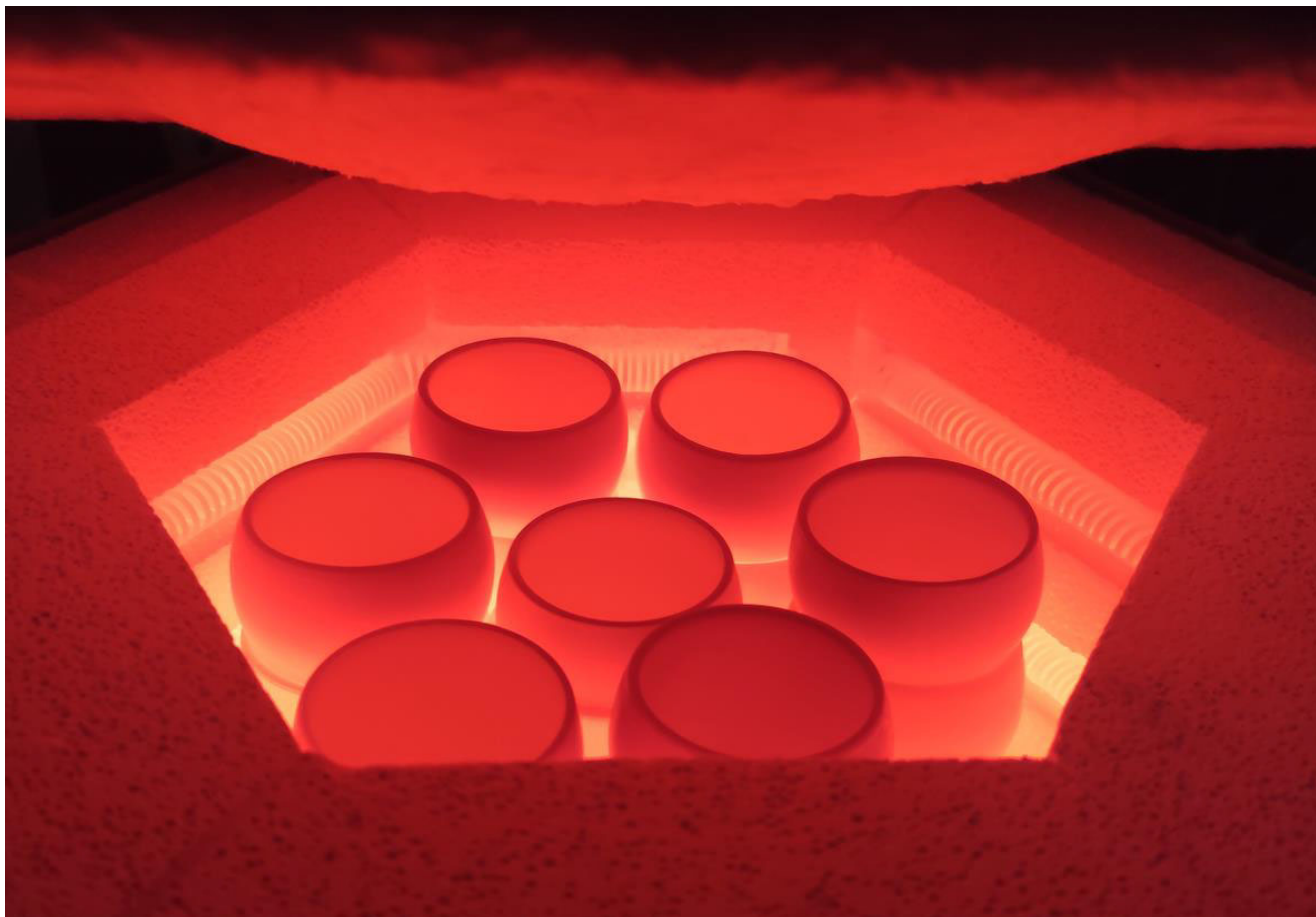


Studie

Dekarbonisierungspotenzial von Hochtemperatur-Prozesswärme durch Elektrifizierung

in der Schweiz



© iStock-1301402497

Projektnummer

B101411

Von

Dr. Kirsten Kubin
Purnima Kulkarni
Saskia Lengning
Dr. Fabian Muralter
Dr. Alexander Piégsa (Projektleitung)
Dr. Noha Saad
Aurel Wunsch

Im Auftrag des

Bundesamts für Energie (BFE)

Abschlussdatum

März 2025

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.
Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Das Unternehmen im Überblick

Prognos – wir geben Orientierung.

Wer heute die richtigen Entscheidungen für morgen treffen will, benötigt gesicherte Grundlagen. Prognos liefert sie – unabhängig, wissenschaftlich fundiert und praxisnah. Seit 1959 erarbeiten wir Analysen für Unternehmen, Verbände, Stiftungen und öffentliche Auftraggeber. Nah an ihrer Seite verschaffen wir unseren Kunden den nötigen Gestaltungsspielraum für die Zukunft – durch Forschung, Beratung und Begleitung. Die bewährten Modelle der Prognos AG liefern die Basis für belastbare Prognosen und Szenarien. Mit rund 180 Expertinnen und Experten ist das Unternehmen an neun Standorten vertreten: Basel, Berlin, Bremen, Brüssel, Düsseldorf, Freiburg, Hamburg, München und Stuttgart. Die Projektteams arbeiten interdisziplinär, verbinden Theorie und Praxis, Wissenschaft, Wirtschaft und Politik. Unser Ziel ist stets das eine: Ihnen einen Vorsprung zu verschaffen, im Wissen, im Wettbewerb, in der Zeit.

Geschäftsführer

Christian Böllhoff

Präsident des Verwaltungsrates

Dr. Jan Giller

Handelsregisternummer

CH-270.3.003.262-6

Mehrwertsteuernummer/UID

CH-107.308.511

Rechtsform

Aktiengesellschaft nach schweizerischem Recht; Sitz der Gesellschaft: Basel
Handelsregisternummer
CH-270.3.003.262-6

Gründungsjahr

1959

Arbeitssprachen

Deutsch, Englisch, Französisch

Hauptsitz

Prognos AG

St. Alban-Vorstadt 24
4052 Basel | Schweiz
Tel.: +41 61 3273-310
Fax: +41 61 3273-300

Prognos AG

Résidence Palace, Block C
Rue de la Loi 155
1040 Brüssel | Belgien
Tel: +32 280 89-947

Prognos AG

Hermannstrasse 13
(c/o WeWork)
20095 Hamburg | Deutschland
Tel.: +49 40 554 37 00-28

Weitere Standorte

Prognos AG

Goethestr. 85
10623 Berlin | Deutschland
Tel.: +49 30 5200 59-210
Fax: +49 30 5200 59-201

Prognos AG

Werdener Strasse 4
40227 Düsseldorf | Deutschland
Tel.: +49 211 913 16-110
Fax: +49 211 913 16-141

Prognos AG

Nymphenburger Str. 14
80335 München | Deutschland
Tel.: +49 89 954 1586-710
Fax: +49 89 954 1586-719

Prognos AG

Domshof 21
28195 Bremen | Deutschland
Tel.: +49 421 845 16-410
Fax: +49 421 845 16-428

Prognos AG

Heinrich-von-Stephan-Str. 17
79100 Freiburg | Deutschland
Tel.: +49 761 766 1164-810
Fax: +49 761 766 1164-820

Prognos AG

Eberhardstr. 12
70173 Stuttgart | Deutschland
Tel.: +49 711 3209-610
Fax: +49 711 3209-609

info@prognos.com | www.prognos.com | www.twitter.com/prognos_ag

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis		VI
Abbildungsverzeichnis		VIII
1	Übersicht und Fazit	1
2	Definition und Status quo der Hochtemperatur-Prozesswärme- und der Dampf-Nachfrage	4
2.1	Definition der Prozesswärmeniveaus	4
2.2	Prozesswärmebedarfe in der Industrie	5
2.2.1	Prozesswärmebedarfe in der Schweizer Industrie	5
2.2.2	Vergleich zu Prozesswärmebedarfen aus der Literatur	9
3	Potenzial zur Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme und Dampf	14
3.1	Technologien zur Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme und Dampf	14
3.1.1	Technologien zur Bereitstellung von Hochtemperatur-Prozesswärme	14
3.1.2	Technologien zur Bereitstellung von Dampf	20
3.2	Modellierung der Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme und Dampf	22
3.3	Ergebnisse der Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme und Dampf	24
3.4	Befragung der Industrie zur Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme	32
4	Auswirkungen einer umfassenden Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme auf das Stromsystem	38
4.1	Stromnachfrage	38
4.2	Großhandelsstrompreise	40
4.3	Importsaldo und Emissionen	41
4.4	Einordnung	42

5	Einordnung und Empfehlungen	43
5.1	Gesetzes- und Förderlandschaft	43
5.1.1	Bundesebene – Gesetze und Förderprogramme	45
5.1.2	Regionale Programme – Kantonale und kommunale Unterstützung	47
5.1.3	Wärmestrategie 2050	48
5.1.4	Mögliche Lücken in der Förderlandschaft hinsichtlich der Elektrifizierung von HT-PW	49
5.2	Einordnung der Elektrifizierungstechnologien	49
5.2.1	Vier-Stufen-Modell zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme	49
5.2.2	Systemisch-technische Einordnung der betrachteten Elektrifizierungstechnologien	52
5.3	Handlungsempfehlungen	53
	Anhang – Technologiesteckbriefe	56
	Anhang – Leitfäden für Experten-Gespräche	80
	Abkürzungsverzeichnis	IX
	Quellenverzeichnis	XI
	Impressum	XIV

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Prozesswärmebedarf in der Industrie	7
Tabelle 2:	Hochtemperatur-Prozesse	8
Tabelle 3:	Dampf-Prozesse	9
Tabelle 4:	Differenz beim Brennstoffverbrauch nach Branchen	29
Tabelle 5:	Differenz beim Elektrizitätsverbrauch nach Branchen	30
Tabelle 6:	Differenz bei den Treibhausgasemissionen nach Branchen	31
Tabelle 7:	Interviewanfragen und durchgeführte Interviews	32
Tabelle 8:	Übersicht der Gesetze und Förderprogramme für Unternehmen	43
Tabelle 9:	Technologiesteckbrief direkte Widerstandsheizung nach Branchen	56
Tabelle 10:	Technologiesteckbrief indirekte Widerstandserwärmung nach Branchen	59
Tabelle 11:	Technologiesteckbrief Induktion (Wechselstrom) nach Branchen	62
Tabelle 12:	Technologiesteckbrief Plasma nach Branchen	64
Tabelle 13:	Technologiesteckbrief zu weiteren Technologien (knapp) – Teil 1/2	66
Tabelle 14:	Technologiesteckbrief zu weiteren Technologien (knapp) – Teil 2/2	68
Tabelle 15:	Technologiesteckbrief Elektrodenkessel nach Branchen	70
Tabelle 16:	Technologiesteckbrief Kompressionswärmepumpe nach Branchen	72
Tabelle 17:	Technologiesteckbrief Hybride Dampferzeugung (Wärmepumpe und Elektrodenkessel)	74
Tabelle 18:	Aggregierter Technologiesteckbrief für die HT-PW-Elektrifizierung nach Branchen	76

Tabelle 19:

Aggregierter Technologiesteckbrief Elektrifizierung der
Dampferzeugung nach Branchen

78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verwendungszweckstruktur beim Endenergieverbrauch in der Industrie	6
Abbildung 2:	Verteilung des Prozesswärmebedarfs auf Temperaturniveaus je Branche	11
Abbildung 3:	Temperaturbereiche von Elektrifizierungstechnologien (HT-PW)	19
Abbildung 4:	Temperaturbereiche von elektrischen Dampferzeugungstechnologien	20
Abbildung 5:	Treibhausgasemissionen und Endenergieverbrauch	24
Abbildung 6:	Brennstoff- und Elektrizitätsverbrauch	25
Abbildung 7:	Hemmnisse einer HT-PW-Elektrifizierung	34
Abbildung 8:	Chancen einer HT-PW-Elektrifizierung	35
Abbildung 9:	Kriterien zur Umsetzung einer HT-PW-Elektrifizierung	36
Abbildung 10:	Stromnachfrage	39
Abbildung 11:	Grosshandelsstrompreise	40
Abbildung 12:	Importsaldo	42

1 Übersicht und Fazit

Motivation

Anfang 2023 hat das Bundesamt für Energie (BFE) die «Wärmestrategie 2050» veröffentlicht [BFE 2023]. Diese Strategie formuliert das Ziel eines CO₂-neutralen Wärmesektors bis zum Jahr 2050. Die Wärmestrategie lehnt sich an die Energieperspektiven 2050+ des BFE aus dem Jahr 2021 an [BFE 2021]. Um das Ziel der Netto-Null-CO₂-Emissionen bis 2050 in der Schweiz zu erreichen, ist eine vollständige Dekarbonisierung des gesamten Wärmesektors eine notwendige Voraussetzung. Das bedeutet, dass jegliche Wärmebereitstellung, sei es für Heizungszwecke oder industrielle Prozesswärme, ohne den Einsatz fossiler Energieträger erfolgen muss.

Es gibt bereits heute Alternativen zu fossilen Brennstoffen, die vielfach marktreif verfügbar sind. Die neuesten Wärmepumpen können Temperaturen von bis zu 200 °C erreichen und nutzen dafür bestehende Abwärmequellen oder Wärmequellen aus der Umwelt. Solarthermie wiederum wandelt Sonneneinstrahlung direkt in Nutzwärme von bis zu 140 °C, und im Falle der konzentrierenden Solarthermie gar bis 400 °C um.

In vielen Fällen gestaltet sich die Substitution fossiler Energieträger hier herausfordernd. Der Einsatz von Biomethan, Wasserstoff und anderen synthetischen Brennstoffen sind Alternativen zu den heute eingesetzten fossilen Brennstoffen. Dabei würde eine notwendige Anlagenumstellung minimiert und es könnten teils auch bereits existierende Infrastrukturen (z. B. das Gasnetz) genutzt werden. Eine direkte Elektrifizierung hingegen ist technisch für die meisten Prozesse theoretisch realisierbar, allerdings erfordert dies oft signifikante Änderungen an den Produktionsanlagen und -prozessen. Zudem sind Auswirkungen auf das Stromsystem zu erwarten, wenn Produktionsstätten ihre Hochtemperaturwärme massiv elektrifizieren. In dieser Studie liegt der Fokus auf der Untersuchung der Elektrifizierung der industriellen Hochtemperatur-Prozesswärme sowie der Dampfbereitstellung.

Das Ziel dieser Studie ist es, das Potenzial sowie die Vorteile und Risiken der Elektrifizierung von Hochtemperaturwärme in der Schweizer Industrie zu identifizieren.

Zusammenfassung

Kapitel 2 nimmt eine Bestandsaufnahme der Hochtemperatur-Prozesswärme in der Schweizer Industrie vor und definiert sie als Prozesswärme ≥ 400 °C. Weiter wird anhand des Industriemodells der Prognos berechnet, dass die 19 abgebildeten Prozesse in der Industrie im Mittel der Jahre 2015 bis 2023 insgesamt 151 PJ / 42 TWh verbrauchen, davon entfallen 85 PJ / 24 TWh (56 %) auf die Prozesswärme, davon wiederum 53 PJ / 15 TWh (62 %) auf die Hochtemperatur-Prozesswärme und davon zuletzt 45 PJ / 13 TWh (85 %) auf Brennstoffe. HT-PW-Prozesse emittieren 2'300 kt CO₂e, das sind 57 % der gesamten 4'050 kt CO₂e, die der Industriesektor durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen emittiert. Zur Validierung der Modellannahmen werden zudem die relativen Verteilungen der branchenspezifischen Prozesswärmemengen über definierte Temperaturniveaus mit denen aus der Literatur verglichen.

Kapitel 3 führt die Technologien auf, denen gemäss der ausgewerteten Literatur relevantes bzw. gerade kein relevantes Potenzial für die Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme

zugeschrieben wird. Detaillierte Technologiesteckbriefe dazu finden sich im Anhang. Anhand zweier Szenarien, einem Business-as-usual-Szenario und einem mit maximaler Elektrifizierung der HT-PW sowie der Dampfbereitstellung unter Wahrung der technischen Umsetzbarkeiten und der Investitionszyklen, wird der (maximale) Effekt dieser Elektrifizierung bestimmt: Anstieg des Stromverbrauches um rund 20 PJ / 6 TWh (+40 %) sowie Rückgang des Brennstoffverbrauchs (exklusive erneuerbarer und leitungsgebundener Wärme) um 27 PJ / 8 TWh (-44 %) und der Treibhausgas-Emissionen um 1'200 kt CO₂e (-54 %). Dabei tragen die Elektrifizierung der HT-PW und der Dampfbereitstellung je etwa die Hälfte zu den THG-Einsparungen bei.

Die im Rahmen der Studie durchgeführten ExpertInnen-Interviews zur qualitativen Einschätzung möglicher HT-PW-Elektrifizierungsoptionen werden am Ende des zweiten Kapitels zusammengefasst. Die Unternehmen äussern die damit zusammenhängenden Unwägbarkeiten, wie die Energie- und Stromversorgungssicherheit, Einfluss auf Strompreise und Kapitalkosten, sowie Hindernisse, wie die auch nach einer Elektrifizierung verbleibenden Prozessemissionen und fehlende Förderprogramme. Dementsprechend haben die Unternehmen derzeit keine konkreten Umsetzungspläne zur HT-PW-Elektrifizierung.

Kapitel 4 beschreibt die Auswirkungen einer umfassenden Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme und der Dampferzeugung auf das Schweizer Stromsystem. Die HT-PW-Elektrifizierung hat geringe Auswirkungen auf das Stromsystem, allerdings erhöht sich die Importabhängigkeit. Es kann politisch und gesellschaftlich wünschenswert sein, den Mehrbedarf durch inländische Erzeugungskapazitäten auszugleichen, um die Resilienz zu erhöhen.

Eine kosteneffizientere Maßnahme, um das gleiche Niveau an Versorgungssicherheit und Unabhängigkeit sicherzustellen, ist die Flexibilisierung des zusätzlichen Strombedarfs: In Engpasssituationen könnte der Bedarf zeitlich verschoben werden oder es könnten bivalente Anlagen auf speicherbare Energieträger umstellen.

Kapitel 5 fasst alle für Unternehmen relevanten Gesetze und Förderprogramme auf Bundes- und regionaler Ebene sowie deren Bezug zur Elektrifizierung zusammen. Die bestehenden Programme bieten Unternehmen umfangreiche Fördermöglichkeiten, um ihre Energieeffizienz zu steigern, den Stromverbrauch zu senken und nachhaltigere – darunter auch elektrifizierte – Produktionsmethoden zu etablieren. Eine gezielte Förderung der Elektrifizierung von Prozesswärme existiert nicht.

Weiter wird eine kohärente Gesamtstrategie zur Dekarbonisierung von Prozesswärme anhand eines vierstufigen Modells beschrieben: Prioritär ist die Steigerung der Energie- und Exergieeffizienz. Dieser folgt die Erschliessung erneuerbarer Wärmequellen wie Solar- oder Geothermie. Danach greifen Alternativtechnologien der Prozesswärmebereitstellung, darunter insbesondere die (direkte) Elektrifizierung. Erst als vierte und letzte Option folgt die Nutzung alternativer Brennstoffe, wie Biomasse, Abfälle oder synthetische Energieträger (PtX), oder auch in bestimmten Branchen die Kohlenstoffabscheidung.

Bei der systemisch-technischen Einordnung der Dampferzeugung mittels Kompressionswärmepumpe und Elektrodenkessel kann erwartet werden, dass beide Technologien voraussichtlich noch vor 2045 die konventionelle Dampferzeugung vollständig verdrängen. Dies begründet sich mit ihrer jeweils hohen Integrationsfähigkeit in bestehende Dampfinfrastrukturen. Auch in den Branchen Glas, alle Metalle, Maschinenbau und Bau ist eine HT-PW-Elektrifizierung bis 2045 technisch wahrscheinlich. Dies liegt an ihren Vorteilen (höhere Energieeffizienz, bessere Regelbarkeit, keinerlei Abgase) sowie der angenommenen Präferenz einer direkten Elektrifizierung noch vor alternativen Brennstoffen. Die Zementindustrie hingegen weist hohe CO₂-Emissionen

aufgrund der Kalksteinentsäuerung auf, weshalb eine direkte Elektrifizierung hier keine Option zur vollständigen Dekarbonisierung der Produktionsverfahren darstellt. Wahrscheinlicher ist stattdessen der verstärkte Einsatz von Sekundärbrennstoffen in Kombination mit Kohlenstoffabscheidung.

Fazit

- Die Modellierung hat Elektrifizierungstechnologien identifiziert, die aus systemisch-technischer Sicht einen grossen Hebel zur Dekarbonisierung der Produktionsprozesse in der Schweizer Industrie versprechen. Insgesamt können bei einem breiten Einsatz dieser Technologien THG-Emissionen von rund 1.2 Mt CO_{2e} in der Schweizer Industrie eingespart werden
- Relevante Elektrifizierungstechnologien sind die (Hochtemperatur-)Wärmepumpe und der Elektrodenkessel zur Dampferzeugung in den Branchen Nahrung, Papier und Chemie/Pharma, die direkte und indirekte Widerstandsheizung in der Glasherstellung, sowie Wechselstrom-Induktionsofen und indirekte Widerstandsheizung für alle Branchen der Metallherzeugung und -bearbeitung (Eisen/Stahl, Aluminium, Kupfer).
- Die Auswirkungen einer HT-PW-Elektrifizierung auf das Stromsystem sind gering, können jedoch die Importabhängigkeit erhöhen, falls keine zusätzlichen Stromerzeugungskapazitäten im Inland geschaffen werden. Eine Flexibilisierung der Strombedarfe der Industrie kann zur Netzstabilisierung beitragen.
- Eine direkte Elektrifizierung von Produktionsverfahren wird mit den bestehenden Förderprogrammen kaum adressiert. Instrumente im Rahmen des Klima- und Innovationsgesetzes sollen diese Förderlücke schliessen. Eine solche Technologieförderung zielt darauf ab, erste Anlagen sowie deren Integration in den bestehenden Produktionsablauf zu unterstützen, um den Einsatz dieser Technologien in der Breite anzustossen.
- Vorlagen für mögliche Förderansätze liefern bereits bestehende Programme aus anderen Staaten, die eine Elektrifizierung industrieller Prozesswärme adressieren. Hier lohnt sich ein vergleichender Blick auf Instrumententyp und -design, Fördergegenstand, Finanzierungsvolumen und -bedingungen sowie Wirkungsabschätzungen (sofern vorhanden), um einen für die Schweizer Situation passgenauen Förderansatz zu eruiieren.
- Der Förderansatz sollte nicht nur die CAPEX, sondern auch die OPEX berücksichtigen. Letztere stellen für den Wechsel auf Elektrifizierungstechnologien eine große Hürde dar, denn hierbei ist im Wesentlichen das Verhältnis von Strom- zu Gaspreis in Relation zur Effizienzverbesserung entscheidend für die Wirtschaftlichkeit einer elektrischen Anlage. Eine Verschärfung der bestehenden Gesetze (KIG, EnG, CO₂-Gesetz, u. a.) wäre hier ebenfalls zielführend.

2 Definition und Status quo der Hochtemperatur-Prozesswärme- und der Dampf-Nachfrage

In diesem Kapitel wird eine Bestandsaufnahme der Hochtemperatur-Prozesswärme (HT-PW) in der Schweizer Industrie vorgenommen. Zum einen wird der Begriff der «Hochtemperatur-Prozesswärme» definiert, bzw. ab welchem Temperaturniveau von Hochtemperatur gesprochen werden kann. Hierfür dient eine Recherche einschlägiger Literatur. Zum anderen wird eruiert, welche Branchen der Schweizer Industrie derzeit Hochtemperatur erfordern. Differenziert wird dabei, wieviel Endenergie pro Branche für die Erzeugung von Hochtemperaturwärme aufgewandt wird und wieviel Treibhausgasemissionen daraus resultieren. Hierfür wird auf Vorarbeiten der Prognos aufgesetzt bzw. das etablierte Industriemodell der Prognos (Prognos Industry Developer for Energy – *prIDE*) genutzt. Zuvorderst soll der Begriff «Prozesswärme» definiert werden:

i

Prozesswärme

ist diejenige Wärme, die für bestimmte technische Prozesse zur Herstellung, Weiterverarbeitung oder Veredelung von Produkten benötigt wird. Beispiele für solche Prozesse sind Trocknen von Papier, Schmelzen von Eisen und Vulkanisieren von Gummi sowie auch thermochemische Prozesse. Nicht gemeint ist in diesem Zusammenhang Wärme in Form von warmem Wasser zur Nutzung in Sanitärbereichen oder zu Heizzwecken in Gebäuden [in4c 2022].

2.1 Definition der Prozesswärmeniveaus

Die Einteilung der Prozesswärme in unterschiedliche Temperaturniveaus ist in der Industrie nicht einheitlich geregelt. Es gibt keine klare Definition für den Begriff «Hochtemperatur», da er je nach Anwendung und Branche unterschiedlich interpretiert wird. Eine mögliche Einteilung erfolgt nach den Wärmeträgermedien, die zur Übertragung der Wärme genutzt werden. So wird beispielsweise Heisswasser bis zu einer Temperatur von 100 °C eingesetzt, Wasserdampf oder Thermoöle von 100 bis 300 °C und für Temperaturen über 400 °C werden Salzschnmelzen oder flüssige Metalle genutzt.

Eine andere Möglichkeit der Einteilung erfolgt anhand der spezifischen Wärmeniveaus, die bestimmte Branchen oder Prozesse benötigen. So wird im Handbuch methodischer Grundfragen zur Masterplan-Erstellung [SIJ 2016] das Spektrum für industrielle Prozesswärme mit bis weit über 1000 Grad Celsius angegeben. Für den Hochtemperaturbereich in Europa werden Temperaturen über 500 Grad Celsius definiert, wie sie beispielsweise in Prozessen der chemischen Industrie, der Stahlindustrie oder bei der Zementherstellung benötigt werden.

[ifeu 2010] benennt für die Verwendung von Wärme in industriellen Prozessen folgende drei Temperaturniveaus:

- **Niedertemperaturbereich:** Zu diesem Bereich zählen alle Prozesse für Temperaturen unter 100 °C, und damit hauptsächlich Prozesse zur Warmwasserbereitung zum Waschen und zur Nahrungsmittelproduktion. Der Raumwärmebedarf der Industrie gehört zwar nicht zur Prozesswärme, fällt aber auch in diesen Temperaturbereich. Für die Nutzung erneuerbarer Energiequellen und insbesondere der Solarthermie ist dieses Temperaturniveau optimal geeignet.
- **Mittlerer Temperaturbereich:** Hierzu zählen alle Prozesse die zwischen einem Temperaturniveau von 100 und 400 bis 500 °C liegen. Die Wärme wird zumeist mittels Dampfes durch örtlich installierte Heizsysteme bereitgestellt. Um das Potenzial solarer Prozesswärme abschätzen zu können, muss dieser Temperaturbereich weiter unterteilt werden.
- **Hoher Temperaturbereich:** Temperaturen über 400 bis 500 °C werden beispielsweise für Herstellungsprozesse in der Keramik- und Metallindustrie benötigt. Die Bereitstellung dieser hohen Temperaturen stellt spezielle Anforderungen an die Heizsysteme. Oft wird hierzu auch Strom verwendet.

Darauf aufbauend definiert die vorliegende Studie **Prozesswärme ab Temperaturen von 400 °C als «Hochtemperatur»**. Ergänzend wird die Dampferzeugung berücksichtigt. Zwar weist Dampf als Energieträger anwendungsseitig üblicherweise geringere Temperaturen auf, jedoch kann die Dampferzeugung selbst durchaus bei höheren Temperaturen stattfinden.

2.2 Prozesswärmebedarfe in der Industrie

2.2.1 Prozesswärmebedarfe in der Schweizer Industrie

Die Bearbeitung der Frage nach dem Prozesswärmebedarf in der Schweizer Industrie setzt auf Vorarbeiten der Prognos im Rahmen der Energieperspektiven 2050+ [BFE 2021] sowie der Teilstatistik zum Energieverbrauch nach Verwendungszweck [BFE 2024b] auf, insbesondere auf dem in den vorgenannten Arbeiten verwendeten Industriemodell der Prognos (*prlDe*). Dieses Bottom-up-Modell untergliedert den industriellen Energieverbrauch nach Branche, Prozess, Verwendungszweck (darunter auch Energieeigenerzeugung in WKK-Anlagen, die jedoch nicht Gegenstand der Untersuchung sein soll) und Energieträger. Der Vorteil beim Einsatz dieses Modells ist, dass die HT-Prozesswärme nicht isoliert, sondern innerhalb des gesamten Industriesektors betrachtet wird. Dieses Vorgehen stabilisiert die getroffenen und zu treffenden Annahmen und Abschätzungen, da die Konsistenz zu den restlichen (komplementären) Verbrauchern (z. B. Niedertemperatur-Prozesswärme) sichergestellt sein muss. Details zu *prlDe*, insbesondere die Modellmechanik sowie die verwendete Datenbasis, sind in [BFE 2024a] zu finden.

Prozesswärme insgesamt

Von den insgesamt 151 PJ, die die Industrie im Mittel der Jahre 2015 bis 2023 an Endenergie verbraucht, entfallen rund 85 PJ (56 %) auf die Prozesswärme¹. Die relevantesten Temperaturbänder sind das mittlere von 400 – 800 °C mit einem Anteil von 35 % an der gesamten Prozesswärme, das höchste von über 1'200 °C (21 %) und das tiefste von unter 100 °C (20 %) (Abbildung 1). Für die Hochtemperatur-Prozesswärme (ab 400 °C) werden 53 PJ verbraucht, also grob zwei

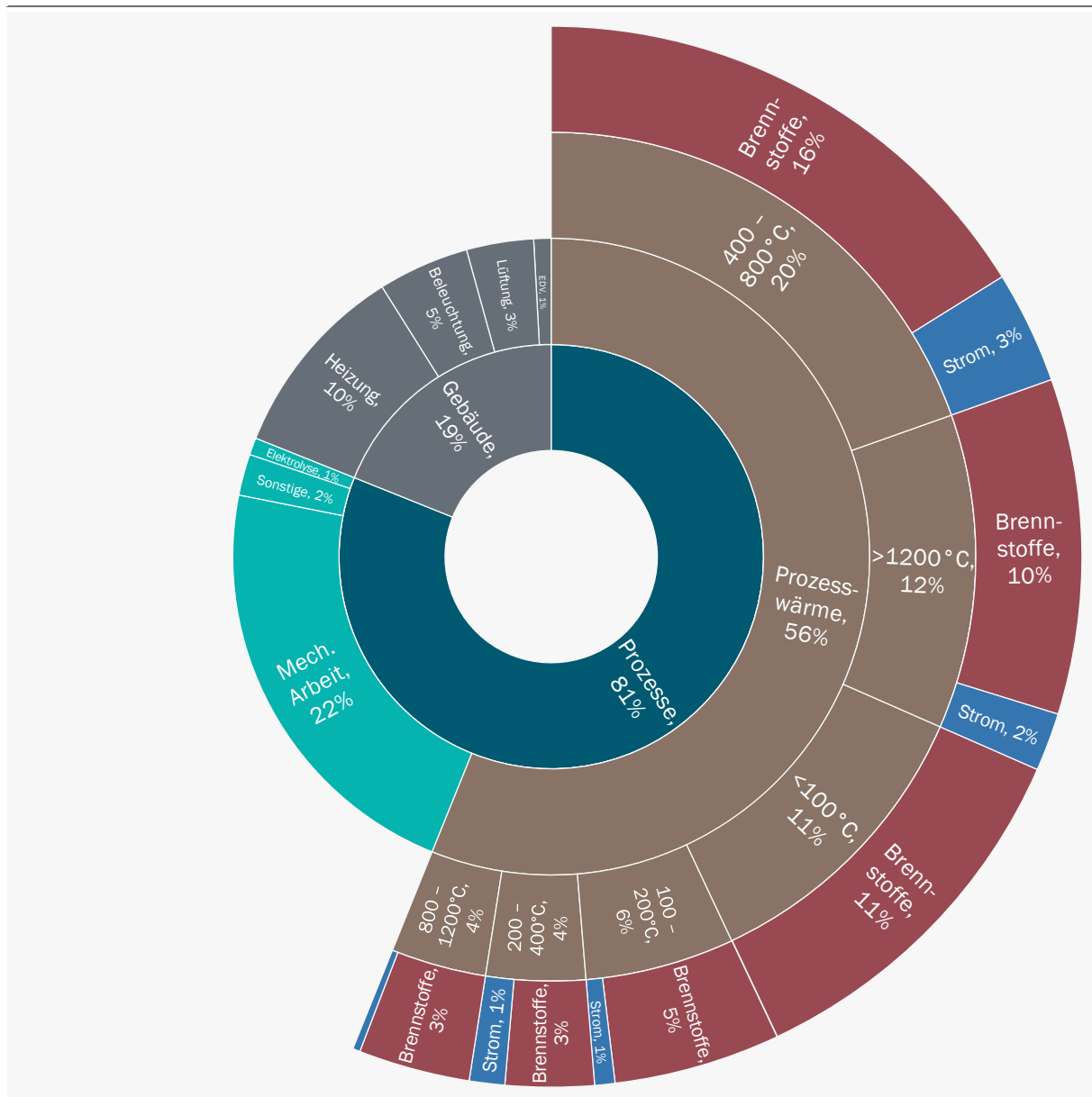
¹ Elektrolytische Verfahren werden nicht zur Prozesswärme gezählt. Auch wenn die Elektrolyse mit einer (z. T. erheblichen) Erwärmung des Mediums einhergeht, so ist sie als elektrochemisches Verfahren mit ihren speziellen Anwendungsfällen grundlegend von Verfahren zur reinen Erhitzung zu unterscheiden und stellt im Allgemeinen keine Alternative dazu dar. Elektrolyse wird darum im Weiteren nicht berücksichtigt.

Drittel der gesamten Prozesswärme und grob ein Drittel des gesamten Energiebedarfs (Tabelle 1).

Auffällig (aber naheliegend) ist der hohe Brennstoffeinsatz für die Prozesswärmebereitstellung: 87 % der gesamten Prozesswärme wird über Brennstoffe, und nur 13 % über Elektrizität erzeugt; ein ähnliches Verhältnis von 85:15 gilt für die Hochtemperatur-Prozesswärme. Dabei schwankt der Anteil der Elektrizität über die einzelnen Temperaturbänder zwischen 0 und 29 %. Für den gesamten Energieträgermix in der Industrie gilt (im Mittel der Jahre 2015 bis 2023) ein Brennstoffanteil von 60 % (die Verwendungszwecke Mechanische Arbeit, Elektrolyse, Lüftung, Beleuchtung und EDV sind komplett elektrifiziert).

Abbildung 1: Verwendungszweckstruktur beim Endenergieverbrauch in der Industrie

in Prozent; im Mittel der Jahre 2015 – 2023; Prozesswärme nach Temperaturniveaus und Brennstoffe/Strom



Eine detaillierte Auflistung der Endenergieverbräuche nach Branchen und Temperaturniveaus findet sich in Tabelle 1. Die Branchenaufteilung folgt dabei aus Gründen der Kompatibilität der Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs [BFE 2024b] mit dem Unterschied, dass sowohl die Mineralien als auch die Metalle aus jeweils zwei disjunkten Subbranchen bestehen. Dies ist für die Untersuchung einer möglichen Elektrifizierung der Hochtemperatur-Prozesswärme von Vorteil.

Tabelle 1: Prozesswärmebedarf in der Industrie

in PJ; im Mittel der Jahre 2015 – 2023; nach Branchen und Temperaturniveaus

Branche	Niedertemperatur				Hochtemperatur				gesamt anteilig	
	< 100 °C	100 – 200 °C	200 – 400 °C	Σ _{NT}	400 – 800 °C	800 – 1200 °C	> 1200 °C	Σ _{HT}		
Nahrung	0.3	8.5	-	8.8	-	-	-	-	8.8	10%
Textilien	0.9	-	-	0.9	-	-	-	-	0.9	1%
Papier	6.2	0.1	-	6.2	-	-	-	-	6.2	7%
Chemie	-	-	0.1	0.1	23.1	-	-	23.1	23.2	27%
Glas, Keramik	-	-	-	-	0.9	0.3	2.0	3.2	3.2	4%
Zement, Ziegel	-	-	0.9	0.9	2.5	0.2	9.2	11.9	12.8	15%
Eisen, Stahl	-	-	0.1	0.1	-	2.1	4.4	6.5	6.7	8%
NE-Metalle	-	-	-	-	3.1	-	-	3.1	3.1	4%
Metallerzeugnisse	-	0.0	-	0.0	-	2.1	-	2.1	2.1	3%
Elektrotechnik	-	-	2.3	2.3	-	-	-	-	2.3	3%
Maschinenbau	-	-	-	-	-	0.8	0.6	1.4	1.4	2%
Übrige Branchen	8.6	-	2.3	10.8	-	-	-	-	10.8	13%
Wasser, Abfall	0.9	-	-	0.9	-	-	-	-	0.9	1%
Bau	0.5	-	-	0.5	-	-	1.8	1.8	2.3	3%
gesamt	17.3	8.6	5.7	31.6	29.6	5.5	18.1	53.1	84.7	
<i>anteilig</i>	20%	10%	7%	37%	35%	6%	21%	63%		

Eigene Berechnungen

© Prognos 2025

Hochtemperatur-Prozesswärme

Aus Tabelle 1 geht hervor, dass nur einige Branchen einen Bedarf an HT-PW aufweisen, nämlich die Branchen Chemie, Mineralien (Glas, Keramik; Zement, Ziegel), Metalle (Eisen, Stahl; NE-Metalle; Metallerzeugnisse), der Maschinenbau sowie das Baugewerbe. Wird ebenfalls der Einsatz von Dampf berücksichtigt, so müssen zudem die Branchen Nahrung und Papier betrachtet werden.²

² Dampfanwendungen finden sich verstärkt auch bei den Prozessen der Chemie und Pharmazie, dort allerdings auf einem Temperaturniveau von ≥ 400 °C. Aus diesem Grund wird die Chemie bei den Hochtemperatur-Prozessen geführt und nicht bei den Dampf-Prozessen.

Tabelle 2: Hochtemperatur-Prozesse

Energie in PJ, energiebedingte THG in kt CO₂e; im Mittel der Jahre 2015 – 2023; nach Branchen und Prozessen

NOGA 2008	Branche	Prozess	Brennstoffe PJ	Strom PJ	THG kt CO ₂ e
2000, 2100	Chemie, Pharma		19.6	3.6	834
2010	Grundstoffchemikalien	Destillieren	2.1	0.6	92
2050	Sonstige Chemikalien	Destillieren, Trocknen	13.2	1.9	574
2100	Pharma	Destillieren, Trocknen	4.3	1.0	168
2300	Mineralien		14.6	0.5	835
2310	Glas	Schmelzen	1.9	0.1	114
2320, 2331, 2340	Keramik	Trocknen, Brennen	0.3	-	18
2332	Ziegel	Trocknen, Brennen	0.2	0.001	10
2351	Zement	Vorkalzinieren	2.5	-	144
2351	Zement	Fertigkalzinieren	9.2	-	520
2352	Kalk*	Erwärmen, Kalzinieren	?	?	?
2360	Erzeugnisse aus Mineralien	Trocknen, Brennen	0.5	0.4	29
2400, 2500	Metalle		7.9	3.8	465
2410	Eisen/Stahl (Erzeugung)	Erhitzen	2.1	-	128
2420, 2430, 2451, 2452	Eisen/Stahl (Bearbeitung)	Erhitzen, Giessen	2.0	2.4	121
2442	Aluminium	Erhitzen, Glühen	1.6	1.0	89
2441, 2443, 2444, 2445, 2453, 2454	Sonstige NE-Metalle	Schmelzen, Erhitzen	0.2	0.2	12
2500	Metallerzeugnisse	Vorerwärmen	1.2	0.1	73
2500	Metallerzeugnisse	Härten, Glühen	0.7	0.1	42
	Sonstige		2.9	0.3	175
2800, 2900, 3000	Maschinenbau	Giessen	0.5	0.1	23
2800, 2900, 3000	Maschinenbau	Vorerwärmen	0.4	-	18
2800, 2900, 3000	Maschinenbau	Härten, Glühen	0.3	0.1	14
4100, 4200, 4300	Bau	Schweissen, Erhitzen	1.8	-	121
gesamt			44.9	8.2	2309

*) Kalkbrennen wird im Industriemodell *nicht* abgebildet / es findet ebenfalls bei der Zuckerproduktion (NOGA 1081) statt

Eigene Darstellung

© Prognos 2025

Alle diese Branchen weisen individuelle Prozessschritte auf, die entweder Hochtemperatur-Prozesswärme oder Dampf (im mittleren Temperaturbereich) erfordern. Dabei verbrauchen die HT-

Prozesse 53 PJ (im Mittel der Jahre 2015–2023³) (Tabelle 2). Davon sind 15 % (8 PJ) Strom, dessen Anteil über die Branchen jedoch stark schwankt: von 3 % bei den Prozessen der Mineralien bis zu 33 % bei den Metallprozessen. Als Brennstoff dient überwiegend Erdgas, wobei insbesondere bei der Zementherstellung Sekundärbrennstoffe (Abfälle) zum Einsatz kommen. Insgesamt sind HT-Prozesse mit Treibhausgasemissionen (THG) von 2'300 kt CO_{2e} (Kohlenstoffdioxid-Äquivalente; effektiver Emissionsfaktor 51.4 t CO_{2e}/GJ) verbunden, das sind 57 % der insgesamt 4'050 kt CO_{2e}, die der Industriesektor durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen emittiert.

Dampf

Die Dampf-Prozesse verbrauchen 15 PJ (Tabelle 3), davon rund 1 PJ (6 %) Strom. Zu beachten ist, dass etwaige Dampf-Prozesse bei der Chemie und Pharmazie hier nicht berücksichtigt werden (Fussnote 2). Damit emittieren Dampf-Prozesse 530 kt CO_{2e}, was 13 % der verbrennungsbedingten Emissionen in der Industrie entspricht. Aufgrund des relativ hohen Biomasseanteils bei den Brennstoffen vor allem in der Papierindustrie ist der effektive Emissionsfaktor mit 38.9 t CO_{2e}/GJ merklich geringer als bei den HT-Prozessen.

Tabelle 3: Dampf-Prozesse

Energie in PJ, energiebedingte THG in kt CO_{2e}; im Mittel der Jahre 2015 – 2023; nach Branchen und Prozessen

NOGA2008	Branche	Prozess	Brennstoffe PJ	Strom PJ	THG kt CO _{2e}
1000, 1100	Nahrung		7.6	0.9	388
1000	Nahrung	Trocknen	6.7	0.7	342
1082	Schokolade	Trocknen	0.2	0.2	13
1105	Bier	Kochen	0.7	0.01	34
1700, 1800	Papier, Druck		6.1	-	144
1712	Papier	Trocknen	6.0	-	141
1712	Papier	TMP-Verfahren	0.1	-	1
1810	Druck	Trocknen	0.04	-	1
gesamt			13.7	0.9	532

Eigene Darstellung

© Prognos 2025

2.2.2 Vergleich zu Prozesswärmebedarfen aus der Literatur

Prozesswärme ist in den meisten Industriezweigen von grosser Bedeutung. Je nach Anwendung bzw. Prozess, zum Beispiel für Brennen, Trocknen oder Schmelzen bestimmter Materialien, werden unterschiedliche Temperaturniveaus für die Prozesswärme benötigt. Das Temperaturniveau beeinflusst den Prozesswärme- bzw. Energiebedarf massgeblich. Prozesswärme nimmt bei metall- und mineralienverarbeitenden Branchen, aber auch in der Papier- und Chemieindustrie, grossen Teil des Endenergieverbrauchs ein.

³ Diese Mittelung gilt für alle im Folgenden genannten Werte.

Zur Validierung der Modellannahmen werden in diesem Abschnitt die relativen Verteilungen der branchenspezifischen Prozesswärmemengen über definierte Temperaturniveaus mit denen aus verschiedenen Quellen verglichen [Agora+ISI 2024, Blesl 2015, FfE 2009, ifeu 2010, Naegler 2015]. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Quellen unterschiedliche Zeitpunkte (über die letzten 35 Jahre) und unterschiedliche Regionen (Deutschland, EU) erfassen. Ebenso unterscheiden sich z. T. verwendete Temperaturniveaus und Branchenabgrenzungen, was eine (lineare bzw. proportionale) Aufteilung oder Umrechnung auf das Zielraster des Industriemodells *prIDE* erforderlich macht.

Abbildung 2 visualisiert die relative Verteilung der Prozesswärme-Temperaturniveaus für die relevantesten Branchen. Dabei sind die Vergleichspunkte aus den ausgewerteten Quellen als Punkt in einem Scatterplot aufgetragen. Die Minimal-, Mittel- und Maximalwerte der Vergleichsdaten in jedem Temperaturniveau sind mit hellgrauen Linien markiert. Weiterhin hellblau markiert ist der Bereich positiver und negativer mittlerer Abweichung der Vergleichsdaten von ihrem Mittelwert in jedem Temperaturintervall. Die Modellannahmen sind als rote Quadrate hervorgehoben.

In der Nahrungsindustrie ist sowohl in den Vergleichsdaten als auch in den Modellergebnissen eine Dominanz von Temperaturen unter 200 °C zu verzeichnen. Temperaturen von über 200 °C kommen vor, sind jedoch sehr selten was die Annahme von 200 °C als pauschale Maximaltemperatur unterstützt. Weiter zeigen die Vergleichsdaten ausgeglichene Prozesswärmemengen zwischen den Temperaturniveaus <100 °C und 100–200 °C, während in den Modellergebnissen klar das Intervall 100–200 °C dominiert.

Die Papierindustrie zeigt einen ähnlichen Trend wie auch die Nahrungsindustrie, allerdings mit grösserer Streuung der Vergleichsdaten im Bereich unter 200 °C und signifikanteren Anteilen im Bereich über 200 °C. Diese Daten sprechen gegen die Annahme von 200 °C als pauschale Maximaltemperatur und der klaren Dominanz von Temperaturen unter 100 °C in den Modellergebnissen, wenn auch im Mittel 80 % der Prozesswärme unter 200 °C liegt.

Die Verteilung der Anteile in der Chemieindustrie ist bedeutend gleichmässiger als die Verteilung in den vorher diskutierten Sektoren mit signifikanten Anteilen in allen Temperaturniveaus von >100 °C bis 800–1'200 °C mit dem Trend zu höheren Temperaturen. Die Modellergebnisse spiegeln die gleichmässiger Verteilung in den Vergleichsdaten nicht wider, stattdessen wird lediglich Prozesswärme im Temperaturniveau 400–800 °C erwartet. Allerdings ist die Schweizer Chemieindustrie grundlegend anders strukturiert als diejenige in der EU und Deutschland mit einem deutlich höheren Anteil an Grundstoffen. Darum ist ein direkter Vergleich in dieser Branche kritisch zu sehen.

In der Glas- und Keramikindustrie dominieren hohe Temperaturen von über 1'200 °C mit deutlich geringeren, aber signifikanten, Anteilen ab 400 °C. Dieser Trend ist ebenfalls erkennbar in den Modellannahmen.

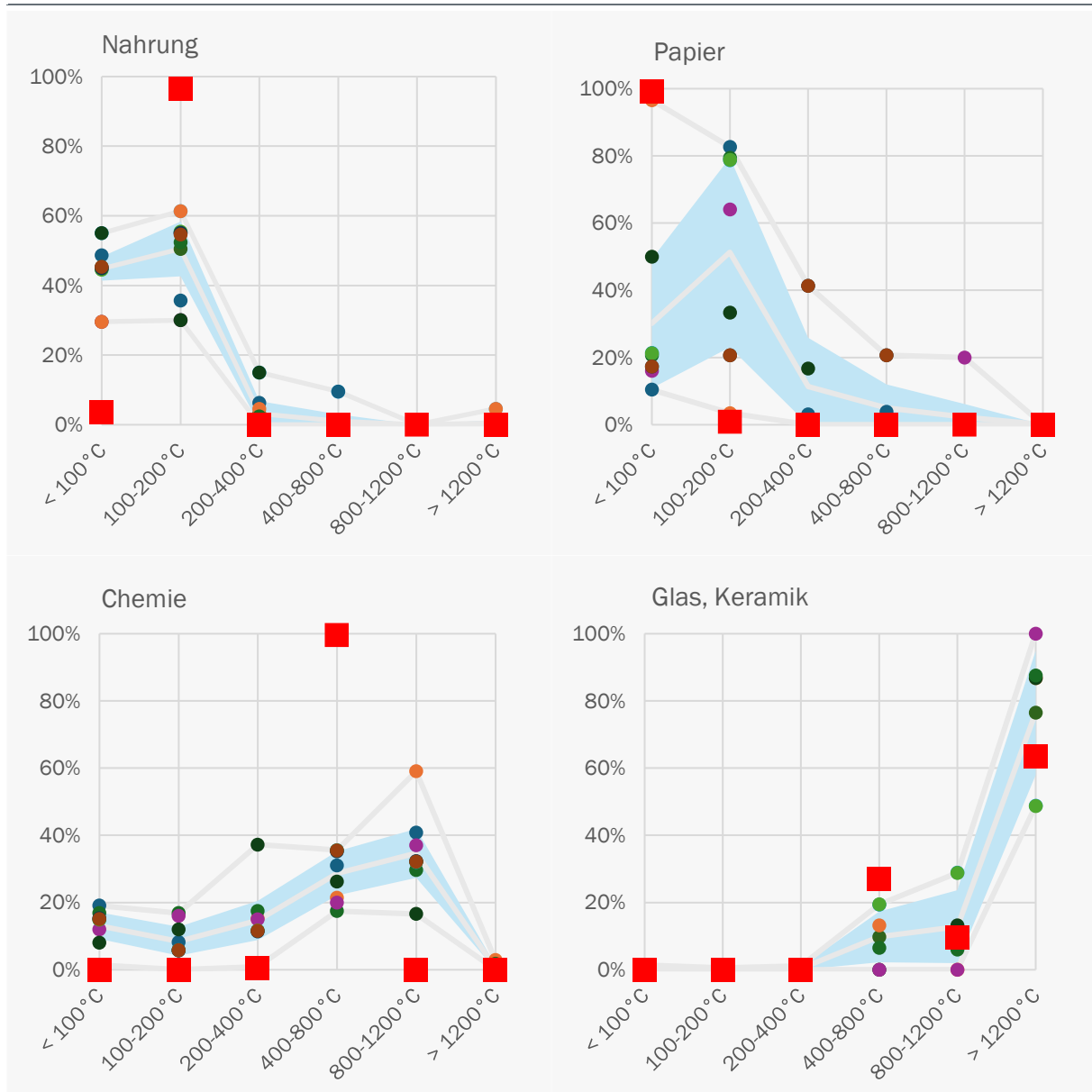
Ähnlich ist das Bild in der Zement- und Ziegelindustrie: Hohe Prozesstemperaturen dominieren, jedoch mit einem maximalen Anteil im Temperaturniveau 800–1'200 °C sowie Anteilen auch unter 400 °C. Die Modellannahmen sind vergleichbar, tendieren hingegen zu höheren Temperaturen (Temperaturniveau 800–1'200 °C vergleichsweise unterschätzt und > 1'200 °C vergleichsweise überschätzt).

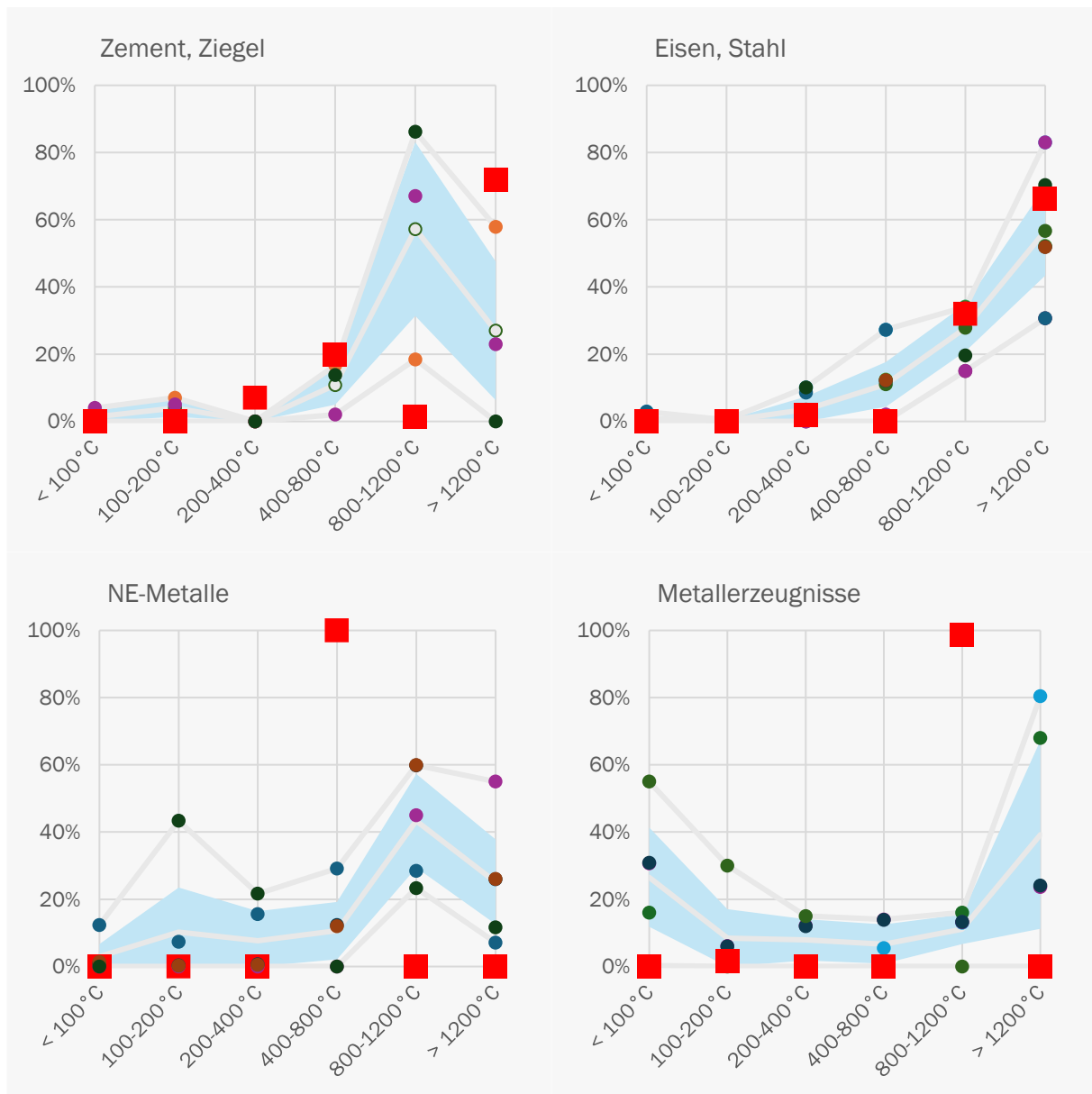
In der Eisen- und Stahlindustrie überlappen sich die Vergleichsdaten und Modellannahmen sehr gut. Mit Ausnahme einer Unterschätzung im Temperaturniveau 400–800 °C liegen die Modellannahmen im Band der mittleren Abweichung der Vergleichsdaten. Niedrige Temperaturen bis

200 °C sind kaum vertreten, während die Anteile oberhalb 200 °C mit steigender Temperatur ebenfalls wachsen und ihr Maximum bei Temperaturen über 1'200 °C verzeichnen.

Abbildung 2: Verteilung des Prozesswärmebedarfs auf Temperaturniveaus je Branche

Anteile in Prozent; rote Quadrate: CH-Modellannahmen, Punkte: Schätzwerte auf Basis der genannten Quellen, graue Linien: Min-/Max-Schätzwerte, blaues Band: Mittelwert $\pm$ Standardabweichung der Schätzwerte





Eigene Darstellung auf Basis von [Agora+ISI 2024], [Blesl 2015], [FfE 2009], [ifeu 2010], [Naegler 2015]

© Prognos 2025

Hingegen zeigen die Vergleichsdaten in der NE-Metalle-Industrie eine gleichmässigeren Verteilung der Anteile über die Temperaturniveaus mit Maxima bei 800–1'200 °C und > 1'200 °C. Die Modellannahmen fallen aus dem Muster mit einem klaren Maximum bei 400–800 °C und subsequenter vergleichsweiser Unterschätzung aller anderen Temperaturniveaus.

Ein ähnlicher Effekt ist bei den Modellannahmen für die Branche Metallerzeugnisse sichtbar, wo ein klares Maximum bei 800–1'200 °C nicht mit der Verteilung in der Vergleichsdaten harmonisiert. Dort kommen alle Temperaturniveaus vor in einer bimodalen Verteilung mit erhöhten Werten in beiden Extremrichtungen, unter 100 °C und über 1200 °C.

Die genannten Abweichungen zwischen Modellannahmen und Vergleichswerten sind Anlass einer zukünftigen Nachjustierung der Modelldatenlage, um auch feinere Temperaturniveaus adäquater

abzubilden. Für die in der vorliegenden Studie vollzogenen Berechnungen hinsichtlich des HT-PW-Elektrifizierungspotenzials wirken sich diese Unterschiede jedoch *nicht* nachteilig aus, da es kaum zu einer mutmasslichen Fehlzurordnung von Temperaturniveaus unter- und oberhalb der Hochtemperatur-Schwelle von 400 °C kommt.

3 Potenzial zur Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme und Dampf

In diesem Kapitel wird das technische und wirtschaftliche Potenzial sowie das Potenzial zur THG-Einsparung einer Elektrifizierung von industriellen Hochtemperatur-Prozessen sowie der Dampferzeugung dargestellt. Es werden verschiedene Technologien aufgeführt und, wo relevant und verfügbar, über zentrale Kennzahlen beschrieben. Zudem werden jeweilige Chancen und Hemmnisse für eine Elektrifizierung der HT-PW modellgestützt identifiziert.

3.1 Technologien zur Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme und Dampf

3.1.1 Technologien zur Bereitstellung von Hochtemperatur-Prozesswärme

Zu Beginn dieses Abschnitts werden Technologien beschrieben, denen gemäss der ausgewerteten Literatur relevantes Potenzial für die Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme zugeschrieben wird. Im Anschluss werden zusätzliche Technologien aufgeführt, die aus heutiger Perspektive kein relevantes zusätzliches Potenzial aufweisen. Die detaillierten Technologiesteckbriefe sowie die Quellenangaben sind im Anhang zu finden.

Widerstandsheizung (direkt)

Bei direkter elektrischer Widerstandsheizung wird ein elektrischer Strom durch das zu erwärmende Material geleitet. Das konduktive (den elektrischen Strom leitende) Material ist dabei Teil des Stromkreises und erwärmt sich aufgrund seines elektrischen Widerstands (Ohm'sche Widerstandsheizung). Dies wird als Joule-Effekt bezeichnet.

Durch diesen spezifischen Ansatz ist die direkte Widerstandsheizung nur auf bestimmte Prozesse und Materialien anwendbar. Es ergeben sich prozessabhängige Anforderungen an Leitfähigkeit bzw. Widerstand, Temperaturbeständigkeit und nötige Prozesstemperatur. Für gewisse Anwendungen, bspw. kleinere Anlagen in der Behälterglasindustrie, ist die Technologie bereits im industriellen Einsatz. Geringere anfängliche Investitionskosten, kompakte Öfen und ein relativ einfacher Betrieb sind die Gründe, warum Teile der Glasindustrie die direkte Widerstandsbeheizung gegenüber Erdgasöfen bevorzugt. In der Regel können nur begrenzte Leistungsdichten erreicht werden, was die Anlagendimensionierung erschwert. Zu den Hemmnissen gehören ausserdem die Wirtschaftlichkeit der Systeme sowie, insbesondere bei der Glasherstellung, die geringe Flexibilität wegen empfindlicher Schmelze.

Technologiesteckbrief: Tabelle 9

Widerstandsheizung (indirekt)

Bei der indirekten Widerstandsbeheizung wird elektrischer Strom nicht direkt durch das zu erwärmende Material geleitet, sondern über einen separaten Widerstand, der sich durch den Joule-Effekt erwärmt. Über Konvektion und Strahlung erwärmt dieser heisse Widerstand eine umgebende

Flüssigkeit, ein Gas (z. B. heiße Luft) oder sogar ein festes Material. Oft wird diese Flüssigkeit oder dieses Gas zur Erwärmung eines weiteren Materials genutzt. Diese Anlagen werden auch als Elektro-Öfen bezeichnet und sind technisch breitflächig einsetzbar. Eine gängige Anwendung ist das Kochen, u. a. in der Lebensmittelindustrie. Aktuell wird die Technologie bspw. in der Grundstoffchemie an elektrischen Steamcrackern erprobt.

Gegenüber konventionellen (brennstoffbetriebenen) Anlagen kommt es in der Regel zu höherem Platzbedarf, da die Leistungsdichte geringer ist. Zudem muss der geringere Abwärmestrom beachtet werden. Beides hat Auswirkungen auf den bestehenden Anlagenpark. Es braucht adäquate Starkstromanschlüsse, Transformator-Kapazitäten und ein Lastmanagement, die existieren bzw. ergänzt werden müssen. Vor allem in der Metallindustrie ist die Technologie bereits im Einsatz. In weiteren Branchen (z. B. Kalk, Chemie) besteht bislang wenig Praxiserfahrung damit. Die Prozessführung kann (bspw. in der Glasschmelze) herausfordernd sein. Der Wirkungsgrad ist in der Regel besser als bei konventionellen Systemen, wodurch sich der Energiebedarf verringert. Insgesamt gibt es kaum konkrete Restriktionen für die Verbreitung der Technologie. Die Wirtschaftlichkeit ist herausfordernd, wobei v. a. die OPEX ausschlaggebend sind.

Technologiesteckbrief: Tabelle 10

Induktionsöfen (Wechselstrom)

Zur induktiven Erwärmung über Wechselstrom wird durch eine Magnetspule («Induktor») ein Magnetfeld erzeugt, das mit hoher Frequenz wechselt. Wenn ein Leiter in diesem Feld platziert wird, werden in diesem Leiter elektrische Wechselströme induziert, die dem magnetischen Wechselfeld entgegengesetzt sind. Diese werden als Wirbelströme bezeichnet. Die Wirbelströme erwärmen den Leiter durch den Joule-Effekt (Ohm'sche Erwärmung).

Zur induktiven Erwärmung sind nur leitfähige Materialien geeignet und es sind bestimmte Geometrien notwendig. In der Praxis ist die Effizienz etwas geringer als bei einer Widerstandsheizung, aber höher als bei konventionellen Öfen, sofern bestimmte Bedingungen erfüllt werden (bspw. Reduzierung der Streufelder, ausreichende Kühlung, gute Kopplung zwischen Induktor und Werkstück, Betrieb bei optimaler Frequenz). Es können hohe Temperaturen und hohe Kapazitäten erreicht werden und die Technologie ist v. a. in der Metallindustrie bereits im Einsatz. In der Gießerei-Industrie haben konventionelle Grossanlagen (bspw. Kupolöfen) dennoch oft höhere Kapazitäten als Induktionsöfen. Dadurch sind mehrere Linien (Tandem-Ofenanlagen) nötig, was sie platzintensiver macht. Eine Umstellung des Schmelzbetriebes von Kupolöfen auf Induktionsöfen erfordert zudem höhere Schrott-Qualitäten. Auch in der Glas- und Keramikindustrie gelten Induktionsöfen als vielversprechend.

Technologiesteckbrief: Tabelle 11

Plasma-Brenner

Plasmaverfahren können in verschiedenen Varianten eingesetzt werden. Für Prozesswärmeanwendungen sind v. a. Plasmabrenner relevant. In Plasmastrahl- bzw. -wärmebehandlungsverfahren wird ein Trägermedium, bspw. Argon, Luft oder Wasser durch einen elektrischen Lichtbogen oder im hochfrequenten elektrischen oder magnetischen Feld ionisiert. Es entsteht ein Plasma, das Gas wird auf hohe Temperaturen aufgeheizt. Bei Austritt aus dem Brenner kann das Gas als Wärmeübertragungsmedium eingesetzt werden. Neben der Prozesswärmeerzeugung werden Plasmaverfahren auch zur Beschichtung (Schichtbildung eines Arbeitsgases am Werkstück durch

Ionisation im Vakuumofen), zum Schneiden und zum Verbindungsschweißen eingesetzt. Erzeugte Radikale können als Reaktanden für chemische Reaktionen dienen.

V. a. in der Metallbearbeitung, insbesondere zum Schneiden und Schweißen, gibt es bereits grosstechnische Anwendungen, in der sonstigen Prozesswärmeerzeugung bestehen noch Entwicklungsbedarfe. Diese betreffen bspw. die Lebensdauer der Elektroden, die durch die extrem hohen Temperaturen begrenzt ist. Der entsprechend hohe Verschleiss sowie Kühlanforderungen limitieren bislang die Wirtschaftlichkeit. Restriktionen bestehen demnach v. a. in Bezug auf Leistung und Materialbeanspruchung. Grundsätzlich sind Plasmabrenner als mögliche Alternative zu fossilen Brennern denkbar, da ähnliche Flammen-/Brenneigenschaften und -geometrien erzielt werden können.

Technologiesteckbrief: Tabelle 12

Weitere Technologien

Folgende Elektrifizierungstechnologien werden informatorisch aufgeführt. Hier ist die Technologiereife noch niedrig und es bestehen anwendungsbezogen grosse Überschneidungen zu den bereits aufgeführten Technologien. Dadurch ist das zusätzliche Elektrifizierungspotenzial aus heutiger Perspektive schwer einschätzbar bzw. eingeschränkt.

Technologiesteckbrief: Tabelle 13 und Tabelle 14

Bei einer **Infrarotheizung** wird eine Wärmequelle genutzt, die Infrarotwellen (Infrarotspektrum der Lichtstrahlung) ausstrahlt. Diese elektromagnetische Strahlung wird auf ein kälteres Objekt gerichtet, von dem sie absorbiert wird. Diese Übertragung von Heizelement-Oberflächen auf Werkstück-Oberflächen passiert ohne Medium, d. h. sie funktioniert auch im Vakuum. Die Absorption ist materialabhängig, jedoch praktisch ohne Konvektionsverluste, wodurch sich das Objekt deutlich schneller erwärmt (3–4-mal) als bei konventionellen Heissluftverfahren. Die Technologie ist u. a. für Erwärmungs- und Trockenprozesse in der Lebensmittel- und Papierindustrie, zum Fixieren von Beschichtungen und Trocknen von Farben in der Metallurgie und Textilindustrie, für die Dampferzeugung sowie für die Raumheizung geeignet.

Lichtbogenöfen (bzw. Electric Arc Furnaces, **EAF**) werden in der Regel zum Schmelzen von Metallen eingesetzt. Das Metall befindet sich zwischen zwei Graphitelektroden. Die Elektroden werden aufgeladen und durch hohen Kurzschlussstrom wird zwischen ihnen ein Lichtbogen gezündet. Die hohen Ströme dieses Lichtbogens durchdringen das Metall und erhitzen es durch den Joule-Effekt. Der Lichtbogen erreicht hohe Temperaturen zwischen 1'000 und 3'000 °C. Es kommt zu selbstständiger Gasentladung in Form eines Plasmas, wobei elektrische Energie in Wärme umgesetzt wird. Wärme wird durch Leitung, Konvektion und Strahlung vom brennenden Lichtbogen auf das Gut übertragen. EAF werden bspw. in der Sekundärstahlerzeugung bereits breitflächig eingesetzt, zusätzliche Potenziale bestehen u. a. in der Weiterverarbeitung von direkt-reduziertem Eisen (DRI), beim Schmelzen von Stahlguss und (aufgrund niedriger Schmelzzeiten) fürs Schweißen. Weiter werden Elektrolichtbogenöfen auch bei der Herstellung von Steinwolle, bei der Produktion von anorganischen Chemikalien und bei der Reduktion und Vorreduktion von Nichteisenmetallen genutzt.

Die **dielektrische Erwärmung** ist ein Set an Technologien zur Erhitzung von elektrisch nichtleitenden Materialien (Dielektrika). Diese können dielektrisch erwärmt werden, wenn sie eine asymmetrische Molekülstruktur aufweisen (bspw. H₂O). Ein sich änderndes (hochfrequentes) elektrisches Feld bringt derartige Moleküle zum Schwingen, da sie versuchen, sich dem externen Feld

anzupassen. Bei genau definierten Frequenzen kommt es zu Molekülschwingung und Reibung zwischen ihnen, was zu einer internen Wärmeentwicklung führt (vgl. Mikrowelle). Gemäss dem Frequenzbereich der eingesetzten Wellen lassen sich *Mikrowellen* (ca. 500 bis 3'000 MHz) und *Radiowellen/Hochfrequenz* (bis ca. 500 MHz, sog. Kondensatorfelderwärmung) unterscheiden. In der Nahrungsmittelindustrie ist die Mikrowellenerhitzung im Niedertemperaturbereich bereits etabliert. Sie wird zum schnellen, platzsparenden Aufheizen mit geringem Energieverbrauch, v. a. bei feuchten Materialien eingesetzt. Sie wird u. a. auch in der Grundstoffchemie, v. a. zum Erhitzen und für die Dampferzeugung, bei NE-Metallen, sowie in der Papierindustrie, bspw. zum Trocknen, erprobt. Insbesondere bei Trocknungsanwendungen wird die dielektrische Erwärmung häufig mit Heissluft oder Infrarotheizung kombiniert: Der grösste Teil des Wassers wird mit Heissluft oder Infrarot verdampft, während der endgültige Feuchtigkeitsgehalt mit der genau kontrollierten dielektrischen Erwärmung entfernt wird. Trotz ihrer relativ geringen Energieeffizienz ist sie oft die energieeffizienteste Option für Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit, wie Gummi und bestimmte Kunststoffe.

Bei der **Gleichstrom-basierten Induktionsheizung** bzw. magnetischen Gleichstromerwärmung wird statt des Magnetfeldes (wie bei der Wechselstrom-basierten Induktionsheizung) das Werkstück rotiert. Mittels supraleitenden Spulen wird ein (starkes) statisches Magnetfeld erzeugt. Ansonsten erfolgt die Erwärmung ähnlich wie bei der Wechselstrom-basierten Induktionsheizung über Induktion von Wirbelströmen im Material und schliesslich dem Joule-Effekt. Mögliche Einsatzfelder sind das Induktionshärten und Schmelzen von Metallen, Speziallegierungen, Gläsern und Oxiden.

Der Einsatz von einem **Elektronenstrahl** ist eine Elektrifizierungstechnologie, bei der eine Glühkathode zur Erzeugung von Elektronen verwendet wird. In einer Elektronenstrahlkanone werden aus einem beheizten Wolfram- oder Tantaldraht (2'900 K) durch Anlegen einer Beschleunigungshochspannung (i. d. R. im Hochvakuum) Elektronen emittiert und auf das Zielmaterial gestrahlt. Die Elektronenstrahl-Erwärmung ist eine gängige Technik zum Schmelzen von Refraktärmetallen mit einem hohen Schmelzpunkt. Sie wird auch in der Textilindustrie eingesetzt, um Polymerisationsreaktionen auszulösen.

Die Technologie der **Funkenerosion** bzw. das elektroerosive Verfahren wird zur hochpräzisen Materialbearbeitung genutzt. In der Regel wird das zu bearbeitende, elektrisch leitende Werkstück (häufig Metall) in einer nicht leitenden Flüssigkeit (Dielektrikum, meist deionisiertes Wasser oder spezielles Öl) bearbeitet. Dazu wird ein ebenfalls elektrisch leitendes Werkzeug in die Nähe des Werkstoffes gebracht, welches gegenüber dem Werkstück eine negative elektrische Spannung (typischerweise 40 bis 150 V) aufweist. Dadurch kommt es zu zahlreichen kleinen Entladungen zwischen Werkzeug und Werkstück. Dies führt zu immer wiederkehrenden Funken, die vorrangig Material vom Werkstück abtragen. Auch das Werkzeug selbst wird erodiert, es muss daher erneuert werden.

Bei der **Schockwellenheizung** werden Hochdruckwellen genutzt, um in einem Material (meist einer Flüssigkeit) hohen Druck bzw. hohe Dichte zu erzeugen. Der Schockkompressionsprozess ist thermodynamisch irreversibel und geht mit einem Temperaturanstieg im Material einher. Diese Technologie ist noch in Entwicklung. Mögliche Anwendungen sind u. a. elektrisches Steamcracken sowie Kalk- und Zementklinkerbrennen.

Im Prozess der **Laserheizung** wird ein Laserstrahl auf ein Material gerichtet, um es zu erhitzen. Laserlicht hat eine hohe Intensität in einem oft sehr engen Frequenzbereich, wodurch grosse Kohärenzlängen und scharfe Bündelung des Strahls erreicht werden. Der Laserstrahl erhitzt die Oberfläche des Materials, untere Schichten erwärmen sich durch Konvektion. Die absorbierte

Leistung hängt dabei v. a. von der Laserleistung, von der Wellenlänge sowie vom Material (und seiner Oberfläche) ab. In der Regel nimmt die Absorption mit steigender Materialtemperatur zu. Der Laserstrahl kann als lokalisierte und hoch kontrollierbare Wärmequelle dienen, um Bauteile zu schneiden, zu härten, zu verbinden oder für sonstige Formgebung. Dabei wird in der Regel mechanische Energie ersetzt. Auf kleinen Flächen ist die Technologie sehr präzise, mit hohen erreichbaren Temperaturen (Millionen °C). Für die meisten Prozesswärme-Anwendungen ist die Effizienz jedoch gering (unter 50 %).

Elektrischer Strom wird in der **Elektrochemie** eingesetzt, um chemische Reaktionen ablaufen zu lassen. Ein Beispiel dafür ist die Elektrolyse. Elektrischer Strom wird dabei genutzt, um eine Redoxreaktion ablaufen zu lassen. Grosstechnische Beispiele sind die Chlor- und Aluminiumerzeugung. Ein weiterer voraussichtlich wichtiger Prozess für die Energiewende (in grundstoffintensiven Volkswirtschaften) ist die Wasserstofferzeugung über Wasserelektrolyse. Aktuell wird der Großteil des verwendeten Wasserstoffs über die Dampfreformierung von Erdgas oder als Nebenprodukt in der petrochemischen Industrie hergestellt. Wasserstoff wird u. a. im Umwandlungssektor (Raffinerien), in der chemischen Industrie und perspektivisch in der Primärstahlproduktion (über Direktreduktion) eingesetzt. Dabei wird er v. a. stofflich genutzt. Perspektivisch ist auch ein Einsatz für Hochtemperatur-Prozesswärme denkbar, aber wirtschaftlich bislang kaum attraktiv.

Übersicht

In Kombination mit den Informationen in Abschnitt 2.2 zeigt dies, dass für den Grossteil an Temperaturbereichen und Branchen Elektrifizierungsmöglichkeiten bestehen (Abbildung 3). Auch in Prozessen wie dem Zementklinkerbrennen, bei denen konventionelle Öfen (v. a. Drehrohrofen) bei sehr hohen Temperaturen von um die 1'700 °C operieren, sind Technologien zur (Teil-)Elektrifizierung bekannt. Zukünftig werden weitere Potenziale für eine HT-PW-Elektrifizierung gesehen, bspw. über Widerstand, Plasma und Schockwellen [Agora+ISI 2024].

Zum Teil sind technisch niedrigere Temperaturen für die jeweiligen Prozesse geeignet, als sie heute üblicherweise genutzt werden, was einer Elektrifizierung entgegenkommt. Hinsichtlich Primärenergieverbrauch haben elektrische Lösungen meist Vorteile ggü. konventionellen oder anderen Alternativen wie synthetische Brennstoffe (insbesondere Wasserstoff) oder Biomasse. Effizienzvorteile bestehen bei fast allen Elektrifizierungstechnologien [Agora+ISI 2024].

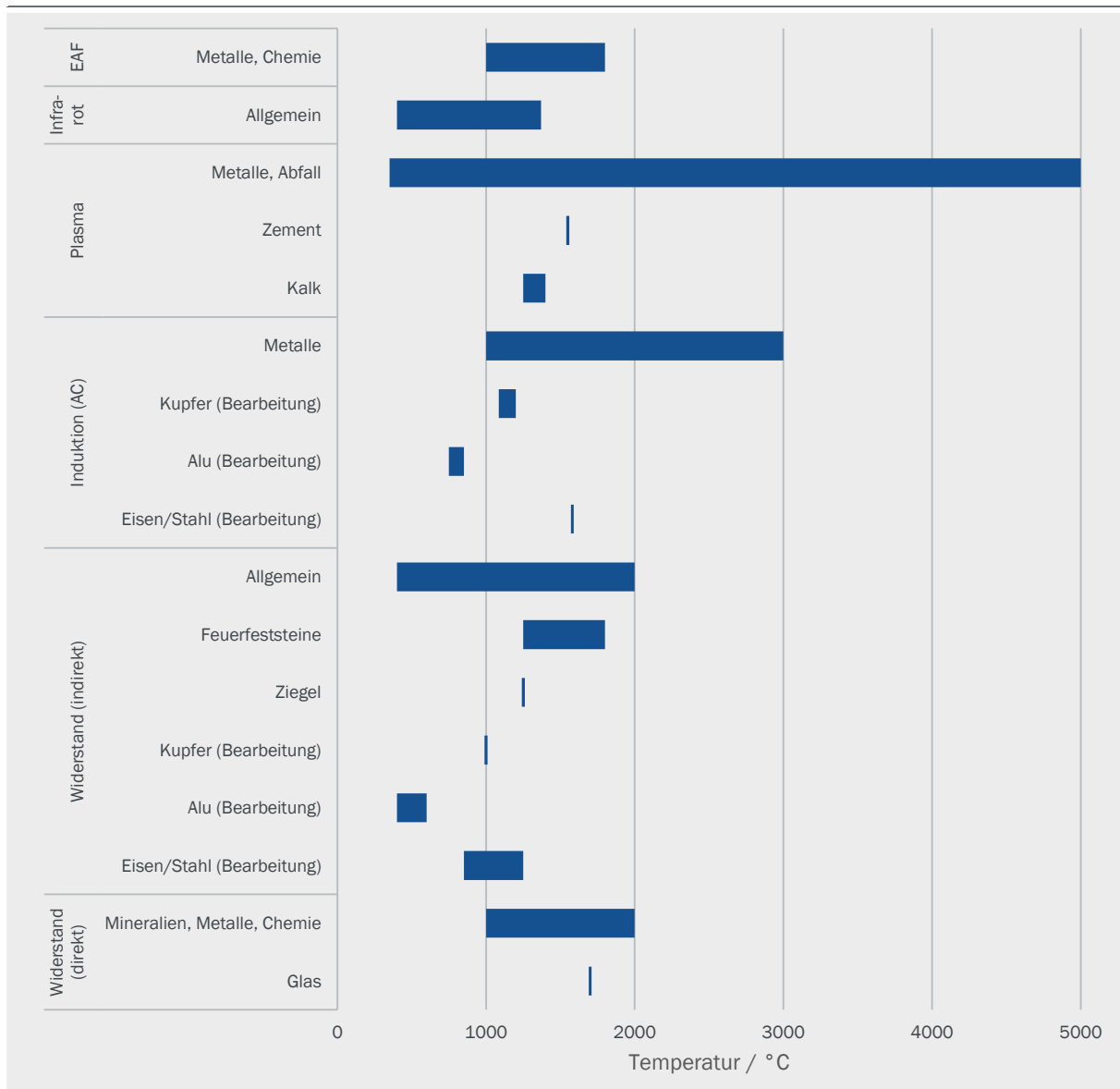
Der Einsatz der Elektrifizierungstechnologien konkurriert mit den jeweils verfügbaren, eben genannten Alternativen in erster Linie hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit. Kostenseitig sind die Investitionen bei elektrischen Anlagen in der Regel etwas höher, aber in ähnlichen Größenordnungen wie die der konventionellen Referenztechnologien. Der Wartungsaufwand ist oft ähnlich oder geringer. Die sonstigen und energiebedingten Betriebskosten hängen stark vom Strompreis ab. Eine Wirtschaftlichkeit stellt sich hier durch ein günstiges Verhältnis des Strompreises zum (fossilen) Hauptenergieträger der Referenztechnologie ein (unter Berücksichtigung der meist höheren Energieeffizienz bei der elektrischen Technologie). Eine wichtige Rolle spielt auch die Verfügbarkeit des Stroms direkt am Standort (Netzanschlussleistung) sowie Standortspezifika wie Verfügbarkeit des nötigen Platzes und Integrationsfähigkeit in bestehende Systeme.

Als wichtige Alternativtechnologie gilt für HT-PW die Biomasse-Beheizung. Für THG-neutrale Prozesswärme muss bei fehlender Dekarbonisierung (zumindest) defossilisiert werden. Dennoch führt die energetische Nutzung von Biomasse zur Entstehung von CO₂. Eine Möglichkeit bietet die Abscheidung dieses CO₂, u. a. zur Erzielung negativer Treibhausgasemissionen (Bioenergy with Carbon Capture and Storage-Technologien – BECCS) in bestimmten Industriezweigen. Diese Prozesse sind allerdings selbst energieintensiv. Insgesamt sollte auf einen effizienten und gezielten

Einsatz von Biomasse als begrenzte Ressource geachtet werden. Denn häufig wird für die Biomasse vorrangig ein stofflicher Einsatz (inkl. Kaskadennutzung) sowie bei Hochtemperaturanwendungen in der Industrie gefordert.

Abbildung 3: Temperaturbereiche von Elektrifizierungstechnologien (HT-PW)

nach Technologie und Branche



Eigene Darstellung

© Prognos 2025

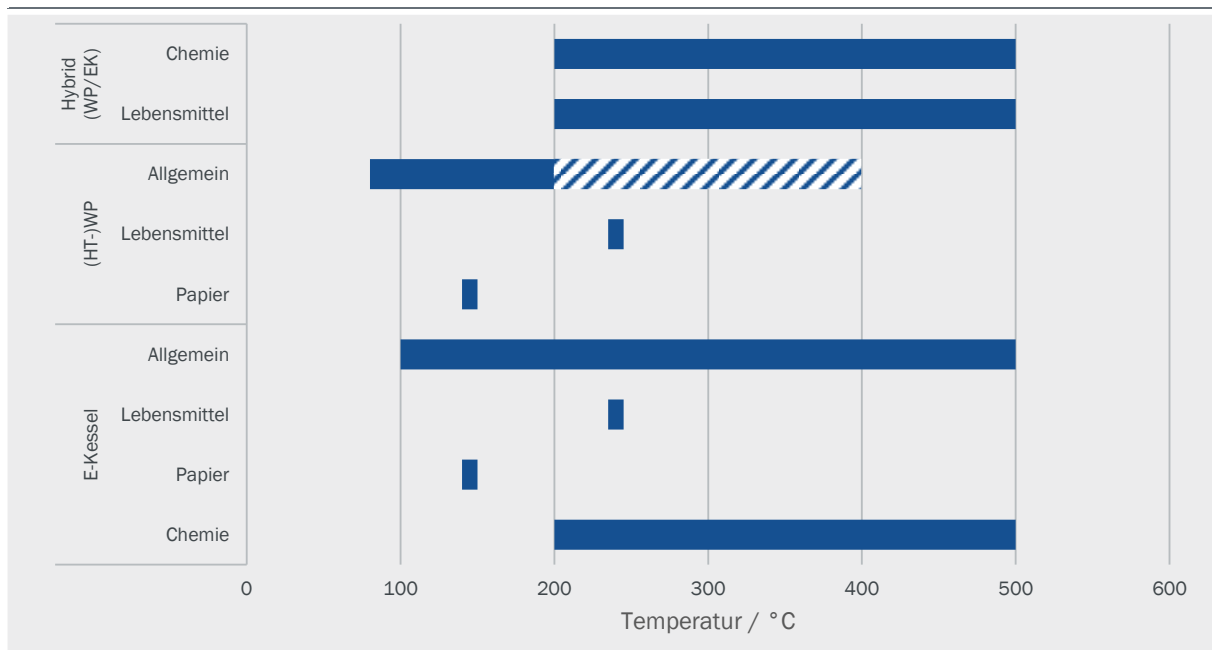
Viele der beschriebenen Technologien können miteinander kombiniert bzw. hybrid integriert werden. Eine mögliche Ergänzung sind auch kombinierte Wärmespeichersysteme. Diese bieten einen dynamischen Ansatz zur Verwaltung von thermischer Energie. Zur elektrischen Wärmeerzeugung wird hier bislang oft eine Widerstandsheizung eingesetzt, prinzipiell ist aber jegliche Technologie bzw. Abwärme nutzbar. Erzeugte oder verfügbare thermische Energie wird dann in einem Medium, wie geschmolzenem Salz oder Ziegeln, gespeichert und bei Bedarf wieder freigesetzt, um

Prozesswärme bereitzustellen. Eine Beispielanwendung ist die Gewährleistung einer kontinuierlichen Produktion von Prozessdampf trotz möglicherweise volatiler Produktion (Flexibilisierung). Kleinskalig wird dieser Ansatz bereits verfolgt. In Zukunft wird von Wirkungsgraden von über 90 % ausgegangen (Verluste von rund 1 % pro Tag), wobei spezifische Kosten voraussichtlich niedriger als bei Batterien sein dürften [Agora+ISI, 2024].

3.1.2 Technologien zur Bereitstellung von Dampf

Dieser Abschnitt widmet sich Technologien, die Potenzial zur Elektrifizierung der Dampferzeugung aufweisen. Die detaillierten Technologiesteckbriefe sind im Anhang zu finden. Ein Überblick über die erreichbaren Temperaturen der einzelnen elektrischen Dampferzeugungstechnologien findet sich in Abbildung 4.

Abbildung 4: Temperaturbereiche von elektrischen Dampferzeugungstechnologien
nach Technologie und Branche



Eigene Darstellung

© Prognos 2025

Elektrodenkessel

Elektrodenkessel werden zur Warm-/Heisswasser- und Dampf-Erzeugung eingesetzt. Dabei wird eine Wechselspannung an Elektroden angelegt, die direkt in Kontakt mit dem Kesselwasser stehen und dadurch elektrische Energie einbringen (Wasser dient als elektrischer Leiter). Der elektrische Strom im Wasser erhitzt dieses. Daneben gibt es auch Systeme, die Strom und damit Wärme über metallische oder keramische Widerstandsheizelemente (Übertragung der Wärme über Strahlung, Leitung und Konvektion) in das Wasser einbringen und auf diese Weise Heisswasser oder Dampf erzeugen.

V. a. bei kleinen Kapazitäten sind Elektrodenkessel bereits in relevanten Anwendungen etabliert. Hinsichtlich Prozesswärme und Integration sind sie quasi äquivalent zu konventionellen Anlagen, was bei einem Tausch zu einem kleinstmöglichen Eingriff ins Gesamtsystem führt. Elektrodenkessel weisen eine höhere Effizienz als fossile Kessel auf, da sie ohne Wärmetauscher und Abgase auskommen. Hier konkurrieren sie v. a. mit Gaskesseln, wobei hohe Strompreise vgl. mit Erdgas das grösste Hindernis für eine breitere Etablierung darstellen. Gegenüber Wärmepumpen mit einem COP von 1,5 (und oft deutlich höher) weisen Elektrodenkessel mit maximal 100 % eine geringere Effizienz auf. Es können jedoch höhere Temperaturen als bei Wärmepumpen erreicht werden und die Integration in bestehende Systeme ist in der Regel einfacher. Insgesamt stellen sie ein gut entwickeltes, getestetes Standardprodukt für den grosstechnischen Einsatz dar, das für viele Anwendungen kommerziell verfügbar ist.

Technologiesteckbriefe: Tabelle 15

Kompressionswärme-/kältepumpe

Wärmepumpen sind Anlagen zur Wärmebereitstellung, die in einem thermodynamischen Kreisprozess mit Verdampfung (Wärmeaufnahme auf niedrigem Temperaturniveau), Verdichtung (elektrischer Kompressor), Kondensation (Wärmeabgabe auf höherem Temperaturniveau) und Entspannung (Drossel) funktionieren. Thermische Energie wird aus einem Reservoir mit niedrigerer Temperatur aufgenommen und als Nutzwärme mit höherer Temperatur auf das zu beheizende System übertragen.

Es handelt sich um eine etablierte Technologie, die bei kleinen/mittleren Kapazitäten und niedrigeren Temperaturen (bis 100 °C) v. a. zu Heizzwecken im Raumwärmebereich eingesetzt wird. Es werden Wirkungsgrade von bis zu 700 % erreicht (durch Nutzung einer externen Wärmequelle). Ein grösserer Temperaturhub reduziert die Effizienz bzw. umgekehrt reduziert sich der Energiebedarf bei Abwärmequellen mit hoher Energiedichte und geringem Temperaturunterschied zur Zieltemperatur. Wärmepumpen rücken in der Industrie immer stärker in den Fokus, da sie das Temperaturniveau von Ab- und/oder Umweltwärme auf über 200 °C heben und so eine erneute Nutzung als Prozesswärme ermöglichen können [Agora+IEG 2023]. In der Industrie sind speziell im Prozesswärmebereich bislang noch wenige Anlagen in Betrieb. Bei höheren Kapazitäten und Temperaturen (Hoch- bzw. Höchsttemperatur: bis 200 °C, zukünftig bis 400 °C erwartbar) ist die Technologie noch nicht im industriellen Massstab etabliert, aber entwickelt sich aktuell sehr dynamisch – insbesondere, wenn Abwärme bei entsprechend hohen Temperaturen vorliegt und nicht direkt weitergenutzt werden kann. Prinzipiell ist die Technik heute bereits verfügbar. BASF will 2025 bspw. in Ludwigshafen (Deutschland) gefördert durch einen Klimaschutzvertrag die mit 500 kt pro Jahr weltweit grösste Wärmepumpe zur Dampferzeugung bauen.⁴

Für die Wirtschaftlichkeit ist v. a. das Verhältnis der Strompreise ggü. Gaspreisen relevant. Die Integration in bestehende Systeme ist komplexer als bei Elektrodenkesseln. Eine weitere Herausforderung besteht im Einsatz von geeigneten Kältemitteln mit niedrigem GWP und ODP. Der Einsatz von Wärmepumpen in dezentralen Systemen kann die Abwärmenutzung erhöhen und gleichzeitig eine schrittweise Elektrifizierung ermöglichen. Je nach Auslegung kann bei Dezentralität der Einsatz flexibilisiert werden, wodurch eine optimierte Prozessführung ermöglicht wird. Ineffizienter sind Systeme üblicherweise bei zentraler Dampfversorgung.

⁴ dafür wird Abwärme aus dem werksseitigen Steamcracker genutzt; siehe <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2024/10/p-24-300>;

Im Unterschied zu Wärmenetzen weisen Produktionsprozesse in der Industrie üblicherweise eine deutlich höhere Jahresauslastung auf. Für Wärmepumpen, die zur Versorgung dieser Produktionsprozesse mit Wärme eingesetzt werden, können daher durchschnittlich rund 6'000 Vollbenutzungsstunden angenommen werden.

Technologiesteckbrief: Tabelle 16

Hybrid: Wärmepumpe und Elektrodenkessel

Eine Kombination von Wärmepumpe und Elektrodenkessel kann einige Vorteile der beiden Technologien kombinieren, wodurch höhere Temperaturen (wie bei Elektrodenkesseln) mit höherer Effizienz (durch Wärmepumpen) erreicht werden können.

Technologiesteckbrief: Tabelle 17

Weitere Aspekte der elektrischen Dampfbereitstellung

Eine zusätzliche Technologie zur Dampfbereitstellung bzw. Dampfaufbereitung ist die mechanische Brüdenverdichtung. Dabei wird der in industriellen Prozessen entstehende Prozessabdampf (Brüden) von einem elektrisch betriebenen Verdichter komprimiert, auf ein höheres Temperaturniveau gehoben und anschliessend dem Prozess als frischer Heizdampf wieder zugeführt. Die in dem Dampf enthaltene Energie geht dabei nicht verloren, lediglich die zur Temperaturerhöhung erforderliche Energie muss zusätzlich aufgebracht werden. Dies stellt eine weitere Möglichkeit dar, um den Druck und die Maximaltemperatur der Dampferzeugung über Wärmepumpen zu erhöhen [in4c 2022].

Sonstige technische Entwicklungen und Umstellungen, wie längere und grössere Anlagen (bspw. Papiermaschinen mit mehr Zeit zum Trocknen), können auch unabhängig von der Technologie zur Erzeugung von Dampf und Prozesswärme die notwendige Temperatur verringern. Dies kann Auswirkungen auf die technologischen Möglichkeiten haben, bspw. indem der Einsatz von Wärmepumpen vereinfacht wird [Agora+ISI 2024]. Ausserdem ist das Prinzip «Efficiency first» als wichtige Ergänzung zu jeglicher Transformation in der Industrie zu verstehen. Wärme zunächst einzusparen erleichtert die Umstellung, dazu gehören die Vermeidung von Wärmeverlusten, der Einsatz von Prozesswärme-Technologien mit hohem Wirkungsgrad und gleichzeitig dort anfallende niederkalorische (Ab-)Wärme (in Industrieprozessen) nutzbar zu machen, indem Wärmepumpen das Temperaturniveau anheben. Die Effizienz erhöht sich, falls sich Prozesswärmebedarf und Temperaturniveaus reduzieren lassen. Die Basis dafür sind Konzepte, die systematisch die Minimierung von Prozesstemperaturen (sogenannte „Low-Ex-Konzepte“) und (innerbetriebliche) Abwärme-Kaskadennutzung adressieren. Effizienzverbesserungen äussern sich allerdings auch in einem geringeren Abwärmepotenzial, was Auswirkungen auf die inner- und ausserbetriebliche Nutzung haben kann [in4c 2022].

3.2 Modellierung der Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme und Dampf

Zur Bestimmung des Effektes einer möglichen Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme und Dampf im Zeitverlauf werden zwei Szenarien erstellt: Zum einen ein Referenzszenario, das sog. Business-as-usual-Szenario («BAU-Szenario»). Es bildet die in Kraft befindlichen Massnahmen der Energie- und Klimapolitik ab und führt die beobachtete Technologieentwicklung

sowie die Entwicklung der Rahmenbedingungen weiter, indem historische Trends der letzten Jahrzehnte auch in Zukunft fortgeführt werden. Das BAU-Szenario entspricht in seinem Ansatz und seiner prinzipiellen Wirkung (jedoch nicht hinsichtlich seiner konkreten Ergebnisse) dem Szenario «Weiter wie bisher» (WWB) der Energieperspektiven 2050+ [BFE 2021]. In diesem Arbeitsschritt wurden ebenfalls Modellannahmen zu *konventionellen* HT-PW-Technologien und deren Kenngrößen aktualisiert und validiert.

Demgegenüber beschreibt das «Max-E-Szenario» die maximale, nach derzeitigem Kenntnisstand technisch mögliche Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme und Dampf. Dafür müssen die im vorigen Kapitel recherchierten Technologien für die Anwendung im Bottom-up-Industriemodell der Prognos (*prIDE*) zusammengefasst (gemittelt) und auf die wesentlichen Parameter, insbesondere die Reduktion des Endenergieverbrauchs bei Ersatz der Referenz- mit der Elektrifizierungstechnologie, reduziert werden (Tabelle 18 und Tabelle 19). Nur so lassen sich die Technologien zielgenau adressieren und entsprechend der technischen Verfügbarkeit in den Bestand einphasen (entlang einer S-Kurve bzw. konkret entlang des Integrals einer Weibull-Verteilung). Dabei werden meist nur Technologien ab TRL 6/7 (Pilot-/Demonstrationsanlage) berücksichtigt. Nur für den Fall, dass für eine Branche ausschliesslich Technologien früherer Entwicklungsstadien vorliegen, wurden diese berücksichtigt – dann jedoch mit entsprechend später Marktverfügbarkeit. Insgesamt konnten demnach neun aggregierte Elektrifizierungstechnologien zur HT-PW-Erzeugung sowie sechs zur Dampferzeugung berücksichtigt werden, welche die meisten der für die vorliegende Untersuchung relevanten Prozesse (vgl. Tabelle 2 für die HT-PW und Tabelle 3 für den Dampf) und damit nahezu die gesamte bei diesen Prozessen benötigte Energie abdecken.

Im Max-E-Szenario entspricht das resultierende dem theoretischen Elektrifizierungspotenzial unter Berücksichtigung der technischen Umsetzbarkeit. So werden stets die jeweiligen Kennwerte der einzelnen Elektrifizierungstechnologien berücksichtigt, insbesondere Einsatzfeld, Branche, Marktverfügbarkeit (bzw. heutige Marktdurchdringung) und spezifischer Energieverbrauch der Elektrifizierungstechnologien sowie Lebensdauer (Investitionszyklen werden gewahrt) und spezifischer Energieverbrauch der Referenztechnologie. Ausserdem werden durch die Elektrifizierung der Dampfbereitstellung weder erneuerbare noch leitungsgebundene Wärme (Solarthermie, bestehende Wärmepumpen/Umweltwärme, Fernwärme) substituiert. Diese Energieträger sind ebenso eine Möglichkeit zur Dekarbonisierung wie es die Elektrifizierung ist und werden auch heute bereits genutzt, stehen also nicht für eine Elektrifizierung (mit dem vorrangigen Ziel der THG-Emissionsreduktion) zur Verfügung.

Weiterhin werden im Max-E-Szenario *keine* Opportunitäten hinsichtlich konkurrierender Dekarbonisierungstechnologien berücksichtigt. Dabei würden entlang der Abwärmenutzungskaskade folgende Punkte in der genannten Reihenfolge technisch und ökonomisch überprüft:

1. Gibt es die Möglichkeit zur Einsparung bzw. Vermeidung von Wärmebedarfen und -verlusten («Efficiency first»)?
2. Wo können Erneuerbare Wärmequellen (Solar- oder Geothermie) eingesetzt werden?
3. Wo (und ab wann) können alternative Technologien bzw. Verfahren der Prozesswärmebereitstellung (darunter auch die Elektrifizierung) zur Dekarbonisierung beitragen?

Dieses Vorgehen ist aus systemischer Sicht laut [in4c 2022], [SWK 2024] und [FVEE 2022] vorzuziehen (vgl. Abschnitt 5.2), behandelt die Elektrifizierung jedoch nachrangig als eine Option unter mehreren. In der vorliegenden Studie bzw. im Max-E-Szenario soll zur Dekarbonisierung bewusst *einzig* auf die Elektrifizierung (von HT-PW und Dampf) gesetzt werden.

Auf ein drittes Szenario, welches eine moderate Elektrifizierung von HT-PW und Dampf abbilden sollte, wurde angesichts der überschaubaren Wirkung auf den Endenergieverbrauch im Max-E-Szenario (s. u.) sowie des gleichzeitig grossen Parameterraums (spez. EEV, Marktverfügbarkeit, Hochlaufpfad) und damit einhergehender grosser Unsicherheiten verzichtet.

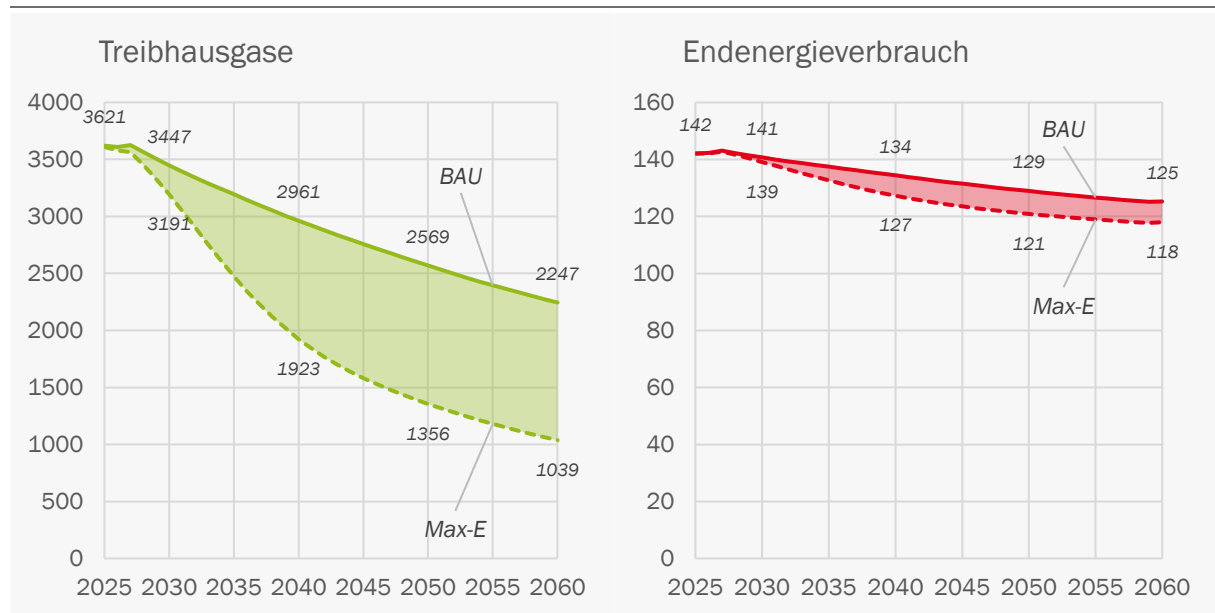
3.3 Ergebnisse der Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme und Dampf

Überblick

Eine Substitution aller Anlagen zur Erzeugung von Hochtemperatur-Prozesswärme sowie Dampf mit der jeweils geeigneten elektrischen Technologie (vgl. Tabelle 18 und Tabelle 19 sowie Abschnitt 3.2) – unter Berücksichtigung der individuellen Marktverfügbarkeiten – führt zu einem signifikanten Rückgang der Treibhausgas-Emissionen von 1'200 kt CO₂e (minus 54 %) bis 2060 (Abbildung 5, links). Der grösste Teil der Elektrifizierungstechnologien, nämlich die Elektroöfen in den Metallbranchen und der Glasbranche sowie Elektrodenkessel und Wärmepumpen zur Dampferzeugung, sind bereits heute oder absehbar in wenigen Jahren marktreif. Dort ist ein Wechsel auf die elektrischen Anlagen im Wesentlichen vom Investitionszyklus, d. h. der Lebensdauer der Referenztechnologie, abhängig und bestimmt das Einphasen dieser Anlagen in den Bestand. Entsprechend wird das absolute Einsparniveau von 1'200 kt CO₂e bereits zwischen 2045 und 2050 erreicht und verbleibt anschliessend bei etwa diesem Wert.

Abbildung 5: Treibhausgasemissionen und Endenergieverbrauch

in der Schweizer Industrie, 2025–2060; links: verbrennungsbedingte THG, in kt CO₂e, rechts: EEV, in PJ; je Szenario



Eigene Darstellung

© Prognos 2025

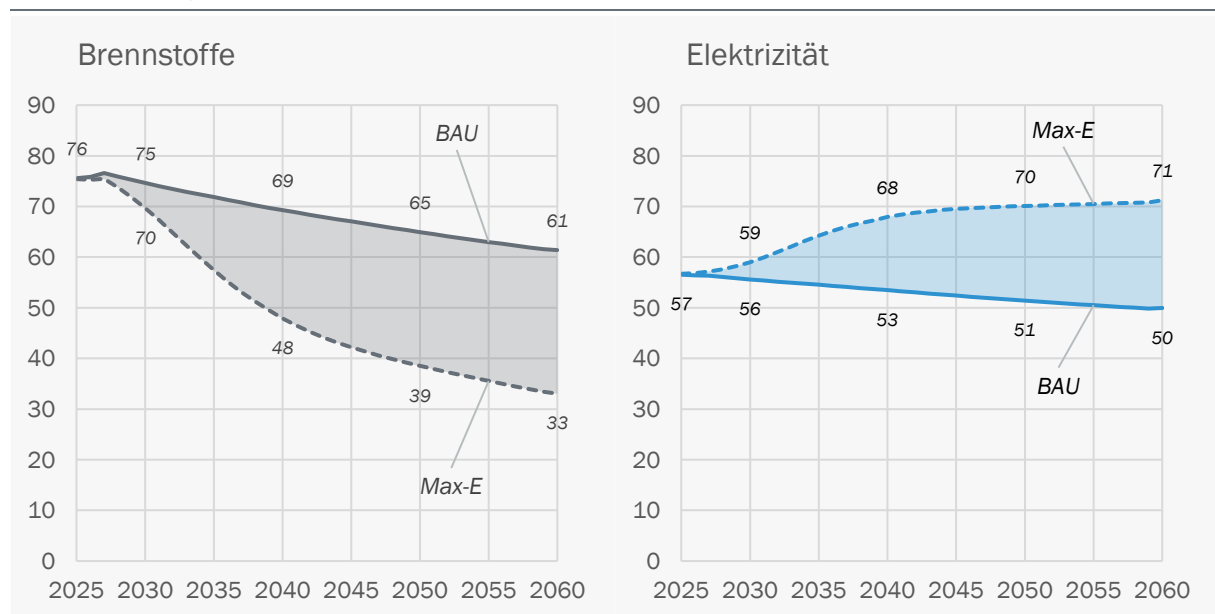
Beim Endenergieverbrauch resultiert hingegen ein deutlich moderaterer Nettoeffekt: Der Rückgang liegt hier bei maximal 7–8 PJ (-5 bis -6%) in den Jahren 2040 bis 2060 (Abbildung 5, rechts). Die forcierte Elektrifizierung im Max-E-Szenario führt zu einem Anstieg des Stromverbrauches um rund 20 PJ ab 2050 (ca. +40 %). Gleichzeitig sinkt der Verbrauch an Brennstoffen

(exklusive erneuerbarer und leitungsgebundener Wärme) um rund 27 PJ (ca. -44 %) (Abbildung 6). Der Elektrizitätszuwachs ist dabei geringer als der Brennstoffrückgang aufgrund des Energieeffizienzvorteils der Elektrifizierungstechnologien ggü. den konventionellen Verfahren von einem Viertel bis zu einem Drittel (im Mittel über alle neu eingesetzten Elektrifizierungstechnologien).

Zum Vergleich beträgt der Elektrizitätsverbrauch aller Nachfragesektoren in der Schweiz etwa 207 PJ (im Mittel der Jahre 2015–2023) [BFE 2024h]. Auch im Szenario Zero Basis der Energieperspektiven 2050+ steigt der Elektrizitätsverbrauch ab den 2030er Jahren (trotz Elektrifizierung des Verkehrs und der Raumwärme sowie teilweise der industriellen Prozesse) nur moderat an auf knapp 230 PJ im Jahr 2050 [BFE 2021]. Damit ist der Einfluss der hier berechneten Elektrifizierung der Hochtemperatur-Prozesswärme sowie der Dampferzeugung auf das gesamte Stromsystem klar begrenzt. Vorrangig aus diesem Grunde wurde auch kein drittes, «mittleres» Szenario gerechnet, welches zwar hinsichtlich der konkreten Elektrifizierungstechnologien in den jeweiligen Branchen zu einer anderen Entwicklung führte, jedoch hinsichtlich der Auswirkungen auf das Stromsystem, ebenso wie das Max-E-Szenario, nur einen untergeordneten Einfluss hätte.

Abbildung 6: Brennstoff- und Elektrizitätsverbrauch

in der Schweizer Industrie, 2025–2060; links: Brennstoffe (ohne Fernwärme, Umwelt- und Solarthermie), rechts: Elektrizität; in PJ je Szenario



Eigene Darstellung

© Prognos 2025

Blick in die Branchen

Detaillierte Ergebnisse zum veränderten Brennstoff- und Elektrizitätsverbrauch sowie zu den veränderten Treibhausgasemissionen einzelner Branchen beim Übergang vom BAU- auf das Max-E-Szenario finden sich je in Tabelle 4, Tabelle 5 und Tabelle 6. Es folgt die knappe Betrachtung jeder einzelnen Branche.

Die **Chemie- und Pharmaindustrie** weist einen hohen Bedarf an Prozesswärme auf, welcher aus dem erhöhten Dampfbedarf resultiert. Es wird angenommen, dass etwa 80 % der Prozesswärme

für Prozessdampf (bzw. Trocknung) aufgewandt werden. Gleichzeitig wird der Prozessdampf für Destillationsprozesse auf einem hohen Temperaturniveau (Hochtemperatur: 400-800°C) benötigt. Viele Prozesse sind auf Dampf als Träger der Prozesswärme ausgelegt, sodass ein umfassender Eingriff in bestehende Produktionsprozesse erforderlich wird, falls das Medium «Dampf» vermieden werden soll. Eine Elektrifizierung der Dampfbereitstellung ist vorzuziehen und kann auch zu 100 % erfolgen. Zur Verfügung stehen Elektrokessel (marktverfügbar) und Kompressions-Wärmepumpen (auch hybrid in Kombination mit einem Elektrokessel, jeweils absehbar marktverfügbar), welche modellseitig in einem Verhältnis von 2/3 zu 1/3 zum Einsatz kommen. Insgesamt kann der Brennstoffverbrauch der Chemie- und Pharmaindustrie im Max-E-Szenario bis 2060 um ca. 10 PJ (-83 % ggü. BAU-Szenario) gesenkt werden. Gleichzeitig erhöht sich der Elektrizitätsverbrauch um 6–7 PJ (+170 %). Die Elektrifizierung der Dampfbereitstellung weist also eine (im Mittel der beiden Elektrifizierungstechnologien) um 33 % höhere Energieeffizienz auf als die konventionellen Verfahren.

Die konduktive Erwärmung (direkte Widerstandsheizung, Glas leitet Strom ab einigen hundert Grad Celsius) ist in der **Glasindustrie** bereits kommerziell verfügbar. Als weitere PtH-Technologie finden sich in der Branche elektrische Heizelemente (indirekte Widerstandsheizungen), auch hybrid in Kombination mit einem konventionellen Ofen. Für die Schweiz ist uns von keinem elektrischen Ofen im produktiven Einsatz bekannt (und konnte aufgrund fehlender Interviews mit Vertretern der Glasindustrie auch nicht eruiert werden), weshalb bei der Berechnung noch keinerlei Marktanteil für diese Technologien angenommen wurde. Insgesamt kann der Brennstoffverbrauch der Glasindustrie im Max-E-Szenario bis zum Zeitraum 2040–2060 um ca. 1.4 PJ (-100 % ggü. BAU-Szenario) gesenkt werden. Gleichzeitig erhöht sich der Elektrizitätsverbrauch um etwa 0.9 PJ (+550 %). Die Elektrifizierung der Glasschmelze weist damit eine um 38 % höhere Energieeffizienz auf als die konventionellen Verfahren. Beim Einsatz der E-Öfen müssen speziell die geänderte (anspruchsvollere) Prozessführung sowie die nach wie vor geringe Flexibilität aufgrund der empfindlichen Glasschmelze beachtet werden.

Für die Branchen **Keramik und Ziegel** stehen elektrische Heizelemente als indirekte Widerstandsheizung nicht vor 2035 zur Verfügung und versprechen grosse EEV-Reduktionen von fast 40 % ggü. den konventionellen Öfen. Aufgrund der späten Marktverfügbarkeit und gleichzeitig hohen Lebensdauern der Bestandsanlagen von 30 Jahren werden erst zum Ende des Betrachtungszeitraumes grosse Teile des Bestandes auf die elektrischen Alternativen umgestellt sein. 2060 wird der Brennstoffverbrauch der Keramik- und Ziegelindustrie im Max-E-Szenario um 0.25 PJ (-96 % ggü. BAU-Szenario) gesenkt und der Elektrizitätsverbrauch um 0.15 PJ gesteigert. Insbesondere beim Ersatz der grossen Ziegelöfen muss die limitierte Leistungsdichte bzw. Kapazität der E-Öfen berücksichtigt werden. Dies kann dazu führen, dass statt eines grossen konventionellen Ofens mehrere elektrische Öfen im Batchbetrieb laufen. Was wiederum aufgrund des damit grösseren Platzbedarfes Auswirkung auf den bestehenden Anlagenpark hätte.

Der äusserst energieintensive Kernprozess bei der **Zementindustrie** besteht aus Kalzinierung und Sinterung des Kalksteins im Drehrohröfen. Für diesen Prozessschritt existieren bisher nur indirekt elektrisch beheizte Drehrohröfen im Technikum-Massstab mit geringem Durchsatz. Hybride Systeme, wie z. B. das Einblasen elektrisch erhitzter Luft, oder der direkte Einsatz von Widerstandsheizelementen, erfordern umfassende Anpassungen an den bestehenden Anlagen bis hin zur Neukonstruktion. Eine «minimalinvasive» Option, die auch bei der Modellierung des Max-E-Szenarios berücksichtigt wurde, ist der Tausch der Erdgas- gegen Plasma-Brenner, was weitgehend kompatibel ist mit der Nutzung und Fahrweise der bestehenden Anlagen. Plasma-Brenner befinden sich noch in der Entwicklung; eine Marktverfügbarkeit wird erst 2035 erwartet. Hemmnisse für den Einsatz eines Plasma-Brenners sind hohe Kühlanforderung (damit eine schlechtere Energieeffizienz) und hoher Verschleiss (damit eine niedrige Lebensdauer). Weiter nutzt die

Zementindustrie in grossem Umfang sehr günstige Sekundärbrennstoffe (überwiegend Abfälle), was eine Kommerzialisierung anderer Energieträger erschwert. Noch schwerer wiegt die Tatsache, dass beim Kalksteinbrennen grosse Mengen an geogenen CO₂-Emissionen austreten. Darum fokussiert sich die Zementindustrie in erster Linie auf die Kohlenstoffabscheidung (CC, vgl. Abschnitt 3.4) und nicht auf eine Dekarbonisierung des Endenergieverbrauchs – trotz des zusätzlichen Vorteils hochreiner CO₂-Ströme (nur geogenes, kein verbrennungsbedingtes CO₂) und damit weniger und einfacheres CC, die eine Elektrifizierung mit sich bringt. Das Max-E-Szenario antizipiert dennoch den grösstmöglichen Einsatz von Plasma-Brennern, der jedoch aufgrund der späten Marktverfügbarkeit und gleichzeitig sehr hoher Lebensdauern der Bestandsanlagen (ca. 60 Jahre) auch bis 2060 nur teilweise stattfindet. Insgesamt kann der Brennstoffverbrauch der Zementindustrie bis 2060 um 4.9 PJ (-43 % ggü. BAU-Szenario) gesenkt werden. Gleichzeitig erhöht sich der Elektrizitätsverbrauch überproportional um 5.3 PJ – die Elektrifizierungstechnologie benötigt in diesem einen Falle also mehr Energie als das konventionelle Verfahren.

Bei der Erzeugung (Schmelzen) und Verarbeitung (Erwärmen) von **Eisen und Stahl**, was in den Branchen Metallerzeugung und Metallbearbeitung, aber auch Metallerzeugnisse, Maschinenbau und Bau als relevante Stahlnutzer, vorkommt, haben sowohl die konduktive (direkte Widerstandsheizung) als auch die induktive Erwärmung einen hohen Entwicklungsstand und eine gewisse Relevanz am Markt. Speziell bei der Herstellung von Sekundärstahl ist der Elektrolichtbogenofen (EAF) Stand der Technik. Aus diesem Grund wird die Sekundärstahlerzeugung bei der Berechnung des Elektrifizierungspotenziales ausgespart. Hingegen besteht bei der ersten Bearbeitung und der Weiterverarbeitung von Eisen und Stahl immer noch deutliches Ausbaupotenzial für elektrische Verfahren, hier konkret der Induktionsofen (Wechselstrom) und die (indirekte) Widerstandsheizung, für die eine heutige Marktdurchdringung von 20 % angenommen wurde. Insgesamt kann der Brennstoffverbrauch im Max-E-Szenario bis 2060 in der Eisen- und Stahlindustrie um ca. 3,5 PJ gesenkt werden, in den Branchen Metallerzeugnisse, Maschinenbau und Bau um ca. 1,6 PJ, 0,2 PJ und 0,9 PJ. Gleichzeitig erhöht sich der Elektrizitätsverbrauch um 2.6 PJ, 1.3 PJ, 0.2 PJ und 0.7 PJ. Die Elektrifizierung weist damit im Mittel eine um 26/16/2/28 % höhere Energieeffizienz auf als die jeweils konventionellen Verfahren. Zusätzlich zum besseren Wirkungsgrad wird in der Eisen- und Stahlindustrie auch eine einfachere Prozessführung insbesondere bei diskontinuierlicher Wärmebehandlung erwartet.

Die Nicht-Eisen-Metallindustrie (**NE-Metallindustrie**) wird bestimmt von der Erzeugung (Sekundärroute bzw. aus Altmetall) und Bearbeitung von Aluminium und Kupfer als, nach Stahl, mengenmässig wichtigste technische Metalle. Modellseitig werden folgende Elektrifizierungstechnologien angenommen und berechnet: Induktionsöfen (Wechselstrom) für das Schmelzen von Aluminium und (indirekte) Widerstandsheizungen für das Erwärmen von Aluminium sowie Induktionsöfen (Wechselstrom) für das Schmelzen von Kupfer und Induktionsöfen (Wechselstrom) oder (indirekte) Widerstandsheizungen für das Erwärmen von Kupfer. Teilweise wird eine geringe Marktdurchdringung von ≤ 10 % bei den E-Öfen angenommen. Etabliert ist z. B. der Einsatz von elektrischen Erwärmungs- und Warmhalteprozessen, insbesondere im Batch-Prozess und anschliessendem Warmhalten für den kontinuierlichen Giess- oder Walzprozess. Es wird erwartet, dass bei langfristig niedrigen Strompreisen elektrische (Recycling)-Kapazitäten in der NE-Metallindustrie aufgebaut werden. Insbesondere beim Aluminium haben die Induktionsöfen mehrere Vorteile wie eine höhere thermische Effizienz, höhere Produktqualitäten durch Vermeidung von Abbrand, weniger Erstarrung bei gleichzeitigem Rühren und Erhitzen sowie Entfall von stromintensiven Gebläsen für die Abgasreinigung. Insgesamt kann der Brennstoffverbrauch der NE-Metallindustrie im Max-E-Szenario bis zum Zeitraum 2040–2060 um ca. 0.7 PJ (-100 % ggü. BAU-Szenario) gesenkt werden. Gleichzeitig erhöht sich der Elektrizitätsverbrauch um etwa 0.6 PJ (+131 %). Die Elektrifizierung der NE-Metallindustrie weist damit eine um 9 % höhere Energieeffizienz auf als die konventionellen Verfahren

Die Dampferzeugung in der **Nahrungs- und Papierindustrie** kann mit den verfügbaren technischen Optionen zu 100% elektrifiziert werden. Es wird angenommen, dass etwa 80 % der Prozesswärme für Prozessdampf (bzw. Trocknung) in der Nahrungsindustrie und etwa 95 % in der Papierindustrie aufgewandt werden. Wie bereits bei der Chemie- und Pharmaindustrie sind viele der vorhandenen Prozesse auf Dampf als Träger der Prozesswärme ausgelegt. Darum erfolgt modellseitig eine Elektrifizierung der Dampfbereitstellung (und keine Elektrifizierung z. B. der Trocknungsprozesse selbst). Zur Verfügung stehen Elektrodenkessel (marktverfügbar) und Kompressions-Wärmepumpe (absehbar marktverfügbar), welche in einem Verhältnis von 50:50 (Nahrung) bzw. 66:34 (Papier) zum Einsatz kommen. Insgesamt kann der Brennstoffverbrauch der Nahrungs- und Papierindustrie im Max-E-Szenario bis 2060 um ca. 4.8 PJ bzw. 0,5 PJ (-78/-65 % ggü. BAU-Szenario) gesenkt werden. Gleichzeitig erhöht sich der Elektrizitätsverbrauch um 2.6 PJ bzw. 0.4 PJ. Die Elektrifizierung der Dampfbereitstellung weist damit eine (im Mittel der beiden Elektrifizierungstechnologien) um 45 % bzw. 22 % höhere Energieeffizienz auf als die konventionellen Verfahren.

Tabelle 4: Differenz beim Brennstoffverbrauch nach Branchen

Max-E- minus BAU-Szenario, 2030–2060, in PJ, Delta (ggü. BAU-Sz.) in Prozent; Brennstoffe ohne Fern-/EE-Wärme

NOGA 2008	Branche	Prozess(e)	2030	2040	2050	2060	Δ 2060
Hochtemperatur-Prozesswärme			-3.8	-16.2	-20.7	-22.9	-70%
2000, 2100	Chemie, Pharma (Dampf)		-2.1	-9.7	-10.4	-9.6	-83%
2010	Grundstoffchemikalien	Destillieren	-0.3	-1.2	-1.3	-1.2	-83%
2050	Sonstige Chemikalien	Destillieren, Trocknen	-1.6	-7.6	-8.2	-7.4	-83%
2100	Pharma	Destillieren, Trocknen	-0.3	-0.9	-0.9	-0.9	-83%
2300	Mineralien		-0.7	-1.8	-3.6	-6.4	-50%
2310	Glas	Schmelzen	-0.7	-1.6	-1.4	-1.2	-100%
2320, 2331, 2340	Keramik	Trocknen, Brennen	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-96%
2332	Ziegel	Trocknen, Brennen	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-96%
2351	Zement	Kalzinieren	0.0	-0.2	-2.0	-4.9	-43%
2400, 2500	Metalle		-0.8	-3.6	-5.3	-5.8	-87%
2410, 2430, 2451, 2452	Eisen/Stahl	Erhitzen, Giessen	-0.4	-1.9	-3.0	-3.5	-86%
2442	Aluminium	Erhitzen, Glühen	-0.1	-0.6	-0.7	-0.7	-100%
2441, 2443, 2444, 2445, 2453, 2454	Sonstige NE-Metalle	Schmelzen, Erhitzen	-0.01	-0.03	-0.02	-0.01	-92%
2500	Metallerzeugnisse	Vorerwärmen, Härten, Glühen	-0.2	-1.0	-1.5	-1.6	-84%
2800, 2900, 3000, 4100, 4200, 4300	Sonstige		-0.3	-1.2	-1.4	-1.2	-81%
2800, 2900, 3000	Maschinenbau	Giessen, Vorerwärmen, Härten, Glühen	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-87%
4100, 4200, 4300	Bau	Schweissen, Erhitzen	-0.2	-0.9	-1.1	-0.9	-80%
Dampf (Niedertemperatur)			-1.1	-5.1	-5.7	-5.3	-77%
1000	Nahrung	Trocknen	-0.8	-4.2	-5.0	-4.8	-78%
1700	Papier	Trocknen, TMP-Verfahren	-0.4	-0.9	-0.7	-0.5	-65%
gesamt			-5.0	-21.3	-26.3	-28.2	-72%

Eigene Darstellung

© Prognos 2025

Tabelle 5: Differenz beim Elektrizitätsverbrauch nach Branchen

Max-E- minus BAU-Szenario, 2030–2060, in PJ, Delta (ggü. BAU-Sz.) in Prozent

NOGA 2008	Branche	Prozess(e)	2030	2040	2050	2060	Δ 2060
	Hochtemperatur-Prozesswärme		2.7	11.4	15.4	18.1	+254%
2000, 2100	Chemie, Pharma (Dampf)		1.4	6.4	6.9	6.4	+173%
2010	Grundstoffchemikalien	Destillieren	0.2	0.8	0.9	0.8	+134%
2050	Sonstige Chemikalien	Destillieren, Trocknen	1.1	5.1	5.4	5.0	+239%
2100	Pharma	Destillieren, Trocknen	0.2	0.6	0.6	0.6	+62%
2300	Mineralien		0.4	1.2	3.2	6.3	+4419%
2310	Glas	Schmelzen	0.4	1.0	0.9	0.8	+551%
2320, 2331, 2340	Keramik	Trocknen, Brennen	0.0	0.0	0.1	0.1	n.a.
2332	Ziegel	Trocknen, Brennen	0.0	0.0	0.0	0.1	12541%
2351	Zement	Kalzinieren	0.0	0.2	2.2	5.3	n.a.
2400, 2500	Metalle		0.6	2.8	4.1	4.5	+153%
2410, 2430, 2451, 2452	Eisen/Stahl	Erhitzen, Giessen	0.3	1.4	2.2	2.6	+113%
2442	Aluminium	Erhitzen, Glühen	0.1	0.5	0.7	0.6	+131%
2441, 2443, 2444, 2445, 2453, 2454	Sonstige NE-Metalle	Schmelzen, Erhitzen	0.01	0.02	0.02	0.01	+80%
2500	Metallerzeugnisse	Vorerwärmen, Härten, Glühen	0.2	0.8	1.2	1.3	+690%
2800, 2900, 3000, 4100, 4200, 4300	Sonstige		0.2	0.9	1.1	0.9	+259%
2800, 2900, 3000	Maschinenbau	Giessen, Vorerwärmen, Härten, Glühen	0.1	0.3	0.3	0.2	+67%
4100, 4200, 4300	Bau	Schweissen, Erhitzen	0.1	0.7	0.8	0.7	n.a.
	Dampf (Niedertemperatur)		0.7	3.0	3.3	3.0	+496%
1000	Nahrung	Trocknen	0.4	2.3	2.7	2.6	+433%
1700	Papier	Trocknen, TMP-Verfahren	0.3	0.7	0.5	0.4	n.a.
gesamt			3.4	14.4	18.6	21.2	+273%

n.a. = nicht anwendbar (kein Elektrizitätsverbrauch im BAU-Szenario)

Tabelle 6: Differenz bei den Treibhausgasemissionen nach Branchen

Max-E- minus BAU-Szenario, 2030–2060, in kt CO₂e, Delta (ggü. BAU-Sz.) in Prozent

NOGA 2008	Branche	Prozess(e)	2030	2040	2050	2060	Δ 2060
Hochtemperatur-Prozesswärme			-202	-807	-977	-1001	-74%
2000, 2100	Chemie, Pharma (Dampf)		-100	-435	-441	-376	-83%
2010	Grundstoffchemikalien	Destillieren	-12	-53	-53	-44	-83%
2050	Sonstige Chemikalien	Destillieren, Trocknen	-73	-330	-331	-276	-83%
2100	Pharma	Destillieren, Trocknen	-16	-52	-56	-57	-83%
2300	Mineralien		-40	-105	-175	-254	-54%
2310	Glas	Schmelzen	-40	-93	-84	-74	-100%
2320, 2331, 2340	Keramik	Trocknen, Brennen	0	-2	-8	-10	-96%
2332	Ziegel	Trocknen, Brennen	0	-1	-4	-5	-96%
2351	Zement	Kalzinieren	0	-8	-79	-165	-43%
2400, 2500	Metalle		-44	-198	-286	-309	-87%
2410, 2430, 2451, 2452	Eisen/Stahl	Erhitzen, Giessen	-24	-107	-165	-188	-86%
2442	Aluminium	Erhitzen, Glühen	-7	-30	-38	-36	-100%
2441, 2443, 2444, 2445, 2453, 2454	Sonstige NE-Metalle	Schmelzen, Erhitzen	-1	-1	-1	-1	-92%
2500	Metallerzeugnisse	Vorerwärmen, Härten, Glühen	-12	-59	-82	-85	-84%
2800, 2900, 3000, 4100, 4200, 4300	Sonstige		-18	-69	-74	-61	-81%
2800, 2900, 3000	Maschinenbau	Giessen, Vorerwärmen, Härten, Glühen	-4	-15	-14	-12	-87%
4100, 4200, 4300	Bau	Schweissen, Erhitzen	-13	-54	-60	-50	-80%
Dampf (Niedertemperatur)			-53	-227	-231	-200	-77%
1000	Nahrung	Trocknen	-38	-195	-208	-185	-78%
1700	Papier	Trocknen, TMP-Verfahren	-15	-32	-23	-15	-65%
gesamt			-255	-1035	-1208	-1201	-74%

Eigene Darstellung

© Prognos 2025

3.4 Befragung der Industrie zur Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme

In Rahmen des Projektes wurden ExpertInnen-Interviews durchgeführt, um eine qualitative Einschätzung zur Elektrifizierung der Hochtemperaturwärme zu erhalten. Dafür wurden im Zeitraum von September 2024 bis Januar 2025 insgesamt sieben Interviews mit verschiedenen Akteuren aus der Privatwirtschaft und den Verbänden der energieintensiven Branchen sowie zwei mit Energieversorgungsunternehmen (EVU) geführt. Für die Durchführung der Interviews wurden Fragen jeweils für Industrieunternehmen und für EVU gesammelt, in einem Leitfaden zusammengestellt und vorab an die Interviewpartner versendet. Von den insgesamt 26 (z. T. wiederholt) angefragten ExpertInnen haben 17 abgesagt oder nicht reagiert (Tabelle 7). Es konnten somit nicht die geplanten zwölf Interviews durchgeführt werden, insbesondere fanden keine Gespräche mit den Branchen NE-Metalle, Keramik, Glas und mineralische Erzeugnisse statt.

Tabelle 7: Interviewanfragen und durchgeführte Interviews

Branche	angefragt	abgesagt oder unbeantwortet	geführt
Stromsystem (EVU)	6	4	2
Zement	3	1	2
Keramik	3	3	0
Glas (Flachglas)	2	2	0
NE-Metalle (Herstellung und Bearbeitung)	5	5	0
Maschinen- und Fahrzeugbau	2	1	1
Erzeugnisse aus Beton, Zement, Gips (insbes. Steinwolle)	1	1	0
Kalk	1	0	1
Chemie, Pharma	1	0	1
Eisen/Stahl (Herstellung)	1	0	1
Ziegel	1	0	1
Summe	26	17	9

Quelle: eigene Darstellung

© Prognos 2025

Die Leitfragen für produzierende Unternehmen beziehen sich auf die folgenden Kernthemen zur Elektrifizierung der Hochtemperatur-Prozesswärme:

- a) Status quo der Hochtemperatur-Prozesswärme,
- b) Ansätze zur Dekarbonisierung der Branche,
- c) Mögliche Rolle der Elektrifizierung und deren Potential in der Branche,
- d) Vorbedingungen und Zeitplan einer geplanten oder möglichen Elektrifizierung,
- e) Hindernisse und Risiken bei der Integration dieser Technologien,
- f) Instrumente (des Staates) zur Beschleunigung der Elektrifizierung,
- g) Lokale Auswirkungen auf den Strombedarf und -anschluss.

Die Leitfragen an die EVU konzentrierten sich auf folgende Aspekte:

- a) Rolle der EVUs bei der Bereitstellung von Hochtemperatur-Prozesswärme,
- b) Technische Aspekte der Stromnetze (Engpässe, Stabilität),
- c) Regulatorik der Stromnetze (Flexibilität, Netzentgelte).

Die Leitfäden finden sich im Anhang.

Status quo der Hochtemperatur-Prozesswärme

Die ExpertInnen definieren die Hochtemperaturgrenze der Prozesswärme je nach Branche und Anwendung unterschiedlich. Für die Branchen wie Zement, Kalk und Ziegel ist der Brennprozess, der ab 1'000 °C stattfindet, der einzige HT-Prozess. Entsprechend werden mehr als 85 % des Energieverbrauchs für diesen Prozess eingesetzt. Für die Stahlherstellung wird die Hochtemperaturgrenze ab 500 °C definiert. Neben Schmelzen (um 1'600 °C) und Walzen (um 1'200 °C) wird Stahl oder Eisen um 500 °C entspannt. Für den Schmelzprozess (im EAF) wird Strom eingesetzt und weist einen Anteil von 60 % am Gesamtverbrauch aus. Für die Chemie- und Pharmaindustrie wird, aufgrund der unterschiedlichen Prozesse, die Grenze ab 130 °C definiert. Bis auf diese Abweichung stimmt die Definition der Hochtemperatur der ExpertInnen mit der Literatur und den Annahmen von Prognos überein. Der meistgenutzte Energieträger zur Erzeugung der Wärme ist Erdgas. Die Zementindustrie setzt dagegen vorrangig Sekundärbrennstoffe (überwiegend sowohl Industrie- als auch Siedlungsabfälle) ein.

Die meisten ExpertInnen weisen darauf hin, dass sich die Unternehmen selbst zum Ziel gesetzt haben, ihre Produktionsprozesse zu dekarbonisieren, und dies durch verschiedene Ansätze bereits umsetzen. Die prozessbedingten (geogenen) Emissionen jedoch spielen, besonders bei der Zement-, Kalk-, und (untergeordnet) Ziegelindustrie, eine wesentliche Rolle. Damit ist eine Elektrifizierung der Prozesse allein nicht ausreichend, um eine CO₂-arme Produktion zu erreichen.

Mögliche Rolle und Potential einer HT-PW-Elektrifizierung

Die Befragten sind der Meinung, dass die meisten der Hochtemperatur-Prozesse theoretisch elektrifiziert werden könnten. Beispielweise bei der Zement- und Kalkindustrie kann das Brennen mittels des LEILAC⁵-Prozesses (zumindest teilweise) elektrifiziert werden. Andere Experten erwähnten Hybridlösungen, wobei Elektrizität kombiniert mit Brennstoffen (konventionell: Erdgas, alternativ: Wasserstoff oder PtG) zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden kann. Der Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen ist am unteren Ende des Temperaturniveaus gut möglich. Andere in Betracht gezogene Technologien sind Induktionsöfen, Widerstands- und Mikrowellenheizungen. Keine der befragten Personen hat konkrete Pläne zur Elektrifizierung seiner Kernprozesse. Es werden hingegen alternative Ansätze zur Dekarbonisierung wie der Einsatz alternativer Brennstoffe (Wasserstoff, PtG und Biogas) in Betracht gezogen. Wenige Befragte haben angemerkt, dass bereits einige untergeordnete Prozessschritte elektrifiziert wurden.

Hemmnisse und Chancen einer HT-PW-Elektrifizierung

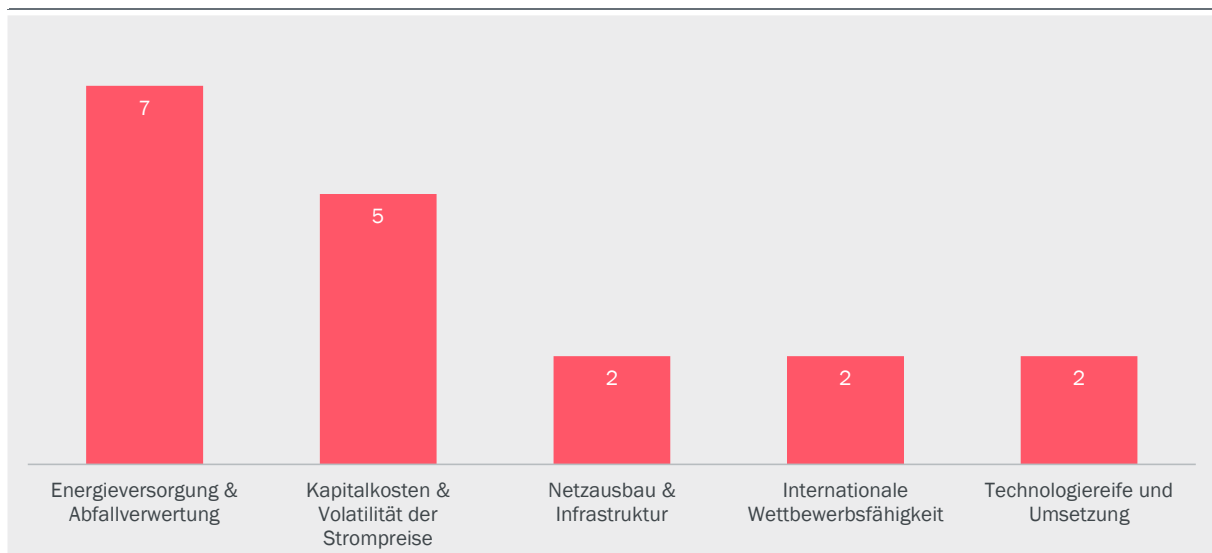
Während der Gespräche wurden Hindernisse und Risiken thematisiert, die die Umstellung auf Strom erschweren. Abbildung 7 stellt diese Faktoren und die Anzahl der Nennungen dar. Am häufigsten wurde genannt, dass die Umstellung auf Strom aufgrund des erhöhten Strombedarfs und der Sicherheit der Energieversorgung risikobehaftet sei. Von der Zementindustrie kam die

⁵ LEILAC: Low Emissions Intensity Lime and Cement

Aussage, dass die Werke aktuell eine wesentliche Menge von Abfall als Brennstoff nutzten und dieser vollständig (stoffliche Rückstände) in Zement integriert würde. Die Verwendung von Abfall sei für die Energieversorgungssicherheit wichtig: Im Falle einer Umstellung auf Elektrizität sei die Abfallverwertung in der Zementindustrie gefährdet. Die frei werdenden Abfallmengen könnten nicht von den bestehenden Kehrrecht-Verwertungsanlagen verbrannt werden, was zu mehr Deposition führte. Weitere Hemmnisse, die mehrmals genannt wurden, sind die Volatilität der Strompreise und die hohen Kapitalkosten zur Umstellung der Prozesse. Beide stellten eine wesentliche Hürde dar, weil durch die Umstellung eine neue und weniger bekannte Technologie eingesetzt würde, die hohe Kapitalkosten erforderte und (aufgrund möglicherweise hoher Strompreise) auch die Betriebskosten erhöhen könnte. Des Weiteren stellen die neuen und z. T. noch nicht ausgereiften Technologien sowie der langsame Netzausbau weitere grosse Risiken dar. Die Anpassung der Netzanschlussleistung und die dafür notwendige Infrastruktur werden als Hindernis für Unternehmen und Energieversorger genannt. Diese Faktoren gefährden zusätzlich die internationale Wettbewerbsfähigkeit.

Abbildung 7: Hemmnisse einer HT-PW-Elektrifizierung

Anzahl der Nennungen



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der durchgeführten Interviews

Einige ExpertInnen meinen, dass die Elektrifizierung auch Chancen bieten könne. Abbildung 8 stellt diese Faktoren und die Anzahl der Nennungen dar. Dass die Elektrifizierung eine CO₂-ärmere Produktion ermöglicht, wurde am häufigsten genannt. Des Weiteren wird als positiv bewertet, dass eine Umstellung auf Strom mehr Flexibilität bei der Produktion ermöglichte und durch die atypische Netznutzung eine Reduktion der Stromkosten möglich sei. Generell jedoch sehen nur wenige Befragte die Elektrifizierung von HT-PW als Chance.

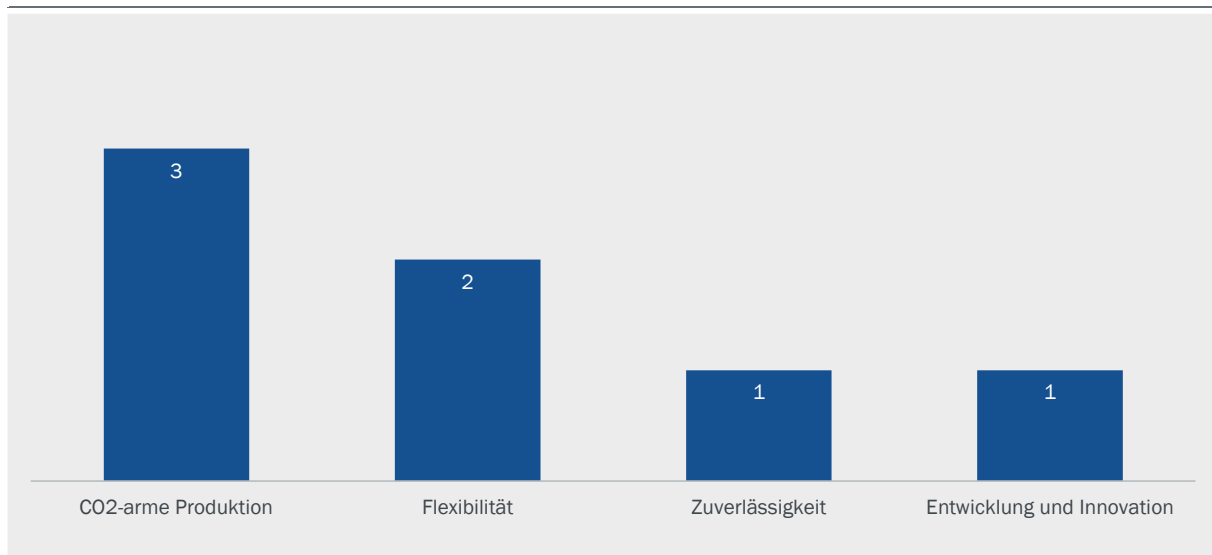
Die oben genannten Hemmnisse in Bezug auf Technologiereife und Umsetzung sowie zu den Kapitalkosten stimmen mit den in der Literatur beschriebenen Hemmnissen überein (vgl. Anhang – Technologiesteckbriefe) [Agora+ISI 2024, UBA 2023, Cu 2015]. Laut der Literatur geht mit der Umstellung auf Strom oft ein grosser Umbau einher, angefangen bei dem Umbau der Starkstromanschlüsse und Anpassung der Transformatoren. Hinzu kommt, dass aufgrund der noch nicht marktreifen Technologie in vielen Fällen noch keine praktischen Erfahrungen vorliegen.

Die Interviews bestätigen, dass die hohen Investitionskosten und die derzeitigen Strompreise eine Umstellung nicht wirtschaftlich erscheinen lassen. In der Literatur werden die Faktoren Energieversorgungssicherheit sowie die internationale Wettbewerbsfähigkeit nicht erwähnt. Für die Befragten ist jedoch die Versorgungssicherheit ein höchst wichtigstes Thema.

Die Befragten bestätigen die in der Literatur beschriebene Chance einer emissionsarmen Produktion. Die anderen positiven Wirkungen bei vielen Technologien, wie ein geringerer Energiebedarf, höhere Temperaturen und höhere Effizienz, werden hingegen nicht genannt. Dem gegenüber werden die Faktoren wie das Potential zur Flexibilisierung, die Zuverlässigkeit während des Betriebs und die Chance auf Innovation und Entwicklung angedeutet.

Abbildung 8: Chancen einer HT-PW-Elektrifizierung

Anzahl der Nennungen



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der durchgeführten Interviews

Vorbedingungen einer HT-PW-Elektrifizierung

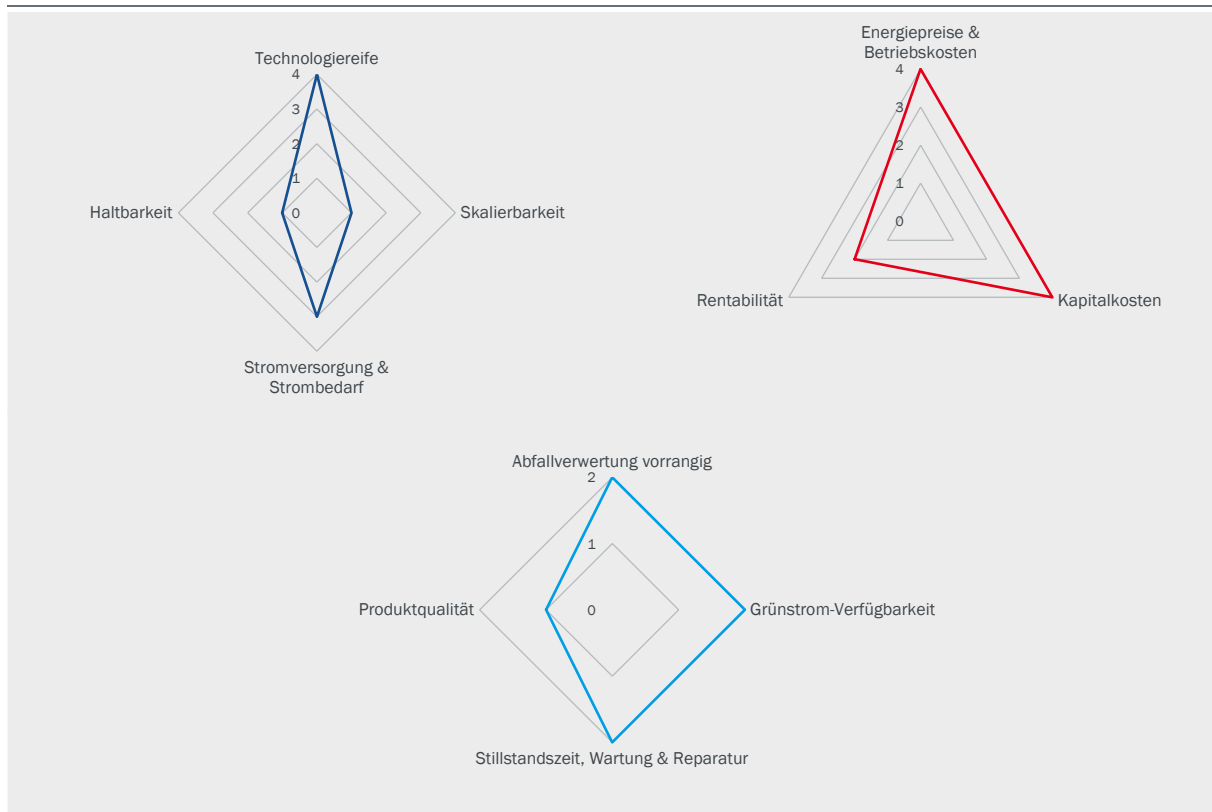
Im Zusammenhang mit der Elektrifizierung nennen die Befragten zentrale Kriterien, die für die Entscheidung zur Umstellung eine wesentliche Rolle spielen. Die Kriterien wurden in technische Aspekte, wirtschaftliche Aspekte und Aspekte zur Implementierung und Akzeptanz eingeteilt (Abbildung 9).

Als technische Kriterien wird die Technologiereife mehrmals genannt. Der (erhöhte) Strombedarf stellt ein weiteres wesentliches mehrfach genanntes technisches Kriterium dar. Generell meinen die ExpertInnen, dass für die Umstellung eine marktreife Technologie mit angemessenem Anstieg des Strombedarfs und eine sichere Versorgung wichtig sei.

Weiterhin legen die Befragten einen hohen Wert auf die Energiepreise und erforderlichen Kapitalkosten. Darüber hinaus wird darauf hingewiesen, dass bei der Implementierung die damit verbundenen Stillstandzeiten und Produktionsunterbrechungen berücksichtigt werden müssen. Die Verfügbarkeit von Grünstrom und die vorrangige Abfallverwertung (relevant für die Zementindustrie) sind für die Akzeptanz einer HT-PW-Elektrifizierung entscheidend.

Abbildung 9: Kriterien zur Umsetzung einer HT-PW-Elektrifizierung

Anzahl der Nennungen; oben links: technische Kriterien, oben rechts: wirtschaftliche Kriterien, unten: Kriterien zur Akzeptanz und Implementierung



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der durchgeführten Interviews

Die Hemmnisse für eine Umstellung werden auch dadurch bestätigt, dass die meisten Befragten keine Förderprogramme für Elektrifizierung in der Schweiz kennen. Nur zwei von neun Befragten nannten den Innovationsfonds zum Klima- und Innovationsgesetz und die mögliche Partnerschaft mit Innosuisse⁶ zur Umsetzung innovativer Projekte. Weiterhin war einigen ExpertInnen bewusst, dass die gesetzlichen Vorgaben durch das Klima- und Innovationsgesetz sowie die Zusammenarbeit mit der Energie-Agentur der Wirtschaft (EnAW) die Elektrifizierung fördern.

Auswirkungen auf das Stromsystem bei einer HT-PW-Elektrifizierung

Die meisten Befragten sind der Meinung, dass die Elektrifizierung eine Vervielfachung ihres Strombedarfs verursachen könnte. Es war den Befragten nicht möglich, die möglichen Auswirkungen zu quantifizieren. Der erhöhte Strombedarf hinsichtlich der Technologien zur CO₂-Abscheidung und -Verflüssigung ist einigen Branchen-ExpertInnen bewusst und die Konsequenzen auf die Anschlussleistung werden untersucht. Für Nieder-Temperaturanwendungen wie Raumwärme nutzten die meisten Befragten bereits Abwärme aus den Prozessen.

Engpässe in der Stromversorgung sind nach Aussage der Befragten derzeit nicht erkennbar, da die Elektrifizierung der Industriebetriebe noch nicht weit fortgeschritten sei. Die Energieversorgungsunternehmen erhalten fast keine Anfragen bezüglich der Notwendigkeit etwaiger

⁶ Innosuisse ist die schweizerische Agentur für Innovationsförderung, <https://www.innosuisse.admin.ch/de>, Zugriff am 30.01.2025

Anpassungen der Netzanschlüsse oder Leistungsbereitstellung bei einer Elektrifizierung der Hochtemperatur-Prozesswärme. Darüber hinaus wird die positive Wirkung von dynamischen Netzentgelten auf die Flexibilität und Elektrifizierung gering eingestuft, weil das Flexibilitätspotential limitiert ist und die Gestaltung von Netzentgelten viel regionaler und spezifischer sein müsste. Daher deuten die ExpertInnen an, dass regulatorische Bedingungen zur Förderung von Flexibilität und Elektrifizierung angepasst oder ergänzt werden sollten.

Fazit

Die Hochtemperatur-Prozesswärme spielt eine wesentliche Rolle bei den befragten Unternehmen. Aktuell wird dieser Wärmebedarf im Wesentlichen durch Erdgas und (im Falle der Zementherstellung) durch Abfall gedeckt. Die Branchen müssen sich mit der Verringerung und der Vermeidung der energie- und prozessbedingten Emissionen auseinandersetzen. Für erstere werden unterschiedliche Ansätze, wie der Einsatz von Wasserstoff, Biogas und synthetischen Brennstoffen (PtG), in Betracht gezogen. Die prozessbedingten CO₂-Emissionen können durch Elektrifizierung nicht vermindert werden, weshalb diese Technologie für einige Branchen keine Lösung zur Emissionsminderung darstellt. Darüber hinaus sehen die Firmen viele Unwägbarkeiten bei einer HT-PW-Elektrifizierung, wie die Energieversorgungssicherheit, hohe Strompreise und hohe Kapitalkosten, welche derzeit durch Förderprogramme nicht adressiert werden. Dementsprechend haben die Unternehmen derzeit keine konkreten Umsetzungspläne. Seltener wird die Elektrifizierung als Chance gesehen, die Produktion emissionsarm zu gestalten und die Flexibilität zu erhöhen. Praktische Faktoren, wie Marktreife der Technologie, der Strombedarf, die nötigen Investitionen und die Stillstandzeiten während der Implementierung, zählen als wichtige Kriterien bei der Entscheidung für eine HT-PW-Elektrifizierung. Zusammengefasst stellen die z. T. noch jungen Elektrifizierungs-Technologien, die hohen Kapitalkosten, die Stromversorgungssicherheit und die verbleibende Prozessemissionen grosse Hürden für eine Elektrifizierung der industriellen Produktion dar.

4 Auswirkungen einer umfassenden Elektrifizierung von Hochtemperatur-Prozesswärme auf das Stromsystem

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen der Umsetzung des Elektrifizierungspotenzials auf die Schweizer Stromversorgung beschrieben, falls das Potenzial der Elektrifizierung von industrieller Hochtemperatur-Prozesswärme aus Kapitel 3 maximal ausgeschöpft würde. Die folgenden drei Fragestellungen stehen im Fokus:

- Wie reagieren die flexiblen Verbraucher (Pumpspeicher) auf den zusätzlichen Strombedarf?
- Wie verändern sich die Import- und Exportbilanz, sowohl in einer jährlichen als auch in einer saisonalen Betrachtung?
- Welche Auswirkungen hat dies auf die THG-Emissionen des Stromsektors?
- Welche Flexibilität kann die Industrie für das Stromsystem liefern.

Das Vorgehen zur Beantwortung der Fragen ist klar eingegrenzt auf eine vergleichende Untersuchung – eine Neuberechnung des gesamten Stromsystems findet als Sensitivätsbetrachtung statt: Die Auswirkungen einer vollständigen Ausschöpfung des HT-PW-Elektrifizierungspotenzials wird einem Referenzszenario ohne diese Elektrifizierung gegenübergestellt und alle anderen Parameter unverändert beibehalten. Als Referenz dient das Szenario ZERO Basis aus den Energieperspektiven 2050+ [BFE 2021] mit einer AKW-Laufzeit von 60 Jahren⁷. Für die Untersuchung wird das Prognos Strommarktmodell eingesetzt, das in stündlicher Auflösung das europäische Stromsystem simuliert, womit Auswirkungen der Elektrifizierung auf Strompreise, THG-Emissionen, Höchstlast sowie Im- und Exporte analysiert werden können.

Angeboten wurden neben der Berechnung einer vollständigen HT-PW-Elektrifizierung auch zwei Sensitivitäten, in denen nur ein Teil des Potenzials elektrifiziert wird, wobei einmal eine hohe und ein andermal eine geringe Flexibilität des Stromverbrauchs angenommen werden sollte. Angesichts des höchstens um 7 % höheren Strombedarfes im Falle der vollständigen HT-PW-Elektrifizierung ist der Mehrwert einer Graduierung nicht gegeben – die Resultate von Zwischenschritten werden eine quasi-lineare Proportionalität aufweisen.

4.1 Stromnachfrage

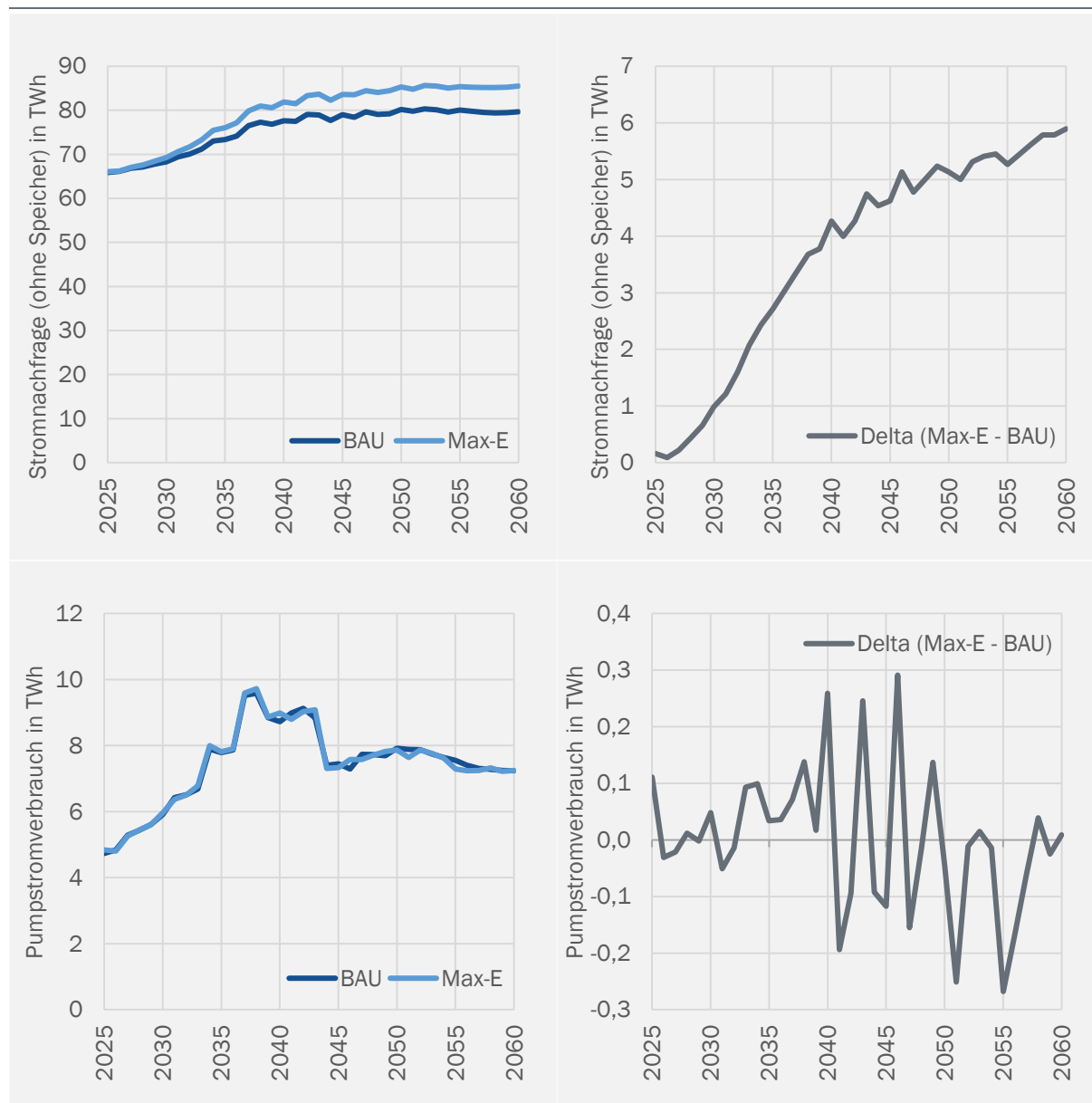
Im Max-E-Szenario steigt die Stromnachfrage der Schweiz gegenüber dem BAU-Szenario bis ins Jahr 2035 zusätzlich um etwa 2 TWh und bis 2050 zusätzlich um 6 TWh an (Abbildung 10, oben links). Die Stromnachfrage der Pumpspeicherkraftwerke verändert sich durch die geänderte Preisstruktur dabei nur geringfügig in einem Bereich von -0.2 bis 0.2 TWh (Abbildung 10, unten, rechts). Ursächlich dafür ist, dass durch den zusätzlichen Strombedarf der Industrie sich die Preisunterschiede zwischen verschiedenen Stunden des Jahres verändern, was dazu führt, dass geringfügig mehr oder weniger Stunden ausreichende Preisunterschiede haben, die einen wirtschaftlichen Betrieb der Pumpspeicherkraftwerke unter Berücksichtigung von Wirkungsgradverlusten ermöglichen. Eine detaillierte Betrachtung der Effekte auf die Wirtschaftlichkeit der Pumpspeicherkraftwerke erfolgte im Rahmen dieses Projektes nicht. Jedoch ist zu erwarten, dass

⁷ Stichjahr 2035 mit noch drei AKWs und 2050 mit 100 % Erneuerbaren Energien

aufgrund sowohl der geringen Änderung der Erzeugung als auch der Strompreise die Effekte gering sind.

Abbildung 10: Stromnachfrage

in der Schweiz, 2025–2060; in TWh; je Szenario; oben: Stromnachfrage ohne Speicher, unten: Pumpstromverbrauch



Hinweis: Die «Zickzack»-Kurve unten rechts ist zu erwarten: Pumpspeicher reagieren bereits auf kleine Änderungen der Preisspreizungen.

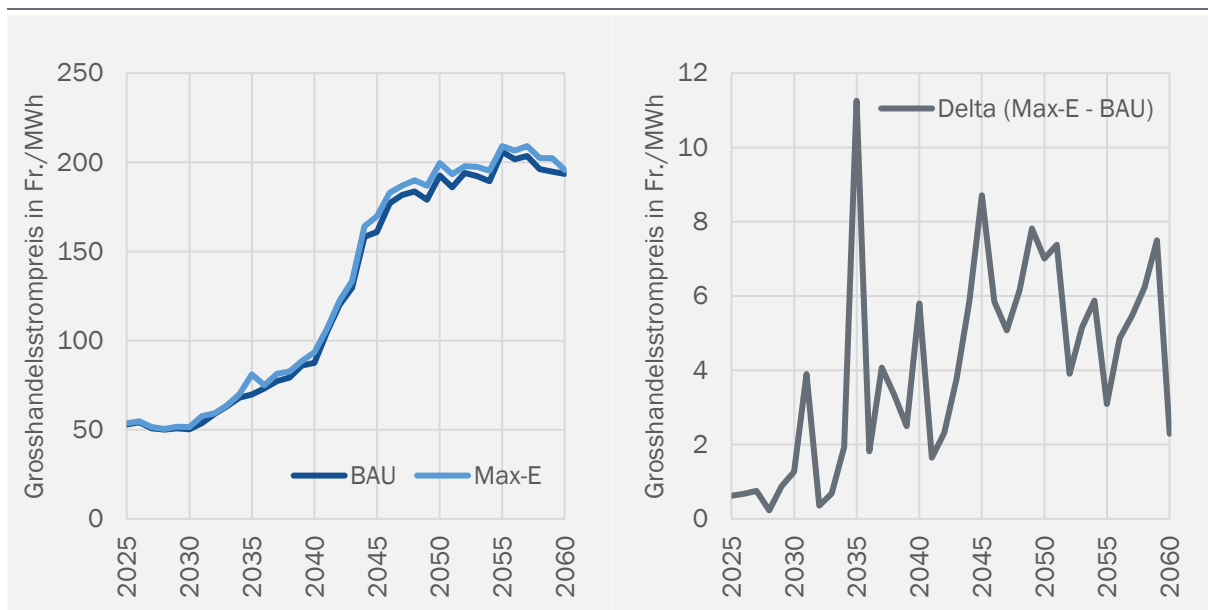
4.2 Großhandelsstrompreise

Die Auswirkungen auf den Großhandelsstrompreis liegen über den gesamten Zeitraum in einer Spanne zwischen +1 und +11 Fr./MWh, im Zeitraum zwischen 2040 und 2060 fällt der Effekt mit +6 Fr./MWh aufgrund der höheren Elektrifizierung und des höheren CO₂-Preises stärker aus als in den Jahren zuvor (Abbildung 11, oben rechts). Die insgesamt eher geringe Auswirkung auf den Preis von gemittelt +3 % erklärt sich zum einen aus der prozentual geringen Änderung an der Gesamtnachfrage und zum anderen aus der starken Einbindung der Schweiz in den europäischen Strommarkt⁸. Wie im Referenzszenario steigt der Großhandelspreis insgesamt sehr stark an, ursächlich dafür ist größtenteils der stark steigende EU-ETS CO₂-Preis, der im Zero Basis Szenario von etwa 110 € im Jahr 2040 auf etwa 350 € im Jahr 2050 ansteigt. Zugrunde liegt dem ein Szenario der EU-Kommission aus dem Jahr 2018. Aus heutiger Sicht ist ein CO₂-Preis in dieser Höhe auch in einem Netto-Null-Szenario unwahrscheinlicher. Bei einem niedrigeren CO₂-Preis wird auch die Preisänderung im Elektrifizierungsszenario in diesem Zeitraum geringer ausfallen.

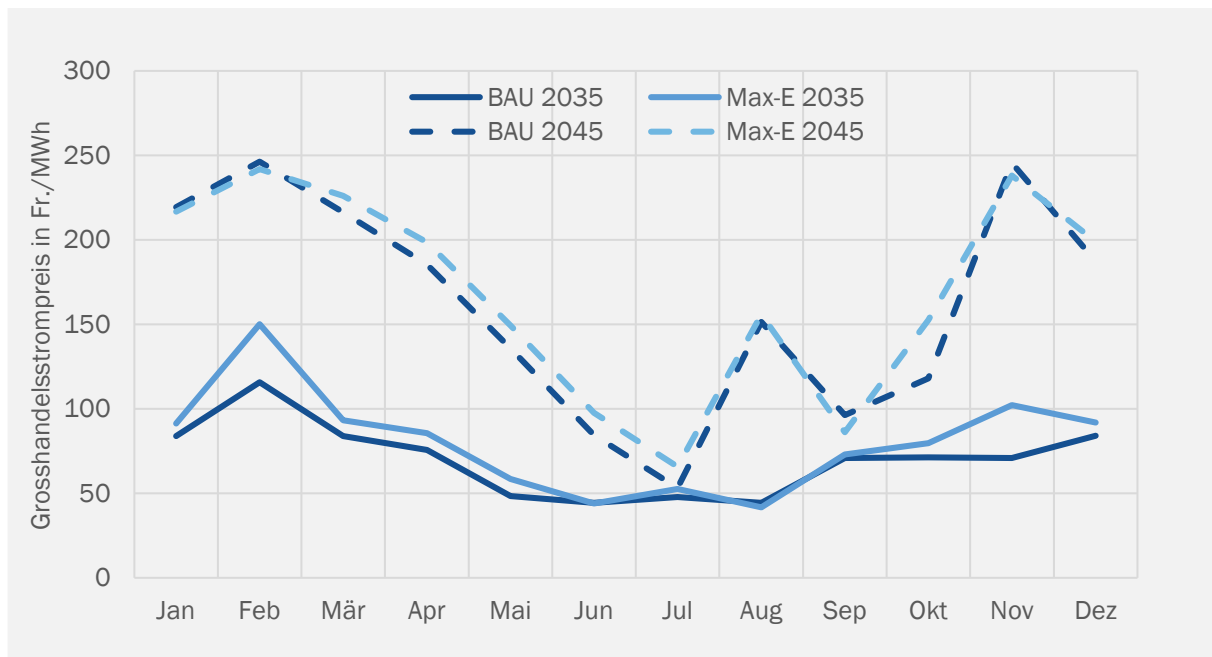
Die unterjährliche Struktur weist ebenfalls geringe Änderungen auf. So steigen die Preise im Max-E-Szenario 2035 im Mittel um 13 % und 2045 um 7 % (Abbildung 11, unten). In einzelnen Monaten des Winterhalbjahres kann die Preissteigerung signifikant sein, jedoch bleibt die unterjährliche Struktur erhalten. Durch die veränderte Optimierung von Pump- und Speicherwasserkraftwerken kommt es in einzelnen Monaten, trotz höheren Preisen im Jahresdurchschnitt, zu leicht geringeren Preisen im Max-E-Szenario. Grund dafür ist, dass durch die geänderte Stromnachfrage Preisunterschiede sinken können und dadurch vereinzelt die Stromnachfrage durch Pumpspeicher an einem Monatsende sinkt, was für diesen Monat einen preisdämpfenden, jedoch für den Folgemonat einen preissteigernden Effekt hat. Dies sind jedoch keine systematischen Effekte, sondern ist abhängig vom gewählten Wetterjahr, da bei einer anderen Erzeugung aus Erneuerbaren Energien und anderem Wasserzufluss, diese, ohnehin kleinen, Effekte nicht zwingend auftreten, oder zu anderen Zeitpunkten auftreten.

Abbildung 11: Grosshandelsstrompreise

in der Schweiz, in Fr./MWh; oben: jährlich 2025–2045, unten: monatlich 2035 und 2045



⁸ Bereits heute liegen die Anteile von Im- und Exporten am gesamten Stromverbrauch jeweils zwischen 40 und 60 %.



Eigene Darstellung

© Prognos 2025

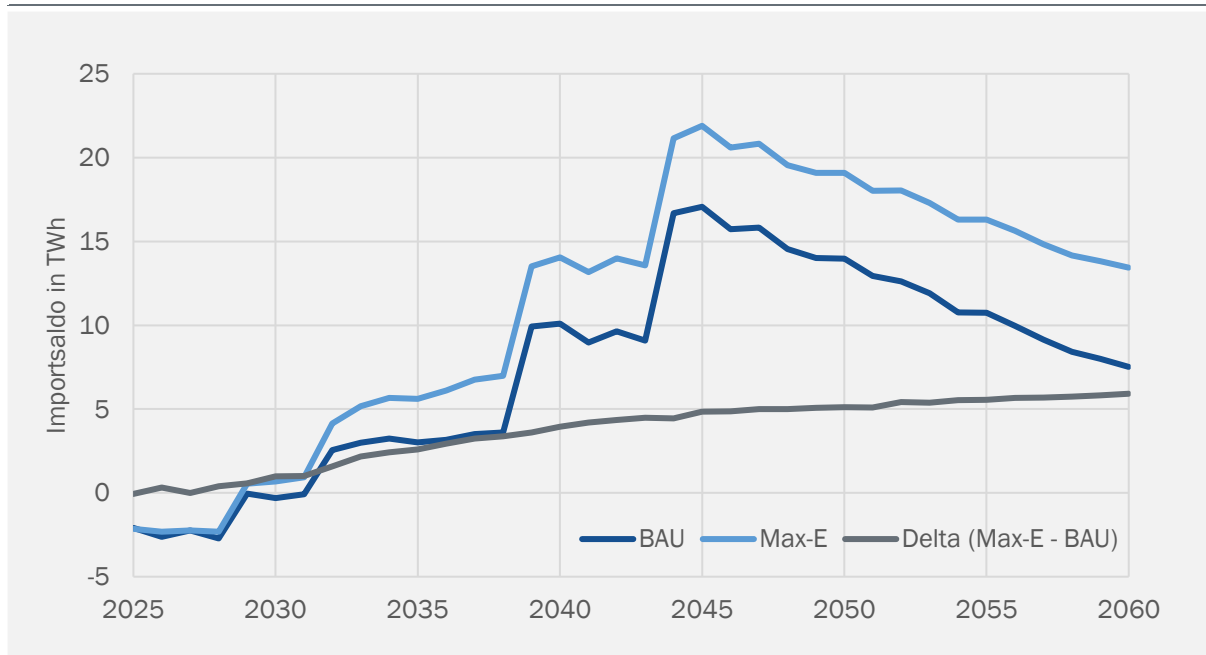
4.3 Importsaldo und Emissionen

Die zusätzliche Nachfrage wird, saldiert, nahezu komplett durch höhere Importe bedient. Ursächlich dafür ist, dass in dem Szenario kein zusätzlicher Ausbau der Erneuerbaren Energien angenommen wurde und effizientere Gaskraftwerke im Ausland zu günstigeren Preisen produzieren können, als der Teil der Schweizer Gaskraftwerke, der nicht schon ohnehin in den meisten Stunden ohne EE-Überschüsse zum Einsatz kommt und daher nur geringfügig die Produktion erhöhen können. Die inländische Gasstromerzeugung erhöht sich in der Spitze lediglich um 0.5 TWh, im Mittelwert um 0.3 TWh (Abbildung 12). Dadurch steigen die jährlichen inländischen Emissionen im Mittel um etwa 0.15 Mt CO₂e und sind damit nahezu vernachlässigbar.

Der zusätzliche Stromimport von im Mittel 3.7 TWh pro Jahr führt im Ausland zu weiteren zusätzlichen Emissionen von etwa 1.5 Mt CO₂e jährlich. Ein Großteil der zusätzlichen Stromnachfrage wird durch Gaskraftwerke bedient. Etwa 20 % der Importe sind bilanzielle Erneuerbare Energien, die zuvor abgeregelt wurden. Der Großteil des Anstieges der Importe ist auf die Abschaltung der Kernkraftwerke zurückzuführen, jedoch erhöht sich durch die zusätzliche Nachfrage der Industrie durch die Elektrifizierung das saldierte Importmaximum um 4 TWh auf fast 22 TWh im Jahr 2045 und sinkt dann bis 2060 nahezu linear auf 13 TWh. Diese zusätzlichen Importe sind durch die hohe Anzahl an Interkonnektoren zum Ausland grundsätzlich unkritisch. Falls ein Teil der Elektrifizierung mit bivalenten oder flexiblen Anlagen erfolgt, statt des im Szenario angenommen durchgängigen Betriebs, verringern sich Risiken auch in Extremsituation noch zusätzlich.

Abbildung 12: Importsaldo

in der Schweiz, für 2035 und 2045, je Szenario,



Eigene Darstellung

© Prognos 2025

4.4 Einordnung

In dem hier gerechneten Vergleichsszenario findet keinerlei Anpassungsreaktion bezüglich des Ausbaus von Erneuerbaren Energien, regelbaren Kraftwerken oder Stromspeichern statt. In der Realität ist davon auszugehen, dass bei einer Elektrifizierung der industriellen Hochtemperatur-Prozesswärme als einen konstant erwartbaren zusätzlichen Stromverbrauch zusätzliche Kapazitäten erreicht werden und die Effekte auf Importmengen und Strompreise somit geringer ausfallen.

Die geringen Auswirkungen der HT-PW-Elektrifizierung auf das Stromsystem, die sich in der Strommarktmodellierung ergeben, stimmen mit den Einschätzungen der befragten Energieversorgungsunternehmen überein, dass durch diese Elektrifizierung keine Verwerfungen zu erwarten seien. Es erhöht sich jedoch die Importabhängigkeit, falls keine zusätzlichen Stromerzeugungskapazitäten im Inland geschaffen werden. Dies ist aus energiewirtschaftlicher Sicht unproblematisch, jedoch kann es aus Gründen der Resilienz politisch und gesellschaftlich erwünscht sein, diesen Mehrbedarf durch zusätzliche inländische Erzeugungskapazitäten auszugleichen, auch falls es im Erwartungswert unwirtschaftlicher sein kann als zusätzliche Stromimporte.

Eine kosteneffizientere Massnahme, um das gleiche Niveau an Versorgungssicherheit und Unabhängigkeit sicherzustellen, kann sein, die regulatorischen Rahmenbedingungen so zu gestalten, dass der Strombedarf flexibilisiert wird und in Engpasssituationen zeitlich verschoben wird oder z. B. bivalente Anlagen von Strom auf langfristig erneuerbare, Gase oder flüssige Energieträger umstellen. Die Flexibilität muss dabei nicht zwingend in der Industrie selbst erbracht werden. Der Mehrbedarf kann in Hinblick auf die Residuallastspitzen auch durch zusätzliche, oftmals günstigere, Flexibilitäten im Verkehrssektor, bei der Gebäudewärme oder durch Batteriespeicher kompensiert werden.

5 Einordnung und Empfehlungen

In diesem Kapitel werden die behandelten Elektrifizierungstechnologien hinsichtlich möglicher THG-Einsparungen, Marktdurchdringungspotenzial, Wechselwirkungen mit dem Stromsystem sowie Förderanreizen – sofern diese anhand der ersten beiden Parameter wünschenswert sind – eingeordnet. Zuvor eruiert eine Analyse der bestehenden Gesetzes- und Förderlandschaft in der Schweiz, in welchem Masse die Einführung bestimmter Elektrifizierungstechnologien von Seiten des Bundes begleitet wird und ob mögliche Förderlücken geschlossen werden sollten. Handlungsempfehlungen aus Schlussfolgerungen der gesamten Arbeiten schliessen das Kapitel ab.

5.1 Gesetzes- und Förderlandschaft

Die Gesetzes- und Förderlandschaft in der Schweiz bietet produzierenden Unternehmen Unterstützung zur Reduktion ihrer CO₂-Emissionen, Steigerung der Energieeffizienz und Förderung erneuerbarer Energien. Sie basiert auf einem eng verzahnten System von nationalen, kantonalen und lokalen Programmen. Die Instrumente reichen von gesetzlichen Vorgaben bis hin zu finanziellen Anreizen und Beratungsangeboten.

Tabelle 8 fasst die für Unternehmen relevanten Gesetze und Förderprogramme sowie deren Bezug zur Elektrifizierung zusammen. Dabei werden auch dezidierte kantonale Programme (exemplarisch für Basel-Stadt und Zürich) aufgeführt. Diese regionalen Programme zielen überwiegend darauf ab, den Einsatz effizienter elektrischer Technologien zu fördern und die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu verringern.

Tabelle 8: Übersicht der Gesetze und Förderprogramme für Unternehmen

Gesetz/Förderprogramm	Beschreibung	Relevanz für Elektrifizierung*
Bundesweite Gesetze und Förderprogramme		
Klima- und Innovationsgesetz (KIG)	Förderung neuartiger Technologien und Prozesse zur Dekarbonisierung, ab 1. Januar 2025 in Kraft.	(direkt) Unterstützt Massnahmen zur Elektrifizierung von Prozessen, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren.
CO₂-Gesetz	Ziel ist eine signifikante Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Schweiz.	(indirekt) CO ₂ -Abgabe und EHS zielen darauf ab, CO ₂ -Emissionen zu verteuern.
Energiegesetz (EnG)	Verpflichtet Unternehmen, den Anteil erneuerbarer Energien zu erhöhen und die Energieeffizienz zu steigern.	(indirekt) Zielt auf Energieeffizienz und Erneuerbare ab.
ProKilowatt	Förderprogramm für Unternehmen zur nachhaltigen Senkung des Stromverbrauchs durch effizientere Maschinen, Prozesse oder Produktionsanlagen.	(indirekt) Fördert den Austausch fossiler Energiequellen durch elektrische Systeme. Fokus liegt auf der Kostenreduktion durch höhere Energieeffizienz.
Wärmepumpenförderung	Zuschüsse für die Installation von Wärmepumpen als Ersatz für fossile Heizsysteme.	(direkt) Förderung elektrischer Heiztechnologien.

Gesetz/Förderprogramm	Beschreibung	Relevanz für Elektrifizierung*
Mobilitätsprogramme	Subventionen zur Förderung von Elektromobilität und Ladeinfrastruktur.	(direkt) Fokus auf die Elektrifizierung des Verkehrs, mit Anreizen für Elektrofahrzeuge. <i>Keinen</i> Bezug zur Elektrifizierung der Prozesswärme.
EnergieSchweiz	Unterstützt Unternehmen und Privatpersonen durch Beratungsangebote und Netzwerke zur Implementierung erneuerbarer Energien sowie bei der Umsetzung innovativer Projekte, die zur Reduktion des Energieverbrauchs beitragen.	(indirekt) Hilft bei der Identifizierung von Möglichkeiten zur Elektrifizierung der Prozesse und Nutzung erneuerbarer Energien.
Förderung Geothermie	Fördert Geothermie-Projekte zur Stromproduktion und direkten Nutzung der Erdwärme für die Wärmeerzeugung	(direkt) Fokus auf Elektrifizierung der Wärmeversorgung.
Rückerstattung Netzzuschlag	Unterstützt stromintensive Unternehmen indem sie sich den Netzzuschlag aus erneuerbaren Energien zum Teil oder vollständig rückerstatten lassen können	(indirekt) Fördert die Nutzung von erneuerbarem Strom.
Kantonale und kommunale Förderprogramme (am Beispiel von Basel und Zürich)		
Gebäudeprogramm	Kooperative Fördermassnahmen von Bund und Kantonen zur energetischen Sanierung von Gebäuden und zur Installation moderner Heizsysteme.	(direkt) Beinhaltet die Förderung von elektrischen Heizsystemen wie Wärmepumpen.
Grossverbraucherartikel	Der Grossverbraucherartikel ist ein Element der Mustervorschriften der Kantone (MuKEn) und erlaubt den Kantonen, Unternehmen mit hohem Energieverbrauch zu verpflichten, ihren Energieverbrauch zu analysieren und zu optimieren.	(indirekt) Fördert die Implementierung energieeffizienter und elektrischer Technologien.
Energieverbrauchs-optimierung für KMU	Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) können eine Zielvereinbarung zur Steigerung der Energieeffizienz über 10 Jahre mit akkreditierten Organisationen abschliessen.	(indirekt) Fördert die Implementierung energieeffizienter und elektrischer Technologien.
Ausschreibung für Stromeinsparung	Unternehmen können einen Förderbeitrag von bis zu 30 % der Investitionskosten für den Ersatz alter Anlagen in Bereichen wie Beleuchtung, Kühlung und Pumpen erhalten.	(keine) Unterstützt die Umrüstung auf energieeffiziente elektrische Systeme, die den Stromverbrauch reduzieren.
Förderung von Wärmepumpen	Klimaprämie für den Austausch fossiler Heizsysteme durch Wärmepumpen; Förderung von 18 Rappen pro eingesparter kWh.	(direkt) Fördert den Einsatz elektrischer Heizsysteme zur Reduzierung des CO ₂ -Ausstosses.
ColorWatt: Energieeffizienz in der Lack- und Farbenindustrie	Programm unterstützt Firmen bei der Reduktion des Stromverbrauchs durch den Austausch alter Geräte und Anlagen (insbesondere Beleuchtung, Lüftung und Kühlung) in der Lack- und Farbenindustrie.	(keine) Fördert den Einsatz effizienter elektrischer Anlagen in der Herstellung.
Stromsparmassnahmen im Weinbau	Unterstützung für spezifische Massnahmen im Weinbau, wie den Ersatz ineffizienter Kühlaggregate, Lüfter und Pumpen.	(keine) Ziel ist die Reduktion des Stromverbrauchs durch den Einsatz moderner elektrischer Geräte.
EFFIZIENZ+	Finanzielle Unterstützung für Unternehmen bei der Umsetzung von Strommassnahmen mit bis zu 90'000 Franken pro Massnahme.	(indirekt) Fördert die Implementierung elektrischer Effizienzmassnahmen in verschiedenen Industrien.
Gewerbliche Kühl- und Gefriergeräte	Förderung von bis zu 30 % der Kosten für den Austausch ineffizienter Kühl- und Gefriergeräte	(keine) Fördert Energieeffizienz von Kühl- und Gefriergeräten in der Lebensmittelindustrie.

Gesetz/Förderprogramm	Beschreibung	Relevanz für Elektrifizierung*
	durch hochmoderne Geräte mit besseren Energieeffizienz.	
Klimafreundliche Kältemittel	Förderung der Modernisierung von Kälteanlagen auf klimafreundliche Kältemittel bis 2025.	(keine) Ziel ist die Verbesserung der Energieeffizienz und Reduzierung der Verwendung umweltschädlicher Chemikalien.
OfficeWatt: Strom sparen im Büro	Programm zur Verbesserung der Energieeffizienz in Bürogebäuden durch Modernisierung von Beleuchtungs- und Klimatisierungssystemen.	(keine) Fördert den Austausch ineffizienter elektrischer Systeme gegen effizientere Lösungen.
Optivent: Effizientere Lüftungen	Förderung des Austauschs oder der Verbesserung von Lüftungssystemen durch effizientere Anlagen mit bis zu 30 % der Investitionskosten.	(keine) Ziel ist die Verbesserung der Energieeffizienz von Lüftungssystemen.
OptiPlastics	Es werden Massnahmen zur Senkung des Stromverbrauchs in der Kunststoffindustrie unterstützt. Gefördert wird der Austausch veralteter Spritzgussmaschinen, Kältemaschinen, Luftkompressoren und Innenbeleuchtung durch energieeffiziente Lösungen.	(keine) Ziel ist die Verbesserung der Energieeffizienz von ohnehin elektrischen Anlagen.
OPTI-ACT	Programm unterstützt Unternehmen der act Cleantech Agentur Schweiz dabei, ihre elektrischen Anlagen und Antriebe (z. B. Lüftungs-, Kälte- und Druckluftsysteme) zu optimieren und so den Stromverbrauch zu senken.	(keine) Ziel ist die Verbesserung der Energieeffizienz von ohnehin elektrischen Anlagen.
ProELA: Energieeffiziente Lüftungsanlagen	Förderangebot für Investitionen in energieeffiziente Lüftungs- und Kälteanlagen, sowohl für Neubauten als auch für Umrüstungen.	(keine) Fördert den Einsatz elektrischer Technologien zur Verbesserung der Energieeffizienz.

*) (direkt) = Elektrifizierung (im Allgemeinen, nicht speziell die der HT-PW) wird direkt adressiert / (indirekt) = Elektrifizierung wird indirekt adressiert, im Fokus stehen jedoch andere Aspekte (z. B. Energieeffizienz, Wirtschaftlichkeit) / (keine) = Elektrifizierung wird nicht adressiert

5.1.1 Bundesebene – Gesetze und Förderprogramme

Klima- und Innovationsgesetz

Das Klima- und Innovationsgesetz (KIG) bildet den Rahmen für die Klimapolitik der Schweiz. Es wurde am 18. Juni 2023 angenommen und trat am 1. Januar 2025 in Kraft. Es zielt darauf ab, die Treibhausgasemissionen bis 2050 auf null zu reduzieren und stellt sicher, dass die Schweiz bis zu diesem Zeitpunkt klimaneutral wird. Im Zentrum stehen die Bereiche Gebäude, Verkehr und Industrie, in denen Massnahmen zur Reduktion der Emissionen fokussiert werden [BFE 2024d].

Für das Gesetz sind jährliche Fördermittel von insgesamt 200 Millionen Franken vorgesehen, beschränkt auf einen Zeitraum von sechs Jahren. Unternehmen werden bei Investitionen in neuartige Technologien und Prozesse gefördert, die zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen führen. Ein weiterer Schwerpunkt des KIG liegt auf dem Ersatz fossiler Heizungen sowie der Unterstützung von Unternehmen, die klimafreundliche Heizsysteme einführen. Zudem soll die

Abhängigkeit der Schweiz von fossilen Energieträgern verringert werden, insbesondere im Kontext der internationalen Energieversorgungskrisen, wie dem Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine.

Die Umsetzung des Klimaschutzes und die Entwicklung neuer Technologien werden in Zusammenarbeit mit Bund und Kantonen organisiert, wobei eine Vorbildfunktion der öffentlichen Hand angestrebt wird. Die Bevölkerung wird nicht über neue Abgaben belastet, während gleichzeitig Massnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels gefordert werden. Das Klima- und Innovationsgesetz ist als ein zentraler Baustein zur Förderung der Nachhaltigkeit und zur Sicherstellung der künftigen Energieversorgung der Schweiz geplant.

CO₂-Gesetz

Das CO₂-Gesetz [BFE 2024e] bildet eine zentrale Grundlage der Klimapolitik und hat das Ziel, die Treibhausgasemissionen in der Schweiz bis zum Jahr 2030 um mindestens 50 % im Vergleich zum Jahr 1990 zu reduzieren. Es setzt auf zwei marktwirtschaftliche Instrumente und Verpflichtungen, um Emissionen in verschiedenen Sektoren zu senken: die CO₂-Abgabe sowie das Emissionshandelssystem.

- **CO₂-Abgabe**
Unternehmen und Haushalte, die fossile Brennstoffe wie Heizöl, Benzin oder Erdgas nutzen, zahlen eine Abgabe auf den CO₂-Ausstoss. Der grösste Teil der Erträge aus der CO₂-Abgabe wird an die Bevölkerung und die Wirtschaft zurückverteilt. Diese Abgabe schafft einen finanziellen Anreiz, auf klimaschonendere Technologien wie elektrische Heizsysteme oder Wärmepumpen umzusteigen. Für Unternehmen besteht jedoch die Möglichkeit, sich von der Abgabe zu befreien, wenn sie sich zu messbaren Emissionsminderungen verpflichten und an Zielvereinbarungen teilnehmen.
- **Emissionshandelssystem (EHS)**
Dieses Instrument richtet sich insbesondere an Unternehmen in energieintensiven Branchen, wie der Zement-, Stahl- oder Chemieindustrie. Diese Unternehmen erhalten CO₂-Zertifikate, die sie am Markt handeln können. Durch Investitionen in Klimaschutzmassnahmen, einschliesslich der Elektrifizierung von Produktionsprozessen, können sie die Anzahl der benötigten Zertifikate reduzieren und somit Kosten sparen. Gleichzeitig schafft das EHS einen Wettbewerbsvorteil für energieeffiziente Betriebe. Das EHS ist mit dem Europäischen Emissionshandelssystem (EU-EHS) verknüpft.

Energiegesetz (EnG)

Das Energiegesetz ist ein zentraler Baustein der Energiestrategie 2050. Es verpflichtet Unternehmen, Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz zu ergreifen und den Anteil erneuerbarer Energien am Energiemix zu erhöhen [BFE 2024f]. Die Umsetzung dieser Ziele wird durch verschiedene Förderprogramme unterstützt, darunter das Gebäudeprogramm, ProKilowatt und EnergieSchweiz. Das EnG adressiert u. a.:

- Richtwerte für den Energie- und Stromverbrauch für 2020 und 2035
- Fortführung des Gebäudeprogramms mit mehr Geld aus der CO₂-Abgabe
- Steuererleichterungen für energetische Gebäudesanierungen
- Ersatz der mechanischen Stromzähler durch Smart Meter
- Richtwerte für den Ausbau der EE-Stromproduktion für 2020 und 2035
- Beendigung der kostendeckenden Einspeisevergütung (KEV) auf Bundesebene für neue Anlagen ab 2022
- Eigene Vermarktung des EE-Stroms durch den Produzenten ab bestimmten Anlagengrössen

- Wasserkraftwerke, Biomasseanlagen und neu auch grössere Photovoltaikanlagen können noch bis 2030 Investitionsbeiträge beantragen
- Raschere Bewilligungsverfahren auf kantonaler Ebene für EE-Anlagen
- Nutzung von selbsterzeugtem Strom, auch als Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV)
- Verbot neuer Kernkraftwerke

5.1.2 Regionale Programme – Kantonale und kommunale Unterstützung

Auf regionaler Ebene ergänzen die Kantone die Fördermassnahmen des Bundes mit eigenen Programmen. Diese richten sich häufig an Unternehmen und Haushalte in den Themenfeldern erneuerbare Energien und Energieeffizienz. Die Programme sind auf die spezifischen Bedürfnisse und Potenziale der jeweiligen Region zugeschnitten. Aus diesem Grund unterscheiden sie sich in den unterschiedlichen Kantonen unter Umständen, wobei im Allgemeinen ein grosser Überlapp der Programme über Kantone hinweg besteht.

Gebäudeprogramm

Das Gebäudeprogramm zählt zu den bedeutendsten Fördermassnahmen der Kantone. Es unterstützt gezielt die energetische Sanierung von Gebäuden und die Installation moderner Heizsysteme, um die CO₂-Emissionen im Gebäudebereich zu senken [BFE 2024g]. Die Hauptziele des Gebäudeprogramms bestehen darin, die Sanierungsquote zu erhöhen, Gebäude besser zu dämmen und den Einsatz fossiler Heizsysteme durch erneuerbare Alternativen wie Wärmepumpen oder Photovoltaik zu ersetzen. Die Höhe der Zuschüsse variiert je nach Kanton und Massnahme. Neben finanzieller Unterstützung werden auch Beratungsleistungen angeboten, um Sanierungsprojekte effizient zu gestalten. Ein Beispiel ist die gezielte Förderung innovativer Energielösungen, die beispielsweise in Mehrfamilienhäusern oder Quartieren mit kombinierten Photovoltaik- und Batteriespeichersystemen zum Einsatz kommen.

Kantonsbezogene Sonderprogramme

Viele Kantone bieten ergänzend zum Gebäudeprogramm weitere Fördermassnahmen an, die auf spezifische Energieanwendungen und Technologien abzielen (vgl. Tabelle 8), u. a.:

- **Wärmepumpenförderung**
Zuschüsse für die Installation von Wärmepumpen als Ersatz für fossile Heizsysteme. Diese Förderungen sind häufig an die Effizienzklasse der Anlage gekoppelt.
- **Lüftungs-, Kälte- und Klimasysteme**
Unternehmen können Zuschüsse für Massnahmen beantragen, die den Stromverbrauch durch effizientere Lüftungs-, Kühl- und Klimaanlage senken. Dies betrifft vor allem energieintensive Branchen wie die Lebensmittelproduktion oder die Logistik.
- **Mobilitätsprogramme**
Viele Kantone fördern Elektromobilität, unter anderem durch Subventionen für Ladeinfrastruktur, die Umstellung von Fuhrparks auf Elektrofahrzeuge oder die Nutzung von Carsharing-Modellen.

Energieberatung

Neben finanziellen Anreizen sind Beratung und Wissensaustausch wesentliche Elemente der Energieförderung in der Schweiz. Sie helfen Unternehmen, Potenziale zur Energieeinsparung zu identifizieren und von Best Practices anderer Betriebe zu lernen. Viele Kantone bieten kostenfreie

oder stark subventionierte Energieberatungen für Unternehmen und Haushalte an. Diese umfassen Energiechecks, die den Energieverbrauch von Gebäuden, Produktionsanlagen oder Infrastruktur analysieren, sowie individuelle Massnahmenpläne zur Steigerung der Energieeffizienz und Reduktion der CO₂-Emissionen. Dabei werden auch mögliche Förderprogramme und Finanzierungsoptionen berücksichtigt, die bei der Umsetzung der Massnahmen genutzt werden können.

5.1.3 Wärmestrategie 2050

Ergänzend zu den Gesetzen und den Förderprogrammen wurde von Seiten des Bundes eine übergeordnete Strategie für die Entwicklung der Wärmeversorgung (sowohl bezogen auf Raumwärme als auch Prozesswärme) formuliert. Die Wärmestrategie 2050 hat das Ziel, die Wärmeversorgung der Schweiz bis 2050 klimaneutral zu gestalten, da sie aktuell etwa 35 % der gesamten THG-Emissionen ausmacht. Davon entfallen 16 % auf die Erzeugung von Prozesswärme in der Industrie. Die Wärmestrategie basiert auf den Energieperspektiven 2050+ und sieht tiefgreifende Veränderungen im Energiesystem vor, um die Dekarbonisierung zu erreichen. Dabei spielen Effizienz, erneuerbare Energien und eine zunehmende Sektorkopplung eine zentrale Rolle [BFE 2023].

Einer der Schwerpunkte liegt auf der Elektrifizierung von Wärmeprozessen und der Integration von erneuerbaren Energien, wobei Wärmepumpen als Schlüsseltechnologie betrachtet werden. Für industrielle Prozesse bis 200 °C wird Umweltwärme, beispielsweise aus Geothermie, Solarenergie oder Wärmepumpen, als Lösung priorisiert. Für Temperaturen über 200 °C kommen direkte Elektrifizierung oder der Einsatz erneuerbarer Brennstoffe wie synthetische Gase und Wasserstoff in Betracht. Um diese Transformation zu ermöglichen, werden Unternehmen angehalten, Massnahmen zur Wärmerückgewinnung systematisch zu identifizieren und umzusetzen. Insbesondere die Digitalisierung von Produktionsprozessen und die Integration in Energiemanagementsysteme sollen helfen, thermische Hauptverbraucher effizienter zu überwachen und Synergien zwischen Kälte- und Wärmebedarf zu erschliessen. Unternehmen müssen langfristige Pläne vorlegen, wie sie ihre Prozesse spätestens bis 2040 emissionsfrei gestalten. Für bestimmte Dekarbonisierungsmassnahmen kann finanzielle Unterstützung bereitgestellt werden.

Ein übergreifendes Ziel der Strategie ist der Ausbau thermischer Netze, die ein Potenzial von 17 bis 22 TWh pro Jahr haben, welches derzeit nur zur Hälfte ausgeschöpft wird. Parallel dazu sollen thermische Speicher und die Flexibilisierung der Nachfrageseite (Demand Side Management) vorangetrieben werden, um das Energiesystem effizienter und stabiler zu gestalten. Der Ausbau der inländischen Stromproduktion aus erneuerbaren Energien ist entscheidend, wobei Strom im Wärmebereich möglichst systemdienlich und effizient genutzt werden muss.

Erneuerbare und synthetische Gase, einschliesslich Wasserstoff, spielen eine zentrale Rolle bei der Erzeugung von Hochtemperatur-Prozesswärme sowie zur Abdeckung von Spitzenlasten in Wärmenetzen. Die Wärmestrategie sieht vor, dass diese Gase gezielt dort eingesetzt werden, wo keine Alternativen verfügbar sind. Eine nationale Wasserstoffstrategie soll entwickelt werden, um dessen Nutzung zu koordinieren.

Alle Kantone sollen verbindliche Energie- und Klimastrategien erstellen, die auf das Ziel der Netto-Null-Emissionen ausgerichtet sind. Dazu gehören konkrete Massnahmen und detaillierte Energiepläne. Parallel dazu wird der Bedarf an Fachkräften in relevanten Branchen analysiert, um gezielte Massnahmen zur Qualifizierung des Personals zu entwickeln, das für die Umsetzung der Energiewende benötigt wird.

Insgesamt setzt die Wärmestrategie auf eine systematische und koordinierte Transformation des Wärmesektors, die durch die Kombination von Effizienzsteigerung, Elektrifizierung und den Einsatz erneuerbarer Energieträger erreicht werden soll. Sie berücksichtigt die Herausforderungen der Industrie, der thermischen Netze sowie des übergreifenden Energiesystems und betont die Bedeutung einer nachhaltigen, technologieoffenen und flexiblen Umsetzung.

5.1.4 Mögliche Lücken in der Förderlandschaft hinsichtlich der Elektrifizierung von HT-PW

Die enge Verzahnung von nationalen und regionalen Instrumenten ist gewährleistet. Während die Bundesebene Rahmenbedingungen (Gesetze, Strategien) und Hauptförderprogramme steuert, sorgen die Kantone für eine gezielte Unterstützung vor Ort. Dadurch können Unternehmen spezifisch auf ihre Bedürfnisse zugeschnittene Förderungen beantragen, sei es für energieintensive Prozesse, Gebäudetechnik oder Mobilitätslösungen.

Die aktuellen Programme, die eine Elektrifizierung der Produktion direkt oder indirekt fördern, unterstützen Unternehmen dabei, fossile Energien zu ersetzen, die Energieeffizienz zu steigern und den Einsatz erneuerbarer Energien in Produktionsprozessen zu fördern. Ein Schwerpunkt liegt bei der Einführung energieeffizienter (jedoch ohnehin bereits elektrischer) Technologien und der Optimierung bestehender Prozesse und damit wesentlich bei der Reduktion des Stromverbrauchs selbst. Dies zeigt sich beispielsweise im Programm *ProKilowatt*, das Unternehmen finanziell unterstützt, wenn sie Massnahmen umsetzen, die den Stromverbrauch ihrer Produktionsanlagen senken. Auch bei kantonalen Programmen wird vorrangig die Steigerung der Energieeffizienz gefördert, während die Elektrifizierung fossiler Anwendungen nur in spezifischen Fällen unterstützt wird. Dieser Ansatz könnte die Elektrifizierung energieintensiver Prozesse und deren Integration ins Energiesystem erschweren.

Die bestehenden Programme bieten Unternehmen umfangreiche Fördermöglichkeiten, um ihre Energieeffizienz zu steigern, den Stromverbrauch zu senken und nachhaltigere – darunter auch elektrifizierte – Produktionsmethoden zu etablieren. Um die Ziele der Energiestrategie 2050 konsequent zu erreichen, wäre jedoch eine stärkere Berücksichtigung der Elektrifizierung von Prozesswärme von Vorteil. Insbesondere hier kann Strom (aus erneuerbaren Quellen) die heute noch weit verbreiteten fossilen Energieträger (überwiegend Erdgas) ersetzen und damit die entstehenden THG-Emissionen weitestgehend reduzieren. Eine Ergänzung bestehender Förderprogramme, um neben einer Energieeffizienzsteigerung gezielt auch Elektrifizierungspotenziale zu erschliessen, würde die Energiewende systemisch voranbringen.

5.2 Einordnung der Elektrifizierungstechnologien

5.2.1 Vier-Stufen-Modell zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme

Elektrifizierung ist einer unter mehreren (auch komplementären) Ansätzen zur Bereitstellung und Dekarbonisierung von Prozesswärme. Eine kohärente Gesamtstrategie muss diese Ansätze mit Systemsicht und unter Berücksichtigung von Nutzungskonkurrenzen integrieren [Agora 2022]. Aus der Literatur können einige Eckpunkte für eine derartige Strategie abgeleitet werden, wobei die Verortung und Einordnung der Elektrifizierungstechnologien hier im Vordergrund steht. Ähnlich wie in [SWK 2024] und [in4c 2022] wird in [FVEE 2022] ein vierstufiges Modell zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme beschrieben. Dies soll eine aus gesamtsystemischer Sicht

optimale Vorgehensweise widerspiegeln. Konkret können diese vier Stufen wie folgt skizziert und beispielhaft mit Massnahmen hinterlegt werden:

1. Die erste Stufe ist die **Steigerung der Energie- und Exergieeffizienz**. Energieeffizienz bezieht sich auf die Quantität der Wärme, Exergieeffizienz auf die Qualität der Wärme (abhängig vom Temperaturniveau im Verhältnis zum Umgebungszustand). Zentral ist es dabei, für den jeweiligen Anwendungszweck temperaturangepasste Wärmeerzeugungslösungen einzusetzen: Niedertemperatur-Wärmequellen (NT) werden für Niedertemperaturanwendungen eingesetzt und dabei ggf. mit Unterstützung von (Hochtemperatur-)Wärmepumpen auf ein geeignetes Temperaturniveau gebracht. Wertvolle Energieträger mit hohem Exergiegehalt (Strom, Biomasse oder Gase) sollten möglichst auf Hochtemperaturanwendungen (HT) bzw. auf den Einsatz in Wärmepumpen oder WKK-Anlagen beschränkt sein.

Begonnen wird also mit einer Betrachtung entlang der Abwärmenutzungskaskade [SWK 2024; in4c 2022]. Als oberstes Prinzip gilt «Efficiency first»: Diese Stufe umfasst Massnahmen zur Vermeidung von Abwärme, Wärmerückgewinnung bzw. -integration und inner- sowie überbetriebliche Abwärmenutzung. Beispiele dafür sind Dämmmassnahmen zur Begrenzung von Abwärmeverlusten, drosseln des Temperaturniveaus, effiziente WKK, sowie auch die Optimierung von Prozessen inklusive prozess- oder betriebsinterner Wärmerückgewinnung.

Anstrengungen zur Hebung der vorhandenen grossen Potenziale zur industriellen Abwärmenutzung stellen einen zentralen Hebel zur Dekarbonisierung der Nah- und Fernwärme dar. Eine umfassende Elektrifizierung sowie ein Ausphasen abwärmeintensiver Produktionsprozesse wirken in der Regel potenzialmindernd. Ansätze der CO₂-Abscheidung sind energieintensiv und demnach tendenziell mit zusätzlichen Energie-/Wärmebedarfen verknüpft. Industrieabwärme sollte in erster Linie zur Steigerung der Energieeffizienz in den Industrieprozessen genutzt werden. Erst wenn dies nicht möglich oder wirtschaftlich sinnvoll ist, sollte die restliche Abwärme in Fernwärmenetzen genutzt werden. Bei der Auskopplung von Wärme aus Industrieprozessen ist eine enge Abstimmung zwischen den Wärmeabnehmern und den Industrieunternehmen erforderlich, da diese unterschiedliche Investitions- und Betriebshorizonte haben. Zudem ist es wichtig, dass der Verkauf von Abwärme nicht zu «fossilen Lock-Ins» bzw. Abhängigkeiten von fossilen Brennstoffen führt.

2. Die zweite Stufe beschreibt die **Erschliessung erneuerbarer Wärmequellen**. Erneuerbare Wärmequellen (wie Solar- oder Geothermie via Grosswärmepumpen) sind für viele Unternehmen noch Neuland, sollten jedoch in den geeigneten Temperaturbereichen in Transformationskonzepte einbezogen werden. Wesentliche Vorteile dieser Wärmequellen sind die Unabhängigkeit von Energiepreisen und Energieimporten.

In Deutschland plant bspw. ein Papierhersteller in Hagen für seine Trocknungspartie eine der deutschlandweit ersten industriellen Tiefengeothermie-Anwendungen, die ca. 40 % seines heutigen Erdgasbedarfes ersetzen soll. Nach [Bracke/Huenges 2022] ist Tiefengeothermie grundlastfähig und deckt potenziell bis zu 25 % des industriellen Wärmebedarfes bis etwa 200 °C. Solarwärme ist für Industrieprozesse v. a. mit nicht-konzentrierenden Kollektoren bereits etabliert und wird für die Brauchwassererwärmung oder Prozesswärme bis etwa 120 °C eingesetzt. Wenige Anlagen mit konzentrierenden Kollektoren sind für die Erzeugung von Wärme im Temperaturbereich von 150-400 °C im Einsatz. In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass der flächenspezifische Ertrag konzentrierender Kollektoren auch schon bei moderaten Betriebstemperaturen den von Flach- bzw. Vakuumröhrenkollektoren übersteigt [in4c 2021]. Bei Geo- und Solarthermie (inkl. konzentrierender Systeme) besteht demnach noch

Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

3. Als dritte Stufe greifen **Alternativtechnologien** der Prozesswärmebereitstellung, darunter v. a. die Elektrifizierung. Dies betrifft jenen Teil der Prozesswärme, der nicht durch Effizienz bzw. rückgewonnene Wärme (Stufe 1) oder durch lokale erneuerbare Wärmepotenziale (Stufe 2) gedeckt werden kann. Die direkte Elektrifizierung ist ggü. indirekter (Power-to-X-to-Heat, d. h. Umwandlung von Strom bspw. in Gase und anschliessender Verbrennung) mit deutlich weniger Wirkungsgradverlusten in der Erzeugungs- und Umwandlungskette verbunden.

Bei einer Elektrifizierung der Wärmeerzeugung können zukünftig die Hybridisierung, also die kombinierte Prozesswärmeerzeugung mittels PtH und Brennstoffverbrennung, und die Flexibilisierung, also Ausnutzen von Strompreisschwankungen und Systemintegration fluktuierender Erneuerbarer durch den Einsatz regelbarer Verbraucher, Erzeuger und/oder Speicher, eine wichtige Rolle spielen. Wie in dieser Studie gezeigt, existieren in nahezu allen Anwendungs- und Temperaturbereichen Elektrifizierungslösungen mit variierender Technologiereife.

Grundlegende Voraussetzung für eine umfassende Elektrifizierung ist die Verfügbarkeit von (Stark-)Strom direkt am Standort. Dafür müssen oftmals Netzanschlussleistung ausgebaut, Lastmanagement ergänzt, sowie Standortspezifika, wie Verfügbarkeit des nötigen Platzes und Integrationsfähigkeit in bestehende Systeme, berücksichtigt werden. Weiter ist oft die Leistungsdichte (Kapazität, Wärmemenge) der E-Öfen und Wärmepumpen limitierend, um konventionelle Anlagen 1:1 zu ersetzen. Der dann notwendige parallele Betrieb mehrerer E-Anlagen hat Auswirkungen auf den bestehenden Anlagenpark (Integration in Produktionsabläufe, Platzverfügbarkeit). Ausserdem muss der in der Regel geringere Abwärmestrom beachtet werden. Zudem hängen energiebedingte Betriebskosten stark vom Strompreis ab.

Trotz der genannten Hemmnisse bietet die Elektrifizierung ein hohes Potenzial zur Verbesserung der Umweltauswirkungen und der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit industrieller Heizsysteme: hohe Energieeffizienz bzw. geringer(er) Energiebedarf, hohe erzielbare Temperaturen bei schnellem Aufheizen, einfache Regelbarkeit, Dosierung und Flexibilisierung, mechanische Robustheit, kompakte Bauweise, keine Abgase, keine THG-Emissionen (außer unvermeidbarer Prozessemissionen).

4. Die vierte Stufe ist die **Nutzung alternativer Brennstoffe**, wie Biomasse, Abfälle oder synthetische Energieträger (PtX). Der Einsatz alternativer Brennstoffe ist aus verschiedenen Gründen herausfordernd und sollte daher nach dem vierstufigen Modell als letzte Option betrachtet werden: Bei biogenen Energieträgern bestehen erhebliche Konkurrenzen zu höherwertiger Nutzung (bspw. stofflich oder «stehen lassen»); insbesondere Primärbiomasse weist grosse Flächenbedarfe auf. V. a. nachhaltige Biomasse als alternativer Brennstoff ist nur begrenzt verfügbar und vernachlässigt den Wert von biogenem CO₂ für das Schaffen langfristiger CO₂-Senken [Agora 2022]. Abfälle (bspw. Kunststoffe) stehen als alternative Brennstoffe nur begrenzt zur Verfügung und in Konflikt mit den Zielen einer energie- und ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft. Zudem sind sie in der Regel mit der Emission von grossen Mengen an fossilem CO₂ verbunden [Agora 2022]. Wasserstoff und seine Derivate (u. a. Methan, Methanol oder Ammoniak) sind über die gesamte Erzeugungskette betrachtet mit hohen Umwandlungsverlusten verknüpft. Zudem sind Auslastung bzw. Vollastjahresstunden von mit erneuerbarer Elektrizität betriebenen PtX-Anlagen, aber auch von PtH-Anlagen (Stufe 3), in der Schweiz beschränkt. Die genannten alternativen Brennstoffe (auch in Kombination mit CO₂-Abscheidung) können wirtschaftlich attraktiv sein, weisen allerdings eigene Herausforderungen wie entsprechende Infrastrukturbedarfe und Nutzungskonkurrenzen auf.

Neben der Option der Hybridisierung bzw. des Fuel-Switchs bieten sich, wie bereits erwähnt, auch thermische Energiespeicher (Thermal Energy Storage – TES) als Technologie an. Im Vergleich zu elektrischen Batterien sind diese typischerweise kostengünstiger [Agora+ISI 2024]. So können Vollastjahresstunden zur Prozesswärmebereitstellung aus erneuerbarem Strom (u. a. PtH-Route, Stufe 3) erhöht werden. Hochtemperatur-TES haben zusätzlich das Potenzial, bei der Entladung neben Wärme (über Dampfauskopplung) auch Strom bereitzustellen. (Hochtemperatur-)Wärmespeicher bedürfen allerdings noch weiterer Forschung und Entwicklung.

Die obigen Ausführungen können aus systemischer Perspektive als zentrale Richtschnur dienen, aber die konkreten industriellen Systeme bestimmen sich u. a. auch durch standort- und prozessabhängige Spezifika und Pfadabhängigkeiten. Folglich sind verschiedene, auch komplementäre Ansätze notwendig und in der Realität zu erwarten, um die Vielfalt industrieller Prozesse erfolgreich zu dekarbonisieren.

5.2.2 Systemisch-technische Einordnung der betrachteten Elektrifizierungstechnologien

Das zuvor beschriebene vierstufige Modell zur Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme befindet Elektrifizierung in den ersten drei von vier Stufen als eine der vielversprechendsten Technologien zur THG-freien Prozesswärmeerzeugung, die insbesondere aufgrund von Effizienzvorteilen prioritär Anwendung finden sollte. Konkurrenz zur Elektrifizierung besteht aus systemischer Perspektive v. a. in den ersten beiden Stufen, d. h. bei Effizienzmassnahmen und dem Einsatz erneuerbarer Wärmequellen.

Mit Blick auf die Niedertemperatur-Prozesswärme sowie die Dampferzeugung ist die Wärmepumpe die erste Wahl unter den Elektrifizierungstechnologien: Sie hebt mit einem Wirkungsgrad von mehreren hundert Prozent sehr effizient bestehende Potenziale aus Abwärme, Umweltwärme und tiefer Geothermie. Für die im Max-E-Szenario berechnete Dampferzeugung kommt dementsprechend die Kompressionswärmepumpe zum Einsatz. Sie wird ergänzt um den Elektrodenkessel, der hohe Leistungsklassen (hohe Kapazität der Dampferzeugung) und hohe Dampftemperaturen ($>200^{\circ}\text{C}$) abdeckt. Elektrodenkessel sind bereits heute und die großen Wärmepumpen absehbar marktverfügbar. Beide Technologien verdrängen darum im Max-E-Szenario schon vor 2045 gänzlich die konventionelle Dampferzeugung in der Nahrungs- und Papierindustrie (NT-Dampf) sowie in der Chemie-/Pharmaindustrie (HT-Dampf). Aufgrund der hohen Integrationsfähigkeit von Wärmepumpe und Elektrodenkessel in bestehende werksseitige Dampfinfrastrukturen und aufgrund der nur bedingten Eignung von Fernwärme und Solarthermie für die benötigten hohen Leistungsklassen ist ein grosskaliger Einsatz dieser beiden Elektrifizierungstechnologien aus technischer Sicht zu erwarten. Im Zeitraum 2045-2060 werden durch die Elektrifizierung der Dampferzeugung rund 10 PJ zusätzliche Elektrizität und rund 17 PJ weniger Brennstoffe verbraucht sowie rund 650 kt CO_2e weniger Treibhausgase emittiert.

Die in der Bestimmung des Elektrifizierungseffektes im Max-E-Szenario berücksichtigten Elektrifizierungstechnologien im Bereich der Hochtemperatur-Prozesswärme sind überwiegend bereits heute marktverfügbar. Nur wenige, nämlich die indirekte Widerstandsheizung in der Keramik- und Ziegelindustrie sowie der Plasma-Brenner in der (Kalk- und) Zementindustrie, werden voraussichtlich erst 2035 oder später marktreif sein. Im Zeitraum 2045-2060 werden durch die Elektrifizierung der HT-PW-Prozesswärme rund 9 PJ zusätzliche Elektrizität und rund 11 PJ weniger Brennstoffe verbraucht sowie rund 560 kt CO_2e weniger Treibhausgase emittiert. Aufgrund der eben erwähnten späteren Marktverfügbarkeit bei den Branchen Keramik, Ziegel und Zement

steigt deren Elektrifizierungseffekt auch nach 2045 noch merklich an. Für die anderen Branchen, Glas, alle Metalle, Maschinenbau und Bau, ist eine Elektrifizierung der HT-PW – ebenso wie bei der Dampferzeugung – aus technischer Sicht bereits bis 2045 wahrscheinlich: Zum einen wegen der vielen technischen Vorteile einer Elektrifizierung in Schritt 3 des im Abschnitt oben beschriebenen vierstufigen Modells. Zum anderen, weil die direkte Elektrifizierung der Nutzung alternativer Brennstoffe (Biogas Wasserstoff und Derivate; Schritt 4) vorzuziehen ist.

Die Zementindustrie weist im Max-E-Szenario 2060 einen der grössten Beiträge einer Branche an der HT-PW-Elektrifizierung auf (~25 % der THG-Einsparungen). Allerdings steht diese Branche aufgrund sehr hoher prozessbedingter CO₂-Emissionen bei der Kalksteinentsäuerung vor besonderen Herausforderungen bei der Dekarbonisierung ihrer Produktionsverfahren (das gilt ebenfalls für die – nicht modellierte – Kalkindustrie), welche von einer direkten und umfänglichen Elektrifizierung *nicht* adressiert werden bzw. werden können. Aus diesem Grund, der auch bei den Interviews mit der Zementindustrie vorgebracht wird (vgl. Abschnitt 3.4), ist eine HT-PW-Elektrifizierung in diesem Kontext nicht wahrscheinlich. Vielmehr kann bei der Zementherstellung (abweichend zum Max-E-Szenario) erwartet werden, dass es bei der umfassenden Nutzung von Sekundärbrennstoffen (Abfällen) bleibt und die Kohlenstoffabscheidung die präferierte Dekarbonisierungsoption ist. Das Zielbild einer Dekarbonisierung der Zementindustrie wäre dann folgendes: gleichbleibender Brennstoffverbrauch evtl. mit steigenden Anteilen an Sekundärbrennstoffen, umfangreiches CC mit Senkenfunktion aufgrund von BECCS, möglicherweise erhöhter Elektrizitätsbedarf durch CC (falls nicht via Abwärme betrieben).

Die Wechselwirkungen der HT-PW-Elektrifizierung mit dem Schweizer Stromsystem in toto sind in Kapitel 4 erläutert. Zudem gilt regional bzw. vor Ort, dass für die Aufnahme und den Transport des zusätzlichen Stroms ausreichend Übertragungskapazität bereit stehen müssen, und zwar von den Erzeugungsanlagen bis in die verschiedenen Netzebenen hinein, um potenzielle Netzengpässe zu vermeiden. Ob die Anschlussleistung am Industriestandort selbst ausgebaut werden muss, hängt vom Einzelfall ab, insbesondere davon, ob noch ausreichende Reserven an elektrischer Anschluss- und Übertragungskapazität vorhanden sind.

5.3 Handlungsempfehlungen

Im vorigen Abschnitt 5.2 wurden einige Elektrifizierungstechnologien identifiziert, die aus systemisch-technischer Sicht einen grossen Hebel zur Dekarbonisierung der Produktionsprozesse in der Schweizer Industrie versprechen und gleichzeitig weitere Chancen bei der Steigerung der Produktivität bieten. Trotzdem wird die direkte Elektrifizierung von Produktionsverfahren mit den bestehenden Förderprogrammen kaum adressiert.

Eine Ergänzung der Förderlandschaft, um neben einer Energieeffizienzsteigerung gezielt auch Elektrifizierungspotenziale zu erschliessen, wäre dem Ziel der Energiestrategie dienlich, bis 2050 netto keine Treibhausgase mehr zu emittieren. Im Rahmen der Klima- und Innovationsgesetzes (KIG) ist geplant, Unternehmen bei Investitionen in klimafreundliche Technologien und Prozesse zu fördern und die «Förderlücke» zu schliessen. Dabei ist «klimafreundlich» zu verstehen als THG-frei oder zumindest weitestgehend THG-arm. Zu dieser Kategorie zählen die meisten der in der vorliegenden Studie betrachteten Lösungen zur Elektrifizierung der HT-PW-Prozesswärme sowie der Dampfbereitstellung, mit Ausnahme derjenigen in der Zement- und evtl. der Keramik- und Ziegelindustrie (vgl. Abschnitt 5.2.2).

Eine Technologieförderung zielt darauf ab, den Aufbau von Pilot-, Demonstrations- oder ersten produktiven Anlagen sowie deren u. U. komplexe Integration in den bestehenden

Industriestandort zu unterstützen, um so den grosstechnischen Einsatz dieser Technologien anzustossen. Konkrete Förderkonzepte, wie diese Elektrifizierungstechnologien im Rahmen des KIG gefördert werden und wie die finanziellen und regulatorischen Anreize gesetzt werden könnten, liegen jedoch noch nicht vor. Darum werden – als Blaupause für mögliche Förderansätze bzw. Instrumententypen – einige Förderprogramme aus anderen Staaten, die eine Elektrifizierung industrieller Prozesswärme adressieren, aufgeführt:

- Klimaschutzverträge (Investitions- und Betriebsförderung, Deutschland, 2024)⁹
In Deutschland wurden als erstem Land 2024 Klimaschutzverträge als Förderinstrument eingeführt. Damit sollen (vorrangig energieintensive) Industrieunternehmen dabei unterstützt werden, in klimafreundliche Produktionsanlagen zu investieren, die sich andernfalls (noch) nicht rechnen würden. Ziel ist der Aufbau von Expertise, die Etablierung «Grüner Märkte» und damit schließlich die Wirtschaftlichkeit des klimafreundlichen Produktionsverfahrens.
- Bundesförderung Industrie und Klimaschutz (Investitionsförderung, Deutschland, 2024 (Vorgänger seit 2021))¹⁰
Das BIK fördert klimafreundliche Investitionsvorhaben ausschließlich in energieintensiven Branchen, die das Ziel der Dekarbonisierung oder der Speicherung und Nutzung von CO₂ haben. Die Förderung erstreckt sich von FuE-Vorhaben bis zu produktiven Anlagen.
- Plattform für Abwärme (Gesetzgebung, Deutschland, 2024)¹¹
Das Energieeffizienzgesetz (EnEG) verpflichtet Unternehmen mit einem Energieverbrauch über 2.5 GWh/a zur Angabe ihrer Abwärmedaten auf einer öffentlichen Plattform. Ziel ist es, diese Abwärme sicht- und nutzbar zu machen und damit die Energieeffizienz zu steigern.
- Industrial Heat Recovery Support (IHRS) Programme (Wettbewerbliche Investitionsförderung, Vereintes Königreich, 2018–2022)¹²
IHRS förderte Investitionen in Abwärmetechnologien. Dies umfasste Möglichkeiten zur Rückgewinnung von Abwärme, die sonst ungenutzt verloren gingen, und deren Wiederverwendung innerhalb derselben industriellen Produktionsstätte, durch einen anderen Endverbraucher (z. B. Wärmenetzwerk) oder durch die Verstromung der Abwärme. Damit sollte das Vertrauen der Industrie in Investitionen in entsprechende Abwärmetechnologien erhöht werden.
- Credit guarantees for green investments (Kreditprogramm, Schweden, 2021–2024)¹³
Staatliche Kreditgarantien sollen grüne Investitionen in der Industrie fördern und damit beitragen, Schwedens Umwelt- und Klimapolitikziele zu erreichen. Die Kreditgarantien können in den Währungen Schwedische Kronen, Euro oder US-Dollar gewährt werden mit einer maximalen Kreditlaufzeit von 15 Jahren.
- Clean Transition Aid Scheme for Industrial Investments (Investitionsförderung, Finnland, 2025)¹⁴
Das Förderprogramm gewährt Zuschüsse für bedeutende Investitionen, die die Dekarbonisierung industrieller Produktionsprozesse und die Verbesserung der Energieeffizienz vorantreiben. So sollen Investitionen in bestimmten Sektoren beschleunigt werden, die strategisch wichtig für den Übergang zu einer klimaneutralen Wirtschaft sind. Das Programm umfasst Investitionen, die in Finnland mit förderfähigen Kosten von mindestens 30 Mio. Euro umgesetzt werden. Im Jahr 2025 wurden 400 Mio. Euro Förderbudget für das Programm reserviert.
- Geothermal Energy Plus Programme (Investitionsförderung, Polen, 2019)¹⁵
Dieses Programm, dessen bereits zweite Phase 2022 startete, zielt darauf ab, die Nutzung

⁹ <https://www.klimaschutzvertraege.info/>

¹⁰ <https://www.klimaschutz-industrie.de/foerderung/>

¹¹ https://www.bfee-online.de/BfEE/DE/Effizienzpolitik/Plattform_fuer_Abwaerme/plattform_fuer_abwaerme_node.html

¹² <https://www.gov.uk/guidance/industrial-heat-recovery-support-programme-how-to-apply>

¹³ <https://www.riksgalden.se/en/our-operations/guarantee-and-lending/credit-guarantees-for-green-investments/>

¹⁴ <https://tem.fi/en/aid-for-electrification>

¹⁵ <https://www.iea.org/policies/14322-polish-geothermal-energy-plus-programme>

geothermischer Ressourcen zu erhöhen, indem Darlehen und Subventionen bereitgestellt werden. Insbesondere gefördert werden der Bau, die Erweiterung oder die Modernisierung von WKK-Anlagen oder Kraftwerke auf Basis geothermischer Quellen.

Zur Förderung der energetischen Nutzung von Geothermie schlägt [in4c 2022] insbesondere folgende Fördergegenstände vor: die flächendeckende Erkundung der natürlichen tiefeingeothermischen Potenziale sowie die Erstellung erster Tiefbohrungen zum Fündigkeitsnachweis je Region mit vielversprechenden tiefeingeothermischen Potenzialen, um privatwirtschaftliche Folgeinvestitionen herbeizuführen.

- Industry for transformation – increasing the capacity of companies to produce zero and low-carbon solutions (Kreditprogramm, Polen, 2023)¹⁶

Das Programm zielt darauf ab, zur Entwicklung einer kohlenstoffarmen Wirtschaft beizutragen, indem es die Industrie befähigt, emissionsfreie/-arme Energiequellen, Energiespeicher und Transportmittel oder Vorprodukte dafür herzustellen. Zur Finanzierung wird ein spezielles, Fonds-ähnliches Finanzinstrument eingeführt, das von staatlicher Stelle verwaltet wird.

Bei den genannten Förderprogrammen handelt es sich überwiegend um Investitionszuschüsse. Lediglich die «Klimaschutzverträge» adressieren auch Betriebsausgaben. Diese stellen gerade für den Wechsel auf Elektrifizierungstechnologien die deutlich größere Hürde dar. Während die Investitionskosten (CAPEX) zwischen konventionellem und elektrischem Produktionsverfahren in vielen Fällen vergleichbar sind (zumindest, sofern eine Neuinvestition und keine Modernisierung erforderlich ist, vgl. Anhang – Technologiesteckbriefe), sind die Betriebsausgaben (OPEX) zentral für die tatsächliche Marktdurchdringung der Elektrifizierungstechnologien, denn hierbei ist im Wesentlichen das Verhältnis von Strom- zu Gaspreis ggü. der Effizienzverbesserung durch die Elektrifizierung von Belang. Beim Verhältnis von Strom- zu Gaspreis könnte eine (derzeit nicht geplante) Verschärfung der CO₂-Abgabe – wie sie bspw. im EU-EHS im Wesentlichen durch eine Reduktion des Caps ausgelöst wird – einer Elektrifizierung zusätzlich behilflich sein. Modellseitig wurden keine wirtschaftlichen Aspekte betrachtet noch in der szenarischen Marktdurchdringung berücksichtigt. Hierfür wären entsprechende Energieträgerkostenpfade der hohen Verbrauchstypen (grosse Endkunden) der kommenden 35 Jahre vonnöten.

¹⁶ <https://www.measures.odyssee-mure.eu/energy-efficiency-policies-database.html#/measures/4624>

Anhang – Technologiesteckbriefe

Technologien mit hoher Relevanz für eine HT-PW-Elektrifizierung

Tabelle 9: Technologiesteckbrief direkte Widerstandsheizung nach Branchen

Kenngrösse	Einheit	Allgemein (Mineralien, Me- talle)	Glas	Glas	Glas	Glas	Quellen
Einsatzfelder		Schmelzen, Erwärmung, Umformung, Schweissen und Kalzinieren	kontinuierliches Schmelzen Behälterglas	kontinuierliches Schmelzen Behälterglas	kontinuierliches Schmelzen Flachglas	kontinuierliches Schmelzen Flachglas	[Madeddu 2020, VISGW 2018, Agora+ISI 2024, UBA 2023]
Technologie							
Temperaturniveau	°C	1000-1850 (ab 2030 bis 2000)	1700	1700	1700	1700	[Madeddu 2020, Agora+ISI 2024, UBA 2023]
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}		0.76	0.8 (0.64 Strom) (hybrid)	1.28	1.38 (1.1 Strom) (hybrid)	[UBA 2023]
Wirkungsgrad	%	50-99					[Madeddu 2020, Agora+ISI 2024]
Fahrweise/Auslastung	-%		kontinuierlich/90	kontinuierlich/90	kontinuierlich/90	kontinuierlich/90	[UBA 2023]
Mittlere Anlagenleistung	MW						[VISGW 2018, Agora+ISI 2024]
Kapazität	kt _{pr} /a		40	80	220	220	[UBA 2023]
Lebensdauer	a		7	15	15	15	[UBA 2023]

Wirtschaftlichkeit							
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}		164.4	205.5	164.4	205.5	[UBA 2023]
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}		109.6	137	109.6	137	[UBA 2023]
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}		8.2	10.3	8.2	10.3	[UBA 2023]
Einsatz							
Reifegrad	TRL	9	<4 (100-300 t/d) 9 (<100 t/d)	<7	<3	<4	[Madeddu 2020, VISGW 2018, Ag-ora+ISI 2024, UBA 2023]
Marktvfügbarkeit			heute	heute	2040	2030	[UBA 2023]
Heutige Marktdurchdringung	%		0	0	0	0	[UBA 2023]
Hemmnisse/Risiken		nur gewisse Materialien, Leistungsdichte (Kapazität und Temperatur) limitierend	begrenzte Leistungsdichten und daraus resultierende erschwerte Anlagendimensionierung, ungünstigere Ökonomie, kaum Flexibilität wg. empfindlicher Schmelze				[UBA 2023]
Chancen		gleichmässige Energiezufuhr über Volumen (Metallurgie); keine Abgase, vermeidet Oberflächenoxidation (Metallurgie); hohe Heizleistung und Hochtemperaturverarbeitung	hohe Effizienz in grossem Temperaturbereich, hohe Temperaturen, einfache Regelbarkeit, mechanische Robustheit				[UBA 2023, Cu 2015]
Referenztechnologie							
Energieträger			Erdgas, Strom	Erdgas, Strom	Erdgas, Strom	Erdgas, Strom	[UBA 2023]
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}		0.889-1.26 (0.13 Strom)	0.889-1.26 (0.13 Strom)	2.14 (0.11 Strom)	2.14 (0.11 Strom)	[UBA 2023]
Lebensdauer	a		15	15	15	15	[UBA 2023]
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}		205.5	205.5	205.5	205.5	[UBA 2023]

CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	137	137	137	137	[UBA 2023]
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	10.3	10.3	10.3	10.3	[UBA 2023]

Eigene Darstellung auf Basis der genannten Quellen

© Prognos 2025

Tabelle 10: Technologiesteckbrief indirekte Widerstandserwärmung nach Branchen

Kenngrösse	Einheit	Stahl	Stahl	Stahl	Stahl	Alu	Kupfer	Ziegel/Feuer- feststeine	Allgemein (Keramik, Ma- schinenbau, Nahrung, Glas, Chemie, Elekt- ronik, Stahl, Metall)	Quellen
Einsatzfelder		Wärmebe- handlung (Walzen)	Erwärmung Schmiede- bauteile	Erwärmung Stahlblech- zuschnitte	Härten von Stahl	Wärmebe- handlung	Wärmebe- handlung	Brennen	Schmelzen, Brennen, Warm- halten, Wärme- behandlungen: Härten, Formen, Walzen, Glühen, Aufkohlen	[VISGW 2018, TUDA 2023, Blesl 2015, UBA 2023]
Technologie										
Temperaturniveau	°C	<850	1250	950	1050	<400 - <600	1000	1250-1800	400-3000	[VISGW 2018, TUDA 2023, UBA 2023]
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	0.19-0.24	0.598	0.261	0.4-0.5	0.16-0.22	0.072- 0.198	0.45-1.52	0.072-1.175	[UBA 2023]
Wirkungsgrad	%									
Fahrweise/Auslastung	-%	kontinuierlich und diskonti- nuierlich/95	diskontinu- ierlich/80	kontinuier- lich/80	kontinuier- lich und diskontinu- ierlich/90	-/80-90	diskontinu- ierlich/70- 100	kontinuierlich und diskonti- nuierlich/90		[UBA 2023]
Mittlere Anlagenleistung	MW									
Kapazität	kt _{pr} /a	10-530	14.6	39.1	1.91-34	20	10-40	9-28		[UBA 2023]
Lebensdauer	a	35	30	30	30	30-35	35	30		[UBA 2023]
Wirtschaftlichkeit										

CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}	152-485	77	54	250-44	20-43.5	269.6	222-321	20-515	[UBA 2023]
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	14.5-76.1	23	5	22 -26	3-6.5	18.2 - 27	111-161		[UBA 2023]
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	11.4-242	0.8	5.4	11.1-25.8	1-20	8.1-21.8	22.2-32.1	0.4-242.4	[UBA 2023]
Einsatz										
Reifegrad	TRL	<4	<3	9	9	9	9	<4	<3 (Kalk, Zement, Ziegel), <4-9 (Glas), 9 (Metall, manchmal <4)	[VISGW 2018, UBA 2023]
Marktverfügbarkeit		2030	2040	heute	heute	heute	heute	2030		[UBA 2023]
Heutige Marktdurchdringung	%	0	0	20	0-20	0	0	0	0-20	[UBA 2023]
Hemmnisse/Risiken		oft grössere Umstellungen notwendig als bei Brennstoffbeheizung, Wirtschaftlichkeit und Praxiserfahrung oft nicht gegeben						dichte Anordnung im Ofen (z.B. bei Vormauerziegeln) erschwert gleichmässige Erwärmung und erfordert konstruktive Änderungen am Ofen	höherer Platzbedarf, da Leistungsdichte geringer als bei konventionellen Anlagen, geringerer Abwärmestrom muss bedacht werden	[UBA 2023]
Chancen		besserer Wirkungsgrad, einfacher Betrieb bei diskontinuierlicher Wärmebehandlung							oft geringerer Energiebedarf	[UBA 2023]
Referenztechnologie										
Energieträger		Erdgas	Erdgas	Erdgas	Erdgas	Erdgas	Erdgas	Erdgas		[UBA 2023]
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	0.22-0.28	0.694	0.379	0.413-0.577	0.18-0.25	0.08-0.22	0.45 -1.6		[UBA 2023]

Lebensdauer	a	35	30	30	30	30-35	35	30	[UBA 2023]
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}	190.3-606.1	86	54	288-556	20-49.6	269.6	22-321	[UBA 2023]
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	18.2-95.1	26	5	17-33	3-7.4	18.2-27	11-161	[UBA 2023]
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	11.4-242.4	0.9	5.4	15.4-33.3	1-1.4	8.1 - 21.8	22.2-32.1	[UBA 2023]

Eigene Darstellung auf Basis der genannten Quellen

© Prognos 2025

Tabelle 11: Technologiesteckbrief Induktion (Wechselstrom) nach Branchen

Kenngrösse	Einheit	Gusseisen	Aluguss	Kupfer	Kupfer	Allgemein (Metalle)	Quellen
Einsatzfelder		Schmelzen	Schmelzen	Schmelzen	Erwärmung	Härten, Schmelzen, Rühren und durchmischen von Metallschmelzen, Warmhalten, Schweißen	[Madeddu 2020, Blesl 2015, VISGW 2018, Agora+ISI 2024, UBA 2023]
Technologie							
Temperaturniveau	°C	1580	750-850	1085-1200	1100	1000-3000	[Madeddu 2020, Agora+ISI 2024, UBA 2023]
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	0.48-0.637	0.475-0.641	0.265	0.152-0.202		UBA 2023
Wirkungsgrad	%					50-90	[Madeddu 2020, Agora+ISI 2024]
Fahrweise/Auslastung	-%	kontinuierlich/75-85	kontinuierlich und diskontinuierlich/69-90	-/90	-/80-100		[UBA 2023]
Mittlere Anlagenleistung	MW					<42 MW (ab 2030 auch >50 MW)	[Agora+ISI 2024]
Kapazität	kt _{pr} /a	30-210	30-39	80	10-200		[UBA 2023]
Lebensdauer	a	28-30	30	50	20-48		[UBA 2023]
Wirtschaftlichkeit							
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}	21.4-115.8	43.5-51.4	65.9	51-454.5		[UBA 2023]
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	3.2-69.3	6.5-7.7	7.1	6.7-303		[UBA 2023]
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	1.1-8	3.8-7.7	3.3	4.4-136.4		[UBA 2023]
Einsatz							

Reifegrad	TRL	9	9	9	9	9	[Madeddu 2020, VISGW 2018, Agora+ISI 2024, UBA 2023]
Marktverfügbarkeit		heute	heute	heute	heute		[Agora+ISI 2024, UBA 2023]
Heutige Marktdurchdringung	%	0%	0-20%	0%	0-20 %		[UBA 2023]
Hemmnisse/Risiken						geringere Effizienz als Widerstandsheizung, nur leitfähige Materialien, bestimmte Geometrien notwendig; Ökonomie schwierig	[Agora+ISI 2024, UBA 2023]
Chancen						hohe Temperaturen; hohe Kapazitäten; bereits in Anwendung; einfache Automatisierung; präzise Wärmelokalisierung; Steuerung der Eindringtiefe (durch Freq.regelung)	[Agora+ISI 2024, Cu 2015]

Referenztechnologie

Energieträger		Koks, Erdgas	Erdgas	Erdgas	Erdgas		[UBA 2023]
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	0.51-0.925	0.55-0.813	0.285	0.19-0.225		[UBA 2023]
Lebensdauer	a	43-50	30	50	20-48		[UBA 2023]
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}	56.7-381.6	16.4-49.6	38.5	51.1-454.5		[UBA 2023]
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	5.7-103.6	4.1-7.4	9.6	6.7-303		[UBA 2023]
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	0.4-20.1	0.1-1.5	1.9	4.3-136.4		[UBA 2023]

Eigene Darstellung auf Basis der genannten Quellen

© Prognos 2025

Tabelle 12: Technologiesteckbrief Plasma nach Branchen

Kenngrösse	Einheit	Kalk	Kalk	Kalk	Zementklinker	Allgemein (Metall, Abfall, Ze- ment, Kalk)	Quellen
Einsatzfelder		kontinuierliches Brennen von Kalk mit niedriger Reaktivität (Normalschachtofen)	kontinuierliches Brennen von Kalk mit mittlerer/hocher Reaktivität (GCR-Ofen)	kontinuierliches Brennen von Kalk mit hohem Durchsatz (Drehrohrofen)	Klinkerbrennen	Schweissen, Schneiden, Sintern, Kalzinieren, Schmelzen, Aufdampfen, Aufspritzen	[Madeddu 2020, VISGW 2018, UBA 2023, Agora+ISI 2024, TUDA 2023]
Technologie							
Temperaturniveau	°C	1400	1250	1400	1550	350-5000	[UBA 2023, Agora+ISI 2024, Madeddu 2020]
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	1.267	1.085	1.575	1.222		[UBA 2023]
Wirkungsgrad	%					50-90	[Madeddu 2020, Agora+ISI 2024, UBA 2023]
Fahrweise/Auslastung	-/%	kontinuierlich/85	kontinuierlich/75	diskontinuierlich/70	kontinuierlich/70		[UBA 2023]
Mittlere Anlagenleistung	MW	-				Plasmastrahlverfahren: bis 28, ab 2035 <50 möglich; Plasmawärmebehandlungs- und Beschichtungsverfahren: bis 1	[Agora+ISI 2024, VISGW 2018, UBA 2023]
Kapazität	kt _{pr} /a	40	130	300	930		[UBA 2023]
Lebensdauer	a	60	45	50	60		[UBA 2023]
Wirtschaftlichkeit							
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}	140.1	80.2	100	251.9		[UBA 2023]
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	28	40.1	20	157.4		[UBA 2023]

OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	0.4	2.6	3.9	13.9		[UBA 2023]
Einsatz							
Reifegrad	TRL	<2	<3	<3	<3	9 (Metall, Abfall) 6 (NE-Metalle)	[Madeddu 2020, VISGW 2018, UBA 2023]
Marktverfügbarkeit		2040	2040	2040	2040		[UBA 2023]
Heutige Marktdurchdringung	%	0	0	0	0		[UBA 2023]
Hemmnisse/Risiken		technische Restriktionen in Bezug auf Leistung & Materialbean- spruchung				Kühlanforderungen limitieren Effizienz, Ökonomie schwierig, niedrige Lebens- dauer, hoher Ver- schleiss	[UBA 2023]
Chancen		indirekte Widerstandsbeheizung für Kalzinatoren zur CO2-reiche Brennatmosphäre (LEICAC)					[UBA 2023]
Referenztechnologie							
Energieträger		Koks, Strom	Erdgas, Strom	Kohle, Abfall, Strom	Abfall, Kohle, Erdgas		[UBA 2023]
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	1.140-1.25 (0.017 Strom)	1.042-1.05 (0.035 Strom)	1.496-1.575 (0.015 Strom)	1.11		[UBA 2023]
Lebensdauer	a	60	45	50	60		[UBA 2023]
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}	140.1	80.2	100	86		[UBA 2023]
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	28	40.1	20	53.7		[UBA 2023]
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	0.4	2.6	3.9	4.7		[UBA 2023]

Technologien mit geringer Relevanz für eine HT-PW-Elektrifizierung

Tabelle 13: Technologiesteckbrief zu weiteren Technologien (knapp) – Teil 1/2						
Kenngrösse	Einheit	Brüdenverdichtung	Elektronenstrahl	Laserstrahl	Funkenerosion	Schockwellen
Einsatzfelder		Energierückgewinnung (mehr Dampf und Prozesswärme)	Schmelzen, Schweißen, Beschichten, Bedampfen, Einlegieren, Bohren, Perforieren und Oberflächen-Wärmebehandlung von metallischen Werkstoffen höchster Reinheiten	Metalle (Schneiden, Schweißen, Gravieren, Löten, Härten, Bohren), Holz (Schneiden, Markieren), 3D-Druck (Sintern); limitierte Anwendungen für Prozesswärme	Schneiden, Schweißen, Löten, Härten, Bohren	Indirekte Heizung bei hohen Temperaturen (z. B. Brennen von Kalk und Zementklinker, e-Cracker)
Branche(n)		(Dampfnutzer)	Metallverarbeitung, Elektroindustrie, Automobilbau			
Technologie						
Temperaturniveau	°C	<400	5930 (Verdampfen von Wolfram) und grösser	Millionen demonstriert		700-1000 (ab 2030 bis 1500)
Wirkungsgrad	%	COP 3-10	6-70	4-30 %, 30-50% Wärmeerzeugung und 5-90% Wärmetransfer	4-30	
Anlagenleistung	MW		1-10 GW/m2 (Dauerbetrieb), bei kurzen Impulsen deutlich mehr)	1 kW/cm2 bis 100 GW/cm2	1 kW/cm2 bis 100 GW/cm2	heute: 1 2025: 5-20 2030: 50 2035: 50-100
Einsatz						
Reifegrad	TRL	9				6
Hemmnisse			sehr teuer, dadurch vermutlich nur für sehr wenige Prozesse sinnvoll	geringe Effizienz		Unsicherheit bzgl. Entwicklung und Skalierung

Chancen	kleine Flächen, präzise auf sehr hohe Temperatu- ren			hohe Temperaturen, Effi- zienz und Kapazitäten	
Quellen	[Madeddu 2020]	[VISGW 2018, TUDA 2023, Agora+ISI 2024]	[TUDA 2023, Agora+ISI 2024]	[TUDA 2023]	[Agora+ISI 2024]
Eigene Darstellung auf Basis der genannten Quellen					© Prognos 2025

Tabelle 14: Technologiesteckbrief zu weiteren Technologien (knapp) – Teil 2/2

Kenngrösse	Einheit	Mikrowellen	Hochfrequenz	Induktionsofen (Gleichstrom)	Infrarotheizung	Elektrolichtbogen
Einsatzfelder		Sintern, Behandeln, Erwärmung und Trocknung von Stoffen mit polaren Moleküleigenschaften	Trocknung und Verleimung, Vorerwärmung und Verschweissung, Auftauen und Konservieren	Induktionshärten, Schmelzen von Metallen, Speziallegierungen und Nichtmetallen, Rühren und Durchmischen von Metallschmelzen, induktives Schweiessen und Fügen, Sonderverfahren	Trocknen, Härten, Behandeln, Erwärmen, Formen, Beschichten	Schmelzen, Umschmelzen, Raffinieren, Schweiessen
Branche(n)		Papier, Holz, Möbel, Textil, Kunststoff, Nahrung, nicht etabliert in: Keramik, Zement	Papier, Textil, Glas, Kunststoff, Nahrung	Metalle, Glas, Elektronik	Keramik, Zement, Nahrung, Papier, Chemie, Textilien	Metall, Chemie, Maschinenbau, Bau
Technologie						
Temperaturniveau	°C	>1000			1000-3000 (kurzwellig) bis 1000 (langwellig)	bis 9000
Wirkungsgrad	%	50-85		>80	Wärmeproduktion: 56-96 Wärmeübertragung: 70-96 bei Plastik und Holz (viel niedriger für meiste Materialien)	60-95
Anlagenleistung	MW					bis 200
Einsatz						
Reifegrad	TRL	9 (bei Nahrung) 8 (bei Papier) 6 (NE-Metalle)		5 (Glas, Keramik)	9	9 (bei Stahl)
Hemmnisse		hohe Anfangsinvestition; komplexe Technologie; auf kleinen Leistungsbereich beschränkt	hohe Anfangsinvestition; komplexe Technologie; auf kleinen Leistungsbereich beschränkt		bei bestimmten Anwendungen möglich, aber diese sind auch durch Widerstandsheizung abdeckbar	

Chancen	schnelles, homogenes und schonendes Aufheizen, Platzsparend, geringer Energieverbrauch bei feuchten Materialien; hohe Leistungsdichte; Leistung ausschliesslich dort abgegeben, wo sie benötigt wird	hohe Leistungsdichte; Leistung ausschliesslich dort abgegeben, wo sie benötigt wird			Hohe Kapazitäten, hohe Temperaturen, bestehende Technologie in einigen Feldern
Quellen	[TUDA 2023, Agora+ISI 2024, VISGW 2018]	[VISGW 2018]	[VISGW 2018]	[Madeddu 2020, Blesl 2015, VISGW 2018, Agora+ISI 2024]	[Madeddu 2020, Agora+ISI 2024, VISGW 2018, UBA 2023]

Eigene Darstellung auf Basis der genannten Quellen

© Prognos 2025

Technologien für eine Elektrifizierung der Dampferzeugung

Tabelle 15: Technologiesteckbrief Elektrodenkessel nach Branchen						
Kenngrösse	Einheit	Chemie	Papier	Nahrung	Allgemein (Papier, Nahrung, Chemie)	Quellen
Einsatzfelder		Chemiepark-Dampfversorgung	Papiertrocknung	Milchpulverherstellung	Raumheizung; Warmwasser; Thermalöl; Dampferzeugung	[Madeddu 2020, VISGW 2018, Agora+ISI 2024, ISI 2024, UBA 2023]
Technologie						
Temperaturniveau	°C	200-500	140-150	240	bis 500 (teilweise bis 1000)	[Madeddu 2020, Agora+ISI 2024, ISI 2024, UBA 2023]
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	0.72	0.67	0.69		
Wirkungsgrad	%				95-99	[Madeddu 2020, Agora+ISI 2024]
Fahrweise/Auslastung	-/%	-/75	-/72	-/69		[UBA 2023]
Mittlere Anlagenleistung	MW				0.1-60	[Blesl 2015, VISGW 2018, Agora+ISI 2024, UBA 2023]
Kapazität	kt _{pr} /a	4800	470	220		[UBA 2023]
Lebensdauer	a				20-25	[UBA 2023]
Wirtschaftlichkeit						
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}	6.5	6.4	7.6	75-80 (pro kW)	[Blesl 2015, UBA 2023]
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	4.3	4.2	4.9		[UBA 2023]
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	0.3	0.3	0.4		[UBA 2023]
Einsatz						
Reifegrad	TRL	9	9	9	9	[Madeddu 2020, Agora+ISI 2024, ISI 2024, UBA 2023]

Marktverfügbarkeit		heute	heute	heute	[UBA 2023]
Heutige Marktdurchdringung	%	1	2	1	bereits in relevanten Anwendungen etabliert (kleine Kapazitäten) [UBA 2023]
Hemmnisse/Risiken					geringere Effizienz als Wärmepumpen [Agora+ISI 2024]
Chancen					äquivalent zu konventionellen Kesseln; höhere Temperaturen als bei Wärmepumpen, höhere Effizienz als fossile, weil keine Wärmetauscher und Abgase, leichtere Integration als Wärmepumpen [Agora+ISI 2024]
Referenztechnologie					
Energieträger		Erdgas	Erdgas	Erdgas	[UBA 2023]
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	0.96-0.97	0.69-0.72	0.99	[UBA 2023]
Lebensdauer	a	20-25	20-25	20-25	[UBA 2023]
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}	24.9	4.8	37.1	[UBA 2023]
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	16.2	3.1	24.1	[UBA 2023]
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	1.2	0.2	1.9	[UBA 2023]

Tabelle 16: Technologiesteckbrief Kompressionswärmepumpe nach Branchen

Kenngrösse	Einheit	Papier	Nahrung	Wärmepumpen allgemein (Papier, Lebensmittel, Metalle, Chemie)	Quellen
Einsatzfelder		Papiertrocknung	Milchpulverherstellung	Raumwärme und Warmwasser, über 200 °C: Trocknung, Destillation, Spritzgiessen	[Arpagaus 2023, Madeddu 2020, Agora+ISI 2024, VISGW 2018, UBA 2023]
Technologie					
Temperaturniveau	°C	140-150	240	80-100 Hochtemperaturwärmepumpen <400 Höchsttemperaturwärmepumpe	[Arpagaus 2023, Madeddu 2020, Agora+ISI 2024, VISGW 2018, UBA 2023, Agora 2022]
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	0.35	0.35		
Wirkungsgrad	%	190 (30 °C) 220 (50 °C)		150 (Temperaturhub ~130 K) 600 (Temperaturhub ~25 K) 700 (T-Hub ~25 K, gleichzeitige Kältenutzung)	[Arpagaus 2023, Agora 2022, Madeddu 2020, Blesl 2015, Agora+ISI 2024, VISGW 2018, UBA 2023]
Fahrweise/Auslastung	-%	-/72	-/69		[UBA 2023]
Mittlere Anlagenleistung	MW			0.03-34	[UBA 2023, Blesl 2015, Arpagaus 2023]
Kapazität	kt _{pr} /a	470	220		[UBA 2023]
Lebensdauer	a			20-25	[UBA 2023]
Wirtschaftlichkeit					
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}				
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	33.7	75.6	150-2000 (pro kW)	[Blesl 2015, UBA 2023, DE-CARBIN 2024, Arpagaus 2023]
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	33.7	75.6		[UBA 2023]
OPEX - Energie	EUR/t _{kap}	1.7	3.8		[UBA 2023]

Einsatz					
Reifegrad	TRL	7-8	5-6 (zentrales System) 7-8 (dezentrales System)	9 (<100 °C) 6-9 (200-280 °C)	[Arpagaus 2023, Madeddu 2020, Agora+ISI 2024, VISGW 2018]
Marktverfügbarkeit		heute	2030		[UBA 2023]
Heutige Marktdurchdringung	%	0	0	sehr gering	[UBA 2023]
Hemmnisse/Risiken				finden geeigneter Kältemitteln mit niedrigem GWP und ODP; ineffizienter bei zentraler Dampfversorgung; grösserer Temperaturhub reduziert Effizienz	[UBA 2023, Agora+ISI 2024]
Chancen				Einsatz in dezentralen Systemen erhöht Abwärmenutzung und ermöglichen schrittweise Elektrifizierung; bessere Auslegung bei Dezentralität flexibilisiert den Einsatz und ermöglicht optimierte Prozessführung; geringerer Energiebedarf	[UBA 2023, Agora+ISI 2024]
Referenztechnologie					
Energieträger		Erdgas	Erdgas		[UBA 2023]
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	0.69-0.72	0.99		[UBA 2023]
Lebensdauer	a	20-25	20-25		[UBA 2023]
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}	4.8	37.1		[UBA 2023]
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	3.1	24.1		[UBA 2023]
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	0.2	1.9		[UBA 2023]

Hinweis: Für die Branchen Papier und Nahrung beziehen sich die Kennwerte auf mehrstufig kaskadierte Wärmepumpensysteme.

Tabelle 17: Technologiesteckbrief Hybride Dampferzeugung (Wärmepumpe und Elektrodenkessel)

Kenngrösse	Einheit	Lebensmittel	Chemie	Quellen
Einsatzfelder		Milchpulverherstellung	Chemiepark-Dampfversorgung	
Technologie				
Temperaturniveau	°C	>200	200-500	[UBA 2023]
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	0.44	0.49 -0.54	[UBA 2023]
Wirkungsgrad	%		240 (WP-System Niederdruck) 160 (WP-System Niederdruck/Mitteldruck)	[UBA 2023]
Fahrweise/Auslastung	-%	-/69	-/75	[UBA 2023]
Mittlere Anlagenleistung	MW			
Kapazität	kt _{pr} /a	220	4800	[UBA 2023]
Lebensdauer	a			
Wirtschaftlichkeit				
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}	88.4	56.6 (WP-System Niederdruck/Mitteldruck) 18.5 (WP-System Niederdruck)	[UBA 2023]
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	88.4	56.3 (WP-System Niederdruck/Mitteldruck) 17.2 (WP-System Niederdruck)	[UBA 2023]
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}			
OPEX - Energie	EUR/t _{kap}	4.4	2.8 (WP-System Niederdruck/Mitteldruck) 0.9 (WP-System Niederdruck) (inkl. Wartung)	[UBA 2023]
Einsatz				
Reifegrad	TRL	7-8	5-6	[UBA 2023]
Marktverfügbarkeit		heute	2030/heute	[UBA 2023]
Heutige Marktdurchdringung		0	0	[UBA 2023]

Hemmnisse/Risiken

Chancen

Referenztechnologie

Energieträger		Erdgas		Erdgas	[UBA 2023]
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	0.99		0.96-0.97	[UBA 2023]
Lebensdauer	a	20-25		20-25	[UBA 2023]
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}	37.1		24.9	[UBA 2023]
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	24.1		16.2	[UBA 2023]
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	1.9		1.2	[UBA 2023]

| Eigene Darstellung auf Basis der genannten Quellen

© Prognos 2025

Modellierte Technologien für eine Elektrifizierung der HT-PW und der Dampferzeugung

Tabelle 18: Aggregierter Technologiesteckbrief für die HT-PW-Elektrifizierung nach Branchen											
Kenngrösse	Einheit	Glas	Keramik	Ziegel	Zement	Eisen, Stahl, Maschi- nenbau	Eisen, Stahl, Metaller- zeugnisse, Maschi- nenbau, Bau	Aluminium	Aluminium, Metaller- zeugnisse	Kupfer	Kupfer, Metaller- zeugnisse
Einsatzfelder		Schmelzen	Brennen	Brennen	Brennen	Schmelzen	Erwärmen	Schmelzen	Erwärmen	Schmelzen	Erwärmen
Technologie		Wider- standshei- zung (direkt, indi- rekt)	Wider- standshei- zung (indirekt)	Wider- standshei- zung (indirekt)	Plasma- Brenner	Induktions- ofen (Wech- selstrom)	Wider- standshei- zung (indirekt)	Induktions- ofen (Wech- selstrom)	Wider- standshei- zung (indirekt)	Induktions- ofen (Wech- selstrom)	Induktions- ofen (Wech- selstrom) / Wider- standshei- zung (indirekt)
Temperaturniveau	°C	1700	900-1480	1250-1800	1550	1580	950	750-850	400-600	1085-1200	1000-1100
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	0.669	0.624	0.624	1.222	0.559	0.261	0.558	0.190	0.265	0.156
EEV-Reduktion bei Elektrifi- zierung ggü. Referenztech.	%	38	39	39	-10*	22	31	18	12	7	13
Auslastung	%	90	90	90	70	80	80	80	85	90	88
Lebensdauer	a	7	30	30	60	29	30	30	33	50	34
Wirtschaftlichkeit											
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}	233	268	268	252	69	54	47	32	66	258
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	110	136	136	157	25	5	7	5	7	89
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	84	121	121	14	5	5	6	11	3	43

Einsatz											
Reifegrad	TRL	9	4-9	4-9	<3	9	9	9	9	9	9
Marktverfügbarkeit		heute	2035	2035	2040	heute	heute	heute	heute	heute	heute
Heutige Marktdurchdringung	%	0	0	0	0	0	20	10	0	0	7
Referenztechnologie											
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	1.075	1.025	1.025	1.110	0.718	0.379	0.682	0.215	0.285	0.179
Lebensdauer	a	15	30	30	60	47	30	30	33	50	34
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}	205	268	268	86	219	54	33	35	39	258
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	137	136	136	54	55	5	6	5	10	89
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	10	121	121	5	10	5	1	1	2	43

*) negative Werte bedeuten *Mehrverbrauch* ggü. der Referenztechnologie

Tabelle 19: Aggregierter Technologiesteckbrief Elektrifizierung der Dampferzeugung nach Branchen

Kenngrösse	Einheit	Nahrung		Papier		Chemie	
Einsatzfelder		Dampf/Trocknung		Dampf/Trocknung		Dampf/Trocknung	
Technologie		<i>Elektrodenkessel</i>	<i>Kompressions-Wärmepumpe (auch hybrid)</i>	<i>Elektrodenkessel</i>	<i>Kompressions-Wärme-/Kältepumpe</i>	<i>Elektrodenkessel</i>	<i>Kompressions-Wärmepumpe (auch hybrid)</i>
Temperaturniveau	°C	240	240	150	150	200-500	200-500
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	0.690	0.395	0.670	0.350	0.720	0.515
EEV-Reduktion bei Elektrifizierung ggü. Referenztech.	%	30	60	5	50	25	47
Auslastung	%	69	69	72	72	75	75
Lebensdauer	a	23	23	23	23	23	23
Verhältnis E-Kessel/WP	%	50	50	66	34	66	34
Wirtschaftlichkeit							
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}	8	82	6	34	7	38
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	5	82	4	34	4	37
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	0.4	4	0.3	4	0.3	2
Einsatz							
Reifegrad	TRL	9	7	9	7-8	9	5-6
Marktverfügbarkeit		heute	2028	heute	2025	heute	2028
Heutige Marktdurchdringung	%	1	0	2	0	1	0
Referenztechnologie							
Spez. Energieverbrauch	MWh/t _{pr}	0.990	0.990	0.705	0.705	0.965	0.965

Lebensdauer	a	23	23	23	23	23	23
CAPEX - Neubau	EUR/t _{kap}	37	37	5	5	25	25
CAPEX - Modernisierung	EUR/t _{kap}	24	24	3	3	16	16
OPEX - Betrieb und Wartung	EUR/t _{kap}	2	2	0.2	0.0	1	1

Eigene Berechnung auf Basis der genannten Quellen aus vorigen Tabellen

© Prognos 2025

Anhang – Leitfäden für Experten-Gespräche

Interview-Leitfragen für Industrieunternehmen

- 1.** Was ist für Sie „Hochtemperatur“ (ab wieviel Grad, andere Aspekte relevant)?
- 2.** Kennen Sie HT-Prozesse in Ihrem Unternehmen/bei Ihren Mitgliedern? Welche sind dies?
- 3.** Welche Anteile haben die HT-Prozesse hinsichtlich des gesamten Energiebedarfes und hinsichtlich der gesamten Treibhausgasemissionen etwa?
- 4.** Wie wird HT-Prozesswärme derzeit bereitgestellt/erzeugt? Welche Energieträger kommen dabei zum Einsatz?
- 5.** Wird auch zukünftig HT-Prozesswärme benötigt? In ähnlichem oder geringerem/höheren Masse? Weshalb ändert sich der Umfang?
- 6.** Welche Ihrer HT-Prozesse sind bereits elektrifiziert? Welcher Anteil an der HT-Prozesswärme ist dies?
- 7.** Welche Ihrer HT-Prozesse liessen sich elektrifizieren (theoretisch)? Welcher Anteil wäre dies?
- 8.** Welche Ihrer HT-Prozesse könnten vorrangig von einer Elektrifizierung betroffen sein (technisch und ökonomisch)? Welcher Anteil wäre dies?
- 9.** Erwägen Sie die Einführung von Elektrifizierungstechnologien für ihre HT-Prozesswärmeerzeugung und warum (nicht)?
- 10.** Kriterien, die für eine Elektrifizierung im Unternehmen/in der Branche berücksichtigt werden sollten:
 - 10.1.** Welches sind technische Kriterien (z. B. Energieeffizienz, Verfügbarkeit, Reifegrad)?
 - 10.2.** Welches sind wirtschaftliche Kriterien (z. B. Investitionskosten, Betriebskosten, Rentabilität, Marktdurchdringung, erwartete Entwicklung)?
 - 10.3.** Welches sind Kriterien der Akzeptanz bzw. der Implementation (z. B. einfache Implementierung, Risiken für die Produktion, geringerer Wartungsaufwand)?
- 11.** Bewertung der Hemmnisse, Risiken und Chancen
 - 11.1.** Welche Hemmnisse, Hindernisse und Risiken bestehen aus Sicht des Unternehmens bei der Integration dieser Technologien?
 - 11.2.** Welche Erfolgsfaktoren kennen Sie, welche Chancen versprechen Sie sich?
- 12.** Welche Art der Elektrifizierung (Induktion, Infrarot, Mikrowellen, Widerstand, Plasma, Laser, ...) käme bei Ihren HT-Prozessen in Frage?
- 13.** Können Sie Angaben zum zeitlichen Horizont einer möglichen Elektrifizierung treffen?
- 14.** Sind Ihnen Förderprogramme bekannt, die eine Elektrifizierung der HT-Prozesse unterstützen? Welche?
- 15.** Existieren gesetzliche Vorgaben, die eine Elektrifizierung bremsen oder fördern?
- 16.** Kennen und berücksichtigen Sie mögliche Auswirkung einer verstärkten Elektrifizierung aufs (lokale) Stromsystem, z. B.
 - 16.1.** deutlicher Zuwachs der Anschlussleistung und
 - 16.2.** Notwendigkeit zur Nutzung von produktionsseitiger Last-Flexibilität?
- 17.** Betreiben Sie interne Forschung zum Thema Elektrifizierung von HT-Prozessen?

- 18.** Spielt eine Elektrifizierung bei Niedertemperatur-Prozessen (z. B. Wärmepumpen, Power-to-Heat) für Sie eine Rolle? Wurde hier bereits elektrifiziert?
- 19.** Beeinflussen weitere Faktoren in Zukunft den Strombedarf im Unternehmen/der Branche, wie bspw. CCS/CCU, zunehmende Digitalisierung/Automatisierung?

Interview-Leitfragen für Energieversorgungsunternehmen

- 1.** Was ist für Sie „Hochtemperatur“ (ab wieviel Grad, andere Aspekte relevant)?
- 2.** Haben Sie bereits Kunden, denen sie als Wärmecontractor Hochtemperaturwärme bereitstellen, Industriekunden, die danach anfragen oder wenn nicht, ist dies ein Zukunftsfeld, was sie in Betracht ziehen?
- 3.** (falls 2. zutreffend) Wie wird HT-Prozesswärme derzeit bereitgestellt/erzeugt? Welche Energieträger kommen dabei zum Einsatz?
- 4.** Bis zu welchem Anteil an Elektrifizierung der Hochtemperatur-Prozesswärme sind die bestehenden Netze ausreichend?
- 5.** Welche Netzebenen stellen die Engpässe dar?
- 6.** Hat die Struktur der Engpässe saisonalen oder tageszeitlich starke Unterschiede?
- 7.** Wie lange dauert es im Falle eines Engpasses, bis dieser gelöst ist und das betroffene Industrieunternehmen die Umstellung umsetzen kann?
- 8.** Sind Verstärkungsmassnahmen ausreichend oder bedarf es eines Neubaus von Stromleitungen?
- 9.** Können Batteriespeicher eine relevante Rolle dabei haben den nötigen Netzausbau zu verringern?
- 10.** Welche Bedeutung haben dynamische Stromnetzentgelte, die je nach Netzsituation variieren, für die Umsetzbarkeit der Elektrifizierung von Hochtemperaturwärme?
- 11.** Sind die regulatorischen Bedingungen geeignet um die Netzbelastung durch elektrifizierte Hochtemperaturwärme geeignet zu bepreisen und Flexibilität anzureizen?
- 12.** (falls 11. nicht zutreffend) Welche Änderungen sind nötig für eine gute Integration von Hochtemperaturwärme in das Stromsystem?
- 13.** Spielt eine Elektrifizierung bei Niedertemperatur-Prozessen (z. B. Wärmepumpen, direktelektrische Erzeugung von Prozessdampf im Bereich 100–200 °C) für ihre Kunden eine Rolle?
- 14.** Wie gut ist die Datenlage zur Auslastung der Netze im Bereich der Mittelspannung?

Abkürzungsverzeichnis

BAU	Business as usual
BECCS	Bioenergy Carbon Capture and Storage (biogene Kohlenstoffabscheidung)
CAPEX	Capital Expenditures (Investitionsausgaben)
CC	Carbon Capture (Kohlenstoffabscheidung)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ e	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente (Normierung der nicht-CO ₂ -Treibhausgase auf die Klimawirksamkeit von CO ₂)
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
EHF	Electric Arc Furnace (Elektrolichtbogenofen)
EE	Erneuerbare Energien
EEV	Endenergieverbrauch
EHS	Emissionshandelssystem
GWP	Global Warming Potential (Treibhauswirksamkeit)
HT-PW	Hochtemperatur-Prozesswärme
KIG	Klima- und Innovationsgesetz
Mt	Millionen Tonnen
NE-Metalle	Nicht-Eisen-Metalle
NOGA 2008	Nomenclature Générale des Activités économiques (Allgemeine Systematik der Wirtschaftszweige) des Jahres 2008
ODP	Ozone depletion potential (Ozonabbaupotenzial)
OPEX	Operational Expenditures (Betriebsausgaben)
PJ	Petajoule (10 ¹⁵ Joule)
prlDe	Prognos Industry Developer for Energy (Industriemodell der Prognos)

PtH	Power-to-Heat (elektrische Wärmebereitstellung)
PtX	Power-to-X (synthetische Energieträger)
t _{kap}	Tonnen Kapazität
t _{pr}	Tonnen Produkt
THG	Treibhausgas(e)
TMP-Verfahren	Thermo-Mechanical-Pulp-Verfahren (Refiner-Verfahren bei der Papierherstellung)
TRL	Technology-Readiness-Level (Technologiereifegrade)
TWh	Terawattstunden (10 ¹² Wattstunden)
WKK	Wärme-Kraft-Kopplung

Quellenverzeichnis

Agora 2022	Power-2-Heat: Direkte Elektrifizierung von industrieller Prozesswärme, Paul Münnich (Agora Industrie), Juli 2022
Agora+IEG 2023	Roll-out von Grosswärmepumpen in Deutschland. Strategien für den Markthochlauf in Wärmenetzen und Industrie. Agora Energiewende und Fraunhofer IEG, Juli 2023
Agora+ISI 2024	Direct electrification of industrial process heat. An assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU. Fraunhofer ISI, DENEFF, Energy Innovation. Im Auftrag vom Agora Industry, Juni 2024
Arpagaus 2023	Hochtemperatur Wärmepumpen für industrielle Anwendungen – Input Referat für VEA Beratungs-GmbH, Webinar «Wie die Dekarbonisierung gelingen kann», von Dr. Cordin Arpagaus (OST), 16. März 2023, https://www.vea.de/files/user_upload/VEA-Hauptseite/Newsroom/Veranstaltungen/2023/4_-_Hochtemperatur-Waermepumpen_fuer_industrielle_Anwendungen_Arpagaus.pdf
BFE 2021	Energieperspektiven 2050+, Bundesamt für Energie (BFE), 2021, https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html
BFE 2023	Wärmestrategie 2050, Bundesamt für Energie (BFE), 2023
BFE 2024a	Methodenbericht Industriesektor – Dokumentation des Prognos Industry Developer for Energy (priDe), Prognos im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE), November 2024 (noch nicht veröffentlicht)
BFE 2024b	Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2023 – Auswertung nach Verwendungszwecken, Prognos, Infrac und TEP Energy für das Bundesamt für Energie (BFE), Oktober 2024, file:///prognos.com/Profile/DL/Alexander.Piegsa/Downloads/11898-bericht_verwendungszwecke_2023.pdf
BFE 2024c	Förderübersicht, Bundesamt für Energie (BFE), https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/foerderung.html , abgerufen am 20.12.2024
BFE 2024d	Energie- und Innovationsgesetz, Bundesamt für Energie (BFE), https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/uvek/abstimmungen/klima-und-innovationsgesetz.html , abgerufen am 20.12.2024
BFE 2024e	CO2-Gesetz, Bundesamt für Energie (BFE), https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/uvek/abstimmungen/co2-gesetz.html , abgerufen am 20.12.2024

BFE 2024f	Energiegesetz, Bundesamt für Energie (BFE), https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/uvek/abstimmungen/abstimmung-zum-energiegesetz/uebersicht-massnahmen.html , abgerufen am 20.12.2024
BFE 2024g	Gebäudeprogramm, Bundesamt für Energie (BFE), https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/vermeidungsmassnahmen/gebaeude/gebaeudeprogramm.html , abgerufen am 20.12.2024
BFE 2024h	Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2023 – Datentabellen, Bundesamt für Energie (BFE), August 2024
Blesl 2015	Effizienz, Verbrauchsentwicklung und neue Stromverbraucher in der Industrie, Markus Blesl (Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung IER), Juni 2015
Bracke/Huenges 2022	Roadmap Tiefe Geothermie für Deutschland, Bracke, R. und Huenges, E., 2022, https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/documents/Roadmap%20Tiefe%20Geothermie%20in%20Deutschland%20FhG%20HGF%2002022022.pdf
Cu 2015	White paper – Introduction to Industrial Electrical Process Heating, Bruno De Wachter, European Copper Institute and Leonardo ENERGY, October 2015
EFr 2024	Energiefranken – Schweizer Förderprogramme für Energie und Mobilität, Bundesamt für Energie (BFE) und Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ), https://www.energiefranken.ch/de , abgerufen am 21.12.2024
FfE 2009	Energiezukunft 2050 – Teil I – Methodik und IST-Zustand, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE) in Zusammenarbeit mit dem ifo Institut für Wirtschaftsforschung, im Auftrag von EnBW, E.ON Energie, RWE Power und Vattenfall Europe, Oktober 2009, https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2021/08/Endbericht_Energiezukunft_2050_Teil_I.pdf
FVEE 2022	Transformation in der Industrie: Herausforderungen und Lösungen für erneuerbare Prozesswärme, D. Schüwer (Wuppertal Institut), veröffentlicht beim ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE), 2022, https://www.fvee.de/wp-content/uploads/2023/06/th2022_03_03.pdf , abgerufen am 26.11.2024
ifeu 2010	Prozesswärme im Marktanreizprogramm – Zwischenbericht zu Perspektivische Weiterentwicklung des Marktanreizprogramms FKZ 03MAP123, ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg sowie Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Juli 2010, https://elib.dlr.de/82173/1/Prozesswa%C3%A4rme_im_MAP.pdf
in4c 2021	Industriewärme Klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation, in4climate.nrw, 2021

in4c 2022	Prozesswärme für eine klimaneutrale Industrie, in4climate.nrw, 2022
Madeddu 2020	The CO2 reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat), Silvia Madeddu et al., 2020, Environ. Res. Lett. 15 124004, https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abbd02/pdf
Naegler 2015	Quantification of the European industrial heat demand by branch and temperature level, Naegler, T., et al., Oktober 2015, https://doi.org/10.1002/er.3436
SIJ 2016	Handbuch methodischer Grundfragen zur Masterplan-Erstellung – Kommunale Masterpläne für 100 % Klimaschutz, Solar-Institut Jülich der FH Aachen (SIJ) in Kooperation mit Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH (WI) und Deutschem Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), 2016, https://www.klimaschutz.de/sites/default/files/handbuch_methodischer_grundfragen_bf_cps_final.pdf
SWK 2024	Kurzstudie: Energieeffiziente und CO2-freie Prozesswärme, SWK E ² - Institut für Energietechnik und Energiemanagement der Hochschule Niederrhein, Krefeld, Mai 2024
UBA 2023	CO2-neutrale Prozesswärmeerzeugung – Umbau des industriellen Anlagenparks im Rahmen der Energiewende: Ermittlung des aktuellen SdT und des weiteren Handlungsbedarfs zum Einsatz strombasierter Prozesswärmeanlagen, Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung (ISI) und Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB) der RWTH Aachen University für das Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Rosslau, Dezember 2023, https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-neutrale-prozesswaermeerzeugung
TUDA 2023 2023	Vorlesungsunterlagen zu «Numerische Simulation elektrothermischer Prozesse», Dr.-Ing. Jörg Neumeyer (Technische Universität Darmstadt – Institut für Elektrische Energiewandlung), 2023
VISGW 2018	Virtuelles Institut Strom zu Gas und Wärme - Flexibilisierungsoptionen im Strom-Gas-Wärme-System, Abschlussbericht, Band II, 2018, http://strom-zu-gas-und-waerme.de/wp-content/uploads/2018/10/Virtuelles-Institut-SGW-Band-II-Pfadanalyse.pdf

Impressum

Dekarbonisierungspotenzial von Hochtemperatur-Prozesswärme durch Elektrifizierung in der Schweiz

Erstellt im Auftrag von

Bundesamt für Energie (BFE)
3003 Bern
Telefon: +41 58 462 56 11
Fax: +41 58 463 25 00
E-Mail: contact@bfe.admin.ch
www.bfe.admin.ch

Bearbeitet von

Prognos AG
St. Alban-Vorstadt 24
4052 Basel
Telefon: +41 61 3273-310
Fax: +41 61 3273-300
E-Mail: info@prognos.com
www.prognos.com
twitter.com/Prognos_AG

Autoren

Dr. Kirsten Kubin
Paurnima Kulkarni
Saskia Lengning
Dr. Fabian Muralter
Dr. Alexander Piégsa
Dr. Noha Saad
Aurel Wunsch

Kontakt

Dr. Alexander Piégsa (Projektleitung)
Telefon: +41 61 3273-430
E-Mail: alexander.piegsa@prognos.com

Satz und Layout: Prognos AG
Stand: März 2025
Copyright: 2025, Prognos AG

Alle Inhalte dieses Werkes, insbesondere Texte, Abbildungen und Grafiken, sind urheberrechtlich geschützt. Das Urheberrecht liegt, soweit nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet, bei der Prognos AG. Jede Art der Vervielfältigung, Verbreitung, öffentlichen Zugänglichmachung oder andere Nutzung bedarf der ausdrücklichen, schriftlichen Zustimmung der Prognos AG.

Zitate im Sinne von § 51 UrhG sollen mit folgender Quellenangabe versehen sein: Prognos AG (2025): Dekarbonisierungspotenzial von Hochtemperatur-Prozesswärme durch Elektrifizierung in der Schweiz. Im Auftrag des BFE.