ermöglichte Vorwärmen kann jedoch dazu beitragen, die Wirtschaftlichkeit des Prozesses zu verbessern. Das Aufkohlen findet i.d.R. als Gasaufkohlen unter einer Schutzgasatmosphäre oder im Vakuum mit Zugabe von Kohlenwasserstoffen bei 820 – 1.050 °C statt. Öfen für kleine Bauteile sind dabei häufig bereits elektrisch beheizt, Öfen für große Bauteile hingegen nicht. Für das anschließende Abschrecken werden überwiegend flüssige Medien (z.B. Härteöle oder Wasser) eingesetzt, wobei bei hohen Qualitätsanforderungen auch Härtepressen zum Einsatz kommen. Das Vergüten (ebenfalls in Abbildung 12-3 enthalten) bezeichnet das kombinierte Verfahren von Härten und Anlassen. Um das Rissbildungsrisiko zu senken, ist die Temperatur beim Anlassen mit 300 – 500 °C höher als beim Einsatzhärten (180 – 250 °C). Die Prozessparameter sind auch der wesentliche Unterschied zum Einsatzhärten, da der Ablauf ansonsten sehr ähnlich ist. Die im Prozessschritt „Austenitisieren“ benötigten Temperaturen werden durch die für Vergütungsstähle gültigen Normen vorgegeben. [56]

Ein weiterer bedeutender Prozess im Bereich der Oberflächenbehandlung ist das Galvanisieren. Dabei werden mithilfe eines wässrigen Elektrolyten und einer äußeren Stromquelle metallische Überzüge auf Bauteilen erzeugt. Besonders häufig werden Zink oder Zink-Legierungen durch Galvanisieren aufgebracht, um den

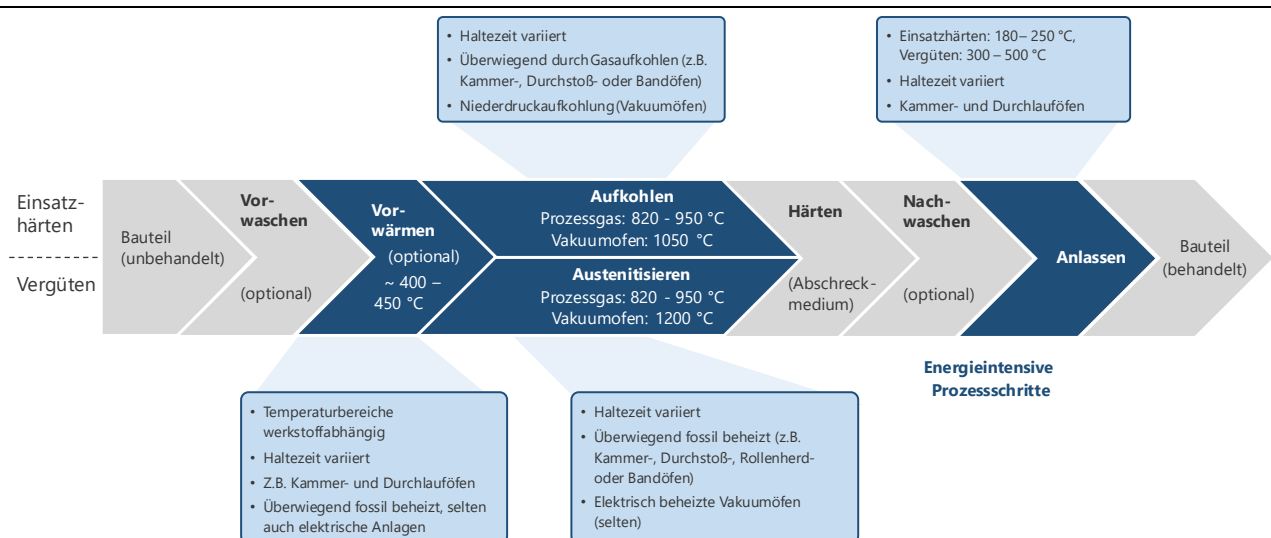


Abbildung 12-3: Energieintensive Prozessschritte beim Einsatzhärten und Vergüten. Die angegebenen Temperaturen stellen exemplarische Werte dar [56].

Korrosions- und Verschleißschutz sowie die Temperaturbeständigkeit von Bauteilen zu verbessern. Dazu werden die vorbehandelten Bauteile in eine flüssige Zinkschmelze (ca. 450 °C) eingetaucht. [129]

Die Oberflächenbehandlung schließt aber auch beispielsweise das Pulverbeschichten mit ein. Wird zum Einbrennen der Beschichtung Wärme im Temperaturbereich von ca. 180 bis 200 °C benötigt.

Enthält die Abluft eines Oberflächenbehandlungsprozesses Schadstoffe oder Rückstände solcher, erfordert die Abluftreinigung i.d.R. eine **Nachverbrennung** zur Umsetzung der Schadstoffe. Dafür sind Temperaturen im Bereich ab 750 °C üblich [113]. Sofern die Lösemittelkonzentration nicht ausreichend hoch für einen autothermen Betrieb ist, ist eine Stützfeuerung nötig. Für diese kommt meist Erdgas zum Einsatz.

12.3 Transformationstechnologien: Metallverarbeitung

Die **Metallverarbeiter** setzen bereits verschiedene Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung und damit zur indirekten Emissionsminderung ein. Dazu gehören bspw. [130]:

- Abwärmenutzung (Kühlung, Druckluft, Prozesse),
- regenerative statt thermischer Nachverbrennung,
- Anpassung von Temperaturniveaus im Kühlprozess an den Bedarf,
- Optimierung der Prozessparameter von Anlagen und Hilfsaggregaten,
- bedarfsorientierter Betrieb von Lüftungs- und Absauganlagen, sowie
- verschiedene Maßnahmen im Bereich der Druckluftversorgung, z.B. effiziente Erzeugung, geringes Druckniveau und regelmäßige Leckageidentifikation und -behebung.

Für eine (nahezu) vollständige Vermeidung der CO₂-Emissionen in Scope 1 sind derzeit zwei Möglichkeiten absehbar:

- Substitution des verbleibenden Bedarfs fossiler Energieträger zu Strom (Elektrifizierung), oder
- Energieträgerwechsel zu emissionsfreien Brennstoffen (Brennstoffwechsel)

Tabelle 12-3 und Tabelle 12-4 listen die einzelnen Maßnahmen auf. Bei den Elektrifizierungsmaßnahmen ist die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung für das Unternehmen, sofern der bestehende Stromanschluss über die erforderliche Kapazitätsreserve verfügt über eine Anpassung des bestehenden Vertrages

möglich. Ist die zusätzlich erforderliche Anschlussleistung mit dem bestehenden Stromanschluss nicht darstellbar, muss mit dem zuständigen VNB abgestimmt werden, wie die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung ermöglicht werden kann. In der Regel gehen damit Bauleistungen zur Ertüchtigung bzw. Erweiterung der elektrischen Betriebsmittel (z.B. neuer Transformator, neue Mittelspannung- Einspeisung) einher. Dabei müssen u.a. mögliche technische Lösungen, der finanzielle Aufwand (ggf. mit Baukostenzuschuss), der Zeithorizont und ggfs. nötiger zusätzlicher Platzbedarf berücksichtigt werden.

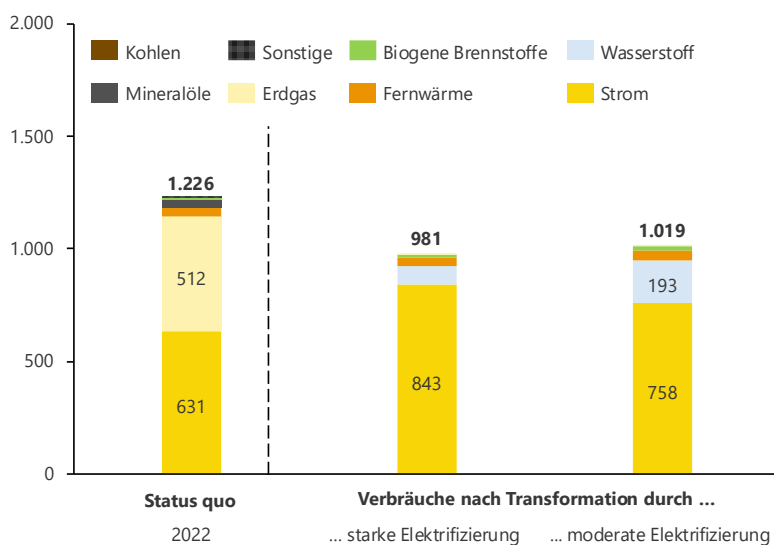
Die geringe Auftragslage der metallverarbeitenden Industrie schränkt die Branche derzeit jedoch bei der Umsetzung von Transformationsmaßnahmen ein.

12.4 Transformationspfade: Metallverarbeitung

Bei den sächsischen Metallverarbeitern haben fossile Energieträger einen Anteil von 45 % am Endenergieverbrauch (Stand 2022). Die Prozesse zur Oberflächenbehandlung führen zudem dazu, dass fast die Hälfte des Prozesswärmebedarfs auf Temperaturen über 500 °C entfällt [9]. Infolge der elektrischen Leitfähigkeit vieler Metalle bieten sich in dieser Branche jedoch auch Elektrifizierungsmaßnahmen für diesen Temperaturbereich an. Der Stromverbrauch durch die betrachteten Transformationen steigt sowohl bei starker (+ 34 %) als auch bei moderater Elektrifizierung (+ 20 %) an. Abbildung 12-4 zeigt zudem, dass auch Wasserstoff in beiden Fällen relevant wird. Der Endenergieverbrauch sinkt insgesamt infolge der Elektrifizierungsmaßnahmen jeweils um etwa 20 %.

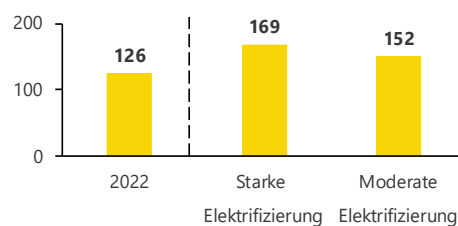
Endenergieverbrauch

in GWh | Sachsen | Metallverarbeitung



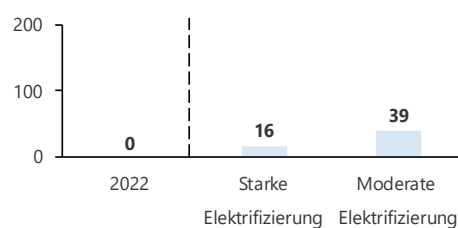
Anschlussleistung Strom

in MW | Sachsen | Metallverarbeitung



Anschlussleistung Wasserstoff

in MW | Sachsen | Metallverarbeitung



Was wäre, wenn die sächsische Metallverarbeitungsbranche dekarbonisiert? Eine Abschätzung anhand verschiedener Elektrifizierungsintensitäten

Effizienzgewinne und Produktionsanpassungen werden nicht berücksichtigt. Die Abschätzung der Anschlussleistungen erfolgt über eine Einschätzung branchenspezifischer Volllaststunden und ist als Richtwert zu verstehen.

Abbildung 12-4: Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen metallverarbeitenden Industrie.

Tabelle 12-3: Transformationstechnologien der metallverarbeitenden Industrie: Brennstoffwechsel. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Brennstoffwechsel		
Biomasse (TRL 9)	- Die energetische Nutzung von Biomasse ist technisch ausgereift und verfügbar. Zu beachten sind Nachhaltigkeitsanforderungen (bspw. bzgl. Herkunft der Biomasse) sowie eine zunehmende Nutzungskonkurrenz um die begrenzten Ressourcen, welche den Preis bestimmt. - Mit Biomasse kann in der metallverarbeitenden Industrie beispielsweise die zum Einbrennen von Pulverbeschichtungen benötigte Wärme bereitgestellt werden. Ein beispielhaftes Blockheizkraftwerk für diesen Anwendungsfall, das mit Altholz befeuert wird, liefert 13,4 MWh. [131]	Bei Einsatz fester Biomasse reduziert sich die bisherige Gasanschlussleistung. Es werden unternehmenseigene Vorratsspeicher benötigt.
Elektrifizierung		
Induktion (TRL 9)	- Ein Magnetfeld induziert in einem leitfähigen Werkstück eine Spannung, die zu einem Wirbelstrom und infolge des elektrischen Widerstands auch zu einer Erwärmung führt [56]. - Induktive Schmiedeerwärmungsanlagen sind im Bereich des Gesenkschmiedens weit verbreitet und bieten Durchsätze von bis zu 14 t/h. Um die benötigten Temperaturen von 1.250 °C zu erreichen, ist ein Strombedarf von 400 kWh/t erforderlich [56]. - Induktion kann auch zum Härten genutzt werden. Aufgrund hoher Prozessgeschwindigkeiten und Investitionsvolumina sind primär mittlere bis große Lose geeignet [132].	Bei einem Durchsatz von 14 t/h resultiert ein Netzanschluss von 5,6 MW. Dafür ist insbesondere im Mittelstand i. d. R. ein Ausbau des Netzanschlusses nötig.
(Hochtemperatur-) Wärmepumpe (TRL 9)	- Für das Erwärmen von Beschichtungsbadern (Oberflächenbehandlung) und Waschen von Bauteilen (v.a. spanende Fertigung). Die dafür benötigten Temperaturen können mit klassischen Wärmepumpen mit bis zu 60 bis 80 °C bereitgestellt werden. Hochtemperaturwärmepumpen sind nur in Ausnahmefällen nötig. - Mit Hoch- und Höchsttemperaturwärmepumpen kann z.B. aus Abwärme Prozessdampf erzeugt werden. Dieser kann anschließend z.B. beim Anlassen eingesetzt werden. - Hochtemperatur-Wärmepumpen (HT-WP) können Wärme im Bereich bis ca. 150 °C bereitstellen, wobei ab 100 °C überwiegend Schraubenkompressoren zum Einsatz kommen [63]. Am Markt verfügbare Hochtemperaturwärmepumpen besitzen Leistungen von bis zu 100 MW_{th} [62]. - Elektrisch betriebene Wärmepumpen können auch zur Flexibilisierung der Prozesswärmebereitstellung genutzt werden. Bei kontinuierlicher Energieabnahme verbraucherseitig sind jedoch Energiespeicher erforderlich.	Durch die HT-WP entsteht eine zusätzliche Stromnachfrage. Abhängig von den lokalen Gegebenheiten kann dies zusätzliche Stromanschlussleistungen und ggf. auch einen Ausbau des Netzanschlusses und der Energieinfrastruktur erfordern.

Tabelle 12-4: Transformationstechnologien der metallverarbeitenden Industrie: Elektrifizierung. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Indirekte Widerstandserwärmung (TRL 9)	- Bei der indirekten Widerstandserwärmung mit Heizelementen aus der intermetallischen Verbindung Molybdändisilizid (MoSi_2) mit keramischen Zusätzen können Temperaturen von bis zu 1.800 °C erreicht werden [67] - Leistung und Kosten sind abhängig von der Ofenkonfiguration. - Durch die Einfachheit, hohen Wirkungsgrade (bis zu 95 %), sowie Regel- und Automatisierbarkeit eignet sich die indirekte Widerstandserwärmung im Maschinenbau z.B. zum Glühen von Bauteilen [56].	Eine Erhöhung der Anschlussleistung für Strom kann notwendig sein. Der Umfang ist abhängig von der Ofenkonfiguration.
Elektrische Öfen (für Wärme- & Oberflächenbehandlung) (TRL 9)	- Am Markt sind Heizelemente für Öfen zum elektrischen Einsatzhärten mit Leistungen von 45 kW/m verfügbar. Die thermische Effizienz kann über 90 % betragen [133]. - In der Pulverbeschichtung können elektrische Öfen zum Einbrennen des Pulvers (180 – 200 °C) genutzt werden [134], [135]. - Die Beschichtung von Bauteilen mit je ca. 1 m Länge, Breite und Höhe sowie einem Gewicht von bis 300 kg ist damit möglich [135]. - Elektrische Öfen sind im Status quo jedoch nicht für sehr große Werkstücke geeignet.	Der elektrische Wärmeeintrag ist im Allgemeinen effizienter als der Wärmeeintrag durch z.B. Erdgasbefeuerung. Dennoch muss ein Großteil der bisher fossil gedeckten Energie elektrisch bereitgestellt werden, was eine Ertüchtigung der elektrischen Infrastruktur am Standort und ggf. der vorgelagerten Stromnetze erfordern kann. Der Umfang des Rückbaus der Gasinfrastruktur ist abhängig von den verbleibenden Prozessen am Standort.

13 Branchensteckbrief: Maschinenbau (WZ 28)

Die Prozesse im **Maschinenbau** sind von Querschnittstechnologien geprägt. Bevor Unternehmen Transformationsmaßnahmen ergreifen, sollten Effizienzpotenziale adressiert werden. Der derzeitige Erdgasverbrauch entfällt vor allem auf niedrige Temperaturniveaus, insbesondere zur Raumwärmeerzeugung. Dies bietet Potenziale zur Elektrifizierung, beispielsweise durch Wärmepumpen.

Tabelle 13-1: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]

28 Maschinenbau

- 28.1 Herstellung von nicht wirtschaftszweigspezifischen Maschinen
z. B. Verbrennungsmotoren und Turbinen (ohne Motoren für Luft- und Straßenfahrzeuge), hydraulische und pneumatische Komponenten und Systemen, Pumpen und Kompressoren
- 28.2 Herstellung von sonstigen nicht wirtschaftszweigspezifischen Maschinen
z. B. Öfen, Brenner, Solarwärmekollektoren, Hebezeuge und Fördermittel
- 28.3 Herstellung von land- und forstwirtschaftlichen Maschinen
- 28.4 Herstellung von Werkzeugmaschinen
z. B. Werkzeugmaschinen für die Metallbearbeitung oder zur Bearbeitung von Steinen, Beton und sonstigen mineralischen Stoffen
- 28.9 Herstellung von Maschinen für sonstige bestimmte Wirtschaftszweige
z. B. Maschinen für die Metallerzeugung, von Walzwerkseinrichtungen und Gießmaschinen, Bergwerks-, Bau- und Baustoffmaschinen

13.1 Branchenübersicht: Maschinenbau

Die im Wirtschaftszweig „Maschinenbau“ zusammengefassten Unternehmen stellen einerseits nicht wirtschaftszweigspezifische Maschinen her, die für verschiedene Anwendungen (darunter auch Querschnittstechnologien, wie z.B. Druckluft oder Lüftung) eingesetzt werden. Andererseits stellen sie auch land- und forstwirtschaftliche Maschinen, Werkzeugmaschinen und Maschinen für u.a. die Wirtschaftszeige Metallerzeugung, Gießerei und Bergbau her. Der Maschinenbau umfasst somit eine breite Produktpalette an Endprodukten, die sowohl für Endverbraucher als auch für andere Industriezweige, wie beispielsweise die Bergwerks-, Bau- und Baustoffbranche, gedacht sind. Dazu gehören u.a.

- nicht wirtschaftszweigspezifische Maschinen wie z.B. hydraulische und pneumatische Komponenten, Pumpen und Kompressoren,

- sonstige nicht wirtschaftszweigspezifische Maschinen wie z.B. Öfen, Brenner, Solarwärmekollektoren und Hebezeuge,
- die Herstellung von land- und forstwirtschaftlichen Maschinen,
- die Herstellung von Werkzeugmaschinen für z.B. die Metallbearbeitung, sowie die
- Herstellung von Maschinen für sonstige bestimmte Wirtschaftszweige wie z.B. die Metallerzeugung.

Anders als in der Metallverarbeitung (WZ 25) entstehen in diesem Wirtschaftszweig Produkte, die mechanisch oder durch Wärme auf Materialien einwirken, sowie deren krafterzeugende und -anwendende Bestandteile [4]. Dennoch sind sich die beiden Wirtschaftszweige, insbesondere bzgl. der Prozesse, sehr ähnlich.

Die Branche in Sachsen

Die 188 sächsischen Maschinenbauer (nur Betriebe mit mehr als 50 Mitarbeitern) beschäftigen Stand März

2025 knapp 34.000 Mitarbeitende. Eine dominierende Unterklasse gibt es in der sächsischen Maschinenbaubranche nicht. Die Herstellung von nicht wirtschaftszweigspezifischen Maschinen (WZ 28.1, 10.238 Beschäftigte), sonstigen nicht wirtschaftszweigspezifischen Maschinen (WZ 28.2, 9.651 Beschäftigte) und Maschinen für sonstige bestimmte Wirtschaftszweige (WZ 28.9, 9.465 Beschäftigte) haben alle einen ähnlichen Anteil bzgl. der Anzahl an Beschäftigten. Mit 63 Zuordnungen weist der WZ 28.2 bzgl. der Unternehmen den höchsten Anteil auf. Dies bedeutet, dass die WZ 28.2 zugeordneten Maschinenbauer im Durchschnitt weniger Beschäftigte pro Unternehmen aufweisen als die Unternehmen aus WZ 28.1 und WZ 28.9.

Die Herstellung von Werkzeugmaschinen (WZ 28.4) spielt im Vergleich dazu eine kleinere Rolle. Die Herstellung von land- und forstwirtschaftlichen Maschinen (WZ 28.3) ist zwar in Sachsen vertreten, spielt aber nur eine untergeordnete Rolle (selbst im direkten Vergleich mit WZ28.4).

Status quo und Herausforderungen

Die Maschinenbaubranche hat in Sachsen einen Endenergieverbrauch von 695 GWh (2022). Da bereits 403 GWh (etwa 58 % des Endenergieverbrauchs) auf Strom entfallen, sind auch die energetisch bedingten CO₂-Emissionen aus fossilen Energieträgern in Scope 1 vergleichsweise gering. Im Jahr 2022 betrugen diese 50,1 kt CO₂. Prozessbedingte Emissionen treten im Maschinenbau nicht auf. Abbildung 11-1 zeigt den historisch hohen Stromanteil. Zudem zeigt die Abbildung, dass der Endenergieverbrauch von 2012 bis 2022 um 20 % gesunken ist.

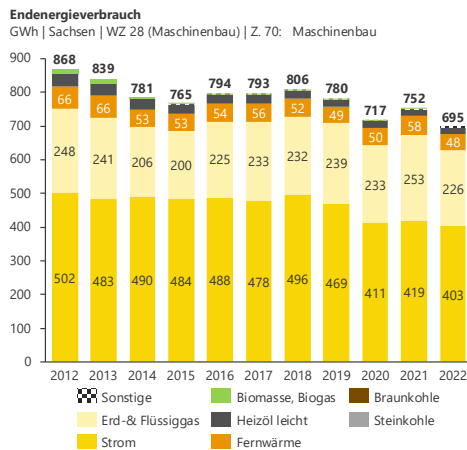


Abbildung 13-1: Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branche „Maschinenbau“ nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.

Die Maschinenbauer sind nicht zertifizierungspflichtig unter dem EU-ETS I. Tabelle 13-2 gibt einen Überblick der relevanten Kennzahlen der sächsischen Maschinenbaubranche (WZ Nr. 22). Der Maschinenbau beschäftigt die meisten Personen innerhalb der betrachteten sächsischen Industriezweige und ist hier auch der umsatzstärkste. Zudem ist der Anteil des Auslandsumsatzes mit 50 % im Vergleich zu anderen Branchen hoch. Ebenfalls hoch ist der Anteil der Beschäftigten in den Unternehmen mit mehr als 50 tätigen Personen. Dieser wird nur von den Branchen Pharma, Papier und DV-Geräte & Uhren knapp übertroffen. Mit Blick auf den Endenergieverbrauch zählt der Maschinenbau nicht zu den energieintensiven Branchen in Sachsen und verursacht aufgrund des hohen Stromanteils auch vergleichsweise wenig CO₂-Emissionen in Scope 1.

Tabelle 13-2: Kennzahlen der sächs. Maschinenbaubranche (2023) [49], [40], [83]

Endenergieverbrauch (2022)	695 GWh/a
... davon fossiler Anteil	35 %
... davon Strom	58 %
Anzahl Betriebe (≥20 Besch.)	344
... davon Betriebe ≥50 Beschäftigte	195
Anzahl Beschäftigte (Betriebe ≥20 Beschäftigte)	38.956
... davon in Betrieben ≥50 Besch.	34.976
Gesamtumsatz	9.126 Mio. €/a
... davon Auslandsumsatz	50 %
CO₂-Emissionen (2022) (energetisch bedingt, Scope 1)	50 kt CO ₂ /a

Abbildung 13-2 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) seit 2020. Die Zahl der Betriebe mit mehr als 50 Beschäftigten ist in diesem Zeitraum von 209 auf 188 zurückgegangen. Am stärksten betroffen ist hierbei die Unterklasse Herstellung von Werkzeugmaschinen (WZ 28.4). Hier beträgt der Rückgang 25 % (von 36 auf 27). Besonders stark ist die Zahl dabei Ende 2020 (zweiter Corona-Lockdown) gesunken. Im Jahr 2020 ist auch die Zahl der Beschäftigten in diesen Betrieben zurückgegangen. Diese ist 2023 und 2024 zwar wieder angestiegen und 2024 nahezu stagniert, konnte das Niveau von Anfang 2020 mit knapp über 36.000 jedoch nicht wieder erreichen.

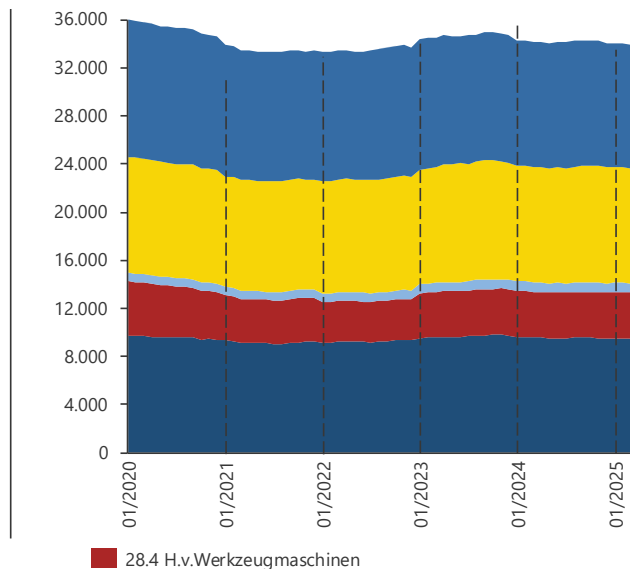
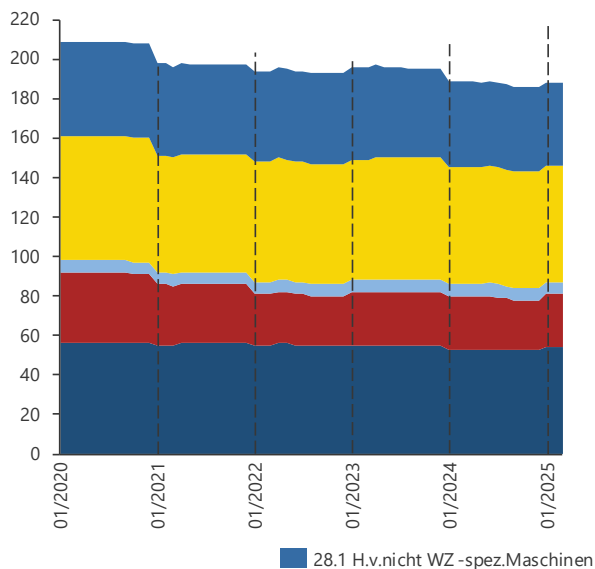


Abbildung 13-2: Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen Maschinenbau-Industrie seit 2020 [49].

13.2 Prozesse im Status quo: Maschinenbau

Im Maschinenbau spielen verschiedene Prozesse eine wichtige Rolle. Dazu gehören die mechanische Bearbeitung und Oberflächenbehandlung (von z.B. Stahl- und Aluminiumteilen), aber auch Füge- und Montageverfahren (z.B. Schweißen). Grundsätzlich weisen der Maschinenbau (WZ 28) und die Metallverarbeitung (WZ 25) ein sehr ähnliches Prozessspektrum auf. Prozessbeschreibungen für das Drehen, Bohren, die Massivumformung, Tiefziehen, Einsatzhärten, Vergüten und Galvanisieren sind in Abschnitt 12.2 zu finden. Im Vergleich zur metallverarbeitenden Industrie sind Füge- und Montageverfahren im Maschinenbau relevanter. Außerdem spielen elektrische Bauteile eine größere Rolle. Deren Herstellung ist jedoch nicht Teil des Wirtschaftszweigs Maschinenbau. Im Vergleich zur Raumwärme nimmt die Prozesswärme im Maschinenbau nur eine untergeordnete Rolle ein [50]. Daher überwiegt dort der Einsatz von Mittel- und insbesondere Niedertemperatur gegenüber Hochtemperatur [50] [29].

Da die für den Maschinenbau ebenfalls relevanten Prozesse der mechanischen Bearbeitung bereits im Steckbrief „Metallverarbeitung“ in Abschnitt 12.2 beschrieben wurden, werden hier nur Fügeverfahren genauer betrachtet. Zu den energieintensiven Fügeverfahren zählen das Schweißen oder das Aufschumpfen [136]. Das **Schweißen** umfasst eine breite Menge an Verfahren, zu denen u.a. das Widerstands-, das Metallschutzgas- und das Elektronenstrahlschweißen

gehören [137]. Beim Schweißen wird Energie benötigt, um die Fügeteile und ggf. Hilfsstoffe lokal aufzuschmelzen. Diese kann entweder elektrisch oder über Brenngase bereitgestellt werden [137]. Beispielsweise kann dies beim Lichtbogenschweißen zu Temperaturen von über 3.000 °C führen [137] [193].

Beim **Aufschumpfen** wird mindestens ein Fügeteil erwärmt oder gekühlt, sodass sich dessen Größe infolge der Temperaturendeckung ändert. Diese Größenänderung ermöglicht das Fügen i.d.R. erst. Anschließend gleichen sich die Temperaturen der Fügeteile wieder an, wodurch die Temperaturendeckung rückgängig gemacht wird. Dadurch schrumpft mindestens ein Teil auf ein anderes auf, wodurch eine kraft- oder formschlüssige Verbindung entsteht. Wird ein Fügeteil erwärmt, so kann die Wärme beispielsweise in Ofenkammern oder induktiv eingebracht werden. Der Energiebedarf hängt dabei im Wesentlichen von der benötigten Temperaturendeckung bzw. -differenz, dem Temperaturendeckungskoeffizienten, der Geometrie des zu erwärmenden Bauteils und dessen Material ab.

Lackiervorgänge unterscheiden sich je nach Anwendungsgebiet stark. Das Lackieren ist im Maschinenbau zwar von großer Bedeutung, als führend werden jedoch der Fahrzeugbau und insbesondere die Automobilindustrie angesehen. Abbildung 13-3 zeigt den übergeordneten Prozessablauf des Lackierens. Grundsätzlich lassen sich die Prozesse in Pulver- und (2K-)Nasslackierung einteilen. Das „2K“ steht dabei für „zwei Komponenten“ (Lack und Bindemittel) und stellt das in der Industrie gängige System dar. Beim 2K-Nasslackieren werden die Komponenten zunächst vermischt und anschließend in flüssiger Form aufgebracht.

Anschließend wird durch physikalische oder chemische Vorgänge (z.B. Verdampfen) die feste Lackierung erzeugt [138]. Beim Pulverlackieren wird die pulverförmige Lackierung nach dem Aufbringen unter Temperaturen von 130 bis 240 °C in einem Ofen eingebrannt [139]. Sowohl beim 2K-Nass- als auch beim Pulverlackieren kann weiter zwischen Strahlen, Eisenphosphatierung und Dünnschichtlackieren unterschieden werden. Enthält die Abluft des Lackierprozesses Lösemittelrückstände, erfordert die Abluftreinigung i.d.R. eine **Nachverbrennung** zur Umsetzung der Schadstoffe. Dafür sind Temperaturen von mindestens 750 °C üblich [113]. Sofern die Lösemittelkonzentration nicht ausreichend hoch für einen autothermen Betrieb ist, ist eine Stützfeuerung nötig. Für diese kommt häufig Erdgas zum Einsatz.

Die Produktionsprozesse der Maschinenbaubranche weisen allgemein einen hohen Anteil an Querschnittstechnologien auf [28]. Außerdem sind im Maschinenbau die Bereiche Forschung, Entwicklung und Konstruktion von besonders großer Bedeutung [140]. Die damit einhergehenden Prozesse, wie z.B. Simulationen, Messreihen und Bauteilprüfungen, weisen ebenfalls einen hohen Anteil an branchenübergreifenden Technologien auf.

13.3 Transformationstechnologien: Maschinenbau

Aufgrund der Relevanz von branchenübergreifenden Technologien setzt der **Maschinenbau** bereits viele Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung und damit

zur indirekten Emissionsminderung ein [50]. Dazu gehören bspw.:

- Abwärmenutzung (z.B. in den Bereichen Kühlung, Druckluft oder Lackieren),
- Bedarfsgerechter Betrieb von Lüftungsanlagen,
- Regenerative statt thermischer Nachverbrennung,
- Anpassung von Temperaturniveaus im Kühlprozess an den Bedarf,
- Gebäudeautomation und
- intelligente Steuerungs- bzw. Energiemanagementsysteme.

Um die Energieeffizienz im Wärme- und Kältebereich des Maschinenbaus weiter zu steigern, weisen Pinch-Analysen ein hohes Potenzial auf. Mit diesen wird bestimmt, wo Wärme- und Kälteströme sinnvoll verschaltet werden können, um so den externen Energiebezug insgesamt zu minimieren.

Für eine (nahezu) vollständige Vermeidung der CO₂-Emissionen in Scope 1 ist insbesondere eine Reduktion des Erdgasverbrauchs zur Raumwärmeerzeugung erforderlich. Der weiteren Elektrifizierung und dem Einsatz von Biomasse wird dabei kein großes Potenzial zugesprochen. Stattdessen steht die Umstellung der Raumwärmeerzeugung auf erneuerbare Energien im Fokus. [50] [29]

Tabelle 13-3 und Tabelle 13-4 listen spezifische Transformationstechnologien für den Maschinenbau auf. Da im Maschinenbau branchenübergreifende Technologien von großer Bedeutung sind, sind weitere relevante Transformationstechnologien im Steckbrief der branchenübergreifenden Technologien zu finden

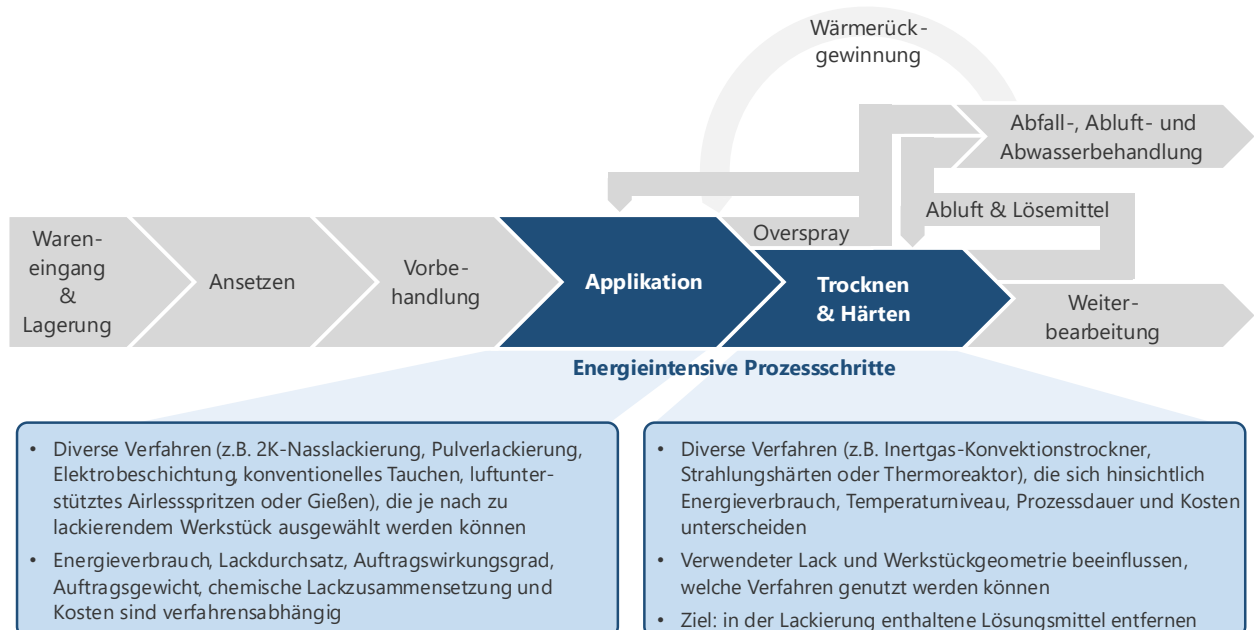


Abbildung 13-3: Energieintensive Prozessschritte beim Lackieren nach /VDI-02 25P, UBA-06 07/.

(Abschnitt 5.3). Auch die Prozesse und Transformati-
onstechnologien der metallverarbeitenden Industrie,
z.B. mechanische Bearbeitung und Wärmebehandlung
(siehe Abschnitt 12.2 und Abschnitt 12.3), sind für den
Maschinenbau relevant. Bei den Elektrifizierungsmaß-
nahmen ist die Erhöhung der elektrischen Anschluss-
leistung für das Unternehmen – sofern der bestehende
Stromanschluss über die erforderliche Kapazitätsre-
serve verfügt – über eine Anpassung des bestehenden
Vertrages möglich. Ist die zusätzlich erforderliche An-
schlussleistung mit dem bestehenden Stromanschluss
nicht darstellbar, muss mit dem zuständigen VNB ab-
gestimmt werden, wie die Erhöhung der elektrischen
Anschlussleistung ermöglicht werden kann. In der Re-
gel gehen damit Bauleistungen zur Ertüchtigung bzw.
Erweiterung der elektrischen Betriebsmittel (z.B. neuer
Transformator, neue Mittelspannung-Einspeisung) ein-
her. Dabei müssen u.a. mögliche technische Lösungen,
der finanzielle Aufwand (ggf. mit Baukostenzuschuss),
der Zeithorizont und ggfs. nötiger zusätzlicher Platz-
bedarf berücksichtigt werden.

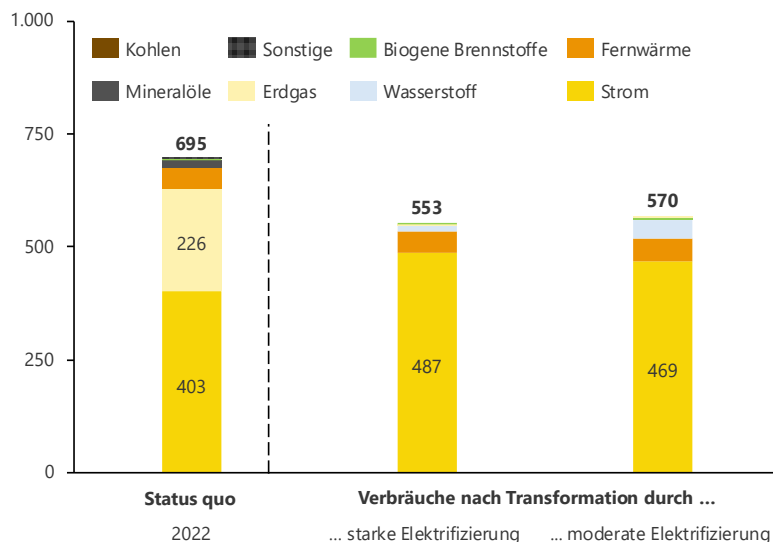
Die Branche steht derzeit infolge einer geringen Auf-
tragslage unter wirtschaftlichem Druck. Zudem stellt
der Fachkräftemangel infolge des demografischen
Wandels eine Herausforderung für die Branche dar [50].

13.4 Transformationspfade: Maschinenbau

Bei den sächsischen Maschinenbauern hat Strom be-
reits einen Anteil von 58 % (Stand 2022) am Endener-
gieverbrauch. Insgesamt ist die Bereitstellung von
Raumwärme in der Branche von größerer Bedeutung
als die Prozesswärme. Daraus ergeben sich Elektrifizie-
rungspotenziale im Temperaturbereich unter 100 °C
für die sich Wärmepumpen eignen. Dies spiegelt sich
auch in den in Abbildung 13-4 zu sehenden Verbräu-
chen nach der Transformation. Bei starker Elektrifizie-
rung hat Strom unter den gewählten Parametern einen
Anteil von 88 % des Endenergieverbrauchs, während
Wasserstoff und andere Brennstoffe nur in geringem
Ausmaß benötigt werden. Im Falle einer moderaten
Elektrifizierung beträgt der Anteil des Wasserstoffs am
insgesamt ebenfalls geringeren Endenergieverbrauch
7,5 %, während sich der Anteil des Stroms auf 82 % re-
duziert. Diese Verschiebung zeigt sich auch bei den An-
schlussleistungen.

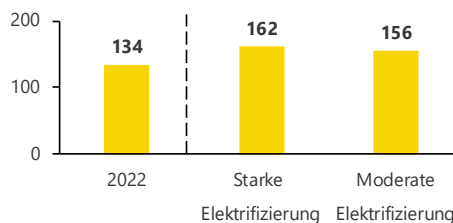
Endenergieverbrauch

in GWh | Sachsen | Maschinenbau



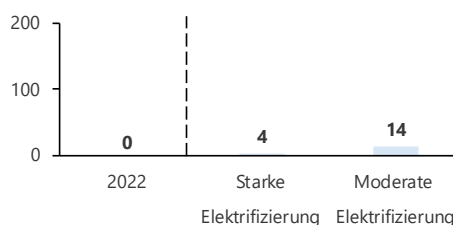
Anschlussleistung Strom

in MW | Sachsen | Maschinenbau



Anschlussleistung Wasserstoff

in MW | Sachsen | Maschinenbau



Was wäre, wenn der sächsische Maschinenbau dekarbonisiert? –Eine Abschätzung anhand verschiedener Elektrifizierungsintensitäten.

Effizienzgewinne und Produktionsanpassungen werden nicht berücksichtigt. Die Abschätzung der Anschlussleistungen erfolgt über eine Einschätzung branchenspezifischer Volllaststunden und ist als Richtwert zu verstehen.

Abbildung 13-4: Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen Maschinenbauer.

Tabelle 13-3: Transformationstechnologien des Maschinenbaus: Elektrifizierung. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren zukünftigen Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Wärmepumpe (TRL 9)	• Raumwärmeerzeugung durch Ab- oder Umweltwärme und elektrischen Strom. Unternehmensinterne Abwärmequellen (z. B. bei der Drucklufterzeugung oder Wärmerückgewinnung aus dem Kühlwasser) sollten priorisiert werden. Möglicherweise können dadurch Kühlkreisläufe teilweise reduziert werden. • Kompressionswärmepumpen stellen die am weitesten verbreitete Bauform dar. Dabei verdampft Ab- oder Umweltwärme ein Kühlmittel. Dieses wird anschließend komprimiert, wodurch es sich weiter erwärmt. In einem Wärmetauscher gibt es seine Wärmeenergie durch Abkühlen schließlich an das Anwendungssystem ab. [63] • Wärmepumpen zur Beheizung und Warmwasserbereitung in Nichtwohngebäuden decken ein breites Leistungsspektrum ab. Heizleistungen von über 2 MW sind möglich. /MEEB-01 25P / • Der COP hängt von der Quellen- und Vorlauftemperatur ab. Der COP von am Markt verfügbaren WP liegt je nach Betriebspunkt im Bereich von 2 bis 5, wobei ein COP von mindestens 3 im Normalbetrieb üblich ist [58]. • Die spezifischen Investitionskosten (Anlagen- und Installationskosten) hängen mit der Anlagengröße, -leistung und Bauart zusammen. Die spezifischen Kosten einer Luft-Wasser-WP liegen im Bereich von 1.080 – 2.240 €/kWth (ca. 20 % Unsicherheit, 2025), wobei diese mit steigender Leistung abnehmen. Bei Wasser-Wasser-WP, die Grundwasser als Wärmequelle nutzen liegen die Kosten je kWth niedriger (1.300 – ca. 500 €/kWth ab 60 kW_{th} Leistung, Stand 2025), sind jedoch auch mit 20 % Unsicherheit behaftet. [59]	Der Strombedarf ist abhängig vom Volumen der Gebäude sowie deren energetischen Zustand. Gegebenenfalls können zusätzliche Stromanschlussleistungen benötigt werden. Substitution des zuvor verwendeten Energieträgers.
Indirekte Widerstandserwärmung (TRL 9)	• Bei der indirekten Widerstandserwärmung mit Heizelementen aus der intermetallischen Verbindung Molybdändisilizid (MoSi₂) mit keramischen Zusätzen können Temperaturen von bis zu 1.800 °C erreicht werden [67] • Leistung und Kosten sind abhängig von der Ofenkonfiguration. • Durch die Einfachheit, hohen Wirkungsgrade (bis zu 95 %), sowie Regel- und Automatisierbarkeit eignet sich die indirekte Widerstandserwärmung im Maschinenbau z.B. zum Glühen von Bauteilen [56].	Eine Erhöhung der Anschlussleistung für Strom kann notwendig sein. Der Umfang ist abhängig von der Ofenkonfiguration.

Tabelle 13-4: Transformationstechnologien des Maschinenbaus: Brennstoffwechsel. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Brennstoffwechsel		
Biomasse (TRL 9)	- Die energetische Nutzung von Biomasse ist technisch ausgereift und verfügbar. Zu beachten sind Nachhaltigkeitsanforderungen (bspw. bzgl. Herkunft der Biomasse) sowie eine zunehmende Nutzungskonkurrenz um die begrenzten Ressourcen, welche den Preis bestimmen. - Gängige Pelletkessel (10 bis 100 kW_{th}) erfordern Investitionskosten von ca. 35.600 bis 96.000 € (2025) [59]. - Mit Biomasse-Heizwerken sind deutlich höhere Leistungen (z.B. bis zu 20 MW_{th}) möglich. [59] - Biomasse eignet sich zwar für die Bereitstellung von Raumwärme, jedoch gibt es andere Technologien (insbesondere Wärmepumpe), die für die Raumwärmeerzeugung in der Breite besser geeignet sind. Biomasse wird hier daher mit mittlerer Wahrscheinlichkeit eingestuft.	Bei Einsatz fester Biomasse reduziert sich die bisherige Gasanschlussleistung. Es werden unternehmenseigene Vorratsspeicher benötigt.
Fernwärme (TRL 9)	- Dekarbonisierungspotenzial ist abhängig von der eingesetzten Wärmeerzeugung. Fernwärme beschreibt grundsätzlich nur eine Art der Wärmeversorgung. - Im Maschinenbau kann Fernwärme für Raumwärme und bei der Nasslackierung eingesetzt werden. - Die Kosten für Fernwärme variieren je nach Anbieter und Netz. 2025 lagen die Preise in Deutschland bei einer angenommenen Benutzungsdauer von 2.000 h/a (bei 1.200 MWh/a und 600 kW) zwischen 80,94 und 181,71 €/MWh (Stand 2025). Im deutschlandweiten Vergleich sind die Kosten für Fernwärme in Sachsen 2025 im (oberen) Mittelfeld. Die genauen Kosten unterscheiden sich jedoch lokal von Anbieter zu Anbieter. [66] - Die Nutzung von Fernwärme als Dekarbonisierungsmaßnahme hängt auch von der Verfügbarkeit eines Fernwärmenetzes ab. Daher ist der Einsatz von Fernwärme als Dekarbonisierungsmaßnahme in der Breite im Vergleich zu anderen Technologien weniger wahrscheinlich.	Anschluss ans Fernwärmenetz erforderlich. Anschlussleistung ist abhängig von Anwendungsfall der Fernwärme (z.B. Prozess- oder Raumwärme) und Umfang der Nutzung.

14 Branchensteckbrief: Ernährung (WZ 10 und 11)

Die **Ernährungsindustrie** bedient ein vielfältiges Produktportfolio, das unterschiedliche Prozesse erfordert. Der Wärmebedarf entfällt dabei vor allem auf den Temperaturbereich unter 200 °C. Dieser kann durch verschiedene Elektrifizierungsmaßnahmen dekarbonisiert werden. Für Bäcker und Fleischer wurden eigenständige Steckbriefe erstellt, die deren relevante Prozesse tiefergehend betrachten.

Tabelle 14-1: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]

10	Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln
10.1	Schlachten und Fleischverarbeitung <i>z. B. Schlachten von Schweinen, Rindern und Geflügel, sowie Fleischverarbeitung</i>
10.2	Fischverarbeitung
10.3	Obst- und Gemüseverarbeitung <i>z. B. Kartoffelverarbeitung, Herstellung von Frucht- und Gemüsesäften, Verarbeitung von Obst und Gemüse</i>
10.4	Herstellung von pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten <i>Öle, Fette, Margarine u. ä. Nahrungsfetten</i>
10.5	Milchverarbeitung <i>Milchverarbeitung und Herstellung von Speiseeis</i>
10.6	Mahl- und Schälmühlen, Herstellung von Stärke und Stärkeerzeugnissen
10.7	Herstellung von Back- und Teigwaren <i>Herstellung von Backwaren, Dauerbackwaren und Teigwaren</i>
10.8	Herstellung von sonstigen Nahrungsmitteln <i>z. B. Zucker, Süßwaren, Würzmittel, Soßen, Fertiggerichte, Kaffee, Tee, ...</i>
10.9	Herstellung von Futtermitteln <i>Futtermittel für Nutztiere und sonstige Tiere</i>
11	Getränkeherstellung
11.01	Herstellung von Spirituosen
11.02	Herstellung von Traubenwein
11.03	Herstellung von Apfelwein und anderen Fruchtweinen
11.04	Herstellung von Wermutwein und sonstigen aromatisierten Weinen
11.05	Herstellung von Bier
11.06	Herstellung von Malz
11.07	Herstellung von Erfrischungsgetränken; Gewinnung natürlicher Mineralwässer

14.1 Branchenübersicht: Ernährung

Die als „Ernährung“ zusammengefassten Industrien umfassen neben der Herstellung von Nahrungs- und

Futtermitteln (WZ 10) auch die Getränkeherstellung (WZ 11). Die als „**Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln**“ zusammengefassten Industrien enthalten neben der Verarbeitung von pflanzlichen und tierischen Erzeugnissen auch die Schlachtung und

Verarbeitung von Tieren, sowie die Herstellung von Futtermitteln. Die **Getränkeherstellung** umfasst die Herstellung von (überwiegend) alkoholischen (WZ 11.01 – 11.06) und alkoholfreien (WZ 11.07) Getränken.

Die Ernährungsbranche verfügt über ein breites und heterogenes Produktportfolio. Dieses umfasst sowohl Endprodukte, die direkt für den Verbraucher oder gastronomische Einrichtungen bestimmt sind, als auch Zwischenprodukte für andere Unternehmen. Dazu gehören u.a.

- das Schlachten und die Fleischverarbeitung zu gegarten, gesalzenen, geräucherten oder getrockneten Fleisch- und Wurstprodukten,
- die Obst- und Gemüseverarbeitung zu geschnittenen Frischeprodukten, Säften, Nektaren, Pasten, Halb- und Vollkonserven sowie Tiefkühl- und Trockenprodukten,
- die Milchverarbeitung zu Frischeprodukten (z.B. Butter oder Joghurt), Käse, Milchtrockenprodukten (z.B. Milch- oder Rahmpulver) und Speiseeis,
- die Herstellung von Back- und Teigwaren wie z.B. Brot und Brötchen, Kuchen, Torten, Knäckebrot, Zwieback, Keksen und süßen oder salzigen Snacks,
- die Herstellung von sonstigen Lebensmitteln wie z.B. Zucker und Süßwaren, Fertiggerichten, Kaffee, Tee und Gewürzen,
- die Herstellung von Spirituosen wie z.B. Whisky, Branntwein, Gin, Korn und Likör,
- die Herstellung von Bier und Spezialbieren wie z.B. entalkoholisiertem Bier, Biermischgetränken und Starkbier (u. a. Bockbier, Ale, Porter und Stout), sowie
- die Herstellung von Erfrischungsgetränken und Gewinnung natürlicher Mineralwässer wie z.B. Limonade, Orangeade, Cola, Energy-Drinks, Fruchtsaftgetränke und Mineralwässer und sonstiger Wässer in Flaschen.

Die Branche in Sachsen

Mit über 14.100 Beschäftigten (nur Betriebe mit mindestens 50 Mitarbeitern, Stand Mai 2025) ist die *Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln (WZ 10)* in Sachsen gegenüber der Getränkeherstellung (über 1.650 Beschäftigte, Stand Mai 2025) deutlich relevanter. Die Mehrheit dieser ist in den Unterklassen *Schlachten und Fleischverarbeitung*, *Milchverarbeitung* und *Herstellung von Back- und Teigwaren* tätig. Für den WZ 10 sind in Sachsen zudem Unternehmen mit 20 – 50 Mitarbeitenden von Bedeutung. Diese mit eingerechnet beschäftigen die Hersteller von Nahrungs- und Futtermitteln in Sachsen über 19.800 Personen (Stand 2024) [141]. Auf Seiten der Getränkeherstellung sind in Sachsen in der Unterklasse Herstellung von Bier (WZ 11.05)

über zwei Drittel der Beschäftigten dieses Wirtschaftszweigs tätig.

Die Unterklassen *Herstellung von pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten (WZ 10.4)*, *Herstellung von Futtermitteln (WZ 10.9)*, sowie *Herstellung von Traubenwein (WZ 11.2)*, *Apfelwein und anderen Fruchtweinen (WZ 11.3)*, *Wermutwein und sonstigen aromatisierten Weinen (WZ 11.4)* und *Malz (WZ 11.6)* spielen in Sachsen nur eine untergeordnete Rolle. Das *Schlachten und die Fleischverarbeitung (WZ 10.1)* und die Herstellung von *Back- und Teigwaren (WZ 10.7)* werden in den Handwerkssteckbriefen (siehe Kapitel 1515 und 16) mit adressiert. Diese acht Unterklassen werden daher im Rahmen dieses Steckbriefs zur Ernährungsindustrie nicht detailliert betrachtet.

Aus der *Fischverarbeitung (WZ 10.2)* sind in Sachsen keine Betriebe mit mehr als 50 Beschäftigten ansässig. Aus diesem Grund sind die Produktionsprozesse und Transformation dieser Unterklasse nicht Teil dieses Steckbriefs.

Status quo und Herausforderungen

Die Ernährungsbranche zählt mit einem Endenergieverbrauch von 2.103 GWh (2022) zu den energieintensiven Branchen in Sachsen. Dabei entfallen ca. 85 % auf den Wirtschaftszweig *Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln (WZ 10)* und nur etwa 15 % auf die *Getränkeherstellung (WZ 11)*. In beiden Wirtschaftszweigen entfallen über die Hälfte des Endenergieverbrauchs auf fossile Energieträger, wobei der Anteil in der Getränkeherstellung mit 71 % höher ist. Erdgas ist hierbei der wichtigste Energieträger. Auf Strom entfallen in den beiden Wirtschaftszweigen nur 36 % (WZ 10) bzw. 28 % (WZ 11). Es resultieren energetisch bedingte CO₂-Emissionen von 238,7 kt CO₂ in Scope 1. Abbildung 14-1 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs in beiden Wirtschaftszweigen. In der Nahrungs- und Futtermittelbranche ist dieser von 2015 bis 2020 angestiegen und liegt seitdem bei ca. 1,8 TWh und damit auch über dem Niveau von 2012. Der Endenergieverbrauch der Getränkeherstellung in Sachsen ist hingegen leicht rückläufig. Der Einsatz von Fernwärme findet bisher nur in der Nahrungs- und Futtermittelherstellung statt.

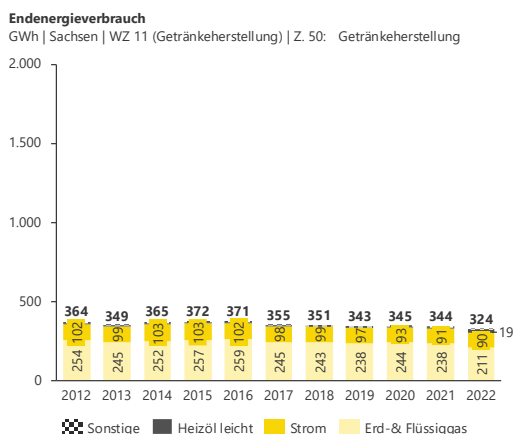
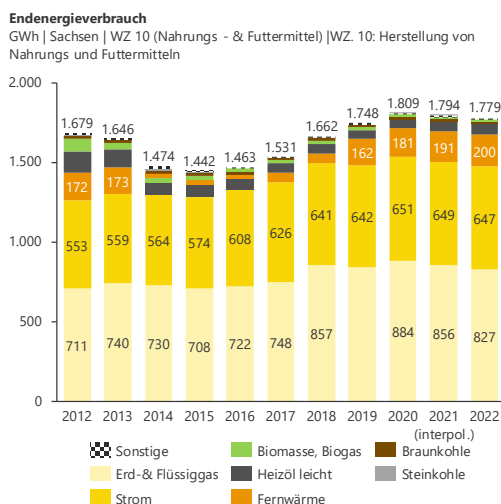


Abbildung 14-1: Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branchen „Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln“ (oben) und „Getränkeherstellung“ (unten) nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.

Prozessbedingte Emissionen können in der Ernährungsbranche infolge von Gärprozessen, z.B. beim Bierbrauen, entstehen. Dabei handelt es sich jedoch um vergleichsweise geringe Mengen. Zudem spielt die Erzeugung der Rohstoffe bezogen auf die Gesamtemissionen eine signifikante Rolle. [50]

Die Hersteller von Nahrungs- und Futtermitteln sind nicht zertifizierungspflichtig unter dem EU-ETS I. Tabelle 14-2 gibt einen Überblick der relevanten Kennzahlen der sächsischen Ernährungsbranche (WZ Nr. 10 und 11). Die Ernährungsbranche ist nach der Papierindustrie die zweitenergieintensivste Branche in Sachsen. Bezüglich der CO₂-Emissionen in Scope 1 liegt die Ernährungsbranche auf dem dritten Platz. Jedoch sind hier mehr Personen beschäftigt als in den emissionsintensiveren Branchen Papier und Glas zusammen. Mit 71 % ist der Anteil der Beschäftigten in größeren Unternehmen branchenübergreifend am niedrigsten. Ebenfalls am niedrigsten ist der Anteil des Auslandsumsatzes (13 %). Die mittelständisch geprägte

Ernährungsindustrie ist damit besonders abhängig vom heimischen Markt.

Tabelle 14-2: Kennzahlen der sächs. Ernährungsindustrie (2023) [49], [40], [83]

Endenergieverbrauch (2022)	2.103 GWh/a
... davon fossiler Anteil	54 %
... davon Strom	35 %
Anzahl Betriebe (≥20 Besch.)	356
... davon Betriebe ≥50 Beschäftigte	97
Anzahl Beschäftigte (Betriebe ≥20 Beschäftigte)	21.535
... davon in Betrieben ≥50 Besch.	15.349
Gesamtumsatz	7.813 Mio. €/a
... davon Auslandsumsatz	13 %
CO₂-Emissionen (2022) (energetisch bedingt, Scope 1)	239 kt CO ₂ /a

Abbildung 14-2 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) seit 2020. Mit Blick auf die **Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln** zeigen die Unternehmens- und Beschäftigtenzahlen ein unterschiedliches Bild. Während die Zahl der Betriebe von 2020 bis Anfang 2025 um 10 % zurückgegangen ist, ist die Zahl der Beschäftigten im gleichen Zeitraum um 7,8 % auf über 13.000 gestiegen. Der Zuwachs bei den Beschäftigten stammt dabei größtenteils aus der Unterklasse *Schlachten und Fleischverarbeitung (WZ 10.1)*. Der Rückgang bei den Betrieben mit mindestens 50 Beschäftigten resultiert hingegen aus der *Herstellung von Back- und Teigwaren (WZ 10.7)* und der *Herstellung von sonstigen Backwaren (WZ 10.8)*. In diesen beiden Branchen ist auch die Zahl der Beschäftigten gesunken. Für die Unterklassen *Mahl- und Schälmmühlen, Herstellung von Stärke und Stärkeerzeugnissen (10.6)*, *Herstellung von pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten (WZ 10.4)*, die *Herstellung von Futtermitteln (WZ 10.9)* werden aus Geheimhaltungsgründen keine Daten zur Anzahl der Beschäftigten veröffentlicht. Insgesamt ist die Zahl der Beschäftigten in diesen drei Unterklassen zusammen jedoch von ca. 430 Anfang 2020 auf knapp 550 Anfang 2025 gestiegen.

In der **Getränkeherstellung** ist die Zahl der Betriebe mit mindestens 50 Beschäftigten im Jahr 2022 von 17 auf 16 gesunken. Die Zahl der Beschäftigten war von 2020 bis 2022 durchgängig leicht rückläufig. Parallel zum Absinken der Zahl der Betriebe kam es auch bei den Beschäftigtenzahlen im Mai 2022 zu einem Rückgang. Seitdem hat sich die Zahl der Beschäftigten jedoch stabilisiert und sogar wieder leicht erholt.

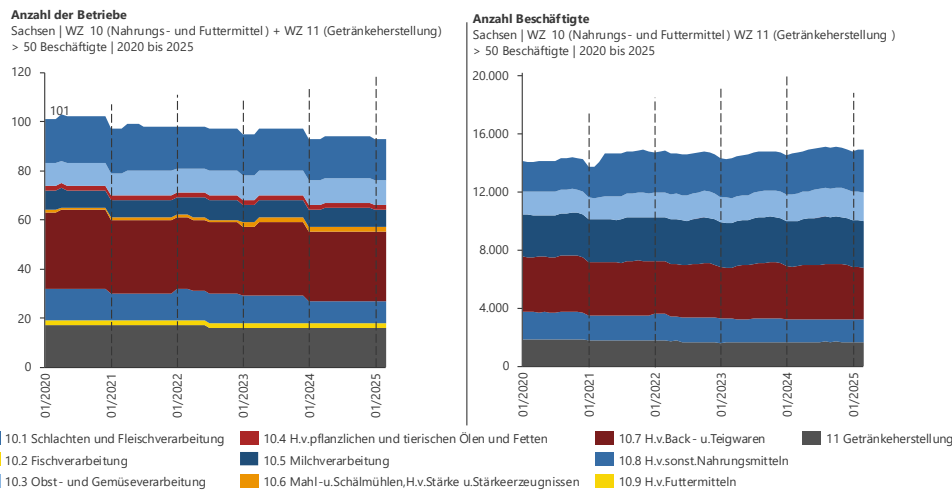


Abbildung 14-2: Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen Ernährungsbranche seit 2020. „Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln“ und „Getränkeherstellung“ [49].

14.2 Prozesse im Status quo: Ernährung (Lebensmittelproduktion)

Aufgrund des breiten Produktportfolios der Ernährungsindustrie unterscheiden sich die eingesetzten Prozesse zwischen den einzelnen Unterklassen und Unternehmen teils stark. So werden beispielsweise in der Zuckerindustrie andere Prozesse eingesetzt als in der milchverarbeitenden Industrie oder bei der Fleischverarbeitung [50]. Unabhängig von der betrachteten Unterklasse spielen jedoch Querschnittstechnologien eine wichtige Rolle in der Produktion [50]. Bezüglich der Prozesswärme dominieren Mitteltemperaturprozesse [50], [29], wobei auch Niedertemperaturprozesse relevant sind [56]. Stromseitig sind Kälteprozesse, Druckluft- und Pumpensysteme, sowie die Bereitstellung mechanischer Energie relevante Verbraucher [50]. Eine vollständige Abbildung aller Prozesse dieser Branche ist an dieser Stelle daher nicht möglich. Stattdessen werden im Folgenden ausgewählte Prozesse beschrieben. Dabei wird zunächst auf übergeordnete und schließlich auf produktspezifische Prozesse eingegangen. Zu den Prozessen bzw. Prozessschritten, die für die gesamte Ernährungsindustrie relevant sind, gehören u.a. die Ultrahochtemperatur-Erhitzung (UHT-Erhitzung), die (Tief)kühlung, die Vakuumierung, das Trocknen, das Sterilisieren, sowie das Kochen, Dämpfen, Darren (Trocknen durch Hitzeinwirkung) und Backen [30] [194].

Das **Trocknen** von Lebensmitteln ist ein wichtiger Prozess, um diese haltbarer zu machen oder bestimmte Eigenschaften einzustellen. Die Trocknung kann beispielsweise durch Luft, Rauchgas oder Dampf erfolgen.

Dabei wird zunächst ungebundene Flüssigkeit von der Feststoffoberfläche verdampft. Bei porösen Feststoffen setzt sich die Verdampfung anschließend im Inneren fort. Um niedrige Feuchtigkeitsgehalte zu erzielen, werden im Allgemeinen geringe Trocknungsgeschwindigkeiten benötigt. Je nach Trocknungstechnologie und Anwendungsfall werden Temperaturen von 55 bis 750 °C benötigt, wobei Temperaturen unter 200 °C überwiegen. [30] Die hohen Energieverbräuche resultieren dabei nicht aus der energieintensiven Verdampfung von Wasser, sondern auch aus niedrigen Anlagenwirkungsgraden von teils unter 50 % [142].

Je nach **Kühlanwendung** (z.B. Tiefkühlung, Eisbereitung oder Schockfrosten) werden in der Ernährungsbranche andere Temperaturniveaus gefordert. Dazu werden in der Regel Kompressionskältemaschinen mit unterschiedlichen Kältemitteln eingesetzt. Für Temperaturen im Bereich von 7 bis 18 °C wird Kaltwasser genutzt, bei -10 bis -40 °C ist in der Lebensmittelproduktion auch Ammoniak verbreitet. Tiefkühlanlagen verfügen i.d.R. über zwei Kühlkreisläufe. Der Eiswasserkreislauf kühlt über Kühlregister die umgewälzte Raumluft, während der zweite Kreislauf (Ammoniakkreislauf) die abzuführende Wärme aufnimmt und das Eiswasser kühlt. Beim Schockfrosten werden das Kaltluftgefrierverfahren (-40 °C kalte Luft umströmt unverpackte Lebensmittel mit hoher Geschwindigkeit), das Kontaktgefrierverfahren (verpackte, meist blockförmige Lebensmittel liegen zwischen -40 °C kalten Metallplatten) und kryogene Tiefgefrierverfahren (unverpackte Lebensmittel gefrieren durch Kontakt mit flüssigem CO₂ oder Stickstoff) eingesetzt [143]. Für Kühlprozesse wird fast ausschließlich Strom als Energieträger verwendet. [30]

Das **Vakuuieren** ist in der Lebensmittelbranche ein weit verbreiteter Verpackungsprozess [30]. Durch die Vakuuierung wird die Luft entzogen, was das Wachstum von Mikroorganismen hemmt und die Haltbarkeit erhöht [144]. Industrielle Vakuuiergeräte, wie beispielsweise der Polar 2-85 von Henkelman BV, verfügen über eine elektrische Anschlussleistung im einstelligen kW-Bereich [145]. Bei größeren Vakuuiergeräten liegt die Anschlussleistung teils auch im zweistelligen kW-Bereich. Das Vakuum wird dabei durch elektrisch betriebene Pumpen erzeugt. Auch die Versiegelung durch Verschweißen der Verpackung erfolgt, indem die Fugestelle elektrisch erhitzt wird.

In der **Milchverarbeitung** kommen verschiedene energieintensive Prozesse zum Einsatz. Dazu gehören das Pasteurisieren, das Homogenisieren, die UHT-Erhitzung und Trocknen in der Milchpulverherstellung. Beim Homogenisieren wird mithilfe von Druck und feinen Düsen das in der Milch enthaltene Fett zerkleinert, wodurch sich dieses gleichmäßiger verteilt. Beim Pasteurisieren werden in der Milch enthaltene gesundheitsschädliche Keime abgetötet. Dazu wird die Milch innerhalb von 15 bis 30 Sekunden auf 72 bis 75 °C erwärmt und direkt im Anschluss wieder abgekühlt. Bei der UHT-Erhitzung wird die Milch für zwei bis drei Sekunden auf 135 bis 150 °C erhitzt und wieder auf 4 bis 5 °C abgekühlt. Dadurch werden nicht nur die gesundheitsschädlichen Keime, sondern fast alle Mikroorganismen abgetötet, wodurch die Milch bis zu sechs Wochen haltbar wird. Die Milchpulverherstellung findet in Deutschland überwiegend per Sprühtrocknung statt. Dabei wird Milch über Zerstäuber in eine Kammer eingeblasen, wo sie anschließend durch Heißgas (z.B. Luft, bis zu ca. 220 °C) trocknet. Die Prozesswärme wird über Wärmetauscher von Dampf, der häufig in KWK-Anlagen erzeugt wird, auf das Heißgas übertragen. Abbildung 14-3 zeigt den Prozess der Milchpulverherstellung. [30]

Für das **Bierbrauen** werden nach dem deutschen Reinheitsgebot Wasser, Hopfen, Hefe und Weizen- oder Gerstenmalz benötigt. Eine feste Einteilung des

Prozesses in Schritte gibt es nicht. Zu Beginn, beim Mälzen, wird die Gerste bzw. der Weizen in Wasser eingeweicht, wodurch diese bzw. dieser zu keimen beginnt. Anschließend wird das Malz getrocknet („Darren“: Schwelken bei 40 bis 50 °C mit anschließendem Abdarren bei 60 bis 105 °C [195] [196], geschrotet und im Maischbottich mit Wasser auf 60 bis 70 °C erhitzt [146]. Beim Läutern werden nun die festen Bestandteile abgetrennt, wodurch die Maische als flüssiger Sud übrigbleibt. Diese wird in der Würzpfanne aufgekocht und mit Hopfen veredelt. Im Kühlschiff werden anschließend ausgefallenes Eiweiß und nicht zersetzter Hopfen entfernt. Die daraus resultierende Ausschlagwürze wird nun von ca. 100 °C auf 10 bis 12 °C heruntergekühlt, wodurch die Stammwürze entsteht. Es folgt die Zugabe der Hefe, die den Malzzucker in Alkohol umwandelt und die Kohlensäure erzeugt. Nachdem die Hefe abgesunken ist und entfernt wurde, gärt bzw. reift das Bier in einem Lagertank (ca. 1 bis 10 °C /BUG-01 25P, ISI-12 13/) nach. Gegebenenfalls wird das Bier nun noch gefiltert, um Heferückstände und andere Schwebstoffe zu entfernen. Die Abfüllung stellt den letzten Produktionsschritt dar, sofern keine Flaschengärung vorgesehen ist. /FBE-01 24P, ISI-12 13/

Bei der Herstellung von **Nudeln** wird zunächst der Teig aus Eiern, Wasser und z.B. Hartweizengrieß entsprechend der Rezeptur angemischt. Die Formgebung erfolgt je nach Sorte auf andere Weise: bei der Spätzleherstellung wird Teig durch Lochbleche gedrückt und tropft anschließend in ein Kochbad zur Vorgarung. Bei gewalzten Nudeln durchläuft der Teig mehrere Walzvorgänge und wird dann in die geforderte Breite geschnitten. Bei gepressten Nudeln wird der Teig mit bis zu 100 bar durch eine Matrize extrudiert. Anschließend werden die Nudeln, teils in mehreren Schritten, getrocknet, wodurch der Wassergehalt reduziert wird. Werden die Nudeln schnell (in 3 bis 6 Stunden) getrocknet, liegt das Temperaturniveau bei 75 - 115 °C [147], [148]. Bei langsamer Trocknung, die bis zu mehreren Tagen dauern kann, liegt die Temperatur teils unter 40 °C [148]. Im letzten Schritt werden die Nudeln abgefüllt. [149]

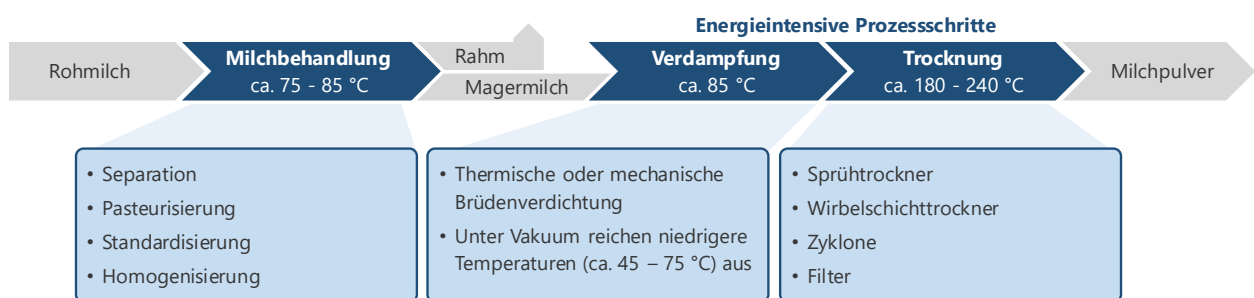


Abbildung 14-3: Energieintensive Prozessschritte in der Milchpulverherstellung [56].

14.3 Transformationstechnologien: Ernährung (Lebensmittelproduktion)

Die **Ernährungsbranche** setzt aufgrund des hohen Einsatzes von branchenübergreifenden Technologien bereits verschiedene Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung und damit zur indirekten Emissionsminderung ein. Dazu gehören bspw.:

- Einsatz von Wärmeschaukeln (Wärmespeicher mit Temperaturschichtung zur Integration diverser Abwärmequellen und Versorgung von Wärmesenken),
- Sinnvolle Verschaltung von Kälte- und Wärmeprozessen,
- Anpassung von Betriebsweisen von Pumpen und Ventilatoren an den Bedarf (häufig durch Einsatz von Frequenzumrichtern ermöglicht),
- Einsatz effizienterer Motoren [150]

Für eine (nahezu) vollständige Vermeidung der CO₂-Emissionen in Scope 1 sind derzeit zwei Möglichkeiten absehbar:

- Substitution des verbleibenden Bedarfs fossiler Energieträger mit Strom (Elektrifizierung), oder
- Energieträgerwechsel zu emissionsfreien Brennstoffen (Brennstoffwechsel)

In bisherigen Studien wird dem Brennstoffwechsel dabei im Vergleich zur Elektrifizierung eine größere Rolle bei der Prozesswärmeerzeugung zugesprochen. Als Gründe dafür werden u.a. die Verfügbarkeit von Biomasse in den Produktionsprozessen und die hohen Kosten von Elektrifizierungsmaßnahmen genannt [50], [29]. Dem gegenüber stehen verfügbare Abwärmequellen in den Prozessen, die begrenzte Menge von Biomasseabfällen und der nicht überall gegebene Platz für Biomassekessel und -lagerung (insbesondere bei historisch gewachsenen Unternehmen). Aus diesen Gründen gibt es auch Experten, die Wärmepumpen als zentrale Transformationstechnologie sehen. Bei den Elektrifizierungsmaßnahmen ist die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung für das Unternehmen – sofern der bestehende Stromanschluss über die erforderliche Kapazitätsreserve verfügt – über eine Anpassung des bestehenden Vertrages möglich. Ist die zusätzlich erforderliche Anschlussleistung mit dem bestehenden Stromanschluss nicht darstellbar, muss mit dem zuständigen VNB abgestimmt werden, wie die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung ermöglicht werden kann. In der Regel gehen damit Bauleistungen zur Ertüchtigung bzw. Erweiterung der elektrischen Betriebsmittel (z.B. neuer Transformator, neue Mittelspannung- bzw. Niederspannung- Einspeisung)

einher. Dabei müssen u.a. mögliche technische Lösungen, der finanzielle Aufwand (ggf. mit Baukostenzuschuss), der Zeithorizont und ggfs. nötiger zusätzlicher Platzbedarf berücksichtigt werden. Tabelle 14-4 und Tabelle 14-3 listen verschiedene Maßnahmen auf.

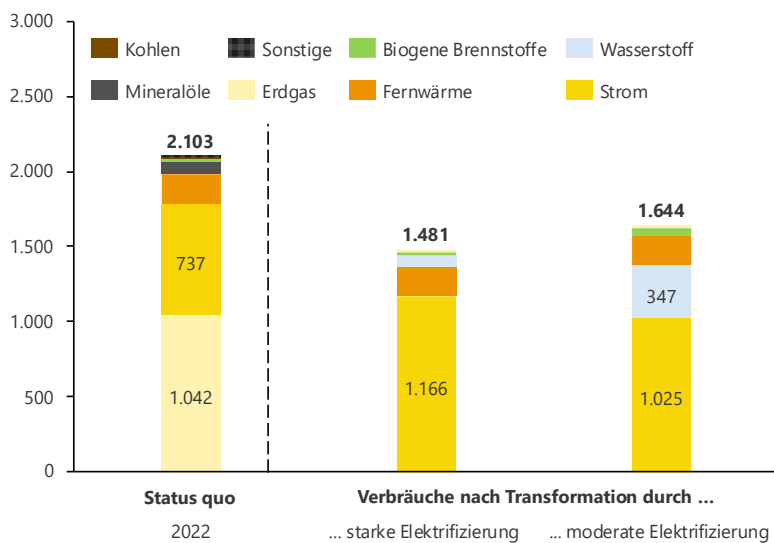
In der Ernährungsbranche werden zudem Veränderungen bei der Verfügbarkeit von Rohstoffen sowie ein Wandel in der Produktnachfrage (z.B. Rückgang des Fleischkonsums) Einfluss auf den Transformationsprozess und die Entwicklung dieses Wirtschaftszweigs haben [50].

14.4 Transformationspfade: Ernährung

Der fossile Anteil am Endenergieverbrauch in der sächsischen Ernährungsindustrie ist mit 54 % (Stand 2022) höher als in anderen betrachteten Branchen. Die Prozesswärme wird überwiegend im Temperaturbereich 100 bis 120 °C benötigt [8]. Abbildung 14-4 zeigt den Zustand bei starker bzw. moderater Elektrifizierung. Aufgrund der notwendigen Wärme bis 120 °C ist davon auszugehen, dass in der Praxis die Elektrifizierung überwiegt.

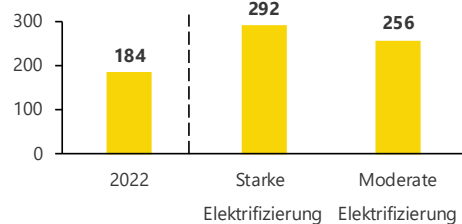
Endenergieverbrauch

in GWh | Sachsen | Ernährung



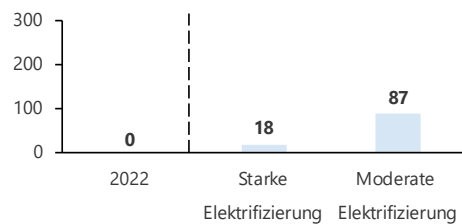
Anschlussleistung Strom

in MW | Sachsen | Ernährung



Anschlussleistung Wasserstoff

in MW | Sachsen | Ernährung



Was wäre, wenn die sächsische Ernährungsindustrie dekarbonisiert? Eine Abschätzung anhand verschiedener Elektrifizierungsintensitäten

Effizienzgewinne und Produktionsanpassungen werden nicht berücksichtigt. Die Abschätzung der Anschlussleistungen erfolgt über eine Einschätzung branchenspezifischer Volllaststunden und ist als Richtwert zu verstehen.

Abbildung 14-4: Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen Ernährungsindustrie.

Tabelle 14-3: Transformationstechnologien der Ernährungsindustrie: Elektrifizierung. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Elektrokessel (TRL 9)	• Elektrokessel verfügen über einen Heizwiderstand und werden überwiegend mit Niederspannung betrieben. • Gängige Modelle zur Heißwassererzeugung bieten Leistungen im Bereich von 0,1 bis ca. 10 MW bei Betriebsdrücken von 6 – 25 bar [64]. • Der Umwandlungswirkungsgrad von Strom in Wärme liegt bei nahezu 100 % [65]. • Die Investitionskosten liegen im Bereich von 125 – 350 €/kW (2014) [12], [65]. • Zudem weisen Elektrokessel Möglichkeiten zur Hybridisierung und somit Flexibilisierungspotenzial auf.	In der Regel ist eine Erhöhung der Anschlussleistung für Strom notwendig. Die Kosten dafür liegen bei 25 – 150 €/kWh (2014) [12].
Elektroden-dampfkessel (TRL 9)	• Elektrifizierung der z.B. über gasbetriebene Großraumwasserkessel stattfindenden Dampfversorgung. • Dampferzeugung bis ca. 240 °C, der zum Kochen, Blanchieren, Sterilisieren und Trocknen (überwiegend <200 °C) genutzt werden kann [56] • Es sind Leistungen von bis zu 90 MW möglich [65]. • Möglichkeiten zur Hybridisierung und bivalenten Nutzung.	Zusätzliche Stromanschlussleistungen werden benötigt. Die benötigten Gasanschlussleistungen können sinken.
Dielektrische Erwärmung (TRL 9)	• Hochfrequenz- und Mikrowellenerwärmung • Mögliche Anwendungsbereiche: Pasteurisieren und Sterilisieren /ISI-04 23P, LUH-04 11/ • Der Wirkungsgrad von beispielsweise Mikrowellenanlagen liegt im Bereich von 40 bis 60 %. Durch die lokal begrenzte Erwärmung ist der spezifische Energiebedarf vergleichsweise gering. Zudem sind die Anlagen meist platzeffizient. [56]	Dielektrische Erwärmung kann den Erdgasbedarf reduzieren. Die elektrische Anlagenperipherie und ggf. auch Anschlussleistungen müssen jedoch ertüchtigt werden
Hoch- und Höchsttemperatur-WP (TRL 6-9)	• Hoch- und Höchsttemperatur-Wärmepumpen (HT-WP) können Wärme im Bereich bis ca. 150 °C bereitstellen wobei ab 100 °C überwiegend Schraubenkompressoren zum Einsatz kommen [63]. • Großes Potenzial, da benötigte Prozesswärme überwiegend im Temperaturbereich unterhalb von 200 °C benötigt wird [56]. Zudem stehen Abwärmepotenziale zur Verfügung, deren Nutzung sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt. • Hochtemperatur-WP eignen sich zur Bereitung von Heißwasser, Höchsttemperatur-WP auch zur Dampferzeugung. • Die Investitionskosten sind abhängig von der Konfiguration und Heizleistung. Im „Technikkatalog Wärmeplanung“ werden für eine Anlage, die bis 125 °C liefern kann, mit 0,3 MW_{th} Investitionskosten von 282.000 € (2025) und für eine Anlage mit 1,5 MW_{th} 1.410.000 € (2025) angegeben [59]. Im Allgemeinen sollten jedoch die Gesamtkosten über die Lebensdauer betrachtet werden. • Im Rahmen des DryFiciency Projekts wurde bei Agrana eine 375 kW Wärmepumpe, die Temperaturen zwischen 110 und 160 °C für die kontinuierliche Trocknung von Stärke benötigt, eingesetzt [151].	Ohne Abwärme mit entsprechendem Temperaturniveau als Wärmequelle ist der Einsatz einer HT-WP i.d.R. nicht wirtschaftlich. Wie hoch das Temperaturniveau der Abwärme sein sollte, hängt wesentlich vom Temperaturhub der HT-WP ab. Die Anforderungen an die Stromversorgung sind abhängig von der Heizleistung der HoT-WP.

Tabelle 14-4: Transformationstechnologien der Ernährungsindustrie: Brennstoffwechsel. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Brennstoffwechsel		
Biogas (TRL 9)	• Biogas kann bei entsprechender Reinheit und (wirtschaftlicher) Verfügbarkeit das fossile Erdgas ohne technische Anpassungen ersetzen. • Teils wird aus Produktionsabfällen zunächst Biogas erzeugt.	Die bisherigen Gasanschlüsse bleiben erhalten. Ein bilanzieller Bezug von Biogas ist über das Erdgasnetz möglich.
Biomasse (TRL 9)	• Die energetische Nutzung von Biomasse, z.B. Holzpellets aber auch Produktionsabfälle (teils über Zwischenschritt Biogas), ist technisch ausgereift und verfügbar. Zu beachten sind Nachhaltigkeitsanforderungen (bspw. bzgl. Herkunft der Biomasse) sowie eine zunehmende Nutzungskonkurrenz um die begrenzten Ressourcen, welche den Preis bestimmen • Zur Dampferzeugung bspw. in der Mehlmüllerei und Futtermittelproduktion geeignet. Eine Anlage, die Industriepellets nutzt, liefert dort beispielsweise 551 MWh Wärme pro Jahr. [131]..	Bei Einsatz fester Biomasse reduziert sich die bisherige Gasanschlussleistung. Es werden unternehmenseigene Vorratsspeicher benötigt.

15 Handwerkssteckbrief: Bäcker

Bei **Bäckern** finden oftmals Prozesse mit Wärme- und Kältebedarf auf engem Raum nebeneinander statt, weshalb Effizienzmaßnahmen und die Kopplung von Wärmequellen und -senken entscheidend zur Dekarbonisierung beitragen kann.

Tabelle 15-1: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]

10.7 Herstellung von Back- und Teigwaren

- 10.71 Herstellung von Backwaren (ohne Dauerbackwaren)
z. B. Brot und Brötchen, Kuchen, Torten, Pfannkuchen, Waffeln, ...
- 10.72 Herstellung von Dauerbackwaren
z. B. Knäckebrot, Zwieback, Kekse, Spritzgebäck, Kracker, Brezeln, ...
- 10.73 Herstellung von Teigwaren
z. B. Makkaroni, Nudeln, Couscous, gefrorenen Teigwaren oder Teigwarenkonserven

Tabelle 15-2: Betrachtete Gewerbegruppen der Handwerksstatistiken (Nr. nach Handwerksordnung Stand 2021) [35]

V Lebensmittelgewerbe

- A 28 Müller
- A 30 Bäcker
- A 31 Konditoren

15.1 Branchenübersicht: Bäcker

Industrielle Bäckereien werden dem Wirtschaftszweig *Herstellung von Back- und Teigwaren* (WZ 10.7) zugeordnet. Die darin zusammengefassten Unternehmen stellen neben klassischen Backwaren auch Dauerbackwaren und Teigwaren her. Für Bäcker ist die Unterklasse WZ 10.71 *Herstellung von Backwaren* (ohne Dauerbackwaren) am relevantesten. Diese umfasst eine vergleichsweise homogen Produktpalette, die sich auf Endprodukten für Verbraucher fokussiert. Dazu gehören beispielsweise:

- die Herstellung, von Brot und Brötchen, sowie die
- die Herstellung feiner Backwaren.

Handwerklich tätige Bäcker zählen nach der Handwerksordnung zur Gewerbegruppe A 30. Die mit der Handwerksordnung in Zusammenhang stehende Verordnung über die Berufsausbildung zum Bäcker/zur Bäckerin (BäAusbV 2004) listet u.a. Weizenbrot und

Weizenkleingebäck, feine Backwaren aus Teig, Partykleingebäck und Süßspeisen als Produkte des Bäckerhandwerks [152].

Die Branche in Sachsen

Laut Handwerksstatistik waren 2023 16.350 Personen im Gewerbezug Bäcker (A 30) beschäftigt. Diese Zahl ist jedoch rückläufig: 2020 wurden noch 17.566 Beschäftigte erfasst. Dies entspricht einem Rückgang von 7 % in 3 Jahren. In der Handwerksstatistik wurden 2023 zudem 807 Unternehmen (rechtliche Einheiten) diesem Gewerbezug zugeordnet.

In der Statistik des verarbeitenden Gewerbes (Unternehmen mit mehr als 19 Beschäftigten) wurden 6.150 tätige Personen (Stand 30.09.2023) der Unterklasse *Herstellung von Backwaren (ohne Dauerbackwaren)* (WZ 10.71) zugerechnet. Diese ist damit mit großem Abstand die relevanteste Unterklasse der *Herstellung von Back- und Teigwaren* (WZ 10.7) in Sachsen, für die insgesamt 7.026 tätige Personen erfasst wurden. Beide Zahlen sind von 2023 auf 2024 gefallen und betrugen

zum 30.09.2024 6.103 für WZ 10.71 und 6.984 für WZ 10.7.

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich primär auf die Handwerksstatistik und den Gewerbe-
zweig Bäcker (A 30).

Status quo und Herausforderungen

Im Durchschnitt benötigen handwerkliche Bäckereien 3,2 – 3,7 kWh pro Kilogramm verarbeitetem Mehl (Mehlmenge) bzw. zwischen 450 und 550 kWh pro Quadratmeter Betriebsfläche [153]. Als beispielhaften Endenergieverbrauch einer Bäckerei nennt die MIE 127 MWh/a [154]. Bei kleinen Bäckereien liegt der Endenergieverbrauch auch unter 100 MWh/a [155].

Bäcker müssen keine CO₂-Emissionszertifikate im EU-ETS kaufen. Tabelle 15-1 gibt einen Überblick der relevanten Kennzahlen des sächsischen Bäckerhandwerks. Der Umsatz liegt auf einem vergleichbaren Niveau wie der des Fleischerhandwerks. Jedoch zählt das Bäckerhandwerk etwa doppelt so viele Unternehmen und beschäftigte Personen.

Tabelle 15-3: Kennzahlen der sächs. Bäcker entsprechend der Handwerksstatistik (2023) [36]

Endenergieverbrauch (2022)	k.A.
... davon fossiler Anteil	k.A.
... davon Strom	k.A.
Anzahl Betriebe (≥20 Besch.)	807
... davon Betriebe ≥50 Beschäftigte	k.A.
Anzahl Beschäftigte	16.350
... davon in Betrieben ≥50 Besch.	k.A.
Gesamtumsatz	950 Mio. €/a
... davon Auslandsumsatz	k.A.
CO ₂ -Emissionen (2022) (energetisch bedingt, Scope 1)	k.A.

Abbildung 15-1 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Betriebe und Beschäftigten, die dem Gewerbe-
zweig Bäcker (A 30) zugeordnet sind, seit 2020. Die Zahl der Betriebe ist zwischen 2020 und Ende 2023 von 880 auf 807 gesunken (-8 %). Die Zahl der Beschäftigten hat sich im betrachteten Zeitraum ähnlich entwickelt. Der Rückgang beträgt hier 7 %.

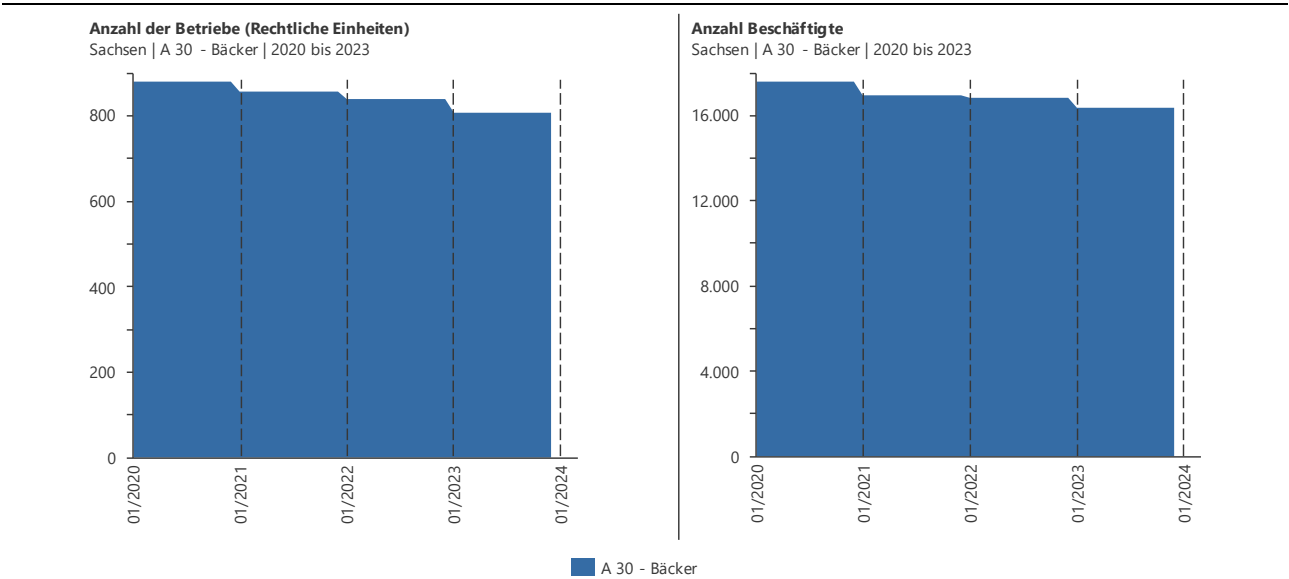


Abbildung 15-1: Anzahl der Betriebe (rechtliche Einheiten) und Beschäftigten im sächsischen Gewerbe-
zweig Bäcker von 2020 bis 2023 [36].

15.2 Prozesse im Status quo: Bäcker

In **Bäckereien** sind die Backöfen für die Hälfte bis zwei Drittel des Gesamtenergieverbrauchs verantwortlich. Die am weitesten verbreiten Bauformen von Öfen stellen Durchlauf-, Etagen- und Stikkenöfen dar.

Elektrische Kleingeräte, die Beleuchtung in Filialen, die Warmwassererzeugung und Heizung, sowie die Gärsteuerung verursachen jeweils zwischen 10 und 20 % des Gesamtenergieverbrauchs. In Bäckereien kommen verschiedene Kleingeräte zum Einsatz. Dazu zählen u.a. Kneten, Teigmixer, Brötchenpressen, Brotschneidemaschinen und Spülmaschinen. Die Beleuchtung in den Filialen ist relevant, da diese nicht nur die Ausleuchtung, sondern auch der Präsentation der Backwaren dient. Die Gärsteuerung zählt mit zum Bereich Kühlung. Relevant ist hierbei, dass konstant eine definierte Temperatur (in Frostern bis zu -30 °C) bereitgestellt werden muss. In Bäckereien ist dabei oftmals problematisch, dass Kühl- und Produktionsräume, in denen gebacken wird, nahe beieinander liegen. Dies kann, sofern keine entsprechenden Maßnahmen ergriffen werden, zu Wärmeaustausch und zusätzlichen Energiebedarfen führen. /ZDH-02 19P, NSEB-01 14/

Das Thema Kühlung ist ausführlich in den Abschnitten 14.2 und 16.2 beschrieben.

Ebenfalls relevant ist der Energieverbrauch beim Transport der Backwaren in die Filialen. Dies gilt besonders für Großbäckereien mit zentralen Produktionsstandorten (Backstuben) und mehreren Lieferfahrten täglich [154].

15.3 Transformationstechnologien: Bäckereien

Die **Bäckereien** setzt bereits viele Maßnahmen zur Energieeffizienz und damit zur indirekten Emissionsminderung ein. Dazu gehören bspw.:

- Abgasklappe im Kamin, um Auskühlen zu vermeiden,
- Stufenbrenner, Herdtürendämmung und
- Herdgruppensteuerung bei Neugeräten,
- Optimieren der Ofenauslastung und Backreihenfolge,
- Minimieren Leerlaufphasen (Back-Pausen)
- Dämmung und Abwärmenutzung,
- Reduzierung der Schwadenmenge und
- Minimierung der Lieferwege durch optimierte Routenplanung.

Weiterführende Informationen zu Energieeffizienzmaßnahmen von Bäckereien sind unter https://cms.energieeffizienz-handwerk.de/re-sources/downloads/43573/steckbrief_baeckerei.pdf und <https://www.stwab.de/Klimaschutz/Energie-spahren/Energiespartipps/Energiespartipps/Broschuere-Baeckereien.pdf> zu finden.

Für eine (nahezu) vollständige Vermeidung der CO₂-Emissionen sind derzeit drei Möglichkeiten absehbar:

- Energieträgerwechsel zu Strom (Elektrifizierung), oder
- Energieträgerwechsel zu emissionsfreien Brennstoffen (Brennstoffwechsel).

Tabelle 15-4 listet die einzelnen Maßnahmen auf. Transformationstechnologien für Bäckereien, wie elektrisch oder mit Biomasse beheizte Öfen, sind bereits am Markt verfügbar. Bäckereien stehen jedoch einerseits vor der Herausforderung, dass diese stets zu den jeweiligen Produktionsanforderungen passen müssen. Andererseits erfordern die Öfen Investitionen, die aufgrund der absoluten Höhe ein Risiko für das Unternehmen darstellen oder erst gar nicht gestemmt werden können. Bei den Elektrifizierungsmaßnahmen ist die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung für das Unternehmen - sofern der bestehende Stromanschluss über die erforderliche Kapazitätsreserve verfügt - über eine Anpassung des bestehenden Vertrages möglich. Ist die zusätzlich erforderliche Anschlussleistung mit dem bestehenden Stromanschluss nicht darstellbar, muss mit dem zuständigen VNB abgestimmt werden, wie die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung ermöglicht werden kann. In der Regel gehen damit Bauleistungen zur Ertüchtigung bzw. Erweiterung der elektrischen Betriebsmittel (z.B. neuer Transformator, neue Mittelspannung- bzw. Niederspannung- Einspeisung) einher. Dabei müssen u.a. mögliche technische Lösungen, der finanzielle Aufwand (ggf. mit Baukostenzuschuss), der Zeithorizont und ggfs. nötiger zusätzlicher Platzbedarf berücksichtigt werden.

Tabelle 15-4: Transformationstechnologien für Bäckereien. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Vollelektrische Backöfen (TRL 9)	Vollelektrische Öfen, wie beispielsweise der MATADOR MDE (Backfläche: 11,5 – 17,28 m²) sind bereits am Markt positioniert und erhältlich [156].	Die Backstuben bzw. Filialen müssen über die geforderte Anschlussleistung des Ofens verfügen.
Vollelektrische Lieferfahrzeuge (TRL 9)	- Die zur Belieferung der Filialen eingesetzten Fahrzeuge können auf solche mit elektrischem Antrieb umgestellt werden. - Da die Belieferung meist auf lokaler oder regionaler Ebene erfolgt, hält sich die Reichweitenproblematik in Grenzen. Zudem bietet sich die Möglichkeit, batterieelektrische Fahrzeuge beim Be- und Entladen der Ware an der Backstube und den Filialen zu laden.	Zum Laden der elektrischen Lieferfahrzeuge können höhere Anschlussleistungen an Backstube und Filiale nötig sein.
Wärmepumpen für Raumwärme (TRL 9)	- Kompressionswärmepumpen stellen die am weitesten verbreitete Bauform zur Bereitstellung von Raumwärme dar [63]. - Wärmepumpen zur Beheizung und Warmwasserbereitung in Nichtwohngebäuden decken ein breites Leistungsspektrum ab. Heizleistungen von über 2 MW sind möglich [57]. Im Handwerk sind jedoch meist Anlagen mit Leistungen im dreistelligen kW-Bereich ausreichend. - Der COP hängt von der Quellen- und Vorlauftemperatur ab. Der COP von am Markt verfügbaren WP liegt je nach Betriebspunkt im Bereich von 2 bis 5, wobei ein COP von mindestens 3 im Normalbetrieb üblich ist [58]. - Die Investitionskosten hängen mit der Anlagengröße, -leistung und Bauart zusammen. Die spezifischen Kosten einer Luft-Wasser-WP liegen im Bereich von 1.080 – 2.240 €/kWth (2025), wobei diese mit steigender Leistung abnehmen. [59] - Bäckereien befinden sich jedoch oftmals in größeren Supermärkten oder Einkaufsgebäuden, die über ein zentrales Heizsystem versorgt werden. Dies kann die Umrüstung auf eine Wärmepumpe behindern.	Der Strombedarf ist abhängig vom Volumen der Gebäude sowie deren energetischen Zustand. Gegebenenfalls können zusätzliche Stromanschlussleistungen benötigt werden. Substitution des zuvor verwendeten Energieträgers.
Brennstoffwechsel		
Biogas (TRL 9)	Biogas kann bei entsprechender Reinheit und (wirtschaftlicher) Verfügbarkeit das fossile Erdgas ohne technische Anpassungen ersetzen bzw. beigemischt werden.	Die bisherigen Gasanschlussleistungen bleiben erhalten. Ein bilanzieller Bezug von Biogas ist über das Erdgasnetz möglich.
Biomasse (TRL 9)	- Die Befeuerung von Thermoöl-Systemen mit Biomasse, wie z.B. Holzpellets, und/oder biogenen Abfällen (Brotreste, etc.) ist möglich. Solche Öfen weisen jedoch höhere Investitionskosten auf, haben einen höheren Wartungsaufwand und die Verbrennungskontrolle ist aufwendiger. [31] - Dennoch sind biomassebefeuerte Öfen, z.B. der Holzbackofen PELLADOR (Backfläche in Praxisanwendung: 65 m²), bereits am Markt erhältlich [157].	Die bisherigen Gasanschlussleistungen werden nicht mehr benötigt. Stattdessen wird Platz für die Lagerung des Brennstoffs benötigt.

16 Handwerkssteckbrief: Fleischer

Bei **Fleischern** bestimmen die Vorgaben zur Kühlkette und Hygiene die Mindestenergieverbräuche. Die überwiegend im Niedertemperaturbereich anfallende Prozesswärme kann größtenteils elektrifiziert werden.

Tabelle 16-1: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]

10.1 Schlachten und Fleischverarbeitung

- 10.11 Schlachten (ohne Schlachten von Geflügel)
z. B. Betrieb von Schlachthäusern, Frisch- und Gefrierfleisch in Schlachtkörpern oder Stücken, ...
- 10.12 Schlachten von Geflügel
z. B. Frisches oder gefrorenes Geflügelfleisch in Einzelportionen, Gewinnung von Federn und Daunen, ...
- 10.13 Fleischverarbeitung
z. B. Getrocknetes, gesalzenes oder geräuchertes Fleisch, Salami, Zervelatwurst, Pasteten, ...

Tabelle 16-2: Betrachtete Gewerbegruppen der Handwerksstatistiken (Nr. nach Handwerksordnung Stand 2021) [35]

V Lebensmittelgewerbe

A 31 Fleischer

Gewerbebezweig A 32 2023 zudem 436 Unternehmen (rechtliche Einheiten) zugeordnet.

16.1 Branchenübersicht: Fleischer

Die im Wirtschaftszweig *Schlachten und Fleischverarbeitung* (WZ 10.1) zusammengefassten Betriebe führen neben dem Schlachten von Geflügel und anderen Tieren auch die Fleischverarbeitung durch. Die Produktpalette des Fleischerhandwerks fokussiert sich auf Zwischen- und Endprodukte für Verbraucher fokussiert. Dazu zählen neben getrocknetem, gesalzenem und geräuchertem Fleisch auch Salami, Zervelatwurst, Pasteten, Kochschinken und Schmalzfleisch.

Die mit der Handwerksordnung in Zusammenhangstehende Verordnung über die Berufsausbildung zum Fleischer/zur Fleischerin (FleiAusbV 2005) listet u.a. Koch-, Brüh- und Rohwurst, Pökelfleisch und Hackfleisch als Produkte des Fleischerhandwerks [158].

Die Branche in Sachsen

Laut Handwerksstatistik waren 2023 7.854 Personen im Gewerbebezweig Fleischer (A 32) beschäftigt. Diese Zahl ist jedoch rückläufig: 2020 wurden noch 8.241 Beschäftigte erfasst. Dies entspricht einem Rückgang von 5 % in 3 Jahren. In der Handwerksstatistik wurden dem

In der Statistik des verarbeitenden Gewerbes (Unternehmen mit mehr als 19 Beschäftigten) wurden 2.853 tätige Personen (Stand 30.09.2023) der Unterklasse *Fleischverarbeitung* (WZ 10.13) zugerechnet. Diese ist damit die relevanteste Unterklasse der von *Schlachten und Fleischverarbeitung* (WZ 10.1) in Sachsen, für die 4.263 tätige Personen erfasst wurden. Beide Zahlen sind von 2023 auf 2024 gestiegen und betrugen zum 30.09.2024 2.863 für WZ 10.13 und 4.325 für WZ 10.1.

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich primär auf die Handwerksstatistik und den Gewerbebezweig Fleischer (A 32).

Status quo und Herausforderungen

Bezüglich des durchschnittlichen Energieverbrauchs von handwerklichen Fleischereien sind unterschiedliche Angaben zu finden. Die ASEW GbR gibt als durchschnittlichen Energieverbrauch 0,7 – 0,8 kWh/kg Ware (Fleischmenge) bzw. zwischen 150 und 230 kWh/m² Betriebsfläche an [159]. Die MIE nennt als durchschnittlichen Energieverbrauch 2,5 kWh/kg Fleischverbrauch und als beispielhaften Endenergieverbrauch einer Fleischerei 94 MWh/a [160].

Fleischer müssen keine CO₂-Emissionszertifikate im EU-ETS kaufen. In der öffentlichen Wahrnehmung spielen die durch die geschlachteten Tiere während ihres Lebens verursachten Emissionen eine zusätzliche Rolle. Tabelle 16-3 gibt einen Überblick der relevanten Kennzahlen des sächsischen Fleischerhandwerks. Der Umsatz liegt auf einem vergleichbaren Niveau wie der des Bäckerhandwerks. Jedoch zählt das Bäckerhandwerk etwa doppelt so viele Unternehmen und beschäftigte Personen. Entsprechend wird in der Handwerksstatistik bei den Fleischern auch ein höherer Umsatz je tätiger Person erfasst.

Tabelle 16-3: Kennzahlen der sächsischer und Fleischer entsprechend der Handwerksstatistik (2023) [36]

Endenergieverbrauch (2022)	k.A.
... davon fossiler Anteil	k.A.
... davon Strom	k.A.
Anzahl Betriebe (≥20 Besch.)	436
... davon Betriebe ≥50 Beschäftigte	k.A.
Anzahl Beschäftigte	7.854
... davon in Betrieben ≥50 Besch.	k.A.
Gesamtumsatz	915 Mio. €/a
... davon Auslandsumsatz	k.A.
CO₂-Emissionen (2022)	k.A.
(energetisch bedingt, Scope 1)	

Abbildung 16-1 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Betriebe und Beschäftigten die dem Gewerbe­zweig Fleischer (A 32) zugeordnet sind, 2020 bis 2023. die Anzahl der Betriebe kontinuierlich gesunken ist und sich von 488 auf 465 verringert hat, ist die Zahl der Beschäftigten zwischenzeitlich angestiegen. 2023 lag die Zahl

der Beschäftigten mit 7.854 schließlich aber auch unter dem Beschäftigtenstand von 2020 (8.241).

16.2 Prozesse im Status quo: Fleischer

Fleischer benötigen etwa 50 % des bezogenen Stroms für die Kühlung. Um die vorgeschriebenen Kühlketten aufrecht zu erhalten, müssen die Kühlgeräte die benötigten Temperaturen dauerhaft bereitstellen. Dazu werden vorwiegend strombetriebene Kompressionskältemaschinen eingesetzt.

Im Bereich der Kühlung macht die 2024 erlassene Verordnung (EU) 2024/573 über fluorierte Treibhausgase Unternehmen neue Vorgaben über den Einsatz von Kältemitteln [161]. Die Verordnung soll dazu führen, dass klimafreundlichere Kältemittel, wie z.B. Propan (R290) oder CO₂, vermehrt eingesetzt werden. Diese führen jedoch ggf. zu höheren Sicherheits- und Brandschutzanforderungen und damit höheren Kosten infolge baulicher Maßnahmen. Die Höhe dieser ist unternehmensspezifisch und hängt u.a. von Einsatzort, Alter und Art der Kühlgeräte ab.

Elektrisch betriebene Maschinen, wie z.B. Fleischwolf oder Transport- und Fördersysteme, führen dazu, dass die Verarbeitung etwa 30 % des eingesetzten Stroms benötigt. /MIE-Fleischerei/

Wärmeseitig sind Verarbeitungsprozesse, wie das Kochen, Räuchern und Backen, mit ebenfalls ca. 50 % führend. Die benötigten Temperaturniveaus beim Kochen sind dabei produktspezifisch. Bei Würsten liegen sie im Bereich von 70 bis 90 °C, die bis zu 200 Minuten

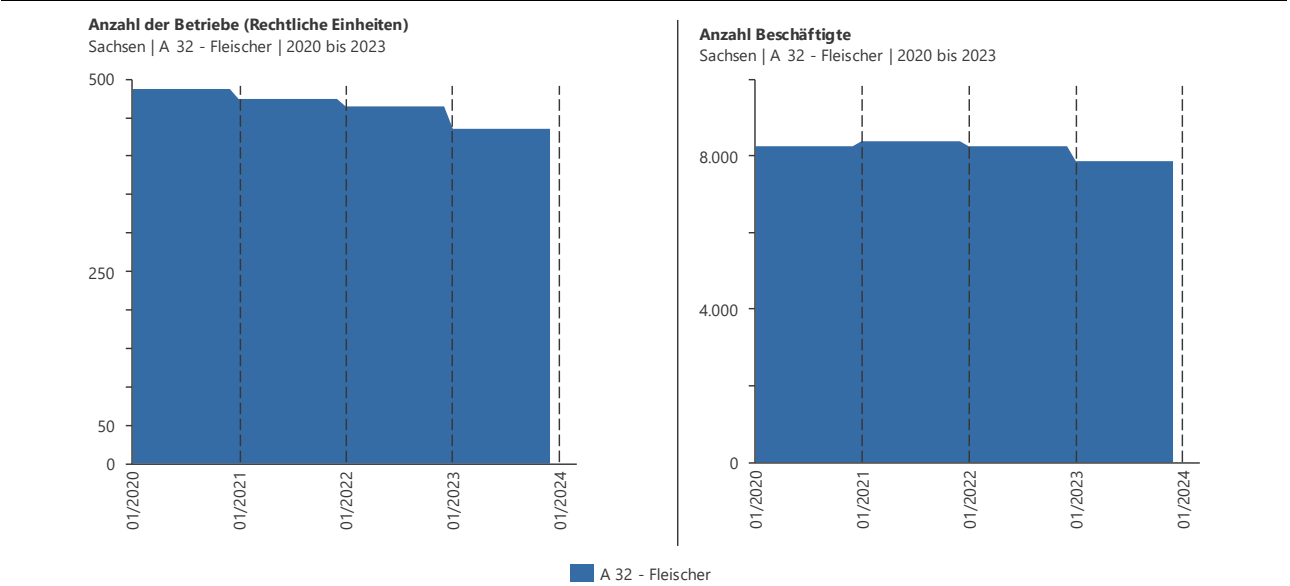


Abbildung 16-1: Anzahl der Betriebe (Rechtliche Einheiten) und Beschäftigten im sächsischen Gewerbe­zweig Fleischer von 2020 bis 2023 [36].

gehalten werden müssen. Dabei kommen sowohl Kochkessel (Volumen von 200 bis 1.000 Liter) als auch Kochschränke bzw. -kammern zum Einsatz. Die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser folgen mit zusammen 40 %. [160]

Beim Pökeln werden Fleischwaren mit Kochsalz, Natrium- oder Kaliumnitrat behandelt, um deren Haltbarkeit zu erhöhen und den Geschmack einzustellen [162]. Gepökelte oder gesalzene Fleischwaren können anschließend geräuchert werden. Zum Räuchern wird der Rauch von Holzfeuern eingesetzt. Beim Kalträuchern von z.B. Pökelfleisch oder Schinken wirkt dieser über Zeiträume von mehreren Tagen bis wenigen Wochen mit 12 bis 18 °C ein. Die Temperaturen beim Heißräuchern, das nur wenige Stunden dauert, liegen im Bereich von 70 bis 100 °C. [163]

16.3 Transformationstechnologien: Fleischer

Die **Fleischer** setzen bereits verschiedene Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung und damit zur indirekten Emissionsminderung ein. Dazu gehören bspw.:

- Wärmerückgewinnung,
- Nutzung von Photovoltaik und Solarthermie auf den Dachflächen,
- Isolation von Kühl- und Gefrieranlagen und Installation von Kälteschutzvorhängen,
- Bedarfsabhängige Regelung von Kälteerzeugung und -verteilung
- Optimierung von Kochtemperaturen und -vorgängen, z.B. durch Reduzierung der Wassermengen in Töpfen [164], oder
- Einsatz von LED Beleuchtung.

Weiterführende Informationen zu Energieeffizienzmaßnahmen in Fleischereien sind unter https://cms.energieeffizienz-handwerk.de/resources/downloads/50193/steckbrief_fleischerei.pdf und <https://www.stwab.de/Klimaschutz/Energie-sparen/Energiespartipps/Energiespartipps/Broschuere-Fleischerei.pdf> zu finden. Berücksichtigt werden muss in dieser Branche jedoch, dass Einsparungen beim Energie- und auch Wasserverbrauch teils durch Lebensmittelsicherheit- und Hygieneanforderungen limitiert sind [165].

Tabelle 16-5 und Tabelle 16-5 gibt einen Überblick über die Transformationstechnologien für Fleischer. Bei den Elektrifizierungsmaßnahmen ist die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung für das Unternehmen - sofern der bestehende Stromanschluss über die erforderliche Kapazitätsreserve verfügt - über eine

Anpassung des bestehenden Vertrages möglich. Ist die zusätzlich erforderliche Anschlussleistung mit dem bestehenden Stromanschluss nicht darstellbar, muss mit dem zuständigen VNB abgestimmt werden, wie die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung ermöglicht werden kann. In der Regel gehen damit Bauleistungen zur Ertüchtigung bzw. Erweiterung der elektrischen Betriebsmittel (z.B. neuer Transformator, neue Mittelspannung- bzw. Niederspannung- Einspeisung) einher. Dabei müssen u.a. mögliche technische Lösungen, der finanzielle Aufwand (ggf. mit Baukostenzuschuss), der Zeithorizont und ggfs. nötiger zusätzlicher Platzbedarf berücksichtigt werden.

Tabelle 16-4: Transformationstechnologien für Fleischer. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Vollelektrische Lieferfahrzeuge (TRL 9)	• Transporte sind sowohl bei der Belieferung der Schlachtereien als auch zur Belieferung der Filialen relevant. • Die hier eingesetzten Fahrzeuge können auf solche mit elektrischem Antrieb umgestellt werden. • Da die Belieferung meist auf lokaler oder regionaler Ebene erfolgt, hält sich die Reichweitenproblematik in Grenzen. Zudem bietet sich die Möglichkeit, batterieelektrische Fahrzeuge beim Be- und Entladen an der Schlachtereie und den Filialen bzw. der Metzgerei zu laden.	Zum Laden der elektrischen Lieferfahrzeuge können höhere Anschlussleistungen an Schlachtereie und Filiale nötig sein.
Elektrokessel (TRL 9)	• Elektrokessel verfügen über einen Heizwiderstand und werden überwiegend mit Niederspannung betrieben. • Gängige Modelle zur Heißwassererzeugung bieten Leistungen im Bereich von 0,1 bis ca. 10 MW bei Betriebsdrücken von 6 - 25 bar [64]. Für handwerkliche Betriebe sind Leistungen unter 1 MW jedoch üblicherweise ausreichend. • Der Umwandlungswirkungsgrad von Strom in Wärme liegt bei 100 % [65]. • Die Investitionskosten liegen im Bereich von 125 – 350 €/kW (2014) [12], [65]. • Zudem weisen Elektrokessel Möglichkeiten zur Hybridisierung und Flexibilisierungspotenzial auf.	In der Regel ist eine Erhöhung der Anschlussleistung für Strom notwendig. Die Kosten dafür liegen bei 25 – 150 €/kWh (2014) [12].
Wärmepumpen für Raumwärme (TRL 9)	• Kompressionswärmepumpen stellen die am weitesten verbreitete Bauform zur Bereitstellung von Raumwärme dar [63]. • Wärmepumpen zur Beheizung und Warmwasserbereitung in Nichtwohngebäuden decken ein breites Leistungsspektrum ab. Heizleistungen von über 2 MW sind möglich [57]. Im Handwerk sind jedoch meist Anlagen mit Leistungen im dreistelligen kW-Bereich ausreichend. • Der COP hängt von der Quellen- und Vorlauftemperatur ab. Der COP von am Markt verfügbaren WP liegt je nach Betriebspunkt im Bereich von 2 bis 5, wobei ein COP von mindestens 3 im Normalbetrieb üblich ist [58]. • Die Investitionskosten hängen mit der Anlagengröße, -leistung und Bauart zusammen. Die spezifischen Kosten einer Luft-Wasser-WP liegen im Bereich von 1.080 – 2.240 €/kWth (2025), wobei diese mit steigender Leistung abnehmen. [59] • Bäckereien befinden sich jedoch oftmals in größeren Supermärkten oder Einkaufsgebäuden, die über ein zentrales Heizsystem versorgt werden. Dies kann die Umrüstung auf eine Wärmepumpe behindern.	Der Strombedarf ist abhängig vom Volumen der Gebäude sowie deren energetischen Zustand. Gegebenenfalls können zusätzliche Stromanschlussleistungen benötigt werden. Substitution des zuvor verwendeten Energieträgers.

Tabelle 16-5: Transformationstechnologien für Fleischer. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Elektrische Räucher- kammer (TRL 9)	- Elektrische Räucher- kammern ermöglichen eine einfache Steuerung der Temperatur, was die kontrollierte Färbung und Trocknung von Lebensmitteln erleichtert [197]. - Über separate Fächer, in denen zusätzlich Holz verbrannt werden kann, kann der bekannte Räuchergeschmack erzeugt werden [197]. - Standardgeräte fassen Fleischmengen im mittleren zweistelligen Kilo-Bereich und verfügen über Anschlussleistungen im einstelligen kW-Bereich [166].	Der Strombedarf ist abhängig vom Volumen der Räucher- kammer. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Anschlussleistungen resultieren im Allgemeinen keine Auswirkungen auf die Energieinfrastruktur.

17 Handwerkssteckbrief: Textilreiniger

Je nach Verfahren muss in der **Textilreinigung** Heißwasser und/oder Dampf im Nieder- bis Mitteltemperaturbereich bereitgestellt werden. Die Dekarbonisierung erfolgt bevorzugt mit Elektrifizierungsmaßnahmen.

Tabelle 17-1: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]

77.2 Vermietung von Gebrauchsgütern

77.29 Vermietung von sonstigen Gebrauchsgütern

z. B. Textilien, Bekleidung, Schuhe, Möbel, Keramik und Glaswaren, Küchen- und Tischgeschirr

96.01 Wäscherei und chemische Reinigung

Waschen, chemisches Reinigen, Bügeln usw. jeder Art von Bekleidung und anderen Textilien

z. B. maschinell, von Hand oder durch Bereitstellung münzbetriebener Automaten

Annahme, Abholen und Ausliefern von Wäschestücken

Shampoonieren von Teppichen und Läufern, Reinigung von Vorhängen und Gardinen

Bereitstellung von Wäsche, Arbeits- und Berufskleidung

Windelwaschdienste

Tabelle 17-2: Betrachtete Gewerbegruppen der Handwerksstatistiken (Nr. nach Handwerksordnung Stand 2021) [35]

VII Handwerke für den privaten Bedarf

B 31 Textilreiniger

17.1 Branchenübersicht: Textilreiniger

Nach WZ-2008 fallen Textilreiniger in die Unterklasse *Wäscherei und chemische Reinigung (WZ 96.01)*. Der Deutsche Textilreinigungs-Verband (DTV) e.V. weist jedoch darauf hin, dass Unternehmen der Branche, die im Bereich Textile Service (Textilien sind im Besitz des Unternehmens und werden von diesem z.B. vermietet) tätig sind, auch der Unterklasse *Vermietung von sonstigen Verbrauchsgütern (WZ 77.29)* zugerechnet werden [167]. Die Vermietung von Textilien, Bekleidung und Schuhen wird hier explizit erwähnt. In der Handwerksstatistik werden Textilreiniger als eigener Gewerbebezweig erfasst und zählen zu den zulassungsfreien Handwerken [35].

Die als Textilreiniger zusammengefassten Unternehmen führen neben Textilreinigungen für private

Kleidung u.a. auch die Sterilisation von medizinischen Textilien im Gesundheitswesen und die hygienische Reinigung von Textilien aus dem Gastgewerbe durch [168].

Die Textilreinigung produziert keine Waren für Kunden. Stattdessen handelt es sich um ein reines Dienstleistungsgewerbe. Die angebotenen Dienstleistungen richten sich dabei sowohl an private als auch an gewerbliche Kunden. Zu den Kunden und angebotenen Dienstleistungen gehören

- die Reinigung von privater Kleidung, wie z.B. Jacken, Anzüge und Abendkleider,
- Reinigungsdienstleistungen für das Gastgewerbe, z.B. von Bettwäsche oder Tischdecken,
- die Sterilisation und Reinigung von medizinischen Textilien und Arbeitskleidung,
- das Reinigen und Vermieten von Textilien.

Die mit der Handwerksordnung in Zusammenhang stehende Verordnung über die Berufsausbildung zum Textilreiniger/zur Textilreinigerin (TexRAusbV 2002) nennt u.a. das Vorbereiten und Vorbehandeln des Behandlungsgutes, das Einstellen, Bedienen und Überwachen von Wasch- und Reinigungsmaschinen sowie von Wasch- und Reinigungsanlagen, das Nachbehandeln und Finishen des Behandlungsgutes und das Anwenden von Desinfektionsverfahren und Durchführen von Hygienemaßnahmen als Tätigkeiten des Textilreinigerhandwerks [169].

Die Branche in Sachsen

Textilreiniger entsprechen dem Gewerbe­zweig B 31 der zulassungsfreien Handwerke. In Sachsen sind 1.407 Beschäftigte (Stand 2023) darin tätig. Diese verteilen sich 2023 auf 93 Betriebe.

Status quo und Herausforderungen

Den Endenergieverbrauch der Branche zu beziffern ist basierend auf der verfügbaren Datenlage nicht möglich. In Sachsen werden keine separaten Daten für die Unterklasse *Wäscherei und chemische Reinigung (WZ 96.01)* erhoben, sondern nur für den WZ 96 als Ganzes. Für die Unterklasse *Vermietung von sonstigen Verbrauchsgütern (WZ 77.29)* werden zwar separate Daten erhoben, in diese Klasse fällt jedoch auch die Vermietung von nicht-textilen Gebrauchsgütern, wie beispielsweise Möbel, Schmuck, Musikinstrumente oder Pflanzen. Der DTV weist daher darauf hin, dass die Anteile der Textilreiniger hier praktisch nicht zu bestimmen sind.

Aufgrund der energieintensiven Maschinen gehören Textilreinigungen und Wäschereien zu den energieintensiven Gewerken. Dies äußert sich dadurch, dass bei Textilreinigern die Energiekosten durchschnittlich 10 – 15 % ihres Jahresumsatzes betragen. Die Bereitstellung von Prozesswärme, für die 85 – 90 % der Energie aufgewendet werden, entfällt größtenteils auf Prozessdampf. [168]

Die energetisch bedingten CO₂-Emissionen in Scope 1 können aufgrund der nicht zur Verfügung stehenden Endenergieverbrauchs der Branche in Sachsen ebenfalls nicht angegeben werden. Textilreiniger müssen jedoch keine CO₂-Emissionszertifikate im EU-ETS kaufen. Tabelle 17-3 gibt einen Überblick der relevanten Kennzahlen der sächsischen Textilreinigung. Im Vergleich zu den Bäckern und Fleischern ist das Textilreinigerhandwerk in Sachsen sowohl bzgl. der Anzahl an Unternehmen als auch Beschäftigten deutlich kleiner. Dies spiegelt sich auch im Umsatz wider. Zudem zählt das Textilreinigerhandwerk zu den zulassungsfreien Handwerken.

Tabelle 17-3: Kennzahlen der sächs. Textilreiniger entsprechend der Handwerksstatistik (2023) [36]

Endenergieverbrauch (2022)	k.A.
... davon fossiler Anteil	k.A.
... davon Strom	k.A.
Anzahl Betriebe (≥20 Besch.)	93
... davon Betriebe ≥50 Beschäftigte	k.A.
Anzahl Beschäftigte (Betriebe ≥20 Beschäftigte)	1.407
... davon in Betrieben ≥50 Besch.	k.A.
Gesamtumsatz	73 Mio. €/a
... davon Auslandsumsatz	k.A.
CO₂-Emissionen (2022) (energetisch bedingt, Scope 1)	k.A.

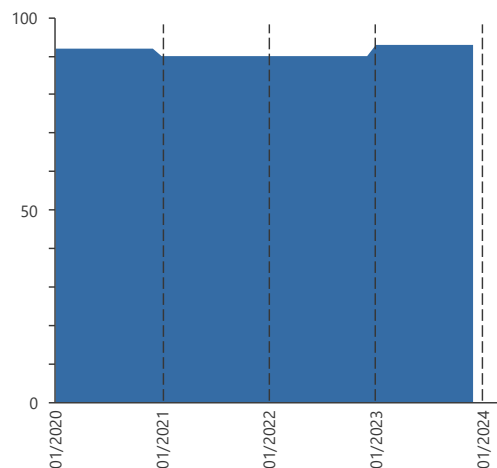
Abbildung 17-1 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) seit 2020. Die Anzahl der Beschäftigten in diesem Gewerbe­zweig ist von 2020 (1.363 tätige Personen) bis 2023 um 3,2 % gestiegen ist. Im Vergleich zu den 1.449 erfassten Beschäftigten in 2022 ist die Zahl jedoch rückläufig. Die Zahl der rechtlichen Einheiten (Unternehmen) hat sich von 2020 bis 2023 von 92 um 1 auf 93 erhöht.

17.2 Prozesse im Status quo: Textilreiniger

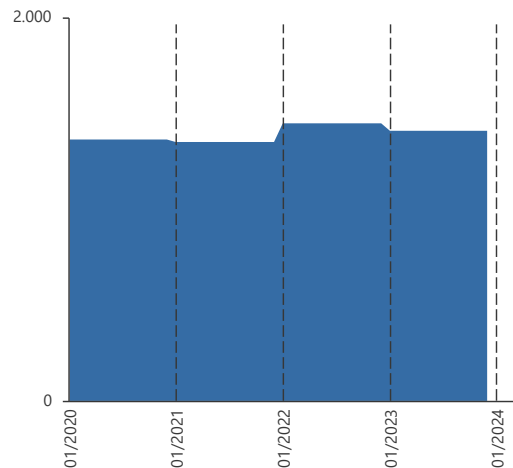
Textilreiniger benötigen in verschiedenen Prozessschritten Energie. Welche Prozessschritte durchlaufen werden, hängt wesentlich von der Art der zu reinigenden Textilien ab.

Am Beginn eines des Prozesses der Nassreinigung steht für gewöhnlich das Waschen, wobei häufig Waschschleudermaschinen zum Einsatz kommen. Gängige Heißwassertemperaturen solcher Maschinen liegen im Bereich von bis zu 90 °C [170]. Für besondere Anforderungen an die Reinigung werden Destillations-, Filter- und Sprühmaschinen eingesetzt [171]. Abhängig davon, welche Textilien bzw. Wäsche gereinigt wird, schließen nun unterschiedliche Prozessschritte an. Feuchte Trockenwäsche, wozu u.a. Daunendecken gehören, werden anschließend in einem Trockner vollgetrocknet. Die Wärmeerzeugung kann dabei über Strom, Dampf, Gas oder eine Wärmepumpe erfolgen. Die Trocknungsvorgänge finden üblicherweise bei Temperaturen zwischen ca. 40 und 90 °C statt [172].

Anzahl der Betriebe (Rechtliche Einheiten)
Sachsen | B 31 - Textilreiniger | 2020 bis 2023



Anzahl Beschäftigte
Sachsen | B 31 - Textilreiniger | 2020 bis 2023



■ B 31 - Textilreiniger

Abbildung 17-1: Anzahl der Betriebe (rechtliche Einheiten) und Beschäftigten im sächsischen Gewerbegebiet Textilreiniger von 2020 bis 2023 [36].

Bei der **Trockenreinigung** (auch chemische Reinigung) werden Lösungsmittel wie Perchlorethylen oder Kohlenwasserstoffe statt Wasser verwendet. Dadurch werden die Fasern nicht angegriffen, weshalb sich diese Methode für empfindliche Kleidung wie Anzüge oder Abendkleider eignet. [173]

Feuchte Formwäsche, wie z.B. Hemden, Hosen oder Sakkos, werden mithilfe von Spezialgeräten geformt und getrocknet. Hier kommen sowohl hochspezialisierte Geräte für einen einzelnen Anwendungsfall als auch flexiblere Universalgeräte zum Einsatz. Um die gewünschte Form der Textilien zu erreichen, wird meist mit Gestellen und Gebläsen gearbeitet. Die Trocknung erfolgt üblicherweise per Dampf mit einem Druck im Bereich von 4 bis 7 bar [198] [199]. Dies entspricht Temperaturen im Bereich von ca. 140 bis 160 °C [174].

Feuchte Flachwäsche wird Mangeln zugeführt. In diesen Geräten werden die Textilien sowohl getrocknet als auch geglättet. Bei Mangeln handelt es sich um Geräte für industrielle Anwendungen. Auch hier stehen zur Prozesswärmebereitstellung verschiedene Optionen zur Verfügung. Diese beeinflussen auch die möglichen Arbeitstemperaturen der Mangel. Ölbefeuerte Mangeln können bis zu 230 °C erreichen, wohingegen Dampfheizungen nur bis 190 °C (12 bar) erreichen [175].

Kleidungsstücke werden teils auch gebügelt. Dazu werden Bügeleisen, Bügeltisch und Dampferzeuger benötigt. Die Bügeltische können dabei über eine Absaug- und Blasfunktion (elektrisch) sowie eine Beheizung (Dampf) verfügen. Die Dampferzeugung findet dabei entweder direkt am Bügeltisch oder an einem

zentralen Dampferzeuger statt. Gängige Dampfdruckniveaus liegen im Bereich von 2,5 bis 5 bar, was einem Temperaturfenster von ca. 125 bis 150 °C entspricht. Höhere Dampfdrücke bzw. Temperaturen werden üblicherweise über zentrale Dampferzeuger bereitgestellt.

Abbildung 17-2 gibt einen Überblick über die Prozesskette des Nassreinigens in der Textilreinigung.

17.3 Transformationstechnologien: Textilreiniger

Die **Textilreiniger** setzen bereits u.a. folgende Maßnahmen zur Energieeffizienz und damit zur indirekten Emissionsminderung um:

- Waschmaschinen mit integrierten Waagen zur automatischen Anpassung der Wasserzufuhr,
- Wärmerückgewinnung (z.B. Vorwärmung des Waschwassers über Abwärme), oder
- Kaltbügeltische statt beheizter Bügeltische.

Weiterführende Informationen zu Energieeffizienzmaßnahmen in Textilreinigungsunternehmen sind unter <https://www.energieeffizienz-handwerk.de/ge-werk/waescherei> und <https://www.dtv-deutsch-land.org/files/downloads/Energiesparhandbuch.pdf> zu finden.

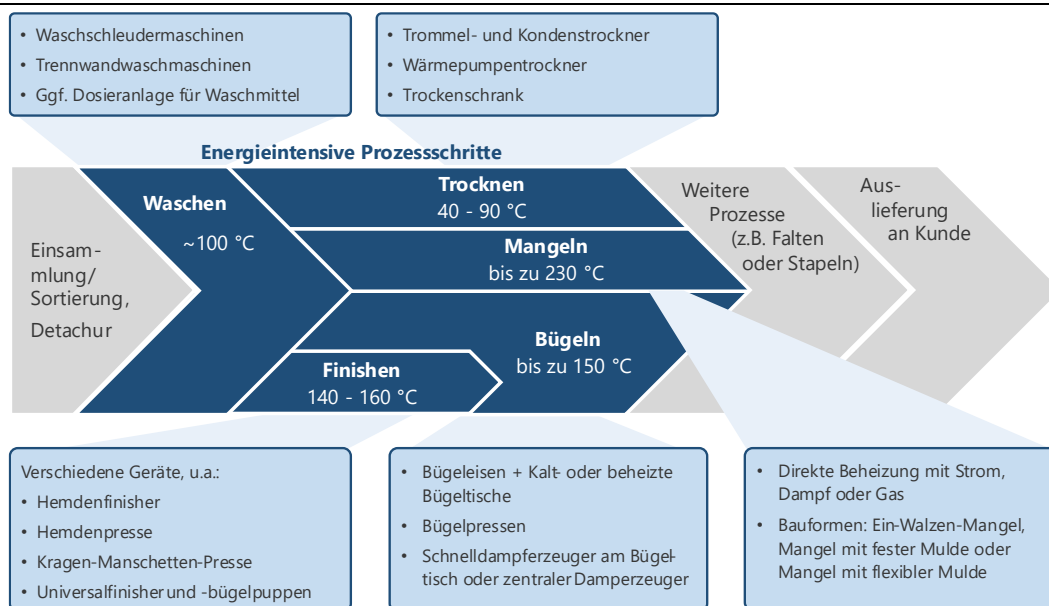


Abbildung 17-2: Energieintensive Prozesse/-schritte in der Prozesskette des Nassreinigens im Status quo [168], [176].

Für eine (nahezu) vollständige Vermeidung der CO₂-Emissionen sind derzeit zwei Möglichkeiten absehbar:

- Energieträgerwechsel zu Strom (Elektrifizierung), oder
- Energieträgerwechsel zu emissionsfreien Brennstoffen (Brennstoffwechsel).

Berücksichtigt werden muss in dieser Branche jedoch, dass für die Energiekosten bereits ein beträchtlicher Teil des Jahresumsatzes aufgewendet wird. Günstiger Strom ist daher insbesondere für die Elektrifizierung entscheidend.

Tabelle 17-5 und Tabelle 17-5 geben einen Überblick über die Transformationstechnologien für Textilreiniger. Da Hochtemperaturprozesse in der Branche nicht relevant sind, ist die Elektrifizierung gegenüber dem Brennstoffwechsel der naheliegendere Transformationspfad. Bei den Elektrifizierungsmaßnahmen ist die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung für das Unternehmen, sofern der bestehende Stromanschluss über die erforderliche Kapazitätsreserve verfügt, über eine Anpassung des bestehenden Vertrages möglich. Ist die zusätzlich erforderliche Anschlussleistung mit dem bestehenden Stromanschluss nicht darstellbar, muss mit dem zuständigen VNB abgestimmt werden, wie die Erhöhung der elektrischen Anschlussleistung ermöglicht werden kann. In der Regel gehen damit Bauleistungen zur Ertüchtigung bzw. Erweiterung der elektrischen Betriebsmittel (z.B. neuer Transformator, neue Mittelspannung- bzw. Niederspannung- Einspeisung) einher. Dabei müssen u.a. mögliche technische Lösungen, der finanzielle Aufwand (ggf. mit Baukostenzuschuss), der Zeithorizont und ggf. nötiger zusätzlicher Platzbedarf berücksichtigt werden.

Tabelle 17-4: Transformationstechnologien für Textilreiniger. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Wärmepumpen (für Raumwärme) (TRL 9)	• Kompressionswärmepumpen stellen die am weitesten verbreitete Bauform zur Bereitstellung von Raumwärme dar [63]. • Wärmepumpen zur Beheizung und Warmwasserbereitung in Nichtwohngebäuden decken ein breites Leistungsspektrum ab. Heizleistungen von über 2 MW sind möglich [57]. Im Handwerk sind jedoch meist Anlagen mit Leistungen im dreistelligen kW-Bereich ausreichend. • Textilreiniger können Wärmepumpen auch für Prozesswärme, z.B. beim Waschen, nutzen. Unternehmensinterne Abwärmequellen sollten priorisiert werden. • Der COP hängt von der Quellen- und Vorlauftemperatur ab. Der COP von am Markt verfügbaren WP liegt je nach Betriebspunkt im Bereich von 2 bis 5, wobei ein COP von mindestens 3 im Normalbetrieb üblich ist [58]. • Die Investitionskosten hängen mit der Anlagengröße, -leistung und Bauart zusammen. Die spezifischen Kosten einer Luft-Wasser-WP liegen im Bereich von 1.080 – 2.240 €/kWth (2025), wobei diese mit steigender Leistung abnehmen. [59]	Der Strombedarf ist abhängig vom Volumen der Gebäude sowie deren energetischen Zustand. Gegebenenfalls können zusätzliche Stromanschlussleistungen benötigt werden. Substitution des zuvor verwendeten Energieträgers.
Elektrokessel (TRL 9)	• Elektrokessel verfügen über einen Heizwiderstand und werden überwiegend mit Niederspannung betrieben. • Gängige Modelle zur Heißwassererzeugung bieten Leistungen im Bereich von 0,1 bis ca. 10 MW bei Betriebsdrücken von 6 - 25 bar [64]. Für handwerkliche Betriebe sind Leistungen unter 1 MW jedoch üblicherweise ausreichend. • Der Umwandlungswirkungsgrad von Strom in Wärme liegt bei 100 % [65]. • Die Investitionskosten liegen im Bereich von 125 – 350 €/kW (2014) [12], [65]. • Zudem weisen Elektrokessel Möglichkeiten zur Hybridisierung und Flexibilisierungspotenzial auf.	In der Regel ist eine Erhöhung der Anschlussleistung für Strom notwendig. Die Kosten dafür liegen bei 25 – 150 €/kWh (2014) [12].
Elektroden-dampfkessel (TRL 9)	• Elektrodenkessel decken einen breiten Leistungsbereich ab. Geräte mit 50 kW sind ebenso verfügbar wie Anlagen mit bis zu 90 MW /ISI-04 23P/, [65]. Für handwerkliche Betriebe sind Leistungen unter 1 MW jedoch i.d.R. ausreichend. • Der Wirkungsgrad von Elektrodenkesseln liegt typischerweise im Bereich von 99 % [56]. • Möglichkeiten zur Hybridisierung und bivalenten Nutzung.	Zusätzliche Stromanschlussleistungen werden benötigt. Die benötigten Gasanschlussleistungen können sinken.

Tabelle 17-5: Transformationstechnologien für Textilreiniger. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.

Maßnahme	Beschreibung	Anforderungen an die Energieinfrastruktur
Elektrifizierung		
Vollelektrische Lieferfahrzeuge (TRL 9)	• Transporte sind sowohl im Bereich Textile Services als auch Textilreiniger, deren Wäscherei und Filiale sich an unterschiedlichen Orten befinden relevant. • Die hier eingesetzten Fahrzeuge können auf solche mit elektrischem Antrieb umgestellt werden. • Da die Belieferung meist auf lokaler oder regionaler Ebene erfolgt, hält sich die Reichweitenproblematik in Grenzen. Zudem bietet sich die Möglichkeit, batterieelektrische Fahrzeuge beim Be- und Entladen an der Wäschereien und den Filialen bzw. beim Kunden zu laden.	Zum Laden der elektrischen Lieferfahrzeuge können höhere Anschlussleistungen an Schlachtereien und Filiale nötig sein.
Brennstoffwechsel		
Biomasse (TRL 9)	• Die energetische Nutzung von Biomasse ist technisch möglich. Zu beachten sind Nachhaltigkeitsanforderungen (bspw. bzgl. Herkunft der Biomasse) sowie eine zunehmende Nutzungskonkurrenz um die begrenzten Ressourcen welche den Preis bestimmen. • Pelletkessel bedingen jedoch im allgemeinen höhere Kosten, die neben dem Kessel selbst auch durch das Pelletlager und die Transportvorrichtung verursacht werden [177]. • Eine beispielhafte Anlage eines Textilreinigers (Zweizug-Großraumwasserkessel mit vorgeschalteter Holzpelletfeuerung) verfügt über eine Nennwärmeleistung von 2 MW Satteldampf bei einem Betriebsdruck von 12 bar [178]. • Bei der Nutzung von Biomasse im Bereich der Textilreinigung ist die Rauchgasreinigung von besonderer Bedeutung. Funkenabscheider und Gewebefilter stellen eine Möglichkeit dar [178].	Bei Einsatz fester Biomasse reduziert sich die bisherige Gasanschlussleistung.

18 Break-Even-Rechnungen: Beispielhafte Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung nach der Kapitalwertmethode ermöglicht eine ganzheitliche Bewertung von Investitionen über den Amortisationszeitraum hinaus. Sie ermöglicht es eigenständige Sensitivitäten zu berechnen und bildet damit eine robuste Grundlage zur Bewertung von Investitionsentscheidungen.

Nach einer Einführung in die Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnung soll die Kapitalwertmethode anhand ausgewählter Praxisbeispiele und Sensitivitäten angewandt werden, um Investitionsentscheidungen bezüglich ihrer Wirtschaftlichkeit und des Break-Even-Punktes zu bewerten.

18.1 Überblick zu Methoden der Wirtschaftlichkeitsbewertung

Grundsätzlich unterscheiden sich die Methoden zur Wirtschaftlichkeitsbewertung in zwei Gruppen.

- **Statische Verfahren** bewerten Investitionen anhand einer durchschnittlichen Periode (bspw. durchschnittliche Kosten und Erlöse) ohne Berücksichtigung des Zeitpunkts einer Zahlung. Sie sind relativ einfach anwendbar, jedoch lediglich für Näherungswerte oder Investitionen mit geringem Volumen geeignet.
- **Dynamische Verfahren** sind State-of-the-Art bei hohen Investitionsvolumina. Sie berücksichtigen die Zeitpunkte von Ein- und Auszahlungen (sog. Zeitwert des Geldes) und haben damit einen höheren Berechnungsaufwand, der sich allerdings in genaueren Ergebnissen und damit fundierteren Investitionsentscheidungen auswirkt.

Dynamische Verfahren zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit sind damit eindeutig von Vorteil. Sie berücksichtigen die gesamte Investitionslaufzeit und zinst die anfallenden Ein- und Auszahlungen entsprechend des Zeitpunkts der Zahlung auf bzw. ab. Zu den dynamischen Verfahren gehören beispielsweise die **dynamische Amortisationsrechnung**, welche die (dynamische) Amortisationszeit unter Berücksichtigung von Zinsen berechnet, oder die **Annuitätenmethode**, welche die Investition und resultierende Kosten und Erlöse in ein konstantes jährliches Einkommen bzw. jährliche Zahlung überführt.

Grundlage aller dynamischen Verfahren bildet jedoch die **Kapitalwertmethode**, die den Vermögenszuwachs (Barwert) eines Investitionsprojektes berechnet. Der Barwert (BW) einer Zahlung (C) gibt den heutigen Wert einer Zahlung wieder und wird daher auch Gegenwartswert genannt. Der Barwert einer Zahlung, die zum Zeitpunkt t (in Jahren) anfällt, berechnet sich daher unter Berücksichtigung eines Kalkulationszinssatzes r nach der Gleichung:

$$BW(C_t) = \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

Rechenbeispiel:

Für eine Zahlung von $C_t = 2.000 \text{ €}$ und einem Zinssatz von $r = 10 \text{ %}$ gilt somit:

- **Die Zahlung fällt jetzt an ($t = 0$):**
Der Barwert beträgt 2.000 €.
- **Die Zahlung fällt in einem Jahr an ($t = 1$):**
Der Barwert beträgt 1.818 €.
- **Die Zahlung fällt in zehn Jahren an ($t = 10$):**
Der Barwert beträgt 771 €.

Je weiter eine Zahlung (bzw. Einsparung) in der Zukunft liegt, desto geringer ist der heutige Bar- bzw. Gegenwartswert.

Der Kapitalwert eines Investitionsprojektes berechnet sich aus der Summe der Barwerte aller anfallenden Ein- und Auszahlungen. Ein positiver Kapitalwert gibt damit den heutigen Wert des zu erwartenden Vermögenszuwachses durch die Investition wieder.

18.2 Kapitalwertberechnung nach der VALERI-Norm

In der Praxis wird häufig die statische oder dynamische Amortisationszeit zur Wirtschaftlichkeitsbewertung genutzt. Sie gibt an, wie lange es dauert, bis investiertes Kapital wieder zurückgeflossen ist – also „bis wann sich eine Investition rechnet“. Sie ist damit ein Maß für das Risiko einer Investition, gibt jedoch keine Aussagen zur Rentabilität und berücksichtigt insbesondere die Erträge außerhalb des Amortisationszeitraums nicht. Oft scheitern daher über ihre Lebenszeit gesehen

rentable Maßnahmen, bspw. zur Energieeffizienz, an geforderten, zu kurzen Amortisationszeitvorgaben.

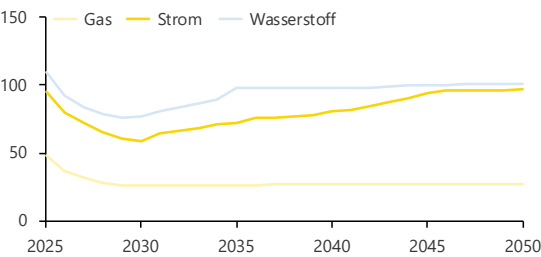
Geeigneter ist daher die Nutzung von Kennzahlen mit Betrachtung der gesamten Lebensdauer einer Investition, wie bspw. die oben beschriebene Kapitalwertmethode. Darauf baut die VALERI-Norm (DIN EN 17463) auf und erweitert die Methodik um weitere relevante Faktoren wie Preissteigerungsraten und Risiken. Sie bildet damit einen ganzheitlichen Ansatz unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien und Parametervariationen. Ursprünglich als Bewertungsmethode für Energieeffizienzmaßnahmen entwickelt (Valuation of Energy Related Investments – VALERI), können die Berechnungsschritte auch auf sonstige Investitionsmaßnahmen angewandt werden.

Kostenfreies Excel-Tool zur Wirtschaftlichkeitsbewertung

Die Bewertung von Investitionsmaßnahmen nach der VALERI-Norm ist zunehmend in Verordnungen wie dem Energieeffizienzgesetz (EnEfG) gefordert. Um Unternehmen den Einstieg in die Wirtschaftlichkeitsbewertung nach VALERI zu erleichtern, stellt die FfE ein kostenfreies Excel-Tool zur Verfügung: www.ffe.de/info-excel-tool

Energieträgerpreise

in €/2024/MWh | FfE-Trendszenario



Netzentgelte

in €/MWh

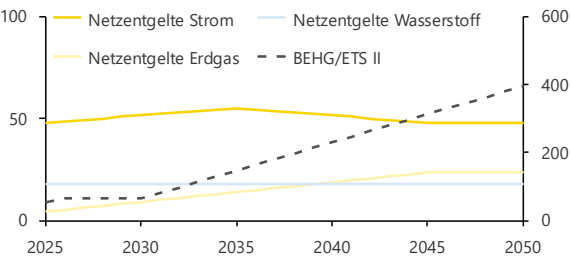


Abbildung 18-1: Grundannahmen bzgl. Energieträgerpreise (oben) und Netzentgelten bzw. BEHG/ETS-II (unten) für die folgenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen.

18.3 Beispielhafte Break-Even-Rechnungen

Nachfolgend sollen anhand drei konkreter Beispiele exemplarische Break-Even- und Kapitalwertberechnungen durchgeführt sowie der Einfluss ausgewählter Sensitivitäten betrachtet werden. Abbildung 18-1 zeigt die zugehörigen Grundannahmen und Preiszeitreihen der Energieträgerpreise, Netzentgelte und des BEHG bzw. ETS-II. Diese basieren auf einer Szenarioberechnung der FfE, welche aktuelle Entwicklungen berücksichtigt (Trendszenario). Die gezeigten Börsenstrompreise sind Ergebnis einer Energiesystemmodellierung, welche die Gas- und Wasserstoffkosten aus [32] nutzen. Die Netzentgelte basieren auf [33] für Strom, [179] und [180] für Erdgas und [181] für Wasserstoff. Als Inflationsrate werden 2 % p.a. angesetzt. Tabelle 18-1 listet weitere Kostenbestandteile auf.

Tabelle 18-1: Berücksichtigte Kostenbestandteile in der Wirtschaftlichkeitsberechnung (als konstant angenommen).

Kostenbestandteil	
Stromsteuer	0,50 €/MWh
Konzessionsabgabe	1,10 €/MWh
KWKG-Umlage	2,99 €/MWh
Strom §19 NEV	0,50 €/MWh
Erdgassteuer	0,50 €/MWh

18.3.1 Wärmepumpe bei variablem Zinssatz

Ausgangssituation: Ein erdgasbefuerter Heizkessel liefert mit ca. 8.000 Betriebsstunden Warmwasser mit einer Vorlauftemperatur von 70 °C für Trocknungsprozesse.

Neuinvestition: Der Heizkessel soll durch zwei Wasser-Wasser-Wärmepumpen (inkl. Bohrung für Brunnenwassernutzung) ersetzt werden.

Tabelle 18-2: Kennzahlen des Erdgaskessels im Vergleich zur Wärmepumpe.

	Referenz: Erdgaskessel	Neuinvestition: Wärmepumpe
Wärmeleistung	250 kW	2 x 125 kW
Nutzungsgrad / COP	85 %	3,5
Betriebsstunden	8.000 h	8.000 h
Durchschnittl. Auslastung	80 %	80 %

Energieverbrauch	1.882 MWh/a (Erdgas)	454 MWh/a (Strom)
Investitionskosten	42.000 €	466.000 €
Jährlich fixe O&M Kosten	1.250 €/a	1.750 €/a

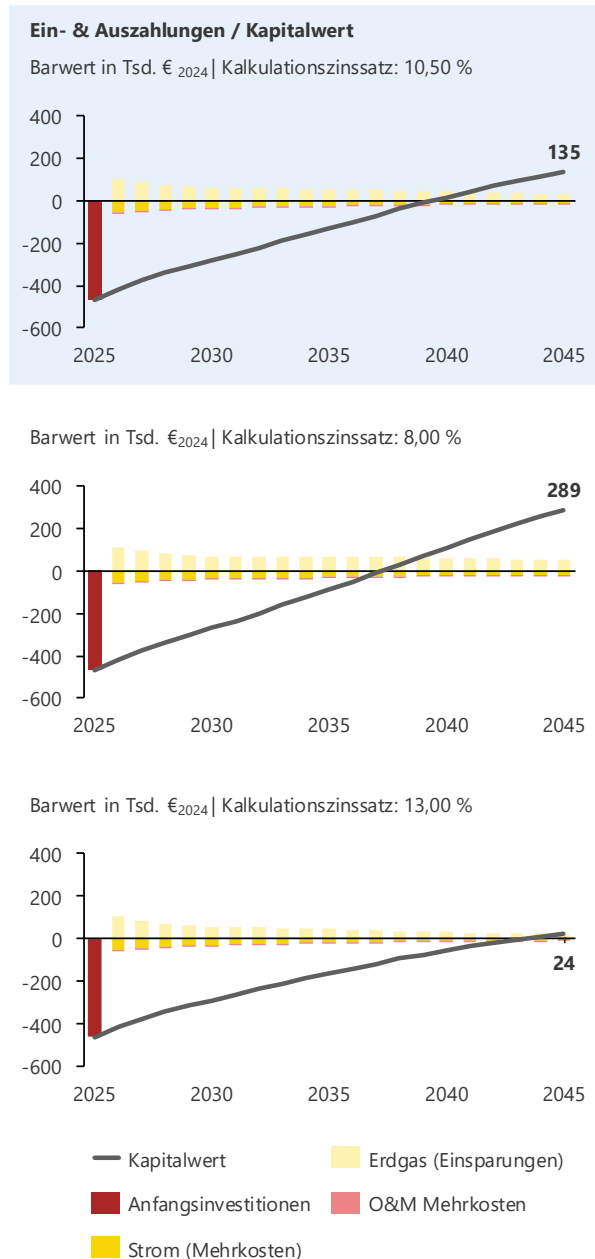


Abbildung 18-2: Kapitalwertberechnung bei Ersatz eines Gaskessels durch Wärmepumpen in Abhängigkeit des angesetzten Kalkulationszinssatzes (oben: 10,50 %; mittig: 8,00 %, unten: 13,00 %).

Die Berechnung des Kapitalwerts erfolgt im gegebenen Beispiel unter Nutzung verschiedener Kalkulationszinssätze. Der Zinssatz repräsentiert die Rendite, die alternativ am Kapitalmarkt bzw. durch alternative Investitionen erzielt werden könnte. Alle

Berechnungen betrachten den Kapitalwert nach einer Lebensdauer von zwanzig Jahren.

Die jährlich eingesparten Kosten für Erdgas übersteigen die neuen Kosten für den Strombezug, weshalb der Kapitalwert über die Zeit stetig ansteigt. Mit einem aus Akteurssicht üblichen Kalkulationszinssatz von 10,50 % erreicht die Investition nach fünfzehn Jahren den Break-Even-Punkt und damit einen positiven Kapitalwert. Am Ende der betrachteten Lebensdauer steht ein positiver Kapitalwert – und damit Vermögenszuwachs aus heutiger Sicht – von 135.000 €.

Auch bei Variation des Kalkulationszinssatzes um $\pm 2,50$ Prozentpunkte erreicht der Kapitalwert nach 20 Jahren immer einen positiven Wert (Tabelle 18-3): Im besten Fall (Zinssatz: 8,00 %) beträgt der Kapitalwert nach 20 Jahren 289.000 € und erreicht nach 13 Jahren den Break-Even-Punkt. Im schlechtesten Fall (Zinssatz: 13,00 %) wird der Break-Even-Punkt erst nach 19 Jahren erreicht und der Kapitalwert nach 20 Jahren liegt bei 24.000 €.

Tabelle 18-3: Ergebnisse der Sensitivität bei Variation des Kalkulationszinssatzes.

Kalkulationszinssatz	Break-Even nach ...	Kapitalwert nach 20 Jahren
10,50 % (Base Case)	15 Jahren	135 Tsd. €
8,00 % (Best Case)	13 Jahren	289 Tsd. €
13,00 % (Worst Case)	19 Jahren	24 Tsd. €

Die richtige Wahl des Kalkulationszinssatzes hat erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Investition. Eine Sensitivitätenanalyse durch Variation des Zinssatzes deckt die Unsicherheiten in der Bestimmung des Zinssatzes ab und liefert eine robuste Grundlage für die Investitionsentscheidung.

Zusatzrechnung: Ersatzinvestition und Förderung bei verschiedenen Volllaststunden.

Die bisher gezeigten Berechnungen gehen von einer reinen Neuinvestition in die Wärmepumpen aus. Wenn sowieso eine (Re-)Investition in die Wärmeerzeugungstechnologie ansteht, können zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit auch die Investitionsmehrkosten (IMK, Differenzkosten zwischen den beiden alternativen Technologien) herangezogen werden.

Zusätzlich können bis zu 45 % dieser Investitionsmehrkosten über das BAFA-Modul 4 (energie- und

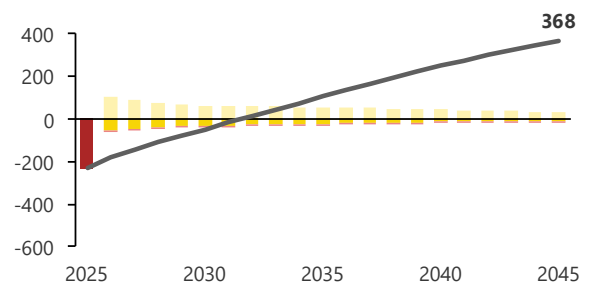
ressourcenbezogene Optimierung von Anlagen und Prozessen) gefördert werden, womit sich die Wirtschaftlichkeit der Investition weiter verbessert.

Unter Berücksichtigung beider Aspekte – Nutzung der Investitionsmehrkosten und Förderung nach BAFA Modul 4 – stellt sich im Base Case ein positiver Kapitalwert bereits nach 7 Jahren ein und steigt auf 368.000 € nach zwanzig Jahren an (Abbildung 18-3 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Unter diesen Bedingungen erreicht die Wärmepumpe selbst bei reduzierten Volllaststunden (4.000 VLS) nach 15 Jahren einen positiven Kapitalwert und kommt nach zwanzig Jahren auf einen Kapitalwert von 65.000 €.

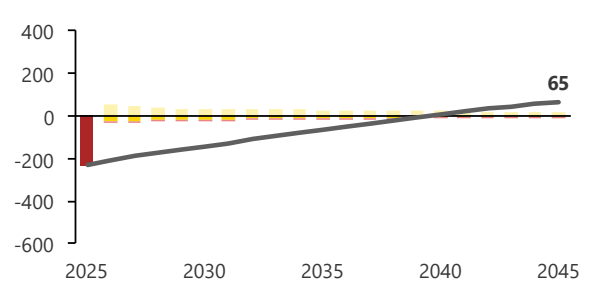
Ein- & Auszahlungen / Kapitalwert – IMK inkl. Förderung

Barwert in Tsd. €₂₀₂₄ | Kalkulationszinssatz: 10,50 % | 8.000 VLS



Ein- & Auszahlungen / Kapitalwert – IMK inkl. Förderung

Barwert in Tsd. €₂₀₂₄ | Kalkulationszinssatz: 10,50 % | 4.000 VLS



— Kapitalwert
 ■ Anfangsinvestitionen
 ■ Erdgas (Einsparungen)
 ■ O&M Mehrkosten
 ■ Strom (Mehrkosten)

Abbildung 18-3: Kapitalwertberechnung der Investitionsmehrkosten (IMK) bei Ersatz eines Gaskessels durch Wärmepumpen inkl. Förderung mit 8.000 VLS (oben) und 4.000 VLS (unten).

18.3.2 Hochtemperatur-Wärmepumpe – Variation der Investitionszeitpunkt

Ausgangssituation: Ein mit Erdgas betriebener Brennwertkessel mit einer Leistung von 1,5 MW und einem jährlichen Energieverbrauch von ca. 11,3 GWh/a verursacht aktuell ca. 2.270 t CO₂-Emissionen pro Jahr.

Neuinvestition: Der Kessel soll durch eine Hochtemperaturwärmepumpe im Temperaturbereich bis 150 °C ersetzt werden. Tabelle 18-4 vergleicht die beiden Technologien.

Um die Frage zu beantworten, ob bereits heute in die Hochtemperaturwärmepumpe investiert werden sollte oder erst in fünf Jahren, wurde jeweils der Kapitalwert über 20 Jahre ab Investitionszeitpunkt berechnet (Abbildung 18-4).

Tabelle 18-4: Kennzahlen des Erdgas-Brennwertkessels im Vergleich zur Hochtemperaturwärmepumpe.

	Referenz: Erdgaskessel (Brennwert)	Neuinvestition: Hochtemp.- Wärmepumpe
Wärmeleistung	1,5 MW	1,5 MW
Nutzungsgrad / COP	85 %	3,2
Betriebsstunden	8.000 h	8.000 h
Durchschnittl. Auslastung	80 %	80 %
Energieverbrauch	11.294 MWh/a (Erdgas)	3.000 MWh/a (Strom)
Investitionskosten	182.000 €	1.535.000 €
Jährl. fixe + variabl. O&M	25.600 €/a	10.400 €/a

Bei einer heutigen Investition wird der Break-Even-Punkt nach 8 Jahren erreicht. Wird erst 2030 investiert, dauert es lediglich 6 Jahre. Dennoch erreichen beide Varianten nach 20 Jahren einen nahezu gleichen positiven Kapitalwert von ca. 1,9 Mio. € und lohnen sich somit aus finanzieller Sicht.

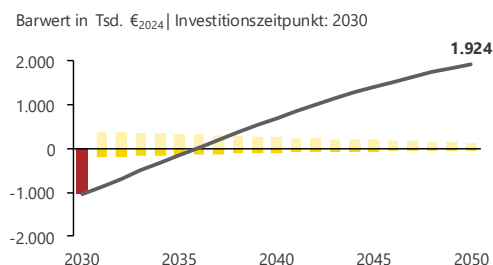
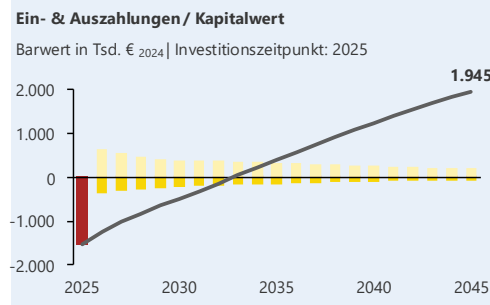


Abbildung 18-4: Kapitalwertberechnung bei Ersatz eines Gas-Brennwertkessels durch eine Hochtemperatur-Wärmepumpe in Abhängigkeit des Investitionszeitpunktes (oben: 2025; unten: 2030).

Zusatzrechnung: Variation des CO₂-Preises

Im Vergleich zu den in Abbildung 18-1 gezeigten Entwicklungen des CO₂-Preises im BEGH bzw. ETS II geht die Bundesnetzagentur (BNetzA) in ihrem Szenariorahmen für den Netzentwicklungsplan Strom 2025 [182] von einer Steigung des ETS I auf 152,70 €/t CO₂ in 2037 bzw. 172,50 €/t CO₂ in 2045 aus. In der Annahme, dass sich in der tatsächlichen Entwicklung ETS I und II annähern werden, zeigt Abbildung 18-5 die Berechnung des Kapitalwerts unter den Annahmen des Szenariorahmens der BNetzA. Trotz der unterschiedlichen Annahmen, tritt der positive Kapitalwert in beiden Szenarien im Jahr 2033, bereits 8 Jahre nach der Investition, ein.

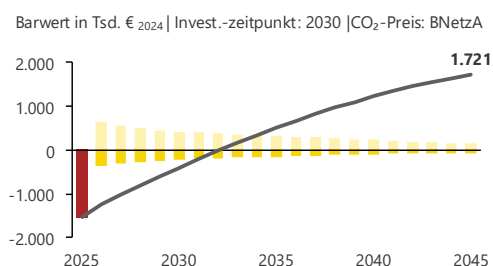
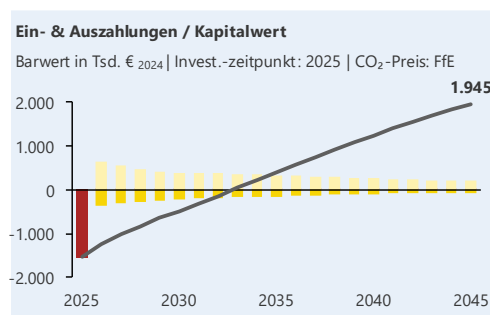


Abbildung 18-5: Kapitalwertberechnung bei Ersatz eines Gas-Brennwertkessels durch eine Hochtemperatur-Wärmepumpe in Abhängigkeit des CO₂-Preis (oben: Preisentwicklung nach FfE, unten: Preisentwicklung nach BNetzA).

18.3.3 Wasserstoffkessel – Unsicherheiten im Wasserstoffpreis

Ausgangssituation: Ein 10 MW Brennwertkessel wird derzeit mit Erdgas betrieben. Der Betrieb erfordert den Einsatz von ca. 64.600 MWh Erdgas pro Jahr und verursacht somit knapp 13.000 t CO₂-Emissionen.

Neuinvestition: Es wird ein Ersatz des Kessels durch einen wasserstoffbefeuerten Kessel der gleichen Größe geprüft. Es wird angenommen, dass ein H₂-ready-Kessel einen Aufschlag von 10 % auf Investitions- und O&M-Kosten im Vergleich zum herkömmlichen Erdgaskessel hat. Tabelle 18-5 vergleicht beide Technologien.

Tabelle 18-5: Kennzahlen des Erdgas-Brennwertkessels im Vergleich zum Wasserstoff-Brennwertkessel.

	Referenz: Erdgaskessel (Brennwert)	Neuinvestition: H ₂ -Kessel (Brennwert)
Wärmeleistung	10 MW	10 MW
Nutzungsgrad (BW)	99 %	99 %
Betriebsstunden	8.000 h	8.000 h
Durchschnittl. Auslastung	80 %	80 %
Energieverbrauch	64.646 MWh/a (Erdgas)	64.646 MWh/a (Wasserstoff)
Investitionskosten	1.070.000 €	1.177.000 €
Jährl. fixe + variabl. O&M	25.600 €/a	10.400 €/a

Um die derzeitigen Unsicherheiten bezüglich des Wasserstoffpreises abzubilden, werden zwei mögliche Preisentwicklungen (aus den FfE Trend- bzw. Zielszenarien) verglichen (Abbildung 18-6).

Energieträgerpreise

in €₂₀₂₄/MWh | FfE-Trendszenario

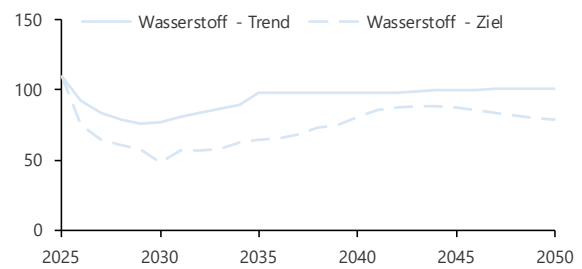


Abbildung 18-6: Entwicklung der Wasserstoffpreise in einem optimistischeren Ziel- und einem pessimistischeren Trendszenario.

Die daraus resultierenden Kapitalwertberechnungen sind in Abbildung 18-5 dargestellt. In beiden betrachteten Szenarien ist der Wasserstoffkessel im betrachteten Zeitraum nicht wirtschaftlich und führt zu einem negativen Kapitalwert der Investition von – 23,2 Mio. € bzw. – 10,6 Mio. €.

Dennoch kann im konkreten Einzelfall einer Investition Wasserstoff bspw. aufgrund besonders guter infrastrukturelle Voraussetzungen oder der Möglichkeit zur günstigen Eigenerzeugung eine sinnvolle Dekarbonisierungsmaßnahme darstellen und sollte je nach Einzelfall geprüft werden.

18.3.4 Anmerkungen Investitionskosten

Die angesetzten Investitions- und O&M-Kosten sind dem „Technikkatalog Wärmeplanung“ (Version 1.1) [34] entnommen. Die entsprechende Zuordnung ist in Tabelle 18-6 gezeigt.

Tabelle 18-6: Zuordnung der Technologien zur Datengrundlage im „Technikkatalog Wärmeplanung“.

Technologie	Tabelle im Technikkatalog
Erdgaskessel (250 kW)	Tabelle 4
Wasser-Wasser-Wärmepumpe (Grundwasserbrunnen)	Tabelle 11
Erdgaskessel (Brennwert)	Tabelle 33
Hochtemperatur-Wärmepumpe	Tabelle 32

Die Kostendaten geben eine erste Einschätzung der Größenordnung der tatsächlich anfallenden Kosten. Für eine konkrete Investitionsentscheidung ist es jedoch unabdingbar, sich die entsprechenden Angebote vorab einzuholen und die standortspezifischen Gegebenheiten zu berücksichtigen.

19 Interaktionsprozesse mit der vorgelagerten Netzinfrasturktur: Rechtlich-regulatorische Einordnung

Damit Unternehmen ihre Dekarbonisierungsmaßnahmen umsetzen können, muss auch die entsprechende vorgelagerte Energieinfrastruktur ertüchtigt werden. Dazu gehört beispielsweise die Erhöhung der Anschlusskapazität ans Stromnetz, welche mit Netzausbaumaßnahmen (Leitungen, Transformatoren, etc.) verbunden sein kann. Aber auch bei einem Brennstoffwechsel zu Wasserstoff oder der Installation einer CO₂-Abscheidung ist die entsprechende Infrastruktur Grundvoraussetzung. Dabei sind je nach Energieträger unterschiedliche, die Netzinfrasturktur betreffende, regulatorische Zwangspunkte zu berücksichtigen.

Im Folgenden werden ausgewählte rechtliche Aspekte der Teilbereiche

- Strom,
- Gas/Wasserstoff und
- CO₂-Abscheidung und -Nutzung bzw. -Speicherung (CCU/CCS)

eingeordnet und aktuelle Entwicklungen dargestellt.

19.1 Vorgelagerte Netzinfrasturktur: Strom

Im Folgenden wird dargestellt, welche Herausforderungen sich im Rahmen der Dekarbonisierung der Industrie aus rechtlicher Sicht mit Blick auf die Interaktionsprozesse bei vorgelagerten Netzinfrasturkten im Bereich Strom ergeben können. Im Fokus der Untersuchung steht die **Rolle der Verteilernetzbetreiber als zentrale Akteure in der Energieversorgung**.

19.1.1 Reform der Netzentgelte im Strombereich

Hohe Strompreise entwickeln sich zunehmend zu einem zentralen Hindernis für die Dekarbonisierung der Industrie. Obwohl die Erhöhung der Elektrifizierung

entscheidend für das Erreichen der Klimaziele ist, mindern steigende Stromkosten für viele Unternehmen die wirtschaftliche Attraktivität dieses Dekarbonisierungspfad. Es entsteht folglich eine Kostenbarriere, die Investitionen verzögern und den Transformationsprozess insgesamt ausbremsen kann.

Eine besonders maßgebliche Rolle spielen dabei die **Netzentgelte**, die einen wesentlichen Bestandteil des Strompreises ausmachen.¹²³ Für die Verteilernetzbetreiber stellen diese Entgelte die **wichtigste Einnahmequelle** dar.¹²⁴ Zugleich stehen sie vor der Aufgabe, ihre Netze angesichts der wachsenden Elektrifizierung umfassend auszubauen und zu modernisieren.

Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden die geplante Reform im Bereich der Netzentgelte aufgezeigt. Dabei ist auch die Frage relevant, ob die Netzentgelte auf Verteilernetzebene – ähnlich wie auf der Übertragungsnetzebene – bundeseinheitlich gestaltet werden sollten, um mehr Planungssicherheit und Kostentransparenz zu schaffen.

Ausgangspunkt: Netzentgelte als Gegenleistung für den Netzzugang

Betreiber von Energieversorgungsnetzen – zu denen auch Verteilernetzbetreiber gemäß § 3 Nr. 4 EnWG i. V. m. § 3 Nr. 2, 3 EnWG zählen – haben gemäß § 20 Abs. 1 EnWG jedermann nach sachlich gerechtfertigten Kriterien diskriminierungsfrei Netzzugang zu gewähren. Als Gegenleistung für den Transport und die Verteilung des Stroms haben die Zugangsberechtigten an die Verteilernetzbetreiber Netzentgelte zu entrichten.¹²⁵ Da die Netzbetreiber aufgrund des natürlichen Monopols im Stromnetz eine marktbeherrschende Stellung einnehmen, unterliegt die Berechnung der Netzentgelte der staatlichen Regulierung.¹²⁶ Vorschriften für die Netzentgelte im Strombereich finden sich in der Stromnetzentgeltverordnung¹²⁷ (**StromNEV**). Die StromNEV regelt die Festlegung der Methode zur Bestimmung der Entgelte für den Zugang zu den Elektrizitätsübertragungs- und Elektrizitätsverteilernetzen.

¹²³ BNetzA, Netzentgelte, Zusammenhang von Strompreis und Netzentgelt.

¹²⁴ Held/Schäfer-Stradowsky, Energierecht und Energiewirklichkeit, Rn. 942.

¹²⁵ Theobald, in: Theobald/Kühling, EnWG, Vor § 1 Rn. 15; Held/Schäfer-Stradowsky, Energierecht und Energiewirklichkeit, Rn. 940.

¹²⁶ Reimers, in: Pritzsche/Vacha, Energierecht, § 8 Rn. 104; Theobald, in: Theobald/Kühling, EnWG, Vor § 1 Rn. 15; Held/Schäfer-Stradowsky, Energierecht und Energiewirklichkeit, Rn. 942.

¹²⁷ Stromnetzentgeltverordnung vom 25. Juli 2005 (BGBl. I S. 2225), die zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 22. Dezember 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 405) geändert worden ist.

Mit der Entrichtung des Netzentgelts wird die Nutzung der Netz- oder Umspannebene des jeweiligen Betreibers des Elektrizitätsversorgungsnetzes, an die der Netznutzer angeschlossen ist, und aller vorgelagerten Netz- und Umspannebenen abgegolten, § 3 Abs. 2 StromNEV.

Regelfall der gesetzlichen Netzentgeltsystematik

Das **transaktionsunabhängige Punktmodell** bildet die Grundlage des Systems der Entgeltbildung für den Netzzugang, § 15 Abs. 1 S. 1 StromNEV. Dies bedeutet, dass die Höhe der Netzentgelte weder von der räumlichen Entfernung zwischen Einspeise- und Entnahmeort noch vom Transportweg abhängt (vgl. § 17 Abs. 1 S. 1 StromNEV).¹²⁸ Die Netzentgelte richten sich nach der Anschlussnetzebene der Entnahmestelle, den jeweils vorhandenen Messvorrichtungen an der Entnahmestelle sowie der jeweiligen Benutzungstundenzahl der Entnahmestelle, § 17 Abs. 1 S. 2 StromNEV.

Das Netzentgelt pro Entnahmestelle besteht aus einem **Jahresleistungspreis** in Euro pro Kilowatt und einem **Arbeitspreis** in Cent pro Kilowattstunde, § 17 Abs. 2 S. 1 StromNEV. Das Jahresleistungsentgelt ist das Produkt aus dem jeweiligen Jahresleistungspreis und der Jahreshöchstleistung in Kilowatt der jeweiligen Entnahme im Abrechnungsjahr, § 17 Abs. 2 S. 2 StromNEV. Das Arbeitsentgelt ist das Produkt aus dem jeweiligen Arbeitspreis und der im Abrechnungsjahr jeweils entnommenen elektrischen Arbeit in Kilowattstunden, § 17 Abs. 2 S. 3 StromNEV.

Die Netzentgelte dienen der **Deckung der Netzkosten** (§ 15 Abs. 1 S. 2 StromNEV). Die Gestaltung der Netzentgelte ist für die Netzbetreiber mithin von erheblicher Bedeutung, da durch sie die Kosten, die für Betrieb, Wartung und Ausbau der Netzinfrastruktur entstehen, refinanziert werden. Für die Ermittlung der Netzentgelte sind demnach gemäß § 3 Abs. 1 S. 1 StromNEV zunächst die Netzkosten nach den §§ 4-11 StromNEV zusammenzustellen. Die Netzkosten bilden folglich die Grundlage für die Berechnung der Netzentgelte.¹²⁹

Für die Einspeisung elektrischer Energie fällt – anders als im Gasbereich – bislang kein Netzentgelt an, § 15 Abs. 1 S. 3 StromNEV.

An dieser Stelle ist zu beachten, dass die **StromNEV am 31. Dezember 2028 außer Kraft treten wird**. Der EuGH hat entschieden, dass die sogenannte „normative Regulierung“ in Deutschland auf Grund von Rechtsverordnungen der Bundesregierung gegen die Elektrizitätsbinnenmarktrichtlinie¹³⁰ verstößt.¹³¹ Die Neuregelung in § 21 Abs. 3 EnWG verleiht der BNetzA fortan die Kompetenz zur Festlegung (§ 29 EnWG) der Entgelte für den Netzzugang und zur Festlegung der Methoden zur Bestimmung dieser Entgelte. Mit Außerkrafttreten der StromNEV besteht die Notwendigkeit, die Grundsätze der Netzentgelte neu zu regeln. Um Rechtsunsicherheiten zu vermeiden, muss die Bundesnetzagentur daher die **bisherigen Vorschriften der §§ 12 ff. StromNEV durch neue Festlegungen ersetzen**.

Neuausrichtung der Netzentgeltsystematik

Die Bundesnetzagentur hat am 12. Mai 2025 ein Verfahren zur Festlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (**AgNes**)¹³² eröffnet.

Ein Kernziel von AgNes ist es, die aktuellen Stromnetzentgelte in Deutschland so weiterzuentwickeln, dass sie den **Anforderungen der Energiewende** gerecht werden.¹³³ Hierzu hat die Bundesnetzagentur ein **Diskussionspapier**¹³⁴ veröffentlicht, welches die veränderten Bedingungen der Energiewende, das angestrebte Zielbild der Netzentgeltsystematik, eine Analyse des aktuellen Stands samt Abgleich mit diesem Zielbild sowie erste daraus abgeleitete Anpassungsoptionen darstellt.

AgNes: Zielsetzungen

Die Netzentgeltsystematik verfolgt verschiedene Ziele, darunter:

- **Kostenorientierung**
- **Anreizfunktion**
- **Finanzierungsfunktion**
- **Umsetzbarkeit**¹³⁵

¹²⁸ Mohr, in: BeckOGK, StromNEV, § 15 Rn. 5; Jonen/Kindler, EWeRK 2025, 63.

¹²⁹ Held/Schäfer-Stradowsky, Energierecht und Energiewirklichkeit, Rn. 941.

¹³⁰ Richtlinie (EU) 2019/944 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 mit gemeinsamen Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 2012/27/EU.

¹³¹ EuGH, Urt. v. 02.09.2021 – C-718/18.

¹³² BNetzA, GBK-25-01-1#3, Festlegung AgNes.

¹³³ BNetzA, GBK-25-01-1#3 Festlegung AgNes.

¹³⁴ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes), Mai 2025.

¹³⁵ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes), Mai 2025, S. 11.

Diese Ziele müssen ausgewogen berücksichtigt werden, um eine wirksame Netzentgeltsystematik zu schaffen.¹³⁶ Die Netzentgeltsystematik muss insbesondere **praktisch handhabbar** sein, damit ihre Ziele tatsächlich erreicht werden.¹³⁷ Selbst das theoretisch bestentwickelte System bleibt wirkungslos, wenn Netzbetreiber oder Kunden es wegen hoher Komplexität oder administrativem Aufwand nicht zuverlässig anwenden können oder seine Funktionsweise nicht verstehen.¹³⁸ Daneben sind sinnvolle **Anreize zu netzdienlichem Verhalten** zu setzen und eine faire Beteiligung der Netznutzer an der Finanzierung sicherzustellen.¹³⁹

Der **am 20. November 2025 veröffentlichte Sachstandsbericht** gibt Aufschluss darüber, in welche Richtung die Bundesnetzagentur bei der Gestaltung der Netzentgelte tendiert.¹⁴⁰ In Zukunft sollen Netzentgelte vor allem durch zwei verschiedene Arten von Entgeltkomponenten gebildet werden, um die zentralen Funktionen der Netzentgelte – Finanzierung der Netzkosten und Anreizsetzung – zu erfüllen.¹⁴¹

Entgeltkomponenten mit Finanzierungsfunktion sollen weitestgehend die Netzkosten refinanzieren, die Netznutzer in ihrem Nutzungsverhalten jedoch nach Möglichkeit wenig beeinflussen.¹⁴² Nach Möglichkeit sollen aber Fehlanreize vermieden werden.¹⁴³ Um den administrativen Aufwand bei der Abrechnung für Kunden mit geringerem Stromverbrauch gering zu halten, soll an einer **Größenunterscheidung** hinsichtlich des Stromverbrauchs festgehalten werden: Für **Verbraucher ab der Umspannebene MS/NS sowie für Niederspannungskunden mit mehr als 100.000 kWh Jahresverbrauch** soll die Finanzierung über zwei Netzentgeltbestandteile erfolgen: einen **Preis für die**

bestellte Kapazität und einen **statischen Arbeitspreis**.¹⁴⁴ Der feste Arbeitspreis soll in zwei Stufen aufgebaut sein: Arbeitspreis 1 gilt für alle Verbrauchsmengen, die innerhalb der bestellten Kapazität liegen. Arbeitspreis 2, der höher ist, wird für Verbräuche oberhalb der gewählten Kapazität fällig und setzt einen Anreiz, die Kapazität sinnvoll zu wählen.¹⁴⁵ Für **Niederspannungskunden mit weniger als 100.000 kWh Jahresverbrauch** soll die Finanzierung nach aktuellem Stand weiterhin über einen **Arbeits- und einen Grundpreis** erfolgen.¹⁴⁶ Die neue Entgeltsystematik soll sicherstellen, dass Prosumer fair an den Kosten für die Niederspannungsnetze beteiligt werden, etwa durch einen höheren Grundpreis.¹⁴⁷

Entgeltkomponenten mit Anreizfunktion hingegen sollen Kostenwirkungen von (kurzfristigen) Einsatz- bzw. (langfristigen) Investitionsentscheidungen internalisieren.¹⁴⁸ Ihr Ziel ist nicht, zusätzliche Einnahmen zu erzielen.¹⁴⁹ Dynamische Arbeitspreise sollen **zu netzorientiertem Verhalten anregen**.¹⁵⁰ Da die Nachfrage nach Netzanschlusskapazitäten steigt und sich das Nutzungsverhalten verändert, sind netzdienliche Anreize in den Netzentgelten entscheidend für eine stabile Infrastruktur und das Gelingen der Energiewende.¹⁵¹

Darüber hinaus soll es auch weiterhin **Entgelte für Messung und Messtellenbetrieb sowie anlassbezogene Entgelte** geben.¹⁵²

Diskussion: Bundeseinheitliche Netzentgelte auf Verteilernetzebene

Gegenstand der aktuellen Diskussion ist auch die Frage, ob die Netzentgelte auf Verteilernetzebene – analog

¹³⁶ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (Ag-Nes), Mai 2025, S. 11.

¹³⁷ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (Ag-Nes), Mai 2025, S. 11.

¹³⁸ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (Ag-Nes), Mai 2025, S. 11.

¹³⁹ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (Ag-Nes), Mai 2025, S. 11.

¹⁴⁰ Bundesnetzagentur, Netzentgeltkomponenten: Orientierungspunkte der BNetzA vom 20.11.2025.

¹⁴¹ Bundesnetzagentur, Netzentgeltkomponenten: Orientierungspunkte der BNetzA vom 20.11.2025, S. 2.

¹⁴² Bundesnetzagentur, Netzentgeltkomponenten: Orientierungspunkte der BNetzA vom 20.11.2025, S. 1 f.

¹⁴³ Bundesnetzagentur, Netzentgeltkomponenten: Orientierungspunkte der BNetzA vom 20.11.2025, S. 3.

¹⁴⁴ Bundesnetzagentur, Netzentgeltkomponenten: Orientierungspunkte der BNetzA vom 20.11.2025, S. 2.

¹⁴⁵ Bundesnetzagentur, Netzentgeltkomponenten: Orientierungspunkte der BNetzA vom 20.11.2025, S. 2.

¹⁴⁶ Bundesnetzagentur, Netzentgeltkomponenten: Orientierungspunkte der BNetzA vom 20.11.2025, S. 2.

¹⁴⁷ Bundesnetzagentur, Netzentgeltkomponenten: Orientierungspunkte der BNetzA vom 20.11.2025, S. 2.

¹⁴⁸ Bundesnetzagentur, Netzentgeltkomponenten: Orientierungspunkte der BNetzA vom 20.11.2025, S. 1 f.

¹⁴⁹ Bundesnetzagentur, Netzentgeltkomponenten: Orientierungspunkte der BNetzA vom 20.11.2025, S. 2.

¹⁵⁰ Bundesnetzagentur, Netzentgeltkomponenten: Orientierungspunkte der BNetzA vom 20.11.2025, S. 2.

¹⁵¹ Bundesnetzagentur, Netzentgeltkomponenten: Orientierungspunkte der BNetzA vom 20.11.2025, S. 10.

¹⁵² Bundesnetzagentur, Netzentgeltkomponenten: Orientierungspunkte der BNetzA vom 20.11.2025, S. 1.

zur Übertragungsnetzebene – bundeseinheitlich gestaltet werden sollten.¹⁵³

Mit der zum 1. Januar 2025 in Kraft getretenen Regelung zur Verteilung der Mehrkosten aus der EE-Integration wird ein weiterer wesentlicher Kostenanteil nicht mehr über die individuellen Netzentgelte der jeweiligen Netzbetreiber, sondern über Umlagen in anderen Versorgungsgebieten finanziert. Dadurch bilden die originären Netzentgelte auf der Verteilernetzebene zunehmend jene strukturbedingten Kosten ab, die durch gebietsspezifische Faktoren wie Alter, Auslastung oder Betriebskosten der Netze geprägt sind und die notwendigen Aufwendungen zur Versorgung der lokalen Letztverbraucher widerspiegeln.¹⁵⁴ In der öffentlichen Debatte wird jedoch kritisiert, dass diese Kosten weitgehend außerhalb des Einflussbereichs der betroffenen Endkunden liegen.¹⁵⁵ Die derzeitige Zuteilung wird daher als ungerecht empfunden.¹⁵⁶ Angesichts des erwarteten deutlichen Anstiegs der wälzungsrelevanten Mehrkosten durch den weiteren Ausbau erneuerbarer Energien und der damit verbundenen erheblichen regionalen Verteilungswirkungen gewinnt die Diskussion über die Einführung bundesweit einheitlicher Netzentgelte auch auf Verteilernetzebene zunehmend an Bedeutung.¹⁵⁷

Mit bundeseinheitlichen Netzentgelten auf Verteilernetzebene würden die **Entgelte auf Basis der Gesamtnetzkosten** gebildet – auch bezüglich der Mehrkosten der EE-Integration.¹⁵⁸ Da die Verteilernetze Teil eines integrierten Systems sind, erscheint eine gesamthafte Kostenbetrachtung nach Ansicht der Bundesnetzagentur plausibel und würde die Verteilung der EE-Kosten vereinheitlichen.¹⁵⁹ Allerdings würden damit

auch sonstige Kostenunterschiede zwischen Netzbetreibern nivelliert. Betreiber mit hohen Kosten stünden weniger unter Rechtfertigungsdruck.¹⁶⁰

Für die Einführung bundeseinheitlicher Netzentgelte auf Verteilernetzebene wird angeführt, dass so zusätzliche Finanzierungsbeiträge – etwa Zuschüsse aus dem Bundeshaushalt – unkompliziert eingeführt und gleichmäßig über alle Netzgebiete verteilt werden könnten.¹⁶¹ Darüber hinaus könnte die Markttransparenz erhöht, Verteilungsgerechtigkeit gefördert¹⁶² und der Markteintritt neuer Wettbewerber erleichtert werden.¹⁶³

Gegen die Einführung bundeseinheitlicher Netzentgelte auf Verteilernetzebene werden die **heterogene Verteilernetzbetreiberstruktur** sowie **zusätzlicher Verwaltungsaufwand** für die Netzbetreiber und die Regulierungsbehörde angeführt.¹⁶⁴ So erkennt auch die Bundesnetzagentur an, dass die Einführung bundeseinheitlicher Netzentgelte auf Verteilernetzebene organisatorisch äußerst anspruchsvoll wäre.¹⁶⁵ Statt vier wie im Übertragungsnetz wären 866 unterschiedliche Verteilernetzbetreiber zu koordinieren, was ein komplexes Ausgleichssystem durch eine zentrale Institution voraussetzt.¹⁶⁶ Zudem müssten deutlich mehr Daten einheitlich, vollständig und fristgerecht bereitgestellt werden – eine Herausforderung, die heute schon oft nicht erfüllt wird.¹⁶⁷ Durch eine zentrale Entgeltbildung ginge der **Entscheidungsspielraum der Verteilernetzbetreiber verloren**, regionale Besonderheiten oder lokale Netz- und Kundenstrukturen zu berücksichtigen. Auch die Einführung zeitlich oder

¹⁵³ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes), Mai 2025, S. 39.

¹⁵⁴ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes), Mai 2025, S. 39.

¹⁵⁵ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes), Mai 2025, S. 39.

¹⁵⁶ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes), Mai 2025, S. 39.

¹⁵⁷ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes), Mai 2025, S. 39.

¹⁵⁸ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes), Mai 2025, S. 39.

¹⁵⁹ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes), Mai 2025, S. 39.

¹⁶⁰ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes), Mai 2025, S. 39.

¹⁶¹ BDEW, Stellungnahme Diskussionspapier der Bundesnetzagentur zur Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes) vom 30.06.2025, S. 24.

¹⁶² Agora Energiewende, Stellungnahme Allgemeine Netzentgeltsystematik Strom (AgNes), S. 13.

¹⁶³ EFET Deutschland – Verband Deutscher Energiehändler e.V., Stellungnahme zum Diskussionspapier der Bundesnetzagentur vom 12.05.2025 zur Weiterentwicklung der allgemeinen Netzentgeltsystematik für Strom (AgNes).

¹⁶⁴ BDI, Stellungnahme zum BNetzA-Diskussionspapier AgNes, S. 18.

¹⁶⁵ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes), Mai 2025, S. 39.

¹⁶⁶ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes), Mai 2025, S. 39 f.

¹⁶⁷ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes), Mai 2025, S. 40.

räumlich dynamischer Netzentgelte wäre kaum noch praktikabel.¹⁶⁸

Zwar würde ein einheitliches Entgelt die Arbeit der Vertriebsgesellschaften erleichtern und die **Preistransparenz erhöhen**, doch die **administrativen, regulatorischen und organisatorischen Hürden** wären erheblich.¹⁶⁹

Individuelle Netzentgelte für Sonderformen der Netznutzung

Im Rahmen der geplanten Netzentgeltreform spielen für Verteilernetzbetreiber auch die Sonderformen der Netznutzung nach § 19 StromNEV eine Rolle. Diese ermöglichen ein **Abweichen von den allgemeinen Netzentgelten** nach § 16 StromNEV, worin unter anderem geregelt ist, dass die Zuteilung der Kosten einer Netz- oder Umspannebene auf die aus dieser Netz- oder Umspannebene entnehmenden Netznutzer möglichst verursachungsgerecht zu erfolgen hat (§ 16 Abs. 2 StromNEV).

In diesem Zusammenhang wird insbesondere das **individuelle Netzentgelt nach § 19 Abs. 2 StromNEV** relevant, das im Folgenden näher dargestellt wird. Im Zentrum steht dabei ein spezifisches Abnahmeverhalten der Netznutzer.¹⁷⁰ Nach § 19 Abs. 2 StromNEV bestehen **zwei gesonderte Privilegierungstatbestände**, die jeweils unterschiedliche netzbezogene Nutzungsverhalten anreizen sollen und von den allgemeinen Netzentgelten abweichen.¹⁷¹ § 19 Abs. 2 StromNEV regelt, dass Netzbetreiber Netzkunden, deren Höchstlastbeitrag vorhersehbar erheblich von der zeitgleichen Jahreshöchstlast aller Entnahmen aus dieser Netz- oder Umspannebene abweicht (**atypische Netznutzer** gemäß § 19 Abs. 2 S. 1 StromNEV) oder die das Netz in besonders intensiver Weise nutzen (**Bandlastkunden** gemäß § 19 Abs. 2 S. 2 StromNEV), ein individuelles Netzentgelt anbieten müssen.

Die **Übertragungsnetzbetreiber haben den Verteilernetzbetreibern die dadurch entgangenen Erlöse zu erstatten und auf die Letztverbraucher umzulegen** (§ 19 Abs. 2 S. 13–15 StromNEV).

Hintergrund der individuellen Netzentgelte für atypische Netznutzer ist, dass auf diese Weise ein Anreiz für mehr Flexibilität im Verbrauch gesetzt werden sollte. Ausgangspunkt war die Überlegung, dass die zeitgleiche Jahreshöchstlast aller Entnahmen in einem Netz maßgeblich für dessen Dimensionierung und folglich für die Netzkosten ist.¹⁷² Eine Reduzierung der Netzentgelte sollen daher diejenigen Letztverbraucher erhalten, die ihre individuelle Jahreshöchstlast deutlich außerhalb des üblichen Zeitraums der gleichzeitigen Jahreshöchstlast aller Netzentnahmen platzieren.¹⁷³ Auf diese Weise soll die erforderliche Netzdimensionierung begrenzt und folglich die Netzkosten insgesamt reduziert werden.¹⁷⁴

Das individuelle Netzentgelt für die stromintensive Nutzung (**Bandlastkunden**) beträgt gemäß § 19 Abs. 2 S. 3 StromNEV bei einer Stromabnahme aus dem Netz der allgemeinen Versorgung für den eigenen Verbrauch an einer Abnahmestelle von mehr als zehn Gigawattstunden pro Kalenderjahr nicht weniger als:

1. **20 Prozent** des veröffentlichten Netzentgeltes, im Falle einer Benutzungsstundenzahl von mindestens **7 000 (Volllast-)Stunden** im Jahr;
2. **15 Prozent** des veröffentlichten Netzentgeltes, im Falle einer Benutzungsstundenzahl von mindestens **7 500 (Volllast-)Stunden** im Jahr oder
3. **10 Prozent** des veröffentlichten Netzentgeltes, im Falle einer Benutzungsstundenzahl von mindestens **8 000 (Volllast-)Stunden** im Jahr.

Die Privilegierung für Bandlastkunden verfolgt das Ziel, eine dauerhaft konstante Grundlast stromintensiver Letztverbraucher zu fördern.¹⁷⁵ Dadurch soll eine stetige Abnahme gewährleistet werden, die für die Einspeisung von Grundlastkraftwerken erforderlich ist und zugleich zur Netzstabilität beiträgt.¹⁷⁶ Zugleich erhalten die Netzbetreiber so eine erhöhte

¹⁶⁸ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (Ag-Nes), Mai 2025, S. 40.

¹⁶⁹ BNetzA, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (Ag-Nes), Mai 2025, S. 40.

¹⁷⁰ *Mohr*, in: BeckOGK, StromNEV, § 19 Rn. 1.

¹⁷¹ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 5.

¹⁷² BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 5.

¹⁷³ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 5.

¹⁷⁴ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 5.

¹⁷⁵ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 5.

¹⁷⁶ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 5.

Planungssicherheit hinsichtlich der zu jeder Zeit zu erwartenden Abnahmemengen.¹⁷⁷

Atypische Netznutzung – Hürden in der Praxis

Die atypische Netznutzung reizt eine Verschiebung der eigenen Höchstlast in Zeitfenstern außerhalb der im Netzgebiet üblichen gleichzeitigen Höchstlast aller Netzentnahmen (je Quartal) an.

In dünn besiedelten Regionen ohne viele (Groß-)Verbraucher kann dies dazu führen, dass einzelne energieintensive Großverbraucher (z. B. ein Industriebetrieb mit elektrischer Prozesswärmeerzeugung) maßgeblich das Zeitfenster der gleichzeitigen Höchstlast im Netzgebiet bestimmen. Daraufhin müssten sie im folgenden Jahr ihre eigene Lastspitze außerhalb des im Betrieb üblichen Lastprofils setzen, um erneut die Atypik-Privilegierung zu erhalten. Sollte dies nicht möglich sein, hätten sie im Folgejahr erhöhte Netzentgelte (ohne Privilegierung) zu zahlen.

Aktuelle Entwicklungen im Bereich der individuellen Netzentgelte

Diese Vorgaben werden den Bedingungen eines Stromsystems mit stark wachsendem Anteil erneuerbarer Energien jedoch nicht mehr gerecht.¹⁷⁸ Eine **Neubewertung der Anreize für die Netznutzung** sei daher nötig.¹⁷⁹

Die Bundesnetzagentur hat daher am 24. Juli 2024 gemäß §§ 21 Abs. 3 S. 4 Nr. 3 lit. f), S. 5; 29 Abs. 1 EnWG ein **Verfahren für eine von § 19 Abs. 2 StromNEV abweichende Festlegung zur Setzung systemdienlicher Anreize durch ein Sondernetzentgelt für**

Industriekunden eingeleitet.¹⁸⁰ Das Verfahren zu den individuellen Netzentgelten wurde mittlerweile in das AgNes-Verfahren integriert. Die wesentlichen Verfahrenszwecke und -ziele ergeben sich aus einem hierzu von der Bundesnetzagentur veröffentlichten **Eckpunktetapier**.¹⁸¹ Dieses enthält erste **Konzepte zu den neuen Rahmenbedingungen für Industrienetzentgelte**.¹⁸² Geplant ist insbesondere, das individuelle Netzentgelt durch ein **neues Sondernetzentgelt** zu ersetzen.¹⁸³

Gründe für eine Neubewertung der Anreizsetzung

Änderungen im Bereich der Stromerzeugerlandschaft führen dazu, dass die bisher gesetzten Anreize zur Netznutzung in Form von Sondernetzentgelten überarbeitet werden müssen¹⁸⁴. Zum einen bestehe unter den heutigen energiewirtschaftlichen Bedingungen **kaum noch ein gesteigerter Bedarf an einer stetig hohen Stromabnahme durch die Netznutzer**.¹⁸⁵ Der Ausbau erneuerbarer Energien führt zu stärker schwankender Einspeisung und damit zu einer zunehmend volatilen Residuallast, die konventionelle Kraftwerke ausgleichen müssen.¹⁸⁶ Gleichzeitig sinkt der Anteil klassischer Grundlastkraftwerke – unter anderem durch den Ausstieg aus Kernenergie und Kohle.¹⁸⁷ Mit dem Rückgang konventioneller Kraftwerke und der Zunahme dezentraler, volatiler Einspeisung erneuerbarer Energien wächst stattdessen der Bedarf an flexiblen Stromabnahmen der Netznutzer.¹⁸⁸ Zudem kann unflexibles Verbrauchsverhalten kritische Netzsituationen zusätzlich verschärfen und dadurch das Stromnetz belasten bzw. schädlich beeinflussen.¹⁸⁹

Angesichts der hohen umgelegten Kosten und der zusätzlichen Belastung für andere Netznutzer – die bereits unter steigenden Energiekosten leiden – können die derzeitigen, ineffizienten Anreize im Rahmen der Sondernetzentgelte nach § 19 Abs. 2 StromNEV nicht aufrechterhalten werden.¹⁹⁰ Insbesondere steht dem von allen Netznutzern zu tragenden Aufschlag auf die

¹⁷⁷ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktetapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 5.

¹⁷⁸ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktetapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 5.

¹⁷⁹ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktetapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 5.

¹⁸⁰ BNetzA, Festlegungsverfahren BK4-24-027.

¹⁸¹ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktetapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024.

¹⁸² Jonen/Kindler, EWeRK 2025, 64 (64).

¹⁸³ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktetapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 8.

¹⁸⁴ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktetapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 5.

¹⁸⁵ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktetapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 5 f.

¹⁸⁶ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktetapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 5 f.

¹⁸⁷ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktetapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 5 f.

¹⁸⁸ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktetapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 5 f.

¹⁸⁹ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktetapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 6.

¹⁹⁰ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktetapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 6.

Netzentgelte nach § 19 Abs. 2 S. 15 StromNEV keine tatsächliche Kostenentlastung des Energieversorgungssystems gegenüber.¹⁹¹

Übergangsregelung zur Erhöhung der Flexibilität in der Netznutzung

Um die Flexibilisierung der Netznutzung zu fördern sowie Beiträge zur Stützung der netztechnischen Leistungsbilanz oder zur Gewährleistung des sicheren Netzbetriebs in der Energiekrise zu ermöglichen, hat der Gesetzgeber mit § 118 Abs. 46a EnWG eine Übergangsregelung geschaffen, durch welche die Bundesnetzagentur ermächtigt wird, im Rahmen von Festlegungen nach § 29 EnWG von § 19 StromNEV abweichende Vorgaben zu treffen. Auf diese Weise können insbesondere die Methoden zur Ermittlung sachgerechter individueller Netzentgelte näher ausgestaltet und die Voraussetzungen angepasst oder ergänzt werden, unter denen im Einzelfall individuelle Entgelte für den Netzzugang vorgesehen werden können (§ 118 Abs. 46a S. 2 Nr. 1 und 2 EnWG).

Auf Basis dieser gesetzlichen Grundlage erließ die Bundesnetzagentur am 15. Februar 2023 die Festlegung BK4-22-089, die zuletzt am 18. Juni 2024 durch die Festlegung BK4-22-089A02 angepasst wurde. Die Bundesnetzagentur hat damit die in der Energiekrise nötigen Ausnahmen von den Bandlastkriterien – d. h. Aufhebung von Flexibilitätshemmnissen, die sich aus den Voraussetzungen für eine Bandlastprivilegierung ergeben – geschaffen, sodass Letztverbraucher systemdienlich flexibel handeln konnten, ohne die Privilegierung der Netzentgeltbefreiung zu verlieren.¹⁹²

An dieser Stelle ist zu beachten, dass sowohl die Festlegung BK4-22-089 als auch die gesetzliche Ermächtigung nach § 118 Abs. 46a EnWG **bis zum 31. Dezember 2025 befristet** sind. Es bedurfte daher einer

Neuregelung, um effektiv Flexibilität zu fördern und systemdienliche Anreize zu setzen.¹⁹³

Grundsätze und Ziele bei der Neugestaltung der Sondernetzentgelte

Die Einhaltung der Bandlastvorgaben verhindere häufig, dass Unternehmen mit hohem Energieverbrauch flexibel reagieren können.¹⁹⁴ Auch setze sie Anreize für ein netzschädliches Verbrauchsverhalten.¹⁹⁵ Dies ergebe sich insbesondere aus der derzeit geforderten tatsächlichen Erfüllung der Mindestanforderungen von 7.000 Benutzungsstunden und einem Jahresverbrauch von mehr als zehn Gigawattstunden (§ 19 Abs. 2 S. 2 StromNEV).¹⁹⁶ Diese Voraussetzung zwingt Industriekunden zu einem ggf. unnötig hohen und mithin netzschädlichen Stromverbrauch, um von den finanziellen Privilegierungen zu profitieren.¹⁹⁷ Ziel der Neugestaltung der individuellen Netzentgelte ist es folglich, **Anreize zu setzen, die die Flexibilitätspotentiale der Letztverbraucher erhöhen**.¹⁹⁸ Die Bundesnetzagentur plant, die **bisherige Bandlastregelung** nach dem Ende der Festlegung BK4-22-089 **zum 1. Januar 2026 auslaufen zu lassen**.¹⁹⁹ Stattdessen soll ein neues Sondernetzentgelt eingeführt werden, das Industriekunden gezielt dazu motivieren soll, sich systemdienlich zu verhalten.²⁰⁰

Privilegiert werden soll künftig systemdienliches Verhalten.²⁰¹ **Als systemdienlich gilt dabei ein Verbrauchsverhalten, das sich entweder positiv auf die Gesamtkosten der Energieversorgung oder eines stabilen Netzbetriebs auswirkt.**²⁰² Geringere Netzentgelte sollen diejenigen entrichten, die ihren Stromverbrauch flexibel anpassen: d. h. deutlich mehr Strom nutzen, wenn die Preise sehr niedrig sind, und deutlich weniger, wenn die Preise hoch sind.²⁰³ Überdies sollen **Übergangsfristen** gewährt werden.²⁰⁴

Dabei seien auch **regionale Unterschiede** im Bereich des Ausbaus erneuerbarer Energien zu beachten.²⁰⁵

¹⁹¹ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 6.

¹⁹² BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 6.

¹⁹³ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 6.

¹⁹⁴ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 7.

¹⁹⁵ Jonen/Kindler, EWeRK 2025, 63 (67).

¹⁹⁶ Jonen/Kindler, EWeRK 2025, 63 (67).

¹⁹⁷ Jonen/Kindler, EWeRK 2025, 63 (67).

¹⁹⁸ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 7.

¹⁹⁹ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 8.

²⁰⁰ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 8.

²⁰¹ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 9.

²⁰² BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 9.

²⁰³ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 9.

²⁰⁴ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 8.

²⁰⁵ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 10.

Besonders in Regionen mit wenig dezentraler erneuerbarer Energie können Engpässe vor allem durch hohe Nachfrage entstehen.²⁰⁶ In solchen Fällen könne verstärkter Stromverbrauch bei niedrigen Preisen die Engpässe sogar verschärfen.²⁰⁷ Bis der Netzausbau so weit fortgeschritten ist, dass Preissignale bundesweit wirken können, sollen in betroffenen Regionen entsprechende Ausnahmen gelten.²⁰⁸

Ein weiteres zentrales Ziel besteht darin, das neue Sondernetzentgelt so zu gestalten, dass seine Anwendung und Überprüfung für alle Beteiligten – Letztverbraucher, Netzbetreiber und Behörden – **einfach und praktikabel** bleibt.²⁰⁹ Zu komplizierte oder schwer handhabbare Regeln sollen vermieden werden.²¹⁰

Wie die reformierte Netzentgeltsystematik und die individuellen Entgelte im Detail letztlich aussehen werden, bleibt derzeit noch offen – die aktuellen Überlegungen deuten jedoch bereits auf eine Entwicklung hin, die flexible Verbrauchsmuster stärker berücksichtigt und Anreize setzt, um die Netznutzung an die zunehmende Volatilität erneuerbarer Energien anzupassen.

19.1.2 Netzananschluss

Vor dem Hintergrund **zunehmend knapper Netzananschlusskapazitäten** stellt sich die Frage, welche rechtlichen Zwangspunkte sich aus der Anschlussverpflichtung nach § 17 Abs. 1 S. 1 EnWG für Verteilernetzbetreiber ergeben. Insbesondere ist zu klären, in welchem Umfang die Betreiber verpflichtet sind, ihr **Netz auszubauen, um der steigenden Nachfrage nach Netzanlässen gerecht zu werden**. Die Analyse der rechtlichen Zwangspunkte zeigt, welche Pflichten zur Netzverstärkung oder -erweiterung gesetzlich verankert sind und in welchem Maße ein aktiver Netzausbau gefordert wird.

Für Details zum Netzananschluss selbst sei auf das Kapitel 2.3.1 verwiesen. Dort wird erläutert, dass der Netzananschluss als physische und rechtliche Voraussetzung für die energiewirtschaftliche Tätigkeit der Anschlussnehmer zwingend erforderlich ist und das EnWG die Netzbetreiber grundsätzlich zur Herstellung des Anschlusses verpflichtet. Gleichzeitig werden dort auch die in der Praxis relevanten Konfliktpunkte behandelt,

etwa Anschlussverweigerungen durch Netzbetreiber, die nicht nur die individuelle Rechtsposition der Anschlusspetenten betreffen, sondern zunehmend als Hemmnis für die Dekarbonisierung wirken.

Zunächst ist festzustellen, dass nach dem Wortlaut der Anschlusspflicht gemäß § 17 Abs. 1 S. 1 EnWG unmittelbar keine Netzausbaupflichtung für Verteilernetzbetreiber besteht.²¹¹ Etwas anderes gilt im Rahmen des **Anschlusses von EE-Anlagen**. Hier sieht § 12 Abs. 1 S. 1 EEG 2023 vor, dass Netzbetreiber auf Verlangen der Einspeisewilligen **unverzüglich ihre Netze entsprechend dem Stand der Technik optimieren, verstärken und ausbauen müssen**, um die Abnahme, Übertragung und Verteilung des Stroms aus erneuerbaren Energien oder Grubengas sicherzustellen.

Allerdings muss die Anschlussverpflichtung aus § 17 Abs. 1 S. 1 EnWG im Lichte von § 11 Abs. 1 S. 1 EnWG ausgelegt werden. Dieser regelt die **Betriebspflicht der Netzbetreiber**. Danach sind diese verpflichtet, ein sicheres, zuverlässiges und leistungsfähiges Energieversorgungsnetz diskriminierungsfrei zu betreiben, zu warten und bedarfsgerecht zu optimieren, zu verstärken und auszubauen. Der Netzausbau dient der Vergrößerung eines bestehenden Netzes, die eine Kapazitätserweiterung zur Folge hat.²¹² **Der Netzausbau ist dabei am Maßstab der Bedarfsgerechtigkeit zu messen.**²¹³ Die notwendige Erweiterung soll sich aus einer Prognose der tatsächlichen Umstände ergeben.²¹⁴ Im Rahmen von Elektrizitätsversorgungsnetzen ist § 11 Abs. 2 S. 1 EnWG zu beachten. Dieser sieht vor, dass für einen bedarfsgerechten, wirtschaftlich zumutbaren Ausbau der Elektrizitätsversorgungsnetze Betreiber von Elektrizitätsversorgungsnetzen den Berechnungen für ihre Netzplanung die Annahme zugrunde legen können, dass die prognostizierte jährliche Stromerzeugung je unmittelbar an ihr Netz angeschlossener Anlage zur Erzeugung von elektrischer Energie aus Windenergie an Land oder solarer Strahlungsenergie um bis zu 3 Prozent reduziert werden darf (Spitzenkappung).

Betreiber haben bei Betrieb, Wartung, Optimierung, Verstärkung, Planung und Ausbau von

²⁰⁶ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 10.

²⁰⁷ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 10.

²⁰⁸ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 10.

²⁰⁹ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 9.

²¹⁰ BNetzA, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, S. 9.

²¹¹ Bartsch/Voigt, EnWZ 2025, 356 (357).

²¹² Bourwieg, in: Bourwieg/Hellermann/Hermes, § 11 EnWG Rn. 86.

²¹³ Knauff, in: BeckOK EnWG, § 11 Rn. 28.

²¹⁴ Knauff, in: BeckOK EnWG, § 11 Rn. 28.

Energieversorgungsnetzen auch die jeweils geltenden politischen Vorgaben und gesetzlichen Regelungen zu berücksichtigen – insbesondere solche, die in den verschiedenen Verbrauchsbereichen zur Erreichung der Treibhausgasneutralität beitragen. Ausweislich der Gesetzgebung zählen dazu beispielsweise die Ausbaupfade des EEG, in europäischen Rechtsakten verankerte Ziele sowie in Strategien der Bundesregierung festgelegte Ziele und Anforderungen, wie zum Beispiel der Nationalen Wasserstoff- oder Carbon Managementstrategie.²¹⁵

Die Ausbaupflicht greift jedoch nur insoweit, wie sie für den Netzbetreiber **wirtschaftlich zumutbar** ist. Auf diese Weise wird die Verhältnismäßigkeit der Verpflichtung sichergestellt.²¹⁶ Hierfür ist eine **objektivierte betriebswirtschaftliche Perspektive** heranzuziehen.²¹⁷ Da die Kosten für den Netzausbau über die Netzentgelte refinanziert werden, wird eine wirtschaftliche Unzumutbarkeit nur in besonderen Ausnahmefällen anzunehmen sein.²¹⁸

Die Bundesnetzagentur betont im Zusammenhang mit der Ausbaupflicht der Netzbetreiber die besondere Bedeutung **vorausschauender Netzplanung**.²¹⁹

19.1.3 Rechtliche Einordnung des Kundenanlagenbegriffs

Im Zuge der Dekarbonisierung der Industrie gewinnt die rechtliche Einstufung von Kundenanlagen durch die Rechtsprechung des EuGH²²⁰ und BGH²²¹ zunehmend praktische Relevanz. **Besonders relevant ist die Frage, unter welchen Voraussetzungen Betreiber solcher Anlagen als Verteilernetzbetreiber gelten.** Für Industriebetriebe ist dies entscheidend, da Kundenanlagen zur betrieblichen Eigenversorgung häufig Teil eines größeren, komplexen Energiesystems sind. Eine Einstufung als Verteilernetzbetreiber bringt weitreichende Pflichten mit sich und kann damit organisatorische, finanzielle und rechtliche Herausforderungen für die Unternehmen nach sich ziehen. Für Industriebetriebe bedeutet dies, dass sie frühzeitig prüfen müssen, welche Rolle ihre Anlagen im rechtlichen Kontext spielen, um rechtliche Risiken zu minimieren und mögliche Hemmnisse für die Umsetzung von Dekarbonisierungsmaßnahmen gezielt zu adressieren.

Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden dargestellt, welche Reformen der Gesetzgeber plant, um die rechtlichen Rahmenbedingungen im Bereich der Kundenanlagen zu präzisieren und die derzeit bestehenden Rechtsunsicherheiten zu vermeiden.

Begriff der Kundenanlage

Das Energiewirtschaftsrecht kennt zwei Arten von Kundenanlagen: **reguläre Kundenanlagen** (§ 3 Nr. 24a EnWG) und **Kundenanlagen zur betrieblichen Eigenversorgung** (§ 3 Nr. 24b EnWG). Im Unterschied zu Energieversorgungsnetzen im Sinne des § 3 Nr. 16 EnWG besteht der Vorteil von Kundenanlagen darin, dass diese nicht den strengen Regulierungsvorschriften des EnWG unterliegen.

Reguläre Kundenanlagen sind Energieanlagen zur Abgabe von Energie, die sich dadurch auszeichnen, dass sie

- sich auf einem räumlich zusammengehörenden Gebiet befinden oder unter bestimmten Voraussetzungen an EE-Anlagen angebunden sind,
- mit einem Energieversorgungsnetz oder mit einer Erzeugungsanlage verbunden sind,
- für die Sicherstellung eines wirksamen und unverfälschten Wettbewerbs bei der Versorgung mit Elektrizität und Gas unbedeutend sind und
- jedermann zum Zwecke der Belieferung der angeschlossenen Letztverbraucher im Wege der Durchleitung unabhängig von der Wahl des Energielieferanten diskriminierungsfrei und unentgeltlich zur Verfügung gestellt werden.

Absage des EuGH an den nationalen Kundenanlagenbegriff

Der EuGH hat in einem Vorabentscheidungsverfahren entschieden, dass der Kundenanlagenbegriff des § 3 Nr. 24a EnWG richtlinienkonform auszulegen ist.²²² Demnach handelt es sich nur dann um eine Kundenanlage, wenn **kein Verteilernetz** gegeben ist.²²³

Die Elektrizitätsbinnenmarkttrichtlinie definiert den Begriff des „Verteilernetzes“ zwar nicht unmittelbar. Jedoch wird der Begriff der „Verteilung“ in Art. 2 Nr. 28

²¹⁵ BT-Drs. 20/7310, S. 73.

²¹⁶ Bourwieg, in: Bourwieg/Hellermann/Hermes, EnWG, § 11 Rn. 88.

²¹⁷ Bourwieg, in: Bourwieg/Hellermann/Hermes, EnWG, § 11 Rn. 111.

²¹⁸ Bourwieg, in: Bourwieg/Hellermann/Hermes, EnWG, § 11 Rn. 88.

²¹⁹ BNetzA, Aktuelle Einschätzung der Bundesnetzagentur zum Kapazitätsengpass in Oranienburg, 17.04.2024.

²²⁰ EuGH, Ur. v. 28.11.2024 – C-293/23.

²²¹ BGH, Besch. v. 13.05.2025 – EnVR 83/20, openJur 2025, 15339.

²²² EuGH, Ur. v. 28.11.2024 – C-293/23.

²²³ Vgl. hierzu auch den darauf ergangenen Beschluss des BGH vom 13.05.2025 – EnVR 83/20, ZNER 2025, 337.

Elektrizitätsbinnenmarktrichtlinie legaldefiniert als Transport von Elektrizität mit Hoch-, Mittel- oder Niederspannung über Verteilernetze zur Belieferung von Kunden, jedoch mit Ausnahme der Versorgung. Daraus sei abzuleiten, dass für die Einordnung als Verteilernetz allein die Spannungsebene der weitergeleiteten Elektrizität (Hoch-, Mittel- oder Niederspannung) und der Umstand entscheidend sind, dass die Elektrizität zum Verkauf an Großhändler und Endkunden bestimmt ist.²²⁴ Eine nationale Regelung, die zusätzliche Kriterien aufstellt, um dadurch Energieanlagen von der Einordnung als Verteilernetz auszunehmen, sei folglich nicht mit dem Europarecht vereinbar.²²⁵ Insbesondere der räumliche Bezug der nationalen Regelung zur Kundenanlage sei nicht entscheidend.²²⁶

Unregulierten Kundenanlagen wurde mithin durch den EuGH eine Absage erteilt. Der BGH führt in seinem daraufhin ergangenen Beschluss aus, dass nur eine Energieanlage, die kein Verteilernetz ist, bei richtlinienkonformer Auslegung eine Kundenanlage sein kann.²²⁷

Für Betreiber von bisher als Kundenanlagen eingeordneten Energieanlagen, welche die Voraussetzungen eines Verteilernetzes erfüllen, folgt aus den gerichtlichen Entscheidungen nun, dass diese ein reguliertes Netz betreiben und die sich daraus ergebenden **umfangreichen gesetzlichen Pflichten** erfüllen müssen. Dazu zählen insbesondere Vorschriften im Bereich der Entflechtung (§§ 6 ff. EnWG), zahlreiche Aufgaben der Netzbetreiber (§§ 11 ff. EnWG) wie auch Vorgaben hinsichtlich des Netzanschlusses (§§ 17 ff. EnWG) und des Netzzugangs (§§ 20 ff. EnWG).

Bedeutung für Kundenanlagen zur betrieblichen Eigenversorgung

Fraglich ist, ob diese Bewertung auch auf Kundenanlagen zur betrieblichen Eigenversorgung anzuwenden ist.²²⁸ Diese waren nicht Gegenstand der in Rede stehenden Entscheidungen des EuGH und des BGH.²²⁹ Kundenanlagen zur betrieblichen Eigenversorgung unterscheiden sich von regulären Kundenanlagen dahingehend, dass sie sich auf einem räumlich zusammengehörenden Betriebsgebiet befinden und fast ausschließlich dem betriebsnotwendigen Transport

von Energie innerhalb des eigenen Unternehmens oder zu verbundenen Unternehmen oder fast ausschließlich dem der Bestimmung des Betriebs geschuldeten Abtransport in ein Energieversorgungsnetz dienen.

Gegen die Einordnung einer Kundenanlagen zur betrieblichen Eigenversorgung als Verteilernetz kann angeführt werden, dass diese gerade nicht der Versorgung Dritter mit Energie dienen, sondern vielmehr der Selbstversorgung des Betreibers.²³⁰ In diesem Zusammenhang wird argumentiert, dass derartige Anlagen nach der Rechtsprechung des EuGH schon gar nicht unter den Verteilernetzbegriff fallen und demnach regulierungsfrei betrieben werden dürfen.²³¹ Sofern Dritte dennoch mit Energie versorgt würden, sei dies unschädlich, solange die Eigenversorgung des Betriebs im Vordergrund stehe.²³² Der BGH führt hierzu aus, dass „jedenfalls sämtliche Leitungssysteme, die der Weiterleitung von Elektrizität dienen, die nicht zum Verkauf bestimmt ist“, vom Kundenanlagenbegriff erfasst seien.²³³

Aktuelle gesetzgeberische Entwicklungen

Um Rechtsunsicherheit hinsichtlich potenziell geltender Regulierungsvorgaben zu vermeiden, ist ein **vorübergehender dreijähriger Bestandsschutz für Kundenanlagen** geplant. Diese Regelung erfolgt im Rahmen des Entwurfs eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsrechts zur Stärkung des Verbraucherschutzes im Energiebereich sowie zur Änderung weiterer energierechtlicher Vorschriften²³⁴. Die darin enthaltene Neufassung des § 118 Abs. 7 sieht vor, dass Energieanlagen, die die Voraussetzungen einer Kundenanlage im Sinne des EnWG erfüllen – d. h. sowohl die der regulären Kundenanlagen als auch der Kundenanlage zur betrieblichen Eigenversorgung – und vor Inkrafttreten der EnWG-Novelle an ein Energieversorgungsnetz angeschlossen wurden, von Vorgaben in Bezug auf die Regulierung von Energieversorgungsnetzen bis zum 31. Dezember 2028 ausgenommen bleiben.²³⁵

Betreiber bisheriger Kundenanlagen sind mithin für diesen Zeitraum weiterhin nicht als Netzbetreiber einzustufen.²³⁶ Insofern wird durch die Regelung

²²⁴ EuGH, Urt. v. 28.11.2024 – C-293/23, Rn. 52 f.

²²⁵ EuGH, Urt. v. 28.11.2024 – C-293/23, Rn. 61 f.

²²⁶ Peiffer, in: BeckOK EnWG, § 3 Nr. 24a Rn. 8b.

²²⁷ BGH, Beschl. v. 13.05.2025 – EnVR 83/20, openJur 2025, 15339.

²²⁸ Peiffer, in: BeckOK EnWG, § 3 Nr. 24b Rn. 1a.

²²⁹ Krafczyk/Wittich, ZNER 2025, 387 (388).

²³⁰ Peiffer, in: BeckOK EnWG, § 3 Nr. 24b Rn. 1a; Krafczyk/Wittich, ZNER 2025, 387 (388).

²³¹ Vgl. EuGH, Urt. v. 28.11.2024 – C-293/23, Rn. 62, 65; BT-Drs. 21/2793, S. 187; Köster/Hefe, EnWZ 2025, 258 (263).

²³² Peiffer, in: BeckOK EnWG, § 3 Nr. 24b Rn. 1a.

²³³ BGH, Beschl. v. 13.05.2025 – EnVR 83/20, openJur 2025, 15339, Rn. 32.

²³⁴ BT-Drs. 21/2793.

²³⁵ BT-Drs. 21/2793, S. 106.

²³⁶ BT-Drs. 21/2793, S. 187.

zumindest übergangsweise Rechtssicherheit dahingehend geschaffen, dass die Regulierungsvorschriften nicht anzuwenden sind.

Die Übergangsregelung soll dem Gesetzgeber die nötige Zeit verschaffen, das EnWG in Bezug auf Vorschriften zur Kundenanlage europarechtskonform anzupassen.²³⁷ Der Vorteil für Betreiber betroffener Kundenanlagen besteht darin, dass diese nicht gezwungen werden, aufgrund drohender Investitionen durch regulatorische Anforderungen ihre Produktionsprozesse oder Geschäftsmodelle einzustellen.²³⁸ Darüber hinaus wird auch dem aufgrund von Abgrenzungsschwierigkeiten drohenden Aufwand für die Regulierungsbehörden vorerst entgegengewirkt.²³⁹

Rechtliche Einordnung von Kundenanlagen, die nicht von der Übergangsregelung erfasst sind

An dieser Stelle ist jedoch hervorzuheben, dass die zuvor bestandene Unsicherheit nur für solche Kundenanlagen ausgeräumt wurde, die vor Inkrafttreten der EnWG-Novelle an das Energieversorgungsnetz angeschlossen wurden.²⁴⁰ In Bezug auf später angeschlossene Kundenanlagen ist die Definition der Kundenanlage folglich europarechtskonform auszulegen.²⁴¹

Ausblick

Eine endgültige europarechtskonforme Neuregelung der Definition der Kundenanlage aus § 3 Nr. 24a/b EnWG durch den Gesetzgeber bleibt abzuwarten. Auch besteht die Gefahr von Rechtsunsicherheit, ob die beschlossene Übergangsregelung selbst mit dem Europarecht vereinbar ist.

19.2 Vorgelagerte Netzinfrastruktur: Gas/Wasserstoff

Aus dem Ziel der Klimaneutralität 2045 folgt die Notwendigkeit der Umstellung der Energieinfrastruktur im Sinne einer klimafreundlichen Energieversorgung. Dies wird im Bereich der Versorgung mit Erdgas sowohl den Einsatz neuer Energieträger, insbesondere Wasserstoff, als auch den Abschied von nicht länger benötigter Netzinfrastruktur umfassen. Es ergibt sich hierdurch ein Spannungsfeld, in dem Klimaziele, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit in Einklang zu bringen

sind.²⁴² Dies gilt auch für die Transformation auf der Verteilernetzebene. Für ihr Gelingen sind geeignete Rahmenbedingungen erforderlich. Insbesondere müssen die regulatorischen Vorgaben klar und praxistauglich sein.

Es fehlt bisher an einem kohärenten Rechtsrahmen für die Transformation der Erdgasverteilernetze hin zu Wasserstoff.

Das Gaspaket, bestehend aus der Gas- und Wasserstoffbinnenmarktverordnung (EU-GasVO) und der Gas- und Wasserstoffbinnenmarktrichtlinie (EU-GasRL), trat nach langwierigen Verhandlungen am 4. August 2024 in Kraft. Es beinhaltet einen europäischen Ordnungsrahmen für die Weiterentwicklung des Gasmarktes und erstmals auch für den entstehenden Wasserstoffmarkt. Als Verordnung gilt die EU-GasVO unmittelbar in den Mitgliedstaaten der EU, während die Richtlinie der Umsetzung ins nationale Recht bedarf. Die Umsetzung der EU-GasRL muss spätestens bis zum 4. August 2026 erfolgen. Seit dem 4. November 2025 liegt nun der Referentenentwurf der Bundesregierung zur Umsetzung der im Gaspaket enthaltenen europäischen Vorgaben vor. Das Gesetzgebungsverfahren steht somit noch am Anfang. Das Inkrafttreten der EnWG-Novelle wird im Sommer 2026 erwartet

Der nationale Rechtsrahmen sieht bereits jetzt umfassende regulatorische Vorgaben für den leitungsgebundenen Transport von Wasserstoff vor. Maßgebliche Rechtsgrundlagen auf nationaler Ebene sind das EnWG, die Wasserstoffnetzentgeltverordnung (Wasserstoff-NEV)²⁴³ sowie die einschlägigen Festlegungen der Bundesnetzagentur. Der Fokus der bestehenden regulatorischen Vorgaben liegt bisher klar auf dem Wasserstoff-Kernnetz. Auf **Verteilernetzebene sehen sich die Akteure demgegenüber erheblichen regulatorischen Unsicherheiten ausgesetzt**. Zwar wurden mit den reformierten Regelungen des Gesetzes für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze²⁴⁴ (WPG) sowie dem Gebäudeenergiegesetz²⁴⁵ (GEG) Kommunen bzw. Gebäude und Heizungsinhaber

²³⁷ BT-Drs. 21/2793, S. 187.

²³⁸ BT-Drs. 21/2793, S. 187.

²³⁹ BT-Drs. 21/2793, S. 187.

²⁴⁰ BT-Drs. 21/2793, S. 187.

²⁴¹ BT-Drs. 21/2793, S. 187.

²⁴² BMWK, Green Paper Transformation Gas-/Wasserstoffverteilernetze, April 2024, S. 2.

²⁴³ Wasserstoffnetzentgeltverordnung vom 23. November 2021 (BGBl. I S. 4955).

²⁴⁴ Wärmeplanungsgesetz vom 20. Dezember 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 394).

²⁴⁵ Gebäudeenergiegesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1728), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 16. Oktober 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 280) geändert worden ist.

adressiert. Für **Erdgas- bzw. Wasserstoffverteilternetzbetreiber** mangelt es hingegen an konkreten Vorgaben.²⁴⁶

Das Fehlen eines klaren Rechtsrahmens kann die erforderliche Transformation von Erdgasverteilernetzen hin zu Wasserstoffverteilernetzen behindern bzw. deutlich verzögern. **Dringend erforderlich ist diese Transformation derweil gerade für die Industrie: Etwa 78 % der Industriestandorte, die künftig Wasserstoff benötigen, liegen weiter als 1 km vom geplanten Kernnetz entfernt.**²⁴⁷ Mit dem Green Paper Transformation Gas-/Wasserstoffverteilernetze²⁴⁸ identifizierte die Ampel-Regierung bereits im Frühjahr 2024 wesentliche anzupassende Themenfelder mit Blick auf einen neuen Ordnungsrahmen, die jedoch bisher noch nicht abschließend gesetzlich adressiert wurden.

Zentrale Rahmenbedingungen für die Transformation auf Verteilernetzebene lassen sich aus **europäischen Vorgaben** entnehmen. Die Gas- und Wasserstoffbinnenmarktrichtlinie (EU-GasRL) und die Gas- und Wasserstoffbinnenmarktverordnung (EU-GasVO)²⁴⁹ (zusammen als „**Gaspaket**“ bezeichnet) wurden vor dem Hintergrund des Umstiegs auf klimaneutrale Industrien und mit dem Ziel der Neugestaltung eines Ordnungsrahmens verabschiedet. Es versucht, den Widerspruch abzubilden, dass der Transformationsprozess auf eine Umstellung auf Wasserstoff bei gleichzeitiger Reduktion bis zur Aufgabe der Erdgasnachfrage ausgerichtet ist.²⁵⁰

Die EU-GasRL enthält Vorgaben zu den wesentlichen regulatorischen Elementen eines künftigen Wasserstoffnetzbetriebs. Zu diesen zählen u. a. die Genehmigung des Netzbetriebs, Entflechtungsregeln, aber auch Netzentwicklungsplanung und Vorgaben zu Anschluss und Zugang zu den Netzinfrastrukturen. Die Umsetzung der Richtlinie ins nationale Recht steht noch aus und muss bis zum 5. August 2026 erfolgen. Mit dem am 4. November 2025 vorgelegten **Referentenentwurf der Bundesregierung zur Änderung des EnWG** zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Binnenmarktpakets²⁵¹ liegt nun eine erste Konzeption für die Umsetzung der Regulierungsvorgaben des Gaspakets in nationales Recht vor.

Im Folgenden soll vor dem Hintergrund des zu untersuchenden Transformationsprozesses und der hieraus entstehenden **interaktionsbezogenen Herausforderungen für die Netzbetreiber** der Schwerpunkt auf Fragen der **Planungsverantwortlichkeit** und den **Anschlussbedingungen** liegen, bevor ein kurzer Blick auf Fragen der **Finanzierung von Wasserstoffnetzen** auf Verteilernetzebene geworfen wird. Nach kurzer Darstellung der aktuellen Rechtslage in Deutschland werden die für den jeweiligen Themenschwerpunkt relevanten Vorgaben der EU-GasRL untersucht. Daran schließt sich eine Einordnung der im Referentenentwurf enthaltenen Vorgaben und die Benennung etwaiger Problemstellungen für Netzbetreiber an.

Abschließend sollen die wesentlichen Problemstellungen, die sich in Folge der Transformation der Gasnetze im Hinblick auf Konzessionen ergeben können, skizziert werden.

19.2.1 Planungsverantwortlichkeit der Verteilernetzbetreiber

Netzbetreiber stehen mit Blick auf die integrierte Netzentwicklungsplanung für Erdgas und Wasserstoff nach §§ 15 ff. EnWG vor der Herausforderung, den Markthochlauf von Wasserstoff effizient zu fördern, eine Weiterentwicklung des Kernnetzes aus dem Gasnetz zu gewährleisten und gleichzeitig einen bedarfsgerechten Betrieb mit Erdgas sicherzustellen. Die Planungsverantwortung liegt dabei bisher in erster Linie auf Ebene der Fernleitungsnetzbetreiber. Die Rolle der Verteilernetzbetreiber H₂/Gas ist nach dem EnWG in diesem Zusammenhang vorwiegend passiver Natur und beschränkt sich auf die Bereitstellung von Informationen.²⁵²

Vorgaben aus der EU-GasRL

Mit dem Gaspaket verändert sich die Rolle der Verteilernetzbetreiber grundlegend: Es wird ihnen eine **originäre Planungsverantwortlichkeit** zugewiesen. Dies zeigt sich durch die Pflicht zur Erstellung von lokalen **Wasserstoffentwicklungsplänen** durch die Wasserstoffverteilternetzbetreiber (Art. 56 EU-GasRL) und der spiegelbildlichen Verpflichtung zur Erstellung von **Stilllegungsplänen** durch die Erdgasverteilternetzbetreiber (Art. 57 EU-GasRL).

²⁴⁶ Däuper/Schemmann, EnWZ 2024, 345 (345).

²⁴⁷ Däuper/Schemmann, EnWZ 2024, 345 (345).

²⁴⁸ BMWK, Green Paper Transformation Gas-/Wasserstoffverteilernetze, April 2024.

²⁴⁹ Verordnung (EU) 2024/1789 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 über die Binnenmärkte für erneuerbares Gas, Erdgas sowie Wasserstoff, zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1227/2011, (EU) 2017/1938, (EU) 2019/942 und (EU) 2022/869 sowie

des Beschlusses (EU) 2017/684 und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 715/2009

²⁵⁰ Däuper/Schemmann, EnWZ 2024, 345 (345).

²⁵¹ BMWK, Referentenentwurf: Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets.

²⁵² Däuper/Schemmann, EnWZ 2024, 345 (347).

Nach Art. 56 Abs. 1 EU-GasRL übermitteln die Wasserstoffverteilernetzbetreiber der Regulierungsbehörde alle vier Jahre einen **Plan zur Wasserstoffinfrastruktur**, die sie zu errichten beabsichtigen. Der Plan ist in enger Zusammenarbeit mit den Verteilernetzbetreibern für Erdgas und Strom und – soweit vorhanden – mit den Betreibern von Fernwärme und Fernkälte zu erstellen. Ermöglicht wird auch eine gemeinsame Planung der Entwicklung von Wasserstoffentwicklungsplänen und Stilllegungsplänen durch die Verteilernetzbetreiber aus beiden Sparten. Inhaltlich muss der Entwicklungsplan für Wasserstoff nach Art. 56 Abs. 2 EU-GasRL bestimmte Vorgaben enthalten. Zu diesen zählen u. a. Angaben zu ausgehandelten Kapazitätsbedarfen zu Volumen und Laufzeit sowie Informationen über die Wasserstoffversorgung und den Kapazitätsbedarf bestehender und potenzieller künftiger schwer zu dekarbonisierender Endnutzer (Art. 56 Abs. 2 lit. a EU-GasRL). Ebenfalls enthalten sein müssen Informationen darüber, inwieweit für den Transport von Wasserstoff umgewidmete Erdgasleitungen verwendet werden (Art. 56 Abs. 2 lit. c EU-GasRL). Darüber hinaus ist die kommunale Wärmeplanung zu berücksichtigen (Art. 56 Abs. 2 lit. b EU-GasRL) und es muss sichergestellt werden, dass die Planung mit dem unionsweiten Netzentwicklungsplan für Wasserstoff und den nationalen Netzentwicklungsplänen nach Art. 55 EU-GasRL in Einklang steht (Art. 56 lit. g EU-GasRL).

Die Mitgliedsstaaten müssen nach Art. 57 Abs. 1 EU-GasRL darüber hinaus sicherstellen, dass die Verteilernetzbetreiber **Pläne für die Netzstilllegung** erarbeiten, wenn eine Verringerung der Erdgasnachfrage, die die Stilllegung von Erdgasverteilernetzen oder Teile solcher Netze erfordert, zu erwarten ist. Auch hier ist eine enge Zusammenarbeit mit den bereits genannten Betreibern weiterer Sparten vorgesehen. Zu den nach Art. 57 Abs. 2 EU-GasRL erforderlichen Inhalten zählen Informationen zu angemessenen Annahmen mit Blick auf die Entwicklung der Erdgaserzeugung, Erdgaseinspeisung und der Versorgung mit Erdgas (einschließlich Biomethan) und die Berücksichtigung des Verbrauchs von Erdgas in allen Sektoren auf Verteilernetzebene (Art. 57 Abs. 2 lit. b). Die erforderlichen Infrastrukturanpassungen müssen, einschließlich der Leitungen, die stillgelegt werden, ermittelt werden (Art. 57 Abs. 2 lit. c). Auch im Rahmen des Stilllegungsplans ist eine Berücksichtigung der kommunalen

Wärmeplanung und weiterer Sektoren erforderlich (Art. 57 Abs. 2 lit. a). Der integrierte Netzentwicklungsplan-Gas/H₂ ist ebenfalls zu berücksichtigen (Art. 57 Abs. 2 lit. h).

Die im Rahmen der EU-GasRL geforderten Pläne sollen als **rechtlich verbindliche Bezugspunkte** für eine auf den Fall bezogene räumliche Differenzierung allgemeiner Vorgaben dienen.²⁵³ Die Vorgaben gehen dabei über die planungsbezogenen Vorgaben des WPG und § 71k GEG hinaus. Insbesondere sind verbindliche Stilllegungspläne bisher weder im GEG noch im WPG angelegt.²⁵⁴

Umsetzung nach dem Referentenentwurf zur Änderung des EnWG

Mit dem Referentenentwurf zur Änderung des EnWG zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets (EnWG-E) liegt nun erstmals ein Umsetzungsvorschlag für die Einführung der genannten Planungsinstrumente vor. Nach Abschluss der Länder- und Verbändebeteiligung folgt die Erarbeitung der finalen Fassung des Gesetzentwurfs. **Der Abschluss des Gesetzgebungsverfahrens wird bis zur parlamentarischen Sommerpause 2026 angestrebt.**²⁵⁵

§ 16b Abs. 1 EnWG-E dient der Umsetzung von Art. 56 Abs. 1 S. 1 EU-GasRL und verpflichtet existente oder zukünftige Betreiber von Wasserstoffverteilernetzen zur Erstellung eines **Entwicklungsplans für das Wasserstoffverteilernetz**, sobald sie einen Beschluss zur Errichtung eines Wasserstoffverteilernetzes fassen. Ein solcher Beschluss ist jedenfalls dann gegeben, wenn eine endgültige Investitionsentscheidung (final investment decision – FID) über den Aufbau des Wasserstoffverteilernetzes getroffen wurde. Die Erstellung des Plans soll aber auch zu einem früheren Zeitpunkt möglich sein.²⁵⁶ In Umsetzung von Art. 57 Abs. 1 S. 1 und Abs. 4 EU-GasRL erstellen Gasnetzbetreiber gemäß § 16b Abs. 2 EnWG-E einen Entwicklungsplan für das **Gasverteilernetz** oder von Teilen eines solchen Netzes, sobald eine dauerhafte **Verringerung der Erdgasnachfrage** innerhalb der nächsten zehn Jahre derart zu erwarten ist, dass diese die Verringerung, Umstellung oder dauerhafte Außerbetriebnahme des Gasverteilernetzes oder Teilen davon erforderlich macht. **Bei der Prognose der Erdgasnachfrage liegt**

²⁵³ BMWK, Green Paper Transformation Gas-/Wasserstoffverteilernetze, April 2024, S.12.

²⁵⁴ BMWK, Green Paper Transformation Gas-/Wasserstoffverteilernetze, April 2024, S. 12.

²⁵⁵ BT-Drs. 21/2833, S. 2., Deutscher Bundestag, Antwort der Bundesregierung auf kleine Anfrage zur nationalen Umsetzung des EU-Gaspakets.

²⁵⁶ BMWK, Referentenentwurf: Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, S. 235.

es dabei im Verantwortungsbereich der Netzbetreiber, nachvollziehbare Einschätzungen auf Basis der zur Verfügung stehenden belastbaren Erkenntnisquellen zu treffen. Maßgebliche Parameter sind – entsprechend den Vorgaben der EU-GasRL – nach § 16d Abs. 3 Nr. 1 EnWG-E insbesondere Annahmen zur Entwicklung der Erdgaserzeugung und -einspeisung sowie der Erdgasnachfrage und -versorgung einschließlich Biomethan und der Verbrauch von Erdgas in allen Sektoren.²⁵⁷ Neben der Wärmeplanung können als Erkenntnisquellen u. a. Gasnetzgebietstransformationspläne nach dem DVGW-Regelwerk, das Ergebnis integrierter Netzentwicklungspläne, Studien zur Gasnetztransformation oder sonstige wissenschaftliche Simulationen der Entwicklungen des Gasverbrauchs sowie die den Netzbetreibern vorliegenden Verbrauchszahlen dienen. **Bei industriellen und gewerblichen Kunden,** die eine energetische oder stoffliche Gasnachfrage für den Betrieb ihrer Prozesse aufweisen, **können die späteren Schritte von Marktabfrageprozessen wichtige Anhaltspunkte liefern,** sofern diese hinreichend konkret und belastbar sind. Insbesondere rechtliche oder vertragliche Bindungen, die über reine Absichtserklärungen hinausgehen, können hier Berücksichtigung finden.²⁵⁸

Gemäß Art. 16b Abs. 3 EnWG-E gilt, dass die Betreiber der entsprechenden Gasverteiler- bzw. Wasserstoffverteilernetze einen **gemeinsamen Plan** erstellen, wenn in einem Netzgebiet mit Blick auf beide Energieträger der Anwendungsbereich der Verteilernetzentwicklungspläne eröffnet ist. Darüber hinaus können gemäß § 16b Abs. 4 EnWG-E Betreiber von Wasserstoffverteilernetzen, die in benachbarten Netzgebieten tätig sind, für ihre Wasserstoff- und Gasverteilernetze einen gemeinsamen Verteilernetzentwicklungsplan erstellen (regionale Planung). Die Verteilernetzentwicklungspläne sind alle vier Jahre zu aktualisieren, eine Aktualisierung kann aber auch bereits nach zwei Jahren erfolgen (§ 16b Abs. 5 EnWG-E).

§ 16c EnWG-E enthält **verfahrensrechtliche Vorgaben** für die Erstellung der Pläne nach § 16b EnWG-E, etwa mit Blick auf die Einbeziehung der Öffentlichkeit, und Vorgaben zur Zusammenarbeit mit anderen Netzbetreibern. Nach § 16c Abs. 2 EnWG-E sind Netzbetreiber der Fernleitungsebene, aber auch aus anderen Sektoren, einschließlich der Betreiber eines Wärmenetzes

nach § 3 Abs. 1 Nr. 17 des WPG berechtigt und verpflichtet, mit den für die Erstellung der Verteilernetzentwicklungspläne zuständigen Netzbetreibern zusammenzuarbeiten. Insbesondere stellt die nach dem WPG planungsverantwortliche Stelle dem zuständigen Netzbetreiber auf Anforderung den Wärmeplan oder den entsprechenden Entwurf zur Verfügung (§ 16c Abs. 3 EnWG-E). In § 16c Abs. 4 EnWG-E ist ein Konsultationsverfahren verankert. Durch dieses sollen die einschlägigen Interessensvertreter frühzeitig und wirksam in den Planungsprozess, einschließlich der Bereitstellung und des Austauschs von Informationen, eingebunden werden. Der für die Planerstellung zuständige Netzbetreiber muss der Öffentlichkeit, einschließlich **tatsächlicher und potenzieller Netznutzer** sowie betroffener Netzbetreiber, Kommunen und Letztverbraucher, **Gelegenheit zur Äußerung** geben.²⁵⁹

§ 16d EnWG-E enthält umfangreiche **materielle Vorgaben** für die Erstellung der Verteilernetzentwicklungsplanung. Die Verteilernetzentwicklungspläne nach § 16b Abs. 1–4 EnWG-E müssen sich gemäß § 16d Abs. 1 EnWG-E auf einen Zeitraum **von mindestens zehn und höchstens 15 Jahren erstrecken. Sie müssen außerdem die nach Teil 2 des WPG erstellten oder diesen nach § 5 WPG gleichgestellten Pläne berücksichtigen** sowie dem Bedarf auch solcher Sektoren Rechnung tragen, die nicht unter diese Pläne fallen. Darüber hinaus muss u. a. die Systementwicklungsstrategie berücksichtigt und der Einklang mit dem integrierten Netzentwicklungsplan und dem unionsweiten Netzentwicklungsplan sichergestellt werden.

§ 16d Abs. 2 EnWG-E enthält Vorgaben für die Wasserstoffverteilernetzentwicklungsplanung bzw. die integrierte Planung von Erdgas- und Wasserstoffverteilernetzen und Regionalplänen.

Wasserstoffverteilernetzentwicklungspläne müssen alle wirksamen Maßnahmen **zur bedarfsgerechten und effizienten Optimierung, zur Verstärkung und zum Ausbau des Wasserstoffverteilernetzes** enthalten, die für einen sicheren und zuverlässigen Netzbetrieb erforderlich sind (§ 16d Abs. 2 Nr. 1 EnWG-E). Diese Formulierung orientiert sich an den Vorgaben zur integrierten Netzentwicklungsplanung auf Transportebene.²⁶⁰ Ebenfalls enthalten sein müssen

²⁵⁷ BMW, Referentenentwurf: Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, S. 236.

²⁵⁸ BMW, Referentenentwurf: Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, S. 236.

²⁵⁹ BMW, Referentenentwurf: Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, S. 240.

²⁶⁰ BMW, Referentenentwurf: Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, S. 242.

Informationen über die Investitionskosten, die die Wasserstoffverteilernetzinfrastruktur voraussichtlich verursachen wird (§ 16d Abs. 2 Nr. 1 EnWG-E).

Darüber hinaus muss der Plan Angaben zu dem mit den Nutzern des Wasserstoffverteilernetzes und dessen Betreiber **ausgehandelten Kapazitätsbedarf** und zu dem für die Wasserstoffnachfrage und Versorgung im Betrachtungszeitraum **erforderlichen Kapazitätsbedarf von schwer zu dekarbonisierenden Letztverbrauchern** umfassen (Art. 16d Abs. 2 Nr. 2 EnWG-E). Beim zu ermittelnden Kapazitätsbedarf sind zunächst die Bedarfe bestehender Nutzer gemeint. Es müssen insbesondere sowohl Angaben über die Laufzeit der Nutzung als auch Angaben über das Volumen der Bedarfe im Plan enthalten sein. Mit Blick auf den **Kapazitätsbedarf schwer zu dekarbonisierender Letztverbraucher** ist sowohl über bestehende als auch über potenzielle zukünftige Letztverbraucher zu informieren. **Netzbetreiber müssen diesbezüglich Prognosen der Kapazitätsentwicklung aufstellen.**²⁶¹ Darüber hinaus sind Informationen auch über die Bewertung über den Grundsatz der „**Energieeffizienz an erster Stelle**“ nach Artikel 2 Nr. 18 der Governance-VO²⁶² bereitzustellen (§16 d Abs. 2 Nr.3 EnWG-E).

§ 16d Abs. 3 EnWG-E enthält spezielle Vorgaben für die Erstellung von isolierten Gasverteilernetzentwicklungsplänen und integrierten Verteilernetzentwicklungsplänen oder Regionalplänen nach § 16b Abs. 4 EnWG-E. In Umsetzung von Art. 57 Abs. 2 lit b) EU-GasRL sieht § 16d Abs. 3 Nr. 1 EnWG-E vor, dass sich die Pläne auf angemessene Annahmen bezüglich der Entwicklung der Erdgaserzeugung und -einspeisung, der Erdgasnachfrage und -versorgung, einschließlich Biomethan, wie auf den Verbrauch von Erdgas in allen Sektoren auf der Ebene der Verteilung im Betrachtungszeitraum, stützen müssen. Es muss außerdem die Infrastruktur aufgeführt werden, die weiterbetrieben, umgestellt oder dauerhaft außer Betrieb genommen werden soll. Im Falle der Umstellung oder Außerbetriebnahme muss zudem dargelegt werden, inwieweit Versorgungssicherheit durch die verbleibende Infrastruktur gewährleistet werden kann (§ 16e Abs. 3 Nr. 3 EnWG-E). Der Plan muss außerdem angemessene Angaben dazu enthalten, inwiefern für betroffene

Letztverbraucher im Zeitpunkt der Umstellung oder Außerbetriebnahme im jeweiligen Netzgebiet hinreichende alternative Versorgungsmöglichkeiten existieren (§ 16e Abs. 3 Nr. 4 EnWG-E).

Für die **Prüfung und Bestätigung** der Verteilernetzentwicklungspläne ist die **Bundesnetzagentur** zuständig, wenn mehr als 200.000 Gas- und Wasserstoffkunden unmittelbar ans Netz angeschlossen sind (§ 16e Abs. 1 Nr. 1 EnWG-E). In allen übrigen Fällen ist die **nach Landesrecht zuständige Behörde** zuständig. Diese ist von den Regulierungsbehörden des jeweiligen Landes zu unterscheiden.²⁶³ Die Bundesländer sind zur Bestimmung der zuständigen Behörde durch Gesetz, Rechtsverordnung oder durch sonstigen Organisationsakt verpflichtet.²⁶⁴

Der Schwellenwert weicht von der allgemeinen Zuständigkeitsregel des § 54 Abs. 2 EnWG ab, die ab 100.000 unmittelbar oder mittelbar angeschlossenen Netzkunden die Zuständigkeit bei der BNetzA sieht. Auf diesem Weg soll gewährleistet werden, dass trotz der kumulierten Betrachtung von Gas- und Wasserstoffanschlüssen die BNetzA nur für Verteilernetzentwicklungspläne mit überregionaler Bedeutung zuständig ist, während die Zuständigkeit für regionale und lokale Verteilernetze bei den Landesbehörden liegt.²⁶⁵ Handelt es sich um ein Netzgebiet, das über die Grenzen eines Landes hinausreicht, ist die Behörde des Landes zuständig, in dessen Gebiet kumuliert die meisten Gas- und Wasserstoffkunden des jeweiligen Verteilernetzentwicklungsplans unmittelbar angeschlossen sind (§ 16e Abs. 1 S. 3 EnWG-E).

Die jeweils zuständige Behörde kann Änderungen der Verteilernetzentwicklungspläne verlangen (§ 16e Abs. 3 EnWG-E). Die **zuständige Regulierungsbehörde** kann außerdem durch Festlegung nach § 29 Abs. 1 EnWG nähere Bestimmungen zum Inhalt und zum Verfahren der zu erstellenden Pläne treffen (§ 16e Abs. 5 S. 1 EnWG-E). Zuständig für eine Festlegung nach S. 1 sind die **Landesregulierungsbehörden** innerhalb eines Landes und im Übrigen die BNetzA (§16e Abs. 5 S. 2 EnWG-E). In Sachsen ist die Landesregulierungsbehörde beim Sächsischen

²⁶¹ BMW, Referentenentwurf: Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, S. 243.

²⁶² Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 94/22/EG, 98/70/EG, 2009/31/EG, 2009/73/EG, 2010/31/EU, 2012/27/EU und 2013/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien

2009/119/EG und (EU) 2015/652 des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates.

²⁶³ Kress, in: BeckOK EnWG, § 54 Rn. 182.

²⁶⁴ Gundel, in: Bourwieg/Hellermann/Hermes, EnWG, § 54 Rn. 28.

²⁶⁵ BMW, Referentenentwurf: Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, S. 246.

Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit, Energie und Klimaschutz verortet.²⁶⁶

Die Netzbetreiber sind nach § 16e Abs. 6 EnWG-E zur Veröffentlichung der Netzentwicklungsplanung verpflichtet.

Mögliche Herausforderungen für Netzbetreiber

Die Vorlage des Referentenentwurfs zur Umsetzung der EU-GasRL ist ein zentraler Schritt auf dem Weg zur Schaffung eines Rechtsrahmens für die Transformation der Gasverteilernetze und damit auch für die Dekarbonisierung der nicht an das Kernnetz angeschlossenen Industrien. Es ist zu begrüßen, dass die Umsetzung der Planungsverantwortung der Verteilernetzbetreiber als zentrale neue Regelungsmaterie Eingang in den Referentenentwurf gefunden hat und den gegebenen Umsetzungsspielraum in weiten Teilen sinnvoll nutzt. So ist z. B. die Möglichkeit der Schaffung gemeinsamer Verteilernetzentwicklungspläne positiv zu bewerten.

Der Entwurf weist jedoch auch einige Unschärfen auf: So wurde dieser zu Recht als in Teilen zu unbestimmt kritisiert. Dies gilt etwa mit Blick auf den die Verpflichtung zur Planung auslösenden Beschluss zur Errichtung des Wasserstoffverteilernetzes. In der Gesetzesbegründung wird lediglich beispielhaft auf das Vorliegen einer FID verwiesen; wann genau diese als erfüllt gilt und unter welchen Voraussetzungen bereits vorher eine Verpflichtung entsteht, bleibt offen.²⁶⁷ Ein weiterer Punkt betrifft die Bezugnahme und Abstimmung der Verteilernetzentwicklungsplanung und der Wärmeplanung. Nach dem Entwurf sollen unverbindliche und verbindliche Planungsmaßnahmen rechtlich und planerisch miteinander verschränkt werden. Dabei bleibt nach Auffassung einiger Stakeholder undeutlich, in welchem Verhältnis diese Pläne konkret zueinander stehen und welche Wechselwirkung sie entfalten. Auch wenn der Entwurf vorschreibt, dass die Wärmepläne in der Planung Berücksichtigung finden sollen, bleibe unklar, wie die konkrete Nutzung der im Rahmen der

Wärmeplanung erhobenen Daten ausgestaltet sein soll.²⁶⁸ Um unnötige Doppelstrukturen zu vermeiden, wurde im Rahmen der Konsultation außerdem vorgeschlagen, bei Einführung der Verteilernetzentwicklungsplanung die Pflicht zur Erstellung eines verbindlichen Fahrplans nach § 71k GEG zu streichen.²⁶⁹

Nach Auffassung der Branchenverbände sind darüber hinaus die materiellen Anforderungen an die Netzbetreiber für die Erstellung der Verteilernetzpläne nach § 16d EnWG-E zu hoch. Tatsächlich gehen sie zum Teil über die Anforderungen der EU-GasRL hinaus, etwa mit Blick auf die Veröffentlichung von Investitionskosten oder der Verpflichtung zur Nennung alternativer Versorgungsmöglichkeiten.²⁷⁰ Insoweit bestehen im Hinblick auf einige der Vorgaben Zweifel, ob ihre jetzige Ausgestaltung zweckmäßig und praxistauglich ist.

19.2.2 Anschlussverweigerung und -kündigung: Gasverteilernetze

Wie auch im Strombereich besteht im Gasbereich prinzipiell eine unbedingte Anschlusspflicht aus §§ 17, 18 EnWG. Ein Anschlussbegehren kann daher nur unter sehr strengen Voraussetzungen verweigert werden.

Vorgaben aus der EU-GasRL

Auch nach Art. 38 Abs. 1 EU-GasRL gilt, dass die grundsätzliche Anschlusspflicht für Gas- und Wasserstoffnetze bestehen bleibt, es sei denn, der Netzbetreiber verfügt nicht über die notwendige Kapazität oder es fehlt an einer Netzverbindung. Nach Art. 38 Abs. 2 EU-GasRL müssen die Mitgliedsstaaten in diesem Fall geeignete Maßnahmen ergreifen, damit Netzbetreiber für den erforderlichen Ausbau Sorge tragen, solange dies wirtschaftlich vertretbar ist oder wenn ein potenzieller Kunde bereit ist, die Kosten zu übernehmen.

Die EU-GasRL sieht darüber hinaus nun auch die Einführung einer **Erweiterung der Verweigerungsgründe für Anschluss** und Zugang vor und schafft die

²⁶⁶ Die Landesregulierungsbehörde ist Teil des SMWA und keinem spezifischen Referat zugeteilt, vgl. Organigramm des Sächsischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Arbeit, Energie und Klimaschutz.

²⁶⁷ Thüga, Entwicklungsplanung-Einfach. Erfüllbar. Erwartungssicher., Stellungnahme zum Referentenentwurf zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, 21.11. 2025, S. 2; so auch DVGW, Stellungnahme vom 24. November 2025 zum Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Binnenmarktpakets, S. 7; BDEW, Stellungnahme zum Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Binnenmarktpakets, 24.11.2025, S. 26.

²⁶⁸ Thüga, Entwicklungsplanung-Einfach. Erfüllbar. Erwartungssicher., Stellungnahme zum Referentenentwurf zur Änderung des

Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, 21.11. 2025, S.4.

²⁶⁹ BDEW, Stellungnahme zum Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Binnenmarktpakets, 24.11.2025, S. 35.

²⁷⁰ DVGW, Stellungnahme vom 24. November 2025 zum Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Binnenmarktpakets, S. 8; BDEW, Stellungnahme zum Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Binnenmarktpakets, 24.11.2025, S. 30.

Möglichkeit einer **Trennung des Netzanschlusses**, wenn es um die Sicherstellung der Einhaltung des Ziels der Klimaneutralität geht (Art. 38 Abs. 4 EU GasRL). Dabei ist für die Verteilernetzebene Voraussetzung, dass die zuständige nationale Behörde gemäß Art. 57 Abs. 3 EU-GasRL den Plan für die Netzstillegung gebilligt hat, die Stilllegung von Netzteilen folglich im lokalen Stilllegungsplan der Netzbetreiber vorgesehen ist. Hier zeigt sich die Relevanz der nun ausgeweiteten Planungsverantwortung auf Verteilernetzebene. **Ohne eine Stilllegungsplanung wird eine Anschlussverweigerung in der Regel nicht möglich sein.**²⁷¹

Umsetzung nach dem Referentenentwurf zur Änderung des EnWG

Mit Blick auf die Transformation der Verteilernetze ist eine Ausweitung der Verweigerungs- bzw. Kündigungsmöglichkeiten ein wichtiger Baustein, der allerdings im Spannungsverhältnis zur Versorgungssicherheit und zum Verbraucherschutz steht.²⁷² Der Referentenentwurf formuliert nun einen Ansatz, die europäischen Vorgaben ins nationale Recht umzusetzen. Nach § 17 Abs. 2c EnWG kann der Betreiber eines Gasversorgungsnetzes einen Netzanschluss auf Verteilernetzebene auch dann verweigern, wenn er nachweist, dass die Verweigerung erforderlich ist, weil in einem nach § 16e Abs. 2 S. 1 EnWG-E bestätigten Verteilernetzentwicklungsplan die Umstellung oder dauerhafte Außerbetriebnahme von Verteilernetzen oder Teilen davon vorgesehen ist. Die Bundesnetzagentur kann durch Festlegung nach § 29 Abs. 1 EnWG objektive, transparente und nichtdiskriminierende Kriterien zur Verweigerung des Netzanschlusses nach § 17 Abs. 2c EnWG bestimmen (§ 17k Abs. 5 EnWG-E).

Der Entwurf sieht darüber hinaus vor, dass der Betreiber eines Gasversorgungsnetzes einen Netzanschluss ohne Zustimmung des betroffenen Letztverbrauchers trennen darf, wenn der bestätigte Netzentwicklungsplan oder aber der bestätigte Verteilernetzentwicklungsplan die **Umstellung oder dauerhafte Außerbetriebnahme** von für die Versorgung des Netzanschlusses erforderlichen Leitungen eines Fernleitungs- oder Gasverteilernetzes vorgesehen ist (§ 17k Abs. 1 EnWG-E). **Zentral ist die hier getroffene Fristenregelung:** So müssen die betroffenen

Letztverbraucher und betroffenen Netznutzer unverzüglich, spätestens aber zehn Jahre vor dem beabsichtigten Termin zur Trennung des Anschlusses über eine beabsichtigte Trennung aufgrund eines zur Bestätigung eingereichten Netzentwicklungsplans oder Verteilernetzentwicklungsplans informieren (§ 17k Abs. 1 Nr. 1 EnWG-E). Liegen bereits bestätigte Pläne vor, muss dies spätestens fünf Jahre vor dem Termin der Trennung erfolgen (§ 17k Abs. 1 Nr. 2 EnWG-E). Mit dieser zweiten Frist wird das Ziel verfolgt, Letztverbraucher zu schützen: So sollen etwaige lange Bestätigungsverfahren, in denen sich die Pläne noch erheblich ändern, nicht dazu führen, dass Letztverbraucher zu kurzfristig über die Anschlusstrennung informiert werden.²⁷³ Die Netzbetreiber treffen gegenüber den Netznutzern und Letztverbrauchern in diesem Zusammenhang **umfangreiche Informationspflichten**. Diese sind nicht nur über die Gründe der Trennung des Anschlusses, über das Verfahren, den Zeitplan und den geplanten Termin für die Trennung zu informieren; es sind darüber hinaus u. a. Informationen zu alternativen Versorgungsmöglichkeiten und Fördermöglichkeiten durch die Netzbetreiber zu übermitteln (§ 17k Abs. 1 Nr. 3 EnWG-E).

Mögliche Herausforderungen für Netzbetreiber

Die Fristenregelungen sollen den Netznutzern ausreichend Zeit geben, sich auf die bevorstehende Anschlusstrennung vorzubereiten. Gleichzeitig soll den Netzbetreibern durch die zehnjährige Frist ausreichend Flexibilität zur Transformation und zur Erreichung der Klimaziele gegeben werden.²⁷⁴ Ob die Fristenregelung tatsächlich geeignet ist, diese Ziele zu erreichen, bleibt abzuwarten. Im Rahmen der bisher zum Entwurf eingereichten Stellungnahmen einiger Branchenverbände, wurde etwa darauf hingewiesen, dass mit einer Einreichung von Verteilernetzentwicklungsplänen erst ab dem Jahr 2027 zu rechnen sei. Entsprechend wären Anschlusskündigungen bzw. Stilllegungen erst ab dem Jahr 2037 möglich. Da auch die tatsächliche Umstellung bzw. Stilllegung der Netze zeitintensiv ist, könne die Fristenregelung das Erreichen der Klimaziele in einigen Bundesländern und kommunale Wärmepläne gefährden.²⁷⁵

²⁷¹ Däuper/Schemmann, EnWZ 2024, 345 (349).

²⁷² Däuper/Schemmann, EnWZ 2024, 345 (349).

²⁷³ BMW, Referentenentwurf: Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, S. 253.

²⁷⁴ BMW, Referentenentwurf: Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher

Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, S. 252.

²⁷⁵ VKU, Stellungnahme zum Referentenentwurf der Bundesregierung zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas und Wasserstoff-Binnenmarktpakets vom 04.11.2025, 24.11.2025, S. 16; im Ergebnis so auch Thüga, Entwicklungsplanung-Einfach. Erfüllbar. Erwartungssicher, Stellungnahme zum Referentenentwurf zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher



Darüber hinaus scheint fraglich, inwieweit die weitergehenden Informationspflichten, gerade in Bezug auf alternative Versorgungs- und Fördermöglichkeiten, unter dem Gesichtspunkt der Praxistauglichkeit bei den Netzbetreibern anzusiedeln sind.²⁷⁶ Für die Netzbetreiber könnte es darüber hinaus praktikabler sein, nicht die Letztverbraucher und Netznutzer, sondern die Anschlussnehmer über die beabsichtigte Trennung zu informieren, die dann wiederum die Informationen an die ggfs. weiteren Anschlussnutzer (Letztverbraucher) weitergeben.²⁷⁷

19.2.3 Finanzierung von Wasserstoffnetzen außerhalb des Kernnetzes

Die **Finanzierung des Netzbetriebs** erfolgt auch im Sektor Wasserstoff über Netzentgelte. Allgemeine Vorgaben für die Entgelte für den Netzzugang zu reinen Wasserstoffnetzen sind aktuell in § 28o EnWG enthalten. Dieser verweist in Teilen auf § 21 EnWG; Entgelte müssen demnach angemessen, diskriminierungsfrei und transparent sein und dürfen nicht ungünstiger sein, als sie von den Betreibern der Energieversorgungsnetze in vergleichbaren Fällen für Leistungen innerhalb ihres Unternehmens oder gegenüber verbundenen oder assoziierten Unternehmen angewendet und tatsächlich oder kalkulatorisch in Rechnung gestellt werden. Die Entgelte werden nach § 21 Abs. 2 S. 1 EnWG **auf der Grundlage der Kosten** einer Betriebsführung, die denen eines effizienten und strukturell vergleichbaren Netzbetreibers entsprechen müssen, unter Berücksichtigung von Anreizen für eine effiziente Leistungserbringung und einer angemessenen wettbewerbsfähigen und risikoangepassten Verzinsung des eingesetzten Kapitals gebildet. Nach § 28o Abs. 1 S. 1 EnWG ist die Anreizregulierung sowie die Genehmigung der Entgelte nach § 23a EnWG nicht auf Wasserstoffnetze anwendbar. Darüber hinaus regelt die WasserstoffNEV die Grundlagen zur Ermittlung der Netzkosten und Grundsätze der Bestimmung der Entgelte für den Zugang zu Wasserstoffnetzen. Kosten dürfen derweil gemäß § 28o Abs. 1 S. 3 EnWG nur insoweit geltend gemacht werden, als eine positive Bedarfsprüfung nach § 28p oder eine Genehmigung nach § 28q Abs. 8 oder ein Entwurf eines Wasserstoff-Kernnetzes durch die Bundesnetzagentur nach § 28q Abs. 3

EnWG oder eine Bestätigung nach § 15d Abs. 3 EnWG vorliegt. Relevante Regelungen für die Finanzierung des **Wasserstoff-Kernnetzes** sind in § 28r und § 28s EnWG enthalten. Durch das zweite Gesetz zur Änderung des EnWG aus dem Jahre 2024 wurde der sogenannte **intertemporale Kostenallokationsmechanismus** eingeführt. Grundlage dieses Finanzierungsmechanismus sind zwei Elemente: Erstens wird ein einheitliches, gedeckeltes Entgelt auf der Grundlage der aggregierten Netzkosten aller Wasserstoffkernnetzbetreiber festgelegt.²⁷⁸ Zweitens richtet der Bund ein sogenanntes **Amortisationskonto** ein, über das die Lücke zwischen den anfänglich hohen Investitionskosten und den später steigenden Entgelteinnahmen überbrückt wird. Auf diese Weise können auch später hinzukommende Nutzer anteilig an den anfänglichen Investitionskosten beteiligt werden.

Eine Anwendbarkeit der Wasserstoffentgeltregulierung nach dem EnWG setzt mithin nach aktueller Rechtslage entweder die „Opt-in“-Erklärung samt positiver Bedarfsprüfung des Netzbetreibers oder ein Engagement im Zusammenhang mit dem Kernnetz voraus.²⁷⁹ **Gerade für die Verteilernetzebene besteht damit nur ein unzureichender Rahmen für die Netzentgelterhebung.** Es fehlt darüber hinaus auch an einem vergleichbar effektiven Finanzierungsansatz, wie er im EnWG für das Kernnetz angelegt ist.

Vorgaben aus der EU-GasRL

In Umsetzung von Art. 35 Abs. 1 EU-GasRL werden Wasserstoffversorgungsnetze nach § 28j Abs. 1 EnWG-E künftig einheitlich reguliert. Die Abgabe einer „Opt-in“-Erklärung ist als Alternative zum Kernnetzbezug nicht länger erforderlich, um der Regulierung nach dem Entwurf zu unterfallen.²⁸⁰ Entsprechend werden die Vorgaben zur Entgeltregulierung künftig ohne weiteres auch für Wasserstoffversorgungsnetze außerhalb des Kernnetzes und auf Verteilernetzebene relevant.

Gemäß Art 78. Abs. 7 b) EU-GasRL obliegt es den Regulierungsbehörden, zumindest die Methoden zur Berechnung oder Festlegung der Bedingungen für den Anschluss an die nationalen Wasserstoffnetze und Zugang zu diesen, gegebenenfalls einschließlich

Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, 21.11.2025, S. 8.

²⁷⁶ VKU, Stellungnahme zum Referentenentwurf der Bundesregierung zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas und Wasserstoff-Binnenmarktpakets vom 04.11.2025, 24.11.2025, S. 17; DVGW, Stellungnahme vom 24. November 2025 zum Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Binnenmarktpakets, S. 13.

²⁷⁷ VKU, Stellungnahme zum Referentenentwurf der Bundesregierung zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer

energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas und Wasserstoff-Binnenmarktpakets vom 04.11.2025, 24.11.2025, S. 15.

²⁷⁸ *Spiekermann/Rosin/Michaelis*, N&R 2025, Heft 01, Beilage 1-28, S. 7.

²⁷⁹ *Spiekermann/Rosin/Michaelis*, N&R 2025, Heft 01, Beilage 1-28, S. 6.

²⁸⁰ BMW, Referentenentwurf: Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, S. 261.

Entgelten für das Wasserstoffnetz mit ausreichendem Vorlauf vor deren Inkrafttreten festzulegen oder zu genehmigen. Bei der Festsetzung oder Genehmigung der Entgelte oder Methoden und der Ausgleichleistungen muss die Regulierungsbehörde sicherstellen, dass für die Fernleitungs- und Verteilernetzbetreiber und für die Wasserstoffnetzbetreiber angemessene Anreize geschaffen werden, sowohl kurzfristig als auch langfristig die Effizienz zu steigern, die Marktintegration und die Versorgungssicherheit zu fördern und entsprechende Forschungsarbeiten zu unterstützen (Art. 78 Abs. 9 EU-GasRL).

Umsetzung durch den Referentenentwurf zur Änderung des EnWG

In Umsetzung dieser Artikel sieht der Referentenentwurf in § 280 EnWG-E nun vor, dass die Entscheidung über die **Einführung und Ausgestaltung der Anreizregulierung für Wasserstoffnetze** bei der Bundesnetzagentur liegt.²⁸¹ Nach § 280 Abs. 2 Nr. 3 EnWG-E kann die Bundesnetzagentur abweichend von § 280 Abs. 1 S. 3 EnWG Regelungen darüber treffen, dass Entgelte, die zur Abdeckung aller notwendigen jährlichen Kosten des Netzbetriebs erforderlich sind, während des Markthochlaufs noch nicht in voller Höhe von den Netzbetreibern vereinnahmt werden und der nicht vereinnahmte Teil erst zu einem späteren Zeitpunkt in der Entgeltbildung berücksichtigt wird. **Mit dieser Regelung wird die Einführung eines intertemporalen Kostenallokationsmechanismus auch außerhalb des Kernnetzes und damit für Wasserstoffverteilernetze möglich.**

Mögliche Herausforderungen für Netzbetreiber

Nach Auffassung einiger Branchenverbände sind die im Referentenentwurf enthaltenen Finanzierungsbedingungen nicht ausreichend. Zum einen sei eine Anreizregulierung für eine im Hochlauf inbegriffene Infrastruktur nur bedingt geeignet.²⁸² Zum anderen sei zwar die Festlegungskompetenz mit Blick auf einen

intertemporalen Kostenausgleich auch außerhalb des Kernnetzes zu begrüßen. Gleichzeitig reiche die bloße Festlegungsbefugnis nicht aus. Bemängelt wird das Fehlen einer unmittelbaren gesetzlichen Regelung zu einem intertemporalen Allokationsmechanismus, sowie es für das Kernnetz im EnWG angelegt wurde.²⁸³ Der Referentenentwurf verkenne die Rolle, die den Verteilernetzbetreibern bei der Transformation zukomme. Ein klarer Finanzierungsrahmen sei dringend erforderlich, um die Gasnetzumstellung überhaupt zu ermöglichen.²⁸⁴ Problematisch ist aus Sicht der Branchenverbände außerdem, dass die Möglichkeiten, die der europäische Rechtsrahmen im Hinblick auf die Finanzierung bietet, nicht ausgeschöpft werden. So wird kritisiert, dass weder das EnWG noch der jetzt vorgelegte Referentenentwurf von der in Art. 5 Abs. 4 und 5 EU-GasVO angelegten Finanzierungsmöglichkeit Gebrauch macht. Unter den in Art. 5 Abs. 4 und 5 EU-GasVO genannten Bedingungen kann ein Mitgliedsstaat Finanztransfers zwischen getrennt regulierten Dienstleistungen gestatten, sofern die Regulierungsbehörde festgestellt hat, dass die Finanzierung betreffender Netzzugangsentgelte, die nur von den jeweiligen Netznutzern gezahlt werden, nicht tragfähig ist. Entsprechend wird seitens einiger Branchenverbände eine Festlegungskompetenz der Bundesnetzagentur zur Ermöglichung von Quersubventionen innerhalb der von der EU-GasVO vorgegebenen engen Grenzen gefordert.²⁸⁵ Finanztransfers könnten für einen befristeten Zeitraum einen künftigen intertemporalen Allokationsmechanismus außerhalb des Kernnetzes ergänzen.²⁸⁶

19.2.4 Bestehende Konzessionsverträge als Dekarbonisierungshindernis

Gasnetzbetreiber können auch aufgrund von Konzessionsverträgen dazu verpflichtet sein, Investitionen in das bestehende Gasverteilernetz zu tätigen. Zum Teil handelt es sich dabei um ein strikt zu realisierendes Investitionsbudget, das in einem Zielkonflikt mit der

²⁸¹ BMW, Referentenentwurf: Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, S. 265.

²⁸² BDEW, Stellungnahme zum Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Binnenmarktpakets, 24.11.2025, S. 52.

²⁸³ VKU, Stellungnahme zum Referentenentwurf der Bundesregierung zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets vom 04.11.2025, 24.11.2025, S. 20.

²⁸⁴ Thüga, Entwicklungsplanung-Einfach. Erfüllbar. Erwartungssicher, Stellungnahme zum Referentenentwurf zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, 21.11.2025, S. 11.

²⁸⁵ FNB, Stellungnahme zum Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, 24.11.2025, S. 27; DVGW, Stellungnahme vom 24. November 2025 zum Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Binnenmarktpakets, S.16; Thüga, Entwicklungsplanung-Einfach. Erfüllbar. Erwartungssicher, Stellungnahme zum Referentenentwurf zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, 21.11.2025, S. 11.

²⁸⁶ DVGW, Stellungnahme vom 24. November 2025 Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Binnenmarktpakets, S. 17.

Energiewende und der Netztransformation stehen kann. Zudem werden hierdurch unter Umständen Ressourcen gebunden, die nicht für die Umrüstung bzw. den Ausbau von Wasserstoffnetzen eingesetzt werden können.²⁸⁷ Ein Lösungsansatz könnte hier in einer gesetzlichen Regelung zur Befreiung des Netzbetreibers von einer vorhandenen „überschießenden“ Investitionsverpflichtung liegen.²⁸⁸

Als zweites Problemfeld stellt sich der Weiterbetrieb von Gasnetzen bei fehlenden Bewerbern auf Neukonzessionen dar. Bei einer sinkenden Kundenzahl ist es denkbar, dass es keine Bewerber auf eine Konzession im Transformationszeitraum geben wird.²⁸⁹ Hieraus ergeben sich gerade mit Blick auf die Versorgungssicherheit offene Fragen, wenn die Gasversorgung einer Kommune bis zur Schaffung von Versorgungsalternativen nicht aufrechterhalten werden kann.²⁹⁰ Als Lösungsansätze für diese Problemstellung nennt das Green Paper der Ampel-Regierung zum einen eine gesetzliche Verlängerung des bestehenden Konzessionsvertrags im Falle eines Marktversagens und festgestelltem Versorgungsbedarf. Alternativ kommt eine Einzelfallentscheidung in Betracht. Hierfür müsste eine gesetzliche Rechtsgrundlage zur einzelfallbezogenen Entscheidung über die Fortsetzung des Netzbetriebs geschaffen werden.²⁹¹

Das Gaspaket enthält für diese Problemstellungen keine Vorgaben. Auch im Referentenentwurf zur Änderung des EnWG sind keine Ansätze enthalten, die die Fortdauer der Konzessionsverträge im Falle eines Marktversagens konkret adressieren. Hier besteht damit nach wie vor Nachsteuerungsbedarf.

19.3 CCU/CCS

Die Begriffe „Carbon Capture and Storage“ (CCS) und „Carbon Capture and Utilization“ (CCU) bezeichnen Technologien, die das Abscheiden von CO₂ aus einem Emissionsstrom noch vor dem Austreten in die Atmosphäre ermöglichen. Während im Fall von CCS das

eingefangene CO₂ zum Zwecke der dauerhaften geologischen Speicherung zu einem unterirdischen Speicher transportiert wird, soll es im Rahmen von CCU für die Herstellung von Produkten, etwa in der Chemieindustrie, eingesetzt werden. Die Technologien können insbesondere für Prozesse relevant werden, bei denen Emissionen nicht oder nur schwer vermeidbar sind.²⁹² Erleichterungen durch den Einsatz der Technologie können sich gerade im Fall von CCS für vom EU-ETS erfasste Industrien ergeben, die durch die Verknappung von Zertifikaten zunehmend unter Kostendruck geraten.²⁹³ Für den Transport des abgeschiedenen CO₂ wird zudem Leitungsinfrastruktur erforderlich werden.

Der Aufbau der erforderlichen CO₂-Infrastruktur steht sowohl in technologischer als auch in finanzieller Hinsicht aktuell noch vor erheblichen Herausforderungen, weshalb ihr Einsatz für Industrie und Infrastrukturbetreiber erst mittelfristig Potenziale bietet. Aus diesem Grund sollen im Folgenden die wesentlichen rechtlichen Entwicklungen in der gebotenen Kürze skizziert werden.

Erste regulatorische Vorgaben für die Speicherung von CO₂ machte ab 2009 die CCS-Richtlinie²⁹⁴, die in Deutschland 2012 mit dem **Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid (KSpG)**²⁹⁵ umgesetzt wurde. Die damaligen Bestrebungen zur Ermöglichung von CCS sahen sich in Deutschland dem Widerstand von Umweltorganisationen und Anwohnenden ausgesetzt.²⁹⁶ Das KSpG enthielt auch eine Einengung des Gesetzeszwecks auf die Erforschung, Erprobung und Demonstration von Speichertechnologie (§§ 1, 2 Abs. 1 KSpG), was es letztlich so gut wie unanwendbar machte.²⁹⁷

Auf europäischer Ebene entwickelte sich in den letzten Jahren gerade im Zusammenhang mit dem Net Zero Industry Act²⁹⁸ eine neue Dynamik im Blick auf den Einsatz von CCU/CCS. So veröffentlichte die Europäische Kommission im Februar 2024 ihre „**Industrial Carbon**

²⁸⁷ Glattfeld, EnK-Aktuell 2024, 010334.

²⁸⁸ BMWK, Green Paper Transformation Gas-/Wasserstoff-Verteilernetze, April 2024, S. 17

²⁸⁹ Glattfeld, EnK-Aktuell 2024, 010334.

²⁹⁰ Glattfeld, EnK-Aktuell 2024, 010334.

²⁹¹ BMWK, Green Paper Transformation Gas-/Wasserstoff-Verteilernetze, April 2024, S. 17.

²⁹² Bringmann/Ortega Sawal, EnWZ 2024, 440 (440).

²⁹³ Braun/Schemmann, KlimR 2025, 329 (329).

²⁹⁴ Richtlinie 2009/31/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die geologische Speicherung von Kohlendioxid und zur Änderung der Richtlinie 85/337/EWG des Rates sowie

der Richtlinien 2000/60/EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG und 2008/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 (ABl. L 140 vom 5.6.2009, S. 114).

²⁹⁵ Kohlendioxid-Speicherungsgesetz vom 17. August 2012 (BGBl. I S. 1726), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 27. Februar 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 70) geändert worden ist.

²⁹⁶ Westmark, KlimR 2025, 8 (9).

²⁹⁷ Braun/Schemmann, KlimR 2025, 329 (330).

²⁹⁸ Verordnung (EU) 2024/1735 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Schaffung eines Rahmens für Maßnahmen zur Stärkung des europäischen Ökosystems der Fertigung von Netto-Null-Technologien und zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/1724.

Management Strategy²⁹⁹, in der sie das industrielle CO₂-Management als eine wesentliche Ergänzung zur grundsätzlich erforderlichen Verringerung der Treibhausgasemissionen bezeichnet. Auch die Ampel-Regierung legte im Juni 2024 Eckpunkte für eine **Carbon Management-Strategie** (CMS)³⁰⁰ vor, in der die politischen Grundlinien unter anderem mit Blick auf Fördermechanismen und Transport- und Speicherinfrastruktur für CO₂ skizziert wurden. Das angekündigte, über die Eckpunkte hinausgehende Strategie-Papier wurde derweil in der vergangenen Legislaturperiode nicht beschlossen. Auch der novellierte Entwurf des KSpG-E konnte nicht mehr das Gesetzgebungsverfahren durchlaufen.

Die Bundesregierung hat nun einen neuen Gesetzesentwurf³⁰¹ vorgelegt, der am 6. November 2025 vom Bundestag beschlossen und am 21. November 2025 vom Bundesrat gebilligt wurde.³⁰² Die Novelle übernimmt dabei wesentliche Punkte des Ampel-Entwurfs. Der „**Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Kohlendioxid-speicherungsgesetzes**“ (KSpTG-E) soll erstmals die dauerhafte Speicherung von Kohlendioxid zu kommerziellen Zwecken im industriellen Maßstab ermöglichen.³⁰³ Maßgeblich ist hierfür zunächst die Ausweitung des Anwendungsbereichs. Die Begrenzungen für CO₂-Speicher werden aufgehoben und es handelt sich nicht länger lediglich um ein Demonstrationsgesetz. Neben der dauerhaften Speicherung ist außerdem nun auch der leitungsgebundene Transport von CO₂ vom Anwendungsbereich umfasst (§ 2 S. 1 Nr. 1 und 3 KSpTG-E).

Ein Fokus des Gesetzesentwurfs liegt auf **genehmigungsrechtlichen Erleichterungen**: § 4 KSpTG-E enthält umfangreiche Vorgaben zur Verfahrensstraffung und -beschleunigung mit Blick auf die grundsätzlich unter Planfeststellungsvorbehalt stehenden CO₂-Transportleitungen. So liegen etwa die Errichtung, der Betrieb sowie die wesentliche Änderung von Kohlendioxidleitungen **im überragendem öffentlichen Interesse**. Eine gleichlautende Regelung besteht gemäß § 11 Abs. 1 KSpTG-E auch für Kohlendioxid-speicher. Die Speicherung von CO₂ soll in erste Linie offshore erfolgen (§ 2 Abs. 2 KSpTG-E), während die Onshore-Speicherung im Rahmen einer Opt-in Klausel durch

einzelne Bundesländer erlaubt werden kann (§ 2 Abs. 5 KSpTG-E).

Für künftige **Betreiber von Speichern und Netzen** enthält der KSpTG-E eine Art **Basisregulierung**.³⁰⁴ Nach § 33 Abs. 1 KSpTG-E müssen Betreiber von Leitungsnetzen und Speichern Anschluss und Zugang zu angemessenen, transparenten und gleichen Bedingungen gewähren. Die Zusammenarbeit der Betreiber soll insbesondere im Rahmen von Kooperationsvereinbarungen erfolgen (§ 33 Abs. 1 S. 2 KSpTG-E). Darüber hinaus werden keine Vorgaben getroffen und es ist auf wettbewerbsrechtliche Vorschriften zurückzugreifen. Der in der CMS der Ampel-Regierung verankerte Ansatz, ex ante nicht regulierend in den Markthochlauf eingreifen zu wollen, scheint im aktuellen Entwurf übernommen worden zu sein.³⁰⁵

Die Schaffung eines Rechtsrahmens für CCS und CCU durch das KSpTG beseitigt zahlreiche Hürden auf dem Weg zur Errichtung der erforderlichen CO₂-Infrastruktur in Deutschland, gerade mit Blick auf genehmigungs- und verfahrensrechtliche Fragestellungen. Nach wie vor fehlt es jedoch insbesondere an einer politischen Gesamtstrategie, die Stakeholder entlang der gesamten Wertschöpfungskette mit Blick auf Planungs- und Investitionssicherheit benötigen.³⁰⁶

19.4 Literaturverzeichnis zum rechtlichen Teil

Agora Energiewende, Stellungnahme Allgemeine Netzentgeltsystematik Strom (AgNes) vom 31.07.2025, abrufbar unter: https://www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2025/2025-16_DE_Ag-nes_Stellungnahme/A-EW_Stellungnahme_Ag-NeS_WEB.pdf (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Assmann, Lukas/Peiffer, Max, Beck'scher Online-Kommentar EnWG, 16. Edition 01.09.2025.

Bartsch, Alexander/Voigt, Julia, Energieversorgungsnetze „unter Spannung“ – Entnahmekapazität oberhalb der Niederspannung ein limitiertes Gut?, EnWZ 2025, 356-362.

²⁹⁹ COM(2024) 62 final - Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Auf dem Weg zu einem ehrgeizigen industriellen CO₂-Management in der EU.

³⁰⁰ BT-Drs. 20/11585.

³⁰¹ BT-Drs. 21/1494.

³⁰² Nach Abschluss der parlamentarischen Beratungen muss die Gesetzesnovelle noch vom Bundespräsidenten unterzeichnet werden

(Stand 25. 11. 2025). Nach Verkündung im Bundesgesetzblatt kann das Gesetz in Kraft treten.

³⁰³ BT-Drs. 21/1494, S.2.

³⁰⁴ Braun/Schemmann, KlimR 2025, 329 (332).

³⁰⁵ Braun/Schemmann, KlimR 2025, 329 (332).

³⁰⁶ Braun/Schemmann, KlimR 2025, 329 (333).

Bourwieg, Karsten/Hellermann, Johannes/Hermes, Georg, Energiewirtschaftsgesetz, 4. Auflage 2023.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Green Paper Transformation Gas-/Wasserstoffverteilernetze, April 2024, abrufbar unter: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/G/green-paper-transformation-gas-wasserstoff-verteilernetze.pdf?blob=publication-File&v=4> (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Bundesnetzagentur, Aktuelle Einschätzung der Bundesnetzagentur zum Kapazitätsengpass in Oranienburg, 17.04.2024, abrufbar unter: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Netzanschluss/oranienburg.pdf?blob=publication-File&v=2>

Bundesnetzagentur, Beschlusskammer 4, Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienergentgelte im Elektrizitätsbereich vom 24.07.2024, abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/BK4-GZ/2024/BK4-24-0027/BK4-24-0027_Eckpunktepapier_24072024.pdf?blob=publicationFile&v=4 (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Bundesnetzagentur, Verfahren zur Festlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes) [GBK-25-01-1#3], abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/GBK-GZ/2025/GBK-25-01-1x3_AgNes/GBK-25-01-1x3_Verfahrenseinleitung.html?nn=666514 (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Bundesnetzagentur, Große Beschlusskammer Energie, Diskussionspapier Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes), Mai 2025, abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/GBK-GZ/2025/GBK-25-01-1x3_AgNes/Downloads/Diskussionspapier_AgNes.pdf?blob=publicationFile&v=6 (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Bundesnetzagentur, Netzentgeltkomponenten: Orientierungspunkte der BNetzA vom 20.11.2025, abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/GBK/GBK_Termine/Downloads/2025/12_2025/02_12_2025/251202_Sachstandspapier_AgNes.pdf?blob=publicationFile&v=3 (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Bundesnetzagentur, Netzentgelte, Zusammenhang von Strompreis und Netzentgelt, abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/BK08/BK8_06_Netzentgelte/BK8_NetzE.html (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Bundesverband der Deutschen Industrie e.V., Stellungnahme vom 05.11.2025 zum BNetzA-Diskussionspapier „Entgelte für Industrie und Gewerbe“, abrufbar unter: <https://bdi.eu/publikation/news/bdi-stellungnahme-zum-bnetza-diskussionspapier-entgelte-fuer-industrie-und-gewerbe> (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Stellungnahme vom 30.06.2025 zum Diskussionspapier der Bundesnetzagentur zur Rahmenfestlegung der Allgemeinen Netzentgeltsystematik Strom (AgNes) vom 30.06.2025, abrufbar unter: https://www.bdew.de/media/documents/2025-06-30_BDEW-Stellungnahme_Diskussionspapier_AgNes_final.pdf (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Stellungnahme vom 24.11.2025 zum Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, abrufbar unter: https://www.bdew.de/media/documents/1_BDEW-Stn_Umsetzung_Gaspaket_RefE_1.pdf (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Braun, Frederik/Schemmann, Julian, Die KSpG-Novelle 2025 – Durchbruch für CCS, CCU und den CO₂-Markthochlauf?, KlimR 2025, 329-334.

Bringmann, Carsten/Ortega Sawal, Salomo, Regulatorischer Rahmen für CCS und CCU zur Umsetzung der Klimaschutzziele-Ausgangslage und offene Fragen, EnWZ 2024, 440-446.

Däuper, Olaf/Schemmann, Julian Conrad, Umsetzungsbedarf im EnWG nach Inkrafttreten der EU-GasRL, EnWZ 2024, 345-350.

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, Stellungnahme vom 24.11.2025 zum Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, abrufbar unter: <https://www.dvgw.de/media/dvgw/verein/aktuelles/stellungnahmen/dvgw-stellungnahme-umsetzung-gas-rl.pdf> (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

EFET Deutschland – Verband Deutscher Energiehändler e.V., Stellungnahme vom 30.06.2025 zum Diskussionspapier der Bundesnetzagentur vom 12.05.2025 zur Weiterentwicklung der allgemeinen Netzentgeltsystematik für Strom (AgNes), abrufbar unter:

<https://www.energytradersdeutschland.org/documents/netzentgeltreform-strom-markt-verzerrungen-vermeiden-und-regulatorische-unsicherheit-minimieren/> (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Held, Christian/Schäfer-Stradowsky, Simon, Energierecht und Energiewirklichkeit, 2. Auflage 2022.

Jonen, Nina/Kindler, Emil, Neustrukturierung der Netzentgelte, EWeRK 2025, 63-68.

Glattfeld, Eric Holger, Transformation der Gas- und Wasserstoffverteilernetze – Teil 2: Investitionsverpflichtungen und Kostenstruktur, EnK-Aktuell 2024, 010334.

Köster, Moussah/Hefe, Melina, Hat die Kundenanlage (doch) noch eine Zukunft?, EnWZ 2025, 258-264.

Krafczyk, Wolfgang/Wittich, Moana, Nachbemerkung zu: Auswirkungen der Unionsrechtswidrigkeit sog. Kundenanlagen i. S. d. EnWG auf die dezentrale Energieversorgung, ZNER 2025, 387-388.

Mohr, Jochen, beck-online.Großkommentar StromNEV, 2025.

Pritzsche, Kai Uwe/Vacha, Vivien, Energierecht, 2. Auflage 2024.

Spiekermann, Kristin/Rosin, Peter/Michaelis, Jana, Rechtlicher Rahmen für eine Transformationsregulierung für Erdgasverteilernetzbetreiber, N&R Heft 01, Beilage 1-28.

Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit, Energie und Klimaschutz, Organigramm, abrufbar unter: https://www.smwa.sachsen.de/download/20251205_Organsation.pdf (zuletzt abgerufen am 14.01.2025).

Thüga, Entwicklungsplanung- Einfach. Erfüllbar. Erwartungssicher. Stellungnahme vom 21.11.2025 zum Referentenentwurf zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Umsetzung des Europäischen Gas- und Wasserstoff-Binnenmarktpakets, abrufbar unter: https://www.thuega.de/app/uploads/2025/11/20251121-Stellungnahme_RefE_Umsetzung_Gaspaket_Thuega.pdf (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Verband kommunaler Unternehmen, Stellungnahme vom 04.11.2025 zum Referentenentwurf Energiewirtschaftsgesetzes Bundesregierung zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes, abrufbar unter:

<https://www.vku.de/vku-positionen/kommunale-energieversorgung/vku-stellungnahme-zum-referentenentwurf-energiewirtschaftsgesetzes-bundesregierung-zur-aenderung-des-energiewirtschaftsgesetzes/> (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V., Stellungnahme vom 24.11.2025 zum Entwurf eines Gesetzes zur Beschleunigung der Verfügbarkeit von Wasserstoff und zur Änderung weiterer rechtlicher Rahmenbedingungen für den Wasserstoffhochlauf und weiterer energierechtlicher Vorschriften (BT-Drucksache 21/2506), abrufbar unter: https://www.bundestag.de/resource/blob/1127462/Stellungnahme_Vereinigung_der_Fernzuleitungsnetzbetreiber_Gas_eV.pdf (zuletzt abgerufen am 05.12.2025).

Westmark, Lennart, Die Reformen im CCS/U-Recht und die Carbon Management Strategie der Bundesregierung, KlimR 2025, 8-17.

Theobald, Christian/Jürgen, Kühling, Energierecht Band 1, 130. Ergänzungslieferung Juni 2025.

20 Fazit & Ausblick: Dekarbonisierung der Wirtschaft als Gemeinschaftsaufgabe

Für die Dekarbonisierung der sächsischen Wirtschaft stehen eine Vielzahl an branchenübergreifenden und -spezifischen Transformati-
ontechnologien zur Verfügung. Deren Umsetzung erfordert jedoch ein Zusammenspiel aus wirtschaftlicher Tragfähigkeit, verlässlichen Rahmenbedingungen und einer leistungsfähigen Energieinfrastruktur. Unternehmen, Netzbetreiber und Politik müssen diese Aufgaben gemeinsam angehen.

Der vorliegende Bericht bildet eine Grundlage für die weitere Dekarbonisierung der sächsischen Wirtschaft. Das abschließende Fazit dient daher als Orientierung und Ausgangspunkt für die nächsten möglichen Schritte, zur konkreten Umsetzung von Dekarbonisierungsmaßnahmen auf dem Pfad zur Klimaneutralität der sächsischen Wirtschaft.

20.1 Fazit der techno-ökonomischen und regulatorischen Betrachtung

Die vorliegende Untersuchung zeigt: Die Dekarbonisierung der sächsischen Wirtschaft ist technisch möglich, aber wirtschaftlich, regulatorisch und infrastrukturell mit Hürden verbunden. Sowohl branchenübergreifend als auch in den betrachteten Schlüsselbranchen sind Dekarbonisierungstechnologien verfügbar, die – üblicherweise nach Ausnutzung von Energieeffizienzpotenzialen – standort- und prozessspezifisch auf technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit geprüft werden können.

Gleichzeitig bestimmen die Verfügbarkeit von Netzan-
schlusskapazitäten, Planungs- und Genehmigungsprozesse sowie die relative Kostenposition von Strom zu Erdgas den realen Umsetzungspfad.

Branchenübergreifend gilt:

Energieeffizienzmaßnahmen (u. a. in den Bereichen Abwärmenutzung, Lüftungs- und Kälteoptimierung, Beleuchtung, Druckluft) sind in nahezu allen Fällen sinnvollerweise der eigentlichen Transformation vorangestellt. Sie senken den Energiebedarf, geben Anschlussleistungen frei und verbessern damit die Ausgangslage für die Umsetzung von tiefergreifenden Transformationstechnologien.

Elektrifizierung stellt insbesondere im Niedrig- und Mitteltemperaturbereich über Wärmepumpen und ggf. in Kombination mit Elektrodenkesseln die wirtschaftlichste Alternative im Vergleich mit anderen Dekarbonisierungstechnologien dar. Jedoch müssen die entsprechenden Rahmenbedingungen geprüft und möglicherweise interne und externe Anpassungen der Energieinfrastruktur berücksichtigt und mitgedacht werden. Aktuell ist die Dekarbonisierungstechnologie nicht immer günstiger als die derzeitige fossile Referenz.

Der Brennstoffwechsel hin zu Wasserstoff und Biomasse nimmt mit zunehmenden Temperaturniveaus an Bedeutung zu. Für Wasserstoff ist dieser jedoch kurz- bis mittelfristig durch Preis, Verfügbarkeit und Infrastruktur limitiert. Für den Einsatz von (nachhaltiger) Biomasse ist auch die langfristige Verfügbarkeit begrenzt. Die Substitution von Erdgas durch Biomethan – entweder per Beimischung oder bilanziell über das Erdgasnetz – ist eine Möglichkeit zur kurzfristigen Senkung der CO₂-Emissionen, langfristig jedoch durch die vorhandenen Mengenpotenziale begrenzt.

Die erarbeiteten Steckbriefe und abgeschätzten Transformationspfade geben eine erste **praxis-taugliche Orientierung**, welche Transformati-
ontechnologien verfügbar sind und wie die Dekarbonisierung der sächsischen Wirtschaft aussehen könnte.

Für alle Transformationsoptionen gilt jedoch, dass die pauschale Vorgabe von Transformationspfaden nur eingeschränkt möglich ist. Die Berücksichtigung standortspezifischer Voraussetzungen, individueller Lastgänge, sowie der Zustand der vorhandenen vorgelagerten Infrastruktur sind für die Erarbeitung konkreter Transformationspläne unerlässlich.

Die Dekarbonisierung der sächsischen Wirtschaft steht in Wechselwirkung mit der Energieinfrastruktur aus Strom- und Gasnetzen, Fernwärme und zukünftig Leitungen für Wasserstoff, sowie in Einzelfällen auch CO₂. Der Zugang bzw. die Erweiterung der notwendigen Anschlussleistung ist vielerorts Engpass und beeinflusst sowohl Kosten (durch Baukostenzuschüsse, Netzentgelte,) als auch

Umsetzungsgeschwindigkeiten (durch Vorlauf- und Genehmigungszeiten) von Investitionen in Dekarbonisierungstechnologien.

Rechtlich-regulatorisch ist zu beachten:

Um der Nachfrage im Zuge einer **zunehmenden Elektrifizierung** gerecht zu werden, ist ein effizienter Netzausbau dringend erforderlich. Eine zentrale Herausforderung für Netzbetreiber liegt in der rechtzeitigen Bedienung einer **wachsenden Anzahl an Netzan-schlussbegehren**, bei immer weniger freien Netzan-schlusskapazitäten. Der rechtliche Rahmen ist aktuell nur bedingt geeignet, der Problematik effektiv zu begegnen. Die gesetzlichen Vorgaben müssen daher zeitnah so angepasst werden, dass der Stau bei An-schlussbegehren gelöst wird. Mögliche Ansätze sind die Abkehr vom Windhundprinzip, die Ermöglichung von Mehrfachnutzung, die netzdienliche Kombination von Anschlusspetenten und die Flexibilisierung von Netzan-schlussverträgen.

Im Bereich **Strom** stellen hohe Netzentgelte ein weiteres zentrales Hindernis für die Dekarbonisierung der Industrie dar. Die bereits angestoßenen Bemühungen zur **Neugestaltung der Netzentgeltsystematik** und der **individuellen Netzentgelte** enthalten hier wertvolle Ansätze. Es kommt nun auf eine rasche Konkretisierung der Reformvorschläge durch die BNetzA an. Die getroffenen Regelungen müssen praxistauglich sein, insbesondere muss der bürokratische Aufwand für die Anwender auf ein Minimum beschränkt werden.

Die Transformation des Erdgasnetzes hin zu **Wasserstoff** bewegt sich im Spannungsfeld zwischen Klimaschutz, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit. Während auf Transportnetzebene in Form der Etablierung des Kernnetzes bereits wesentliche gesetzgeberische Schritte unternommen wurden, sehen sich die Akteure auf Verteilernetzebene **erheblichen regulatorischen Unsicherheiten ausgesetzt**. Dies hat das Potenzial, die Dekarbonisierung von Industrien außerhalb des Kernnetzes deutlich zu verzögern. Der europäische Gesetzgeber hat im Sommer 2024 durch das Gaspaket die Rahmenbedingungen für den Gas- und Wasserstoffmarkt vorgelegt. Die zentrale Rolle der Verteilernetzbetreiber bei der Transformation wird hier u. a. durch die Einführung einer **originären Planungs-verantwortlichkeit** für Wasserstoffverteilternetze und Stilllegungspläne adressiert. Letztere bieten Netzbetreibern auch die Grundlage für die **Verweigerung von Netzan-schlüssen oder deren Kündigung**.

Seit Anfang November liegt nun ein Gesetzesentwurf der Bundesregierung zur Änderung des EnWG zur Umsetzung des Gaspakets vor, der zentrale Vorgaben für die Realisierung der Transformation der

Erdgasverteilternetze hin zu Wasserstoff enthält. Während die angestrebte Novellierung des EnWG unbedingt zu begrüßen ist, besteht mit Blick auf den Entwurf Nachsteuerungsbedarf. So bleiben etwa einige wesentliche Normvorschläge zu unbestimmt. Darüber hinaus scheint die angelegte Verschränkung der neuen verbindlichen Planungsinstrumente mit unverbindlichen Plänen der Wärmeplanung konkretisierungswürdig. Fragen ergeben sich auch im Hinblick auf die gewählte Fristsetzung für die Anschlusskündigung und die **Finanzierung von Wasserstoffverteilternetzen**. Der Gesetzgeber ist gehalten, zeitnah praxistaugliche Lösungen zu entwickeln und das Gesetzgebungsverfahren rasch voranzutreiben.

20.2 Ausblick und Handlungsfelder

Aus den Ergebnisse sowie begleitenden Workshop-Diskussionen mit Akteur:innen der sächsischen Industrie, des Handwerks und Verteilernetzbetreibern, lassen sich exemplarisch weiterführende Handlungsfelder skizzieren, um die Dekarbonisierung der sächsischen Wirtschaft in der Praxis voranzubringen.

Unternehmensebene

Auf Unternehmensebene dienen die vorliegenden Steckbriefe als erster Anhaltspunkt für eine Betrachtung von Transformationstechnologien. Anhand von **standortspezifischen Transformationsplänen** (bspw. nach BAFA-Modul 5 Förderung) und/oder **Machbarkeitsstudien** können diese in konkret umsetzbare Konzepte überführt werden. Dabei sollten auch **Maßnahmen zur Hebung von Effizienz-, Suffizienz- und Energieflexibilitätpotenzialen** berücksichtigt werden. Grundlage der Investitionsentscheidungen ist dabei eine ganzheitliche und robuste **Wirtschaftlichkeitsbewertung** (Kapitalwertmethode nach VALERI-Norm), wie sie exemplarisch in diesem Bericht dargestellt ist. Sobald es zur Planung von Dekarbonisierungsmaßnahmen kommt, ist ein **frühzeitiger und transparenter Austausch mit dem Verteilernetzbetreiber** erforderlich, um Anschlussbedarfe abzustimmen und ggf. notwendige Ertüchtigungen der Energieinfrastruktur zu ermöglichen.

Übergreifende Handlungsfelder

Der projektbegleitende Austausch von Unternehmen, Netzbetreibern, neutraler, wissenschaftlicher Begleitung und Politik hat gezeigt, dass **Kommunikation zwischen den Akteur:innen** notwendig ist und als iterativer Prozess verstetigt werden sollte. Insbesondere der **Dialog zu Netzan-schlussverfahren** für ein beidseitiges Verständnis der jeweiligen Anforderungen und Bedürfnisse kann Umsetzungshürden in der Praxis abbauen.

Auf politischer Ebene ist es notwendig, Rahmenbedingungen für **Planungssicherheit** zu schaffen, beispielsweise durch eine verlässliche Vorgabe von Klima- und **ETS-Zielpfaden**. Dazu zählt auch, dass Unsicherheiten in der Entwicklung der Energieträgerpreise abgebaut werden und **Planungs- und Genehmigungsverfahren** vereinfacht werden. Um unterstützende, zielgenaue **Fördermechanismen** für den Hochlauf von Pilotanlagen zu erarbeiten, müssen zunächst die Förderlücken aufgezeigt werden. Eine detaillierte und integrierte **Modellierung von Transformationspfaden** in allen Endenergiesektoren und dem Energiesystem kann als Zielbild und Grundlage für die Dekarbonisierung in Sachsen dienen.

Schlussbemerkung: Dekarbonisierung als kontinuierlicher und dynamischer Prozess

Der notwendige begleitende **Austausch und die Wissensbildung** sind kontinuierlich zu betreiben, um bspw. auch die hier erarbeiteten Steckbriefe stets auf dem Stand der Technik zu halten, auf aktuelle Entwicklungen reagieren zu können und ggf. um weitere relevante Aspekte zu erweitern.

Sachsens Wirtschaft verfügt über die technischen Möglichkeiten zur Dekarbonisierung. Dennoch verbleiben Hürden in der Umsetzung. Dafür müssen Unternehmen, Netzbetreiber, Politik und Transferakteur:innen die hier skizzierten Aufgaben konsequent miteinander verzahnen, um nicht nur die Klimaziele zu erreichen, sondern auch **Wettbewerbsfähigkeit und Wertschöpfung nachhaltig zu sichern**.

21 Literaturverzeichnis

- [1] VERORDNUNG (EU) 2021/1119 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES - zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“). Brüssel: Das Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union, 2021.
- [2] Klimaschutzgesetz 2021. In <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>. (Abruf am 2021-08-05); Berlin: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2021.
- [3] The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. Geneva, Washington D.C.: World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), 2004. ISBN: 1-56973-568-9.
- [4] Klassifikationen - Gliederung der Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008). Wiesbaden: Statistische Bundesamt, 2008
- [5] Energiebilanz 2014 Freistaat Sachsen: https://www.energie.sachsen.de/download/energie/Bilanz_2014_in_Mengeneinheiten_endg.pdf; Kamenz: Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2016.
- [6] Energiebilanz 2015 Freistaat Sachsen: https://www.energie.sachsen.de/download/energie/Bilanz_2015_in_Energieeinheiten_endg.pdf; Kamenz: Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2016.
- [7] Rohde, Clemens; Arnold-Keifer, Sonja: Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2021 bis 2023 für die Sektoren Industrie und GHD - Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Fraunhofer ISI), 2024.
- [8] Blesl, Markus; Kessler, Alois: Energieeffizienz in der Industrie - 2. Auflage. Berlin: Springer-Verlag GmbH, 2017. ISBN: 978-3-662-55998-7.
- [9] Nast, Michael; Frisch, Sabine; Pehnt, Martin; Otter, Philipp: Prozesswärme im Marktanreizprogramm - Zwischenbericht zu Perspektivische Weiterentwicklung des Marktanreizprogramms FKZ 03MAP123. Stuttgart, Heidelberg: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2010.
- [10] Hirzel, Simon; Sontag, Benjamin; Rohde, Clemens: Industrielle Abwärmenutzung - Kurzstudie. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2013
- [11] Hofmann, Karina: Tiefengeothermie in Sachsen - Potentiale petrothormaler und strömungsgebundener Reservoirs. Freiberg: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2024.
- [12] Gerhardt, Norman; Müller, Thorsten; Schulz, Wolfgang et al.: Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien. Berlin: Agora Energiewende, 2014
- [13] Basma, Hussein; Rodriguez, Felipe: A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe. Berlin: The International Council on Clean Transportation (ICCT), 2023.
- [14] Leisin, Matthias: Branchensteckbrief der Glasindustrie. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), 2019.
- [16] Guminski, Andrej; Wiener, Manuel; Rouyrre, Elsa: CO₂-Verminderung in der Flachglasherstellung. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft, 2021.
- [17] Hübner, Tobias; Guminski, Andrej; von Roon, Serafin: Energiewende in der Industrie - Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor - Branchensteckbrief der Keramikindustrie. Stuttgart, München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft, 2019.
- [18] Leisin, Matthias; Radgen, Peter: Glas 2045 - Dekarbonisierung der Glasindustrie. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), 2022.
- [19] Unser Weg ins Jahr 2050 - Fahrplan der Keramikindustrie. Brussels: Cerame-Unie - The European Ceramic Industry Association, 2013.
- [20] Gogin, Hélène: Energiewende in der Industrie - Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor - Branchensteckbrief der Papierindustrie. Köln: Navigant Energy Germany GmbH, 2019.
- [21] Push2Heat: Felix Schoeller installiert im Werk Weißenborn die erste Hochtemperatur Wärmepumpe der Gruppe. In <https://www.papierindustrie-transformation.de/case-studies/push2heat-felix-schoeller-installiert-im-werk-weisenborn-die-erste-hochtemperatur-warmepumpe-der-gruppe>. (Abruf am 2025-11-21); Berlin: DIE PAPIERINDUSTRIE e. V., 2025.
- [22] Blesl, Markus; Kessler, Alois: Energieeffizienz in der Industrie in: Springer Verlag. Berlin Heidelberg: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Forschung und Innovation, Karlsruhe, 2013.

- [23] Roadmap Chemie 2050 - Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. München, Frankfurt: FutureCamp Climate GmbH, 2019. ISBN: 978-3-89746-223-.
- [24] Referenzdokument über die besten verfügbaren Techniken für die Herstellung von Polymeren. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2006.
- [25] Fleiter, Tobias; Schlomann, Barbara; Eichhammer, Wolfgang: Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2013. ISBN: 978-3-8396-0515-8.
- [26] Baake, Egbert: Grundlagen und Anwendungen elektrothermischer Verfahren - Folge11: Mikrowellenerwärmung. In: elektrowärme international Heft 3/2011 September. Hannover: Institut für Elektroprozesstechnik, Leibniz Universität Hannover, 2011.
- [27] Galvanotechnik und nasschemische Prozesse. In <https://www.ist.fraunhofer.de/de/technologien/ecv.html>. (Abruf am 2025-11-17); Braunschweig: Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST, 2025.
- [28] dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität - Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.), 2021.
- [29] Boston Consulting Group: Klimapfade 2.0 - Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Berlin: Bundesverband der Deutschen Industrie, 2021.
- [30] Gühl, Sarah; Schwarz, Marcel; Schimmel, Matthias: Energiewende in der Industrie - Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor - Branchensteckbrief der Nahrungsmittelindustrie. Stuttgart, München: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2020.
- [31] Schulz, Jörg: Energieeffizienz in Bäckereien - Energieeinsparungen in Backstuben und Filialen. Bremerhaven: Netzwerk zur Steigerung der Energieeffizienz in Bäckereien, 2014.
- [32] World Energy Outlook 2025. Paris: International Energy Agency (IEA), 2025.
- [33] Schaber, Katrin: Stromnetzentgelte - gut und günstig - Ausbaurkosten reduzieren und Entgeltsysteme zukunftssicher aufstellen. Berlin: Agora Energiewende, 2025.
- [34] Deutsche Energie-Agentur: Einfach Strom sparen - Ich will mehr Licht für mein Geld. Berlin: Deutsche Energie-Agentur, 2015
- [35] Gewerbegruppen der Handwerksstatistiken nach Handwerksordnung Stand 2021 - Produzierendes Gewerbe. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Destatis), 2022.
- [36] 53111-004 - Handwerkszählung: Rechtliche Einheit im Handwerk, Tätige Personen, Umsatz, Gewerbegruppen, -zweige - Kreise (Gebietsstand ab 01.08.08) - Jahre (ab 2020): <https://www.statistik.sachsen.de/genonline/online?operation=previous&levelindex=3&step=2&titel=Tabellenaufbau&levelid=1764663325579&levelid=1764663229354#abreadcrumb>; Kamenz: Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2025.
- [37] Louisenthal: Unternehmensprofil. In <https://www.louisenthal.com/de/ueber-uns/ueber-louisenthal/unternehmensprofil>. (Abruf am 2025-11-3); Gmund am Tegernsee: Papierfabrik Louisenthal GmbH, 2025.
- [38] Giesecke+Devrient - Unternehmenspräsentation - Stand: August 2025. München: Giesecke+Devrient GmbH, 2025.
- [39] Louisenthal: Geschichte Königstein. In <https://www.louisenthal.com/de/ueber-uns/ueber-louisenthal/geschichte-koenigstein>. (Abruf am 2025-11-3); Gmund am Tegernsee: Papierfabrik Louisenthal GmbH, 2025.
- [40] Energiebilanz 2022 Freistaat Sachsen: https://www.energie.sachsen.de/download/CMS/EB_2022_Energieeinheiten_endg.pdf; Kamenz: Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2024.
- [41] Energiebilanz 2012 Freistaat Sachsen: https://www.energie.sachsen.de/download/2012_Energiebilanz_2012_in_Mengeneinheiten_REV_2022.pdf; Kamenz: Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2022.
- [42] Energiebilanz 2013 Freistaat Sachsen: https://www.energie.sachsen.de/download/2012_Energiebilanz_2012_in_Mengeneinheiten_REV_2022.pdf; Kamenz: Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2022.
- [43] Energiebilanz 2016 Freistaat Sachsen: https://www.energie.sachsen.de/download/2016_Energiebilanz_2016_in_Energieeinheiten_REV_2022.pdf; Kamenz: Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2022.
- [44] Energiebilanz 2017 Freistaat Sachsen: https://www.energie.sachsen.de/download/2017_Energiebilanz_2017_in_Mengeneinheiten_REV_2022.pdf; Kamenz: Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2022.
- [45] Energiebilanz 2018 Freistaat Sachsen: https://www.energie.sachsen.de/download/2018_Energiebilanz_2018_in_Mengeneinheiten_REV_2022.pdf; Kamenz: Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2022.
- [46] Energiebilanz 2019 Freistaat Sachsen: https://www.energie.sachsen.de/download/2019_NEU_Energiebilanz-in-ME.pdf; Kamenz: Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2023.
- [47] Energie- und CO₂-Bilanzen im Freistaat Sachsen 2020 - E IV 6 - j/20. Kamenz: Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2023.
- [48] Energiebilanz 2021 Freistaat Sachsen: https://www.energie.sachsen.de/download/EB_2021_Energieeinheiten.pdf; Kamenz: Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2024.

- [49] 42111B-08Z - Verarb. Gewerbe: Betriebe (Besch.>49), Beschäftigte, Arbeitsstd., Entgelte, Umsatz -- Kreis (GS ab 01.08.08) -- WZ 2008, Jahre, Monate: <https://www.statistik.sachsen.de/genonline//online?operation=table&code=42111B-08Z&by-pass=true&levelindex=1&levelid=1764659578868#abreadcrumb>; Kamenz: Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2025.
- [50] Transformationsstudie zur Dekarbonisierung der niedersächsischen Wirtschaft. Hannover: Niedersachsen Allianz für Nachhaltigkeit, 2022.
- [51] E-Tool. In <https://www.energie-tool.de/#!>. (Abruf am 2025-12-02); Berlin: Zentralverband des Deutschen Handwerks e.V. (ZDH), 2025.
- [52] Technology Readiness Levels (TRL). In https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Shaping_the_Future/Technology_Readiness_Levels_TRL. (Abruf am 2025-11-26); Paris: European Space Agency, 2025.
- [53] Veitengruber, Frank: Energieeffizienz in der Industrie – Erkenntnisse aus der Praxis. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2021.
- [54] Liste zu Kurzfristmaßnahmen für Energieeinsparung und Energiesubstitution in Unternehmen. Berlin: Initiative Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerke, 2023.
- [55] Erfolgreiche Abwärmenutzung im Unternehmen. - Energieeffizienzpotenziale erkennen und erschließen.. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2015.
- [56] Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Hirzel, Simon; Neusel, Lisa; Aydemir, Ali: CO₂-neutrale Prozesswärmeerzeugung - Umbau des industriellen Anlagenparks im Rahmen der Energiewende: Ermittlung des aktuellen SdT und des weiteren Handlungsbedarfs zum Einsatz strombasierter Prozesswärmeanlagen. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2023.
- [57] Großwärmepumpen - Industriewärmepumpen und Wärmepumpen für große Gebäude. In <https://www.mitsubishi-les.com/de-de/gross-waermepumpen-6917.html>. (Abruf am 2025-12-01); Ratingen: Mitsubishi Electric Europe B.V., 2025.
- [58] Compress 7400i AW - CS7400iAW 5 ORMB-S - 7739618572. Wernau: Bosch Thermotechnik GmbH, 2025.
- [59] KWW-Technikkatalog Wärmeplanung: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fapi.kww-halle.de%2Ffileadmin%2FPDFs%2FKWW-Technikkatalog-Waermeplanung_10-2025.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK; Halle (Saale): Kompetenzzentrum Kommunale Wärmewende (KWW), 2024.
- [60] Rohani, Shahab; Zhou, Xinyue; Gregor, Bern: Solare Prozesswärme für die deutsche Industrie - Ertrag und Wirtschaftlichkeit gegenüber konventioneller Wärmeversorgung. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2025.
- [61] Geothermie. In <https://www.kww-halle.de/fokusthemen/waermewende-technologien/geothermie>. (Abruf am 2025-11-19); Halle (Saale): Kompetenzzentrum Kommunale Wärmewende (KWW), 2025.
- [62] Produkte. In <https://www.grosswaermepumpen-info.de/de/produkte/produkte/>. (Abruf am 2025-11-26); Wiesbaden: LEA Hessen GmbH, 2025.
- [63] Hochtemperatur-Wärmepumpen Einsatz und CO₂ - Einsparpotenziale - Technologie-Fakten Klimaschutz in der Industrie. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2022.
- [64] Elektrischer Heißwassererzeuger - Vitomax HW-E. In <https://www.viessmann.de/de/produkte/grosskessel/vitomax-hw-e.html#downloads>. (Abruf am 2025-11-26); Allendorf (Eder): Viessmann Holding International GmbH, 2025.
- [65] Elektrokessel. In <https://technologiematrix.synergie-projekt.de/steckbrief/elektrokessel/#toggle-id-6>. (Abruf am 2025-11-26); Berlin/Stuttgart: Kopernikus-Projekt SynErgie, 2018.
- [66] Fernwärmepreisvergleich 2025 - Fernwärmepreise unterscheiden sich zwischen den Anbietern um mehr als 150 Prozent – im Schnitt sinken sie um 10 Prozent. In <https://www.vea.de/newsroom/pressemitteilungen/pressemitteilung/fernwaermepreisvergleich-2025>. (Abruf am 2025-11-19); Hannover: VEA - Bundesverband der Energie-Abnehmer e.V., 2025.
- [67] MolyCom®-Ultra - Molybdändisilizid-Heizelemente (MoSi₂). In <https://www.schupp-ceramics.com/de/elektrisches-beheizen/molybdaendisilizid-mosi2-heizelemente-molycom-ultra.html>. (Abruf am 2025-11-19); Aachen: M.E. Schupp Industriekeramik GmbH, 2025.
- [68] Hochtemperatur-Wärmepumpe ThermBoosterTM Dampf bis 160 °C und Wasser bis 165 °C - Heißer und effizienter als andere Wärmepumpen.. In <https://spheat.de/thermbooster/>. (Abruf am 2025-11-19); Overath: SPH Sustainable Process Heat GmbH, 2025.
- [69] Dampfkesselanlagen. In <https://www.host-bio-energy.com/de/l%C3%B6sungen/biomasse-und-abfallbefeuerte-kesselanlagen/dampfkesselanlagen/>. (Abruf am 2025-12-02); Enschede: HoSt Holding B.V., 2025.
- [70] Heiz- und Prozesswärme mit klimaneutralem Wasserstoff. In <https://www.bosch-industrial.com/de/de/gewerbe-industrie/wissen/fachberichte/wasserstoff/>. (Abruf am 2025-11-26); Gunzenhausen: Bosch Industriekessel GmbH, 2025.
- [71] Wo höchste Temperaturen benötigt werden sind wir zu Hause.. In <https://www.schupp-ceramics.com/de/anwendungen.html>. (Abruf am 2025-11-19); Aachen: M.E. Schupp Industriekeramik GmbH, 2025.

- [72] Durchschnittliche Reichweite von Elektrofahrzeugen in Deutschland von 2017 bis 2025. In <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/443614/umfrage/prognose-zur-reichweite-von-elektroautos/>. (Abruf am 2025-11-18); Hamburg: Statista GmbH, 2025.
- [73] Clausen, Jens: Verbrenner oder Elektro? Ein Vergleich der Vor- und Nachteile.. Berlin: Borderstep Institut, 2025.
- [74] Technischer Leitfaden LADEINFRASTRUKTUR ELEKTROMOBILITÄT - Version 4.1. Offenbach am Main: Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, 2023.
- [75] VERSÄUMNISSE ANGEHEN, ENTSCHLOSSEN MODERNISIEREN - Jahresgutachten 24/25. Wiesbaden: Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung, 2024.
- [76] MAN Elektro-Lkw haben 2025 bereits 500.000 Kilometer im realen Logistikeinsatz zurückgelegt. München: MAN Truck & Bus, 2025.
- [77] Spiller, Beia; Lohawala, Nafisa; DeAngeli, Emma: Medium- and Heavy-Duty Vehicle Electrification: Challenges, Policy Solutions, and Open Research Questions. Washington DC: Resources for the Future (RFF), 2023.
- [78] Noll, Bessie; del Val, Santiago; Schmidt, Tobias; Steffen, Bjarne: Analyzing the competitiveness of low-carbon drive-technologies in road-freight: A total cost of ownership analysis in Europe. Freising-Weihenstephan: ETH Zürich, 2021.
- [79] Link, Steffen; Stephan, Annegret; Speth, Daniel; Plötz, Patrick: Rapidly declining costs of truck batteries and fuel cells enable large-scale road freight electrification. Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, 2024.
- [80] Diesel vs. Elektro-Stapler: Kosten, Einsatzgebiete & TCO im Vergleich. In <https://biberger.de/blogs/news/stapler-diesel-oder-elektro-stapler>. (Abruf am 2025-11-19); Schierling: Concept-B GmbH, 2025.
- [81] Sicherer und effizienter Einsatz von Flurförderzeugen - Richtlinien VDI 2199 E und VDI 4482. In <https://www.vdi.de/news/detail/sicherer-und-effizienter-einsatz-von-flurfoerderzeugen>. (Abruf am 2025-11-19); Düsseldorf: VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2025.
- [82] Bayerlein, Maximilian; Hausmann, Julius; Heimes, Heiner; Kampker, Achim: A comprehensive techno-economic evaluation of fuel cell electric trucks. Aachen: RWTH Aachen, 2025.
- [83] 42271-08Z - Verarb. Gewerbe: Betriebe (Besch.>19) und Beschäftigte am 30.09., Entgelte und Umsatz - - Kreis (GS ab 01.08.08) -- WZ 2008 - Jahre; Kamenz: Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2025.
- [84] Kracht, Hannes; Veitengruber, Frank; Gruber, Anna; Guminski, Andrej; Kaindl, Fabian: Energieflexibilität in der Glasindustrie. München: FfE, 2025.
- [85] Ceramic Roadmap to 2050 - Continuing our Path towards Climate Neutrality. Brussels: Cerame-Uni A.I.S.B.L, 2021.
- [86] Intermittierende Mikrowellentrocknung für die keramische Industrie - Workshop. Weimar: MFPA Weimar, 2024.
- [87] Keramik und Porzellan - Anwendungen - Homogene Trocknung von Keramik und Porzellan. In <https://www.microwaveheating.net/de/anwendungen/keramik-porzellan>. (Abruf am 2025-6-18); Peine: Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH, 2025.
- [88] Italcir Group setzt 100% elektrischen Brennofen ein. In <https://www.1200grad.com/italcer-group-setzt-100-elektrischen-brennofen-ein>. (Abruf am 2025-08-20); Essen: 1200° Grad – Das Online-Magazin für die Keramik- und Zubehörbranche, 2024.
- [89] Klimastudie Papierindustrie - TRANSFORMATION ZUR KLIMANEUTRALITÄT. Berlin: DIE PAPIERINDUSTRIE e. V., 2024.
- [90] Leistungsbericht Papier 2025. Berlin: DIE PAPIERINDUSTRIE e. V., 2025.
- [91] Energieeffiziente industrielle Trocknung von Beschichtungen auf Papier mit neuartigen Infrarotstrahlern und Verfahren - Abschlussbericht. Freiberg: IBT.InfraBioTech GmbH, 2009.
- [92] Infrarot-Trocknung verbessert die Herstellung von Wellpappe. Kleinostheim: Heraeus Noblelight GmbH, 2012.
- [93] Biomasse stärkt Papierindustrie im Erzgebirge. In <https://www.erzgebirge-gedachtgemacht.de/news/biomasse-staerkt-papierindustrie-im-erzgebirge>. (Abruf am 2025-11-21); Annaberg-Buchholz: Wirtschaftsförderung Erzgebirge GmbH, 2025.
- [94] Papier CO2-frei produziert – Durchbruch auf dem Weg zur Klimaneutralität. In <https://www.essity.de/presse/pressemitteilungen/2023/co2-free-with-green-hydrogen/>. (Abruf am 2025-11-20); Mannheim: Essity GmbH, 2023.
- [95] Groundbreaking Ceremony for Beccs Stockholm - A milestone was passed as the groundbreaking ceremony for BECCS Stockholm took place. In <https://beccs.se/news/groundbreaking-ceremony-for-beccs-stockholm/>. (Abruf am 2025-11-28); Stockholm: Stockholm Exergi, 2025.
- [96] Zahlen und Fakten. In <https://www.vti-online.de/seitenelemente/zahlen-und-fakten>. (Abruf am 2025-11-11); Chemnitz: Verband der Nord-Ost-deutschen Textil- und Bekleidungsindustrie e.V., 2025.
- [97] Gemeinsamer Schlussbericht ENTEX (02PO2090-92). In <https://edocs.tib.eu/files/e01fb15/829096876.pdf>. (Abruf am 2025-11-04); Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2013.
- [98] Leitfaden - Effiziente Energienutzung in der Textilveredelung. Wuppertal: Energieagentur.NRW, 2012.

- [99] Heinze, Thorsten; Mammitzsch, Jens: Thermofixieren von Seilen aus hochfesten Synthefasern. Chemnitz: TU Chemnitz, 2010.
- [100] Topf, W.: Mischfreudige Chemiefasern-Herstellung und Qualität von Spinnfasermischgarnen. Lenzing: Lenzing Berichte, 1977.
- [101] Grüner Strom statt Erdgas in der Textilindustrie. In <https://nachrichten.idw-online.de/2022/12/14/gruener-strom-statt-erdgas-in-der-textilindustrie/>. (Abruf am 2025-11-21); Bayreuth: Informationsdienst Wissenschaft e.V. -idw-, 2022.
- [102] POWER-FRAME - FOR THE NONWOVENS SECTOR. Leonberg: BRÜCKNER Textile Technologies GmbH & Co. KG, 2025.
- [103] Energieeffizientes Luftdüsenweben - Numerische Simulation macht's möglich. In <https://www.ditf.de/de/weitere-infos/details/energieeffizientes-luftduesenweben/>. (Abruf am 2025-11-28); Denkendorf: Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf, 2025.
- [104] Energieeffizientes Luftdüsenweben. In <https://www.ditf.de/de/weitere-infos/details/energieeffizientes-luftduesenweben/>. (Abruf am 2025-11-04); Denkendorf: Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf, 2025.
- [105] Ökologischer Rolle-zu-Rolle-Digitaldruck mit Pigmenttinten auf Textil. In <https://www.dbu.de/projektdatenbank/32850-01/>. (Abruf am 2025-11-04); Osnabrück: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2018.
- [106] Natural Fire en la industria textil. In <https://natural-fire.es/natural-fire-en-la-industria-textil/>. (Abruf am 2025-11-21); Yecla (Murcia): Natural Fire, S.L., 2024.
- [107] Dow schließt in Europa drei Upstream-Anlagen aufgrund struktureller Herausforderungen in der Region. In <https://de.dow.com/de-de/presse/presse-meldungen/dow-schreibt-in-europa-drei-upstream-anlagen.html>. (Abruf am 2025-11-06); Wiesbaden: Dow Deutschland Anlagengesellschaft mbH, 2025.
- [108] Grüner Motor für die Chemie. In <https://www.basf.com/global/de/who-we-are/change-for-climate/a-green-engine-for-chemistry>. (Abruf am 2025-11-20); Ludwigshafen: BASF SE, 2025.
- [109] Das Unternehmen. In <https://www.trinseo.com/das-unternehmen>. (Abruf am 2025-11-17); Schkopau: Trinseo, 2025.
- [110] Pharmazeutischer Fermentationsprozess in der Arzneimittelherstellung. In <https://ritaibioreactor.com/de/pharmazeutisches-fermentationsverfahren/>. (Abruf am 2025-11-11); Shanghai: RITAL, 2024.
- [111] Produktion von Arzneimitteln: Made in EU? Mehr Liefersicherheit – weniger Engpässe. Berlin: Bundesverband der Pharmazeutischen Industrie e.V. (BPI), 2021.
- [112] Dresden - Mitten im Herzen der Stadt Dresden befindet sich GlaxoSmithKline Biologicals und stellt Impfstoffe für den Weltmarkt her: Der saisonale Grippe-Impfstoff wird in rund 70 Ländern vertrieben.. In <https://de.gsk.com/de-de/unternehmen/at-a-glance/dresden/>. (Abruf am 2025-11-20); München: GlaxoSmithKline GmbH & Co. KG, 2025.
- [113] Reindorf, Torsten: Modellierung und Analyse des Betriebsverhaltens von thermischen Nachverbrennungsanlagen mit regenerativer Abluftvorwärmung. Dissertation. Herausgegeben durch Technische Universität Clausthal - Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften: Clausthal, 2014.
- [114] Fleitner, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Neusel, Lisa; Hirzel, Simon; Neuwirth, Marius; Schwotzer, Christian; Kaiser, Felix; Gondorf, Carsten: CO₂ -neutrale Prozesswärme durch Elektrifizierung und Einsatz von Wasserstoff. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2024.
- [115] Blaumeiser, Dominik: Wasserstoff in der chemischen Industrie. München: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., 2023.
- [116] Mechanisches Recycling von Kunststoffabfällen. In <https://plasticseurope.org/de/nachhaltigkeit/kreislaufwirtschaft/recycling/mechanisches-recycling/>. (Abruf am 2025-11-21); Frankfurt am Main: Plastics-Europe Deutschland e.V., 2025.
- [117] Knappe, Florian; Reinhardt, Joachim; Kauertz, Benedikt; Oetjen-Dehne, Rüdiger; Buschow, Nadine; Ritthoff, Michael; Wilts, Henning; Lehmann, Martina: Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes. Dessau-Roßlau, Deutschland: Umweltbundesamt, 2019.
- [118] Vogel, Julia: Chemisches Recycling von Kunststoffen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2025.
- [119] Ramesohl, Stephan; Vetter, Laura; Meys, Raoul; Steger, Sören: Chemisches Kunststoffrecycling - Potenziale und Entwicklungsperspektiven - Ein Beitrag zur Defossilisierung der chemischen und kunststoffverarbeitenden Industrie in NRW - Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Circular Economy. Gelsenkirchen: IN4climate.NRW GmbH, 2020.
- [120] Brandenburg, Fabian; Röhring, Katharina; Hunger, Steffi; Kuchenbuch, Anne; Harnisch, Falk: Elektrobioreaktoren für alle! – Technische Anforderungen und Innovationen - Elektrobiotechnologie. Leipzig: HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG – UFZ, 2024.
- [121] Fermenter und Bioreaktoren. In <https://idoneus.de/fermenter-bioreactor/>. (Abruf am 2025-11-21); Pähl: idoneus Anlagenbau GmbH, 2025.
- [122] Spritzgießen. In <https://www.ressource-deutschland.de/werkzeuge/loesungsentwicklung/prozessketten/spritzgiessen/>. (Abruf am 2025-11-05); Düsseldorf: VDI Technologiezentrum GmbH, 2025.

- [123] Plischuk, Lea: Expertenbasierte Bilanzierung von Industrieprozessen und Entwicklung einer kennzahlenbasierten Bewertung von Recyclingpotenzialen. Masterarbeit. Herausgabe: Technische Universität München. München, 2022.
- [124] Abdallas Chikri, Yasmine; Wetzels, Wouter: DECARBONISATION OPTIONS FOR THE DUTCH TYRE INDUSTRY. Den Haag: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2019.
- [125] Muras, Johann; Kleinert, Gerhard: Induktives Beheizen von Kunststoffextrudern. Remscheid: SMS Elotherm GmbH, 2014.
- [126] Contiline-HEAT Infrarot-Durchlauföfen. In <https://ibt.de/produkte/contiline-heat#anwendungsbereiche>. (Abruf am 2025-11-21); Freiberg: IBT GmbH, 2025.
- [127] Umformtechnik und Umformverfahren. In <https://wgp.de/de/umformtechnik/>. (Abruf am 2025-11-17); Garching: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e.V. – WGP, 2025.
- [128] Blausprödigkeit. In <https://haertetechnik-hagen.de/blausproedigkeit>. (Abruf am 2025-12-05); Hagen: Härtetechnik Hagen GmbH, 2025.
- [129] Baira, El Mustapha: Trockeneisstrahlen als Vorbehandlungsverfahren vor dem Galvanisieren. Dissertation. Herausgegeben durch TU Berlin: Berlin, 2016.
- [13] Basma, Hussein; Rodríguez, Felipe: A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe. Berlin: The International Council on Clean Transportation (ICCT), 2023.
- [130] Der energieeffiziente metallverarbeitende Betrieb. Berlin: Zentralverband des Deutschen Handwerk e.V. (ZDH), 2019.
- [131] PROZESSWÄRME AUS BIOENERGIE - WIE KLEINE UND MITTLERE UNTERNEHMEN SCHON HEUTE IHRE PRODUKTION DEKARBONISIEREN KÖNNEN. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien (AEE), 2023.
- [132] Dappen, Stefan; Amiri, Farsad: Verfahrenstechnische Aspekte beim induktiven Härten. Remscheid: SMS Elotherm GmbH, 2015.
- [133] Einsatzhärten. In <https://www.kanthal.de/anwendungen/%C3%B6fen/einsatzh%C3%A4rten/>. (Abruf am 2025-12-05); Hallstahammar: Kanthal AB, 2025.
- [134] Elektrischer Pulverofen mit Pulverabsaugung und Fördersystem. In <https://starpaint.de/products/elektrischer-pulverofen-mit-pulverabsaugung-und-fordersystemen>. (Abruf am 2025-11-21); Mainstockheim: Starpoint Industries, 2025.
- [135] EINBRENN-OFEN. In <https://www.emuk-pulverbeschichtung.de/einbrennofen>. (Abruf am 2025-11-21); Friesenheim-Oberweier: EMUK Pulverbeschichtung, 2025.
- [136] Ressourceneffizienz der Fügeverfahren - VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 16. Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), 2016.
- [137] Schweißen und verwandte Verfahren. In <https://www.bghm.de/arbeitschueter/themen/schweissen-und-verwandte-verfahren>. (Abruf am 2022-11-21); Mainz: Berufsgenossenschaft Holz und Metall, 2025.
- [138] Nasslackieren - Beschichtungsverfahren. In <https://www.coloritas.de/temp/nasslackierung/#:~:text=In%20der%20Industrie%20werden%20heute%20haupts%C3%A4chlich%20K-Lacke%20eingesetzt.,Diese%20reagieren%20chemisch%20und%20h%C3%A4rten%20%28ohne%20Trocknung%29%20aus>. (Abruf am 2025-11-07); Dettingen: ms-Oberflächentechnologie, 2025.
- [139] Emissionen aus dem Einbrennprozess von Pulverlacken. Frankfurt: Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie e.V., 2017.
- [140] Maschinen- und Anlagenbau. In <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Artikel/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-maschinen-und-anlagenbau.html>. (Abruf am 2025-11-07); Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2025.
- [141] 42271-08Z - Verarb. Gewerbe: Betriebe (Besch.>19) und Beschäftigte am 30.09., Entgelte und Umsatz - - Kreis (GS ab 01.08.08) -- WZ 2008 - Jahre; Kamenz: Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen, 2025.
- [142] Industrielle Trocknung - Technologien zur Dekarbonisierung der Prozesswärme. Hannover: Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen GmbH, 2024.
- [143] Schockfrostten. In <https://www.lebensmittelverband.de/de/lebensmittel/verarbeitung/schockfrostten>. (Abruf am 2025-11-06); Berlin: Lebensmittelverband Deutschland, 2025.
- [144] Vakuumtechnik in der Lebensmittelindustrie: Hygiene, Präzision und Effizienz im Fokus. In <https://vakuumtechnologien.de/vakuumtechnik-in-der-lebensmittelindustrie-hygiene-prazision-und-effizienz-im-fokus/>. (Abruf am 2025-11-20); Beverate di Brivio: VUOTOTECNICA S.r.l., 2025.
- [145] Polar 2-85. Hertogenbosch: Henkelman BV, 2025.
- [146] Produktion - Bei unseren traditionellen Produktionsprozessen setzen wir auf eine umweltschonende Herstellung.. In <https://www.wochingerbraeu.de/brauprozess>. (Abruf am 2025-11-18); Traunstein: Jakob Wochinger & Sohn GmbH, 2025.
- [147] Langsamer Trocknungsprozess - für qualitativ hochwertige Teigwaren. In https://www.dececco.com/de_de/langsamer-trocknungsprozess/. (Abruf am 2025-12-05); Fara San Martino: F.Ili De Cecco di Filippo - Fara San Martino S.p.A., 2025.
- [148] Trocknungstemperatur von Pasta: Warum langsam und niedrig die beste Wahl ist. In <https://www.pastafabbri.it/de/blogs/pastapedia/trocknungstemperatur-von-pasta-warum-langsam-und-niedrig-die-beste-wahl-ist>. (Abruf am 2025-12-05); Greve in Chianti: Pastificio Artigiano Fabbri SRL, 2025.

- [149] Die 4 Produktionsschritte - Der Weg zur fertigen Nudel. In <https://www.jeremias.com/die-4-produktionsschritte>. (Abruf am 2025-11-18); Birkenfeld: Teigwarenfabrik Jeremias GmbH, 2025.
- [15] Guminski, Andrej; Wiener, Manuel; Rouyre, Elsa: CO₂-Verminderung in der Hohlglasherstellung. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft, 2017.
- [150] Verbesserung der Energieeffizienz - Lebensmittel- und Getränkeindustrie. Zürich: ABB, 2021.
- [151] Agrana – Food industry. In <https://dryficiency.eu/integration-demonstration/agrana-food-industry>. (Abruf am 2025-11-28); Wien: AIT Austrian Institute of Technology GmbH, 2025.
- [152] Verordnung über die Berufsausbildung zum Bäcker/zur Bäckerin (BäAusbV 2004). Ausgefertigt am 2004-04-21, Version vom 2016-02-08; Berlin: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2016.
- [153] Einspar-Beratung für Bäcker und Konditoren. Köln: ASEW GbR, 2022.
- [154] Die energieeffiziente Bäckerei. Berlin: Zentralverband des Deutschen Handwerk e.V. (ZDH), 2019.
- [155] Gewerbestrom für Bäcker, Bäckereien und Konditoren. In <https://www.stromauskunft.de/gewerbestrom/gewerbestrom-baecker/>. (Abruf am 2025-11-06); Münster: EnergieAuskunft GmbH, 2025.
- [156] MATADOR MDE. In <https://www.wp-l.de/backofen-fuer-baeckereien/etagenbackofen/etagenbackofen-matador-mde.html>. (Abruf am 2025-11-18); Dinkelsbühl: Werner & Pfleiderer Lebensmitteltechnik GmbH, 2025.
- [157] PELLADOR - Pelletbefeuerter Holzbackofen Tradition x Innovation. In <https://www.wp-l.de/backofen-fuer-baeckereien/holzbackofen/holzbackofen-pellador.html>. (Abruf am 2025-11-18); Dinkelsbühl: Werner & Pfleiderer Lebensmitteltechnik GmbH, 2025.
- [158] Verordnung über die Berufsausbildung zum Fleischer/zur Fleischerin (FleiAusbV 2005). Ausgefertigt am 23-03-20, Version vom 2016-12-30; Berlin: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2016.
- [159] Einspar-Beratung für Fleischereien - Optimaler Einsatz von Energie und Trinkwasser. Köln: ASEW GbR, 2022.
- [160] Die energieeffiziente Fleischerei. Berlin: Zentralverband des Deutschen Handwerk e.V. (ZDH), 2019.
- [161] EU-Verordnung über fluoridierte Treibhausgase. In <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluoridierte-treibhausgase-fckw/rechtliche-regelungen/eu-verordnung-ueber-fluoridierte-treibhausgase#verbote-des-inverkehrbringens-der-verwendung-sowie-der-inbetriebnahme>. (Abruf am 2025-11-18); Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2025.
- [162] Pökeln. In <https://www.lebensmittelverband.de/de/lebensmittel/verarbeitung/poekeln>. (Abruf am 2025-11-18); Berlin: Lebensmittelverband Deutschland e.V., 2025.
- [163] Räuchern. In <https://www.lebensmittelverband.de/de/lebensmittel/raechern>. (Abruf am 2025-11-18); Berlin: Lebensmittelverband Deutschland e. V., 2025.
- [164] Energie einsparen in Metzgereien und Fleischereien. In <https://www.oekolandbau.de/bio-in-der-praxis/bio-verarbeitung/unternehmensfuehrung/nachhaltigkeit/energieintensive-produktion-einsparpotenziale-in-der-verarbeitung/energie-einsparen-in-metzgereien-und-fleischereien/>. (Abruf am 2025-11-18); Bonn: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2025.
- [165] Schlachtbetriebe und Verwertung tierischer Nebenprodukte. In <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industrieb Branchen/nahrungs-futtermittelindustrie-tierhaltungsanlagen/schlachtbetriebe-verwertung-tierischer#schlachthofe-und-schlachtbetriebe-in-deutschland>. (Abruf am 2025-11-06); Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2024.
- [166] KAISER'S RÄUCHERSCHRANK '200'. In <https://www.raucherofen.at/kaiser-raucherofen-200-aus-edelstahl-elektrisch-isoliert/>. (Abruf am 2025-12-05); Brunn: KAISER COMPANY s.r.o., 2025.
- [167] Zahlen und Fakten zur Textil-Dienstleistungsbranche in Deutschland. In <https://www.dtv-deutschland.org/zahlen-und-fakten.html>. (Abruf am 2025-11-06); Bonn: Deutscher Textilreinigungs-Verband e.V., 2025.
- [168] TEXTILREINIGUNG. In <https://www.energieeffizienz-handwerk.de/gewerk/waescherei>. (Abruf am 2025-11-06); Berlin: Zentralverband des Deutschen Handwerk e.V. (ZDH), 2025.
- [169] Verordnung über die Berufsausbildung zum Textilreiniger/zur Textilreinigerin (TexRAusbV 2002). Ausgefertigt am 2002-06-17; Berlin: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2002.
- [170] Freistehende Waschschleudermaschinen. Hampton Bays: Alliance Laundry Systems, 2025.
- [171] Textilreinigungsmaschinen kaufen oder mieten. In <https://www.treysse-waeschereitechnik.de/produkte/textilreinigungsmaschinen/>. (Abruf am 2025-11-18); Nesselat: TREYSSE GmbH Wäscherei- und Reinigungstechnik, 2025.
- [172] INDUSTRIE-WÄSCHETROCKNER. Wangenheim: Treysse GmbH, 2025.
- [173] Chemische Reinigung: Wann sie sinnvoll ist & wie sie funktioniert. In <https://deutscherreinigung.de/ratgeber/chemische-reinigung/>. (Abruf am 2025-11-21); Grünwald: DRG-Deutsche Reinigungsgesellschaft mbH, 2025.
- [174] Dampfdrucktabelle (Wasser). Ingelfingen: GEMÜ Gebr. Müller Apparatebau GmbH & Co. KG, 2025.
- [175] Jenroll EXPG 2000. Burgdorf: JENSEN HOLDING AG, 2012.

- [176] Energieeffizienz in der Textilreinigung. In <https://www.gewerbegas.info/gewerbe/textilreinigung/>. (Abruf am 2025-11-18); Berlin: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2025.
- [177] Handbuch zur Energieeinsparung in Textilreinigungen. Bonn: Deutscher Textilreinigungs Verband - DTV- e.V., 2017.
- [178] Wern, B.; Matschoss, P.; Klemm, M.; Wilker, P.: Beitrag der Biomasse für eine klimaneutrale Prozessenergie in Deutschland – Theorie und Beispiele. Berlin: ForschungsVerbund Erneuerbare Energien, 2025.
- [179] Herrndorff, Mareike: Ein neuer Ordnungsrahmen für Erdgasverteilnetze - Analysen und Handlungsoptionen für eine bezahlbare und klimazielfunkompatible Transformation. Berlin: Agora Energiewende, 2023.
- [180] Gaspreise für Haushalte im 1. Halbjahr 2024 um 4,0 % gestiegen - Pressemitteilung Nr. 375 vom 30. September 2024. In www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/09/PD24_375_61243.html. (Abruf am 2025-08-25); Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2024.
- [181] Arnold, Fabian; Novirdoust, Amir; Niesler, Nicole; Dressler, Merit; Reinecke, Antonie; Kienscherf, Philipp: Abschätzung zukünftiger Wasserstoffnetznutzungsentgelte. Köln: Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, 2024.
- [182] Genehmigung des Szenariorahmens 2025-2037/2045. Bonn: Bundesnetzagentur, 2025.
- [183] Technology Readiness Levels. In https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2012/11/Technology_Readiness_Levels. (Abruf am 2025-11-26); Paris: European Space Agency, 2012.
- [184] eSprinter Kastenwagen. In <https://www.mercedes-benz.de/vans/models/esprinter/panel-van/overview.html>. (Abruf am 2025-11-18); Stuttgart: Mercedes-Benz AG, 2025.
- [185] Sprinter Kastenwagen. In <https://www.mercedes-benz.de/vans/models/sprinter/panel-van/overview.html?gclid=faded0004b13a94b77b6374b3247e7&gclsrc=3p.ds&msclkid=faded0004b13a94b77b6374b3247e7>. (Abruf am 2025-11-18); Stuttgart: Mercedes Benz AG, 2025.
- [186] Heinze, Thorsten; Mammitzsch, Jens: Thermofixieren von Seilen aus hochfesten Synthesefasern. Chemnitz: TU Chemnitz, 2010
- [187] Nentwig, Joachim: Kunststoff-Folien - Herstellung - Eigenschaften - Anwendung. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG, 2006. ISBN: 978-3-446-40390-1
- [188] Einführungsskriptum zur Übung Vulkanisation. Graz: TU Graz, 2017.
- [189] Vulkanisierung von Gummi erklärt: Schritt-für-Schritt-Verfahren, Verwendungsmöglichkeiten und Vorteile. In <https://www.kinsoe.com/de/vulcanization-rubber-process/>. (Abruf am 2025-11-05); Vinson: Kinsoe, 2025.
- [190] Kautschuk Vulkanisieren: Verfahren zur Herstellung von Gummi. In <https://ibt.de/kautschuk-vulkanisieren>. (Abruf am 2025-11-05); Freiberg: IBT GmbH, 2025.
- [191] Bohren. In <https://wgp.de/de/bohren/>. (Abruf am 2025-11-17); Garching: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e.V. – WGP, 2025.
- [192] Drehen als Fertigungsverfahren. In <https://wgp.de/de/drehen/>. (Abruf am 2025-11-17); Garching: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e.V. – WGP, 2025.
- [193] Grundlagen des Lichtbogen-Schweißens. In <https://www.gatzsch.de/de/produkte/lichtbogenschweissen/lichtbogenschweissen-erklart>. (Abruf am 2025-11-21); Attendorn: Gatzsch Schweißtechnik GmbH, 2025.
- [194] AMBITIONIERTEN KLIMASCHUTZ ERFOLGREICH UMSETZEN - AUF DEM WEG ZUR KLIMANEUTRALITÄT. Berlin: Bundesvereinigung der Deutschen Ernährungsindustrie e.V., 2023.
- [195] Abdarren. In <https://gradplato.com/bierwissen/abdarren>. (Abruf am 2025-11-18); Nürnberg: Fachverlag Hans Carl GmbH, 2025.
- [196] Prozessanalyse der Malztrocknung zur Nivellierung rohstoff- und jahrgangsbedingter Schwankungen der Verkleisterungstemperatur. Freising: Technische Universität München, 2019.
- [197] Raucher. In <https://spako.nl/de/unsere-maschinen/raucher/>. (Abruf am 2025-11-18); Asten: Spako Food Machinery, 2025.
- [198] Angel 2.0. Inzago: PONY S.p.a., 2025.
- [199] HOSENTOPPER MPT-DL. Inzago: PONY S.p.a., 2025.

22 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Übersicht der für die Papierfabrik relevanten Hoch- und Höchstspannungsleitungen.	12
Abbildung 3-1:	Endenergieverbrauch in TWh nach Energieträgern ausgewählter Branchen in Sachsen (2022). [40]	24
Abbildung 3-2:	Charakterisierung der Fokusbranchen (2022).	25
Abbildung 4-1:	Aufbau der Branchen- und Handwerkssteckbriefe.	26
Abbildung 4-2:	Hierarchie der Technology Readiness Levels (TRL). Links übergeordnete Beschreibung der Phase, rechts Beschreibung der einzelnen Level. Eigene Darstellung nach [183].	28
Abbildung 4-3:	Ampelfarben zur indikativen Bewertung der Transformationstechnologien.	28
Abbildung 5-1:	Stromeinsparpotenzial verschiedener branchenübergreifender Technologien basierend auf zwischen 2018 und 2020 von der FfE durchgeführten Energieaudits [53].	31
Abbildung 6-1:	Entwicklung des EEV zwischen 2018 und 2022 der Branchen „Glas“ nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.	44
Abbildung 6-2:	Emissionen und frei zugeteilte Zertifikate der sächsischen Glas- (oben) und Keramikindustrie (unten).	44
Abbildung 6-3:	Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen Glasbranche seit 2020 [49].	45
Abbildung 6-4:	Energieintensive Prozesse/-schritte in der Glasindustrie im Status quo.	46
Abbildung 6-5:	Energieintensive Prozesse/-schritte in der Keramikindustrie im Status quo.	46
Abbildung 6-6:	Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen Glas- & Keramikindustrie.	47
Abbildung 7-1:	Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branche „Papier“ nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.	51
Abbildung 7-2:	Emissionen und frei zugeteilte Zertifikate der sächsischen Papierindustrie	51
Abbildung 7-3:	Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen Papierbranche seit 2020.	52
Abbildung 7-4:	Energieintensive Prozesse/-schritte in der Papierproduktion im Status quo [20].	53
Abbildung 7-5:	Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen Papierindustrie.	54
Abbildung 8-1:	Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branchen „DV-Geräte & Uhren“ nach eingesetzten Energieträgern.	59
Abbildung 8-2:	Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen DV-Geräte und Uhrenbranche seit 2020 [49].	59
Abbildung 8-3:	Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen Glas- & Keramikindustrie.	60
Abbildung 9-1:	Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branche „Textilien“ nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.	63
Abbildung 9-2:	Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen Textilbranche seit 2020 [49].	63
Abbildung 9-3:	Energieintensive Prozesse/-schritte in der Herstellung technischer Textilien im Status quo [98], [102].	64
Abbildung 9-4:	Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen Papierindustrie.	66
Abbildung 10-1:	Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branchen „Grundstoffchemie“ (oben, in TWh), „Chemie II“ (mittig, in GWh) und „Pharmazeutische Erzeugnisse“ (unten, in GWh) nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.	71

Abbildung 10-2:	Emissionen und frei zugeteilte Zertifikate der sächsischen Hersteller von chemischen Erzeugnissen.	71
Abbildung 10-3:	Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen Chemie-(oben) und Pharmabranche (unten) seit 2020 [49].	73
Abbildung 10-4:	Energieintensive Prozesse/-schritte in der Wertschöpfungskette chemischer Erzeugnisse im Status quo.	74
Abbildung 10-5:	Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung des sächsischen Industriezweigs Chemie II & Pharma.	76
Abbildung 11-1:	Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branche „Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren“ nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.	82
Abbildung 11-2:	Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen Gummi- und Kunststoffbranche seit 2020 [49].	83
Abbildung 11-3:	Energieintensive Prozessschritte beim Spritzgießen in der Kunststoffindustrie nach [122].	84
Abbildung 11-4:	Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen Gummi- und Kunststoffindustrie.	85
Abbildung 12-1:	Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branche „Herstellung von Metallerzeugnissen“ nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.	90
Abbildung 12-2:	Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen metallverarbeitenden Industrie seit 2020 [49].	91
Abbildung 12-3:	Energieintensive Prozessschritte beim Einsatzhärten und Vergüten. Die angegebenen Temperaturen stellen exemplarische Werte dar [56].	92
Abbildung 12-4:	Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen metallverarbeitenden Industrie.	94
Abbildung 13-1:	Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branche „Maschinenbau“ nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.	98
Abbildung 13-2:	Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen Maschinenbau-Industrie seit 2020 [49].	99
Abbildung 13-3:	Energieintensive Prozessschritte beim Lackieren nach /VDI-02 25P, UBA-06 07/.	100
Abbildung 13-4:	Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen Maschinenbauer.	101
Abbildung 14-1:	Entwicklung des EEV zwischen 2012 und 2022 der Branchen „Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln“ (oben) und „Getränkeherstellung“ (unten) nach eingesetzten Energieträgern auf Basis der sächsischen Energiebilanzen.	106
Abbildung 14-2:	Anzahl der Betriebe und Beschäftigten (jeweils für Betriebe mit ≥ 50 Beschäftigten) in der sächsischen Ernährungsbranche seit 2020. „Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln“ und „Getränkeherstellung“ [49].	107
Abbildung 14-3:	Energieintensive Prozessschritte in der Milchpulverherstellung [56].	108
Abbildung 14-4:	Abschätzung der energieträgerscharfen Endenergieverbräuche sowie der gesamten Anschlussleistungen für Strom bzw. Wasserstoff bei Dekarbonisierung der sächsischen Ernährungsindustrie.	110
Abbildung 15-1:	Anzahl der Betriebe (rechtliche Einheiten) und Beschäftigten im sächsischen Gewerbebranchen Bäcker von 2020 bis 2023 [36].	114
Abbildung 16-1:	Anzahl der Betriebe (rechtliche Einheiten) und Beschäftigten im sächsischen Gewerbebranchen Fleischer von 2020 bis 2023 [36].	118
Abbildung 17-1:	Anzahl der Betriebe (rechtliche Einheiten) und Beschäftigten im sächsischen Gewerbebranchen Textilreiniger von 2020 bis 2023 [36].	124
Abbildung 17-2:	Energieintensive Prozesse/-schritte in der Prozesskette des Nassreinigens im Status quo [168], [176].	125
Abbildung 18-1:	Grundannahmen bzgl. Energieträgerpreise (oben) und Netzentgelten bzw. BEHG/ETS-II (unten) für die folgenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen.	129

Abbildung 18-2:	Kapitalwertberechnung bei Ersatz eines Gaskessels durch Wärmepumpen in Abhängigkeit des angesetzten Kalkulationszinssatzes (oben: 10,50 %; mittig: 8.00 %, unten: 13,00 %).	130
Abbildung 18-3:	Kapitalwertberechnung bei Ersatz eines Gaskessels durch Wärmepumpen inkl. Förderung mit 8.000 VLS (oben) und 4.000 VLS (unten).	131
Abbildung 18-4:	Kapitalwertberechnung bei Ersatz eines Gas-Brennwertkessels durch eine Hochtemperatur-Wärmepumpe in Abhängigkeit des Investitionszeitpunktes (oben: 2025; unten: 2030).	132
Abbildung 18-5:	Kapitalwertberechnung bei Ersatz eines Gas-Brennwertkessels durch einen gleichwertigen Wasserstoffkessel bei verschiedenen Wasserstoffpreisen.	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abbildung 18-6:	Entwicklung der Wasserstoffpreise in einem optimistischeren Ziel- und einem pessimistischeren Trendszenario.	133

23 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Angenommene Volllaststunden basierend auf [8] und eigener Erfahrung für die Berechnung der Anschlussleistung je Branche in den Transformationsberechnungen.	29
Tabelle 4-2:	Parameter für die Abschätzung der aus der Transformation resultierenden Endenergiebedarfe. Der Elektrifizierungsgrad bezieht sich auf den bisher fossil gedeckten Anteil der Wärmeerzeugung. Über den COP werden sowohl Wärmepumpen als auch direkt elektrische Wärmeerzeugung abgedeckt.	29
Tabelle 5-1:	Branchenübergreifende Technologien und exemplarische Anwendungsbereiche dieser.	30
Tabelle 5-2:	Anwendungen mit direktem Brenn-/Kraftstoffverbrauch und zugehörige Transformationsmaßnahmen.	33
Tabelle 5-3:	Transformationstechnologien für Niedertemperaturwärme (< 150 °C). Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	35
Tabelle 5-4:	Transformationstechnologien für Mitteltemperaturwärme (150 °C – 500 °C). Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	38
Tabelle 5-5:	Transformationstechnologien für Hochtemperaturwärme (ab 500 °C). Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	40
Tabelle 5-6:	Transformationstechnologien für Mobilität. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	41
Tabelle 6-1:	Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte	43
Tabelle 6-2:	Kennzahlen der sächs. Glas- & Keramikbranche (2023) [49], [40], [83]	45
Tabelle 6-3:	Transformationstechnologien der Glasindustrie. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	48
Tabelle 6-4:	Transformationstechnologien der Keramikindustrie. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	49
Tabelle 7-1:	Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]	50
Tabelle 7-2:	Kennzahlen der sächs. Papierbranche (2023) [49], [40], [83]	51
Tabelle 7-3:	Transformationstechnologien der Papierindustrie (Elektrifizierung). Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	55
Tabelle 7-4:	Transformationstechnologien (Brennstoffwechsel) der Papierindustrie. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	56
Tabelle 7-5:	Transformationstechnologien (CO ₂ -Abscheidung) der Papierindustrie. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	57
Tabelle 8-1:	DV-Geräte: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte.	58

Tabelle 8-2:	Kennzahlen der sächs. DV-Geräte- & Uhrenbranche (2023) [49], [40], [83]...	59
Tabelle 9-1:	Textilien: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]	62
Tabelle 9-2:	Kennzahlen der sächs. Textilbranche (2023) [49], [40], [83]	63
Tabelle 9-3:	Transformationstechnologien der Textilindustrie. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	67
Tabelle 10-1:	Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]	69
Tabelle 10-2:	Kennzahlen der Branche Grundstoffchemie (WZ 20.1) in Sachsen (2023) [49], [40], [83]	72
Tabelle 10-3:	Kennzahlen der Branche Chemie II (WZ 20 ohne WZ 20.1) in Sachsen (2023) [49], [40], [83]	72
Tabelle 10-4:	Kennzahlen der sächs. pharmazeutischen Industrie (2023) [49], [40], [83].....	72
Tabelle 10-5:	Transformationstechnologien der chemischen Industrie: Elektrifizierung. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	77
Tabelle 10-6:	Transformationstechnologien der chemischen Industrie: Brennstoffwechsel. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	78
Tabelle 10-7:	Transformationstechnologien der chemischen Industrie: Kunststoffrecycling. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	79
Tabelle 10-8:	Transformationstechnologien der pharmazeutischen Industrie. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	80
Tabelle 11-1:	Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]	81
Tabelle 11-2:	Kennzahlen der sächs. Gummi- und Kunststoffbranche (2023) [49], [40], [83]	82
Tabelle 11-3:	Transformationstechnologien der Kunststoffindustrie. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	86
Tabelle 11-4:	Transformationstechnologien der Gummiindustrie: Elektrifizierung. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	87
Tabelle 11-5:	Transformationstechnologien der Gummiindustrie: Brennstoffwechsel. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	88
Tabelle 12-1:	Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]	89
Tabelle 12-2:	Kennzahlen der sächs. Metallverarbeiter (2023) [49], [40], [83]	91
Tabelle 12-3:	Transformationstechnologien der metallverarbeitenden Industrie: Brennstoffwechsel. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	95
Tabelle 12-4:	Transformationstechnologien der metallverarbeitenden Industrie: Elektrifizierung. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	96
Tabelle 13-1:	Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]	97
Tabelle 13-2:	Kennzahlen der sächs. Maschinenbaubranche (2023) [49], [40], [83]	98
Tabelle 13-3:	Transformationstechnologien des Maschinenbaus: Elektrifizierung. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an	

Unternehmensstandorten auf deren zukünftigen Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	102
Tabelle 13-4: Transformationstechnologien des Maschinenbaus: Brennstoffwechsel. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	103
Tabelle 14-1: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]	104
Tabelle 14-2: Kennzahlen der sächs. Ernährungsindustrie (2023) [49], [40], [83]	106
Tabelle 14-3: Transformationstechnologien der Ernährungsindustrie: Elektrifizierung. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	111
Tabelle 14-4: Transformationstechnologien der Ernährungsindustrie: Brennstoffwechsel. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	112
Tabelle 15-1: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]	113
Tabelle 15-2: Betrachtete Gewerbegruppen der Handwerksstatistiken (Nr. nach Handwerksordnung Stand 2021) / DESTATIS-23 22P/.....	113
Tabelle 15-3: Kennzahlen der sächs. Bäcker entsprechend der Handwerksstatistik (2023) [36]	114
Tabelle 15-4: Transformationstechnologien für Bäckereien. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	116
Tabelle 16-1: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]	117
Tabelle 16-2: Betrachtete Gewerbegruppen der Handwerksstatistiken (Nr. nach Handwerksordnung Stand 2021) [35]	117
Tabelle 16-3: Kennzahlen der sächsischer und Fleischer entsprechend der Handwerksstatistik (2023) [36]	118
Tabelle 16-4: Transformationstechnologien für Fleischer. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	120
Tabelle 16-5: Transformationstechnologien für Fleischer. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	121
Tabelle 17-1: Betrachtete Wirtschaftszweige (Nr. nach WZ-2008) und ausgewählte Produkte. [4]	122
Tabelle 17-2: Betrachtete Gewerbegruppen der Handwerksstatistiken (Nr. nach Handwerksordnung Stand 2021) [35]	122
Tabelle 17-3: Kennzahlen der sächs. Textilreiniger entsprechend der Handwerksstatistik (2023) [36]	123
Tabelle 17-4: Transformationstechnologien für Textilreiniger. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	126
Tabelle 17-5: Transformationstechnologien für Textilreiniger. Ampelsystem: niedrige (rot), mittlere (gelb) oder hohe Wahrscheinlichkeit (grün), dass die Technologie für eine Vielzahl an Unternehmensstandorten auf deren Dekarbonisierungspfad als wirtschaftliche Maßnahme in Frage kommt.	127
Tabelle 18-1: Berücksichtigte Kostenbestandteile in der Wirtschaftlichkeitsberechnung (als konstant angenommen).	129
Tabelle 18-2: Kennzahlen des Erdgaskessels im Vergleich zur Wärmepumpe.	129
Tabelle 18-3: Ergebnisse der Sensitivität bei Variation des Kalkulationszinssatzes.	130
Tabelle 18-4: Kennzahlen des Erdgas-Brennwertkessels im Vergleich zur Hochtemperaturwärmepumpe.	132
Tabelle 18-5: Kennzahlen des Erdgas-Brennwertkessels im Vergleich zum Wasserstoff-Brennwertkessel.	133
Tabelle 18-6: Zuordnung der Technologien zur Datengrundlage im „Technikkatalog Wärmeplanung“.	134
Tabelle A-0-1: Zuordnung der Fokusbranchen zu den zugehörigen Wirtschaftszweigen nach der WZ-2008 Klassifikation.....	175

Anhang

23.1 Branchenzuordnung

Tabelle A-0-1: Zuordnung der Fokusbranchen zu den zugehörigen Wirtschaftszweigen nach der WZ-2008 Klassifikation.

Branche	Inkludierte Wirtschaftszweige (WZ-2008, 2-Steller)	WZ-2008 Klassifikation
Ernährung	Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln	10
	Getränkeherstellung	11
Textilien	Herstellung von Textilien	13
Holz	Herstellung von Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren (ohne Möbel)	16
Papier	Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus	17
Chemie II	Herstellung von chemischen Erzeugnissen	20 (ohne 20.1)
	Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen	21
Kunststoff	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren	22
Glas	Herstellung v. Glas & Glaswaren, Keramik, Verarbeitung v. Steinen & Erden	23
Metall II	Herstellung von Metallerzeugnissen	25
DV-Geräte	Herst. v. Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen & opt. Erzeugnissen	26
El. Ausrüstung	Herstellung von elektrischen Ausrüstungen	27
Maschinenbau	Maschinenbau	28
KFZ	Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen	29
Fahrzeugbau	Sonstiger Fahrzeugbau	30
Sonstiges	Herstellung von Bekleidung	14
	H. v. Druckerzeugn.; Vervielfältigung v. bespielten Ton-, Bild- & Datenträgern	18
	Herstellung von Möbeln	31
	Herstellung von sonstigen Waren	32
	Reparatur und Installation von Maschinen & Ausrüstung	33

Herausgeber:

Sächsisches Staatsministerium
für Wirtschaft, Arbeit, Energie und Klimaschutz
Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH (SAENA)

Redaktion:

Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FfE)

Projektpartner:

Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e. V. (IKEM)
An-Institut der Universität Greifswald

Projektleitung:

Uwe Kluge (SAENA)
Hannes Kracht (FfE)
Dr. Andrej Guminski (FfE)

Bearbeitung:

Andreas Fill (FfE), Aïcha Platzdasch (FfE), Dr. Anna Gruber (FfE)
Leandra Schulz (IKEM), Friederike Allolio (IKEM)

Redaktionsschluss:

16.02.2026

Bezug:

Download: www.publikationen.sachsen.de

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinnahme des Herausgebers zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.

Copyright

Diese Veröffentlichung ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die des Nachdruckes von Auszügen und der fotomechanischen Wiedergabe, sind dem Herausgeber vorbehalten.