



IEA IETS Annex 19

Elektrifizierung der Industrie

**Basispapier
Elektrifizierung der Industrie**

Jänner 2020

**IEA FORSCHUNGS
KOOPERATION**

*Dieses Projekt wird im Rahmen der IEA-Forschungskooperation im Auftrag des
Klima- und Energiefonds durchgeführt.*



 **Bundesministerium
Verkehr, Innovation
und Technologie**



Der IEA IETS Annex 19 „Elektrifizierung der Industrie“

Die Elektrifizierung in ihren verschiedenen Ausprägungen bietet Industriebetrieben Möglichkeiten, auf eine CO₂-neutrale Produktion umzustellen. Das österreichische Konsortium, bestehend aus Energieinstitut an der JKU, AIT, MU Leoben und AEE INTEC, ist die österreichische Vertretung beim Annex „Elektrifizierung der Industrie“ der IEA (Programm: Industrial Energy-Related Technologies and Systems). Unser breit aufgestelltes Konsortium deckt die vielen Facetten der Elektrifizierung der Industrie ab: direkte Elektrifizierung, Wärmepumpen, Power-to-Hydrogen, Power-to-X, Potenzial- und Systemaspekte. Ziele und Tätigkeiten:

- Unterstützung und Beschleunigung der Einführung der Elektrifizierung in der Prozessindustrie
- Gemeinsame Entwicklung von neuem Wissen und Know-how zur industriellen Elektrifizierung
- Nutzung der Internationalen Netzwerk- und Informationsinfrastruktur
- Nationales Wissen zwischen den Partnern austauschen und verbreiten
- Verbesserung des Verständnisses der Bedingungen, Treiber und Politiken für eine optimale industrielle Umsetzung

AutorInnen

Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz (Projektleitung) Simon Moser Hans Böhm Johannes Lindorfer Andreas Zauner	
AIT Austrian Institute of Technology Gerwin Drexler-Schmid Sophie Knöttner Rene Hofmann	
Montanuniversität Leoben Lehrstuhl für Energieverbundtechnik Thomas Kienberger Christoph Sejkora Johannes Dock	
AEE INTEC Jürgen Fluch Christoph Brunner Wolfgang Glatzl	

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	4
1 Einleitung.....	6
1.1 Motivation für die Betrachtung der Elektrifizierung der Industrie	6
1.2 Definition der „Elektrifizierung der Industrie“	6
1.3 Ziel und Methode	7
2 Elektrifizierung der Industrie – Prozesse.....	8
2.1 Unit Operations zur Elektrifizierung.....	8
2.2 Power-to-Heat.....	11
2.2.1 Hochtemperatur / Direktnutzung	11
2.2.2 Nieder- und Mitteltemperatur	12
2.2.3 Industrielle Wärmepumpen	13
2.3 Power-to-Gas.....	15
2.3.1 Ersatz Fossiler in gleichbleibendem Prozess	17
2.3.2 Ersatz Fossiler in neuem Prozess.....	18
2.4 Hilfsaggregate.....	18
3 Exkurs: Oxyfuel und Carbon Capture	19
3.1 Industrielle Sauerstofferzeugung und Oxyfuel-Prozesse	19
3.2 Carbon Capture	20
4 Elektrifizierung der Industrie – System und Versorgung.....	22
4.1 Potenziale erneuerbaren Stroms	22
4.2 Volatilität der Erzeugung #1: Tages- und Saisonspeicher	22
4.3 Volatilität der Erzeugung #2: Demand Response.....	25
4.4 Anforderungen an die Leitungsinfrastruktur	26

Zusammenfassung

Unter der Elektrifizierung der Industrie soll jede Änderung der industriellen Prozesse und der vorgelagerten Energieversorgungskette verstanden werden, welche aus der Umstellung auf erneuerbaren Strom als Primärenergiequelle für die in industriellen Prozessen verwendete Energie resultiert. Ziel der Elektrifizierung der Industrie ist die Reduktion der zurechenbaren CO₂-Emissionen. **Die Elektrifizierung industrieller Prozesse leistet, wenn die Versorgung über Strom aus erneuerbaren Quellen erfolgt, einen wesentlichen Beitrag zur CO₂-Emissionsreduktion.** Über potenziell positive energetische und wirtschaftliche Aspekte hinausgehend ist es essenziell, die Implikationen für das Energiesystem zu verstehen, mit denen Versorgungsunternehmen und Infrastrukturbetreiber konfrontiert sind. Eine Reduktion der CO₂-Emissionen kann auch über andere erneuerbare Energiequellen oder über den Effizienzpfad erfolgen. Die Elektrifizierung der Prozesse bzw. die elektrische Energiebereitstellung hält aber aufgrund der umfassenden Nutzbarkeit des Energieträgers und der bisherigen Fokussierung der Energiewende auf strombasierte Technologien eine besondere Position inne.

Industrielle Produktions- und Prozessschritte werden in Grundverfahrensschritte (**Unit Operations**) unterteilt, die je nach eingesetzter Technologie unterschiedliche Potenziale für die Elektrifizierung aufweisen. In Anbetracht der limitierten Verfügbarkeiten erneuerbaren Stroms sind diese Strategien einer exergetischen Optimierung/Prüfung zu unterwerfen. Dazu zählen die Entwicklung und Adaptierung bestehender Unit Operations (Potenzialsteigerung) ebenso wie die Anwendung, Entwicklung und Implementierung neuer Prozesstechnologien für die optimierte Nutzung verfügbarer und erneuerbarer Nieder- und Mitteltemperaturwärme für die Entlastung des Strombedarfs.

Strombasierte (Wärme-)Prozesse können in einigen Fällen effizienter und wirtschaftlicher sein als die auf fossilen Brennstoffen basierenden Technologien. Die Elektrifizierung mildert die Emissionen aber nur dann, wenn Strom ohne CO₂-Emissionen erzeugt wird und wettbewerbsfähig ist (d.h. auch zum Einsatz kommt). Industrielle Hochtemperaturwärme mit mehr als 500 °C wird in Österreich heute insbesondere in den energieintensiven Subsektoren benötigt. In Österreich ist die Eisen- und Stahlindustrie jene mit dem größten Anteil an elektrischer Hochtemperaturwärmeaufbringung. Zwar für Österreich nicht relevant, jedoch international Stand der Technik, ist die Schmelzflusselektrolyse zur Herstellung von Primäraluminium. In der Glasindustrie wird elektrische Energie für den Betrieb kleinerer, diskontinuierlich betriebener Öfen bis ca. 100 t Tagesleistung eingesetzt.

Prozesswärmebereitstellung in der Industrie erfolgt in der Regel über Wärmeträgermedien, wie z.B. Heißwasser, Dampf oder auch Thermoöl, oder über Direktbefeuerung der Prozesse. Häufig eingesetzte Methoden zur **elektrifizierten Dampf- bzw. Heißwassererzeugung** sind Elektrokessel (bis ca. 130° C), Elektrodenkessel (bis ca. 250°C) sowie kombinierte Anlagen aus Elektrodenkessel und Heizschwert (bis knapp 400°C). Vorteile solcher Anlagen zur Wärmebereitstellung ist die stufenlose Erzeugung (Minimallast 0%), höhere Wirkungsgrade (98%) im Vergleich zu brennstoffbefeuelten Dampf- und Heißwassererzeugern (bis zu 90%) sowie das schnelle An- und Abfahrverhalten.

Durch Weiterentwicklung der **Wärmepumpentechnologie** in den letzten Jahren ist mittlerweile auch die Realisierung von höheren Temperaturen (150-160°C) spruchreif. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Anlagen, wird die Prozesswärme mit Wärmepumpen nicht ausschließlich über die Umwandlung mit elektrischem Strom bereitgestellt, sondern einer (Abwärme-)Quelle entnommen.

Wasserstoff findet in unterschiedlichen Industriebranchen Verwendung. Das mengenmäßig größte Potenzial für die Nutzung von erneuerbarem (mittels Elektrolyse erzeugtem) Wasserstoff liegt derzeit in der Mineralölindustrie und der chemischen Industrie (Ammoniak- und Methanolproduktion). In Zukunft besteht auch in der Eisen- und Stahlindustrie ein großes Potenzial an erneuerbarem Wasserstoff, wenn die Roheisenerzeugung auf Direktreduktion umgestellt wird. Die übrigen industriellen Anwendungen zusammen haben zurzeit einen eher geringen Anteil von etwa 2 % am Gesamtwasserstoffbedarf der Industrie. Jedoch kann bei diesen (Nischen-)Anwendungen auch jetzt schon der Wasserstoffbedarf durch am Markt verfügbare Elektrolyseure abgedeckt werden.

Industriell günstig verfügbarer Sauerstoff ist ein wesentlicher Treiber zum verstärkten Einsatz von **Oxyfuel**-Verbrennungstechnik. Bei der Oxyfuel-Technologie wird reiner Sauerstoff anstatt Luft für die Verbrennung von Brennstoffen herangezogen, was eine Reihe an Vorteilen mit sich bringt. Sauerstoff wird heute industriell über Luftzerlegung erzeugt. Luftzerlegungsanlagen sind elektrische Verbraucher, die heute Bandlasten darstellen. Werden geeignete Sauerstoffspeicher bereitgestellt, ist zukünftig ein verstärkt flexibler Betrieb denkbar, insbesondere um kurzfristige Residuallasten abzudecken. Zukünftig wird elektrolytisch erzeugter Wasserstoff an Bedeutung gewinnen, als Koppelprodukt entsteht Sauerstoff.

Carbon Capture ist eine stromverbrauchende Technologie, welche im Rahmen der Intention der „Elektrifizierung der Industrie“, nämlich der Vermeidung von CO₂-Emissionen, relevant ist. Die Umwandlung von CO₂ aus industriellen Prozessen und erneuerbarem Wasserstoff im Sinne von Carbon Capture and Utilization führt zu synthetischen Kohlenwasserstoffen wie Methan, Methanol, Benzin, Diesel, Kerosin, etc. Die größere Bedeutung von Carbon Capture liegt in einer erweiterten Perspektive der Sicherung der Rohstoffbasis und Ressourceneffizienz der Industrie.

Die gesamten technischen **Potenziale an erneuerbaren Energieträgern** in Österreich sind nicht ausreichend, um den aktuellen inländischen Primärenergieverbrauch aller Sektoren zu decken. Aus diesem Grund sollten einerseits alle technischen Potenziale ausgebaut werden und gleichzeitig muss die Primärenergieeffizienz deutlich erhöht werden. Andernfalls sind erneuerbare Energieimporte (z.B. Strom oder Wasserstoff) notwendig. Die räumliche Analyse hat gezeigt, dass das erneuerbare Potenzial relativ gleichmäßig in Österreich verteilt ist. Demgegenüber ist der Primärenergieverbrauch insbesondere in den industriellen bzw. urbanen Regionen konzentriert. Die zeitliche Analyse der erneuerbaren Potenziale sowie der derzeitigen elektrischen Last zeigt auf, dass zukünftig insbesondere der saisonale (Sommer – Winter) sowie der tägliche Ausgleich (Tag – Nacht) relevant sein werden. Die zukünftige Infrastruktur muss sowohl diese zeitlichen sowie regionalen Unterschiede ausgleichen. In Zukunft kann Demand Response die öffentliche Energieinfrastruktur bei diesem Ausgleich entlasten.

- **Die Elektrifizierung stellt ein wesentliches Element zur Dekarbonisierung der Industrie dar.**
- Die heimischen **Potenziale für Strom sind beschränkt**; Elektrifizierung kann nicht der alleinige Pfad der Dekarbonisierung sein, eine exergieorientierte Energienutzung ist unumgänglich.
- Aus der Elektrifizierung leiten sich zusätzliche **Anforderungen an die Infrastruktur** ab (Realisierung des Erneuerbaren-Potenzials; Leitungen, Kurz- und Langzeit-Speicher für Strom, Gas und Wärme).
- Die Palette an **Technologien der Elektrifizierung** reicht von Technologien, die Stand der Technik sind, bis zu Technologien nahe der Grundlagenforschung. Der Forschungsbedarf bleibt gegeben, eine reine Umsetzungsorientierung ist unzureichend.

1 Einleitung

Als Basis für die gemeinsame Arbeit des österreichischen Konsortiums im IEA IETS Annex 19 „Elektrifizierung der Industrie“ und als Orientierung für die österreichischen Stakeholder erfolgt die Ausarbeitung eines thematischen Fundaments, in dem die Elektrifizierung der Industrie in ihrer gesamten Breite (Power-to-Heat, direkter Stromeinsatz, Speicherbedarf, Power-to-Gas, Power-to-Product) beschrieben und die Systemimplikationen dargestellt werden.

1.1 Motivation für die Betrachtung der Elektrifizierung der Industrie

Als wesentliche Ausgangsparameter sind das Commitment zur Vermeidung des Klimawandels und zum effizienten Energieeinsatz in der Industrie anzusehen: Die Elektrifizierung industrieller Prozesse leistet, wenn die Versorgung über Strom aus erneuerbaren Quellen erfolgt, einen wesentlichen Beitrag zur CO₂-Emissionsreduktion. Gleichzeitig kann der Energieträger-Switch zu Strom energetische und wirtschaftliche Effizienzsteigerungen mit sich bringen. Über die betriebswirtschaftlichen Aspekte hinausgehend ist es essenziell, dass die Implikationen für das Energie-System verstanden werden, mit denen Versorgungsunternehmen und Infrastrukturbetreiber konfrontiert sind.

Eine Reduktion der CO₂-Emissionen kann auch über andere erneuerbare Quellen wie Solar- und Geothermie, biogene Brennstoffe oder über den Effizienzpfad erfolgen. Die Elektrifizierung der Prozesse bzw. der Energiebereitstellung hält aber eine besondere Position inne; Gründe dafür sind:¹

- Die umfassende und weitreichende Nutzbarkeit des Energieträgers Elektrizität, der aufgrund seiner Hochwertigkeit (Exergie) in vielen Prozessen Anwendung finden kann.
- Die bisherige Fokussierung der Energiewende zuerst auf die Erzeugungsseite und sodann auf strombasierte Technologien wie zum Beispiel PV und Windkraft.

Studienergebnisse zeigen auch, dass nicht nur die energetische Verwendung eine wesentliche Rolle spielen wird, sondern in einem erneuerbaren Energiesystem auch die nichtenergetisch verwendeten Energieträger erneuerbar bereitgestellt werden müssen (ansonsten gelangt das CO₂ durch Verbrennung oder Verwesung am Ende der Lebensdauer wieder in die Atmosphäre). Die Bereitstellung des industriellen Feedstocks wird ebenso beträchtliche Mengen Strom benötigen, v.a. für die über Elektrolyse bereitgestellten Wasserstoff-Mengen.²

1.2 Definition der „Elektrifizierung der Industrie“

Unter der Elektrifizierung der Industrie soll jede Änderung der Energieversorgungskette und der industriellen Prozesse verstanden werden, welche aus der Umstellung auf erneuerbaren Strom als Primärenergiequelle für die in industriellen Prozessen verwendete Energie resultiert. Ziel der Elektrifizierung der Industrie ist die Reduktion der zurechenbaren CO₂-Emissionen.

Die Elektrifizierung der Industrie bezeichnet hier selbstredend nicht die allgemeine / erstmalige Lieferung von Elektrizität an die Industrie. Die Elektrifizierung der Industrie umfasst durch den

¹ Renewables4Industry (2018b): Diskussionspapier zum Projekt Renewables4Industry. Endberichtsteil 2 von 3. Im Auftrag des Klima- und Energiefonds. Linz, Jänner 2018.

² Renewables4Industry (2018b).

definierten Fokus auf erneuerbaren Strom als Primärenergiequelle auch vorgelagerte Prozesse zur strombasierten Bereitstellung von Energieträgern und Feedstock, also auch betriebsextern erfolgendes Power-to-Gas oder Power-to-Heat.

1.3 Ziel und Methode

Als Basis für die gemeinsame Arbeit des österreichischen Konsortiums im IEA IETS Annex 19 „Elektrifizierung der Industrie“ und als Orientierung für die österreichischen Stakeholder erfolgt die Ausarbeitung dieses Papiers. Ziel ist es, das Thema Elektrifizierung der Industrie in seiner Breite darzustellen und dabei auch die erweiterten Prozessaspekte (Oxyfuel & Carbon Capture) sowie Systemimplikationen (Erneuerbare-Energie-Potenziale, Demand Response, Infrastruktur-Ausbaubedarf etc.) darzustellen. Die dem Papier zugrundeliegende Methode ist die Literaturrecherche, wobei aufgrund der Zusammenstellung des Konsortiums stark auf Basis von Vorstudien der zu den angeführten Themenbereichen gearbeitet werden konnte. Diese sind thematisch einschlägig und daher essenzielle Grundlage für das Basispapier.^{3,4}

³ Renewables4Industry (2018b).

⁴ Geyer, Knöttner, Diendorfer, Drexler-Schmid (2019): IndustRiES – Energieinfrastruktur für 100% Erneuerbare Energie in der Industrie. Studie erstellt im Auftrag des Klima- und Energiefonds, Wien, September 2019.

2 Elektrifizierung der Industrie – Prozesse

2.1 Unit Operations zur Elektrifizierung

Unter Unit Operations versteht man in der industriellen Produktion einen grundlegenden Verfahrensschritt, der für die Herstellung von Produkten notwendig ist und durch ihre Kombination und Anwendung Prozesstechnologien, Produktionsprozesse und -ketten beschreiben. Jede Unit Operation hat zum Ziel, den oder die eingesetzten Rohstoffe so zu behandeln (manipulieren), um am Ende das gewünschte Produkt in einer bestimmten Qualität zu erreichen. In den Bereichen Maschinenbau, chemischer Verfahrenstechnik, Wärmetechnik, Elektrochemie und Biotechnologie zählen u.a. folgende Verfahrensschritte zu diesen Unit Operations:

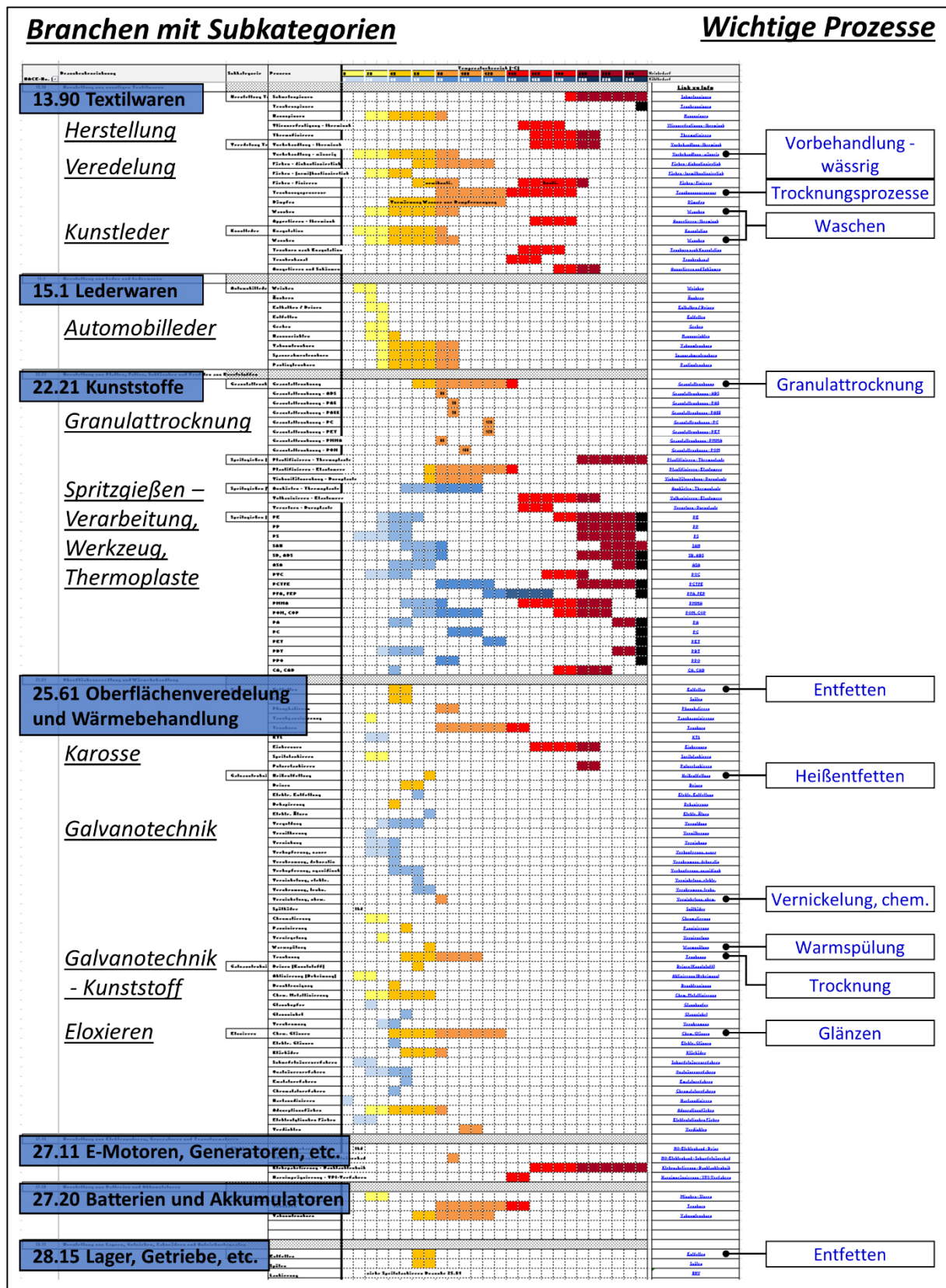
- Mechanische: zerkleinern, agglomerieren, trennen, mischen
- Chemische: Umwandlung von Stoffen und Systemen durch chemische Reaktionen
- Thermische: Wärmetechnische Trenn- und Reinigungsprozesse
- Elektrochemische: Vorgänge wie Synthesen
- Biotechnologische: Vorgänge wie Bio-Synthese, Fermentation und Bio-Katalysatoren

Unit Operations haben je nach Ablauf einen Energiebedarf (endotherme Prozesse) oder setzen Energie frei (exotherme), die unter Umständen aktiv abgeführt werden muss (Kühlung). Dieser Energie- bzw. Exergiebedarf steht somit für den industriellen Bedarf und ist im Zuge der Dekarbonisierung der Industrie von höchstem Interesse. Betrachtet man die einzelnen Unit Operations genauer und entkoppelt von bestehenden Versorgungssystemen, so können sie je nach eingesetzter Prozesstechnologie und ihrem Energiebedarf weiter klassifiziert werden.

Beispielsweise haben typische Zerkleinerungsverfahren zum Ziel, die Korngröße eines Produktes zu verringern. Dieses Ziel kann beispielsweise durch die Einwirkung von mechanischer Energie erreicht werden. Wie diese mechanische Energie zur Verfügung gestellt wird, ist für den Prozessablauf bzw. die Erreichung des Verfahrensziels selbst unerheblich. Ähnlich verhält es sich für thermische Reinigungsprozesse. Das Ziel der Reinigung ist es beispielsweise, Verschmutzungen von Anlagen zu beseitigen und so etwa die Anzahl der Bakterien zu reduzieren. Das kann über die Einwirkung von thermischer Energie erreicht werden (unter Umständen in Kombination mit dem Einsatz chemischer oder biologischer Hilfsmittel). Ob diese Energie jedoch aus thermischen Versorgungstechnologien oder über eine Stromversorgung abgedeckt wird, ist für das Prozessergebnis wiederum unerheblich.

Die Elektrifizierung von Prozessen zielt vornehmlich darauf ab, die Versorgung von Unit Operations mit Strom abzudecken. Grundsätzlich kann der Energiebedarf der meisten, auch thermischen, Prozesse elektrisch bereitgestellt werden. In der Diskussion müssen also zu Beginn jene Unit Operations identifiziert werden, die sich aus Sicht des Prozessablaufes bzw. der technischen Notwendigkeiten nicht für eine Elektrifizierung eignen. In der Bewertung des tatsächlichen technischen Potenzials der Elektrifizierung von Prozessen, die sich technisch dafür eignen, und der damit avisierten Dekarbonisierung des industriellen Energiebedarfs durch erneuerbaren Strom ist es wichtig, das sich daraus ergebende Ungleichgewicht zwischen Strombedarf und Versorgungspotenzial (Unterdeckung) zu berücksichtigen. Dabei müssen neben der Industrie alle weiteren Sektoren mit Energie- und Strombedarf berücksichtigt werden, um daraus eine genaue Betrachtung der exergetisch sinnvollen Elektrifizierung industrieller Prozesse abzuleiten. Das gilt insbesondere für Prozesse mit einem thermischen Energiebedarf unterschiedlicher Temperaturniveaus.

Abbildung 1: Prozessinformationen und Temperaturbedarf in Zuordnung zu Subbranchen am Beispiel der Automobil- und Zuliefererindustrie.⁵



Am Beispiel der Automobil- und Zulieferindustrie (siehe Abbildung 1) ist klar zu erkennen, dass es eine Unterteilung des thermischen Energiebedarfs in Niedertemperatur ($<100^{\circ}\text{C}$), Mitteltemperatur

(100...250/400°C) und Hochtemperatur (> 400°C) gibt. Typische Hochtemperaturprozesse werden derzeit über meist fossil befeuerte Dampf- oder Thermoölsysteme versorgt oder aber bereits über elektrische Systeme angetrieben. Auch für Mittel- und Niedertemperaturprozesse ist ein ähnliches Bild zu finden. Die Versorgung ist meist über dieselben Systeme (Dampf, Thermoöl) in einem industriellen Betrieb sichergestellt oder aber werden unabhängig von der notwendigen Prozesstemperatur über eine direkte Stromversorgung versorgt. Das ist speziell für Nieder- und Mitteltemperaturprozesse aus exergetischer Sicht ineffizient (Exergieverlust). Im Kontext der angeführten Unterdeckung des Strombedarfs sind gerade diese Prozesse interessant, bieten sie doch das Potenzial zur Abdeckung mit anfallender Abwärme, erneuerbarer Wärme oder eine Kombination dieser Quellen. Dieses Potenzial sinkt mit steigender Prozesstemperatur, obwohl es auch hier technische Möglichkeiten gibt und die Forschung Fortschritte erzielt. Die Elektrifizierung von industriellen Prozessen sollte hier unter exergetischen Gesichtspunkten stattfinden.

Herausforderungen im Zuge der exergetisch optimierten Energieversorgung von Unit Operations und den eingesetzten Prozesstechnologien, dem Einsatz von Mittel- und Niedertemperaturwärmequellen (Abwärme und erneuerbare Wärme) bzw. deren Elektrifizierung:

- Anforderung von Unit Operations an die Energieversorgung (Temperatur, spezifischer Energieeintrag, Regelbarkeit, etc.)
- Bestehende Prozesstechnologien und deren Anforderungen an die Energieversorgung
- Technische Möglichkeiten der Umrüstung bestehender Prozesstechnologien auf andere Energiequellen
- Regelung der Unit Operations bzw. der eingesetzten Prozesstechnologien
- Potenzial von Lastverschiebungen von Unit Operations bzw. Prozesstechnologien im Kontext der Produktqualität
- Zusammenhang Unit Operation, Prozesstechnologie, Energieversorgung und Produktqualität
- Sicherstellung der Versorgung im Moment des Energiebedarfs
- Optimierte Kombination verschiedener Versorgungstechnologien

Diese Herausforderungen sind beispielhaft und um weitere Punkte zu ergänzen.

Daraus sind aber unterschiedliche Strategien abzuleiten, wie die Elektrifizierung erreicht und unter exergetischer Optimierung des Energiesystems Bedarf und Verfügbarkeit erneuerbaren Stroms zur Dekarbonisierung ausgebaut werden kann:

- a. Adaptierung bestehender Unit Operations bzw. Prozesstechnologien für die Versorgung mit Strom
- b. Anwendung, Entwicklung und Implementierung neuer Unit Operations bzw. Prozesstechnologien mit erhöhtem Potenzial zur Versorgung mit Strom (im Vergleich zu derzeit eingesetzten Technologien)
- c. Anwendung, Entwicklung und Implementierung neuer Unit Operations bzw. Prozesstechnologien, die bewusst verfügbare und erneuerbare Nieder- und Mitteltemperaturwärme nutzen und so exergetisch optimierte Auslegung und Betrieb von industriellen Energiesystemen im Kontext zum Strombedarf anderer Sektoren und der Verfügbarkeit erneuerbaren Stroms ermöglichen

⁵ Pag, Schmitt, Schlosser, Mai, Jochem, Fluch, Brunner, Ramschak: Abschlussbericht zum bilateralen F&E Vorhaben SolarAutomotive (Deutschland), solare Prozesswärme für die Automobil- und Zulieferindustrie, Gefördert durch den Klima- und EnergieFonds, Förderprogramm Energieforschung e!mission (Projektnummer 848925), April 2019

2.2 Power-to-Heat

Strombasierte (Wärme-)Prozesse können in einigen Fällen effizienter und wirtschaftlicher sein als die auf fossilen Brennstoffen basierenden Technologien. Die Elektrifizierung mildert die Emissionen aber nur dann, wenn Strom ohne CO₂-Emissionen kostengünstig und wettbewerbsfähig erzeugt wird.

In einigen Fällen erfordert die Elektrifizierung von bestehenden Prozessen keine größeren Änderungen. Ein Beispiel dafür ist der Ersatz von Gas durch Elektrokessel, das Wärmeträgermedium und somit die Schnittstelle zum Prozess bleibt ident. In anderen Fällen sind erhebliche Investitionen in die Neugestaltung der Produktionsprozesse erforderlich. Angesichts der tiefen Integration dieser industriellen Prozesse muss jede Änderung eines Prozesses von Änderungen anderer Teile des Prozesses begleitet werden. Die Elektrifizierung erfordert daher Anpassungen an andere Produktionsstufen. Niedertemperaturwärme kann bereits vergleichsweise einfach von Elektro(den)kesseln aber auch (Hochtemperatur-)Wärmepumpen bereitgestellt werden (in Demoanlagen bereits bis 160 °C).⁶ Andere elektrothermische Technologien für höhere Temperaturen umfassen: Lichtbogen, Infrarot, Induktion, Dielektrikum, Direktwiderstand, Mikrowelle und Elektronenstrahlerwärmung.

2.2.1 Hochtemperatur / Direktnutzung

Industrielle Hochtemperaturwärme > 500 °C wird in Österreich heute insbesondere in den energieintensiven Subsektoren Eisen und Stahl, Chemie und Petrochemie, Nichteisen Metalle und Steine, Erden, Glas benötigt. Der größte Teil davon wird heute über Endenergieträger wie Erdgas und Kohle⁷ sowie, insbesondere in der dem Subsektor Steine, Erden, Glas zugehörigen Zementindustrie, über Ersatzbrennstoffe⁸ aufgebracht. Elektrische Energie für industrielle Hochtemperaturwärme wird im globalen Kontext heute hauptsächlich in den Subsektoren Eisen- und Stahlerzeugung, Nicht Eisen Metalle und in der Glasindustrie eingesetzt.

In Österreich ist gemäß der aktuellen Statistik zur Verteilung der Endenergieträger für die Nutzenergiebereitstellung⁹, in Verbindung mit den Hochtemperaturbedarfen der industriellen Subsektoren¹⁰, die Eisen- und Stahlindustrie jene mit dem größten Anteil an elektrischer Hochtemperaturwärmeaufbringung. Dabei kommen in den Werken der voestalpine Edelstahl Kapfenberg, der Breitenfeld Edelstahl und der Marienhütte Graz Elektrolichtbogenöfen (electric arc furnaces – EAF) zum Einsatz. Über Grafitelektroden wird dabei ein Stromkreis über zuvor in das Ofengefäß chargierten Schrott geschlossen. Die eingebrachte elektrische Energie ermöglicht ein Einschmelzen des Schrottes, über zusätzlich eingebrachte Legierungselemente kann die Stahlqualität eingestellt werden. Zur Schmelze besonders hochlegierter Edelstahlschrotte sowie von Gusseisen

⁶ DryFiciency Project: <http://dry-f.eu/>

⁷ Lauterbach, C. ; Schmitt, B. ; Jordan, U. ; Vajen, K.: *The potential of solar heat for industrial processes in Germany*. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012), Nr. 7, S. 5121–5130

⁸ Aranda Usón, Alfonso; López-Sabirón, Ana M.; Ferreira, Germán; Llera Sastresa, Eva: *Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options*. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23, S. 242–260

⁹ https://www.statistik.at/web_en/statistics/EnergyEnvironmentInnovationMobility/energy_environment/energy/useful_energy_analysis/index.html. – Aktualisierungsdatum: December 19th, 2019 – Überprüfungsdatum September 24th, 2019

¹⁰ Naegler, Tobias ; Simon, Sonja ; Klein, Martin ; Gils, Hans Christian: *Potenziale für erneuerbare Energien in der industriellen Wärmeerzeugung : Temperaturanforderungen limitieren Einsatz erneuerbarer Energien bei der Prozesswärmebereitstellung*. In: *BWK* 6/2016 (2016), S. 20–24. URL <http://elib.dlr.de/104723/>

werden zudem an mehreren Standorten in Österreich Induktionsöfen verwendet, die zum Teil im Vakuum betrieben werden. Der Wärmeeintrag erfolgt dabei durch induzierte Wirbelströme direkt ins Schmelzgut. Hinsichtlich der Funktion Elektrolichtbogenöfen ähnlich sind sog. Pfannenöfen. Dabei wird jedoch nicht Schrott eingeschmolzen, sondern flüssiger Rohstahl in einem sekundärmetallurgischen Schritt zu speziellen Stahlqualitäten legiert. Des Weiteren kommt in der Sekundärmetallurgie das sog. Elektroschlacke-Umschmelzverfahren (ESU) zum Einsatz. Ein Stahlblock, der in ein Schlackebad getaucht ist, wird dabei über elektrische Widerstandsheizung aufgeschmolzen. Die Schlacke dient dabei als Heizwiderstand, der Stahlblock als stromzuführende Elektrode. Mit diesem Verfahren können sehr reine Stähle, mit besonderem Gefüge, erzeugt werden.¹¹

Zwar für Österreich nicht relevant, jedoch international Stand der Technik, ist die Schmelzflusselektrolyse zur Herstellung von Primäraluminium¹². Dabei wird der zu Aluminiumoxid aufbereitete Rohstoff Bauxit in geschmolzener Form als Elektrolyt eingesetzt. Um den Schmelzpunkt auf ca. 950°C zu erniedrigen, wird das Aluminiumoxid dabei mit Kryolith (Na_3AlF_6) vermischt. Beim elektrolytischen Prozess entsteht an der Anode Sauerstoff, an der Kathode sammelt sich flüssiges Rohaluminium, welches über Saugrohre entnommen wird. Neben der Erzeugung von Primäraluminium dient die Schmelzflusselektrolyse der Gewinnung der meisten Alkalimetalle (Li, Na, K, ...) sowie aller Erdalkalimetalle (Mg, Ca, ...). Um Anlagenschäden zu vermeiden, dürfen beim Prozess der Schmelzflusselektrolyse Unterbrechungen der Stromversorgung nicht länger als ca. 4 Stunden dauern.¹³

In der Glasindustrie wird elektrische Energie für den Betrieb kleinerer, diskontinuierlich betriebener Öfen bis ca. 100 t Tagesleistung eingesetzt. Diese dienen heute hauptsächlich der Herstellung von Spezialgläsern. Die Wärmezufuhr erfolgt durch einen Stromfluss zwischen mehreren Elektrodenpaaren, wobei die Glasschmelze, deren elektrische Leitfähigkeit mit steigender Temperatur stark zunimmt, als Heizwiderstand dient. Elektrisch beheizte Öfen werden in Österreich an drei Standorten betrieben und zur Herstellung von Bleiglas, Glaswolle und Spezialglas eingesetzt.¹⁴

2.2.2 Nieder- und Mitteltemperatur

Brennstoffbasierte Prozesswärmebereitstellung in der Industrie erfolgt in der Regel über Wärmeträgermedien, wie z.B. Heißwasser, Dampf oder auch Thermoöl, oder über Direktbefeuerung der Prozesse. Werden Temperaturen über 240°C meist durch direktbefeuerte Prozesse realisiert, erfolgt die Prozesswärmebereitstellung bis 240°C oft indirekt über Heißwasser oder Dampf¹⁵. Allerdings gibt es auch direktbefeuerte (Industrieofen-)Prozesse im Nieder- und Mitteltemperaturbereich bis 240°C, wozu beispielsweise Trocknungsprozesse¹⁶ in der Holzindustrie aber auch in der Automobilherstellung gehören. Auch Raumwärme und Warmwasser werden in der

¹¹ Michael Degner u. a.: *Stahlfibel*. Hrsg.: Stahlinstitut VDEh. Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf 2007, [ISBN 978-3-514-00741-3](#)

¹² Die Produktion von Primäraluminium aus Bauxit wurde in Österreich im Jahr 1992 eingestellt. Quelle: UBA, Klimarelevanz ausgewählter Recycling Prozesse in Österreich, Endbericht, Wien 2010

¹³ Wilkening S, Grundlagen der Aluminiumschmelzflusselektrolyse, Verlag Chemie, Weinheim 1982

¹⁴ UBA, Stand der Technik bei der Glasherstellung, Wien 1994

¹⁵ Gruber, Biedermann, von Roon (2015): Industrielles Power-to-Heat Potenzial. 9. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien. Wien. Februar 2015

¹⁶ Vgl. Prozesstemperaturübersicht in Blesl, Kempe, Ohl, Fahl, König, Jenssen, Eltrop (2008): Wärmeatlas Baden-Württemberg - Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, 2008

Regel über Heißwasser- bzw. Dampfsysteme bereitgestellt. In diesem Abschnitt wird im Gegensatz zu Abschnitt 2.2.1 die elektrifizierte Prozesswärmebereitstellung bis 240°C beschrieben.

Häufig eingesetzte Methoden zur elektrifizierten Dampf- bzw. Heißwassererzeugung sind Elektrokessel (bis ca. 130°C), Elektrodenkessel (bis ca. 250°C) sowie kombinierte Anlagen aus Elektrokessel und Heizschwert (bis knapp 400°C)¹⁷. Vorteile solcher Anlagen zur Wärmebereitstellung ist die stufenlose Erzeugung (Minimallast 0%), höhere Wirkungsgrade (98%)¹⁸ im Vergleich zu brennstoffbefeuerten Dampf- und Heißwassererzeugern (bis zu 90%) sowie das schnelle An- und Abfahrverhalten. Ein Beispiel dafür ist die benötigte Zeitspanne von 30 Sekunden, um von Minimallast zum Volllastbetrieb zu gelangen, bzw. in 5 Minuten vom Kaltstart zum Volllastbetrieb¹⁹. In Elektrokesseln wird die Wärme indirekt über eine Widerstandserwärmung erzeugt. Der Strom fließt durch einen ummantelten Widerstand, erwärmt diesen und die Wärme des gesamten Heizelements wird an das umliegende Wasser abgegeben. Für größere Leistungsbereiche werden allerdings oft Elektrodenkessel eingesetzt, bei denen das Wasser selbst den Widerstand bildet²⁰.

2.2.3 Industrielle Wärmepumpen

Eine weitere Technologie, bei der Strom zur Wärmebereitstellung eingesetzt wird, sind Wärmepumpen. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Anlagen, wird die Prozesswärme mit Wärmepumpen nicht ausschließlich über die Umwandlung mit elektrischem Strom bereitgestellt. Vielmehr wird der elektrische Strom eingesetzt, um Wärme auf einem (zu) niedrigen Temperaturniveau (Quelle) auf ein höheres, nutzbares Niveau zu heben (Senke). Die dazugehörige Kennzahl, *Coefficient of Performance* COP, beschreibt dabei die Relation von nutzbarer Wärme zu eingesetztem Strom und ist von dem Verhältnis der Temperaturen auf Quellen- und Senkenseite abhängig. Zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser, wobei senkenseitig je nach Technologie zwischen 45 und 80°C realisiert werden, werden Wärmepumpen vor allem im Haushaltsbereich oft eingesetzt. Aber auch in der Industrie kann diese Nutzenergiekategorie mit hohen COPs energieeffizient mit Wärmepumpen realisiert werden.

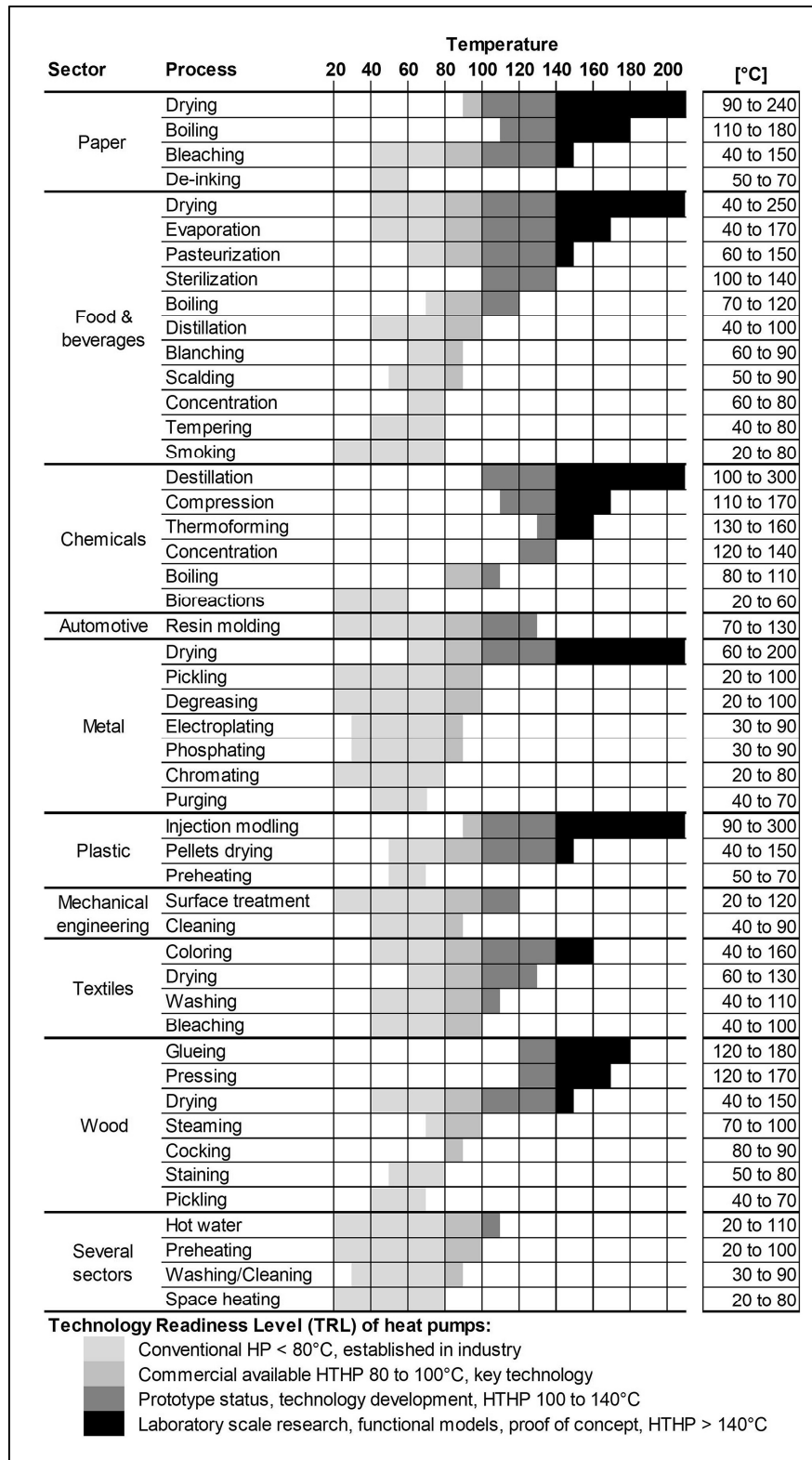
Durch Weiterentwicklung der Wärmepumpentechnologie in den letzten Jahren ist mittlerweile auch die Realisierung von höheren Temperaturen (150-160°C) spruchreif. Auch die Bereitstellung von Dampf ist mittlerweile in Forschungsprojekten mit Umsetzungscharakter ein Thema. Die folgende Grafik zeigt einen Überblick von Einsatzmöglichkeiten für industrielle Wärmepumpen (Stand 2018), sowie den aktuellen Stand der Entwicklung der Wärmepumpe in den einzelnen Temperaturbereichen:

¹⁷ Gruber, Biedermann, von Roon (2015)

¹⁸ M. Bücken, P. Freialdenhoven, T. Gleichmann, A. Kraft, (2017): Potenziale der Sektorkopplung und Nutzung von Strom aus Erneuerbaren Energien im Wärmebereich in Sachsen-Anhalt. Web: https://enerko.de/wp-content/uploads/2017/12/Endbericht_PtH_web.pdf (Zuletzt geprüft am 08.04.2019).

¹⁹ PARAT Halvorsen AS: PARAT IEH. Hochspannung Elektrodenkessel für Dampf- und Heißwasser. Web: <https://www.parat.no/ieh/> (Zuletzt geprüft am 08.04.2019).

²⁰ JRC (2017): Long term (2050) projections of techno-economic performance of large-scale heating and cooling in the EU. Web: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC109006/kjna28859enn.pdf> (Zuletzt geprüft am 08.04.2019).

Abbildung 2: Temperaturbereiche industrieller Prozesse und Wärmepumpentechnologien ²¹

²¹ Grafik: Arpagaus, Cordin; Bless, Frédéric; Uhlmann, Michael; Schiffmann, Jürg; Bertsch, Stefan S. (2018): High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. In: Energy 152, S. 985–1010. DOI: 10.1016/j.energy.2018.03.166.

2.3 Power-to-Gas

Die Weiterentwicklung des nationalen und internationalen Energiesystems ist geprägt durch das energie-, umwelt- und klimapolitische Paradigma der notwendigen Reduzierung der globalen Treibhausgasemissionen. Um dies zu gewährleisten, müssen die im industriellen Bereich eingesetzten Gase auch aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt werden, wie beispielsweise H₂ oder SNG (Synthetisches Naturgas) aus Power-to-Gas.

In vielen industriellen Anwendungen wird fossiles Erdgas als Energieträger genutzt, wobei dieses ohne Änderung der Prozesse direkt durch erneuerbares SNG ersetzt werden kann. Darüber hinaus ist es möglich, bestehende industrielle Prozesse zu modifizieren oder neue zu entwickeln, um erneuerbaren Wasserstoff oder SNG als Energiequelle zu nutzen, z.B. Stahlindustrie - Hochofenprozess (Energieträger Koks) vs. Direktreduktion (Energieträger Wasserstoff).

Wasserstoff findet in unterschiedlichen Industriebranchen Verwendung. Das mengenmäßig größte Potenzial für die Bereitstellung von erneuerbarem Wasserstoff liegt derzeit in der Mineralölindustrie und der chemischen Industrie (Ammoniak- und Methanolproduktion). In Zukunft besteht auch in der Eisen- und Stahlindustrie ein großes Potenzial an erneuerbarem Wasserstoff, wenn die Roheisenerzeugung auf Direktreduktion umgestellt wird. Die übrigen industriellen Anwendungen zusammen haben zurzeit einen eher geringen Anteil von etwa 2 % am Gesamtwasserstoffbedarf der Industrie. Jedoch kann bei diesen (Nischen-)Anwendungen auch jetzt schon der Wasserstoffbedarf durch am Markt verfügbare Elektrolyseure abgedeckt werden.

Wasserstoff ist ein brennbares, ungiftiges, farb- und geruchsloses Gas, welches in einer Vielzahl von Anwendungen in der Industrie zum Einsatz kommt. Weltweit werden insgesamt etwa 400-600 Mrd. Nm³ Wasserstoff (davon etwa 78 Mrd. Nm³ in der EU) erzeugt, wovon der Großteil direkt vor Ort verbraucht und nur etwa 5 % gehandelt werden.²²

Derzeit stammen etwa 95 % des erzeugten Wasserstoffs aus fossilen Quellen. Davon wird etwa die Hälfte durch die Dampfreformierung von Erdgas erzeugt und die andere Hälfte fällt als Nebenprodukt in der chemischen Industrie (Partielle Oxidation von Schweröl, Benzinreformierung, Ethylenproduktion und sonstige chemische Industrie) an bzw. wird aus anderen fossilen Rohstoffen (z.B. aus Kohle durch Kohlevergasung) erzeugt. Der nicht aus fossilen Quellen erzeugte Wasserstoff, etwa 2 bis 4 %, wird derzeit vorwiegend durch die Elektrolyse von Wasser (Power-to-Gas) hergestellt oder aus Biomasse gewonnen.^{23,24}

Die Literaturangaben zu Bedarfsanteilen von Wasserstoff in einzelnen Branchen sind zum Teil sehr unterschiedlich, da diese von der betrachteten Region (z.B. weltweite oder nationale Betrachtung) und deren Bedarfsstruktur abhängen. Des Weiteren unterliegt der Bedarf in einzelnen Branchen auch einer zeitlichen Entwicklung. So wird davon ausgegangen, dass sich der Wasserstoffbedarf in den Raffinerien bis ins Jahr 2050 auf etwa ein Fünftel reduziert, wobei die Menge für die Ammoniaksynthese als eher konstant angenommen wird. Auch wenn die Bedarfsanteile von Wasserstoff in einzelnen Branchen einer Schwankungsbreite unterliegen, kann zusammenfassend jedoch festgehalten werden, siehe

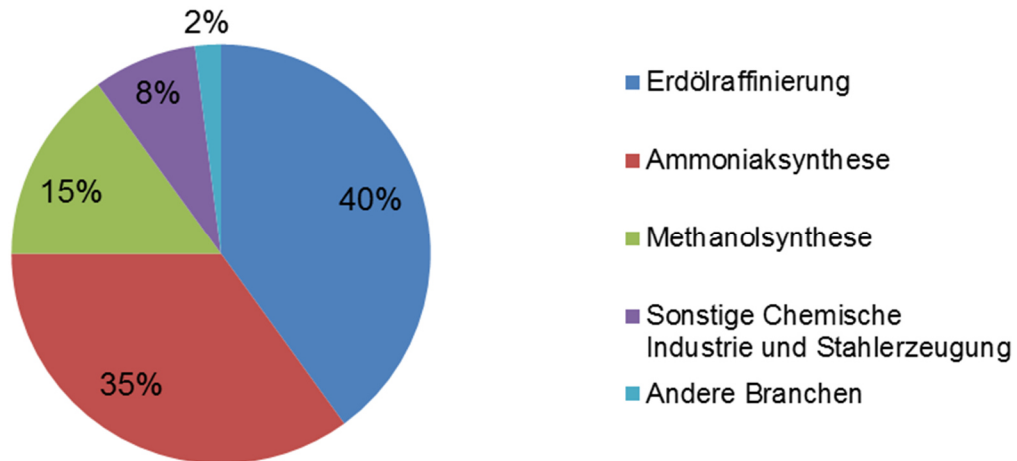
²² Töpler, J., & Lehmann, J. (Hrsg.). (2017). Wasserstoff und Brennstoffzelle - Technologien und Marktperspektiven (2., aktualisierte und erweiterte Auflage Ausg.). Springer Vieweg.

²³ Busack, V. (2015). HYPOS – Entwicklung einer Modellregion für eine grüne Wasserstoffwirtschaft. Leipzig: 9. Expertentreffen Energiemetropole Leipzig, 7. Dezember 2015.

²⁴ Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. Renewable and Sustainable Energy Reviews 67 (2017) 597–611, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>.

Abbildung 3, dass etwa 40 % in der Erdölraffinierung und 35 % in der Ammoniaksynthese Verwendung finden. Für die Methanolsynthese werden etwa 15 % benötigt und rund 8 % werden für weitere Anwendungen in der chemischen Industrie und der Stahlproduktion eingesetzt. Der verbleibende Anteil von etwa 2 % teilt sich auf andere Branchen, wie etwa die Glasindustrie, Halbleiterindustrie, Kunststoffindustrie, Metallverarbeitende Industrie und Pharmaindustrie auf.^{25,26,27}

Abbildung 3: Bedarfsanteile von Wasserstoff in einzelnen Branchen (Zusammenfassung aus 28,29,30)



Wasserstoff ist ein vielseitig einsetzbares Industriegas, das in unterschiedlichen Anwendungen zum Einsatz kommt. In Tabelle 1 sind unterschiedliche Industriebranchen und Anwendungen aufgelistet.

²⁵ Busack, V. (2015). HYPOS – Entwicklung einer Modellregion für eine grüne Wasserstoffwirtschaft. Leipzig: 9. Expertentreffen Energiemetropole Leipzig, 7. Dezember 2015.

²⁶ Winter, C., & Nitsch, J. (Hrsg.). (1986). Wasserstoff als Energieträger - Technik, Systeme, Wirtschaft. Berlin: Springer Verlag.

²⁷ Estermann, T., Pichlmaier, S., Guminski, A., & Pellingner, C. (2017). Kurzstudie Power-to-X: Ermittlung des Potenzials von PtX-Anwendungen für die Netzplanung der deutschen ÜNB. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE).

²⁸ Busack, V. (2015). HYPOS – Entwicklung einer Modellregion für eine grüne Wasserstoffwirtschaft. Leipzig: 9. Expertentreffen Energiemetropole Leipzig, 7. Dezember 2015.

²⁹ Winter, C., & Nitsch, J. (Hrsg.). (1986). Wasserstoff als Energieträger - Technik, Systeme, Wirtschaft. Berlin: Springer Verlag.

³⁰ Estermann, T., Pichlmaier, S., Guminski, A., & Pellingner, C. (2017). Kurzstudie Power-to-X: Ermittlung des Potenzials von PtX-Anwendungen für die Netzplanung der deutschen ÜNB. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FFE).

Tabelle 1: Wasserstoffanwendungen in der Industrie. Quelle: Zusammenstellung des Energieinstituts an der JKU Linz.

Branche	Untergruppe	Anwendung
Mineralölindustrie	Erdölraffinierung	Hydrocracking
		Hydrotreating
Chemische Industrie	Methanolsynthese	
	Ammoniaksynthese	Haber-Bosch-Verfahren
Glasindustrie	Flachglasherstellung	Schutzgas
		Inertisierungsgas
	Glasbearbeitung	Gas für Brenner – Quarzglasbearbeitung
Elektro- und Elektronikindustrie	Elektronikindustrie	Schutzgas
		Trägergas
Metalltechnische Industrie	Metallverarbeitung	Legierungsprozess
		Wärmebehandlung
		Reduktion von NE-Metallen
Stahlerzeugende Industrie	Stahlerzeugung	Direktreduktion
Lebensmittelindustrie		Packgas
		Fett- und Ölhärtung (Hydrierung) - Margarineherstellung, Seifenherstellung
		Treibgas
Sonstige	Kühlgas	Generator-Kühlung

2.3.1 Ersatz Fossiler in gleichbleibendem Prozess

Wie bereits eingangs erwähnt können durch Power-to-Gas erzeugte Energieträger, wie Wasserstoff oder synthetisches Erdgas, deren fossile Pendanten in unterschiedlichen Industrieprozessen nahezu direkt substituieren. Dadurch könnten bestehende Prozesse weitgehend beibehalten werden und ein kurz- bzw. mittelfristiger Umstieg zu erneuerbaren Energieträgern ermöglicht werden. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass auch heute schon stromgetriebene Verfahren vorhanden sind, die Strom für hochexergetische Wärmeanwendungen einsetzen; eine Umstellung auf direkt elektrische Prozesstechnologien ist also in einigen Bereichen technisch möglich.

Für einzelne Anwendungen kann die direkte Nutzung von Wasserstoff auch zu einer Vereinfachung der bestehenden Prozesse führen. So entfällt bei der Verwendung von Wasserstoff aus Elektrolyse für die Ammoniak-Synthese im konventionellen Haber-Bosch-Verfahren die Dampfreformierung von Methan (bzw. Erdgas) zur Herstellung des benötigten Wasserstoffs und damit auch der wesentliche Anteil der mit dem Verfahren verbundenen CO₂-Emissionen.

Mit der Herstellung von SNG mittels Power-to-Gas und Methanisierung ergeben sich auch in anderen Industrieprozessen wesentliche Potenziale zur Dekarbonisierung. So kann die Integration dieser Technologien in bestehende Hüttenwerke, vor allem unter Nutzung interner Kohlenstoffquellen wie Hüttengasen und Etablierung eines internen CO₂-Kreislaufs, eine deutliche Reduktion der CO₂-Emissionen aus der Stahlerzeugung ermöglichen³¹. Darüber hinaus kann SNG zur Direktreduktion

³¹ Rosenfeld, D. C., Böhm, H., Lindorfer, J., & Lehner, M. (2020). Scenario analysis of implementing a power-to-gas and biomass gasification system in an integrated steel plant: A techno-economic and environmental study. *Renewable Energy* 147, S. 1511-1524. doi:10.1016/j.renene.2019.09.053

von Eisen (DRI), die in modernen Stahlwerken stattfindet, als Substitut für fossiles Erdgas eingesetzt werden, ohne die Notwendigkeit, bestehende Prozesse zu adaptieren.

2.3.2 Ersatz Fossiler in neuem Prozess

Langfristig gesehen ist die Anpassung bestehender bzw. die Entwicklung neuer Industrieprozesse zur Nutzung von erneuerbar erzeugten Energieträgern im Sinne der Prozessoptimierung als notwendig zu erachten. Die Nutzung von synthetischen Gasen, wie Wasserstoff oder SNG, als Brennstoff zur Erzeugung von elektrischem Strom oder Prozesswärme erfordert dabei prozess- oder wirkungsgradbedingt den Einsatz neuer Technologien, wie etwa Brennstoffzellen oder adaptierte Verbrennungsprozesse. Neben der thermischen Nutzung von PtG-Produkten ermöglicht eine grundlegende Überarbeitung etablierter Industrieprozesse aber auch die Entwicklung von effizienten und emissionsarmen Nutzungspfaden.

In der Stahlerzeugung bietet sich Wasserstoff aus Elektrolyse als Reduktionsmittel zur Direktreduktion von Eisenerz an. Die Entwicklung entsprechender Prozessketen zur Substitution von Koks durch Wasserstoff in der Stahlproduktion ist Gegenstand mehrerer Forschungsprojekte, wie H2FUTURE³² und HYBRIT³³. Die erwarteten CO₂-Emissionen belaufen sich dabei auf 25 kg CO₂ pro t Rohstahl gegenüber 1.600 kg CO₂ im konventionellen Hochofenprozess³⁴.

Bezogen auf die Ammoniak-Synthese ist die Entwicklung von neuen Power-to-Gas-Prozessen zur direkten Produktion von Ammoniak aus Wasser und Stickstoff Gegenstand aktueller Forschung³⁵. Auch die Verwendung von Luft, ohne die vorhergehende Separation von Stickstoff, zur elektrochemischen Synthese wurde bereits gezeigt³⁶. Diese Power-to-Ammonia-Technologien könnten damit zukünftig das Haber-Bosch-Verfahren zur Herstellung von Ammoniak ablösen und die damit verbundenen fossilen CO₂-Emissionen entsprechend deutlich reduzieren.

2.4 Hilfsaggregate

Entlang der gesamten Produktions- und Versorgungskette industrieller Prozesse und Produktionsverfahren wird eine Vielzahl von Hilfsaggregaten eingesetzt, die für die Versorgung, den Antrieb und die Regelung der Anlagen mit Druckluft, Kälte, etc. oder für logistische Abläufe (Motoren, Pumpen, etc.) verantwortlich sind. Die dafür eingesetzte Energiequelle ist zumeist Strom und bietet entsprechend wenig Potenzial für eine weitere Elektrifizierung.

³² VERBUND Solutions GmbH. (2019). H2FUTURE PROJECT - Technology. Web: <https://www.h2future-project.eu/technology> (2019-12-10).

³³ LKAB, SSAB AB, Vattenfall AB. (2019). Fossil-free Steel - Hybrit. Web: <http://www.hybritdevelopment.com/> (2019-12-10).

³⁴ SSAB, LKAB, Vattenfall, HYBRIT Development AB. (2017). Summary of findings from HYBRIT Pre-Feasibility Study 2016–2017.

³⁵ Nazemi, M., & El-Sayed, M. A. (2018). Electrochemical Synthesis of Ammonia from N₂ and H₂O under Ambient Conditions Using Pore-Size-Controlled Hollow Gold Nanocatalysts with Tunable Plasmonic Properties. J. Phys. Chem. Lett. 9, S. 5160–5166. doi:10.1021/acs.jpclett.8b02188

³⁶ Lan, R., Irvine, J. T., & Tao, S. (2013). Synthesis of ammonia directly from air and water at ambient temperature and pressure. Scientific Reports 3. doi:10.1038/srep01145

3 Exkurs: Oxyfuel und Carbon Capture

Bei der Oxyfuel-Technologie wird reiner Sauerstoff anstatt Luft für die Verbrennung von Brennstoffen herangezogen, was eine Reihe an Vorteilen mit sich bringt; Luftzerlegungsanlagen sind elektrische Verbraucher. Auch die Abscheidung von CO₂ (Carbon Capture) ist eine stromverbrauchende Technologie. Beide stromverbrauchenden Technologien gehören im Sinne der Vermeidung von CO₂-Emissionen zum Themengebiet „Elektrifizierung der Industrie“.

3.1 Industrielle Sauerstofferzeugung und Oxyfuel-Prozesse

Sauerstoff wird heute industriell über Luftzerlegung erzeugt. Luftzerlegungsanlagen sind elektrische Verbraucher, die heute Bandlasten darstellen. Werden geeignete Sauerstoffspeicher bereitgestellt, ist zukünftig ein verstärkt flexibler Betrieb denkbar, insbesondere um kurzfristige Residuallasten abzudecken³⁷. Zukünftig wird elektrolytisch erzeugter Wasserstoff an Bedeutung gewinnen, als Koppelprodukt entsteht Sauerstoff.

Industriell günstig verfügbarer Sauerstoff ist ein wesentlicher Treiber zum verstärkten Einsatz von Oxyfuel-Verbrennungstechnik. Bei der Oxyfuel-Technologie wird reiner Sauerstoff anstatt Luft für die Verbrennung von Brennstoffen herangezogen, was eine Reihe an Vorteilen mit sich bringt. Die Brennerflamme enthält bei der Verbrennung mit Luft einen hohen Anteil an Stickstoff (21 % O₂, 79 % N₂ in der Luft). Dabei muss ein beträchtlicher Teil der Brennstoffenergie für die Erwärmung des N₂-Ballasts aufgewandt werden, ohne dass der Stickstoff an der Reaktion teilnimmt. Dies führt zu einer verminderten Verbrennungstemperatur und hohen Abgasverlusten. Die Abwesenheit des N₂-Ballasts bei der Oxyfuel-Verbrennung führt also zu einer Erhöhung der thermischen Effizienz der Feuerung. Ein weiterer Vorteil der Verbrennung mit reinem Sauerstoff liegt im verbesserten Wärmeübergang vom Rauchgas auf das Wärmgut. Insbesondere der Wärmeübergang durch Strahlung erhöht sich aufgrund der höheren Konzentration der in hohem Maße strahlenden Gase CO₂ und H₂O im Rauchgas. Zusätzlich führt die verringerte Konzentration an Stickstoff im Rauchgas zu niedrigeren NO_x-Emissionen. Ein weiterer interessanter Vorteil der Oxyfuel-Verbrennung besteht darin, dass niedrigkalorische Brennstoffe (< 2 kWh/m³) mit hinreichend hohen Verbrennungstemperaturen eingesetzt werden können. Aufgrund der kleinen Volumina und der hohen Konzentration an CO₂ im Rauchgas eignet sich die Oxyfuel-Verbrennung auch zum Einsatz von Carbon Capture-Verfahren.

Oxyfuel-Technologien finden bereits heute bei vielen Hochtemperaturprozessen Anwendung, wie sie in der Eisen- und Stahl-, Zement- oder Glasindustrie zu finden sind³⁸. Wesentliche Verbrennungstechnologien sind dabei die flammenlose Oxyfuel-Verbrennung und Direct Flame Impingement (DFI). Bei der flammenlosen Verbrennung wird die Flamme mit heißem Rauchgas verdünnt, wodurch die Flamme praktisch unsichtbar wird. Dies führt zur Kühlung und Verlängerung der Flamme. Die Verbrennungsgase breiten sich gleichmäßig im Ofen aus, was zu einem einheitlicheren und effizienteren Wärmeübergang führt. Einsatzmöglichkeiten für die flammenlose Verbrennung bestehen in der Wärmebehandlung sowie im Vorwärmen von Pfannen und Konvertern. Als Direct Flame Impingement bezeichnet man das direkte Aufbringen von Oxyfuel-Flammen auf ein

³⁷ Windmeier et al.: Lastflexibilisierung einer Luftzerlegungsanlage, Deutsche Kälte- und Klimatagung, Dresden, 2015.

³⁸ Scheffknecht, Günter; Al-Makhadmeh, Leema; Schnell, Uwe; Maier, Jörg (2011): Oxy-fuel coal combustion—A review of the current state-of-the-art. In: International Journal of Greenhouse Gas Control 5, S16-S35

Wärmegut. DFI erhöht den lokalen Wärmestrom auf das zu wärmende Material, was zu Brennstoffeinsparungen führt. In der Metallurgie wird Direct Flame Impingement beispielsweise beim Bandglühen eingesetzt³⁹.

3.2 Carbon Capture

Carbon Capture ist eine stromverbrauchende Technologie, welche im Rahmen der Intention der „Elektrifizierung der Industrie“, nämlich der Vermeidung von CO₂-Emissionen, relevant ist.

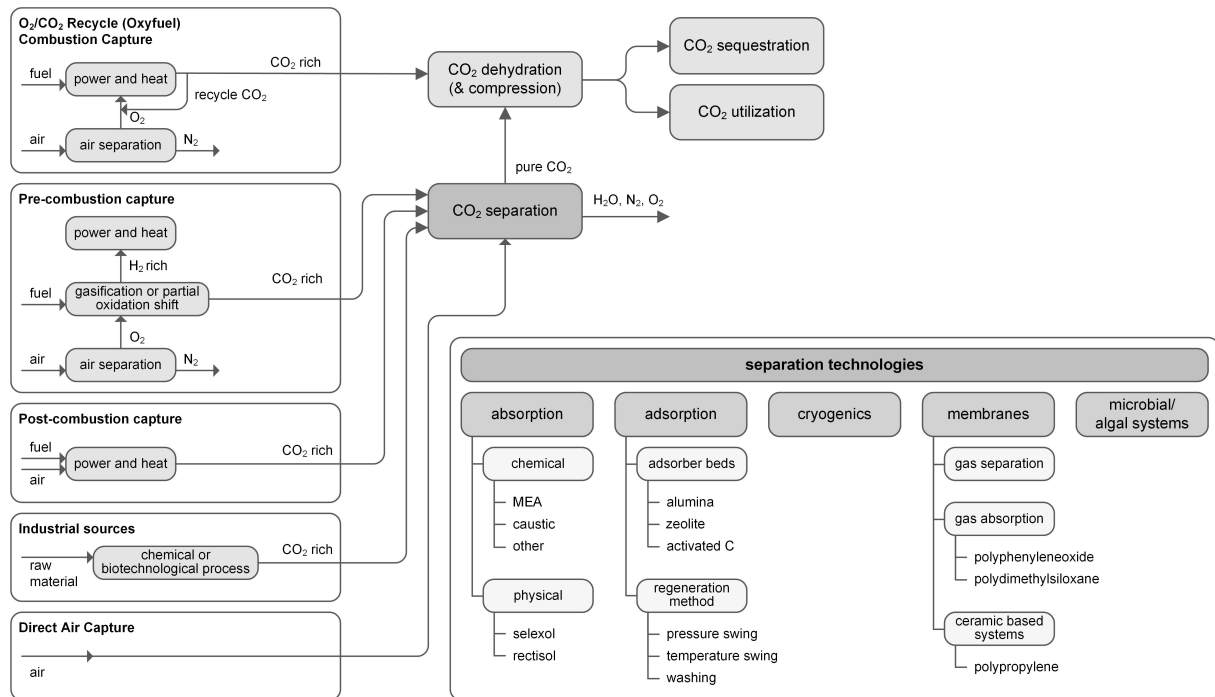
Die Umwandlung von CO₂ aus industriellen Prozessen und erneuerbarem Wasserstoff im Sinne von CCU (Carbon Capture and Utilization) führt zu CO₂-neutralen Kohlenwasserstoffen (z. B. synthetisches Methan, Methanol, Benzin, Diesel, Kerosin). Diese können als Treibstoffe für die Mobilität oder Rohstoffe für die chemische Industrie eingesetzt werden und bieten potenziell die Möglichkeit, fluktuierende elektrische Energieerzeugung aus Sonne und Wind in der Form von CO₂-neutralen Kohlenwasserstoffen speicherbar zu machen. Mit CCU kann ein Kreislauf des Kohlenstoffs entstehen. Am überzeugendsten ist dabei die Anwendung von CCU zur Herstellung chemischer Grundstoffe, die zu langlebigen und recyclebaren Produkten verarbeitet werden. Dabei wird Kohlenstoff zunächst im Recycling-Kreislauf gebunden, wird am Ende der Lebensdauer von nicht mehr recyclebaren Resten noch energetisch genutzt und via CCU nochmals in den chemischen Grundstoff recycelt. Zu beachten dabei ist, dass der Kreislauf zwar in Bezug auf den Kohlenstoff in dieser Weise entstehen könnte, nicht aber in Bezug auf die Energie. Durch Wirkungsgradverluste und den zusätzlichen Energieaufwand für die Abtrennung des CO₂ ist bei jedem Durchlauf Energie aufzuwenden. Ob eine konkrete CCU-Anwendung sinnvoll ist, sollte stets anhand einer umfassenden Lebenszyklusanalyse geprüft werden.

Die größere Bedeutung von CCU liegt in einer erweiterten Perspektive der Sicherung der Rohstoffbasis und Ressourceneffizienz der Industrie. In einer nahezu 100% auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung bilden CCU-Prozesse eine Option zur Langzeitspeicherung von Strom und tragen durch flexible, an die Wetterverhältnisse angepasste Fahrweise zur Stabilität des Gesamtsystems und zur maximalen Ausnutzung aller verfügbaren Strommengen bei. In einer klimaneutralen Wirtschaft, die Erdöl, Erdgas und Kohle nicht mehr verwendet, bilden CCU-Prozesse neben Biomasse aus nachhaltiger Herstellung die neue Rohstoffbasis für die chemische Industrie. Für Mobilitätsanwendungen, für die derzeit keine anderen Antriebe vorstellbar sind, insbesondere Flugverkehr, stellen CCU-Treibstoffe ebenfalls eine Alternative zu erdölbasierten Treibstoffen dar.

Für die Entwicklung und den Scale-up dieser Technologien (Power-to-X) ist eine sektorübergreifende Zusammenarbeit von Unternehmen aus den Bereichen industrielle Produktion, Energieerzeugung und Mobilität von Vorteil, um im Zuge der Sektorkopplung einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung zu leisten.

³⁹ Joachim Von Schéele: Oxyfuel Combustion in the Steel Industry. Energy Efficiency and Decrease of CO₂ Emissions, in: Energy efficiency, hg. von Jenny Palm, Rijeka, Croatia 2010

Abbildung 4: Carbon Capture Technologies. Quelle: Energieinstitut an der JKU Linz.



4 Elektrifizierung der Industrie – System und Versorgung

4.1 Potenziale erneuerbaren Stroms

2017 hatte Österreich einen Primärenergieverbrauch in der Höhe von etwa 381 TWh. Der Anteil an Erneuerbaren am Primärenergieverbrauch betrug dabei 30 %. Im Rahmen des Projekts Renewables4Industry sowie im Rahmen neuerer Arbeiten an der Montanuniversität⁴⁰, wurde der derzeitige Primärenergieverbrauch mit den verfügbaren Gesamtpotenzialen⁴¹ an erneuerbarer Energie gegenübergestellt. Ziel war es, zu ermitteln, ob, den heutigen Verbrauch vorausgesetzt, eine Deckung mit inländisch bereitgestellten Erneuerbaren möglich ist. Diese Potenzialstudie stützt sich einerseits auf bereits publizierte Studien, und ergänzt diese andererseits durch eigene Berechnungen. In Summe konnte ein erneuerbares Potenzial in der Höhe von 266 TWh/a ermittelt werden, welches sich in der Größenordnung mit den anderen verfügbaren, österreichweiten Studien deckt. In diesen Studien wurden die Dachflächen vollständig für Photovoltaik-Anlagen berücksichtigt. In Summe beträgt das Potenzial aus stark fluktuierenden elektrischen Energieträgern (Photovoltaik und Windkraft) etwa 105 TWh/a. Das entspricht etwa 170 % des derzeitigen elektrischen Endenergiebedarfs bzw. etwa 58 % des heimischen, rein erneuerbaren, technischen Strompotenzials (ohne Biomasseverstromung). Bei einem gleichbleibenden Primärenergieverbrauch ist davon auszugehen, dass sich bei einer energieautonomen und erneuerbaren Primärenergieaufbringung eine jährliche Deckungslücke von zumindest 115 TWh einstellt. Bezogen auf den Primärenergiebedarf von 2017 entspricht dies einer benötigten Primärenergieeinsparung von etwa 30 %.

Um in einem zukünftigen Energiesystem den Anteil an zu importierenden erneuerbaren Energieträgern möglichst gering zu halten, ist aufgrund der oben erwähnten Potenzialsituation zur Deckung des Bedarfs eine höchst ambitionierte Steigerung der Primärenergieeffizienz erforderlich. Um diese Primärenergieeinsparungen zu erreichen, ist beim Design des zukünftigen Energiesystems auf eine Versorgung aller Energiedienstleistungen entsprechend ihres tatsächlich benötigten Exergiebedarfs vorzusehen. Dazu sind Technologien wie Wärmepumpen, Kraft-Wärme-Kopplung oder Abwärmenutzung notwendig. Derartige exergieoptimierte Systeme weisen die höchste Effizienz, bezogen auf die eingesetzte Primärenergie, auf.

4.2 Volatilität der Erzeugung #1: Tages- und Saisonspeicher

Nach der energetischen Betrachtung im vorangegangenen Abschnitt 4.1 wird an dieser Stelle auf eine leistungsmäßige Betrachtung eingegangen. Diese ist notwendig, da in einem elektrischen Energiesystem zu jedem Zeitpunkt Verbrauch und Erzeugung gleich groß sein müssen, um die Frequenz konstant bei 50 Hz zu halten⁴². Durch das Bilden der Differenz zwischen der nicht disponiblen

⁴⁰ Sejkora et al: Exergy as Criteria for Efficient Energy Systems - A Spatially Resolved Comparison of the Current Exergy Consumption, the Current Useful Exergy Demand and Renewable Exergy Potential, Energies, 2020.

⁴¹ Berücksichtigt wurden technische Potenziale. Es sind jene die mithilfe heutiger bekannter Technologie und unter Berücksichtigung sonstiger heutiger nicht-wirtschaftlicher Rahmenbedingungen (Flächenwidmung, Nutzungspfade, etc.) gehoben werden können.

⁴² Ist der Verbrauch größer als die Erzeugung, sinkt die Netzfrequenz. Bei steigender Netzfrequenz ist die Erzeugung größer als der Verbrauch. Aus diesem Grund wird das Ausgleichen der Abweichungen zwischen Erzeugung und Verbrauch als Frequenzhaltung bezeichnet.

Erzeugung und dem elektrischen Verbrauch wird die zum Ausgleich notwendige Leistung bestimmt. Die auszugleichende Leistung wird als Residuallast bezeichnet. Sie kann sowohl positiv als auch negativ sein und mithilfe so genannter Flexibilitätsoptionen (z.B. disponible Erzeugungsanlagen⁴³ oder Speicher⁴⁴) kompensiert werden. Eine positive Residuallast tritt bei einer Unterdeckung des Systems auf. Dies bedeutet, dass die nicht disponible Erzeugung (inkl. wärmegeführten KWK-Anlagen) nicht die Last decken kann. Meist werden in solchen Fällen zusätzliche Kraftwerke wie z.B. Speicherkraftwerke aktiviert. Bei einer negativen Residuallast ist das nicht disponible Angebot⁴⁵ größer als der Bedarf. In einer solchen Situation wird entweder die Erzeugungsleistung reduziert (z.B. Abregelung von Windkraftwerken) oder die überschüssige Energie mithilfe von Pumpspeicherkraftwerken gespeichert bzw. mit Power-to-X Anwendungen umgewandelt. Die Definition der Residuallast $P_{Res,i}$ zum Zeitpunkt i ist in Gleichung 1 dargestellt.

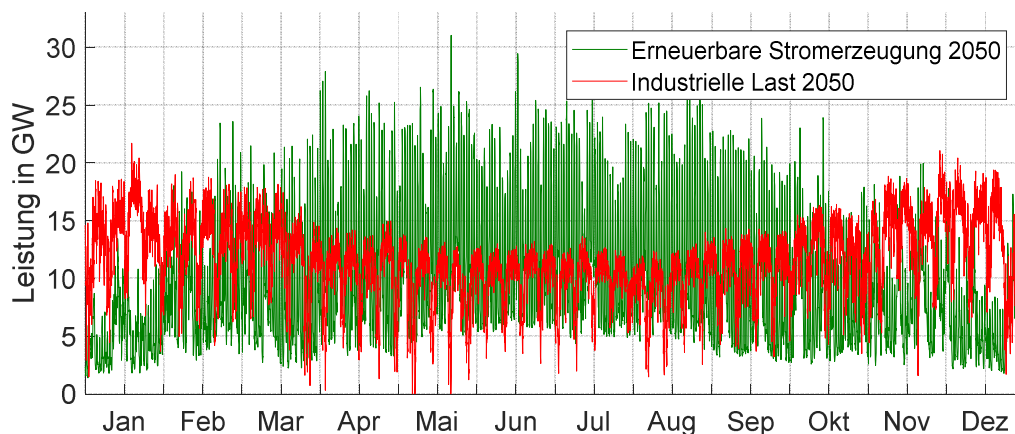
$$P_{Res,i} = P_{Last,i} - (P_{ndE,i} + P_{KWK,i}) \quad (1)$$

$P_{Last,i}$... Leistung der Last zum Zeitpunkt i

$P_{ndE,i}$... nicht disponible Erzeugung zum Zeitpunkt i

$P_{KWK,i}$... wärmegeführte KWK Anlagen zum Zeitpunkt i

Abbildung 5: Zeitlich aufgelöste Gegenüberstellung der fluktuierenden, erneuerbaren Stromerzeugung sowie der industriellen elektrischen Last im Jahr 2050 (Szenarioannahme) Quelle: Renewables4Industry.



In Abbildung 5 ist die zeitlich aufgelöste Gegenüberstellung zwischen einem erneuerbaren Erzeugungsprofil⁴⁶ und einem exemplarischen elektrischen Industrielastgang für 2050, entnommen aus der Studie Renewables4Industries, dargestellt. Daraus wird in Abbildung 6 gemäß Gleichung 1 die Residuallast berechnet.

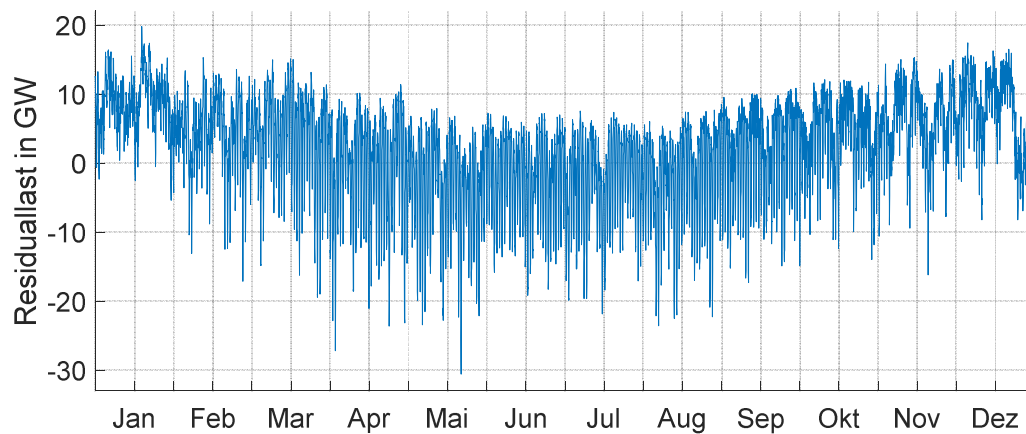
⁴³ Konventionelle Kraftwerke (z.B. Gaskraftwerke) oder Speicherkraftwerke können je nach Bedarf die erzeugende Leistung erhöhen oder reduzieren.

⁴⁴ Speicher sind flexibel einsetzbar, da diese eine zeitliche Entkoppelung zwischen Erzeugung und Bedarf ermöglichen (z.B. Pumpspeicherkraftwerke).

⁴⁵ inkl. wärmegeführter KWK Anlagen

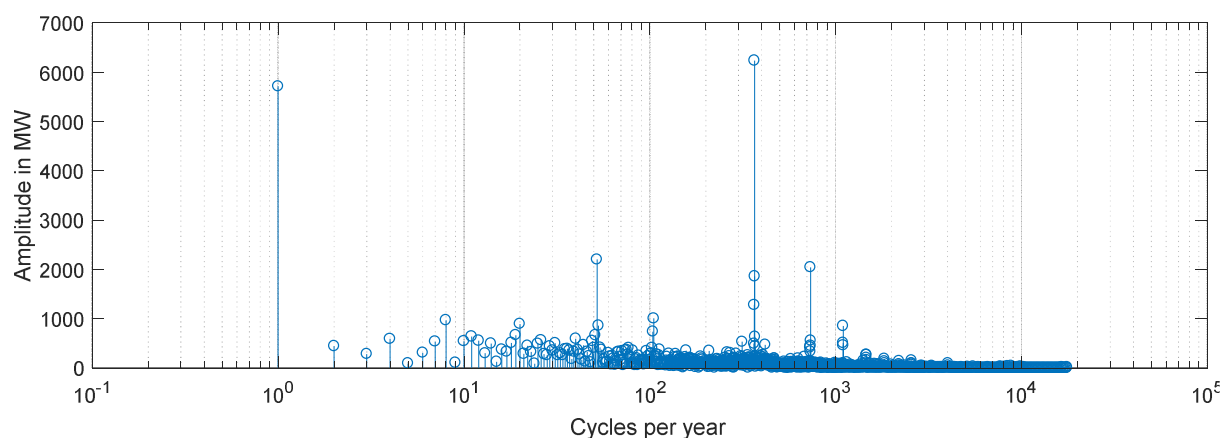
⁴⁶ Es wird angenommen, dass im Jahr 2050 der Großteil der erneuerbaren Potenziale ausgebaut ist.

Abbildung 6: Darstellung der Residuallast im Jahr 2050 (Szenarioannahme) Quelle: Renewables4Industry.



Wird die Residuallast (Abbildung 6) mithilfe der Diskrete Fourier Transformation (DFT) in ihre Spektralkomponenten zerlegt (Abbildung 7), erkennt man, dass zur Deckung zukünftiger Residuallasten zwei wesentliche Flexibilitätszeitkonstanten zu berücksichtigen sind: Einerseits die saisonale Komponente (ein Jahreszyklus), die im hier gezeigten Beispiel rund 6 GW beträgt, sowie andererseits die Tageskomponente (365 Zyklen im Jahr), die leistungsmäßig in derselben Größenordnung liegt. Beide Komponenten resultieren im Wesentlichen aus dem Zubau von PV-Strom. Die Tageskomponente folgt dem natürlichen Tag/Nacht Rhythmus und kann zukünftig über verteilte Flexibilitätsoptionen, wie z.B. Batteriespeicher dezentral abgedeckt werden. Im industriellen Kontext sind dabei Technologien mit hoher Leistung gefragt, die heute noch nicht zur Verfügung stehen. Die saisonale Komponente, die durch PV-Sommerüberschüsse entsteht, muss über Langzeitspeicher in den Winter verschoben werden. Hier eignen sich Technologien, die Strom in andere Energieträger wie Gas oder Wärme umwandeln und im Vergleich zu den Flexibilitätsoptionen eher zentral verortet sein werden. Dadurch können Skaleneffekte zum Teil den Nachteil der geringen Volllaststunden kompensieren.

Abbildung 7: DFT Analyse der Residuallast im Jahr 2050 (Szenarioannahme) Quelle: Eigene Darstellung/MU Leoben EVT.



4.3 Volatilität der Erzeugung #2: Demand Response

Bei der Umstellung auf erneuerbar versorgte Industriebetriebe, wird der Energieträger Strom eine wichtige Rolle spielen, wobei die Erzeugung allerdings oft fluktuierend und volatil sein wird. Dadurch bedarf es Maßnahmen zur Flexibilisierung der Prozesse. Diese erlauben die Hebung des Potenzials zur Umstellung auf eine erneuerbare Versorgung und wirken kurz-, mittel- und langfristig und somit in unterschiedlichen Zeithorizonten. Technologien, die eine Flexibilisierung bzw. zeitliche Verschiebung von Lastblöcken zulassen, sind unter anderem Speicher, aber auch Demand Response-Maßnahmen. Demand Response ist v.a. über kurze Zeitdauern (Minuten, Stunden, maximal ein Tag) einsetzbar und konkurriert mit Tagesspeichern. Für längere zeitliche Verschiebungen bis zum saisonalen Ausgleich braucht es allerdings weitere Speicher. Unter Demand Response können Maßnahmen gemäß der folgenden Definition verstanden werden.

Demand Response ist eine kurzfristige und planbare Veränderung der Verbraucherlast als Reaktion auf Preissignale im Markt oder auf eine Aktivierung im Rahmen einer vertraglichen Leistungsreserve. Diese Marktpreise oder Leistungsabrufe werden durch ungeplante, unregelmäßige oder extreme energiewirtschaftliche Ereignisse ausgelöst.⁴⁷

In der österreichischen Industrie ergab sich basierend auf einer Literatur- und Datenrecherche kurzfristig ein geringes Potenzial zur Flexibilisierung. Kurzfristige Demand Response-Maßnahmen werden hier als Maßnahmen verstanden, die ohne weitgreifende Änderungen in den Erzeugungsrouten in einigen industriellen Prozessen die Flexibilität erhöhen. Beispiele dafür kann das Zu- und Wegschalten von elektrischen Antrieben in der Papier- und Zellstoffindustrie (kurzfristig bis ca. 200 MW) und in der mineralverarbeitenden Industrie sein (bis 100 MW). Im chemischen Sektor ist eine adaptierte Anpassung von elektrischen Erzeugungsanlagen denkbar (ca. 30 MW). Es lässt sich schlussfolgern, dass aktuell ein als gering einzustufendes Potenzial für Demand Response in industriellen Prozessen festzustellen ist. Auf Basis der durchgeführten Analysen ist davon auszugehen, dass wahrscheinlich schon aktuell ein höheres, aber nur vor Ort und mit Mitwirkung der Industrie zu analysierendes Potenzial vorliegt.

Mittelfristig und langfristig wird die Flexibilität durch verstärkte Sektorkopplung und kaskadische Nutzung der Energieträger, Speicherintegration (vgl. Kombination Wärmepumpe und thermischer Speicher), Prozessintensivierung, Maßnahmen zur Erhöhung der Primär- und Endenergieeffizienz sowie die Umstellung auf neue Prozesse (z.B. elektrisch basierte Wasserstoffherstellung für dekarbonisierte Stahlerzeugung) erhöht. In weiterer Folge können Lastspitzen (relativ gesehen) verringert und geglättet werden, die Prozesse eignen sich besser für eine Versorgung durch Erneuerbare und die Potenziale für die niederexergetische Versorgung durch Solarthermie, Wärmepumpen und Abwärme werden angehoben. Durch diese Maßnahmen ergeben sich neue Demand Response-Potenziale. Somit ist eine weitere Steigerung des Potenzials erstens durch eine Anpassung der Rahmenbedingungen (geeignetes Marktdesign) zu erwarten. Zweitens ist eine weitere, beträchtliche Steigerung des Potenzials durch eine Elektrifizierung von Anlagen und Teilprozessen zu erwarten.

⁴⁷ Zitiert nach: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (2011): Demand Response. Web: <https://www.ffe.de/publikationen/veroeffentlichungen/344-demand-response> (Aktualisiert: 31.1.2011, Zugriff: 5.12.2019)

4.4 Anforderungen an die Leitungsinfrastruktur

Die Studien „Renewables4Industry“ und „IndustRiES“ sind aktuelle Arbeiten, die sich mit dem industriellen Energiesystem und den entsprechenden Infrastrukturanforderungen in Österreich auseinandersetzen. Die räumliche Auflösung erfolgt in Renewables4Industry auf Bezirksebene. Im Rahmen der „IndustRiES“ Studie wurde ein interaktives Tool entwickelt, mit dem zukünftige Anforderungen an die Energieinfrastruktur analysiert werden können. Die räumliche Auflösung erfolgt anhand der statistischen Datengrundlage auf Bundeslandebene. Analysen können sowohl für den Status quo also auch nach drei definierten Szenarien sowie nach einzelnen Energieträgern durchgeführt werden. Zusätzlich ist der zeitliche Verlauf durch Erzeuger- und Lastprofile auf Stundenebene abgebildet. Damit können Abschätzungen getätigt werden, wann und wo welcher Energieträger in welchen Mengen benötigt wird. In den berechneten Szenarien ist zum einen ein sehr starker Anstieg des Strombedarfs in den Industriezentren Oberösterreichs und der Steiermark festzuhalten. Weiters ergeben sich bei einem Vergleich der Leistungsnachfrage mit dem Leistungsangebot in der „IndustRiES“ Studie Differenzen. Unter- und Überdeckungen führen in weiterer Folge zu möglichen Speicher- bzw. Importbedarf. Für elektrische Energie ergibt sich je nach Szenario bei ausschließlicher Berücksichtigung des industriellen Verbrauchs und unter Vernachlässigung der Sektoren „private Haushalte“ und „Transport“, eine Unterdeckung bis zu 7,1 TWh für Österreich. Dieser Bedarf kann also nicht direkt mit den vorhandenen Erneuerbaren-Potenzialen gedeckt werden. Außerdem verdoppelt sich die berechnete Höchstlast der Industrie im Umbruch-Szenario mit bis zu 14,6 GW um mehr als das Doppelte gegenüber dem Status quo (6,3 GW). Im Vergleich dazu lag die Höchstlast im öffentlichen Stromnetz in Österreich (alle Sektoren) im Jänner 2017 bei 10,6 GW. Daraus resultiert, dass die berechnete Höchstlast der Industrie um bis zu 38% höher ist als die derzeitige Höchstlast im öffentlichen Stromnetz.⁴⁸ Da die erneuerbaren Potenziale in Österreich räumlich ähnlich verteilt sind, der Verbrauch aber verstärkt in den urbanen und industriellen Zentren verortet ist, werden zukünftig vermehrt elektrische Lastflüsse aus der Fläche hin zu den Verbrauchsschwerpunkten stattfinden.⁴⁹ Ein Ausbau des elektrischen Netzes, um den zuvor beschriebenen Anforderungen gerecht werden zu können, ist demnach ein essentieller Bestandteil, wenn eine erfolgreiche Dekarbonisierung gelingen soll. Allerdings werden sich auch für die bestehende, bereits gut ausgebaute Erdgasinfrastruktur neue Herausforderungen ergeben, wie die Integration von hochkalorischen, erneuerbar erzeugten gasförmigen Brennstoffen unterschiedlichen Ursprungs. Beispiele dafür können Wasserstoff aber auch Biomethan, das aus Biogas aufbereitet wurde, sein. Bezüglich eines vermehrten Einsatzes von Wasserstoff ist neben einer zeitlich variablen Gasqualität weiters auch noch die Speicherfrage zu klären, sowohl hinsichtlich effizienter, wirtschaftlicher Technologie also auch hinsichtlich der Verortung.

Im Zuge des Klimafondsprojekt *NEFI_lab* (https://www.nefi.at/nefi_lab/) wird eine umfangreiche Analyse der österreichischen Energie-Infrastruktur durchgeführt, bei der mit Hilfe von energieträgerübergreifenden Lastflussrechnungen und unter Berücksichtigung der Sektoren „private Haushalte“ und „Transport“, die zukünftigen Infrastrukturbedürfnisse der Industrie zeitlich und räumlich feinverortet aufgezeigt werden.

⁴⁸ Geyer, Knöttner, Diendorfer, Drexler-Schmid (2019): IndustRiES – Energieinfrastruktur für 100% Erneuerbare Energie in der Industrie. Studie erstellt im Auftrag des Klima- und Energiefonds, Wien, September 2019.

⁴⁹ Sejkora et al: Exergy as Criteria for Efficient Energy Systems - A Spatially Resolved Comparison of the Current Exergy Consumption, the Current Useful Exergy Demand and Renewable Exergy Potential, *Energies*, 2020.