

# TRENDS DES ZUKÜNFTIGEN STROMVERBRAUCHS DER INDUSTRIE IN BADEN- WÜRTTEMBERG

Eine Studie im Auftrag des VfEW

13. August 2021



## AUTOREN:

---



Dr. Jens Perner  
Dr. Michaela Unteutsch  
Dr. Ann-Katrin Lenz  
Joscha Krug



Nino Turek  
nino.turek@fichtner.de

---

## KONTAKT:

### Dr. Jens Perner

 +49 (221) 337 131 02  
 jens.perner@frontier-economics.com

### Dr. Michaela Unteutsch

 +49 (221) 337 131 33  
 michaela.unteutsch@frontier-economics.com

---

Frontier Economics Ltd ist Teil des Frontier Economics Netzwerks, welches aus zwei unabhängigen Firmen in Europa (Frontier Economics Ltd) und Australien (Frontier Economics Pty Ltd) besteht. Beide Firmen sind in unabhängigem Besitz und Management, und rechtliche Verpflichtungen einer Firma erlegen keine Verpflichtungen auf die andere Firma des Netzwerks. Alle im hier vorliegenden Dokument geäußerten Meinungen sind die Meinungen von Frontier Economics Ltd.

## INHALT

Zusammenfassung	4
<b>1 Hintergrund, Zielsetzung und Ansatz</b>	<b>12</b>
1.1 Hintergrund	12
1.2 Zielsetzung und Ansatz	14
1.3 Aufbau des Berichts	15
<b>2 Treiber des zukünftigen Stromverbrauchs</b>	<b>16</b>
2.1 Übersicht der Treiber des zukünftigen Stromverbrauchs	16
2.2 Treiber des industriellen Stromverbrauchs	19
2.3 Stromverbrauchstreiber in weiteren Sektoren	24
<b>3 Entwicklung des industriellen Stromverbrauchs in Baden-Württemberg</b>	<b>36</b>
3.1 Heutiger industrieller Energie- und Stromverbrauch in Baden-Württemberg	36
3.2 Branchenübergreifende Stromverbrauchstrends der Industrie in BW	39
3.3 Branchenspezifische Stromverbrauchstrends der Industrie in BW	43
<b>4 Einfluss von Elektrifizierungsmaßnahmen auf den industriellen Stromverbrauch</b>	<b>75</b>
4.1 Definition der betrachteten Szenarien	75
4.2 Entwicklung des industriellen Stromverbrauchs in den verschiedenen Szenarien	76
<b>5 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen</b>	<b>81</b>
5.1 Schlussfolgerungen für die zukünftige Entwicklung des (industriellen) Stromverbrauchs in Baden-Württemberg	81
5.2 Handlungsempfehlungen	83
<b>6 Literaturverzeichnis</b>	<b>85</b>
<b>ANNEX A Fragebogen der Online-Umfrage</b>	<b>91</b>
<b>ANNEX B Vorgehensweise Szenarienberechnung zum Einfluss von Elektrifizierungsmaßnahmen auf den industriellen Stromverbrauch</b>	<b>98</b>

## ZUSAMMENFASSUNG

Eine möglichst realistische Abschätzung des zukünftigen, regional disaggregierten, Stromverbrauchs ist elementarer Bestandteil der Netzausbauplanung und damit essentiell für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit. Eine hohe Versorgungssicherheit ist wiederum entscheidend für die Sicherung des Industrie- und Gewerbestandorts Baden-Württemberg (BW).

Angesichts der ambitionierten Klimaschutzziele, die sich sowohl Bundes-, als auch Landesregierung gesetzt haben, ist ein besonders bedeutender Einflussfaktor des zukünftigen Stromverbrauchs die Sektorenkopplung. So muss zur Erreichung dieser Ziele

- zumindest ein Teil des Endenergiebedarfs von fossilen Energieträgern wie Gasen und Flüssigbrennstoffen auf Strom umgestellt werden (direkter Einsatz von Strom im Industrie-, Verkehrs- und Wärmesektor); und
- die weiter genutzten Gase und Flüssigbrennstoffe auf Basis erneuerbaren Stroms oder anderer CO<sub>2</sub>-neutraler Verfahren hergestellt werden (indirekter Einsatz von Strom für die Herstellung von Wasserstoff und weiteren Derivaten, die sich daraus gewinnen lassen (synthetisches Kerosin, Methanol, Benzin etc.)).

Weitere Treiber des zukünftigen Stromverbrauchs, vor allem im industriellen Bereich, können beispielsweise Automatisierungs- und Digitalisierungsprozesse sowie die Ansiedelung von neuen energieintensiven Wirtschaftszweigen (z. B. Rechenzentren und Batteriefabriken) sein.

Vor diesem Hintergrund haben Frontier Economics und FICHTNER im Auftrag des Verbands für Energie- und Wasserwirtschaft Baden-Württemberg e.V. („VfEW“) eine Studie zu den Trends des zukünftigen Stromverbrauchs in Baden-Württemberg durchgeführt. Der Fokus der Studie liegt dabei auf der Identifikation von Stromverbrauchstreibern im industriellen Sektor, die in Stromnachfrageprognosen als Grundlage für Netzausbauplanungen zu berücksichtigen sind. Ergänzend wurden – allerdings rein literaturbasiert und in einem geringeren Detaillierungsgrad – auch die wesentlichen Stromverbrauchstreiber im Haushalts-, GHD- und Verkehrssektor identifiziert.

### Identifikation der Treiber des industriellen Stromverbrauchs in Baden-Württemberg basierend auf Interviews und Literaturlauswertungen

Um die Bedeutung von unterschiedlichen Stromverbrauchstreibern im Industriesektor in Baden-Württemberg abzuschätzen, haben wir

- bestehende Stromverbrauchsprognosen und weitere Literaturquellen ausgewertet;
- Industrieverbände und Industrie-Unternehmen aus energieintensiven Wirtschaftszweigen in Baden-Württemberg befragt; und

- eine Online-Befragung durchgeführt, die über die IHKs an Unternehmen aller Branchen in Baden-Württemberg zugesendet wurde.

Im Rahmen der Studie haben wir Stromverbrauchstrends identifiziert und die Auswirkung von Elektrifizierungsmaßnahmen auf den industriellen Stromverbrauch indikativ skizziert, jedoch keine eigene Stromverbrauchsprognose durchgeführt. Im Fokus der Studie stehen also die Identifikation und Analyse von Treibern und Trends. Zu beachten ist außerdem, dass die Interviews vor Veröffentlichung des Entwurfs zum Klimaschutzgesetz (KSG) 2021 durchgeführt wurden und die Interview-Partner daher noch nicht die geplante Beschleunigung der Senkung von Treibhausgasemissionen vor Augen hatten. Wir gehen nicht davon aus, dass die grundlegenden Aussagen der Interviews – insbesondere in Bezug auf die längerfristigen Optionen zur Elektrifizierung bzw. alternativen Dekarbonisierungsoptionen – hierdurch substantiell beeinflusst werden. Gerade in Bezug auf den Zeitraum bis 2030 wird die Industrie jedoch stärker als bisher geplant Dekarbonisierungsmaßnahmen durchführen müssen, um das verschärfte 2030er-THG-Minderungsziel zu erreichen.<sup>1</sup>

### Branchenübergreifende Stromverbrauchstrends im Industriesektor

Die Befragung der Industrie in Baden-Württemberg lässt darauf schließen, dass Dekarbonisierungsmaßnahmen der bedeutsamste Treiber des zukünftigen industriellen Stromverbrauchs sein werden. Im Einzelnen hat die Befragung gezeigt, dass

- **in einigen Bereichen Elektrifizierungsmaßnahmen bereits durchgeführt bzw. konkret geplant werden** – dies gilt vor allem im Bereich der Gebäudeenergie (Einsatz von Wärmepumpen), beim Ersatz fossil befeuerter Öfen durch Elektroöfen in der Metallindustrie und im Bereich des Fuhrparks von Unternehmen.
- **eine weitergehende, umfangreiche Elektrifizierung wesentlich vom regulatorischen Rahmen abhängt** – Eine weitergehende Elektrifizierung ist in vielen Bereichen aus technischer Sicht möglich (so z. B. die elektrische Dampferzeugung), aber derzeit angesichts des heutigen Energiepreisgefüges und der erforderlichen Umbaukosten für die Unternehmen (noch) nicht rentabel. Zudem ist aus Sicht der Unternehmen die zukünftige relative Rentabilität von verschiedenen Dekarbonisierungsmaßnahmen höchst unsicher. So wird die längerfristige Abwägung zwischen Elektrifizierungsmaßnahmen und dem Einsatz von grünem Wasserstoff aus Sicht vieler Unternehmen maßgeblich vom Verhältnis des Strompreises zum Wasserstoffpreis (und den entsprechenden Umbaukosten) abhängen, das aus Sicht der Unternehmen zum derzeitigen Zeitpunkt schwer abgeschätzt werden kann und das maßgeblich durch den entsprechenden, noch weiter auszugestaltenden, regulatorischen Rahmen beeinflusst werden wird.

---

<sup>1</sup> Die zulässige Jahresemissionsmenge für den Industriesektor (auf Bundesebene) soll gemäß des Entwurfs zum Klimaschutzgesetz (KSG) 2021 von 186 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Jahr 2020 auf 118 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente im Jahr 2030 sinken. Nach dem KSG vom Dezember 2019 war für den Industriesektor noch eine zulässige Jahresemissionsmenge von 140 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente für das Jahr 2030 vorgesehen, was bereits umfangreiche Dekarbonisierungsmaßnahmen erfordert hätte.

- **Elektrifizierungsmaßnahmen i. d. R. als kurzfristiger umsetzbar angesehen werden, als der Einsatz von grünem Wasserstoff** – Grund hierfür ist vor allem die noch fehlende Wasserstoff-Infrastruktur. Zudem gibt es bei ausgewählten prozesstechnischen Anwendungen, bei denen zurzeit Erdgas zum Einsatz kommt, bislang noch keine adäquaten, marktreifen Produkte für den Einsatz von Wasserstoff. Vor dem Hintergrund der mit dem KSG 2021 verschärften Dekarbonisierungsziele für das Jahr 2030, ist daher damit zu rechnen, dass Elektrifizierungsmaßnahmen gerade in den nächsten Jahren eine besondere Bedeutung zukommt.
- **es in einigen Bereichen einen Trend zur Erhöhung des Fremdstrombezugs gibt**, der auch aus Sicht der Netzplanung zu berücksichtigen ist – Im Kontext der Dekarbonisierung des Industriesektors gibt es seitens der Unternehmen zwei gegenläufige Trends:
  - **Trend zur Stromeigenerzeugung** – Einige Unternehmen setzen verstärkt auf Stromeigenerzeugung auf Basis von erneuerbaren Energien. Sofern die Unternehmen jedoch weiterhin auf das Stromnetz zurückgreifen, um ihren Strombedarf in Zeiten niedriger Stromeigenerzeugung zu decken, muss das Netz weiterhin entsprechend ausgelegt sein.
  - **Trend zum erhöhten Fremdstrombezug** – Einige Unternehmen haben erläutert, dass sie aufgrund geänderter regulatorischer Rahmenbedingungen für die KWK-Erzeugung zukünftig vermehrt auf Fremdstrombezug setzen wollen. Für weitere Unternehmen ist der Ersatz von Stromeigenerzeugung auf Basis von fossilen Energieträgern durch den Fremdbezug von Grünstrom (Bezug von Strom aus dem Stromnetz und Erwerb von Herkunftsnachweisen für die Grünstromeigenschaft) Teil ihrer Dekarbonisierungsstrategie.

### Branchenspezifische Elektrifizierungsoptionen und -pläne, sowie weitere Stromverbrauchstrends

Im Folgenden beschreiben wir branchenspezifische Ergebnisse aus den Unternehmens-Interviews im Hinblick auf mögliche Elektrifizierungsoptionen und diesbezügliche Pläne, sowie weitere besonders relevante Stromverbrauchstrends:

- In der **Papier-Industrie** gibt es – bei den von uns befragten Unternehmen – bislang noch keine konkreten Pläne für Elektrifizierungsmaßnahmen. Eine Option wäre jedoch, die Dampferzeugung zukünftig mit Strom durchzuführen. Die Technologien sind verfügbar, der Ansatz wird als technisch machbar erachtet. Ein Stromverbrauchstreiber in der kurzen und mittleren Frist ist der Einsatz von neuen Papiermaschinen, die ein höheres Strom-Wärmeverhältnis haben, als alte Papiermaschinen. Zudem zeichnet sich in der Papier-Industrie ein Trend zum Ersatz von KWK-basierter Strom-Eigenerzeugung durch Fremdstrombezug ab.
- In der **chemischen Industrie** ist die Umstellung der Wasserstoffproduktion auf strombasierte Elektrolyseverfahren möglich. Mittel- bis langfristig wird von den befragten Unternehmen zudem die Umstellung auf eine strombasierte Wärmeerzeugung erwogen. In der kurzen und mittleren Frist ist außerdem

aufgrund des erwarteten Produktionswachstums mit einem Stromverbrauchsanstieg zu rechnen.

- Im Bereich der **Metallerzeugung und -verarbeitung** ist die wesentliche Elektrifizierungsoption der Einsatz von elektrischen anstelle von erdgasbefeuerten Öfen. Hierzu gibt es seitens einiger Unternehmen in Baden-Württemberg bereits konkrete Pläne bzw. Überlegungen.
- In den Wirtschaftszweigen **Maschinen- und Fahrzeugbau** macht die Gebäudeenergie einen hohen Anteil des Energiebedarfs aus. In diesem Bereich gibt es seitens der Unternehmen konkrete Pläne zum Einsatz von Wärmepumpen.
- In der **Zementindustrie** werden konkrete Überlegungen zur Elektrifizierung im Bereich Fahrzeuge und Baumaschinen angestellt. Eine mögliche Elektrifizierung im Herstellungsprozess wäre die Umstellung der Klinkerproduktion auf einen strombasierten Prozess. In dieser Hinsicht besteht jedoch noch Forschungsbedarf. Weitere Treiber für einen Anstieg des Strombedarfs in der Zementindustrie sind geänderte Produkthanforderungen (die zu einem höheren Mahlbedarf führen) sowie Umweltschutzanforderungen. Zudem machen prozessbedingte Emissionen einen hohen Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementindustrie aus. Um diese zu vermeiden, werden voraussichtlich CCUS-Maßnahmen eingesetzt werden, die zu einem starken Anstieg des Stromverbrauchs (etwa um Faktor 2, bezogen auf den heutigen Stromverbrauch) führen könnten.
- In der **Kalk-Industrie** gibt es ähnliche Überlegungen zur Elektrifizierung im Bereich der Fahrzeuge und Baumaschinen, wie in der Zementindustrie. Ein weiterer Treiber für den Anstieg des Strombedarfs sind erhöhte Umweltschutzanforderungen und damit einhergehend der Betrieb zusätzlicher technischer Systeme. 2/3 der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kalkindustrie werden durch prozessbedingte Emissionen verursacht. Diese können, wie zuvor für die Zementindustrie beschrieben, durch den Einsatz von CCUS vermieden werden, wodurch der Stromverbrauch stark ansteigen würde.
- Der industrielle Stromverbrauch in Baden-Württemberg wird zudem durch **neue (große) Stromverbraucher** getrieben. Beispiele für potenzielle neue bedeutende Stromverbraucher sind
  - **Rechenzentren:** Im Zuge der Digitalisierung müssen zukünftig zunehmend große Datenmengen in kurzer Zeit transferiert werden. Die schnelle Übermittlung von großen Datenmengen erfordert dabei die Verbindung zu lokalen Rechenzentren, wodurch ein Bedarf für zusätzliche Rechenzentren-Kapazität in Baden-Württemberg entsteht; und
  - **Batteriefabriken:** Es bestehen von verschiedenen Unternehmen Pläne zur Ausweitung von bestehenden Anlagen oder zur Errichtung von neuen Batteriefabriken in Baden-Württemberg.

## Indikative Abschätzung der Auswirkungen von Elektrifizierungsmaßnahmen auf den zukünftigen industriellen Stromverbrauch in Baden-Württemberg

Die Gespräche mit den Industrie-Unternehmen haben gezeigt, dass der zukünftige Einsatz unterschiedlicher Dekarbonisierungsmaßnahmen maßgeblich von den zukünftigen Kosten der verschiedenen Optionen abhängt (die wiederum in bedeutendem Maß vom regulatorischen Rahmen getrieben werden).

Vor diesem Hintergrund haben wir eine indikative szenarienbasierte Abschätzung des industriellen Stromverbrauchs (keine Stromverbrauchsprognose) vorgenommen für die Fälle, dass

1. ein Großteil der Dekarbonisierung des Industriesektors nicht über die Elektrifizierung erfolgt, sondern über andere Optionen wie z.B. die Verwendung von grünem Wasserstoff im Verein mit Effizienzmaßnahmen. Dies wäre z. B. dann der Fall, wenn grüner Strom relativ teuer ist (z. B. wegen hoher Abgaben und Umlagen) und/oder grüner Wasserstoff relativ günstig zur Verfügung gestellt werden kann (z. B. über Importe). Die Transformation der Energieversorgung „kippt“ im Industriebereich in einer solchen Welt Richtung grüner Wasserstoff und anderer Alternativen (**Maßnahmenkombinations-Szenario**). Wir gehen hierbei davon aus, dass der Wasserstoff nicht oder nur zu einem kleinen Teil in Baden-Württemberg hergestellt wird, sondern an kostengünstigeren Standorten wie z. B. in Norddeutschland.
2. die Markt- und Rahmenbedingungen und die technische Entwicklung sich für den Einsatz von grünem Strom in der Industrie in Zukunft relativ günstig entwickeln. Dies ist z. B. dann der Fall, wenn grüner Strom in ausreichendem Umfang und zu moderaten Kosten in Baden-Württemberg zur Verfügung steht und nicht zu stark z. B. von Abgaben und Umlagen belastet wird. Gleichzeitig bleiben alternative Technologien wie der Einsatz von grünem Wasserstoff in diesem Szenario vergleichsweise teuer bzw. begrenzt verfügbar. Die Transformation der Energieversorgung „kippt“ im Industriebereich in einer solchen Welt Richtung Stromeinsatz (**Elektrifizierungsszenario und maximales Elektrifizierungsszenario**).

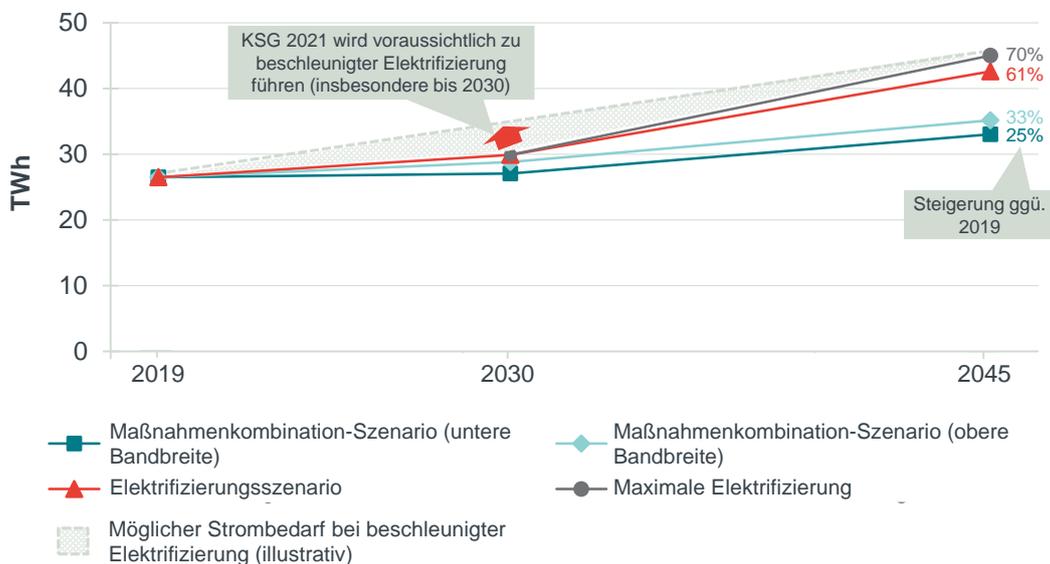
Die Wachstumsraten im Maßnahmenkombinations- und im Elektrifizierungsszenario leiten wir unter Rückgriff auf bestehende Studien bzw. Szenarien ab (im ersten Fall auf Szenarien *ohne*, im zweiten Fall auf Szenarien *mit* umfassender Elektrifizierung). Im maximalen Elektrifizierungsszenario wird als „Kontrollrechnung“ abgeschätzt, in welchem Ausmaß der Stromverbrauch ansteigen könnte, wenn der energetische Einsatz fossiler Energieträger in den einzelnen Branchen nahezu vollständig (hier annahmegemäß zu 90 %) durch den Einsatz von Strom ersetzt würde. Da eine solche umfassende Elektrifizierung erst in der längeren Frist zu erwarten ist, weisen wir Ergebnisse für das maximale Elektrifizierungsszenario nur für den Zeitraum 2030 bis 2045 aus.

Im kurz- bis mittelfristigen Zeithorizont (bis 2030) zeigen sich in allen Szenarien relativ moderate Entwicklungen in den industriellen Strombedarfen in Baden-Württemberg. Dies steht im Einklang mit den Aussagen in den Industrie-Interviews, dass nur in einzelnen Bereichen (z. B. Einsatz von Wärmepumpen; Einsatz von

Elektroöfen) bereits konkrete Pläne für Elektrifizierungsmaßnahmen bestehen und eine weitergehende Elektrifizierung eher langfristig erfolgen könnte.

Allerdings ist zu beachten, dass die Unternehmens-Interviews vor Veröffentlichung des Entwurfs zum KSG 2021 durchgeführt wurden. Zudem wurden die Studien, auf die wir bei den Annahmen zu den Verbrauchsanstiegen zurückgreifen, vor diesem Zeitpunkt erstellt. Um das verschärfte CO<sub>2</sub>-Minderungsziel für 2030 zu erreichen, muss der Industriesektor also weitergehende Dekarbonisierungsmaßnahmen ergreifen, als bislang gedacht bzw. in den Schätzungen reflektiert. Gerade im Zeitraum bis 2030, wenn grüner Wasserstoff noch nicht flächendeckend bzw. umfassend verfügbar ist, ist daher eine Zunahme von Elektrifizierungsmaßnahmen wahrscheinlich, die in der Form noch nicht in den in Abbildung 1 dargestellten Szenarien erfasst ist.

**Abbildung 1** Überschlüssig geschätzter Stromverbrauch des Industriesektors in Baden-Württemberg für die Jahre 2030 und 2045 in verschiedenen Szenarien



Quelle: Frontier Economics/FICHTNER

Bis zum Jahr 2045 fallen die Energiebedarfe der Industrie entsprechend der unterschiedlichen Dekarbonisierungspfade deutlich differenzierter aus: Liegt der industrielle Stromverbrauch bei den **Maßnahmenkombinationsszenarien** bei knapp **35 TWh**, erreichen die **Szenarien, die eine umfassende Elektrifizierung unterstellen**, Werte von **43 TWh** bzw. **45 TWh**. Eine primär auf Elektrifizierung basierende Dekarbonisierung der Industrie in Baden-Württemberg würde also zu einem Anstieg des Stromverbrauchs in der Industrie um etwa **60- 70 %** gegenüber heute führen.

### Stromverbrauchsanstieg auch in weiteren Sektoren zu erwarten

Fokus der vorliegenden Studie sind Stromverbrauchstrends im Industriesektor. Ergänzend wurden auf Basis von bestehenden Studien auch die wesentlichen Stromverbrauchstrends im Haushalts-, GHD- und Verkehrssektor identifiziert und auf dieser Basis eine Abschätzung der jeweiligen sektorspezifischen Stromverbrauchsentwicklung vorgenommen. Insbesondere im Verkehrssektor,

sowie in geringerem Maße im Haushaltssektor, ist mit einem Anstieg des Stromverbrauchs zu rechnen:

- Im **Haushaltssektor** gehen wir von einem moderaten Wachstum der Stromnachfrage aus. Für dieses Wachstum werden in der kurzen Frist vor allem die steigende Anzahl an Haushalten und mittel- bis langfristig die Verbreitung elektrischer Wärmepumpen verantwortlich sein. Abgeschwächt wird das Wachstum voraussichtlich durch einen moderaten Anstieg der Energieeffizienz.
- Für den **GHD-Sektor** gehen die meisten der gesichteten Studien von einem konstanten oder sinkenden zukünftigen Stromverbrauch aus. Geht man allerdings von einer positiven wirtschaftlichen Entwicklung sowie einer Elektrifizierung des Gebäudesektors (Einsatz von Wärmepumpen) aus, dürfte es schwer fallen, den Stromverbrauch im GHD-Sektor dennoch zu reduzieren (etwa durch sehr hohe Effizienzgewinne).
- Im **Verkehrssektor** gehen wir auf Basis der Studien von einem langfristig stark steigenden Stromverbrauch aus, der insbesondere durch die Elektrifizierung des Straßenverkehrs getrieben wird.

### Schlussfolgerungen für die zukünftige Entwicklung des Stromverbrauchs in Baden-Württemberg

Aus unseren Analysen leiten wir folgende Schlussfolgerungen für die zukünftige Entwicklung des industriellen Stromverbrauchs in Baden-Württemberg ab:

- Die **Dekarbonisierung im Industriesektor wird zum Haupt-Treiber des zukünftigen industriellen Stromverbrauchs werden**, momentan bestehen jedoch noch große Unsicherheiten bezüglich Ausmaß und Geschwindigkeit des Stromverbrauchanstiegs durch die Sektorenkopplung:
  - In einigen Bereichen werden Elektrifizierungsmaßnahmen bereits durchgeführt oder konkret geplant.
  - Eine weitere Elektrifizierung vieler Anwendungen ist zudem aus technischer Sicht möglich. Ebenso ist der Ersatz von fossilen Brennstoffen durch (grünen) Wasserstoff aus technischer Sicht in vielen Bereichen möglich; wird für die Mehrzahl der befragten Industrieunternehmen jedoch als eine Option angesehen, die in weiter entfernter Zukunft liegt, als die Elektrifizierung.
  - Viele Maßnahmen zur Elektrifizierung bzw. zum Einsatz von grünem Wasserstoff scheitern zur Zeit jedoch an der (noch) fehlenden Rentabilität der Maßnahmen sowie – im Fall von Wasserstoff – an der noch fehlenden Infrastruktur.
- Die **Ausgestaltung regulatorischer Rahmenbedingungen wird maßgeblich darüber entscheiden, in welchem Ausmaß Elektrifizierungsmaßnahmen zur Dekarbonisierung der Industrie beitragen werden** – Welche Rolle Elektrifizierungsmaßnahmen und der Einsatz von grünem Wasserstoff in der Industrie zukünftig spielen werden, hängt nach Aussage der Unternehmen vor allem von der relativen Wirtschaftlichkeit der beiden Maßnahmen ab, also maßgeblich von der Höhe

zukünftiger Strom- und Wasserstoffpreise bzw. der Kosten dieser Technologiesysteme. Diese hängen wiederum von regulatorisch gesetzten Rahmenbedingungen ab (z. B. in Bezug auf Steuern, Abgaben und Umlagen; sowie dem regulatorischen Rahmen für den Ausbau erneuerbarer Energien im Stromsystem und für die Wasserstoffherstellung), der heute allerdings nicht oder nur sehr unvollständig bekannt ist.

- **Verschärfte Klimaschutzziele für das Jahr 2030 voraussichtlich weiterer Treiber für Elektrifizierungsmaßnahmen** – Durch das Klimaschutzgesetz 2021 wird der Industrie-Sektor bereits in der kurzen und mittleren Frist in einem stärkeren Ausmaß Dekarbonisierungsmaßnahmen durchführen müssen, als bislang geplant bzw. angedacht. Elektrifizierungsmaßnahmen sind i. d. R. kurzfristiger umsetzbar als der Einsatz von grünem Wasserstoff, der in einem größeren Umfang voraussichtlich erst dann eine Rolle spielen wird, wenn eine flächendeckende Wasserstoffinfrastruktur aufgebaut ist. Eine Vielzahl von Elektrifizierungsmaßnahmen kann dagegen bereits heute umgesetzt werden.
- **Wenn die Rahmenbedingungen in einer Weise gesetzt werden, dass Elektrifizierungsoptionen aus Sicht der Unternehmen rentabel werden (Dekarbonisierung erfolgt im Wesentlichen über Elektrifizierung), ist mit einem substantiellen Anstieg des Stromverbrauchs zu rechnen, der deutlich oberhalb der in den meisten Stromverbrauchsprognosen genannten Größen liegt.**
  - Überschlägige Berechnungen zeigen, dass der industrielle Stromverbrauch in Baden-Württemberg bei zugrunde legen von Wachstumsfaktoren in „klassischen“ Stromverbrauchsszenarien bis 2045 um ca. 25-30 % gegenüber heute ansteigen würde.
  - Erfolgt die Dekarbonisierung im Wesentlichen über Elektrifizierungsmaßnahmen, ist dagegen mit einem Anstieg des industriellen Stromverbrauchs in Baden-Württemberg um 60-70 % gegenüber heute zu rechnen. Dieser Verbrauchsanstieg wäre dann entsprechend in Bedarfsplanungen inkl. der Netzausbauplanung zugrunde zu legen.
- Auch wenn das genaue Ausmaß von neuen Stromverbrauchern wie Rechenzentren und Batteriefabriken aus derzeitiger Sicht schwer abzuschätzen ist, zeichnet sich ab, dass diese **neuen Stromverbraucher ein Treiber für einen Anstieg des Stromverbrauchs in Baden-Württemberg sein werden**. So werden lokale Rechenzentren in Hinblick auf eine fortschreitende Digitalisierung (Stichwort „Internet of Things“) an Bedeutung gewinnen. Zudem bestehen bereits heute verschiedene Pläne zur Ansiedlung bzw. des Ausbaus von Batteriefabriken in Baden-Württemberg.
- **Neben dem Stromverbrauchsanstieg im Industrie-Sektor ist im Kontext der Sektorenkopplung auch in weiteren Sektoren, insbesondere im Verkehrssektor und im Bereich der Gebäudewärme, von einem Stromverbrauchsanstieg auszugehen.**

# 1 HINTERGRUND, ZIELSETZUNG UND ANSATZ

Im Auftrag des Verbands für Energie- und Wasserwirtschaft Baden-Württemberg e.V. („VfEW“) haben Frontier Economics und FICHTNER eine Studie zu den Auswirkungen der Sektorenkopplung auf den zukünftigen Stromverbrauch, vor allem des Industriesektors, in Baden-Württemberg durchgeführt. In diesem Kapitel erläutern wir

- die Relevanz des Themas (Abschnitt 1.1),
- das Ziel der Studie sowie unsere Vorgehensweise (Abschnitt 1.2) und
- den weiteren Aufbau dieses Berichts (Abschnitt 1.3).

## 1.1 Hintergrund

Eine möglichst realistische Abschätzung des zukünftigen, regional disaggregierten, Stromverbrauchs ist elementarer Bestandteil der Netzausbauplanung und damit essentiell für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit. Eine hohe Versorgungssicherheit ist wiederum entscheidend für die Sicherung des Industrie- und Gewerbestandorts Baden-Württemberg (BW).

Auf die Entwicklung des zukünftigen Stromverbrauchs haben u. a. politische bzw. regulatorische Weichenstellungen sowie technologische Entwicklungen einen hohen Einfluss:

- Erstens erfordert die Umsetzung von ambitionierten Dekarbonisierungszielen, wie sie sich sowohl Bundes-, als auch Landesregierung gesetzt haben<sup>2</sup>, dass
  - zumindest ein Teil des Endenergiebedarfs von fossilen Energieträgern wie Gasen und Flüssigbrennstoffen auf Strom umgestellt wird (direkter Einsatz von Strom im Industrie-, Verkehrs- und Wärmesektor); und
  - die weiter genutzten Gase und Flüssigbrennstoffe (mittelfristig teilweise, langfristig nahezu vollständig) auf Basis erneuerbaren Stroms oder anderer CO<sub>2</sub>-neutraler Verfahren hergestellt werden (indirekter Einsatz von Strom für die Herstellung von Wasserstoff und weiteren Derivaten, die sich daraus gewinnen lassen (synthetisches Kerosin, Methanol, Benzin etc.)).<sup>3</sup>

---

<sup>2</sup> Mit dem Klimaschutzplan 2050 hat sich Deutschland das Ziel gesetzt, die nationalen Treibhausgasemissionen (THG) bis zum Jahr 2030 um 55 % gegenüber dem Jahr 1990 zu reduzieren und im Jahr 2050 Treibhausgasneutralität zu erreichen. Diese Ziele werden aller Voraussicht nach durch das Klimaschutzgesetz 2021 jedoch noch einmal verschärft werden (65 % weniger THG-Emissionen bis 2030, Klimaneutralität bis 2045; Vgl. die Pressemitteilung des BMWi zum Klimaschutzpaket vom 12.05.2021 unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>). Auf Landesebene soll Klimaneutralität gemäß des im Mai veröffentlichten Koalitionsvertrag bis spätestens 2040 erreicht werden ([https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/dateien/PDF/210506\\_Koalitionsvertrag\\_2021-2026.pdf](https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/dateien/PDF/210506_Koalitionsvertrag_2021-2026.pdf)).

<sup>3</sup> Eine weitere Möglichkeit besteht darin, fossile Energieträger durch biogene Brenn- und Kraftstoffe zu ersetzen. Zudem können CO<sub>2</sub>-Emissionen auch abgeschieden und gespeichert (Carbon Capture and Storage, CCS) oder abgeschieden und – z. B. zur Herstellung von synthetischen Gasen und Flüssigbrennstoffen – genutzt werden (Carbon Capture and Usage, CCU) werden. CCS- und/oder CCU-Technologien sind insbesondere im Umgang mit prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Industrie von Bedeutung.

- Zweitens nimmt die Bedeutung von Automatisierung und Digitalisierung (vor allem) in der Industrie zu (Stichwort „Industrie 4.0“ oder auch „vierte industrielle Revolution“<sup>4</sup>), was ebenfalls Auswirkungen auf den zukünftigen Stromverbrauch haben kann.
- Drittens könnten sich durch die beiden ersten genannten Entwicklungen neue energieintensive Wirtschaftszweige entwickeln bzw. ansiedeln (z. B. Rechenzentren oder Batteriefabriken).

Andererseits können zukünftige Entwicklungen auch zu einer Reduktion von Stromverbräuchen führen bzw. den zukünftigen Strombedarfsanstieg dämpfen. Beispielsweise können Digitalisierung und Automatisierung zu einer weiteren Steigerung der Energieeffizienz führen.

Diese unterschiedlichen Treiber des zukünftigen Stromverbrauchs werden in bestehenden Stromverbrauchsszenarien und -prognosen in sehr unterschiedlichem Ausmaß berücksichtigt, wodurch sich große Abweichungen zwischen den abgeschätzten zukünftigen Stromverbrauchsmengen ergeben (siehe Abbildung 2). So gehen beispielsweise UBA (2020) und Prognos et al. (2020) von einem konstanten oder sogar leicht sinkenden Stromverbrauch aus, der Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2035<sup>5</sup> von einem leicht steigenden Wachstum und Dena (2018), je nach Szenario – d. h. insbesondere je nach Ausmaß der Berücksichtigung der Sektorenkopplung – von einem deutlichen Wachstum der Stromnachfrage in Deutschland. Für Baden-Württemberg rechnet TransnetBW (2020)<sup>6</sup> aufgrund der Sektorenkopplung mit einer Steigerung der Netto-Stromnachfrage um über 50 % bis zum Jahr 2050.

Zu beachten ist, dass alle in Abbildung 2 erfassten Studien vor dem Bundesverfassungsgerichtsbeschluss zum Klimaschutzgesetz und dem Entwurf des Klimaschutzgesetzes (KSG) 2021, sowie vor Veröffentlichung des neuen Koalitionsvertrages Baden-Württemberg, verfasst wurden. Folglich beziehen sich die dargestellten Stromverbrauchsszenarien – auch wenn sie von einer Erreichung von Klimaschutzzielen ausgehen – noch auf die „alten“ Klimaschutzziele, mit dem Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2050. Aktuell wird Klimaneutralität dagegen bis zum Jahr 2045 (Bundesebene, Entwurf des KSG 2021), bzw. sogar bis zum Jahr 2040 (Landesebene, Koalitionsvertrag Baden-Württemberg)<sup>7</sup> angestrebt.

---

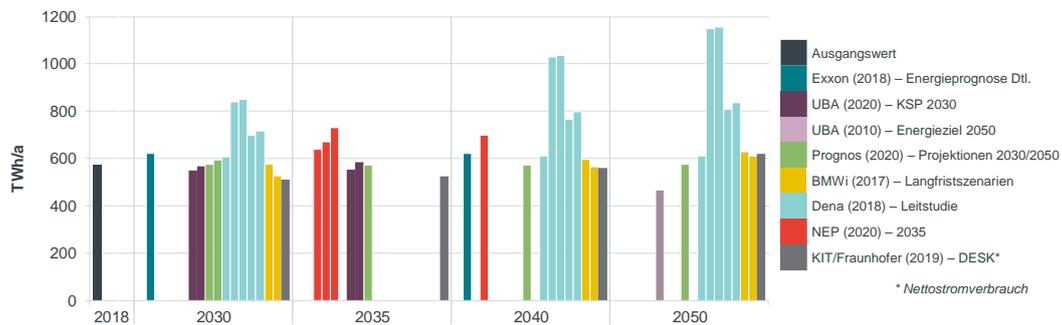
<sup>4</sup> Vgl. für einen Überblick z. B. die Homepage der Plattform Industrie 4.0 des BMWi und BMBF unter <https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>.

<sup>5</sup> Szenariorahmen NEP 2035.

<sup>6</sup> TransnetBW – Stromnetz 2050.

<sup>7</sup> Koalitionsvertrag Baden-Württemberg vom 05.05.2021.

**Abbildung 2 Übersicht des prognostizierten Bruttostromverbrauchs\* in Deutschland in verschiedenen Studien**



Quelle: Frontier Economics/Fichtner auf Basis der in der Legende genannten Studien.

Hinweis: \* Bei den Zahlen gemäß KIT/Fraunhofer ISI (2019) handelt es sich um den Netto- und nicht um den Bruttostromverbrauch.

Solange der Netzausbau mit dieser Entwicklung Schritt hält, ist auch ein starker Anstieg der Stromnachfrage unproblematisch. Voraussetzung hierfür ist eine belastbare Strombedarfsprognose, die die denkbaren Szenarien ausreichend abbildet, und ein geeigneter nationaler Netzentwicklungsplan, der mögliche Netzengpässe adressiert und behebt. Aufgrund des erheblichen Vorlaufs des Ausbaus der Netzinfrastruktur, müssen Trends der zukünftigen Stromnachfrage möglichst frühzeitig identifiziert werden.

## 1.2 Zielsetzung und Ansatz

Ziel dieser Studie ist es, die bedeutsamsten Treiber des zukünftigen Stromverbrauchs in Baden-Württemberg (bis 2030 bzw. 2045/2050) zu identifizieren, die in Stromnachfrageprognosen als Grundlage für Netzausbauplanungen zu berücksichtigen sind.

Fokus der Studie liegt dabei auf der Identifikation der Treiber des industriellen Stromverbrauchs in Baden-Württemberg, sowie einer indikativen Einschätzung des Einflusses der bedeutsamsten Treiber auf den zukünftigen Industriestromverbrauch. Um die Bedeutung von unterschiedlichen Stromverbrauchstreibern (vor allem) im Industriesektor in Baden-Württemberg abzuschätzen, haben wir

- bestehende Stromverbrauchsprognosen und weitere Literaturquellen ausgewertet; und
- Industrieverbände und Industrie-Unternehmen in Baden-Württemberg hinsichtlich ihrer Einschätzung bezüglich der Entwicklung dieser Treiber befragt. Im Einzelnen haben wir folgende Gespräche geführt:
  - 7 Gespräche mit Industrie-Verbänden in Baden-Württemberg;
  - 19 Gespräche mit Unternehmen in Baden-Württemberg, hiervon mit
    - 18 Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes aus den Branchen Papier und Pappe, Maschinenbau, Fahrzeugbau, Metallherstellung und -bearbeitung, Chemie, Steine und Erden und mit
    - einem IT-Unternehmen (zur Thematik von Rechenzentren).

Zudem haben wir eine Online-Befragung durchgeführt, die über die IHKs an ca. 2000 Unternehmen aller Branchen in Baden-Württemberg gesendet wurde. 49 Unternehmen aus mehr als 15 Branchen haben den Fragebogen ausgefüllt.<sup>8</sup>

Im Rahmen der Studie wurde keine modellbasierte Stromverbrauchsprognose durchgeführt. Auf Basis der im Rahmen der Studie durchgeführten Analysen können jedoch bestehende Stromverbrauchstrends und deren wichtigste Treiber identifiziert, sowie Anforderungen an Stromverbrauchsprognosen für die Netzausbauplanung formuliert werden. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf den industriellen Stromverbrauch in Baden-Württemberg, auf dem der Fokus dieser Studie liegt.

Auch hier ist zu beachten, dass die Interviews vor Veröffentlichung des Entwurfs zum KSG 2021 durchgeführt wurden und die Interview-Partner daher noch nicht die nun geplante Beschleunigung der Dekarbonisierung vor Augen hatten. Wir gehen nicht davon aus, dass die grundlegenden Aussagen der Interviews – insbesondere in Bezug auf die längerfristigen Optionen zur Elektrifizierung bzw. alternativen Dekarbonisierungsoptionen – hierdurch beeinflusst würden. Gerade in Bezug auf den Zeitraum bis 2030 wird die Industrie jedoch in stärkeren Maße Dekarbonisierungsmaßnahmen durchführen müssen als bisher geplant, um das verschärfte 2030er-Ziel zu erreichen.

## 1.3 Aufbau des Berichts

Der weitere Bericht gliedert sich wie folgt:

- in **Kapitel 2** identifizieren wir zunächst wesentliche Treiber des zukünftigen Stromverbrauchs auf Basis bestehender Studien (Industrie-Sektor sowie weitere Sektoren);
- in **Kapitel 3** stellen wir die Ergebnisse unserer Analyse der Trends des industriellen Stromverbrauchs in Baden-Württemberg vor;
- in **Kapitel 4** schätzen wir den Einfluss von Elektrifizierungsmaßnahmen auf den industriellen Stromverbrauch in Baden-Württemberg indikativ ab; und
- in **Kapitel 5** ziehen wir Schlussfolgerungen aus unseren Untersuchungen bezüglich der bei zukünftigen Stromverbrauchsprognosen zu beachtenden kritischen Faktoren und leiten Handlungsempfehlungen ab.

---

<sup>8</sup> Der Fragebogen kann ANNEX A entnommen werden.

## 2 TREIBER DES ZUKÜNFTIGEN STROMVERBRAUCHS

In diesem Kapitel beschreiben wir die Treiber des zukünftigen Stromverbrauchs. Hierbei

- geben wir zunächst einen sektoren-übergreifenden Überblick über die Treiber des zukünftigen Stromverbrauchs (Abschnitt 2.1);
- beschreiben anschließend die Treiber des industriellen Stromverbrauchs im Speziellen (Abschnitt 2.2); und
- gehen abschließend auf die Treiber in weiteren Sektoren (Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) sowie Verkehr) ein (Abschnitt 2.3).

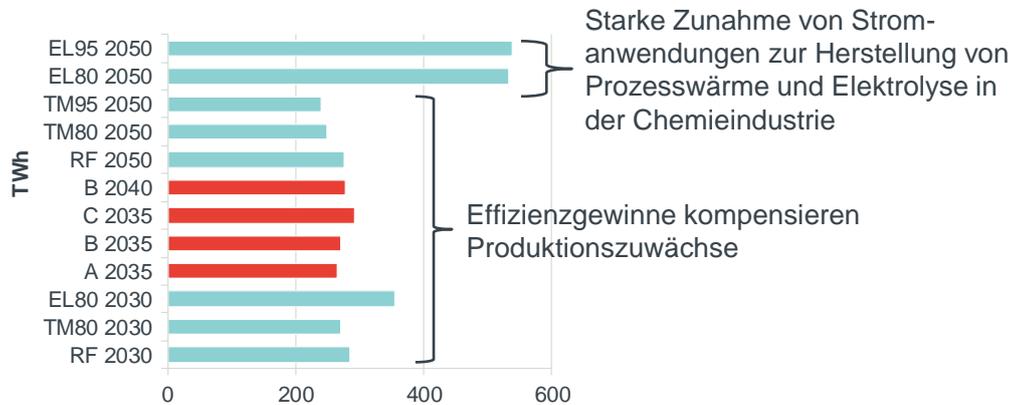
### 2.1 Übersicht der Treiber des zukünftigen Stromverbrauchs

Die Höhe des zukünftigen Bruttostromverbrauchs, die in verschiedenen, in den letzten Jahren veröffentlichten, Studien ausgewiesen wird, weist große Bandbreiten auf (vgl. Abbildung 2 in Abschnitt 1.1). So liegt die Bandbreite des bundesweiten Bruttostromverbrauchs in den betrachteten Studien beispielsweise für das Jahr 2040 zwischen 560 und 1035 TWh. Hierbei ist zu beachten, dass auch innerhalb einzelner Studien der ausgewiesene Stromverbrauch je nach Szenario deutlich variiert (in besonders starkem Umfang z. B. bei Dena (2018)). Die Differenzen zwischen den einzelnen Studien und Szenarien ergeben sich aus den jeweils getroffenen Annahmen bezüglich der Entwicklung der einzelnen Stromverbrauchstreiber.

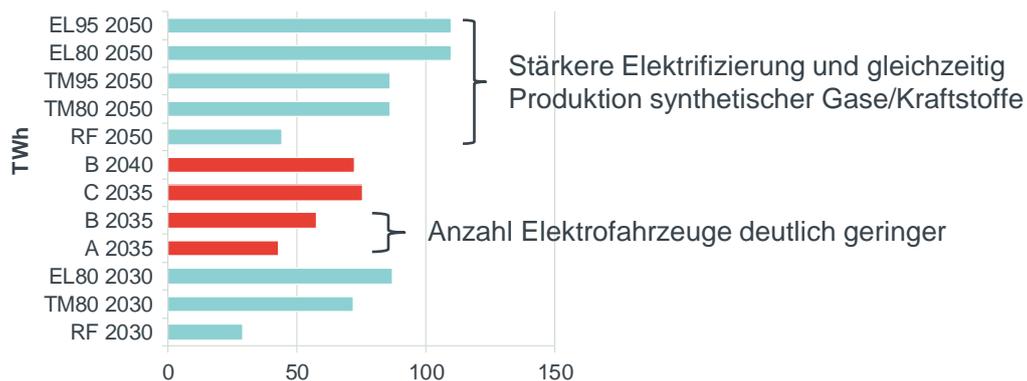
Die größten Unterschiede zwischen den Studien und Szenarien ergeben sich durch unterschiedliche Annahmen bezüglich des zukünftigen industriellen Stromverbrauchs, sowie des Stromverbrauchs im Verkehrssektor, wie in Abbildung 3 exemplarisch für zwei Studien (Szenariorahmen NEP 2035 und Dena (2018)) dargestellt.

**Abbildung 3 Indikativer Vergleich wesentlicher Stromverbrauchstreiber im Industrie- und Verkehrssektor im Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2035, Version 2021, und der Dena Leitstudie**

## Industrie



## Verkehr



Quelle: Frontier Economics/Fichtner Consulting auf Basis der in der Grafik genannten Studien.

Wesentliche, in den Studien berücksichtigte, Stromverbrauchstreiber umfassen

- die Sektorenkopplung (Treiber für einen Anstieg des Stromverbrauchs);
- Energieeffizienzgewinne (Treiber für eine Reduktion des Stromverbrauchs);
- weitere Treiber, wie wirtschaftliche Entwicklung und Bevölkerungsentwicklung (die prinzipiell sowohl Treiber für einen Anstieg, als auch für eine Reduktion des Stromverbrauchs sein können).

## Sektorenkopplung

Unter dem Begriff der Sektorenkopplung wird der verstärkte Einsatz von Strom im industriellen Bereich, bei der Erzeugung von Wärme (und Kälte), sowie im Verkehrssektor, verstanden. Ziel der Sektorenkopplung ist der Ersatz von fossilen

Energieträgern durch erneuerbare Energien.<sup>9</sup> Dies kann entweder durch eine direkte Elektrifizierung (Ersatz fossiler Energieträger durch Strom aus erneuerbaren Energien) oder durch eine indirekte Elektrifizierung (Ersatz fossiler Energieträger durch auf Basis von Strom aus erneuerbaren Energien hergestellten synthetischen Brenn- und Kraftstoffen) erfolgen.

Die Sektorenkopplung ist ein bedeutender Treiber des zukünftigen Stromverbrauchs im Industrie-, Wärme- und Verkehrssektor:

- Um die Dekarbonisierung im Industriebereich voranzutreiben, müssen fossile Energieträger, die derzeit in Produktionsprozessen bzw. in Gebäuden der Industrie eingesetzt werden, durch den Einsatz von Strom oder synthetischen Brennstoffen (bzw. alternativ durch biogene Brennstoffe) ersetzt werden. Hierauf gehen wir in Abschnitt 2.2 näher ein.
- Im Gebäude-/Wärmebereich wird die Dekarbonisierung vor allem durch den Einsatz von Wärmepumpen (direkte Elektrifizierung) vorangetrieben. Mittel- und langfristig könnte auch der Einsatz von synthetischen Gasen (indirekte Elektrifizierung) im Wärmebereich zunehmen (z. B. über eine Beimischung von Wasserstoff im Erdgasnetz). Auf die Sektorenkopplung im Wärmebereich bei Haushalten und GHD gehen wir in Abschnitt 2.3 ein.
- Im Verkehrssektor erfolgt die Sektorenkopplung zum einen durch den Ausbau der Elektromobilität (Straßen- und Schienenverkehr), zum anderen durch den Einsatz von synthetischen Kraftstoffen (indirekte Elektrifizierung). Hierauf gehen wir ebenfalls in Abschnitt 2.3 ein.

Wie stark der Stromverbrauch durch Sektorenkopplung ansteigt, hängt u. a. davon ab, zu welchen Anteilen die Sektorenkopplung jeweils durch direkte bzw. indirekte Elektrifizierung erfolgt. In Hinblick auf die indirekte Elektrifizierung ist für die Abschätzung des regionalen Stromverbrauchs zudem von Bedeutung, ob bzw. zu welchen Anteilen synthetische Brenn- und Kraftstoffe lokal erzeugt werden oder aus anderen Regionen importiert werden.

## Energieeffizienz

Durch Energieeffizienzfortschritte bei Industrieprozessen, Antriebstechnologien und im Gebäudebereich (dort vor allem durch Sanierungsmaßnahmen und durch effizientere Heizungstechnologien) kann sowohl der Strombedarf bei heutigen Stromanwendungen reduziert werden, als auch der Anstieg des zukünftigen zusätzlichen Strombedarfs durch die Sektorenkopplung gedämpft werden. Auf den Einfluss der Energieeffizienz auf den Stromverbrauch der einzelnen Sektoren gehen wir in den Abschnitten 2.2 und 2.3 näher ein.

## Weitere Stromverbrauchstreiber

Weitere Stromverbrauchstreiber umfassen u. a. Annahmen bezüglich der wirtschaftlichen Entwicklung und der Bevölkerungsentwicklung sowie in Bezug auf die Auswirkungen einer zunehmenden Digitalisierung. Auch hierauf gehen wir in den folgenden Abschnitten jeweils ein.

---

<sup>9</sup> Vgl. BMWi (2016).

## 2.2 Treiber des industriellen Stromverbrauchs

Der industrielle Stromverbrauch macht derzeit etwa 44 % des gesamten Endenergieverbrauchs von Strom in Deutschland aus.<sup>10</sup> Neben Strom kommt im Industriesektor vor allem Erdgas als Energieträger zum Einsatz (siehe Abschnitt 3.1). Wie sich der industrielle Stromverbrauch zukünftig entwickeln wird, hängt im Wesentlichen davon ab,

- wie sich der heutige industrielle Energiebedarf insgesamt weiterentwickeln wird, und
- welche Energieträger zukünftig eingesetzt werden, um den industriellen Energiebedarf zu decken.

Haupttreiber für die Entwicklung des Energiebedarfs und des Energieträgermix in der Industrie sind

- Dekarbonisierungsanforderungen,
- die wirtschaftliche Entwicklung und
- weitere Treiber wie Automatisierung und Digitalisierung.

### Dekarbonisierung als Treiber des industriellen Stromverbrauchs

Bis zum Jahr 2050 (bzw. voraussichtlich 2045) will Deutschland Treibhausgasneutralität erreichen, das Land Baden-Württemberg sogar bis zum Jahr 2040.<sup>11</sup> Um dieses Ziel zu erreichen, muss auch die Industrie einen entscheidenden Beitrag leisten. So sinkt die zulässige Jahresemissionsmenge für den Industriesektor im Zeitraum 2020 bis 2030 von 186 auf 140 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente, bzw. gemäß des Entwurfs zum Klimaschutzgesetz 2021 sogar auf 118 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente (siehe Abbildung 4 zu den zulässigen, sektoralen Jahresemissionsmengen für das Jahr 2030).<sup>12</sup> Für den Zeitraum 2031-2040 sollen im Jahr 2025, bzw. gemäß dem Entwurf zum Klimaschutzgesetz 2021 im Jahr 2024, jährlich absinkende Emissionsmengen festgelegt werden.<sup>13</sup>

---

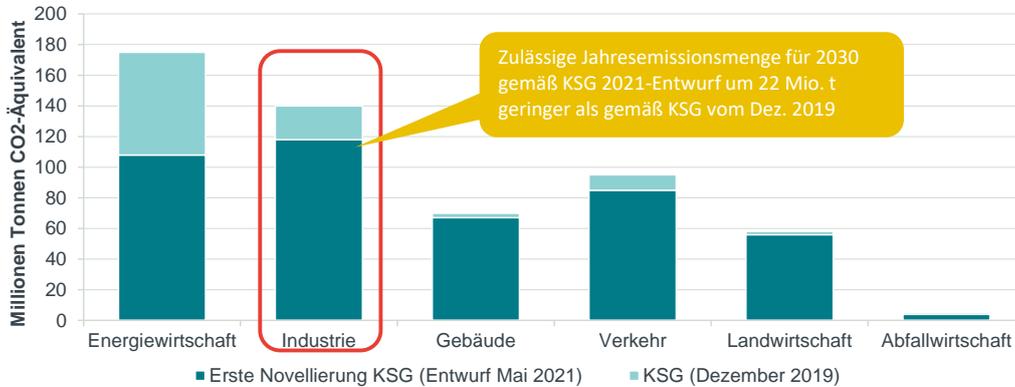
<sup>10</sup> Zahlen aus dem Jahr 2019, vgl. AG Energiebilanzen (2021).

<sup>11</sup> Vgl. den Klimaschutzplan 2050, den Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundesklimaschutzgesetzes vom 12.05.2021 und den Koalitionsvertrag Baden-Württemberg vom 05.05.2021.

<sup>12</sup> Bundes-Klimaschutzgesetz (2019), Anlage 2 zu § 4 und Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundesklimaschutzgesetzes vom 12.05.2021

<sup>13</sup> Bundes-Klimaschutzgesetz (2019), § 4 Absatz 6 und Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundesklimaschutzgesetzes vom 12.05.2021. Im Jahr 2034 sollen die sektorspezifischen Emissionsminderungen für den Zeitraum 2041 bis 2045 festgelegt werden.

**Abbildung 4 Zulässige sektorale Jahresemissionsmengen für das Jahr 2030 gemäß KSG (Dez. 2019) und KSG 2021 (Entwurf, Mai 2021)**



Quelle: Frontier Economics/Fichtner basierend auf BMU Referentenentwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes und Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) Anlage 2

Eine Reduktion der THG-Emissionen ist bei gleichbleibender Produktionsleistung durch den Ersatz fossiler durch regenerative Energieträger möglich, und/oder – bis zu einem gewissen Grad – durch eine Steigerung der Energieeffizienz.<sup>14</sup>

### Ersatz fossiler Energieträger

Fossile Energieträger finden derzeit in der Industrie in drei Bereichen Anwendung (siehe Abbildung 5):

1. Fossile Energieträger werden (in Kesseln oder Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Anlagen)) verbrannt, um Dampf, Warmwasser und/oder Strom herzustellen. Warmwasser und/oder Strom werden anschließend (a) in Gebäuden oder (b) in Produktionsprozessen eingesetzt. Der erzeugte Dampf kommt ausschließlich in Produktionsprozessen zum Einsatz.
2. Fossile Energieträger werden direkt in Prozessen verbrannt.
3. Fossile Energieträger kommen als Rohstoffe in der Produktion zum Einsatz.

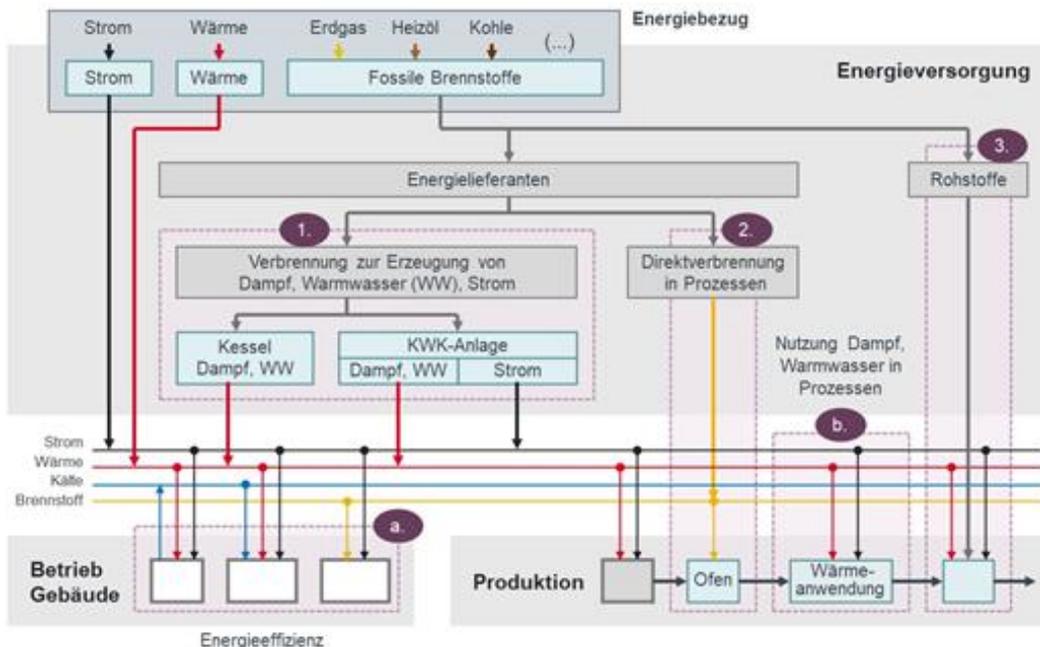
Ein Ersatz der fossilen Energieträger kann zum einen durch eine Elektrifizierung der Endanwendungen (z. B. durch den Einsatz von (Groß-) Wärmepumpen im Gebäudebereich oder durch Umstellung von Produktionsprozessen) erfolgen. Zum anderen können fossile Energieträger durch den Einsatz von grünem Wasserstoff oder dessen Folgeprodukten (oder durch den Einsatz von Biomasse) ersetzt werden.

In Bezug auf die oben genannten Anwendungsbereiche 1 und 2 ist grundsätzlich sowohl eine Elektrifizierung der Endanwendungen, als auch ein Ersatz der fossilen Brennstoffe durch alternative, grüne Brennstoffe, denkbar. In welchen Industriezweigen es derzeit welche Überlegungen zum Ersatz fossiler Energieträger gibt, beschreiben wir in Abschnitt 3.3. Der Anwendungsbereich 3 (Einsatz fossiler Energieträger als Rohstoffe) ist dagegen i. d. R. nicht

<sup>14</sup> Zudem können CCS- und CCU-Verfahren eingesetzt werden, um prozessbedingte Emissionen in der Industrie abzuscheiden und zu nutzen (Carbon-Capture-and-Usage (CCU)) oder zu speichern (Carbon-Capture-and-Storage (CCS)).

elektrifizierbar, bzw. mindestens nicht direkt elektrifizierbar. Ein Beispiel für eine indirekte Elektrifizierung eines fossilen Energieträgers, der als Rohstoff eingesetzt wird, ist die Substitution von aus Methan hergestelltem Wasserstoff durch Wasserstoff, der mittels Elektrolyse gewonnen wird.

**Abbildung 5 Grundsätzliche Verwendungszwecke verschiedener Energieträger in Industrie-Unternehmen**



Quelle: Frontier Economics/FICHTNER.

Für die Abschätzung der Auswirkungen des Ersatzes fossiler Energieträger in der Industrie auf den zukünftigen regionalen Stromverbrauch ist relevant,

- inwieweit der direkte Strombedarf ansteigt,
- inwieweit mit dem Einsatz von Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Folgeprodukten geplant wird, und
- zu welchem Anteil diese Produkte regional produziert werden.

### Energieeffizienz

Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion von THG-Emissionen besteht darin, den Energieverbrauch durch eine Steigerung der Energieeffizienz zu senken. In Bezug auf den Industrie-Sektor ist eine Energieeffizienz-Steigerung in folgenden Bereichen grundsätzlich möglich:

- Steigerung der Effizienz bei der Eigenerzeugung von Dampf, Warmwasser oder Strom;
- Effizientere Energienutzung im Gebäudebereich (z. B. über Sanierungen der Gebäude); und

- Effizientere Energienutzung in den Produktionsprozessen, z. B. über eine verbesserte Abwärmenutzung oder die Reduktion von Wärmeverlusten.<sup>15</sup>

In den vergangenen Jahren wurden bereits deutliche Fortschritte bei der Energieeffizienz im Industriesektor erzielt. So ist beispielsweise die Energieproduktivität, ausgedrückt als das Verhältnis der Bruttowertschöpfung zum Endenergieverbrauch, deutlich angestiegen (z. B. um ca. 21 % im Zeitraum 2010 bis 2018).<sup>16</sup> In verschiedenen Studien wird davon ausgegangen, dass weiterhin erhebliche Potenziale zur Erhöhung der Energieeffizienz bestehen. Beispielsweise unterstellt der Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2035 (Version 2021), dass – bei isolierter Betrachtung der Energieeffizienz – in allen Sektoren (Haushalte, GHD, verarbeitendes Gewerbe und Industrie) der Stromverbrauch durch Energieeffizienzmaßnahmen um 0,5 % p.a. reduziert wird.<sup>17</sup> In der Dena Leitstudie werden je nach Szenario Energieeffizienzgewinne von 0,85 % bis 1,12 % pro Jahr angenommen.<sup>18</sup>

### Einfluss der wirtschaftlichen Entwicklung auf den industriellen Stromverbrauch

Ein weiterer wesentlicher Treiber des industriellen Stromverbrauchs ist die wirtschaftliche Entwicklung innerhalb der einzelnen Industrie-Sektoren. Hierbei ist neben der wirtschaftlichen Gesamtentwicklung innerhalb der Sektoren (z. B. gemessen anhand der Bruttowertschöpfung oder der Produktionsmengen), auch ein möglicher Strukturwandel innerhalb der Branchen (z. B. Entwicklung vom Verbrennungs- zum Elektroantrieb in der Automobilindustrie) relevant, sofern dieser eine Auswirkung auf den Energie- und Strombedarf in der Branche hat.

Bezüglich der wirtschaftlichen Gesamtentwicklung gehen beispielsweise EWI et al. (2014) davon aus, dass es bundesweit in allen Branchen zu einem Anstieg der (realen) Bruttowertschöpfung bis 2050 kommt, wobei das angenommene Ausmaß des Wachstums je Branche sehr unterschiedlich hoch ist. Mit Ausnahme der Wirtschaftszweige „Kokereien und Mineralölverarbeitung“ sowie „Textil, Bekleidung und Leder“ gilt dies auch für die von BCG/Prognos (2018) getroffenen Annahmen zur Entwicklung der Bruttowertschöpfung von 2015 bis 2050. Spezifisch für Baden-Württemberg gehen ZSW et al. (2017)<sup>19</sup> von einem Anstieg der Bruttowertschöpfung aus. Prognos et al. (2020) nehmen hingegen an, dass es in einigen Industrie-Branchen bis 2050 eine deutliche Senkung (z. B. bei Elektrogeräten) und in anderen Sektoren einen deutlichen Anstieg der Produktionsmengen (z. B. bei Metallerzeugnissen) gibt.<sup>20</sup> Dena (2018) geht von einem durchschnittlichen Wachstum von 1 % in allen Branchen aus.<sup>21</sup> Der

---

<sup>15</sup> Vgl. z. B. die Homepage der Dena unter <https://www.dena.de/themen-projekte/energieeffizienz/unternehmen/>.

<sup>16</sup> Vgl. BMWi (2020), S.34. Bei der Energieproduktivität handelt es sich um einen Indikator für die Auswirkungen von Energieeffizienzsteigerungen. Dennoch gibt es andere Faktoren neben Veränderungen der Energieeffizienz, die zu einem Anstieg der Energieproduktivität des Industrie-Sektors führen können (wie z. B. eine Verschiebung der Produktion zwischen verschiedenen Industrie-Sektoren mit unterschiedlich hohen Energieproduktivitäten).

<sup>17</sup> Vgl. 50Hertz et al. (2020), S. 37 f.

<sup>18</sup> Vgl. Dena (2018), S. 99.

<sup>19</sup> Siehe dort Tabelle 18.

<sup>20</sup> Vgl. Prognos et al. (2020), S. 34.

<sup>21</sup> Vgl. Dena (2018), S. 98.

Szenariorahmen NEP 2035 weist zwar einen (für alle Branchen gleichen) Laststeigerungsfaktor (i. H. v. 0,3 % p. a. für die Szenarien A und B bzw. i. H. v. 0,5 % p. a. im Szenario C) aus, dieser umfasst jedoch lediglich den Mehrbedarf für „Digitalisierung, Dekarbonisierung und neue Verbraucher“ und nicht durch Wirtschaftswachstum.<sup>22</sup>

### Weitere Treiber des industriellen Stromverbrauchs

Weitere Treiber des industriellen Stromverbrauchs sind umfassende Automatisierungs- und Digitalisierungsprozesse, die auch unter dem Begriff „Industrie 4.0“ subsummiert werden. Durch Automatisierungs- und Digitalisierungsprozesse, die auch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz und Robotik beinhalten können, soll es zu einer intelligenten Vernetzung von Menschen, Maschinen und industriellen Prozessen kommen.<sup>23</sup> Diese Entwicklung wird als die „vierte industrielle Revolution“ angesehen.<sup>24</sup>

Der Einfluss von Automatisierungs- und Digitalisierungsprozessen auf den Strombedarf wird unterschiedlich bewertet. Isoliert betrachtet führen die Prozesse zu einem Anstieg des Strombedarfs – sowohl bei den Industrieunternehmen selbst, als auch durch einen höheren Bedarf an Rechenzentren (die nicht zwangsläufig bei den Unternehmen angesiedelt sein müssen). Gleichzeitig kann die Entwicklung im Bereich Automatisierung und Digitalisierung zu einer Steigerung der Energieeffizienz führen, z. B. durch eine verbesserte Steuerung und intelligente Vernetzung der Anlagen, die Reduktion von Stillstandszeiten (wodurch Stand-by-Verluste gemindert werden) und durch die Identifikation von Einsparmöglichkeiten durch eine bessere Datenverfügbarkeit.<sup>25</sup>

In bestehenden Stromverbrauchsprognosen wird der Einfluss von Automatisierungs- und Digitalisierungsprozessen unterschiedlich berücksichtigt bzw. bewertet. So ist im Szenariorahmen NEP 2035 Digitalisierung neben Dekarbonisierung und neuen Industrieanwendungen ein Faktor für einen Anstieg des zukünftigen industriellen Stromverbrauchs und somit im „Laststeigerungsfaktor“ erfasst. Zudem werden im Netzentwicklungsplan neue Stromgroßverbraucher, wie geplante Batteriefabriken, neue Anlagen in der Stahl- und Aluminiumindustrie sowie der chemischen Industrie, als neue industrielle Stromanwendungen zusätzlich berücksichtigt. Diese werden aufgenommen, wenn für die gemeldeten Großverbraucher eine oder mehrere konkrete Anschlussanfragen für einen Standort vorlagen. In Dena (2018) wird Digitalisierung dagegen ausschließlich als Treiber für eine Senkung des Strombedarfs (im Gebäudesektor, der dort sowohl Wohngebäude als auch Nicht-Wohngebäude des GHD- und Industriesektors umfasst) erfasst.

---

<sup>22</sup> Vgl. Szenariorahmen NEP 2035, S. 38.

<sup>23</sup> Vgl. die Homepage des BMWi „Digitale Transformation in der Industrie“ unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/industrie-40.html>.

<sup>24</sup> Vgl. ebenda.

<sup>25</sup> Vgl. Kulterer (2019).

## 2.3 Stromverbrauchstreiber in weiteren Sektoren

Der heutige Stromverbrauch der weiteren Sektoren liegt jeweils deutlich unter dem Stromverbrauch des Industriesektors. Der Industriesektor macht im Jahr 2019 etwa 44 % des gesamten Endenergieverbrauchs von Strom in Deutschland aus, der Haushaltssektor 25 %, der GHD-Sektor 29 % und der Verkehrssektor 2 %.<sup>26</sup> Für Baden-Württemberg sehen diese Relationen ähnlich aus.<sup>27</sup> Vor diesem Hintergrund fokussieren wir uns im weiteren Verlauf des Berichts primär auf die Industrie und gehen lediglich in diesem Abschnitt auf die weiteren Sektoren näher ein. Wir betrachteten dabei für jeden der drei Sektoren

- die Gesamtentwicklung der Stromnachfrage für Deutschland und Baden-Württemberg auf Basis von Studien, die den zukünftigen Stromverbrauch für die Jahre 2030 und 2050 prognostizieren;
- die hinter diesen Prognosen stehenden Treiber der Stromnachfrage;
- sowie selektiv die in den einzelnen Studien bzw. Szenarien getroffenen Annahmen für die einzelnen Treiber, um Unterschiede zwischen den Studien erklären zu können.

Abschließend geben wir eine überschlägige Einschätzung für die Richtung des zukünftigen Stromverbrauchs in den einzelnen Sektoren.

### 2.3.1 Haushalte

Die Haushalte in Deutschland haben im Jahr 2019 ca. 126 TWh an Strom konsumiert.<sup>28</sup> Stromnachfrageprognosen verschiedener Studien (siehe Abbildung 6) für die Jahre 2030/2035 liegen zwischen gut 100 bis 145 TWh. In dieser Spannbreite sind auch für das Jahr 2050 die überwiegende Zahl der Prognosen zu verorten.<sup>29</sup>

---

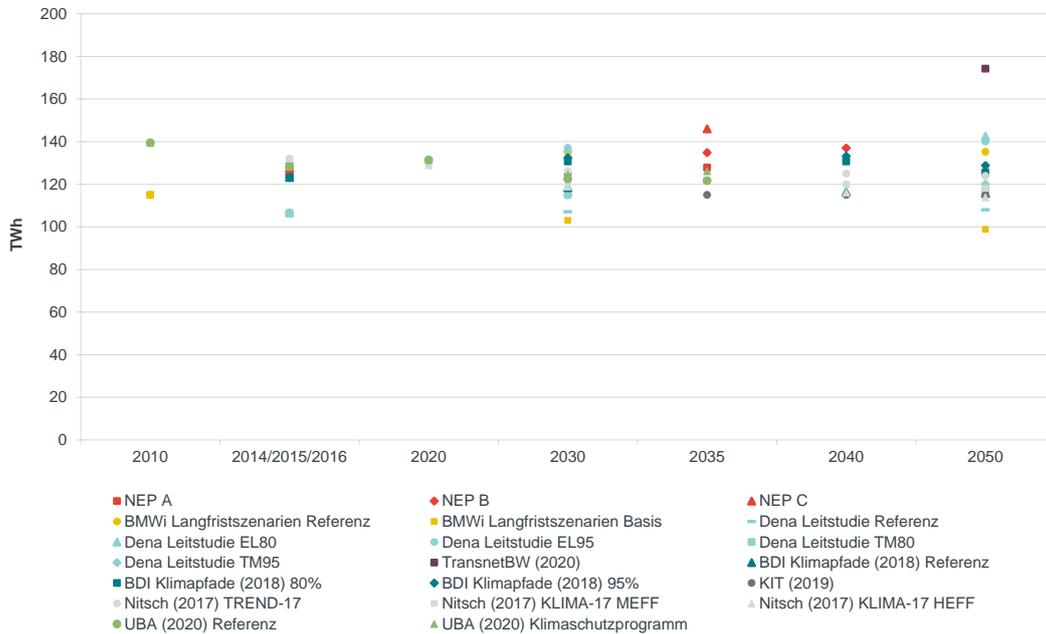
<sup>26</sup> Vgl. AG Energiebilanzen (2021).

<sup>27</sup> Vgl. Länderarbeitskreis Energiebilanzen, Energiebilanz Baden-Württemberg für 2018 (vorläufige Zahlen), verfügbar unter <https://www.lak-energiebilanzen.de/eingabe-dynamisch/?a=e900>.

<sup>28</sup> Vgl. AG Energiebilanzen (2021).

<sup>29</sup> Eine Ausnahme davon bildet TransnetBW (2020) mit einer Schätzung i. H. v. 174 TWh für das Jahr 2050. Hier ist zu beachten, dass von TransnetBW (2020) lediglich ein Gesamtverbrauch von 527 TWh für Haushalte, GHD und Industrie ausgewiesen ist. Diesen Gesamtverbrauch i. H. v. 527 TWh haben wir auf Basis der Anteile der Sektoren am Stromverbrauch im Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans 2035 (Szenariorahmen NEP 2035) im Jahr 2016 auf die drei Sektoren aufgeteilt.

**Abbildung 6 Prognosen des Nettostromverbrauchs der Haushalte bis 2050 in Deutschland**



Quelle: Frontier Economics basierend auf den angegebenen Studien

Hinweis: Dena Leitstudie: Aufteilung der Stromnachfrage des Gebäudesektors jeweils hälftig auf Haushalte und GHD. BDI Klimapfade: Annahme, dass elektrische Anwendungen zukünftig analog zu 2015 weiterhin 80 % des Strom-Endenergieverbrauchs ausmachen.

In Baden-Württemberg betrug der Stromverbrauch der Haushalte 2018 ca. 16 TWh.<sup>30</sup> 2030 wird in verschiedenen Studien ein Verbrauch von 16-19 TWh prognostiziert, in 2050 17-21 TWh (siehe Abbildung 7).

**Abbildung 7 Prognosen des Nettostromverbrauchs der Haushalte bis 2050 in Baden-Württemberg**



Quelle: Frontier Economics basierend auf den angegebenen Studien

<sup>30</sup> Vgl. Länderarbeitskreis Energiebilanzen, Energiebilanz Baden-Württemberg für 2018, sowie Statistisches Bundesamt Baden-Württemberg, Endenergieverbrauch der Haushalte und sonstigen Verbraucher sowie Endenergieverbrauch privater Haushalte für das Jahr 2018.

*Hinweis: Nitsch/Magosch (2020): Aufteilung des Stromverbrauchs auf die Sektoren Haushalte, GHD, Verkehr und Industrie erfolgt basierend auf der Verteilung des NEP in 2016.*

Die ermittelten Bandbreiten lassen in Verbindung mit dem Ausgangsniveau bereits erkennen, dass die einzelnen Studien unterschiedliche Entwicklungen des Stromverbrauchs der Haushalte vorhersagen. Erhebliche Unterschiede zwischen Deutschland und Baden-Württemberg sind nicht zu erkennen und nicht zu erwarten. Der Gesamttrend wird von folgenden z. T. gegenläufigen Treibern beeinflusst (in Klammern: Trends):

- **Anzahl der Haushalte (+):** Die Anzahl der Haushalte hängt von der Bevölkerungsentwicklung sowie der Größe der Haushalte ab. Mit sinkender Bevölkerungszahl nimmt tendenziell auch der Stromverbrauch ab. Allerdings steht dem der gegenläufige Trend zur Verkleinerung der Haushalte entgegen: Der Stromverbrauch pro Kopf nimmt hierdurch zu, da in diesem Fall mitunter z. B. weiterhin eine ähnliche Zahl an Zimmern beleuchtet werden muss oder ähnlich viele elektrische Geräte im Einsatz sind.

In einigen Studien wird lediglich die Bevölkerungsentwicklung betrachtet – so z. B. im Szenariorahmen NEP 2035 oder vom BMWi (2017). Diese steigt im Szenariorahmen NEP 2035 zunächst (bis ca. 2030) an, anschließend nimmt die Bevölkerung aber i. d. R. ab und liegt in 2050 z. T. deutlich unter dem Niveau von 2020. Andere Studien wie z. B. BDI Klimapfade (BCG/Prognos (2018)), UBA (2020) oder KIT/Fraunhofer ISI (2019) berücksichtigen dagegen den erwarteten Trend einer Zunahme kleinerer Haushalte und den damit einhergehenden gegenläufigen Effekt auf die Stromnachfrage.

- **Effizienzsteigerungen (-) bei elektrischen Geräten und Beleuchtung sowie Entwicklung der Anzahl der Geräte (+):** Bei Analyse der konventionellen Stromnachfrage von Haushalten wird regelmäßig von einer Effizienzsteigerung bei Informations- und Kommunikationstechnik (IKT), Haushaltsgroßgeräten (wie weißer Ware) und Beleuchtung ausgegangen. Die ausgewiesene Größenordnung liegt im Szenariorahmen NEP 2035 bei 0,5 % p. a. In den Langfristszenarien des BMWi (2017) werden hingegen zumindest beim Basisszenario mit dem Erreichen der Klimaziele ambitionierte 0,78 % p. a. unterstellt. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Anzahl der Geräte durch eine steigende Zahl von Haushalten<sup>31</sup> oder von IKT-Geräten infolge steigender Digitalisierung steigen kann, was den Effekt von Effizienzsteigerungen abschwächen kann, aber – abgesehen von einzelnen Gerätekategorien wie IKT<sup>32</sup> – zumeist nicht überkompensiert.
- **Umstellung von fossilen Energieträgern auf elektrische Wärmepumpen zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser (+):** Der maßgebliche, den Stromverbrauch von Haushalten erhöhende, Treiber ist die Umstellung der Heizungsanlagen von fossilen Energieträgern, wie Gas und Heizöl, auf elektrische Wärmepumpen. Die Installation einer Wärmepumpe ist jedoch nur bei ausreichender Wärmedämmung des Gebäudes sinnvoll möglich, sodass

---

<sup>31</sup> Vgl. UBA (2020), S. 197 und 199.

<sup>32</sup> Vgl. UBA (2020), S. 197 und 199.

der vorhandene Gebäudebestand<sup>33</sup> und dessen Zustand<sup>34</sup> sowie realisierbare Sanierungsraten bei der zukünftigen Verbreitung von Wärmepumpen ebenfalls eine Rolle spielen. Dadurch kann der Energiebedarf zwar insgesamt sinken, der Stromverbrauch wird aber durch die Umstellung von fossilen Energieträgern, wie Gas oder Heizöl, auf Strom dennoch steigen.

Der hohe Effekt auf die Stromnachfrage von Haushalten ist aus Abbildung 6 ersichtlich. Die für 2050 im oberen Bereich liegenden Prognosen (TransnetBW (2020), Dena (2017) Elektrifizierungsszenarien) weisen einen hohen Stromverbrauch durch Wärmepumpen auf. Für 2035 weist der Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans 2035<sup>35</sup> über die einzelnen Szenarien A, B und C mit 4, 6 und 9 Mio. Wärmepumpen eine große Spannweite auf, wobei 4 Mio. Wärmepumpen eher im unteren Bereich (aber nicht am untersten Ende) und 6 bzw. 9 Mio. Wärmepumpen einen hohen bzw. sehr hohen Wert darstellen.

Es ist allerdings anzumerken, dass ein ambitionierter Zubau von Wärmepumpen nur bei ebenso ambitionierten Sanierungsraten möglich ist: Viele Studien,<sup>36</sup> wie auch Dena (2018), sehen eine Vollsanierungsrate von ca. 2 % als erforderlich an, um eine Dekarbonisierung des Wärmemarktes durch eine starke Elektrifizierung in Form von Wärmepumpen zu erreichen. Die tatsächliche Rate energetischer Sanierungen in Deutschland lag seit 2000 hingegen durchgehend um 1 %, meist sogar darunter. Angebotsseitig ist die erforderliche Verdopplung der Sanierungsrate fraglich und auch nachfrageseitig bestehen erhebliche Hürden für eine hohe Sanierungsgeschwindigkeit.<sup>37</sup> Allzu ambitionierte Entwicklungen bei der Zahl der Wärmepumpen im Haushaltsbereich wären eher kritisch zu hinterfragen.

- **Einsatz von Wasserstoff in Brennwertthermen mit lokal produziertem Wasserstoff (+):** Eine Alternative zur Dekarbonisierung des Wärmesektors ist die Nutzung von Wasserstoff in Brennwertthermen – entweder mittels Beimischung zu Erdgas oder in reiner Form in 100 % H<sub>2</sub>-kompatiblen Anlagen. Beim Wechsel von fossilen Energieträgern würde im Fall einer lokalen Erzeugung des Wasserstoffs in Deutschland bzw. in Baden-Württemberg eine Steigerung des Stromverbrauchs resultieren. In größeren Mengen ist eine Wasserstoffproduktion speziell in Baden-Württemberg aber infolge der begrenzten Verfügbarkeit günstiger erneuerbarer Energien eher unwahrscheinlich. Vielmehr scheint eine Produktion im Norden Deutschlands bzw. mittel- bis langfristig auch ein Import von Wasserstoff eher realistisch.<sup>38</sup>

Wir stellen fest, dass die Szenarien/Studien mit einem starken prognostizierten Anstieg des Einsatzes von Wärmepumpen z. T. auch diejenigen sind, die einen

---

<sup>33</sup> Von rund 19 Millionen Wohngebäuden in Deutschland stammen knapp zwei Drittel aus der Zeit vor der ersten Wärmeschutzverordnung im Jahr 1977. Nur 11 % der Wohnungen sind in den letzten 20 Jahren gebaut worden. Vgl. BDEW (2020).

<sup>34</sup> Nur rund 13 % der Bestandsgebäude gelten als vollsaniert oder Neubau und entsprechen damit höheren energetischen Standards. Rund 36 % der Wohngebäude gelten als unsaniert und etwas mehr als 51 % zumindest teilsaniert. Vgl. UBA (2019).

<sup>35</sup> Szenariorahmen NEP 2035.

<sup>36</sup> U. a. BMWi (2017), BCG/Prognos (2018) 80 % und 90 % Szenario.

<sup>37</sup> Vgl. Frontier Economics (2021a).

<sup>38</sup> Vgl. Frontier Economics (2021b) und DVGW (2020). Ebenso geht auch die Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg von einem Import nach Baden-Württemberg aus, vgl. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (2020).

Anstieg des Gesamtstromverbrauchs der Haushalte<sup>39</sup> erwarten. Weitere darunter fallende Studien sind hingegen eher als „business as usual“ mit weniger ambitionierten Zielen für den Wärmepumpeneinsatz einzuordnen. Diejenigen Szenarien/Studien mit einem vergleichsweise geringen Anstieg von Wärmepumpen und z. T. eher hohen Erwartungen bzgl. der Effizienzsteigerungen prognostizieren einen konstanten oder gar fallenden Gesamtstromverbrauch von Haushalten.<sup>40</sup> Unter Berücksichtigung einer zunächst steigenden und langfristig konstanten Haushaltszahl, einer eher moderaten Effizienzsteigerung sowie einem zumindest langfristigen Anstieg von elektrischen Wärmepumpen gehen wir insgesamt von einem **moderaten Wachstum der Stromnachfrage der Haushalte – ähnlich zum Szenario B des Szenariorahmens des Netzentwicklungsplans 2035<sup>41</sup> – sowohl für Deutschland als auch für Baden-Württemberg aus.**

### 2.3.2 Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

Der Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektor in Deutschland weist im Jahr 2019 mit 144 TWh<sup>42</sup> einen leicht höheren Stromverbrauch als die Haushalte auf. Die Prognosen verschiedener Studien liegen für die Jahre 2030/35 sowie für das Jahr 2050 zwischen 105 und 145 TWh (siehe Abbildung 8), also in einem ähnlichen Bereich wie die Werte für den Haushaltssektor. Im Jahr 2030 stellt die Studie vom KIT/Fraunhofer ISI (2019) mit 175 TWh einen Ausreißer dar, der vermutlich im Zuschnitt des Sektors begründet liegt, da bereits von einem deutlich höheren Ausgangswert in 2015 ausgegangen wird. Im Jahr 2050 weist – analog zu den Haushalten – lediglich TransnetBW (2020) mit 187 TWh einen Wert außerhalb der genannten Bandbreite auf.

---

<sup>39</sup> Ein steigender Verbrauch wird für Deutschland in den Szenarien B und C im Szenariorahmen NEP 2035, im BMWi (2017) Referenzszenario, von Dena (2018) für die Elektrifizierungs- und Technologiemixszenarien, von TransnetBW (2020) und für Baden-Württemberg von ZSW et al. (2017) angenommen.

<sup>40</sup> Eine konstante oder gar sinkende Nachfrage wird hingegen im Szenario A des Szenariorahmens NEP 2035, im BMWi (2017) Basisszenario, im Dena (2018) Referenzszenario, von BCG/Prognos (2018) Referenzszenario für den BDI, KIT (2019), Nitsch (2017), UBA (2020) und für Baden-Württemberg von DLR et al. (2018) unterstellt.

<sup>41</sup> Szenariorahmen NEP 2035.

<sup>42</sup> Vgl. AG Energiebilanzen (2021).

**Abbildung 8** Prognosen des Nettostromverbrauchs von GHD bis 2050 in Deutschland



Quelle: Frontier Economics basierend auf den angegebenen Studien

Hinweis: Dena Leitstudie: Aufteilung der Stromnachfrage des Gebäudesektors jeweils hälftig auf Haushalte und GHD.

Für Baden-Württemberg lag der Stromverbrauch im GHD-Sektor im Jahr 2018 bei ca. 19 TWh.<sup>43</sup> Für 2030 als auch 2050 werden hingegen i. d. R. eher leicht höhere bis konstante Werte von 19 bis 23 TWh prognostiziert. Lediglich das KIT/Fraunhofer ISI (2019) weist für das Jahr 2030 einen starken Anstieg auf 27 TWh aus, der im Jahr 2050 allerdings wieder auf 23 TWh sinkt.

<sup>43</sup> Vgl. Länderarbeitskreis Energiebilanzen, Energiebilanz Baden-Württemberg für 2018, sowie Statistisches Bundesamt Baden-Württemberg, Endenergieverbrauch der Haushalte und sonstigen Verbraucher sowie Endenergieverbrauch privater Haushalte für das Jahr 2018.

**Abbildung 9 Prognosen des Nettostromverbrauchs von GHD bis 2050 in Baden-Württemberg**



Quelle: Frontier Economics basierend auf den angegebenen Studien

Hinweis: Nitsch/Magosch (2020): Aufteilung des Stromverbrauchs auf die Sektoren Haushalte, GHD, Verkehr und Industrie erfolgt basierend auf der Verteilung des NEP in 2016.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Mehrzahl der Szenarien in den untersuchten Studien von einem über die Zeit sinkenden oder allenfalls konstanten Stromverbrauch im GHD Sektor ausgeht. Dies gilt sowohl für Deutschland insgesamt, als auch Baden-Württemberg. Maximal sinkt der Stromverbrauch dabei um ca. 20 %. Steigende Prognosen sind lediglich bei den Elektrifizierungs- und Technologiemieszenarien von Dena (2018), beim BMWi (2017) Referenzszenario, bei TransnetBW (2020) und beim Referenzszenario von ZSW et al. (2017) zu finden. Die Entwicklung der Stromnachfrage wird dabei von folgenden Treibern beeinflusst, die sich z. T. mit denen des Haushaltssektors überlappen:

- Ein wesentlicher Treiber der Stromnachfrage des GHD-Sektors ist die **wirtschaftliche Entwicklung (+)**. Diese wird vom KIT/Fraunhofer ISI (2019) durch die Bruttowertschöpfung der Subsektoren, die Anzahl der Beschäftigten sowie die Nutzfläche je Branche parametrisiert. Das BMWi (2017) greift auf die beiden letztgenannten Parameter zurück. In beiden Studien wird von einem positiven Wirtschaftswachstum ausgegangen,<sup>44</sup> das zu einem Anstieg der Stromnachfrage des GHD-Sektors führt. Der Szenariorahmen NEP 2035 bildet den „Mehrbedarf durch Digitalisierung und Dekarbonisierung“ hingegen pauschal durch einen Laststeigerungsfaktor i. H. v. 0,3 % p. a. (Szenario A und B) bzw. 0,5 % p. a. (Szenario C) ab.
- **Umstellung** von fossilen Energieträgern **auf elektrische Wärmepumpen zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser (+)**: Analog zu den Haushalten ist auch bei Nichtwohngebäuden von einer zunehmenden Umstellung der Heizungsanlagen auf elektrische Wärmepumpen in Verbindung mit entsprechenden Gebäudesanierungen auszugehen. Angesichts der großen Fläche je Gebäude und hohen quadratmeterbezogenen Verbräuchen sind die

<sup>44</sup> Vgl. KIT/Fraunhofer ISI (2019), S. 8, ohne Angabe zum Wert. Das BMWi (2019), S. 63, weist eine Steigerung der Beschäftigten von 2,5 % sowie ein Flächenwachstum von knapp 50 % bis 2050 aus.

daraus resultierenden Energieverbräuche trotz geringer Zahl von Nichtwohngebäuden im Vergleich zu Wohngebäuden erheblich. So stellen Nichtwohngebäude mit 36 % beim Gebäudeenergieverbrauch derzeit die zweitgrößte Gruppe dar.<sup>45</sup> Der Effekt der Umstellung auf elektrische Wärmepumpen macht sich folglich auch hier in den Stromverbrauchsprognosen von Studien mit einer starken Elektrifizierung des Gebäudebereichs bemerkbar, also insbesondere bei den Elektrifizierungsszenarien von Dena (2018) und TransnetBW (2020). Im Szenariorahmen NEP 2035 werden hingegen lediglich Haushaltswärmepumpen, Großwärmepumpen der öffentlichen Fernwärmeversorgung und Elektroheizer für Industrieprozesse betrachtet, sodass die Elektrifizierung des Gebäudesektors im GHD-Bereich unzureichend berücksichtigt wird.

- **Einsatz von Wasserstoff in Brennwertthermen mit lokal produziertem Wasserstoff (+):** Ebenfalls analog zum Haushaltssektor ist auch bei Nichtwohngebäuden im GHD-Bereich der direkte Einsatz von erneuerbarem Wasserstoff zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser möglich. Eine Steigerung des Stromverbrauchs ergibt sich allerdings auch hier nur bei lokaler Produktion, die in großem Umfang insbesondere in Baden-Württemberg eher unwahrscheinlich ist.<sup>46</sup>
- **Verbreitung von Klimaanlage in Nicht-Wohngebäuden (+):** Gleichzeitig existiert ferner ein Trend zu einer zunehmenden Ausrüstung der Nichtwohngebäude mit Lüftungs- oder Klimaanlage, was den Stromverbrauch zukünftig entsprechend ansteigen lässt. Die Studie von BCG/Prognos für den BDI (2018) weist z. B. einen Anstieg von 4 TWh in 2015 auf 12 TWh (Referenzszenario) bzw. 8 TWh (80 % und 90 % Pfad) im Jahr 2050 für Klimakälte aus.
- **Effizienzsteigerungen bei Informations- und Kommunikationstechnik sowie Beleuchtung (-):** Auch im GHD-Sektor wird allgemein von einer Verbreitung effizienterer Geräte ausgegangen, die zu einer Senkung des Stromverbrauchs führen. Große Potentiale bestehen zudem auch bei der Beleuchtung – BCG/Prognos (2018) weisen in der Studie für den BDI hier eine Senkung von gut 3 % p. a. von 2015 bis 2050 für den 80%- und 95%-Pfad aus.<sup>47</sup> im Szenariorahmen NEP 2035 wird pauschal der bereits bei den Haushalten ausgewiesene Wert von 0,5 % p. a. verwendet. ZSW et al. (2017) sowie BMWi (2017) verweisen allerdings darauf, dass für eine ambitionierte Umsetzung von Effizienzmaßnahmen der Abbau existierender Hemmnisse erforderlich sind, da bei vielen Unternehmen der Energiebedarf mit einem Gesamtkostenanteil von weniger als 1 % eine untergeordnete Rolle spielt und somit häufig keine aktive Suche nach Einsparmaßnahmen stattfindet. Beim BMWi (2017) kompensieren insofern nur beim Basisszenario die Effizienzsteigerungen weitere positive Effekte, beim Referenzszenario gelingt dies lediglich bis 2030.
- **Technologisierung und neue Großverbraucher (+):** Effizienzsteigerungen werden durch die zunehmende Technisierung sowie eine Zunahme von IKT-

<sup>45</sup> Vgl. Dena (2019).

<sup>46</sup> Vgl. Fußnote 38.

<sup>47</sup> Vgl. z. B. auch BMWi (2017).

basierten Stromanwendungen, z. B. Servern oder gar neuen Großverbrauchern wie Rechenzentren, überkompensiert.<sup>48</sup>

In Anbetracht der als positiv eingeschätzten wirtschaftlichen Entwicklung des GHD-Sektors, der zu erwartenden Umstellung von fossilen Energieträgern auf elektrische Wärmepumpen zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser, der zunehmenden Verbreitung von Klimaanlage, der zunehmenden Technologisierung sowie Entwicklung neuer Großverbraucher wäre von einer steigenden Nachfrage im GHD-Sektor auszugehen. Die Mehrzahl der Szenarien in den untersuchten Studien prognostiziert allerdings einen über die Zeit sinkenden oder allenfalls konstanten Stromverbrauch, was entweder entsprechend große Effizienzsteigerungen implizieren würde, oder, dass die Studien u. U. nicht alle Treiber umfassend berücksichtigen. Eine eindeutige Aussage hinsichtlich der Entwicklung des zukünftigen Stromverbrauchs im GHD-Sektor ist somit schwer zu treffen. Wenn man jedoch von einer positiven wirtschaftlichen Entwicklung (auch unter Berücksichtigung neuer Rechenzentren) sowie einer starken Elektrifizierung des Gebäudesektors ausgeht, dürfte eine Kompensation dieser stromverbrauchssteigernden Effekte durch Effizienzsteigerungsmaßnahmen zunehmend schwerer werden.

### 2.3.3 Verkehr

Die derzeitige Stromnachfrage des Verkehrssektors ist mit knapp 12 TWh (2019)<sup>49</sup> in Deutschland recht gering und resultiert im Wesentlichen aus der eher kleinen Zahl von Elektrofahrzeugen (2020 ca. 135.000 Elektrofahrzeuge und 540.000 Hybrid-Fahrzeuge)<sup>50</sup> sowie dem elektrifizierten Schienenverkehr. Die betrachteten Studien prognostizieren jedoch ein starkes Wachstum der Stromnachfrage des Verkehrssektors.

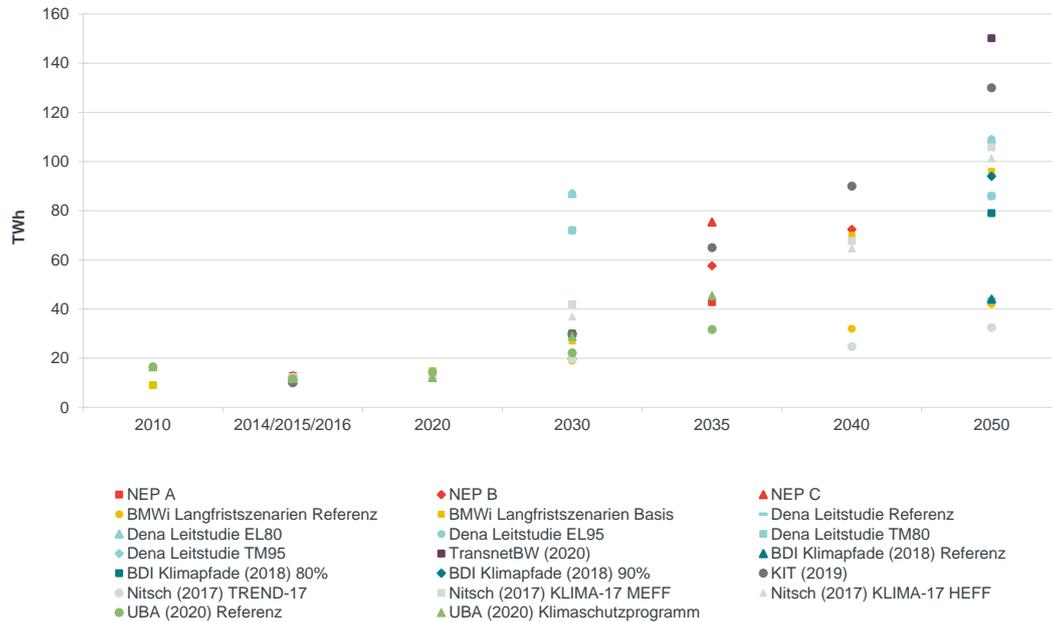
- Bis 2030 wird zumeist ein Anstieg auf ca. 19 bis 40 TWh erwartet. Lediglich Dena (2018) sieht bei den die Klimaziele erfüllenden Szenarien ein kurz- bis mittelfristig sehr viel stärkeres Wachstum auf 72 bzw. 87 TWh. Auch die Szenarien im Szenariorahmen NEP 2035 liegen für das Jahr 2035 mit 43 TWh (Szenario A), 58 TWh (Szenario B) und 75 TWh (Szenario C) z. T. deutlich über der Bandbreite anderer Studien für das Jahr 2030.
- Langfristig, d. h. bis zum Jahr 2050, wird in sämtlichen Studien ebenfalls mit einer weiter steigenden Stromnachfrage im Verkehrssektor gerechnet. Die ausgewiesenen Werte liegen bei der Mehrzahl der Szenarien, die ein Erreichen der Klimaschutzziele unterstellen (inklusive der Szenarien von Dena (2018)), zwischen 80 und 110 TWh. Dena (2018) sowie der Szenariorahmen NEP 2035 gehen folglich lediglich davon aus, dass der Anstieg der Stromnachfrage im Verkehrssektor früher einsetzt als bei anderen Studien. Die in Abbildung 10 für 2050 ausgewiesenen Werte von 33 bis 44 TWh stellen hingegen „business as usual“ Szenarien dar. Ausreißer nach oben sind das KIT/Fraunhofer ISI (2019) mit 130 TWh und TransnetBW (2020) mit 150 TWh.

<sup>48</sup> Vgl. z. B. ZSW et al. (2017), S. 76, oder KIT/Fraunhofer ISI (2019), S. 8.

<sup>49</sup> Vgl. AG Energiebilanzen (2021).

<sup>50</sup> Vgl. die Homepage des Kraftfahrt-Bundesamtes unter [https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/fz\\_b\\_umwelt\\_archiv/2020/2020\\_b\\_umwelt\\_z.html?nn=2601598](https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/fz_b_umwelt_archiv/2020/2020_b_umwelt_z.html?nn=2601598).

**Abbildung 10 Prognosen des Nettostromverbrauchs des Verkehrssektors bis 2050 in Deutschland**



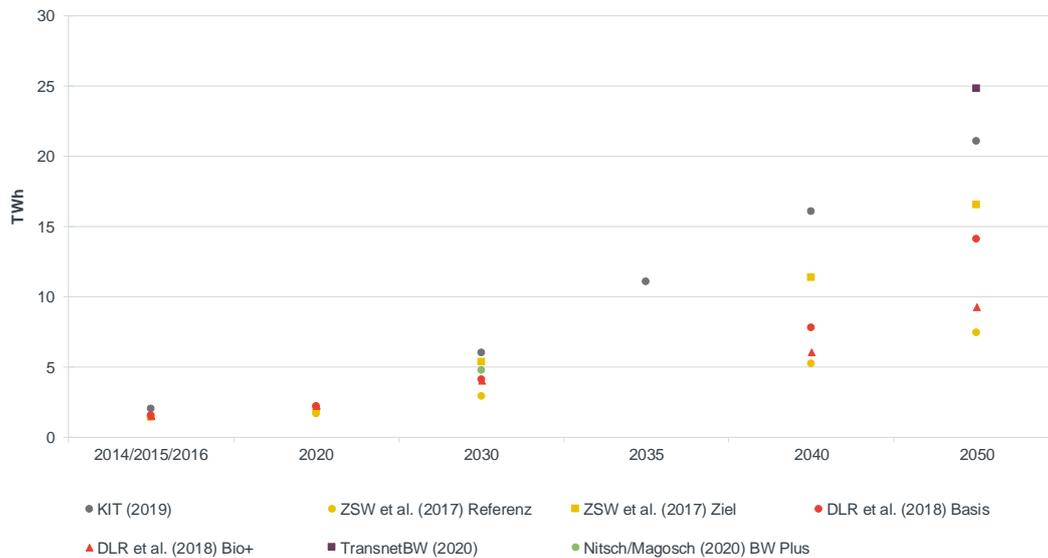
Quelle: Frontier Economics basierend auf den angegebenen Studien

Hinweis: Power-to-X (also z. B. zu Wasserstoff oder synthetischen Kraftstoffen) ist in den Werten nicht enthalten.

In Baden-Württemberg ist die Situation ähnlich und unterscheidet sich lediglich im Niveau (siehe Abbildung 11). Der gegenwärtige Stromverbrauch im Verkehrssektor liegt bei ca. 1,5 TWh<sup>51</sup> (2018) und steigt in den betrachteten Studien bis zum Jahr 2030 auf 3 bis 6 TWh an. Bis zum Jahr 2050 steigt die Nachfrage weiter an, in welchem Umfang ist allerdings unsicher. Die prognostizierten Werte liegen hier weit gestreut zwischen 7 und 25 TWh.

<sup>51</sup> Vgl. Länderarbeitskreis Energiebilanzen, Energiebilanz Baden-Württemberg für 2018, sowie Statistisches Bundesamt Baden-Württemberg, Endenergieverbrauch der Haushalte und sonstigen Verbraucher sowie Endenergieverbrauch privater Haushalte für das Jahr 2018.

**Abbildung 11 Prognosen des Nettostromverbrauchs des Verkehrssektors bis 2050 in Baden-Württemberg**



Quelle: Frontier Economics basierend auf den angegebenen Studien

Hinweis: Power-to-X (also z. B. zu Wasserstoff oder synthetischen Kraftstoffen) ist in den Werten nicht enthalten.

Der deutliche Anstieg der Stromnachfrage im Verkehrssektor lässt sich insbesondere auf den Umstieg von Verbrennungsmotoren auf elektrische Antriebe im Straßenverkehr zurückführen. Weitere Treiber sind die Entwicklung des elektrifizierten Schienenverkehrs und die Nutzung von lokal erzeugten synthetischen Gasen bzw. Kraftstoffen für verschiedene Verkehrsträger (Straße, Schiene, Schifffahrt, Luftverkehr).<sup>52</sup> Im Folgenden gehen wir auf diese Treiber und die in den Szenarien der Studien betrachteten Annahmen näher ein.

- Anstieg der Elektromobilität (+):** Sämtliche Studien erwarten einen Anstieg der Elektromobilität – sei es durch reine Elektro- oder Hybrid-Antriebe. Die Elektrifizierung betrifft dabei insbesondere PKW und leichte Nutzfahrzeuge, es werden aber auch elektrifizierte LKW in den Studien berücksichtigt. Die Stromverbrauchsprognosen von Dena (2018) (Technologiemix- und Elektrifizierungsszenario) stellen für das Jahr 2030 Ausreißer dar, die aus der überdurchschnittlich hohen Zahl an Elektrofahrzeugen (23 bzw. 26 Mio. Fahrzeuge) resultieren. Die dort genannte Entwicklung zu den Elektrofahrzeugen liegt deutlich über den Schätzungen anderer Studien, z. B. des Szenariorahmens NEP 2035 mit 8, 12 bzw. 17 Mio. Elektrofahrzeugen für das Jahr 2035 oder des BMWis (2017) mit ca. 4 bis 6 Mio. Elektro- und Hybridfahrzeugen im Jahr 2030.

Für das Jahr 2050 werden in den „business as usual“-Szenarien beispielsweise 12 (Dena (2018)), 14 (BCG/Prognos für den BDI (2018)) und 15 Mio. Elektrofahrzeuge (BMW (2017)) unterstellt, bei den Szenarien, in denen die Klimaschutzziele erreicht werden, liegen die Werte hingegen mit 26 bis 38 Mio.

<sup>52</sup> Ein weiterer Treiber sind Änderungen im Mobilitätsverhalten. Das Mobilitätsverhalten umfasst dabei sowohl die Fahrleistung insgesamt, als auch die Wahl zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln. Ein eindeutiger Effekt auf den Stromverbrauch erfordert angesichts der Vielzahl von Einflussfaktoren eine detaillierte Analyse, die nicht im Fokus dieser Studie steht und insofern ausgeklammert wird.

- Fahrzeugen<sup>53</sup> deutlich darüber, wodurch sich auch ein Großteil der Spannbreite der Stromverbrauchsprognosen für das Jahr 2050 erklären lässt.
- **Nutzung lokal erzeugter synthetischer Gase und Kraftstoffe (+):** Als Option zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors, speziell für den Schwerlastverkehr auf der Straße, den Luft- und Schiffsverkehr sowie z. T. für Züge, werden synthetische Gase und Kraftstoffe diskutiert. Dies wird z. B. bei Dena (2018), bei BCG/Prognos (2018) und bei TransnetBW (2020) berücksichtigt, wo Größenordnungen von 10 bis 30 TWh im Jahr 2030 bzw. bis zu 120 TWh im Jahr 2050 angenommen werden. In Abbildung 10 und Abbildung 11 sind die dafür erforderlichen Stromverbräuche jedoch nicht aufgenommen, da sich eine Steigerung des Stromverbrauchs lediglich bei lokaler Produktion ergeben würde. In größerem Umfang wird dies insbesondere bei Fokussierung auf die Stromnachfrage von Baden-Württemberg<sup>54</sup> – analog zur Verwendung von synthetischen Gasen im Wärmebereich – aber als eher unwahrscheinlich erachtet. Im Szenariorahmen NEP 2035 wird Power-to-Gas für den Verkehrssektor vollständig ausgeklammert und sich auf Power-to-Gas im Industriesektor fokussiert.
  - **Zunahme des (elektrifizierten) Schienenverkehrs (+):** Verschiedene Studien gehen von einer Zunahme des (elektrifizierten) Schienenverkehrs und dem damit verbundenen Stromverbrauch aus – sowohl für 2030 als auch z. T. in etwas geringerem Umfang für 2050. Der Szenariorahmen NEP 2035 berücksichtigt dies in einem pauschalen Laststeigerungsfaktor für den Nah-, Fern-, und Güterverkehr i. . v. 25 %. In weiteren Studien wird speziell ein Anstieg des Stromverbrauchs des Schienengüterverkehrs erwartet,<sup>55</sup> wohingegen der Trend beim Stromverbrauch des Schienenpersonenverkehrs weniger eindeutig ist. Dies liegt u. a. an der prognostizierten sinkenden Bevölkerung und Veränderungen im Mobilitätsverhalten. In Anbetracht des absolut gesehen eher geringen Anteils des Stromverbrauchs des Schienenverkehrs (um die 16 TWh in den Jahren 2030/2035<sup>56</sup> sowie 16-17 TWh im Jahr 2050) am erwarteten Gesamtstromverbrauch im Verkehrssektor (19 bis 40 TWh bzw. – bei starker Elektrifizierung des Straßenverkehrs – bis knapp 90 TWh im Jahr 2030 und 80 bis 110 TWh in 2050), ist der Schienenverkehr allerdings ein untergeordneter Treiber für die Entwicklung des Stromverbrauchs des Verkehrssektors.

Insgesamt ist festzustellen, dass sämtliche Szenarien/Studien einen zumindest langfristig stark ansteigenden Stromverbrauch des Verkehrssektors prognostizieren, der insbesondere aus der Elektrifizierung des Straßenverkehrs resultiert. Im Jahr 2050 wird ein Niveau der Stromnachfrage erreicht, das sich mit 80 und 110 TWh deutschlandweit dem Niveau des Haushalts- und GHD-Sektors annähert. Dies gilt auch – allerdings mit etwas größerer Unsicherheit – für Baden-Württemberg, wo die Bandbreite der prognostizierten Werte für das Jahr 2050 stärker gestreut ist.

<sup>53</sup> 30 bzw. 38 Mio. Fahrzeuge – Dena (2018), 30 Mio. Fahrzeuge – BMWi (2017), 26 bzw. 33 Mio. Fahrzeuge – BCG/Prognos (2018).

<sup>54</sup> Vgl. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (2020).

<sup>55</sup> Vgl. z. B. BMWi (2017), Dena (2018), BCG/Prognos für den BDI (2018) und Szenariorahmen NEP 2035.

<sup>56</sup> Vgl. BMWi (2017) und Szenariorahmen NEP 2035.

## 3 ENTWICKLUNG DES INDUSTRIELLEN STROMVERBRAUCHS IN BADEN- WÜRTTEMBERG

In diesem Kapitel beschreiben wir, welche Trends sich bezüglich des industriellen Stromverbrauchs in Baden-Württemberg abzeichnen oder – z. B. bei einer Änderung der regulatorischen Rahmenbedingungen – zukünftig abzeichnen könnten. Hierfür

- beschreiben wir zunächst den heutigen (bzw. historischen) industriellen Energie- und Stromverbrauch in Baden-Württemberg (Abschnitt 3.1);
- erläutern wir, welche branchenübergreifenden Erkenntnisse in Bezug auf den industriellen Stromverbrauch aus der Befragung der Industrieverbände und -unternehmen in Baden-Württemberg gezogen werden können (Abschnitt 3.2); und
- skizzieren wir, welche branchenspezifischen Trends sich in den für den zukünftigen industriellen Stromverbrauch besonders bedeutsamen Industrie-Branchen in Baden-Württemberg abzeichnen (Abschnitt 3.3).

### 3.1 Heutiger industrieller Energie- und Stromverbrauch in Baden-Württemberg

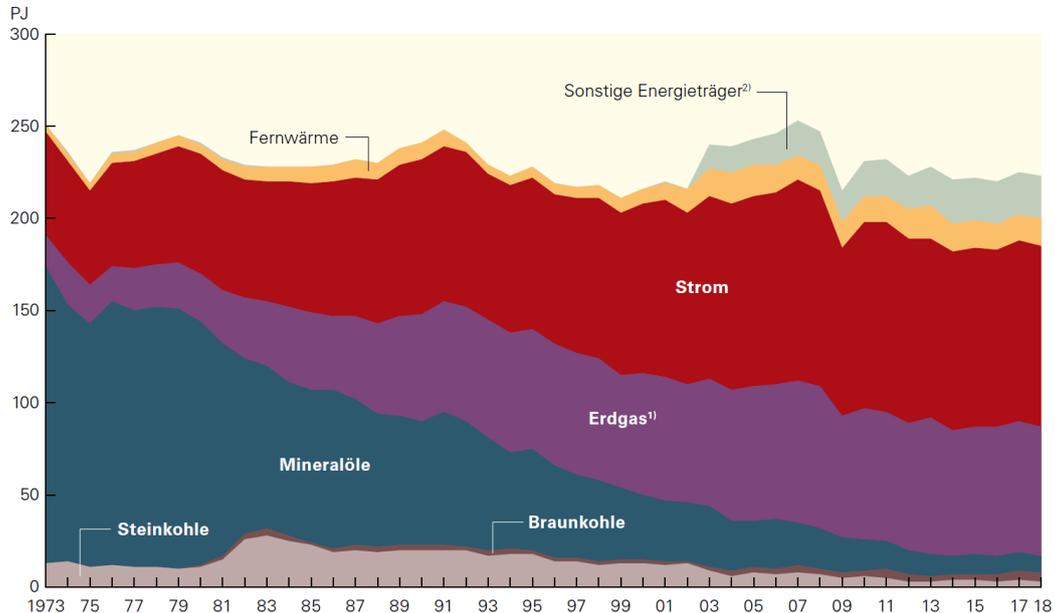
Fast die Hälfte des industriellen Endenergieverbrauchs decken derzeit fossile Energieträger, die bis zur Mitte des Jahrhunderts durch grünen Strom oder andere erneuerbaren Energiequellen ersetzt werden müssen. Der Energiebedarf und der Anteil fossiler Energieträger verteilen sich dabei sehr ungleich über die verschiedenen Branchen: Tatsächlich sind einige wenige Schlüsselindustrien für den Großteil des Energieverbrauchs verantwortlich. Diesen kommt für eine Prognose des zukünftigen Strombedarfs daher eine entscheidende Rolle zu.

#### Entwicklung des Endenergieverbrauchs der Industrie in Baden-Württemberg

Insgesamt lag der Endenergieverbrauch der Industrie in Baden-Württemberg 2018 bei etwa 223 PJ (62 TWh) pro Jahr (Abbildung 12). Damit ist der Stromverbrauch über die letzten fünfzig Jahre trotz der wirtschaftlichen Entwicklungen weitgehend konstant geblieben. Deutlich verändert hat sich allerdings der Energieträgermix, mit dem der Endenergiebedarf gedeckt wird: Der Stromanteil ist bis zur Jahrtausendwende deutlich gestiegen, stagniert aber seither bei knapp über 40 % des Endenergiebedarfs bzw. etwa 98 PJ (27 TWh). Eine ähnliche Entwicklung ist bei Erdgas, dem bedeutendsten fossilen Energieträger mit einem Anteil von konstant knapp über 30 %, zu beobachten. Der Anteil von Mineralölen und Kohle am industriellen Energieverbrauch geht dagegen kontinuierlich zurück. Dafür

kommen seit Anfang der 2000er vermehrt alternative Energieträger wie Biomasse, Solarthermie oder Deponiegas zum Einsatz.<sup>57</sup>

**Abbildung 12 Entwicklung des Energieträgermix‘ in der baden-württembergischen Industrie von 1973 bis heute**



Quelle: Statistisches Landesamt BW (2020): Energiebericht (2020), S. 53

Hinweis: Sonstige Energieträger umfassen Klärgas, Deponiegas, Solarthermie, Biomasse, Wärmepumpen und Andere.

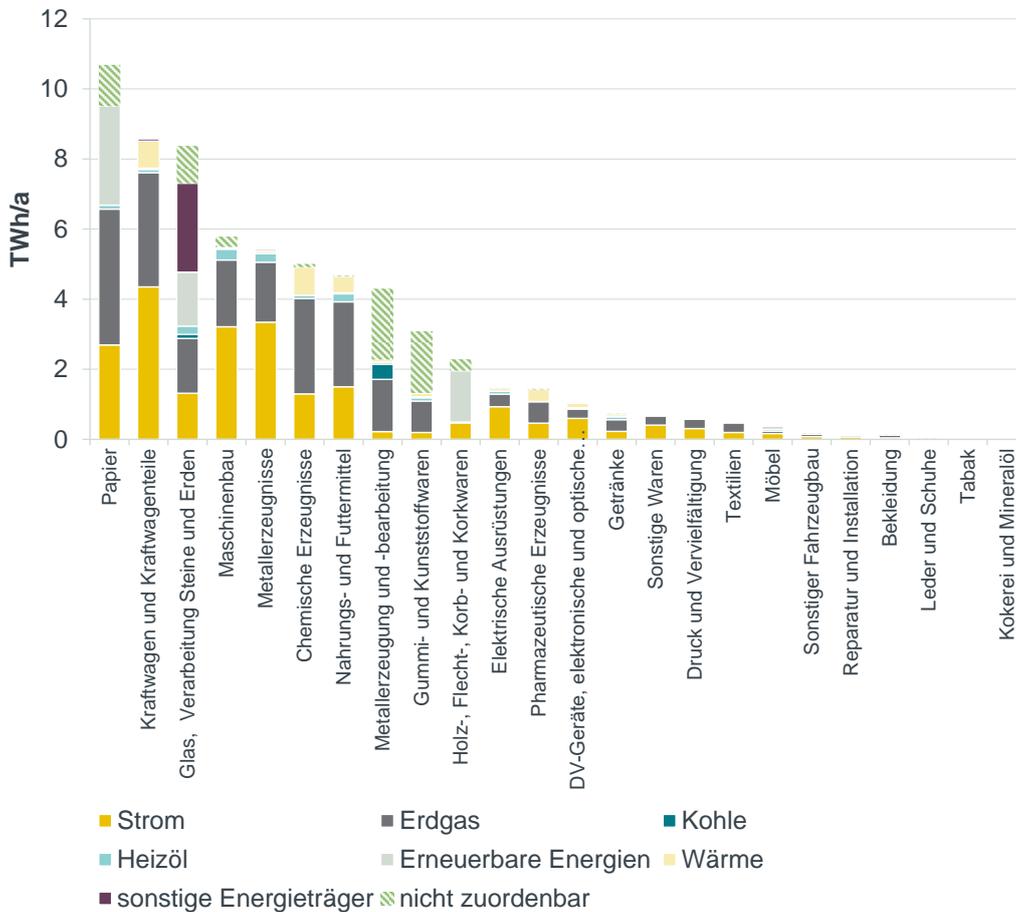
### Zusammensetzung des industriellen Endenergieverbrauchs je Wirtschaftszweig

Knapp drei Viertel des industriellen Endenergieverbrauchs in Baden-Württemberg gehen auf sieben Wirtschaftszweige zurück (**Abbildung 13**): Papier und Pappe, Fahrzeugbau, Verarbeitung von Steinen und Erden, Maschinenbau, Herstellung von Metallerzeugnissen, Chemie und Nahrungsmittel. Diese Branchen werden voraussichtlich auch in Bezug auf die Entwicklung des zukünftigen industriellen Strombedarfs in Baden-Württemberg eine zentrale Rolle spielen.

Der bisherige Elektrifizierungsgrad der Wirtschaftszweige mit besonders hohem Energieverbrauch unterscheidet sich deutlich. Fahrzeug- und Maschinenbau sowie die Herstellung von Metallerzeugnissen haben derzeit bereits einen Stromanteil von mehr als 50 % bezogen auf den Endenergieverbrauch. In den anderen Branchen dominieren weiterhin fossile Energieträger, allen voran Erdgas. Da diese fossilen Energieträger mittel- bis langfristig nahezu vollständig durch alternative, grüne Energieträger ersetzt werden müssen (vgl. Abschnitt 2.2), besteht in allen energieintensiven Branchen ein deutliches Steigerungspotential für den Strombedarf.

<sup>57</sup> Statistisches Landesamt BW (2020): Energiebericht 2020, S. 53

Abbildung 13 Industrieller Endenergieverbrauch in Baden-Württemberg nach Wirtschaftszweigen im Jahr 2019



Quelle: Frontier Economics/FICHTNER basierend auf Statistisches Landesamt BW (2021).

Hinweis: Einschließlich nichtenergetischem Verbrauch, ausgenommen Strom und Fernwärme. Soweit Energieträger als Brennstoffe zur Stromerzeugung in eigenen Anlagen eingesetzt werden, enthält der Gesamtenergieverbrauch sowohl den Energiegehalt der eingesetzten Brennstoffe als auch den des erzeugten Stroms.

Bei einigen Branchen ist der in der Statistik ausgewiesene Gesamt-Endenergieverbrauch höher als die Summe der einzelnen Energieträger. In diesen Fällen entspricht der als „nicht zuordenbar“ bezeichnete Wert der Differenz des Gesamtwertes und der Summe der einzelnen Energieträger.

## Energieverbrauch in Baden-Württemberg im Vergleich zum bundesweiten Energieverbrauch

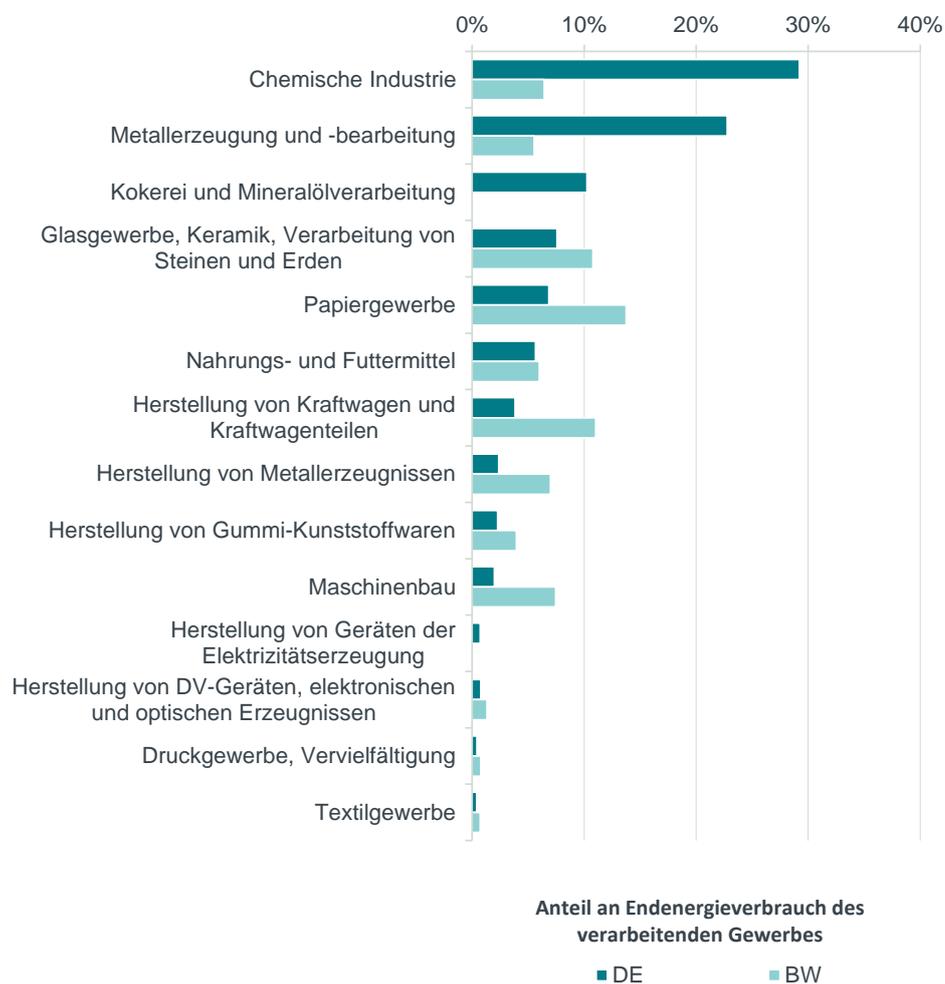
Die Struktur des industriellen Energieverbrauchs in Baden-Württemberg unterscheidet sich deutlich vom bundesweiten Durchschnitt. Viele der energie- und CO<sub>2</sub>-intensiven Großindustrien sind im Rest der Bundesrepublik stärker vertreten als in Baden-Württemberg. Baden-Württemberg hat dadurch eine im Schnitt weniger energieintensive Industrie<sup>58</sup>, in der zudem der Stromanteil am Endenergieverbrauch wesentlich höher ist als in Gesamtdeutschland.

Vergleicht man den Anteil des Energieverbrauchs einzelner Branchen am gesamten industriellen Energieverbrauch auf gesamtdeutscher Ebene bzw. auf

<sup>58</sup> Bundesweit waren 2017 für jeden Euro, der in Gesamtdeutschland erwirtschaftet wurde, 883 MWh nötig; in Baden-Württemberg waren es nur 650 MWh (vgl. Föderal Erneuerbar (2021): Landesinfo Baden-Württemberg).

Ebene von Baden-Württemberg, ist erkennbar, dass die Industriestruktur Baden-Württembergs deutlich vom bundesdeutschen Durchschnitt abweicht (**Abbildung 14**). So macht der Energieverbrauch in der Chemie- und Metallindustrie zusammen mehr als die Hälfte des industriellen Endenergieverbrauchs in Deutschland aus. In Baden-Württemberg beläuft sich der Energieverbrauch der beiden Branchen in Summe dagegen nur auf etwa 15 % des industriellen Energieverbrauchs. Der Anteil des Energieverbrauchs der Branchen Papier und Pappe, sowie Fahrzeug- und Maschinenbau am gesamten industriellen Endenergieverbrauch ist in Baden-Württemberg dafür mehr als doppelt so hoch wie auf Bundesebene.

**Abbildung 14 Vergleich der Anteile verschiedener Wirtschaftszweige am industriellen Endenergieverbrauch, DE vs. BW (2019)**



Quelle: Frontier Economics/FICHTNER auf Basis von Destatis (2021): Energieverbrauch der Betriebe im Verarb. Gewerbe und Statistisches Landesamt BW (2021): Erzeugung und Verwendung

## 3.2 Branchenübergreifende Stromverbrauchstrends der Industrie in BW

Im Folgenden fassen wir branchenübergreifende Stromverbrauchstrends der Industrie in Baden-Württemberg zusammen, die sich aus den Gesprächen mit den

Industrieverbänden und Industrieunternehmen sowie aus der durchgeführten Online-Umfrage ableiten lassen.

Wie in Abschnitt 1.2 erläutert, wurden die Interviews sowie die Online-Umfrage vor Veröffentlichung des Entwurfs zum KSG 2021 durchgeführt. In Folge des KSG 2021 ist damit zu rechnen, dass sich auch der regulatorische Rahmen für den Industriesektor so entwickeln wird, dass die Unternehmen schon früher als bisher geplant, weitere Maßnahmen zur Dekarbonisierung ergreifen werden. Hierbei könnte – insbesondere im Süden Deutschlands – der Elektrifizierung eine bedeutende Rolle zukommen, da Elektrifizierungsmaßnahmen i. d. R. kurzfristiger umsetzbar sind als der Einsatz von grünem Wasserstoff (siehe unten).

### In einigen Bereichen werden Elektrifizierungsmaßnahmen bereits durchgeführt bzw. konkret geplant

Derzeit finden Elektrifizierungsmaßnahmen, bzw. diesbezügliche konkrete Planungen, vor allem im Bereich der Gebäudeenergie (Einsatz von Wärmepumpen), beim Ersatz fossil befeuerter Öfen durch Elektroöfen in der Metallindustrie und im Bereich des Fuhrparks von Unternehmen statt.

Hierbei werden die Elektrifizierungsmaßnahmen i. d. R. zeitlich gekoppelt an Investitionszyklen bzw. Sanierungszeitpunkte von Gebäuden durchgeführt. So haben beispielsweise einige Unternehmen erläutert, dass sie sukzessive im Rahmen von Gebäudesanierungen oder Gebäude-Neubauten in Wärmepumpen investieren.

### Eine weitergehende, umfangreiche Elektrifizierung hängt wesentlich vom regulatorischen Rahmen ab

Eine weitergehende Elektrifizierung ist in vielen Bereichen aus technischer Sicht möglich (so z. B. die elektrische Dampferzeugung), aber derzeit angesichts des heutigen Energiepreisgefüges und der erforderlichen Umbaukosten für die Unternehmen (noch) nicht rentabel.

Da die für die Unternehmen relevanten End-Energiepreise (inklusive aller für die jeweiligen Unternehmen relevanten Preiskomponenten wie Steuern, Abgaben und Umlagen) maßgeblich durch den regulatorischen Rahmen beeinflusst werden und die Entwicklung dieses Rahmens von den Unternehmen schwer abgeschätzt werden kann, ist zudem die zukünftige Rentabilität von verschiedenen Dekarbonisierungsmaßnahmen aus Sicht der Unternehmen höchst unsicher. So wird die längerfristige Abwägung zwischen Elektrifizierungsmaßnahmen und dem Einsatz von grünem Wasserstoff aus Sicht vieler Unternehmen maßgeblich vom Verhältnis des Strompreises zum Wasserstoffpreis (und den entsprechenden Umbaukosten) abhängen.

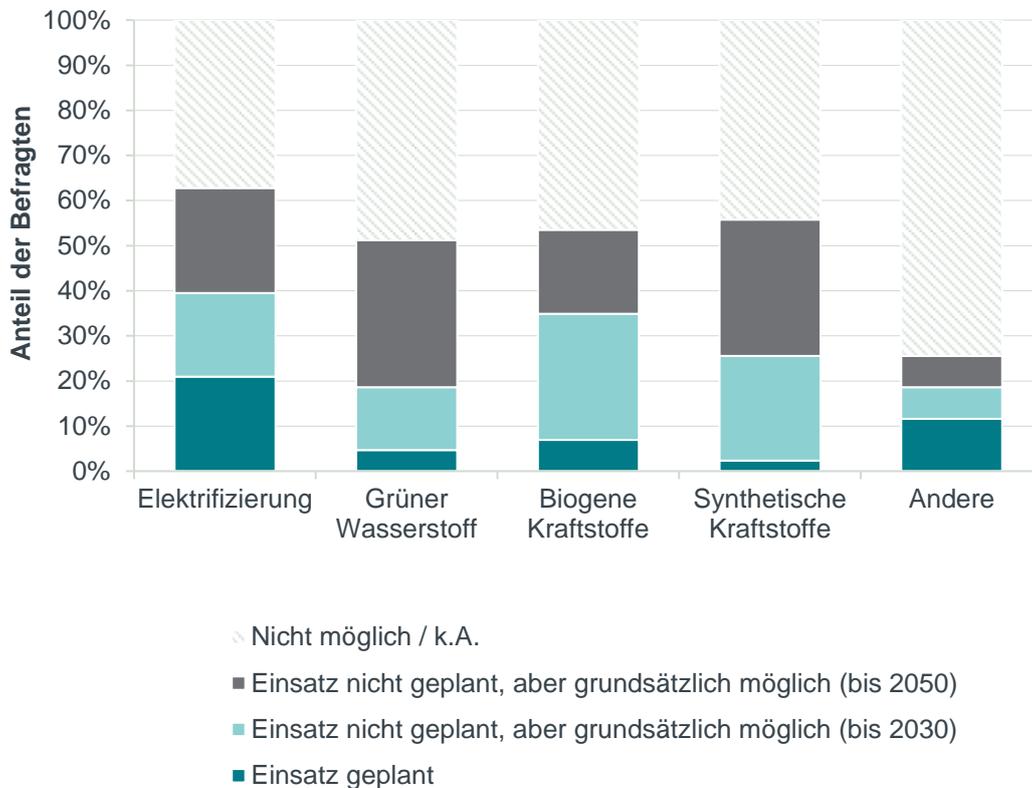
In einzelnen Fällen können Elektrifizierungsmaßnahmen derzeit auch dadurch unrentabel sein, dass hohe Netzanschlusskapazitäten für die Bereitstellung des Spitzenbedarfs benötigt werden (der nur sehr selten benötigt wird) und daher hohe Leistungspreise für den Netzanschluss anfallen können. Ebenso wurde in einzelnen Fällen von Unternehmen darauf hingewiesen, dass die erforderliche Strom-Netzanschlusskapazität für eine umfassende Elektrifizierung derzeit nicht verfügbar sei.

### Elektrifizierungsmaßnahmen werden i. d. R. als kurzfristiger umsetzbar angesehen, als der Einsatz von grünem Wasserstoff

Vor allem aufgrund der noch fehlenden Wasserstoff-Infrastruktur, wird der Einsatz von grünem Wasserstoff von den meisten Unternehmen als Dekarbonisierungsoption betrachtet, die eher in der langen Frist zur Anwendung kommen könnte. Neben der fehlenden Infrastruktur wurde auch darauf hingewiesen, dass es bei ausgewählten prozesstechnischen Anwendungen, bei denen zurzeit Erdgas zum Einsatz kommt, bislang noch keine adäquaten, marktreifen Produkte für den Einsatz von Wasserstoff gebe. Im Rahmen von Investitionen in neue Brenner wird dagegen teilweise bereits darauf geachtet, dass diese „H<sub>2</sub>-ready“ sind, also zu einem späteren Zeitpunkt auf den Wasserstoffbetrieb umgestellt werden können.

Diese in den Unternehmensinterviews geäußerte Einschätzung zum Einsatz von grünem Wasserstoff, deckt sich auch mit den Antworten von Unternehmen im Rahmen der Online-Befragung zur Frage, welche Dekarbonisierungsoptionen sie in ihren Betriebsstätten in Baden-Württemberg geplant oder grundsätzlich für denkbar halten (Abbildung 15). So gaben ca. 40 % der Umfrageteilnehmer an, Elektrifizierungsmaßnahmen entweder bereits konkret geplant zu haben, oder in den nächsten Jahren (bis 2030) grundsätzlich als denkbar zu erachten. Den Einsatz von grünem Wasserstoff sehen dagegen nur 20 % der Umfrageteilnehmer als eine Lösung im Zeitraum bis 2030 an.

**Abbildung 15** Einschätzungen zur grundsätzlichen Umsetzbarkeit von Elektrifizierungsmaßnahmen und weiteren Dekarbonisierungsoptionen



Quelle: Frontier Economics/FICHTNER. Ergebnis der Online-Umfrage. Antworten auf Frage 7: „Welche Dekarbonisierungsmaßnahmen halten Sie an Ihren Betriebsstätten in Baden-Württemberg für denkbar?“

### In einigen Bereichen gibt es einen Trend zur Erhöhung des Fremdstrombezugs – auch dies ist aus Sicht der Netzplanung zu berücksichtigen

Zusätzlich zu der Entwicklung des Stromverbrauchs der Unternehmen wurden in den Unternehmensgesprächen auch Überlegungen zur Eigen-Stromerzeugung bzw. der Fremdstrombeschaffung geäußert, die für die zukünftige Netzplanung ebenfalls relevant sind.

So gibt es im Kontext der Dekarbonisierung des Industriesektors seitens der Unternehmen einerseits Trends, verstärkt Strom selbst zu erzeugen und andererseits Trends, verstärkt Eigenerzeugung durch Fremdstrombezug zu ersetzen:

- **Trend zur Eigenstromerzeugung** – Einige Unternehmen, z. B. im Maschinen- und Fahrzeugbau-Sektor, setzen zukünftig verstärkt auf Stromeigenerzeugung mit erneuerbaren Energien (insbesondere PV-Anlagen und Biomasse). Von anderen Unternehmen wurde z. T. explizit darauf hingewiesen, dass der Einsatz von PV-Anlagen, mindestens in größeren Dimensionen, nicht möglich sei, da Dachflächen für Lüftungssysteme und ähnliches genutzt wurden.

- **Trend zum erhöhten Fremdstrombezug** – Einige Unternehmen, die derzeit Strom auf Basis von KWK-Anlagen selbst erzeugen, haben erläutert, dass sie aufgrund der (durch die geänderten regulatorischen Rahmenbedingungen für die KWK-Erzeugung) zunehmenden Unwirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen zukünftig vermehrt auf Fremdstrombezug setzen wollen. Für wiederum andere Unternehmen ist der Ersatz von Eigenstromerzeugung auf Basis von fossilen Energieträgern durch den Fremdbezug von Grünstrom (Bezug von Strom aus dem Stromnetz und Erwerb von Herkunftsnachweisen für die Grünstromeigenschaft) Teil der Dekarbonisierungsstrategie.

Ob Strom von den Unternehmen selbst erzeugt oder über das Netz bezogen wird, hat auf den Strombedarf der Industrie zwar keinen Einfluss, wohl aber auf den Netzausbaubedarf. So steigt tendenziell der Netzausbaubedarf, wenn fossile Eigenstromerzeugung durch einen erhöhten Fremdstrombezug ersetzt wird. Andersherum ist von einem Anstieg der Eigenerzeugung auf Basis von erneuerbaren Energien nicht zwangsläufig auf eine Verringerung des Netzbedarfs zu schließen. Sofern die Unternehmen auf das Stromnetz zurückgreifen, um ihren Strombedarf in Zeiten niedriger Stromerzeugung auf Basis von erneuerbaren Energien (wie beispielsweise PV-Anlagen) zu decken, muss das Netz weiterhin entsprechend ausgelegt sein.

### 3.3 Branchenspezifische Stromverbrauchstrends der Industrie in BW

In diesem Abschnitt beschreiben wir die Trends des zukünftigen Stromverbrauchs in

- der Papier- und Pappe-Industrie (Abschnitt 3.3.1);
- der Chemie-Industrie (Abschnitt 3.3.2);
- der Metall-Industrie (Abschnitt 3.3.3);
- den Branchen Maschinen- und Fahrzeugbau (Abschnitt 3.3.4);
- der Zement-Industrie (Abschnitt 3.3.5);
- der Kalk-Industrie (Abschnitt 3.3.6) und
- weisen auf mögliche neue große Stromverbraucher in Baden-Württemberg hin (Abschnitt 3.3.7).

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Stromverbrauchstreiber der in Abschnitten 3.3.1 bis 3.3.6 behandelten Branchen.

**Tabelle 1 Zusammenfassung der branchenspezifischen Stromverbrauchstreiber**

Industrie-Zweig	Elektrifizierungsoptionen und -pläne	Weitere Stromverbrauchstreiber
Papier und Pappe	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Optionen:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>□ Dampferzeugung mit Strom</li> <li>□ Einsatz elektrisch beheizter Walzen</li> </ul> </li> <li>■ Bislang noch keine konkreten Pläne für Elektrifizierungsmaßnahmen bei befragten Unternehmen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ höheres Strom-Wärme-Verhältnis bei neuen Papiermaschinen</li> <li>■ Trend zum Ersatz von KWK-basierter Strom-Eigenerzeugung zum Fremdstrombezug</li> </ul>
Chemie	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Optionen:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>□ Dampferzeugung mit Strom</li> <li>□ Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse (statt Dampfreformierung von Methan)</li> <li>□ Substitution von Dampf als Wärmelieferant durch Strom</li> </ul> </li> <li>■ Pläne existierten für die Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse; mittel bis langfristig wird die strombasierte Wärmeerzeugung erwogen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Produktionswachstum</li> </ul>
Metall	<p>Wesentliche Option: Einsatz von elektrischen Öfen anstelle erdgasbefeuerter Öfen; Hierzu gibt es seitens einiger Unternehmen bereits konkrete Pläne bzw. Überlegungen</p>	
Maschinen- und Fahrzeugbau	<p>Gebäudeenergie macht hohen Anteil des Energiebedarfs im Maschinen- und Fahrzeugbau aus; in diesem Bereich gibt es konkrete Pläne zum Einsatz von Wärmepumpen</p>	

Industrie-Zweig	Elektrifizierungsoptionen und -pläne	Weitere Stromverbrauchstreiber
Zement	Umstellung der Klinkerproduktion auf strombasierten Prozess (hier besteht noch Forschungsbedarf) Elektrifizierung im Bereich Fahrzeuge und Baumaschinen (hierzu bestehen konkrete Überlegungen).	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Höherer Mahlbedarf durch geänderte Produkthanforderungen</li> <li>■ Umweltschutzanforderungen</li> <li>■ CCUS-Maßnahmen zur Reduktion von prozessbedingten Emissionen</li> </ul>
Kalk	Elektrifizierung im Bereich Fahrzeuge und Baumaschinen (hierzu bestehen konkrete Überlegungen).	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ prozesstechnische Optimierungen</li> <li>■ Umweltschutzanforderungen</li> <li>■ CCUS-Maßnahmen zur Reduktion von prozessbedingten Emissionen</li> </ul>

Quelle: Frontier Economics/FICHTNER auf Basis der Unternehmensinterviews.

### 3.3.1 Papier- Industrie

Die Papierindustrie (WZ 17) gehört zu den energieintensiven Branchen - sowohl auf Bundesebene, als auch auf Ebene Baden-Württembergs. Der Endenergieverbrauch dieses Wirtschaftszweiges in Baden-Württemberg belief sich im Jahr 2019 auf 11 TWh.<sup>59</sup> Der Stromeinsatz lag bei etwa einem Drittel des Endenergieverbrauchs, und die fossilen Energieträger machten etwa ein weiteres Drittel des Endenergieverbrauchs aus.<sup>60</sup>

In Deutschland gehören ca. 200 Anlagen zur Papier- und Zellstoffbranche, sechs davon sind Zellstoffwerke.<sup>61</sup> Die Papierindustrie beinhaltet die Herstellung und Verarbeitung von Zellstoff, Holzstoff, Papier, Karton und Pappe.

Die Endprodukte lassen sich folgendermaßen aufteilen:

**Tabelle 2 Produkte der Papierindustrie**

Papierart	Beispiele	Marktanteil 2020
1 Grafische Papiere	Zeitungsdruck, Magazine, Kataloge, Schreibpapiere	28,2 %
2 Verpackungen	Maschinenkarton, Pack- & Wellpappenpapiere	58,2 %
3 Hygienepapiere	Küchenrollen, Toilettenpapier, Taschentücher	7,2 %
4 Spezialpapiere	Dekorpapier, Tapetenpapier, Filterpapier	6,4 %

Quelle: Frontier Economics/FICHTNER auf Basis von Verband Deutscher Papierfabriken (2020a): *Papierkompass* und Verband Deutscher Papierfabriken (2020b): *Pressezahlen 2020*.

<sup>59</sup> Statistisches Landesamt BW (2021): Erzeugung und Verwendung

<sup>60</sup> Statistisches Landesamt BW (2021) und Länderarbeitskreis Energiebilanzen, Energiebilanz Baden-Württemberg für 2018

<sup>61</sup> Umweltbundesamt (2020c): Zellstoff- und Papierindustrie

Im Folgenden beschreiben wir

- welche wesentlichen Schritte mit der Papierherstellung verbunden sind;
- den Energiebedarf der Papierindustrie, die derzeit zur Deckung des Energiebedarfs eingesetzten Energieträger und die bei der Papier-Produktion anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen;
- welche Optionen zur Dekarbonisierung im Bereich der Papierindustrie existieren;
- welche – neben der Dekarbonisierung – weiteren Stromverbrauchstreiber in der Papierindustrie relevant sind; und
- wie wir die Entwicklung des Stromverbrauchs in der Papier-Industrie in Baden-Württemberg insgesamt einschätzen.

### Herstellung von Papier

Papier besteht im Wesentlichen aus Fasern und Hilfsstoffen, mit denen die Eigenschaften und Qualitäten der Produkte eingestellt werden. Die Herstellung erfolgt typischerweise in zwei aufeinander folgenden Wertschöpfungsstufen (WS):

- **WS 1: Gewinnung von Fasern („Stoffherstellung“).** Hierfür kommen drei verschiedene Verfahren zum Einsatz:<sup>62</sup>
  - Altpapier-Recycling: Benötigte Faserstoffe werden aus Altpapier hergestellt (Anteil ca. 75 %).<sup>63</sup>
  - Chemisches Verfahren: Hackschnitzel werden chemisch (meistens mit dem sog. Sulfatverfahren (in Baden-Württemberg zwei Anlagen und nur im Sulphitverfahren) zu Zellstoff aufgeschlossen.
  - Mechanisches Verfahren: Holz wird zu Holzstoff zerfasert.
- **WS 2: Herstellung von Papier einschließlich Veredelung.** Die eigentliche Papierherstellung ist ein weitgehend einheitlicher Prozess. Allerdings werden sehr unterschiedliche Zuschlagsstoffe zur Papierveredelung verwendet, sodass einzelne Papierstraßen i. d. R. nur für ein Produkt verwendet werden.<sup>64</sup>

Ein Produktionsstandort kann unterschiedliche Wertschöpfungsstufen beinhalten:

- Nichtintegriertes Zellstoffwerk (nur WS 1);
- Nichtintegrierte Papierfabrik (nur WS 2); oder
- Integriertes Zellstoff- & Papierwerk (WS 1 & 2).

Bei Standorten, die Altpapier verarbeiten, ist im Werk üblicherweise eine Altpapieraufbereitung integriert.

In folgender Textbox werden die einzelnen Produktionsschritte bei der Papier-Herstellung im Detail erläutert.

---

<sup>62</sup> Verband Deutscher Papierfabriken (2015): Papier machen.

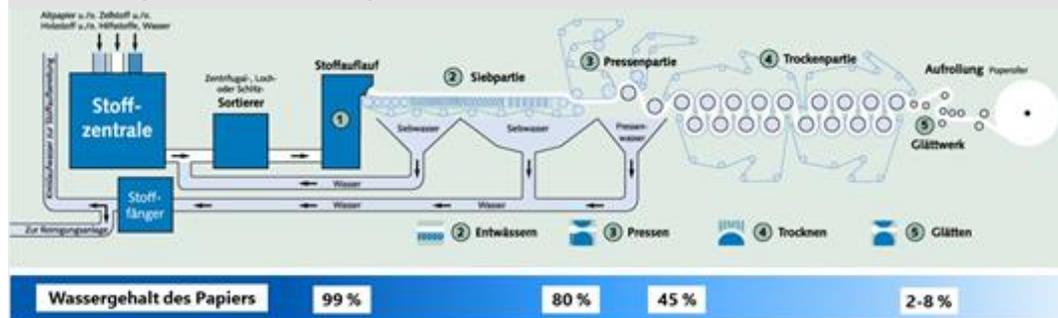
<sup>63</sup> Navigant et al. (2020d): Branchensteckbrief der Papierindustrie

<sup>64</sup> Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (2018): CO<sub>2</sub>-Vermeidung im Papiergewerbe, S. 2.

## SCHRITTE DER PAPIER-HERSTELLUNG

In der nachstehenden Abbildung sind die einzelnen Schritte zur Herstellung von Papier veranschaulicht:

Abbildung 16 Herstellung von Papier



Quelle: VDP und eigene Darstellung.

In der **Stoffzentrale** werden je nach gewünschter Papiersorte die verschiedenen Roh- und Hilfsstoffe, miteinander gemischt. Füll- und Hilfsstoffe dienen zur Verbesserung der Papierqualität und zur Erhöhung der Produktivität. Als Ergebnis liegt eine Fasersuspension mit einem Wassergehalt von 99 % vor.

Die Produktionsschritte 1-5 werden nachfolgend beschrieben.<sup>65 66 67</sup>

1. Der **Stoffauflauf** ist der eigentliche Start der Papierproduktion. Hierbei erfolgt eine gleichmäßige Verteilung der Faserstoff-Wasser-Suspension auf der gesamten Siebbreite.
2. Auf der **Siebpartie** lagern sich die Fasern neben- und aufeinander ab, und es erfolgt die Blattbildung. Gleichzeitig zählt die Entwässerung des Faservlies zu den Hauptaufgaben des Siebs.
3. In der **Pressenpartie** wird der Entwässerungsprozess über mechanischen Druck fortgeführt. Die Papierbahn wird dafür zwischen zwei mit saugfähigem Filz versehenen Walzen geführt und gepresst. Häufig gibt es noch eine Presse ohne Filz. Das Papiergefüge wird verdichtet, die Oberflächengüte wird entscheidend beeinflusst, und die Festigkeit wird erhöht. Jedes %, das in diesem Schritt an Trockengehalt gesteigert werden kann, bedeutet eine Ersparnis von 5-10 % an Heizenergie in der anschließenden Trockenpartie.
4. In der **Trockenpartie** wird das noch enthaltene Wasser der Papierbahn bis zum gewünschten Trockengehalt verdampft. Die Papierbahn durchläuft dabei „slalomartig“ mehrere dampfgeheizte Trockenzylinder. Die Wärmeenergie wird durch direkten Kontakt von den Außenwänden der Zylinder auf die Papieroberfläche übertragen.

<sup>65</sup> Verband Deutscher Papierfabriken (2015): Papier machen.

<sup>66</sup> Papier + Technik (2021): Die Leimpresse...

<sup>67</sup> sappi (2012): Papiermaschine

Die **Leimpresse** ist eine von mehreren Techniken des Streichens und befindet sich innerhalb der Trockenpartie. Sie dient als Zusatzeinrichtung für die Verbesserung der Oberflächenqualität, vor allem für die Bedruckbarkeit und Festigkeit. Zur Unterstützung der Trockenzyylinder werden in der zweiten Trockenpartie teilweise eine Infrarot-Trocknung oder Heißlufttrocknung eingesetzt. Alternativ zur integrierten Leimpresse/Streichmaschine gibt es auch separate Anlagen (off-line), welche getrennt von der Papiermaschine betrieben werden.

5. Im **Glättwerk** erfolgt eine Veredelung der Oberfläche der Papierbahn durch Satinieren (Glätte- und Glanzsteigerung) mittels Kalanders (Rollen). Mehrere übereinander angeordnete beheizte Walzen geben der Papierbahn eine glatte Oberfläche und gleichmäßige Blattdicke. Dadurch wird das Papier noch besser bedruckbar. Die fertige Papierbahn wird auf einem Stahlkern (Tambour) aufgewickelt.

### Energiebedarf, Energieversorgung, CO<sub>2</sub>-Emissionen

Die Herstellung von Papier (aus bereits hergestellten Faserstoffen) ist mit einem spezifischen Strombedarf von 530 kWh/t und einem Brennstoffbedarf von 1.528 kWh/t verbunden.<sup>68</sup> 90-100 % der verwendeten Brennstoffe werden zur Erzeugung von Strom und Wärme (Dampf, Warmwasser) und 0-10 % in Direktfeuerungen, z. B. zur Trocknung der Papierbahn genutzt. Von der bereitgestellten Wärme entfallen etwa 80 % auf Dampf (150°C - 250°C), der insbesondere in der Trockenpartie zur Erhitzung der Trockenzyylinder benötigt wird und ca. 20 % auf Komfortwärme (<100°C).<sup>69</sup>

Bei der Energieversorgung können drei Varianten unterschieden werden:

1. Bezug von Strom und Wärme;
2. Bezug von Strom, Betrieb von Kesseln zur Eigenversorgung mit Wärme;
3. Betrieb von KWK-Anlagen und Kesseln zur Eigenversorgung mit Strom und Wärme.

Im Rahmen der geführten Interviews wurden die Versorgungsoptionen 2 und 3 festgestellt. Durch die Unternehmen werden folgende Brennstoffe genutzt: Erdgas, Biomasse, Kohle, biomassebasierte Nebenprodukte aus der Zellstoffproduktion wie Ablagen, Rinden, Sägespäne sowie in geringem Umfang Öl zur Besicherung.

Die bei der Papierherstellung entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen resultieren aus dem Einsatz fossiler Energieträger zur Erzeugung von Strom und Dampf sowie für den Betrieb der Haubenheizungen.

Nachfolgend werden die Aussagen der Interviewpartner zusammengefasst:

<sup>68</sup> Navigant et al. (2020d): Branchensteckbrief der Papierindustrie, S. 13

<sup>69</sup> Vgl. Fraunhofer et al. (2014) : Potenzial- und Kosten-Nutzen-Analyse zu den Einsatzmöglichkeiten von Kraft-Wärme-Kopplung.

## Optionen zur Dekarbonisierung

Im Rahmen der Interviews wurden folgende Optionen zur Dekarbonisierung genannt:

### ■ Elektrifizierung

- Variante 1: Dampferzeugung mit Strom. Die Technologien sind verfügbar und der Ansatz wird als technisch machbar erachtet. Umbauarbeiten würden insbesondere den Netzanschluss und die Energiezentrale betreffen. Dampf wird weiterhin genutzt, und an den entsprechenden Produktionsstufen erfolgen keine Veränderungen. Allerdings ist die Haubenheizung danach immer noch auf einen sauberen, gasförmigen Brennstoff angewiesen.
- Variante 2: Einsatz elektrisch beheizter Walzen zur Trocknung der Papierbahnen. Die Technik wird zwar vereinzelt in Schweden eingesetzt, der Einsatz in Deutschland ist aber nicht vorstellbar. Diese Maßnahme würde umfassende Umbauarbeiten an den Papiermaschinen und den Lüftungssystemen umfassen, die mit einem Neubau vergleichbar wären. Die bisherige Dampfversorgung würde entfallen.

Voraussetzung für beide Varianten ist die Verfügbarkeit einer adäquaten elektrischen Infrastruktur (Stromnetze, Netzanschluss).

Eine Elektrifizierung ist aus heutiger Sicht kaum vorstellbar und wird als Maßnahme für den langfristigen Zeithorizont gesehen. Neben der fehlenden Infrastruktur und den erforderlichen Umbauarbeiten wird der Anstieg der Energiekosten aufgeführt. Dabei wurden die gegenwärtigen Strompreise den gegenwärtigen Brennstoffkosten gegenübergestellt.

Eine Stromversorgung durch PV wird aus mehreren Gründen als ungeeignet erachtet: mangelnde Verfügbarkeit von Flächen, benötigte Energiemengen nicht bereitstellbar, keine Versorgungssicherheit.

### ■ Einsatz von Wasserstoff

- Diese Maßnahme würde einen **Brennstoffwechsel** beinhalten. Mitunter ist es vorstellbar, die Wärmebereitstellung auf Wasserstoff umzustellen. Im Zuge der Umstellung wird jedoch ein hoher Umbauaufwand, insbesondere in den Bereichen Netzanschluss, Gasverteilung, Luft/Wärmeverteilung und Brenner, gesehen.
- Eine zukünftige Nutzung von Wasserstoff wird mitunter bei den gegenwärtigen Planungen berücksichtigt. Hierzu gehört die Auswahl von Brennern oder Gasturbinen, in denen Wasserstoff eingesetzt werden kann. Bei einigen Gesprächspartnern gibt es zum Thema Wasserstoff noch keine Überlegungen, und das Thema wird als noch nicht greifbar eingestuft. Grundsätzlich wird Wasserstoff als eine Maßnahme für den mittel- bis langfristigen Zeithorizont gesehen.
- Voraussetzung für den Einsatz wäre die Marktreife und die Verfügbarkeit der Technologien zur Wasserstoffversorgung, das Vorhandensein der Infrastruktur zur Lieferung von Wasserstoff an den Standorten sowie die Lieferbarkeit von Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Preisen.

■ **Einsatz von Biomasse**

- Biomasse als Brennstoff wird aktuell mitunter als Antwort auf das Thema Dekarbonisierung gesehen. So wurden bereits Anlagen auf Biomasse umgestellt, oder es werden neue mit Biomasse betriebene Anlagen errichtet. Treiber hierfür sind die Kosten für CO<sub>2</sub> sowie Kunden, die eine Senkung des CO<sub>2</sub>-Footprint fordern. In beiden Fällen wurden „schnelle“ Lösungen benötigt, die mit der Biomasse als Brennstoff realisiert werden konnten. Eine flächendeckende Umstellung auf Biomasse ist jedoch aufgrund mangelnder Verfügbarkeiten nicht möglich.

■ **Erhöhung Energieeffizienz**

- Derzeit kommen bei Umbauten / Neubauten konventionelle Technologien (z. B. Gasturbinen) zum Einsatz, die heute marktreif und verfügbar sind und wirtschaftlich betrieben werden können. Hierbei wird auf hochmoderne Anlagen mit einer hohen Effizienzklasse Wert gelegt.
- Aufgrund des hohen Energiekostenanteils an der Bruttowertschöpfung wurden Energieeinsparpotentiale bereits größtenteils ausgeschöpft. Eine weitere Effizienzsteigerung wird im Bereich von 0,5 bis 1 % p. a. gesehen.

### Weitere Einflüsse auf den Stromverbrauch

Neben den Entwicklungen im Bereich Dekarbonisierung wird der Stromverbrauch bzw. der Strombezug in der Papier-Industrie vor allem von den folgenden zwei Entwicklungen getrieben:

- Neue Papiermaschinen haben ein Strom-Wärme-Verhältnis von 1:2. Bei älteren Anlagen liegt dieses bei etwa 1:4 oder 1:5. Hintergrund für die Verbesserung sind wirkungsvollere Presspartien (Produktionsschritt 3), die aus der Papierbahn eine größere Wassermenge herauspressen. Dadurch muss in Produktionsschritt 4 weniger Wasser verdampft werden.
- Aufgrund geänderter Förderbedingungen ergeben sich für Unternehmen keine wirtschaftlichen Vorteile mehr, KWK-Anlagen am Standort zu betreiben. Vor diesem Hintergrund wurde bereits eine neue Anlage als reine Wärmeerzeugungsanlage ausgeführt. Von mehreren Gesprächspartnern wird als Trend gesehen, dass am Standort nur noch Dampfkessel betrieben werden und der Strom aus dem Netz bezogen wird. **Sollte sich diese Entwicklung manifestieren, hätte dies einen Anstieg des Strombezugs aus dem Netz zur Folge.**

### Zusammenfassende Betrachtung

Eine Wärmeversorgung auf Basis von Strom oder Wasserstoff wird als technisch möglich erachtet, aber als Thema für den mittel- bis langfristigen Zeithorizont mit bisher unüberwindbaren Kostenhürden gesehen. Bei Investitionen wird „H<sub>2</sub>-ready“ mitunter als zusätzliche Randbedingung mitberücksichtigt. Anforderungen zur Dekarbonisierung werden aktuell durch den Einsatz von Biomasse und hocheffizienter, aber konventioneller Technik gelöst, weil diese verfügbar und wirtschaftlich sind.

Eine schleichende Entwicklung könnte der Wegfall der Stromerzeugung an den Produktionsstandorten sein. Hintergrund hierfür sind geänderte Förderbedingungen für KWK-Anlagen. Dies hätte einen Anstieg des Strombezugs aus dem Netz zur Folge.

### 3.3.2 Chemische Industrie

Die chemische Industrie (WZ 20) ist eine energieintensive Branche. Der Endenergieverbrauch dieses Wirtschaftszweiges in Baden-Württemberg belief sich im Jahr 2019 auf 5 TWh.<sup>70</sup> Der Stromeinsatz lag bei etwa 30 % des Endenergieverbrauchs, und die fossilen Energieträger machten ungefähr die Hälfte des Endenergieverbrauchs aus.<sup>71</sup>

Die chemische Industrie kann in die Basis- oder Grundstoffchemie und die Spezialchemie gegliedert werden, wobei der Übergang fließend ist. Die Basischemie beinhaltet die Massenproduktion chemischer Grundstoffe, die seit Jahrzehnten weitgehend unverändert sind.<sup>72</sup> Hierzu gehören z. B.: Ammoniak, Harnstoff, Chlor, Methanol, Ethen, Propen, Benzol, etc. Die Grundstoffe werden durch Spezialchemie-Unternehmen weiterverarbeitet. Dabei bilden „wenige“ Basisprodukte die Grundlage für ein breites Portfolio, das mehr als 30.000 Produkte umfasst.<sup>73</sup> Hierzu gehören u. a.: Lebensmittelzusatzstoffe, Lichtschutzmittel, Flammenschutzmittel, Chemiefasern, Kunststoffe, Farbmittel, Lösemittel, etc. Die große Produktpalette und Spezialisierung führen zu einer hohen Vielfalt an Produktionsverfahren, wobei einzelne Produkte mitunter nur in geringen Mengen hergestellt werden.

Die chemische Industrie in Deutschland zeichnet sich durch eine heterogene Branchenstruktur aus und umfasst etwa 2.000 Unternehmen. Über 90 % davon sind Kleinere und Mittlere Unternehmen (KMU). Etwa 70 % der hergestellten Produkte werden innerhalb der Industrie weiterverarbeitet.<sup>74</sup> Typischerweise erzeugen große Chemieunternehmen Basisprodukte, die durch die Mittelständler „veredelt“ werden. Deutschland gehört zu den wenigen Ländern, die sowohl eine starke Basischemie als auch eine große Spezialchemie haben.<sup>75</sup>

Die Chemiebranche in Baden-Württemberg ist von mittelständischen Unternehmen geprägt.<sup>76</sup> Im Landesverband der chemischen Industrie in Baden-Württemberg sind 313 Unternehmen mit 77.000 Beschäftigten vertreten.<sup>77</sup> Die Herstellung von Grundchemikalien macht in Baden-Württemberg etwa 10 % des Umsatzes der Chemieindustrie aus. Damit liegt der Schwerpunkt der chemischen Industrie in Baden-Württemberg im Bereich der Spezialchemie.

---

<sup>70</sup> Statistisches Landesamt BW (2021): Erzeugung und Verwendung.

<sup>71</sup> Statistisches Landesamt BW (2021) und Länderarbeitskreis Energiebilanzen, Energiebilanz Baden-Württemberg für 2018.

<sup>72</sup> Verband der Chemischen Industrie (2012a): Basischemie 2030.

<sup>73</sup> Verband der Chemischen Industrie (2012b): VCI-Analyse zur Basischemie 2030.

<sup>74</sup> Verband der Chemischen Industrie (2020): Auf einen Blick – Chemische Industrie 2020.

<sup>75</sup> Verband der Chemischen Industrie (2012b): VCI-Analyse zur Basischemie 2030.

<sup>76</sup> Chemie.BW (2021a): Konjunktur chemische und pharmazeutische Industrie in Baden-Württemberg.

<sup>77</sup> Chemie.BW (2021b): Verband der Chemischen Industrie e.V. Landesverband Baden-Württemberg.

Grundsätzlich ist zu bemerken, dass die Basischemie wesentlich energieintensiver einzustufen ist als die Spezialchemie (**Tabelle 3**).<sup>78</sup>

**Tabelle 3 Energieintensität der chemischen Industrie (2009)**

Branche	Bruttoproduktionswert (Mrd. € /a)	Brennstoffe (inkl. Fernwärme) (PJ/a)	Strom (PJ/a)	Gesamte Endenergie in (PJ/a)
Basischemie	83,26	298,01	162,10	460,10
Sonstige Chemie	92,84	64,34	26,80	91,14

Quelle: Frontier Economics/FICHTNER auf Basis von Fraunhofer ISI (2013): *Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Prozesse*, S. 118

Entsprechend liegt der Energiekostenanteil der Basischemie typischerweise zwischen 10 und 30 %, während der der Spezialchemie eher zwischen 2 und 6 % liegt. Im Folgenden fassen wir die Aussagen der befragten Unternehmen zu folgenden Aspekten zusammen:

- Energiebedarf, derzeitige Energieversorgung und CO<sub>2</sub>-Emissionen in der chemischen Industrie in Baden-Württemberg;
- Optionen zur Dekarbonisierung;
- Weitere – nicht mit der Dekarbonisierung verbundene – Treiber des zukünftigen Stromverbrauchs.

### Energiebedarf, Energieversorgung, CO<sub>2</sub>-Emissionen

Der Energiebedarf der Unternehmen kann wie folgt gegliedert werden:

- Strom
- Wärme
  - Dampf für Produktionsprozesse
  - Heißluft für Trocknungsprozesse
  - Komfortwärme zur Beheizung der Gebäude
- Erdgas, als Rohstoff für die Herstellung von Wasserstoff

Bei den Gesprächspartnern wurden folgende Varianten zur Energieversorgung festgestellt:

1. Bezug Strom und Wärme
2. Bezug Strom und Wärme, Eigenversorgung mit Wärme
3. Bezug Strom, Eigenversorgung mit Wärme
4. Bezug Wärme, Eigenversorgung mit Strom und Wärme
5. Eigenversorgung mit Strom und Wärme

Die oben dargestellten Varianten zur Energieversorgung beinhalten die IST-Situation bei den Unternehmen sowie neue Konstellationen, wie Sie für die nahe Zukunft vorgesehen sind. Ein Unternehmen plant auf vollständigen Energiebezug (Strom und Wärme) umzusteigen. Dadurch könnte die Versorgung optimiert und

<sup>78</sup> Die Zahlen in der Tabelle stammen zwar aus dem Jahr 2009, die Industriestruktur hat sich seitdem allerdings nicht grundsätzlich geändert.

die CO<sub>2</sub>-Emissionen am Standort vermieden werden. Ein anderes Unternehmen beabsichtigt ein biomassegefeuertes Heizwerk zu errichten. Treiber hierfür sind erhöhte Kosten für CO<sub>2</sub> im Zuge der Einführung des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG).

Die an den Standorten entstehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen resultieren aus dem Einsatz fossiler Energieträger zur Erzeugung von Strom und Wärme.

### Optionen zur Dekarbonisierung

Folgende Optionen zur Dekarbonisierung wurden von den Interview-Partnern genannt:

#### ■ Elektrifizierung

- **Dampferzeugung mit Strom.** Die Technologien sind verfügbar, und der Ansatz wird als technisch machbar erachtet.
- Substitution der **Direktverbrennung von Erdgas zur Erzeugung von Heißluft.** Geeignete Technologien hierfür sind nicht vorhanden, und der Ansatz wird als kaum umsetzbar gesehen.
- **Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse** zur Substitution der Dampfreformierung von Methan. Die Technologien sind verfügbar, und die Maßnahme ist in der Vorplanung. Im Fall eines Unternehmens kann der hierfür benötigte Strom durch ein nahegelegenes Wasserkraftwerk bereitgestellt werden.
- Substitution von **Dampf als Wärmelieferant** durch Strom. Eine zukünftige Beheizung von Behältern und Reaktoren mit Strom wird erwogen. Bezogen auf den heutigen Einsatz von Dampf wird ein Elektrifizierungsgrad von 10 % als möglich erachtet.

#### ■ Einsatz von Wasserstoff

- Diese Maßnahme würde einen **Brennstoffwechsel** beinhalten. Mitunter ist es vorstellbar, die Wärmebereitstellung auf Wasserstoff umzustellen. Dies wird allerdings als eine Maßnahme für den langfristigen Zeithorizont gesehen.

#### ■ Einsatz von Biomasse

- Als aktuelle Maßnahme zur Dekarbonisierung beabsichtigt ein Unternehmen in naher Zukunft ein Heizwerk mit **Biomasse** als Brennstoff zu errichten. Aufgrund des Eigenstromverbrauchs dieser Anlage sowie der Stilllegung der gegenwärtig mit Erdgas betriebenen KWK-Anlage wird der Strombezug des Unternehmens steigen.

#### ■ Änderung Produktionsverfahren

- Aufgrund einer **Verfahrensänderung** wird bei einem Unternehmen für Trocknungsprozesse Heißluft nicht mehr benötigt. Damit kann die Erzeugung von Heißluft durch Verbrennung von Erdgas entfallen. Da zuvor schon Strom und Wärme extern bezogen wurden, kann zukünftig der gesamte Energiebedarf durch externen Bezug gedeckt werden. Mit dieser Maßnahme würden am Standort keine CO<sub>2</sub>-Emissionen mehr anfallen.

### ■ Erhöhung Energieeffizienz

- Energieeinsparpotentiale wurden bereits größtenteils ausgeschöpft. Eine weitere Effizienzsteigerung wird im Bereich von 0,5 % p. a. gesehen.
- Effiziente Technologien kommen bei Neuinvestitionen zum Einsatz.
- Bei einem Standort wurden, aufgrund anstehender Restrukturierungen, Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz von 3 % p. a. gesehen.

### Weitere Einflüsse auf den Stromverbrauch

Ein weiterer Treiber des Stromverbrauchs in der chemischen Industrie ist das Produktionswachstum in der Branche. Die befragten Unternehmen erwarten für die Zukunft teils gleichbleibende, teils steigende Produktionsvolumina (bis zu + 5 % p. a.) im kurz- bis mittelfristigen Zeitraum.

### Zusammenfassende Betrachtung

Zur Dekarbonisierung der Standorte werden mittel- bis langfristig mehrere Ansätze als möglich erachtet, wie z. B.: Elektrifizierung der Wärmeversorgung, Substitution fossiler Energieträger durch Wasserstoff und Umstieg auf externen Energiebezug. Eine aktuell umsetzbare Maßnahme ist der Brennstoffwechsel auf Biomasse.

Für die Zukunft wird ein Anstieg des Stromverbrauchs erwartet. Wesentliche Gründe hierfür sind die steigenden Produktionsvolumina, mittel- bis langfristig eine Elektrifizierung der Wärmebereitstellung und die Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse.

## 3.3.3 Metallerzeugung und -verarbeitung

Der Endenergieverbrauch für die Wirtschaftszweige Metallerzeugung und -bearbeitung (WZ 24)<sup>79</sup> sowie Herstellung von Metallerzeugnissen (WZ 25)<sup>80</sup> in Baden-Württemberg belief sich im Jahr 2019 auf 4,3 TWh bzw. 5,4 TWh<sup>81</sup>. Im Bereich Metallerzeugung und -bearbeitung entfällt davon etwas mehr als die Hälfte auf den Stromeinsatz, Erdgas liegt etwa bei einem Drittel des Endenergieverbrauchs.<sup>82</sup> Bei der Herstellung von Metallerzeugnissen liegt der Anteil des Stromverbrauchs am Endenergieverbrauch bei über 60 % und der Anteil des Erdgases bei über 30 %.<sup>83</sup>

---

<sup>79</sup> In den WZ 24 fallen das Schmelzen und Legieren von Metallen, die Herstellung von Metalllegierungen und die Weiterverarbeitung durch Walz-, Zieh- und Extrusionsverfahren sowie durch Gießen der Metalle (siehe Statistisches Bundesamt (2008)).

<sup>80</sup> Im WZ 25 wird die Herstellung von Metallerzeugnissen, wie Bauelemente, Behälter und Konstruktion, erfasst (siehe Statistisches Bundesamt (2008)).

<sup>81</sup> Statistisches Landesamt BW (2021).

<sup>82</sup> Statistisches Landesamt BW (2021) und Länderarbeitskreis Energiebilanzen, Energiebilanz Baden-Württemberg für 2018 (vorläufige Zahlen). In der Statistik zum Endenergieverbrauch (Statistisches Landesamt BW (2021)) ist ein großer Teil des Gesamt-Endenergieverbrauchs des WZ 24 nicht auf die Energieträger aufgeteilt („nicht zuordenbar“ – vergleiche Hinweis zu Abbildung 13). Ein Abgleich mit den Zahlen der Energiebilanz lässt darauf schließen, dass der „nicht zuordenbare“ Anteil des Energieverbrauchs in WZ 24 im Wesentlichen dem Stromverbrauch zuzuordnen ist.

<sup>83</sup> Statistisches Landesamt BW (2021).

Die in Bezug auf den Energieverbrauch bedeutsamsten Metall-Branchen sind Stahl, Aluminium und Kupfer.<sup>84</sup> Abbildung 17 skizziert die wesentlichen Prozesse bei der Erzeugung und Bearbeitung dieser Metalle:

- Bei der Metallerzeugung ist zwischen der Primär- und der Sekundärerzeugung (Recycling) zu unterscheiden. **In Baden-Württemberg wird Stahl, Aluminium und Kupfer ausschließlich auf Basis von Schrott (d. h. im Sekundärerzeugungsverfahren) hergestellt.** Somit findet keine Primärerzeugung dieser Metalle in Baden-Württemberg statt.
- Im Bereich Stahl produziert Baden-Württembergs einziges Stahlwerk, die Badischen Stahlwerke Kehl, ausschließlich Sekundärstahl im Elektrolichtbogen-Verfahren.<sup>85</sup> Das Werk in Kehl ist das größte Elektrostahlwerk Deutschlands und produziert etwa 2 Mio. Tonnen pro Jahr bzw. etwa 6 % der deutschen Stahlproduktion.<sup>86</sup> Im Elektrolichtbogen-Ofen wird Stahlschrott mit elektrisch generierter Prozesswärme geschmolzen und zunächst als sogenannte „Knüppel“ (längliche Halbzeuge) im Strangguss-Verfahren gegossen.<sup>87</sup> Die Knüppel werden anschließend im Walzwerk weiterverarbeitet, im Fall der Badischen Stahlwerke zu Betonstahl und Walzdraht.<sup>88</sup> Je heißer der Knüppel das Walzwerk erreicht, desto geringer ist die benötigte Energie zur Erwärmung des Knüppels vor der Weiterverarbeitung. Der Gesamtstrombedarf der Badischen Stahlwerke liegt bei etwa 1,2 TWh p. a.<sup>89</sup> Der höchste Energieverbrauch im Elektrostahlwerk geht vom Lichtbogenofen aus; dieser benötigt etwa 300 bis 500 kWh Strom und ca. 50 kWh Erdgas je Tonne Rohstahl.<sup>90</sup>
- Zudem ist Baden-Württemberg ein wichtiger Standort für die Sekundärproduktion von Aluminium.<sup>91</sup> Die Art der eingesetzten Öfen hängt dabei wesentlich vom Verunreinigungsgrad des Alt-Metalls ab. Bei leichter Verunreinigung werden Induktionsöfen eingesetzt, bei starker Verunreinigung erdgasbefeuerte Öfen.<sup>92</sup> Da letztere den Großteil der Produktion ausmachen, ist Erdgas der Hauptenergieträger.<sup>93</sup>
- Ebenso wird in Baden-Württemberg Alt-Kupfer recycelt. Auch hierbei hängt die Art der eingesetzten Öfen und Energieträger vom Reinheitsgrad der Recycling-Materialien ab.

---

<sup>84</sup> Vgl. Navigant et al. (2020b) in Bezug auf die Relevanz der Aluminium- und Kupfer-Industrie innerhalb der NE-Metall-Industrie.

<sup>85</sup> Vgl. Statista (2021): Größte Stahlproduzenten in Deutschland nach Produktionsmenge im Jahr 2016 verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/153022/umfrage/die-groessten-stahlproduzenten-nach-produktionsmenge-in-deutschland/>, zuletzt abgerufen am 12. März 2021

<sup>86</sup> Vgl. Navigant (2020b).

<sup>87</sup> Für mehr Informationen zur Weiterverarbeitung des geschmolzenen Stahls in Stahlwerken siehe auch Navigant (2020b).

<sup>88</sup> Vgl. <https://www.bsw-kehl.de/>

<sup>89</sup> Vgl. <https://www.badische-zeitung.de/4500-haushalte-sollen-kuenftig-mit-abwaerme-der-badischen-stahlwerke-geheizt-werden--173116550.html>

<sup>90</sup> Vgl. Navigant et al (2020a), S.9.

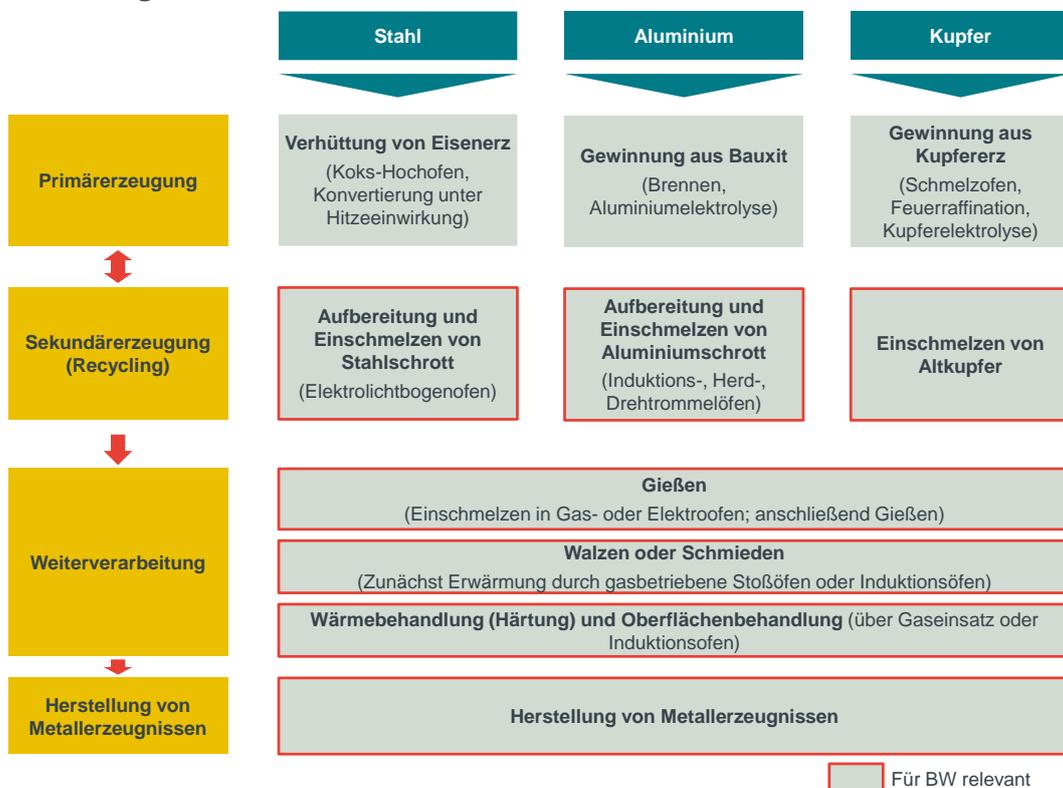
<sup>91</sup> Vgl. Navigant et al. (2020a). Von den vier deutschen Primär-Aluminiumhüttenwerken befindet sich dagegen keines in Baden-Württemberg.

<sup>92</sup> Vgl. ebenda.

<sup>93</sup> Vgl. ebenda.

- Im Bereich der (ersten) Weiterverarbeitung von Metallen sind vor allem die Prozesse Gießen, Walzen, Schmieden, Wärmebehandlung und Oberflächenbehandlung relevant. Durch diese Prozesse entstehen in der Regel Metall-Halbzeuge (Halbfabrikate), wie Bleche, Stangen oder Drähte, die anschließend entweder weiterverarbeitet werden oder auch direkt zum Einsatz kommen (z. B. in der Schwerindustrie oder dem Schiffsbau).<sup>94</sup> Die für die Bearbeitung der Metalle notwendige Erwärmung der Metalle findet derzeit vor allem in gasbefeuerten Öfen statt. Elektrische Alternativen (Induktionsöfen) existieren jedoch und können bereits heute alternativ eingesetzt werden (siehe unten).
- Aus den metallischen Halbzeugen werden schließlich durch verschiedene Prozesse Metallerzeugnisse, wie z. B. Autokarosserien, Werkzeuge oder Behälter, hergestellt.

Abbildung 17 Zentrale Prozesse in der Metallindustrie



Quelle: Frontier Economics/FICHTNER auf Basis von Navigant (2020a), Navigant (2020b) und Aussagen in den Unternehmens-Interviews.

## Dekarbonisierungsoptionen und -trends in der Metallindustrie in Baden-Württemberg

Eine Möglichkeit des Ersatzes von fossilen Energieträgern in der Metallindustrie ist der Einsatz von elektrischen Öfen anstelle der erdgasbefeuerten Öfen, die heute maßgeblich im Bereich der Weiterverarbeitung von Metall zum Einsatz kommen.<sup>95</sup> Wesentliche Vorteile sind die Einsatzmöglichkeit von grünem Strom

<sup>94</sup> Vgl. Navigant (2020b).

<sup>95</sup> Siehe hierzu auch Navigant et al. (2019), Folie 9.

und die „punktgenaue“ Erwärmung und damit die erhebliche Reduzierung von Abwärmeverlusten.

Gespräche mit der Metallindustrie in Baden-Württemberg haben gezeigt, dass es seitens einiger Unternehmen in Baden-Württemberg bereits sehr konkrete Überlegungen zum Einsatz von Elektroöfen gibt und diese hierzu z. T. bereits Machbarkeitsstudien und Kalkulationen durchführen. Beispielsweise haben zwei baden-württembergische Härtereien angekündigt, ihren Erdgasbedarf bis 2040 zu 90 % zu elektrifizieren.<sup>96</sup> Ebenso gibt es in anderen Weiterverarbeitungsbereichen, wie z. B. im Bereich von Gießereien, Überlegungen zum Einsatz von Elektroöfen.

Nach Einschätzung der Unternehmen wäre es grundsätzlich auch möglich, den Einsatz von fossilen Energieträgern in Öfen durch den Einsatz von (grünem) Wasserstoff zu ersetzen. Allerdings seien zum derzeitigen Zeitpunkt noch keine adäquaten, marktreifen Produkte für den Einsatz von Wasserstoff verfügbar. Zudem ist eine Voraussetzung dafür, dass die entsprechende Infrastruktur verfügbar und grüner Wasserstoff zu einem vertretbaren Preis erhältlich ist. Nach derzeitiger Einschätzung der Unternehmen wird der Ersatz von fossilen Energieträgern durch grünen Wasserstoff als „deutlich weiter weg“ eingestuft, als der Einsatz von elektrischen Öfen.

Im Bereich Sekundärherstellung von Aluminium und Kupfer ist bei hohen Verunreinigungsgraden der Recyclingmaterialien der Einsatz von gasbeheizten Öfen aufgrund von Verschlackungsprozessen notwendig. Bei Stand der heutigen Verfahrenstechnik ist eine reine Nutzung von Elektroöfen in diesem Bereich also nicht möglich, sofern nicht ausschließlich sehr reine Alt-Metalle eingeschmolzen werden. Es wird sogar eine gegenteilige Entwicklung als möglich erachtet, dass bei zunehmender Verwertung von minderwertigem Schrott der Gaseinsatz in diesem Bereich steigt.

Insgesamt ist durch den zu erwartenden Einsatz von elektrischen Öfen in der Metallverarbeitung zukünftig von einem Anstieg des Stromverbrauchs in der Metall-Industrie in Baden-Württemberg auszugehen.

### Weitere Treiber des zukünftigen Stromverbrauchs in der Metallindustrie

Weitere Treiber des zukünftigen Stromverbrauchs in der Metallindustrie in Baden-Württemberg sind vor allem die erwartete wirtschaftliche Entwicklung sowie für die Zukunft erwartete Energieeffizienzsteigerungen.

Die befragten Unternehmen gehen teils von einer etwa gleichbleibenden und teils von einer moderat steigenden wirtschaftlichen Entwicklung an ihren Standorten in Baden-Württemberg aus. Gleichzeitig gehen die Unternehmen teils davon aus, dass noch weitere Energieeffizienzsteigerungen (im Bereich von ca. 0.5 % pro Jahr) erzielt werden können, teils davon, dass es keine weiteren Energieeffizienzsteigerungen (mindestens keine den Stromverbrauch betreffenden) mehr geben wird. In Summe könnten sich der Stromverbrauchsanstieg durch Wirtschaftswachstum und die Stromverbrauchssenkung durch Energieeffizienzsteigerungen in etwa ausgleichen.

---

<sup>96</sup> Vgl. GAV Energie (2020).

### Gesamteinschätzung zum zukünftigen Stromverbrauch in der Metallindustrie in Baden-Württemberg

Insgesamt ist von einem Anstieg des Stromverbrauchs in der Metallindustrie in Baden-Württemberg auszugehen. Haupttreiber hierfür ist die zu erwartende zunehmende Elektrifizierung (insbesondere der zukünftige Einsatz von elektrischen Öfen in der Metallweiterverarbeitung).

#### 3.3.4 Maschinen- und Fahrzeugbau

Der Fahrzeugbau umfasst die meist mittelständisch geprägten Zulieferer von Autoteilen sowie die Fahrzeug- und Motorenhersteller, wie Daimler, Porsche und Audi mit Firmensitz in Baden-Württemberg. Der Maschinenbau ist eine sehr heterogene Branche und umfasst den Bau von Maschinen, die mechanisch oder durch Wärme auf Materialien einwirken oder an Materialien Vorgänge durchführen, sowie deren Bestandteile. Dementsprechend unterschiedlich können auch einzelne Unternehmen, ihr Energiebezug und die Möglichkeiten zur Dekarbonisierung sein.

Sowohl der Maschinen- als auch der Fahrzeugbau weisen eine vergleichsweise geringe Energieintensität auf, d. h. der Energieeinsatz ist im Verhältnis zur Bruttowertschöpfung sehr niedrig.<sup>97</sup> Dementsprechend beträgt der Anteil des Maschinen- bzw. Fahrzeugbaus am Endenergieverbrauch der Industrie in Deutschland auch lediglich 3 bzw. 5 %, <sup>98</sup> obwohl diese bedeutende Branchen in Deutschland darstellen. In Baden-Württemberg liegen diese Anteile hingegen mit 9 bzw. 13 % <sup>99</sup> deutlich höher, was sich durch eine überdurchschnittlich hohe Ansiedelung von Unternehmen dieser Branchen in Baden-Württemberg erklären lässt.

Die hauptsächlich eingesetzten Energieträger der beiden Branchen sind in Baden-Württemberg Strom (knapp 60 %) <sup>100</sup> und Erdgas (knapp 30 %) <sup>101</sup>. Diese werden zu mehr als 50 % zur Erzeugung von Warmwasser, Raumwärme und Prozesswärme unter 100 °C verwendet (vgl. Abbildung 18). Erdgas wird dabei entweder direkt zur Raumwärme- und Warmwassererzeugung eingesetzt oder findet Anwendung in Kraftwärmekopplungsanlagen zur Strom-, Warmwasser-, Dampf- und Wärmeerzeugung. Anhand der Verwendungszwecke lassen sich verschiedene **Optionen zum Ersatz fossiler Energieträger durch erneuerbare Energieträger** ableiten, die auch in verschiedenen Unternehmen bereits (teilweise) umgesetzt wurden bzw. geplant sind:

- **Elektrifizierung durch Wärmepumpen:** Zur Wärmebereitstellung von Gebäuden kann auf elektrische Wärmepumpen zurückgegriffen werden. Diese nehmen unter Aufwendung von elektrischer Arbeit thermische Wärmeenergie aus der Umwelt (Luft, Wasser, Erde) auf und geben diese als Nutzwärme ab. Bei Verwendung von Strom aus EE-Anlagen erfolgt somit eine (nahezu)

<sup>97</sup> Vgl. EWI et al. (2014), S. 100.

<sup>98</sup> Vgl. AG Energiebilanzen (2021).

<sup>99</sup> Vgl. LAK, Energiebilanz Baden-Württemberg 2016, verfügbar unter <https://www.lak-energiebilanzen.de/laenderbilanzen/>.

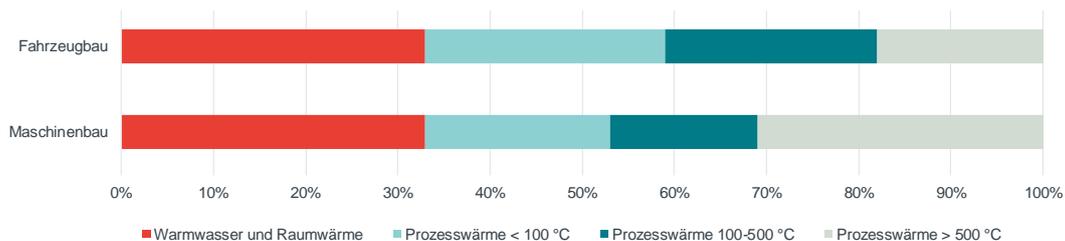
<sup>100</sup> 59 % im Fahrzeugbau und 57 % im Maschinenbau. Vgl. ebenda.

<sup>101</sup> 27 % im Fahrzeugbau und 29 % im Maschinenbau. Vgl. ebenda.

CO<sub>2</sub>-freie Produktion von Wärme. Der Einbau von Wärmepumpen ist bei den interviewten Unternehmen im Fahrzeug- und Maschinenbau bei Neubauten und sukzessive stattfindenden Sanierungen bestehender Gebäuden bereits erfolgt und/oder geplant und eine der am häufigsten genannten Optionen zur Dekarbonisierung. Der für die Wärmepumpen erforderliche Strom kann entweder fremdbezogen werden, oder – wie von einem guten Teil der interviewten Unternehmen geplant – z. B. mittels PV auf Firmengebäuden eigenerzeugt werden. Wärmepumpen können zur Erzeugung von Prozesswärme allerdings nur für geringe bis mittlere Temperaturniveaus (130 – 160 °C, max. 200 °C) eingesetzt werden,<sup>102</sup> weswegen auch weitere Dekarbonisierungsoptionen von den Unternehmen betrachtet werden. Als gegenwärtige Hemmnisse für eine umfassende Elektrifizierung werden allerdings von den interviewten Unternehmen häufiger angeführt, dass die dafür erforderliche Infrastruktur (z. B. Netzanschlusskapazität) geschaffen werden muss, der gegenwärtig hohe Strompreis abschreckend wirkt sowie bestehende Anlagen noch über längere Zeiträume abgeschrieben werden.

- **Einsatz von Biogas in KWK-Anlagen oder BHKW zur Eigenerzeugung von Strom und Wärme:** Von einigen Unternehmen in der Fahrzeugindustrie wird bereits heute Biogas in KWK-Anlagen anstelle von Erdgas eingesetzt.<sup>103</sup> Ebenso ist dies bei einem interviewten Unternehmen des Maschinenbaus in Planung.
- **Verwendung von erneuerbarem Wasserstoff:** Der Einsatz von erneuerbarem Wasserstoff u. a. in KWK-Anlagen wäre zwar eine Option, ist derzeit aber nicht wirtschaftlich und mit großen Unsicherheiten z. B. hinsichtlich der Verfügbarkeit oder den regulatorischen Rahmenbedingungen behaftet. Die Unternehmen im Fahrzeug- und Maschinenbau haben diese Option somit zwar im Blick, konkrete Projekte sind aber i. d. R. nicht geplant.

**Abbildung 18 Mehr als 50 % des Wärmebedarfs im Fahrzeug- und Maschinenbau entfallen auf Wärme < 100°C**



Quelle: Frontier Economics/FICHTNER basierend auf Fraunhofer et al. (2014).

Bevor die zuvor aufgeführten Dekarbonisierungsmaßnahmen zum Einsatz kommen, wird von den Unternehmen dieser Branchen jedoch oftmals versucht, Potentiale zur **Reduktion des Energieverbrauchs** zu heben.<sup>104</sup> Beim

<sup>102</sup> Vgl. Wolf (2017) und Seitz (2017).

<sup>103</sup> Vgl. z. B. die Pressemitteilungen von Audi und Daimler; <https://www.audi-mediacyber.com/de/pressemitteilungen/audi-e-tron-gt-geht-in-serieco2-neutrale-produktion-in-den-boellinger-hoefen-startet-13473>; <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Europaeische-Daimler-Werke-werden-ab-2022-CO2-neutral-produzieren-Produktion.xhtml?oid=44955326>.

<sup>104</sup> Vgl. für den Fahrzeugbau z. B. Umweltdialog (2020): CO<sub>2</sub>-neutrale Autoproduktion: Wie geht das?, verfügbar unter <https://www.umweltdialog.de/de/management/CSR-Strategie/2020/CO2-neutrale-Autoproduktion-Wie-geht-das.php> und Produktion (2019): Das unternimmt die Autoindustrie gegen den

Stromverbrauch gaben die interviewten Unternehmen eine Senkung von 0,5 % pro Jahr, z. T. sogar mehr als 1 % pro Jahr als realisierbar an, d. h. es scheinen bei diesen Branchen weiterhin Energieeffizienzpotentiale vorhanden zu sein. Dabei können verschiedene Querschnittstechnologien zum Einsatz kommen. Hierzu zählen u. a.<sup>105</sup>

- der Einsatz von LED bei der Beleuchtung,
- die automatische Steuerung, Überwachung und Optimierung von Beleuchtung oder Heizungen,
- moderne Filtrationslösungen bei Lüftungsanlagen;
- die Optimierung und regelmäßige Überprüfung von Druckluftsystemen;
- drehzahlvariable Pumpenantriebe;
- die Nutzung von Abwärme;
- sowie die Umstellung des Fuhrparks auf Elektrofahrzeuge.

Speziell Energieeffizienzsteigerungen mit Bezug zu Gebäuden wurden von den interviewten Unternehmen regelmäßig als bereits umgesetzte oder geplante Dekarbonisierungsoptionen genannt. Diese erfolgen regelmäßig in Kombination mit dem Einbau von elektrischen Wärmepumpen.

Zudem spielt die **Automatisierung und Digitalisierung** beim Fahrzeug- und Maschinenbau eine zentrale Rolle. Es ist allerdings in diesen Sektoren unklar, ob der Effekt des zusätzlichen Stromverbrauchs oder die daraus resultierenden Energieeffizienzpotentiale überwiegen.

Auf die Entwicklung des Stromverbrauchs im Fahrzeug- und Maschinenbau haben schließlich auch die **wirtschaftliche Entwicklung** sowie **strukturelle Umbrüche** in den Branchen einen Einfluss. Hier erwarten EWI et al. (2014) für Deutschland sowie ZSW et al. (2017) für Baden-Württemberg einen überproportional hohen Anstieg der Bruttowertschöpfung, der – zumindest zusammen mit der voraussichtlich erfolgenden Elektrifizierung mittels elektrischer Wärmepumpen – zu einem insgesamt steigenden Stromverbrauch in diesen Branchen führt, also die Energieeffizienzsteigerungen überkompensieren würde.

Die positiven Wachstumsprognosen decken sich weitgehend mit den Aussagen der interviewten Unternehmen der Branche. Dies gilt – trotz des starken Umbruchs von Verbrennungsmotoren zur E-Mobilität – auch für die Automobilindustrie. So werden viele Produkte ebenso bei Elektrofahrzeugen wie bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren benötigt. Teilweise bestehen auch Pläne für Batteriefabriken in Baden-Württemberg (vergleiche Abschnitt 3.3.7), die im Übrigen zu einem Anstieg des Stromverbrauchs führen.

Insgesamt gehen die interviewten Unternehmen der Branche davon aus, dass das wirtschaftliche Wachstum in Kombination mit der voraussichtlich zunehmenden Elektrifizierung die Effizienz einsparungen beim Stromverbrauch ausgleichen, gegebenenfalls (in Abhängigkeit des Umfangs der Elektrifizierung) auch überkompensieren wird. Folglich ist ein **konstanter bis gegebenenfalls steigender Stromverbrauch dieser beiden Branchen** zu erwarten.

---

Klimawandel, verfügbar unter <https://www.produktion.de/technik/das-unternimmt-die-autoindustrie-gegen-den-klimawandel-239.html>.

<sup>105</sup> Vgl. Dena (2013).

### 3.3.5 Zement-Industrie

Die Zementindustrie gehört zum Wirtschaftszweig Steine und Erden (WZ 23). Der Endenergieverbrauch dieses Wirtschaftszweiges in Baden-Württemberg belief sich im Jahr 2019 auf 8 TWh.<sup>106</sup> Der Stromeinsatz lag bei etwa einem Viertel des Endenergieverbrauchs, und die fossilen Energieträger machten die Hälfte des Endenergieverbrauchs aus.<sup>107</sup>

Die Zementindustrie gehört mit einem Anteil der Energiekosten an der Bruttowertschöpfung von über 30 % zu den energieintensiven Branchen.<sup>108</sup> Zementwerke, auch unterschiedlicher Unternehmen, sind in ihren Produktionsabläufen i. d. R. sehr ähnlich. Zementwerke können eine Klinkerproduktion beinhalten oder lediglich ein Mahlwerk betreiben (ohne Klinkerproduktion). In Deutschland gibt es 34 Zementwerke mit und 19 ohne Klinkerproduktion.<sup>109</sup> In Baden-Württemberg sind es 6 Zementwerke mit und 2 ohne Klinkerproduktion.<sup>110</sup> Die Zementindustrie unterscheidet sich von den meisten Industriezweigen darin, dass im Zuge der Produktion auch umfangreiche prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen.

Im Folgenden

- geben wir zunächst einen Überblick über die verschiedenen Zementarten und die Schritte der Zementherstellung;
- beschreiben den Energiebedarf und die derzeitige Energieversorgung in der Zement-Industrie;
- erläutern, welche CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Zement-Herstellung anfallen und wie diese grundsätzlich verringert werden können;
- erläutern, inwieweit Elektrifizierungsmaßnahmen und/oder der Einsatz von grünem Wasserstoff eine Dekarbonisierungsoption in der Zement-Industrie darstellt; und
- stellen dar, welche weiteren Treiber des Stromverbrauchs in der Zement-Industrie relevant sind (Wirtschaftliche Entwicklung, Strukturwandel, Energieeffizienz, zusätzliche Stromanwendungen).

#### Zementarten und Zementherstellung

Zement ist ein Mehrkomponentenprodukt, das sich aus fein gemahlenem Zementklinker und anderen Hauptbestandteilen zusammensetzt. Durch deren Mischungsverhältnisse werden die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Zements bestimmt wie z. B. Erstarrungsverhalten, Festigkeit, Fließverhalten und Porosität.

---

<sup>106</sup> Statistisches Landesamt BW (2021): Erzeugung und Verwendung.

<sup>107</sup> Statistisches Landesamt BW (2021) und Länderarbeitskreis Energiebilanzen, Energiebilanz Baden-Württemberg für 2018.

<sup>108</sup> Verein Deutscher Zementwerke (2021): Energieeffizienz.

<sup>109</sup> Umweltbundesamt (2020d): Dekarbonisierung der Zementindustrie.

<sup>110</sup> Verein Deutscher Zementwerke (2020b): Dekarbonisierung von Zement und Beton, S.9.

Zemente werden in fünf Hauptzementarten unterteilt. Diese sind einschließlich ihrer Zusammensetzung in der folgenden Tabelle dargestellt:

**Tabelle 4**      **Zusammensetzung der fünf Hauptzementarten**

Hauptzementart		Zusammensetzung [Masse- %]	Marktanteil 2019
1	Portlandzement	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 95 -100 % Portlandzementklinker</li> <li>■ max. 5 % mineralische Nebenbestandteile</li> </ul>	27 %
2	Portland-kompositzement	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 94 - 65 % Portlandzementklinker</li> <li>■ 6 - 35 % Hüttensand, Silicatstaub, Puzzolane, Flugasche, gebrannter Schiefer, Kalkstein</li> </ul>	49 %
3	Hochofenzement	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 64 - 5 % Portlandzementklinker</li> <li>■ 36 - 95 % Hüttensand</li> </ul>	23 %
4	Puzzolanzement	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 89 - 45 % Portlandzementklinker</li> <li>■ 11 - 55 % Puzzolane, Silicatstaub, Flugasche</li> </ul>	1 %
5	Kompositzement	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 20 - 64 % Portlandzementklinker</li> <li>■ 18 - 50 % Hüttensand</li> <li>■ 18 - 50 % Puzzolane und Flugasche</li> </ul>	

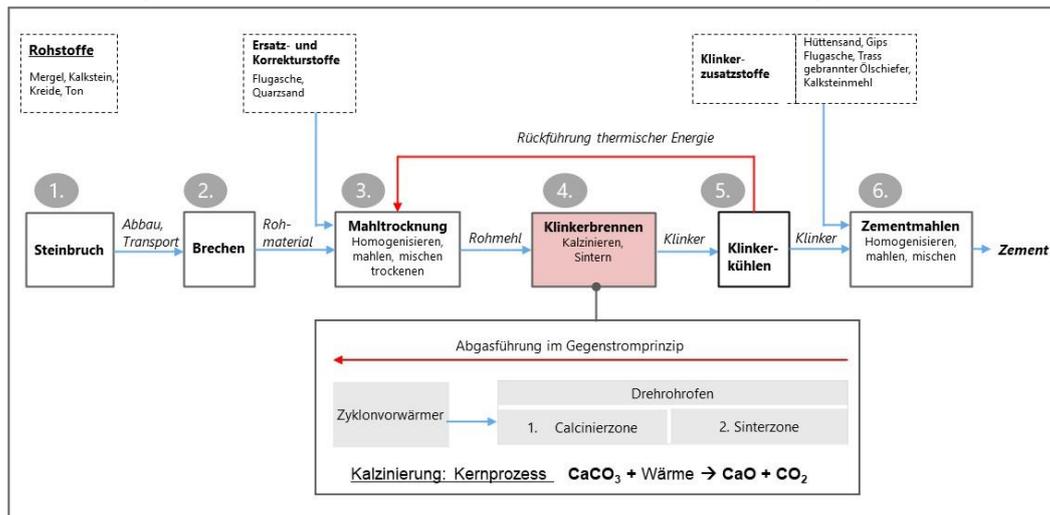
Quelle: Frontier Economics/FICHTNER auf Basis von Heidelberg Cement (2021): *Betontechnische Daten und Verein Deutscher Zementwerke (2020): Zementindustrie im Überblick 2020/21*, S. 24-25.

Die Herstellung von Zement erfolgt typischerweise in den folgenden Schritten:

1. **Gewinnung Rohmaterialien:** Sprengung (z. B. Mergel, Kalkstein, Ton, Kreide) im Steinbruch
2. **Brechen:** Vorzerkleinerung der Rohmaterialien in sogenannten Brechern
3. **Mahlrocknung:** Trocknen, homogenisieren, mahlen und mischen zu Rohmehl
4. **Klinkerbrennen:** Brennen des Rohmehls in Drehrohröfen zu Klinker
5. **Klinkerkühlen:** Kühlung des Klinkers nach dem Brennprozess
6. **Zementmahlen:** Mahlen des Klinkers zu Zement

In der nachstehenden Abbildung 19 ist der Produktionsprozess der Zementherstellung in einem Fließschema dargestellt:

Abbildung 19 Produktionsprozess der Zementherstellung



Quelle: Frontier Economics/FICHTNER

Die Produktionsschritte 1-6 werden nachfolgend beschrieben.

### 1. Gewinnung der Rohmaterialien: Sprengung im Steinbruch

Der Produktionsprozess von Zement beginnt mit der Gewinnung der Rohstoffe für die Klinkerherstellung. Diese werden meist mittels Sprengung aus Steinbrüchen gewonnen. Zu den Rohstoffen gehören: Kalkstein, Kreide und Tone beziehungsweise deren natürliches Gemisch der Kalksteinmergel.

### 2. Brechen: Vorzerkleinerung der Rohmaterialien in sogenannten Brechern, homogenisieren, lagern

Die aus den Sprengvorgängen gewonnenen, sehr groben Materialblöcke, werden in einem Hammerbrecher zu Schotter vorzerkleinert. Anschließend erfolgt eine Homogenisierung des Rohmaterials. Hierbei wird gebrochenes Rohmaterial mit Rohmaterial einer vorherigen Sprengung vermischt, um eventuelle Schwankungen in der Zusammensetzung des Rohstoffes auszugleichen. Das homogenisierte Material wird auf der Rohmaterialhalde zwischengelagert.

### 3. Mahltrocknung: Trocknen, homogenisieren, mahlen und mischen zu Rohmehl

Nach der Vorzerkleinerung im Brecher, weist der Schotter einen Feuchtegehalt von 3 - 8 %<sup>111</sup> auf. Daher muss dieser fein gemahlen und getrocknet werden. Dies erfolgt in der Mahltrocknung. Die hierfür benötigte thermische Energie kann aus der Abluft, der in Schritt 5 beschriebenen Kühlung des Klinkers bezogen werden (soweit die Klinkerproduktion integriert ist), sodass in diesen Fällen kein zusätzlicher Energiebedarf entsteht.

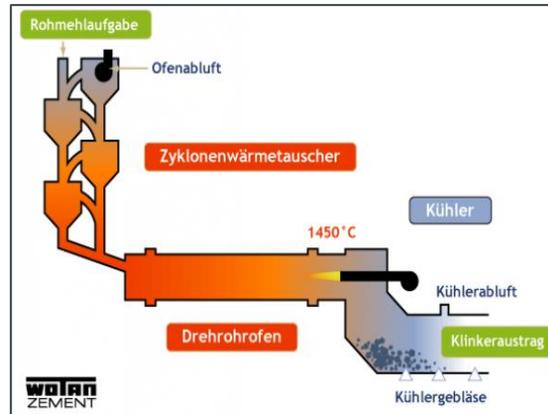
Je nach Zementart müssen die chemischen Bestandteile in einem bestimmten Verhältnis stehen. Während des Mahltrocknens können Ersatz- / Korrekturstoffe wie z. B. Flugasche, Quarzsand etc. beigemischt werden. Das Zwischenprodukt des Mahltrocknens ist das Rohmehl, welches in den Rohmehlsilos gelagert wird.

<sup>111</sup> ZKG International (2015) : ZKG-Handbuch Zementanlagenbau 2015/16, S.18

#### 4. Klinkerbrennen: Brennen des Rohmehls in Drehrohröfen zu Klinker

In diesem Prozessschritt wird aus dem Rohmehl der Zementklinker in Drehrohröfen gebrannt. Dies stellt den Kernprozess der Herstellung von Zement dar. Die Vorwärmung des Rohmehls erfolgt in einem Zyklonvorwärmer. Durch diesen fällt das Rohmehl hindurch, ehe es in den Drehrohröfen gelangt. Der Ofen weist eine Längsneigung und eine Drehzahl von 1,3 - 3,5 U/min auf. Durch Drehung und Neigung wird das Material kontinuierlich durch den Ofen transportiert.

Abbildung 20. Brennen des Rohmehls zu Klinker



Die Abgase des Brenners strömen in entgegengesetzter Richtung und treten am Rohmehl-Eintritt aus.

Quelle: Wotan Zement.

Durch dieses Gegenstromprinzip erfolgt eine Wärmerückgewinnung, und die Energieeffizienz des Prozesses wird gesteigert.

Am Eintritt des Ofens befindet sich die Kalzinierungszone. Hier wird das im Kalk enthaltene  $\text{CO}_2$  bei 900-1250 °C abgetrennt. Dieser Prozess wird auch Entsäuerung oder Kalzinierung genannt. Dabei entstehen die Prozessemissionen der Zementherstellung.

Je weiter das Mehl in Richtung Ofenausgang transportiert wird, desto höher steigt die Temperatur. Bei ca. 1450 °C beginnt die Sinterzone. In diesem Ofenbereich beginnt das Mehl an den Korngrenzen zu schmelzen und bildet Nussgroße Strukturen.<sup>112</sup> Nach dem Sintern wird das Produkt Klinker genannt.

#### 5. Klinkerkühlen: Kühlung des Klinkers nach dem Brennprozesses

Der Klinker verlässt den Drehrohröfen mit ca. 1200 °C<sup>113</sup> und muss schnell gekühlt werden, um eine Rückbildung der Klinkermineralien zu unterbinden. Als Kühlmedium wird Außenluft verwendet die als Brennluft-Vorwärmung und als Wärmequelle für die Mahltrocknung genutzt wird. Durch diese Wärmerückgewinnung wird die Energieeffizienz der Prozesse gesteigert.

#### 6. Zementmahlen: Mahlen des gesinterten Klinkers zu Zement

Im letzten Fertigungsschritt wird der Klinker sehr fein gemahlen. Je nach Zementart werden sog. Kompositmaterialien z. B. Flugasche, Gips, Hüttensand etc. zugemischt, um die Zementeigenschaften einzustellen. Das Verhältnis von Klinker zu Zement wird als Klinkerfaktor bezeichnet. Der klassische Portlandzement weist einen Klinkerfaktor von 0,95 - 1,0 auf. Durch die Entwicklung und Verwendung neuer Kompositzemente, konnte der durchschnittliche

<sup>112</sup> Umweltbundesamt (2020e): Abfallmitverbrennung in Zementwerken, S. 36

<sup>113</sup> Forschungszentrum Karlsruhe (2000): Herstellung von Zementklinker, S. 16

Klinkerfaktor in Deutschland bereits auf 0,71 gesenkt werden<sup>114</sup>, was zu erheblichen Energieeinsparungen führt.

### Energiebedarf und Energieversorgung

Der jährliche Energiebedarf in der deutschen Zementindustrie liegt bei 30 TWh.<sup>115</sup> Für die Herstellung einer Tonne Zement werden ca. 770 kWh thermischer und ca. 110 kWh elektrischer Energie benötigt. Die thermische Energie wird im Wesentlichen für das Brennen des Klinkers eingesetzt. Das Zementmahlen ist der Prozessschritt mit dem höchsten Bedarf an elektrischer Energie (ca. 46 %). In der Rohmaterialaufbereitung werden ca. 25 % der elektrischen Energie benötigt und in den Prozessschritten Brennen und Kühlen des Klinkers ca. 24 %.<sup>116</sup>

Die elektrische Energie wird typischerweise aus dem Stromnetz bezogen. Die thermische Energie zum Beheizen des Drehrohrofens, wird durch das Verbrennen fossiler und alternativer Brennstoffe erzeugt. Eine Übersicht der verwendeten Brennstoffe ist in der nachstehenden Tabelle enthalten:

**Tabelle 5 Brennstoffe zum Beheizen des Drehrohrofens (2019)**

Fossile Brennstoffe	Alternative Brennstoffe
31 %	69 %
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Steinkohle</li> <li>■ Braunkohle</li> <li>■ Petrolkoks</li> <li>■ Heizöl</li> <li>■ Erdgas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Altreifen</li> <li>■ Altöl</li> <li>■ Industrie-, Gewerbe-, Siedlungsabfälle</li> <li>■ Tiermehle</li> <li>■ Altholz</li> <li>■ Lösungsmittel</li> </ul>

Quelle: Frontier Economics/ FICHTNER auf Basis von Verein Deutscher Zementwerke (2020c): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2019, S. 10f.

Für das An- und Abfahren der Anlage werden Brennstoffe mit hohen Heizwerten (Erdgas, Steinkohle) benötigt. Ist eine stabile Betriebstemperatur erreicht, können auch alternative Brennstoffe wie Hausmüll und Autoreifen zugeführt werden.

### CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Zementherstellung und Maßnahmen zu deren Minderung

Im Jahr 2019 emittierte die Zementindustrie in Deutschland ca. 20 Mio. t CO<sub>2</sub> was etwa 3 % der deutschen CO<sub>2</sub>-Emissionen entspricht. Bei der Herstellung einer Tonne Zement werden ca. 600 kg CO<sub>2</sub> emittiert (direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen). Dabei entfallen ca. 200 kg (1/3) auf energiebedingte Emissionen, die aus dem Beheizen des Drehrohrofens durch die Verbrennung von Brennstoffen resultieren. Ca. 400 kg (2/3) entfallen auf prozessbedingte Emissionen.<sup>117</sup> Diese entstehen bei der Entsäuerung von Calciumcarbonat (CaCO<sub>3</sub>). Entsäuerung bedeutet in diesem Zusammenhang das Austreiben von chemisch gebundenem CO<sub>2</sub>:

<sup>114</sup> Verein Deutscher Zementwerke (2020b): Dekarbonisierung von Zement und Beton, S.27.

<sup>115</sup> Verein Deutscher Zementwerke (2020a): Zementindustrie im Überblick 2020/2021, S.11.

<sup>116</sup> Verein Deutscher Zementwerke (2020c): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie, S. 12.

<sup>117</sup> Verein Deutscher Zementwerke (2020b): Dekarbonisierung von Zement und Beton, S.13.

### **CaCO<sub>3</sub> + thermische Energie → CaO + CO<sub>2</sub>**

Neben den direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen fallen durch den Strombezug aus dem Netz auch indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen an.

Maßnahmen zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zement-Industrie beinhalten:

- die Verminderung des Strombedarfs durch Erhöhung der Energieeffizienz und die Dekarbonisierung der Stromversorgung durch den Ausbau erneuerbarer Energien, um **energiebedingte indirekte CO<sub>2</sub>-Emissionen** zu senken (Emissionen, welche durch den Strombezug aus dem Stromnetz entstehen);
- die Senkung des Wärmebedarfs durch Erhöhung der Energieeffizienz und die Substitution fossiler Brennstoffe durch Strom, alternative Brennstoffe oder Wasserstoff, um **energiebedingte direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen** zu senken (Emissionen, welche durch die Verbrennung von Energieträgern zur Erzeugung von Wärme emittiert werden);
- Maßnahmen zur Senkung von **prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen** (Emissionen, welche durch die Entsäuerung des Kalksteins während des Klinkerbrennens frei werden). Diese Emissionen sind mit Maßnahmen wie Verbesserung der Energieeffizienz oder Brennstoffwechsel nicht minderbar. Zur Minderung der prozessbedingten Emissionen werden alternative Ansätze verfolgt. Hierzu gehören z. B. <sup>118</sup>
  - **Senkung Klinkerfaktor:** Einsatz von CO<sub>2</sub>-effizienten Zementen mit Klinkerfaktoren von 0,5 - 0,65 (CEM II/C-Zemente) bzw. 0,35 - 0,5 (CEM VI-Zemente)
  - **CCUS-Technologien** (Carbon Capture and Utilisation / Storage): Dies umfasst die Abscheidung von CO<sub>2</sub> in Zementwerken und die Nutzung bzw. Speicherung des CO<sub>2</sub>. Diese Maßnahme wird aufgrund der Kosten erst eingesetzt, wenn andere Maßnahmen ausgeschöpft sind. Mit dieser Maßnahme können die verbleibenden prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen vollständig reduziert werden.

### **PILOTPROJEKT: CCU UND HERSTELLUNG SYNTHETISCHER KRAFTSTOFF**

Das Ministerium für Verkehr in Baden-Württemberg entwickelt in Zusammenarbeit mit dem VDZ ein Pilotprojekt namens „catch4climate“. Dabei sollen klimaneutrale synthetische Kraftstoffe, reFuels (renewable energy fuels), u. a. aus in Zementwerken abgeschiedenem CO<sub>2</sub> hergestellt werden.<sup>119</sup> Mit diesem Projekt soll die Carbon Capture and Utilisation Technologie (CCU) in Kombination mit der Synthetisierung von Kraftstoffen erprobt werden. Das Projekt wird in Kooperation mit dem Flughafen Stuttgart durchgeführt. Ziel ist die Erforschung von Optionen zur Herstellung synthetischen Kerosins zur Dekarbonisierung des Flugverkehrs.

<sup>118</sup> Verein Deutscher Zementwerke (2020b): Dekarbonisierung von Zement und Beton, S.5, 7.

<sup>119</sup> Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg (2020): Klimaneutrale Kraftstoffe.

## Dekarbonisierung durch Elektrifizierung oder Wasserstoff-Einsatz

Bei einer Umstellung der Klinkerproduktion von einem brennstoffbasierten auf einen **strombasierten Prozess** könnten bis zu 1/3 der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementindustrie vermieden werden. Unter Berücksichtigung der bislang genutzten alternativen Brennstoffe wäre das Reduktionspotential jedoch geringer.

Bei einer Elektrifizierung wird die Wärmeübertragung im Ofen als Herausforderung gesehen. Eine alternative Technologie zur Elektrifizierung könnte der Einsatz von Plasmabrennern sein. Hierzu beginnen in der Zementindustrie erste Versuche. Als Nachteile dieser Technologie werden der hohe Verschleiß und die erforderliche Kühlung der Brenner und damit einhergehend die hohen Energieverluste gesehen.

Die elektrische Klinkerherstellung wäre mit einem Strombedarf von ca. 850-900 kWh/t Klinker verbunden. Ausgehend von den in Deutschland im Jahr 2019 produzierten Mengen an Zement würde bei einer Elektrifizierung der Klinkerherstellung der Strombedarf von gegenwärtig 3,9 TWh um mindestens 21 TWh<sup>120</sup> ansteigen, was einer Steigerung des deutschen Gesamtstrombedarf von etwa 3 % entspräche.

Weitere Elektrifizierungspotenziale liegen im Bereich der Fahrzeuge und Baumaschinen, die in der „Gewinnung der Rohmaterialien“ zum Einsatz kommen. Über eine Elektrifizierung dieser Fahrzeuge und Maschinen wird laut Interviewpartnern nachgedacht. Da diese nur kurze Strecken zurücklegen, wird eine Stromversorgung direkt über Kabelanbindung erwogen (also kein Batteriebetrieb). Nach Unternehmensaussage würde der zusätzliche Leistungsbedarf pro Grube, je nach Maßnahme, im hohen dreistelligen kW-Bereich bzw. im niedrigen einstelligen MW-Bereich liegen. Die entsprechenden Fahrzeuge und Baumaschinen sind allerdings noch nicht auf dem Markt verfügbar. Somit wäre der Zeithorizont für diese Maßnahme eher mittel- bis langfristig.

Zusammenfassend ist eine Elektrifizierung in der Zement-Industrie im Wesentlichen im Fahrzeugbereich denkbar. Bei der Klinkerherstellung wird dagegen noch Untersuchungs- und Forschungsbedarf gesehen. Daher ist in diesem Bereich kurz- und mittelfristig nicht mit einer Elektrifizierung zu rechnen.

Der **Einsatz von Wasserstoff** als Brennstoff gilt grundsätzlich als denkbar. Da hierzu allerdings kaum praktische Erfahrungen vorliegen und sich Wasserstoff als Brennstoff deutlich von anderen Energieträgern unterscheidet, besteht weiterer Forschungsbedarf. So vermindert sich z. B. aufgrund der geringeren Strahlungswärme von Wasserstoffflammen die Wärmeübertragung auf das Zementmehl. Aus heutiger Sicht wird Wasserstoff lediglich als zusätzlicher Brennstoff, beigemischt zu den bislang eingesetzten fossilen Energieträgern, eingesetzt werden können. Ein Anteil von 10 % der Feuerungswärmeleistung scheint möglich. Höhere Anteile erfordern Untersuchungen, z. B. bezüglich möglicher Auswirkungen auf die Produktqualität.<sup>121</sup>

---

<sup>120</sup> Verein Deutscher Zementwerke (2020b): Dekarbonisierung von Zement und Beton, S.26.

<sup>121</sup> Verein Deutscher Zementwerke (2020b): Dekarbonisierung von Zement und Beton, S.25f.

## Einfluss wirtschaftlicher Entwicklung auf den Stromverbrauch

Die Produktion mineralischer Rohstoffe ist derzeit konjunkturell in einer Hochphase mit leicht schwankenden Produktionsvolumina. Für den mittelfristigen Zeitraum werden keine Veränderungen bzw. kein wesentlicher Rückgang erwartet.

## Strukturwandel

Die Anzahl der Abbaustätten sinkt leicht, die Unternehmenskonzentration nimmt zu. Rückläufige Produktionsmengen an zur Schließung anstehenden Standorten der Zementindustrie werden durch die verbleibenden Betriebsstätten kompensiert. Der Wegfall von Standorten und die Steigerung der Produktionsvolumina der verbleibenden Standorte führen in Summe zu einer Senkung des Stromverbrauchs.

Strukturwandel indirekt: Gips ist in geringen Mengen auch ein Bestandteil des Zements. Durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung steht mittel- und langfristig der aus den Rauchgasreinigungsanlagen gewonnene Gips als Rohstoffquelle nicht mehr zur Verfügung. Zur Gipsversorgung werden möglicherweise Naturgipse zum Einsatz kommen. Dies wäre mit neuen Produktionsstätten und zusätzlichem Stromverbrauch verbunden.

## Energieeffizienz

Aufgrund der hohen Energieintensität optimieren Zementwerke fortlaufend die Effizienz ihrer Anlagen. Daher ist die Effizienz für den Brennstoff- und Stromeinsatz bereits heute als hoch einzustufen.<sup>122</sup>

## Zusätzliche Stromanwendungen

Aufgrund moderner Bautechniken steigt die Nachfrage nach Zementen mit höheren Festigkeiten. Diese feingemahlene Zemente haben einen höheren Mahlbedarf, was zu einem Anstieg des Stromverbrauchs führt. Die zunehmende Verwendung von Zementen, in denen Klinker durch andere Hauptbestandteile (z. B. Hüttensand) ersetzt wird, führt ebenfalls zu einem höheren Mahlbedarf und damit zu einem Anstieg des Stromverbrauchs.

Umweltschutzmaßnahmen haben oft auch einen Anstieg des Stromverbrauchs zur Folge, weil zusätzliche Anlagen und Komponenten betrieben werden müssen, z. B. Abgasreinigungsanlagen. Eine Verbesserung der thermischen Effizienz führt ebenfalls zu einem Anstieg des Stromverbrauchs, weil zusätzliche prozesstechnische Komponenten zum Einsatz kommen.<sup>123</sup>

Mit der CO<sub>2</sub>-Abscheidung können nahezu 100 % des im Abgas verbleibenden CO<sub>2</sub> abgetrennt werden. Für eine vollständige Dekarbonisierung der prozessbedingten Emissionen wird diese Maßnahme zukünftig voraussichtlich den größten Beitrag leisten. **Der elektrische Energiebedarf je Tonne Zement würde sich dabei, je**

---

<sup>122</sup> Verein Deutscher Zementwerke (2020a): Zementindustrie im Überblick 2020/2021, S. 11

<sup>123</sup> Verein Deutscher Zementwerke (2020b): Dekarbonisierung von Zement und Beton, S.20.

nach **Carbon-Capture Verfahren, verdoppeln.**<sup>124</sup> Es wird damit gerechnet, dass diese Technologien ab ca. 2030 vermehrt zum Einsatz kommen.

### Zusammenfassende Betrachtung

Bei der Dekarbonisierung der Zementindustrie müssen energiebedingte und prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden werden. Die energiebedingten Emissionen werden im ersten Schritt durch Verbesserung der Energieeffizienz und dem Ersatz fossiler Brennstoffe durch alternative Energieträger gesenkt. Mittel- und langfristig könnten zur Wärmebereitstellung Strom oder Wasserstoff genutzt werden, allerdings wird diesbezüglich noch ein Untersuchungs- und Forschungsbedarf gesehen. Höhere Umweltauflagen, prozesstechnische Optimierungen und verbesserte Produkteigenschaften werden aufgrund eines höheren Mahlaufwandes und dem Betrieb zusätzlicher technischer Systeme zu einem Anstieg des Strombedarfs der Zementindustrie führen.

Prozessbedingte Emissionen können teilweise durch Klinkersubstitution gesenkt werden. Die CCUS-Technologien werden zur Reduktion jener Emissionen eingesetzt, welche technisch nicht anders reduziert werden können. Hierfür wird die Verfügbarkeit von CCUS-Wertschöpfungsketten wie z. B. eine flächendeckende Infrastruktur für den CO<sub>2</sub>-Transport benötigt. Der Einsatz von CCUS würde zu einer Verdoppelung des Stromverbrauchs der Zementindustrie führen.

### 3.3.6 Kalk-Industrie

Die Kalkindustrie ist eine mittelständische Industrie und gehört wie die zuvor beschriebene Zementindustrie zum Wirtschaftszweig Steine und Erden (WZ 23).

In Deutschland produzieren rund 50 kleine und mittelständische Unternehmen an fast 100 Standorten jährlich ca. 6,4 Mio. Tonnen Kalk.<sup>125</sup> Pro Woche benötigt jede/r Bundesbürger/-in umgerechnet ca. 1,75 kg Kalk für das tägliche Leben.<sup>126</sup>

Kalk ist in verschiedenen Branchen ein eingesetzter Grundstoff und steht zu Beginn vieler industrieller Wertschöpfungsketten. Für die Eisen- und Stahlherstellung wird Kalk zum Binden von Verunreinigungen im Roheisen eingesetzt. Die Baustoffindustrie benötigt Kalk zur Herstellung von Mörteln, Putzen und Betonen. Die Chemieindustrie setzt Kalk zur Herstellung organischer und anorganischer Calciumverbindungen ein, und in der Glasindustrie wird Kalk als Härtebildner verwendet. Auch für den Herstellungsprozess von Soda, Kunststoffen, Alkoholen, Klebstoffen, Farbstoffen, Kosmetika, Pharmazeutika und Lebensmitteln wird Kalk verwendet.<sup>127</sup> Die gängigsten drei 3 Kalkprodukte werden in der nachstehenden Tabelle charakterisiert:

---

<sup>124</sup> Verein Deutscher Zementwerke (2020b): Dekarbonisierung von Zement und Beton, S.8.

<sup>125</sup> Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie (2020): Roadmap Kalk 2050, S. 3.

<sup>126</sup> Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie (2020): Roadmap Kalk 2050, S. 3.

<sup>127</sup> Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie (2019): Geschäftsbericht 2018/2019, S. 33.

**Tabelle 6 Charakterisierung der Kalkprodukte**

Kalkprodukt		Beschreibung
1	Ungebrannter Kalkstein	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wesentlicher Anteil: Calciumcarbonat</li> <li>▪ Rohes Produkt aus dem Steinbruch, gewaschen und nach Größe gesiebt.</li> </ul>
2	Branntkalk	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Entsteht aus der Erhitzung des Kalksteines (Kalkbrennen) über eine Temperatur von 900 °C. Dadurch wird das CaCO<sub>3</sub> thermisch in CaO und CO<sub>2</sub> zersetzt.</li> </ul>
3	Löschkalk	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kalk, welcher nach dem Brennprozess mit Wasser „gelöscht“ wurde Ca (OH)<sub>2</sub>.</li> </ul>

Quelle: Frontier Economics/FICHTNER auf Basis von Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie (2021): Rohstoffversorgung.

Bei der Herstellung des ungebrannten Kalkes erfolgt kein Brennprozess. Damit entfallen die Prozessemissionen aus der Entsäuerung.

Die Herstellung von Branntkalk und Löschkalk beinhaltet, wie bei der Herstellung von Klinker, einen energieintensiven Brennprozess. Hierbei fallen die bei der Entsäuerung des Kalksteins entstehenden Prozessemissionen an.

Zur Herstellung von Branntkalk werden folgende Ofentypen eingesetzt:

- Normalschachtofen,
- Gleichstrom-Gegenstrom-Regenerativ-Ofen (GGR-Ofen),
- Ringschacht, und
- Drehrohrofen (nur wenige Anlagen in Deutschland).

### Energieversorgung

Für die Herstellung von Kalkprodukten wird thermische und elektrische Energie benötigt. Die elektrische Energie wird aus dem Stromnetz bezogen und für den Betrieb der technischen Anlagen genutzt. Die benötigte thermische Energie zum Beheizen der Brennöfen auf 1100 - 1450 °C, wird weitgehend durch das Verbrennen von Erdgas, Kohle/Anthrazit oder Koks erzeugt.<sup>128</sup>

Sekundärbrennstoffe, wie sie in der Zementindustrie beim Klinkerbrennen zum Einsatz kommen, werden beim Brennen von Kalk nicht verwendet. Hintergrund ist die heterogene Zusammensetzung der Sekundärbrennstoffe und die Anforderungen an die Produkteigenschaften von Kalk.<sup>129</sup>

### Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen

Maßnahmen zur Dekarbonisierung der Kalkproduktion wurden durch die Branche bereits identifiziert und beinhalten:

<sup>128</sup> Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie (2019): Geschäftsbericht 2018/2019, S. 58.

<sup>129</sup> Navigant et al. (2020e): Branchensteckbrief der Zementindustrie.

**Tabelle 7 Dekarbonisierung der Kalkproduktion**

Maßnahmen	Beschreibung
1 Steigerung der Energieeffizienz	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ insbesondere Wechsel der Ofentechnologien</li> </ul>
2 Dekarbonisierung Brennstoffmix	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schritt 1: Ersatz fester Brennstoffe durch Erdgas</li> <li>▪ Schritt 2: Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas</li> <li>▪ Entwicklung neuer Ofentechnologien welche den Einsatz alternativer Brennstoffe ermöglichen (vgl. Zement)</li> </ul>
3 Abscheidung CO <sub>2</sub> -Emissionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vgl. Zementindustrie</li> </ul>

Quelle: *Frontier Economics/FICHTNER auf Basis von Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie (2019): Geschäftsbericht 2018/2019, S. 58, und Navigant et al. (2020e): Branchensteckbrief der Zementindustrie.*

### Zusammenfassende Betrachtung

Für die Kalkindustrie gelten ähnliche Schlussfolgerungen wie für die Zementindustrie. Bei der Dekarbonisierung der Kalkindustrie müssen ebenfalls energiebedingte und prozessbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden werden. Die energiebedingten Emissionen werden durch Verbesserung der Energieeffizienz und Brennstoffwechsel gesenkt. Höhere Umweltauflagen und prozesstechnische Optimierungen werden aufgrund des Betriebs zusätzlicher technischer Systeme zu einem Anstieg des Strombedarfs führen.

2/3 der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Kalkindustrie sind prozessbedingte Emissionen. Diese CO<sub>2</sub>-Emissionen können nur durch den Einsatz von CCUS vermieden werden. Dies würde zu einem Anstieg des Strombedarfs führen.

### 3.3.7 Neue Stromverbraucher

Die Entwicklung des industriellen Stromverbrauchs in Baden-Württemberg wird neben den bestehenden Industriezweigen durch die Ansiedlung neuer (großer) Stromverbraucher getrieben. Beispiele für potenzielle neue bedeutende Stromverbraucher sind Rechenzentren und Batteriefabriken.

#### Rechenzentren

Der Betrieb von Rechenzentren ist mit einem hohen Stromverbrauch verbunden. So lag der jährliche Stromverbrauch für Server und Rechenzentren in Deutschland bereits im Jahr 2014 bei über 9 TWh,<sup>130</sup> mit stark steigender Tendenz. So wird ein starker Anstieg des Bedarfs an Rechenleistungen in Rechenzentren erwartet und damit ein entsprechender Anstieg des Strombedarfs.<sup>131</sup>

Für die Abschätzung des regionalen Stromverbrauchs in Baden-Württemberg ist vor allem relevant, wo sich Rechenzentren zukünftig ansiedeln werden. Der Szenariorahmen NEP 2035 geht davon aus, dass neue, große Rechenzentren (größer 10 MW) vor allem in Hessen, Bayern und Brandenburg errichtet werden.<sup>132</sup>

<sup>130</sup> Vgl. Deutscher Bundestag (2019).

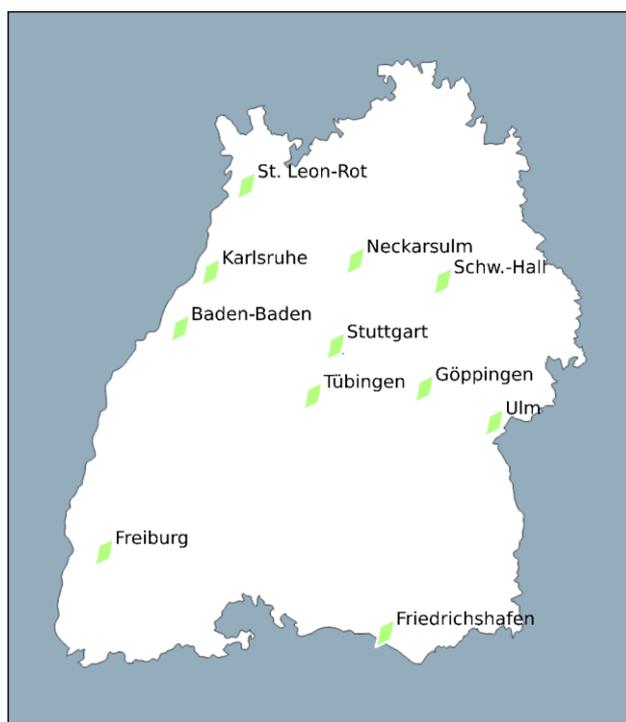
<sup>131</sup> Vgl. Deutscher Bundestag (2019), S. 5-6.

<sup>132</sup> Siehe Szenariorahmen NEP 2035, Abbildung 9, S. 42: Für Baden-Württemberg werden als „neue Stromgroßverbraucher“ nur Stromverbraucher auf der Industrie-, nicht aber auf der GHD-Ebene

Folgende Hinweise deuten jedoch darauf hin, dass auch in Baden-Württemberg die Anzahl an Rechenzentren aller Voraussicht nach zunehmen wird – wenn auch der genaue Umfang nach derzeitigem Stand großen Unsicherheiten unterliegt:

1. In Baden-Württemberg bestehen bereits heute an verschiedenen Standorten Rechenzentren (vergleiche **Abbildung 21**). In einem Interview mit einem Industrieunternehmen wurde berichtet, dass dieses Unternehmen in Baden-Württemberg plant, zusätzliche Rechenzentren mit einem elektrischen Energiebedarf in der Größenordnung von 3-4 MW zu errichten.

**Abbildung 21** Im Rahmen des Projektes „Nachhaltige Rechenzentren“ des Landes Baden-Württemberg untersuchte Rechenzentren mit Standorten in Baden-Württemberg



Quelle: <https://www.nachhaltige-rechenzentren.de/ap1/>

2. Im Zuge der Digitalisierung, vor allem im Industrie- und Verkehrssektor sowie im Bereich vernetzte Gebäude, müssen zukünftig zunehmend große Datenmengen in kurzer Zeit transferiert werden. Die schnelle Übermittlung von großen Datenmengen erfordert dabei die Verbindung zu lokalen Rechenzentren. Es zeichnet sich daher neben dem Trend zum Cloud-Computing (wo maßgeblich auf große, zentrale Rechenzentren zurückgegriffen wird), ein Gegentrend zum Fog- und Edge-Computing ab, bei der vermehrt auf kleinere, lokale Rechenzentren zurückgegriffen wird (siehe unten stehende Textbox zu Fog- bzw. Edge-Computing).

Auf den Trend zum Edge-Computing wird auch im Kontext des (laufenden) Projektes „Nachhaltige Rechenzentren“ des Landes Baden-Württemberg hingewiesen. Im Rahmen eines Arbeitspakets des Projektes wurden Szenarien zur Abschätzung des Gesamtenergiebedarfs von Edge-Rechenzentren in

---

berücksichtigt. (Rechenzentren werden in Szenariorahmen NEP 2035dem GHD-Sektor zugerechnet (Szenariorahmen NEP 2035, S.41)).

Baden-Württemberg im Jahr 2025 entwickelt. Bei Berücksichtigung der Anwendungsfälle „Autonomes Fahren“ und „Smart Cities“ wird im Szenario „Moderate Edge-RZ Entwicklung“ von einem Gesamtenergieverbrauch i. H. v. 130 Mio. kWh/a im Jahr 2025 ausgegangen, und im Szenario „Verstärkte Edge-RZ Entwicklung“ von 479 Mio. kWh/a.<sup>133</sup>

## FOG- UND EDGE-COMPUTING

Ein weiterer Treiber des zukünftigen industriellen Stromverbrauchs könnte der Trend zum dezentralen Edge- bzw. Fog-Computing werden. Diese Technologien erfordern im Gegensatz zu Cloud-Lösungen regionale und lokale Rechenleistung. Das Potential solcher Dezentralisierungstechnologien ist groß: Angesichts der Datenmassen, die Smart Factories und das Internet of Things produzieren, wäre eine Industrie 4.0 mit zentralisierten Cloud-Architekturen nur unter großen Herausforderungen möglich.<sup>134</sup>

Im Kern basieren sowohl Edge- als auch Fog-Computing auf dem Prinzip, die Datenverarbeitung aus der Cloud teilweise zurück zu den Endgeräten zu verlagern. Dies ist insbesondere dort nötig, wo große Datenmassen in Echtzeit produziert werden, die nur noch mit großer Latenzzeit an zentrale Cloud-Server übertragen werden können – also beispielsweise in Smart Factories. Beim **Fog-Computing** werden die entsprechenden Daten der Endgeräte zunächst an ein regionales Rechenzentrum übertragen. Die Server dort können schnell auf die empfangenen Informationen reagieren und gleichzeitig vorfiltern, welche Daten sie an die zentrale Cloud weiterleiten. Das **Edge-Computing** treibt dieses Prinzip noch weiter, indem es die erste Datenverarbeitung direkt an die Endgeräte oder an sogenannte Smart Router im lokalen Netzwerk des Anwendungsortes verlagert. Fog- und Edge-Architekturen schließen sich dabei nicht gegenseitig aus, sondern lassen sich kombinieren.<sup>135</sup>

## Batteriefabriken

Die Herstellung von Batteriezellen ist mit einem hohen Stromverbrauch verbunden.<sup>136</sup> Der genaue Umfang der zukünftigen Batterieherstellung in Baden-Württemberg ist aus derzeitiger Sicht schwer abzusehen. Allerdings gibt es Indikationen, dass es in den nächsten Jahren zu einer Ausweitung der Batterieproduktion in Baden-Württemberg kommen könnte:

- Daimler plant, seine Batterieproduktion in Baden-Württemberg in den nächsten Jahren deutlich auszuweiten<sup>137</sup>;

<sup>133</sup> <https://www.nachhaltige-rechenzentren.de/ap1/>

<sup>134</sup> So haben sich etwa weltweit führende Technologiekonzerne wie Dell, Intel, Microsoft, Cisco, IBM und AT&T schon 2014 bzw. 2015 zu den mittlerweile vereinigten Industrial Internet- und OpenFog-Konsortien zusammengeschlossen. Diese Konsortien, die zu den einflussreichsten Akteuren im Bereich des Internet of Things gehören, legen einen großen Fokus auf Edge- und Fog-Computing (vgl. <https://www.mouser.de/blog/neues-industrial-internet-consortium-openfog>).

<sup>135</sup> Vgl. <https://www.ionos.de/digitalguide/server/knowhow/edge-computing-erklaerung-und-definition/>

<sup>136</sup> So geht bspw. IVL (2019) von einem Strombedarf i.H.v. 30 MJ/kWh (Batteriekapazität) für die Herstellung von Lithium-Ionen aus.

<sup>137</sup> <https://www.daimler.com/innovation/case/electric/batteriefabriken-region-stuttgart.html> und <https://www.daimler.com/konzern/standorte/campus-untertuerkheim.html>

- Das Unternehmen Leclancé plant, die Fertigungskapazität der Batterieproduktion am Standort Willstätt von derzeit 200 MW pro Jahr auf 1 GW pro Jahr ab dem Jahr 2022, sowie längerfristig auf 2,5 GW pro Jahr, auszuweiten<sup>138</sup>;
- Porsche plant die Errichtung einer Batteriezellenfabrik in Tübingen<sup>139</sup>.

Zudem weist der Großabnehmerverband Energie in Baden-Württemberg (GAV) in einer Stellungnahme von Juli 2020 darauf hin, dass einzelne (kleinere) Projekte bei der Batteriezellenproduktion geplant seien.<sup>140</sup>

---

<sup>138</sup> <https://www.econo.de/aktuelles/artikel/willstaett-wird-zum-e-mekka-7937/>

<sup>139</sup> <https://www.electrive.net/2021/04/25/porsche-plant-bau-eines-batteriezellwerks-in-tuebingen/>

<sup>140</sup> Vgl. GAV Energie (2020). Dort heißt es: „Einzelne Projekte bei der Batteriezellenproduktion sind geplant. Diese bewegen sich nach dem aktuellen Planungsstand im einstelligen MW-Bereich.“

## 4 EINFLUSS VON ELEKTRIFIZIERUNGSMÄßNAHMEN AUF DEN INDUSTRIELLEN STROMVERBRAUCH

Wie in Abschnitt 3 beschrieben, bestehen große Unsicherheiten darüber, durch welche Maßnahmen die Dekarbonisierung in der Industrie mittel- bis langfristig maßgeblich vorangetrieben wird. Es ist insbesondere unklar, in welchem Ausmaß die Dekarbonisierung über umfangreiche Elektrifizierungsmaßnahmen und in welchem Ausmaß über den Einsatz von grünem Wasserstoff und dessen Folgeprodukten erfolgen wird. Um den Einfluss eines unterschiedlichen Ausmaßes an Elektrifizierungsmaßnahmen im Rahmen von Dekarbonisierungsprozessen auf den zukünftigen industriellen Stromverbrauch in Baden-Württemberg indikativ abzuschätzen, haben wir unterschiedliche Entwicklungen des Stromverbrauchs in drei Szenarien skizziert.

Im Folgenden

- geben wir zunächst einen kurzen Überblick über die Definition der Szenarien (Abschnitt 4.1); und
- beschreiben anschließend die Entwicklung des industriellen Stromverbrauchs in den Szenarien (Abschnitt 4.2).

Die in diesem Abschnitt betrachteten Szenarien sollen dazu dienen, den Einfluss eines unterschiedlich starken Ausmaßes von Elektrifizierungsmaßnahmen auf den industriellen Stromverbrauch in Baden-Württemberg indikativ aufzuzeigen. Es handelt es sich hierbei nicht um eine Prognose des zukünftigen Stromverbrauchs.

### 4.1 Definition der betrachteten Szenarien

Wir betrachten folgende drei Szenarien für den Industriesektor in Baden-Württemberg, die sich hinsichtlich des Ausmaßes an Elektrifizierung für die Jahre 2030 und 2045 unterscheiden:

- Im **Maßnahmenkombinations-Szenario** wird angenommen, dass ein Großteil der Dekarbonisierung des Industriesektors nicht über die Elektrifizierung erfolgt, sondern über andere Optionen wie z. B. die Verwendung von grünem Wasserstoff zusammen mit Effizienzmaßnahmen. Dies wäre z. B. dann der Fall, wenn grüner Strom relativ teuer ist (z. B. wegen hohen Abgaben und Umlagen) und/oder grüner Wasserstoff relativ günstig zur Verfügung gestellt werden kann (z. B. über Importe). Die Transformation der Energieversorgung „kippt“ im Industriebereich in einer solchen Welt Richtung grüner Wasserstoff und anderer Alternativen.

Um dieses Szenario zu beschreiben, schreiben wir den aktuellen Stromverbrauch je Branche unter Berücksichtigung von eher moderaten Annahmen zur Elektrifizierung fort. Die über die Branchen konstante jährliche Veränderung des Stromverbrauchs (bis 2030 bzw. zwischen 2031 und 2045) wird dabei unter Rückgriff auf Wachstumsraten des industriellen

Stromverbrauchs fortgeschrieben, die wir auf Basis von bestehenden Studien abgeleitet haben. Hierbei wurden Studien bzw. Szenarien mit umfassenden Elektrifizierungsmaßnahmen nicht mit berücksichtigt. Wir definieren ein unteres und ein oberes Maßnahmenkombinations-Szenario, um die Bandbreite der in den Studien ausgewiesenen zukünftigen Stromverbräuche zu berücksichtigen.

- Im Rahmen des **Elektrifizierungsszenarios** gehen wir davon aus, dass sich die Markt- und Rahmenbedingungen und die technische Entwicklung für den Einsatz von grünem Strom in der Industrie in Zukunft relativ günstig entwickeln. Dies ist z. B. dann der Fall, wenn grüner Strom in ausreichendem Umfang und zu moderaten Kosten in Baden-Württemberg zur Verfügung steht und nicht zu stark z. B. von Abgaben und Umlagen belastet wird. Gleichzeitig bleiben alternative Technologien wie der Einsatz von grünem Wasserstoff in diesem Szenario vergleichsweise teuer bzw. begrenzt verfügbar. Die Transformation der Energieversorgung „kippt“ im Industriebereich in einer solchen Welt Richtung Stromeinsatz.

Auch in diesem Szenario wird der aktuelle Stromverbrauch je Branche unter Berücksichtigung einer jährlichen Veränderung (bis 2030 bzw. zwischen 2031 und 2045) fortgeschrieben. Die jährliche Veränderungsrate wird jedoch unter Rückgriff auf Studien bzw. Szenarien ermittelt, die von einer umfassenden Elektrifizierung ausgehen.

- Das **maximale Elektrifizierungsszenario** geht wie das Elektrifizierungsszenario von einem starken zukünftigen Stromeinsatz in der Industrie in Baden-Württemberg aus, unterscheidet sich von der Vorgehensweise allerdings von den beiden anderen Szenarien. Als „Kontrollrechnung“ wird abgeschätzt, in welchem Ausmaß der Stromverbrauch ansteigen könnte, wenn der energetische Einsatz fossiler Energieträger in den einzelnen Branchen nahezu vollständig (hier annahmegemäß zu 90 %) durch den Einsatz von Strom ersetzt wird. Da eine solche umfassende Elektrifizierung erst in der längeren Frist zu erwarten ist, weisen wir Ergebnisse für das maximale Elektrifizierungsszenario nur für den Zeitraum 2030 bis 2045 aus.<sup>141</sup>

Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise zur Abschätzung des industriellen Stromverbrauchs in den drei Szenarien findet sich in ANNEX B.

Bei der Betrachtung fokussieren wir auf die Stichjahre 2030 und 2045. Diese Stichjahre repräsentieren eine „mittlere“ bzw. ein „lange“ Frist. Die Auswahl der Stichjahre ist insofern beliebig; die Indikationen sollten dementsprechend nicht als Punktschätzungen interpretiert werden.

## 4.2 Entwicklung des industriellen Stromverbrauchs in den verschiedenen Szenarien

Sowohl aus der Industriebefragung als auch aus den Unternehmensinterviews ergibt sich für die Entwicklung des zukünftigen Stromverbrauchs das Bild, dass

---

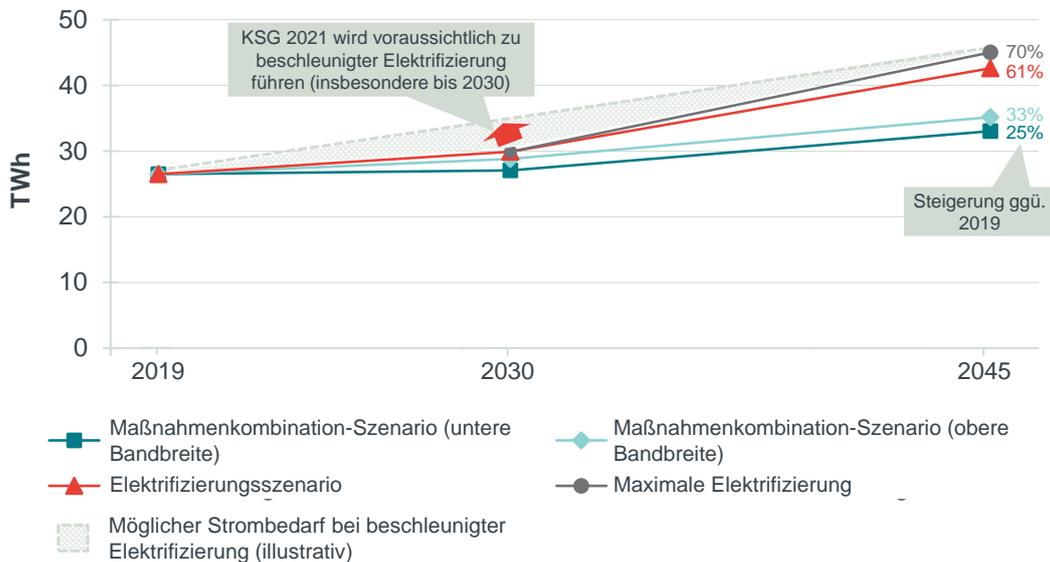
<sup>141</sup> Für das Jahr 2030 nehmen wir an, dass der Stromverbrauch im maximalen Elektrifizierungsszenario dem Verbrauch im Elektrifizierungsszenario entspricht.

- sich in der kurzen und mittleren Frist (bis 2030) der Strombedarf der Industrie nur moderat verändern wird, da
  - industrieller Strukturwandel nur relativ langsam erfolgt;
  - Investitionen in neue Verfahren, Prozesse und Anlagen, die mit einer zunehmenden Elektrifizierung einhergehen können, einen erheblichen zeitlichen Vorlauf haben;
  - neue Prozesse, Verfahren und Anlagen z. T. noch in der Entwicklungs- und Erprobungsphase sind, und
  - die marktlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen für die unterschiedlichen Dekarbonisierungsoptionen, die die Wirtschaftlichkeit der Investitionen bestimmen, heute noch derart unklar sind, dass sich noch keine grundlegenden Investitionsentscheidungen mit ausreichender Verlässlichkeit treffen lassen.
- die Transformation und Restrukturierung der Industrie in Richtung CO<sub>2</sub>-Neutralität v. a. nach 2030, also langfristig zu erwarten ist: In diesem Zeitraum müssen die zunehmenden strikteren Klimaziele für die Industrie auf die ein oder andere Weise erreicht werden.

Dementsprechend zeigen sich im kurz- bis mittelfristigen Zeithorizont (bis 2030) in allen Stromverbrauchsszenarien relativ moderate Unterschiede in den industriellen Strombedarfen in Baden-Württemberg. Auf Basis der getroffenen Annahmen zu den Szenarien (Verbrauchsanstiege von 0,2 %, 0,8 % bzw. 1 % p.a.) bleibt der industrielle Stromverbrauch nahezu konstant oder steigt moderat von heute gut 26 TWh auf knapp 30 TWh an (Abbildung 22).

Bei der Interpretation des Anstiegs bis 2030 ist allerdings beachten, dass alle Studien, die den Verbrauchsanstiegen zugrunde liegen, vor Veröffentlichung des Entwurfs zum KSG 2021 erstellt wurden. Auch die Interviews wurden vor diesem Zeitpunkt geführt. Um das verschärfte CO<sub>2</sub>-Minderungsziel für 2030 zu erreichen, muss der Industriesektor allerdings stärkere Dekarbonisierungsmaßnahmen ergreifen, als bislang gedacht, auch wenn die obigen Herausforderungen zunächst einmal weiterhin bestehen. Gerade im Zeitraum bis 2030, wenn grüner Wasserstoff noch nicht flächendeckend bzw. umfassend verfügbar ist, ist daher eine Zunahme von Elektrifizierungsmaßnahmen wahrscheinlich (vgl. Abschnitt 3.2), die in der Form noch nicht in Abbildung 22 erfasst ist.

**Abbildung 22** Überschlägig geschätzter Stromverbrauch des Industriesektors in Baden-Württemberg für die Jahre 2030 und 2045 in verschiedenen Szenarien



Quelle: Frontier Economics/FICHTNER

Langfristig, also nach dem Jahr 2030, wird eine deutlich stärkere Dynamik der Transformation der Energieversorgung und -verwendung der Industrie erwartet. Entsprechend der unterschiedlichen Dekarbonisierungspfade in den Szenarien fallen die Energiebedarfe der Industrie bis zum Jahr 2045 entsprechend unterschiedlich aus: Liegt der industrielle Stromverbrauch bei den **Maßnahmenkombinationsszenarien** bei knapp **35 TWh**, erreichen die **Szenarien, die eine umfassende Elektrifizierung unterstellen**, Werte von **43 TWh bzw. 45 TWh**. Dabei unterscheiden sich die beiden Berechnungsansätze für das Elektrifizierungsszenario nur unwesentlich.

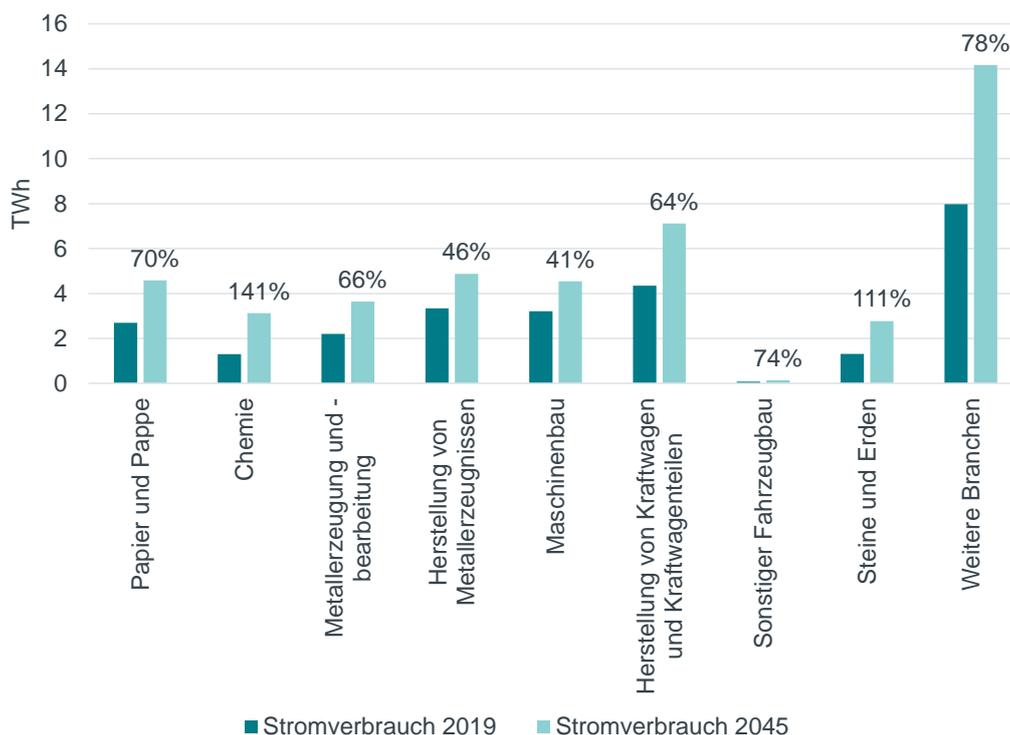
Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine primär auf Elektrifizierung basierende Dekarbonisierung der Industrie in **Baden-Württemberg** zu einem **Anstieg des Stromverbrauchs in der Industrie um etwa 60 - 70 % gegenüber heute** führen würde. Ein vergleichbar hoher absoluter Anstieg ist in den untersuchten Studien (siehe Abschnitt 2.3) lediglich beim Verkehrssektor zu beobachten, der im Maximalfall bei TransnetBW (2020) von knapp 2 auf 25 TWh im Jahr 2050 ansteigt. Der **absolute Stromverbrauch des Industriesektors im Jahr 2045** läge in allen hier betrachteten Szenarien **deutlich über dem Verbrauch der anderen Sektoren**. Auch relativ gesehen nimmt die Bedeutung des Industriesektors, also der Anteil des Industriesektors am Gesamtstromverbrauch der vier Sektoren in Baden-Württemberg, damit i. d. R.<sup>142</sup> zu.

<sup>142</sup> Lediglich im Maßnahmenkombinations-Szenario und bei Berücksichtigung der maximalen Stromverbrauchsprognosen aus den drei Sektoren (vgl. Abschnitt 2.3), liegt der Anteil des Industriesektors am Gesamtstromverbrauch unter dem heutigen Anteil.

### Branchen-spezifische Ergebnisse im maximalen Elektrifizierungsszenario

Der Anstieg des industriellen Stromverbrauchs um knapp 70 % bis 2045 im maximalen Elektrifizierungsszenario wird insbesondere von Wirtschaftszweigen getrieben, die heute einen hohen Verbrauch an fossiler Energie aufweisen. Der prozentuale Stromverbrauchsanstieg in den einzelnen betrachteten Wirtschaftszweigen liegt zwischen ca. 40 % (Maschinenbau) und ca. 140 % (Chemie-Branche) (Abbildung 23).

**Abbildung 23 Stromverbrauch nach Wirtschaftszweigen im Jahr 2019 und im Jahr 2045 im maximalen Elektrifizierungsszenario**



Quelle: Frontier Economics

Hinweis: Die Prozentsätze geben den Anstieg des Stromverbrauchs im Jahr 2045 im Vergleich zu 2019 an. Stromverbrauch im Jahr 2019 gemäß Statistisches Landesamt BW (2021) (siehe auch Abbildung 13). Für den WZ 24 (Metallerzeugung und -bearbeitung) wurde nach Abgleich mit Daten der Energiebilanzen geschlussfolgert, dass der Endenergieverbrauch, der in Abbildung 13 für diesen Wirtschaftszweig als „nicht zuordenbar“ ausgewiesen ist, ein zusätzlicher Stromverbrauch ist, und der Wert für 2019 daher in Abbildung 23 entsprechend angepasst.

In Branchen wie dem Maschinen- und Fahrzeugbau-Sektor und der Herstellung von Metallerzeugnissen ist bereits heute der Stromanteil relativ hoch – der prozentuale Stromverbrauchszuwachs ist daher niedriger als im Durchschnitt über alle Wirtschaftszweige. In der Chemiebranche ist dagegen der heutige Erdgasanteil im Vergleich zum Stromanteil relativ hoch, so dass eine Elektrifizierung als Substitution des Einsatzes der energetisch genutzten fossilen Energieträger, zu einem starken Stromanstieg führen würde. In Bezug auf den in Abbildung 23 illustrierten Stromverbrauchsanstieg im Wirtschaftszweig Steine und Erden ist zu berücksichtigen, dass dieser noch keinen Stromverbrauchsanstieg durch CCUS-Maßnahmen zur Vermeidung von prozessbedingten Emissionen in der Zement- und Kalk-Industrie berücksichtigt (vgl. 3.3.5 und 3.3.6).

Auf Basis der Unternehmensinterviews lassen sich die Branchentrends in Bezug auf den Ersatz von fossilen Energien durch Strom wie folgt einordnen:

- Der Stromverbrauch der **Papier- und Pappe-Industrie** könnte entsprechend der obigen Berechnung in einem Elektrifizierungsszenario um bis ca. 70 % ansteigen. Momentan gehen die dortigen Planungen allerdings nicht in Richtung Elektrifizierung, sondern fokussieren z. B. auf den verstärkten Einsatz von Biomasse. Technisch ist eine Elektrifizierung der Prozesse jedoch grundsätzlich möglich.
- Die **Chemieindustrie** könnte im Elektrifizierungsszenario ihren Stromverbrauch rechnerisch um ca. 140 % steigern. Analog zum Wirtschaftszweig Papier und Pappe bestehen derzeit allerdings keine konkreten Planungen zur Elektrifizierung, diese wäre technisch aber grundsätzlich denkbar. Ebenso gibt es Überlegungen zu Pilotprojekten für Elektrolyseure zur Erzeugung von Wasserstoff vor Ort, was sich mit den Aussagen in der baden-württembergischen H<sub>2</sub>-Strategie decken würde.<sup>143</sup>
- Die **Metallindustrie** umfasst die Wirtschaftszweige Metallerzeugung und -bearbeitung sowie die Herstellung von Metallerzeugnissen. Ein Anstieg des Stromverbrauchs lässt sich durch bestehende konkrete Überlegungen zur Elektrifizierung bei einigen Prozessen plausibilisieren.
- Im **Maschinen- und Fahrzeugbau** entfällt ein Drittel des fossilen Energieträgereinsatzes auf den Bereich Warmwasser und Raumwärme. Der dort stattfindende Einsatz fossiler Energieträger (insbesondere Erdgas) soll durch erneuerbaren Strom ersetzt werden. Entsprechende Elektrifizierungsmaßnahmen werden gerade umgesetzt bzw. sind bereits in Planung und decken sich mit den Steigerungen des Stromverbrauchs der relevanten Wirtschaftszweige um 41 bis 74 %.
- Die Elektrifizierung energiebedingter Prozesse ist im Sektor **Steine und Erden** mit technischen Herausforderungen verbunden. In dieser Hinsicht ist perspektivisch zunächst eher nicht von einer Erhöhung des Stromverbrauchs auszugehen. Allerdings wird zur Vermeidung der THG-Emissionen aus nicht energetischen Prozessen die Abscheidung und Verwertung bzw. Speicherung von CO<sub>2</sub> aus den Industrieabgasen eingesetzt werden müssen („Carbon Capture and Usage“ (CCUS)). Die vollumfängliche Umsetzung von CCUS wäre – im Vergleich zum heutigen Stromverbrauch – mit einem Anstieg des Stromverbrauchs um einen Faktor 2 bis 3 verbunden. Dieser Energiebedarf ist in unserer indikativen Berechnung nicht enthalten, allerdings könnte der kalkulierte Anstieg des Stromverbrauchs um ca. 110 % in dieser Richtung interpretiert werden.

---

<sup>143</sup> Die Wasserstoff-Roadmap in Baden-Württemberg führt zur lokalen Erzeugung von grünem Wasserstoff aus: „Zur Unterstützung der Technologie soll die Erzeugung von grünem Wasserstoff in Baden-Württemberg mittels Wasserelektrolyse in angemessener Größenordnung aufgebaut werden. Dadurch soll das Technologiepotenzial zur Eigenerzeugung aufgezeigt und zu Beginn des Markthochlaufs die Versorgung mit grünem Wasserstoff ermöglicht werden.“ Vgl. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (2020).

## 5 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

### 5.1 Schlussfolgerungen für die zukünftige Entwicklung des (industriellen) Stromverbrauchs in Baden-Württemberg

In diesem Abschnitt formulieren wir auf Basis der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Dekarbonisierungs- und Elektrifizierungstrends zentrale Schlussfolgerungen für die zukünftige Entwicklung des (industriellen) Stromverbrauchs in Baden-Württemberg.

**Die Dekarbonisierung im Industriesektor wird zum Haupt-Treiber des zukünftigen industriellen Stromverbrauchs werden, momentan bestehen jedoch noch große Unsicherheiten bezüglich Ausmaß und Geschwindigkeit des Stromverbrauchanstiegs durch die Sektorenkopplung**

Die im Rahmen der Studie durchgeführten Gespräche mit der Industrie in Baden-Württemberg haben gezeigt, dass die Elektrifizierung vieler Anwendungen im Industriebereich aus technischer Sicht möglich ist. Ebenso ist der Ersatz von fossilen Brennstoffen durch (grünen) Wasserstoff aus technischer Sicht in vielen Bereichen möglich, wird für die Mehrzahl der befragten Industrieunternehmen jedoch als eine Option angesehen, die in weiter entfernter Zukunft liegt, als die Elektrifizierung.

Bereits durchgeführte oder konkret geplante Elektrifizierungsmaßnahmen in der Industrie betreffen vor allem den Bereich der Gebäudeenergie (im Wesentlichen Einsatz von Wärmepumpen), den Ersatz von fossil befeuerten Öfen durch elektrische Öfen (z. B. im Bereich der Metallerzeugung und -verarbeitung) und die Umstellung der Wasserstoffproduktion von Dampfreformierung auf Elektrolyse in der chemischen Industrie.

Elektrifizierungsmaßnahmen in anderen Bereichen sowie Maßnahmen zum Einsatz von grünem Wasserstoff scheitern zur Zeit im Wesentlichen an der (noch) fehlenden Rentabilität der Maßnahmen sowie – im Fall von Wasserstoff – an der noch fehlenden Infrastruktur (siehe Schlussfolgerung 2).

Derzeit setzen viele Unternehmen daher zunächst auf andere Dekarbonisierungsmaßnahmen, wie den Ersatz fossiler Brennstoffe durch biogene Brennstoffe, eine weitere Erhöhung der Energieeffizienz, und teilweise auf eine Substitution von fossil basierter Eigenstromerzeugung durch eine Erhöhung des Fremdstrombezugs.

**Die Ausgestaltung regulatorischer Rahmenbedingungen wird maßgeblich darüber entscheiden, in welchem Ausmaß**

## **Elektrifizierungsmaßnahmen zur Dekarbonisierung der Industrie beitragen werden**

In vielen industriellen Anwendungsbereichen ist eine Dekarbonisierung aus technischer Sicht sowohl über eine Elektrifizierung, als auch durch den Einsatz von grünem Wasserstoff möglich (siehe Schlussfolgerung 1).

Welche Rolle die beiden Dekarbonisierungsoptionen zukünftig spielen werden, hängt nach Aussage der Unternehmen vor allem von der relativen Wirtschaftlichkeit der beiden Maßnahmen ab, also maßgeblich von der Höhe zukünftiger Strom- und Wasserstoffpreise bzw. der Kosten dieser Technologiesysteme. Diese hängen wiederum von regulatorisch gesetzten Rahmenbedingungen ab (z. B. in Bezug auf Steuern, Abgaben und Umlagen; sowie den regulatorischen Rahmen für den Ausbau erneuerbarer Energien im Stromsystem und für die Wasserstoffherstellung), der heute allerdings nicht oder nur sehr unvollständig bekannt ist.

## **Verschärfte Klimaschutzziele für das Jahr 2030 weiterer Treiber für Elektrifizierungsmaßnahmen**

Durch das Klimaschutzgesetz 2021 wird der Industrie-Sektor bereits in der kurzen und mittleren Frist in einem stärkeren Ausmaß Dekarbonisierungsmaßnahmen durchführen müssen, als bislang geplant bzw. angedacht. Elektrifizierungsmaßnahmen sind i. d. R. kurzfristiger umsetzbar als der Einsatz von grünem Wasserstoff, der in einem größeren Umfang voraussichtlich erst dann eine Rolle spielen wird, wenn eine flächendeckende Wasserstoffinfrastruktur aufgebaut ist. Eine Vielzahl von Elektrifizierungsmaßnahmen kann dagegen bereits heute umgesetzt werden. Damit die Industrie entsprechend auf die (verschärften) Klimaschutzziele reagieren kann, ist die zeitnahe Schaffung eines entsprechenden verlässlichen regulatorischen Rahmens unerlässlich.

## **Wenn die Rahmenbedingungen in einer Weise gesetzt werden, dass Elektrifizierungsoptionen aus Sicht der Unternehmen rentabel werden (Dekarbonisierung erfolgt im Wesentlichen über Elektrifizierung), ist mit einem substantiellen Anstieg des Stromverbrauchs zu rechnen**

Sofern regulatorische Rahmenbedingungen so gesetzt werden, dass Elektrifizierungsmaßnahmen für die Unternehmen rentabel werden und die Unternehmen zur Dekarbonisierung im Wesentlichen auf Maßnahmen der Elektrifizierung setzen, ist mit einem substantiellen Anstieg des industriellen Stromverbrauchs zu rechnen, der deutlich oberhalb der in den meisten Stromverbrauchsprognosen genannten Größen liegt.

Überschlägige Berechnungen zeigen, dass der industrielle Stromverbrauch in Baden-Württemberg bei zugrunde legen von Wachstumsfaktoren in „klassischen“ Stromverbrauchsszenarien bis 2045 um ca. 25 - 30 % gegenüber heute ansteigen würde.

Erfolgt die Dekarbonisierung im Wesentlichen über Elektrifizierungsmaßnahmen, ist dagegen mit einem Anstieg des industriellen Stromverbrauchs in Baden-

Württemberg um 60 – 70 % gegenüber heute zu rechnen. Dieser Verbrauchsanstieg wäre dann entsprechend in Bedarfsplanungen inkl. der Netzausbauplanung zugrunde zu legen.

### **Die Ansiedelung neuer Stromverbraucher wird auch für Baden-Württemberg erwartet, wodurch ebenfalls von einem Anstieg des Stromverbrauchs auszugehen ist**

Neben der Dekarbonisierung der Industrie ist ein weiterer Treiber für einen Anstieg des industriellen Stromverbrauchs die Ansiedelung neuer Stromverbraucher. Auch wenn das genaue Ausmaß von neuen Stromverbrauchern wie Rechenzentren und Batteriefabriken aus derzeitiger Sicht schwer abzuschätzen ist, zeichnet sich ab, dass diese neuen Stromverbraucher ein Treiber für einen Anstieg des Stromverbrauchs in Baden-Württemberg sein werden. So werden lokale Rechenzentren in Hinblick auf eine fortschreitende Digitalisierung (Stichwort „Internet of Things“) an Bedeutung gewinnen und daher auch in Baden-Württemberg benötigt werden. Zudem bestehen bereits heute verschiedene Pläne zur Ansiedlung bzw. des Ausbaus von Batteriefabriken in Baden-Württemberg.

### **Stromverbrauchsanstieg im Kontext der Sektorenkopplung auch in weiteren Sektoren zu erwarten**

Die Sektorenkopplung ist nicht nur im Industriesektor, sondern auch im Verkehrssektor (insbesondere durch die Elektrifizierung des Straßenverkehrs), sowie im Bereich der Wärmeversorgung im Haushalts- und GHD-Sektor (Einsatz von Wärmepumpen), ein wesentlicher Treiber des zukünftigen Stromverbrauchs. Insgesamt ist insbesondere im Verkehrs-, und in geringerem Ausmaß auch im Haushaltssektor, von einem zukünftig steigenden Anstieg des Stromverbrauchs auszugehen. Bei der Netzausbauplanung muss daher neben dem Anstieg des Stromverbrauchs im Industriesektor, auch der Stromverbrauchsanstieg im Verkehrssektor, sowie im Bereich der Wärmeversorgung von privaten und gewerblichen Gebäuden, berücksichtigt werden.

## **5.2 Handlungsempfehlungen**

Im Folgenden leiten wir auf Basis der in Abschnitt 3 identifizierten Trends des industriellen Stromverbrauchs in Baden-Württemberg Handlungsempfehlungen für zukünftige Stromverbrauchsprognosen, z. B. für die Netzausbauplanung, ab.

- **Szenarien mit hoher Elektrifizierung mitdenken** – Angesichts der Dekarbonisierungsziele, die sich die Bundesregierung gesetzt hat (und die durch das Klimaschutzgesetz 2021 weiter verschärft wurden), werden in den nächsten Jahren und Jahrzehnten umfangreiche Dekarbonisierungsmaßnahmen im Industriesektor erfolgen müssen. Aus Sicht der Unternehmen ist die Abwägung zwischen einer starken Elektrifizierung und dem Einsatz von grünem Wasserstoff vor allem von der Rentabilität der Maßnahmen und der Verfügbarkeit von Infrastruktur und technischen Komponenten abhängig – Aspekte, die für die Unternehmen aus derzeitiger Sicht mit hoher Unsicherheit behaftet sind. Sofern die Rahmenbedingungen so gesetzt werden, dass die Dekarbonisierung im Wesentlichen über eine Elektrifizierung erfolgt, wird dies

zu einem substantiellen Anstieg des industriellen Strombedarfs führen. Aufgrund langer Netzausbauzeiten müssen diese Szenarien im Bereich der Netzausbauplanung mitberücksichtigt werden.

Hierbei ist zudem zu berücksichtigen, dass es durch die Beschleunigung der Dekarbonisierungsziele durch das KSG 2021 gerade in den nächsten Jahren zu einem verstärkten Elektrifizierungsdruck kommen könnte und dass es zudem durch den Kernenergie- und Kohleausstieg in den nächsten Jahren zu einem Rückgang der Stromerzeugung in Baden-Württemberg kommt.<sup>144</sup> Ein zeitnahe, adäquater Netzausbau ist daher sowohl angesichts der Nachfrageentwicklung, als auch angesichts der Entwicklungen auf Seiten der Stromerzeugung erforderlich.

- **Trends zum Strombedarf für neue Stromverbraucher weiter beobachten und berücksichtigen** – Neben der Entwicklung des Strombedarfs der Bestandsindustrie wird der zukünftige Stromverbrauch durch die Ansiedlung neuer Stromverbraucher, wie z. B. Rechenzentren und Batteriefabriken, getrieben. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, frühzeitig Trends zu beobachten, die zu einem Anstieg des Stromverbrauchs führen können. Ein Beispiel hierfür ist der Trend zum Edge-Computing, der voraussichtlich zu einem erhöhten Bedarf an lokalen Rechenzentren führen wird.
- **Trends im Bereich Stromherkunft der Industrie (Eigenerzeugung vs. Fremdbezug) weiter beobachten** – Neben der Höhe des Strombedarfs der Industrie ist für die Netzausbauplanung relevant, zu welchen Anteilen (und mit welchen Technologien) die Unternehmen den Strom selbst erzeugen und zu welchen Anteilen sie den Strom aus dem Netz beziehen. So wird ein Rückgang der fossilen Eigenerzeugung tendenziell zu einem Anstieg des Netzausbaubedarfs führen. Ein Anstieg der Eigenerzeugung führt andererseits nicht automatisch zu einem Rückgang des Netzbedarfs, wenn die Eigenerzeugung auf Basis von witterungsabhängigen erneuerbaren Energien erfolgt und das Stromnetz weiterhin als Batterie bzw. Back-up-Lösung genutzt wird. Die unterschiedlichen Trends im Bereich Eigenerzeugung und Fremdbezug müssen daher im Hinblick auf die Netzausbauplanung weiter beobachtet und berücksichtigt werden.
- **Strombedarf durch CCUS berücksichtigen** – Prozessbedingte Emissionen lassen sich nicht durch Dekarbonisierungsmaßnahmen wie Elektrifizierung oder den Einsatz von regenerativen Brenn- und Kraftstoffen vermeiden. Aus derzeitiger Sicht wird – z. B. in der Zement- und Kalk-Industrie – die Abscheidung und Speicherung oder Abscheidung und Nutzung von CO<sub>2</sub> (CCUS) als Weg angesehen, um die prozessbedingten Emissionen mittel- bis langfristig zu reduzieren. Diese Verfahren sind mit einem hohen Strombedarf verbunden, der z. B. in der Zementindustrie zu einer Verdopplung des heutigen Strombedarfs führen würde.

---

<sup>144</sup> Siehe hierzu z.B. TransnetBW (2020), S.28f.

## 6 LITERATURVERZEICHNIS

AG Energiebilanzen (2021): Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 2019.

BCG, Prognos (2018): Klimapfade für Deutschland, Studie im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI).

BDEW (2020): Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland, Basisdaten und Einflussfaktoren, Foliensatz zur BDEW-Publikation, 4. Aktualisierung, Mai 2020, [https://www.bdew.de/media/documents/20200525\\_Waermeverbrauchs\\_analyse\\_Foliensatz\\_2020\\_daQSUCb.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/20200525_Waermeverbrauchs_analyse_Foliensatz_2020_daQSUCb.pdf)

Bundesklimaschutzgesetz (2019): Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften vom 12. Dezember 2019.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2016): Was bedeutet "Sektorkopplung"?, Newsletter Energiewende direkt vom 11.07.2016, verfügbar unter <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2016/14/Meldung/direkt-erklaert.html>.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland, Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario, Studie des Fraunhofer ISI, Consentec, ifeu im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Energieeffizienz in Zahlen Entwicklungen und Trends in Deutschland 2020.

Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie (2019): Geschäftsbericht 2018/2019 des Bundesverbands der Deutschen Kalkindustrie e.V., der Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V. und des Instituts für Kalk- und Mörtelforschung e.V., [https://www.kalk.de/index.php?eID=tx\\_nawsecuredl&u=0&q=0&t=1621525217&hash=0a8bbc77c6c658255bf3dc9a96e6f7bb43a92391&file=uploads/tx\\_bvk/GB\\_2019\\_02.pdf](https://www.kalk.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&q=0&t=1621525217&hash=0a8bbc77c6c658255bf3dc9a96e6f7bb43a92391&file=uploads/tx_bvk/GB_2019_02.pdf).

Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie (2020): Roadmap Kalkindustrie 2050: Über die klimaneutrale Produktion zur klimapositiven Industrie, [https://www.kalk.de/index.php?eID=tx\\_nawsecuredl&u=0&q=0&t=1621525053&hash=018d663cd55c37b88999679d84afd08dc408fe45&file=uploads/tx\\_bvk/KALK\\_CO2\\_Roadmap\\_Oktober\\_2020\\_01.pdf](https://www.kalk.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&q=0&t=1621525053&hash=018d663cd55c37b88999679d84afd08dc408fe45&file=uploads/tx_bvk/KALK_CO2_Roadmap_Oktober_2020_01.pdf).

Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie (2021): Rohstoffversorgung, <https://www.kalk.de/nachhaltigkeit/rohstoffversorgung/>.

Chemie.BW (2021a): Konjunktur chemische und pharmazeutische Industrie in Baden-Württemberg, <https://www.chemie.com/presse/presse-artikel/article/konjunktur-chemische-und-pharmazeutische-industrie-in-baden-wuerttemberg-bilanz-2020-und-prognose-2.html>.

Chemie.BW (2021b): Verband der Chemischen Industrie e.V. Landesverband Baden-Württemberg, <https://www.chemie.com/verbaende/verband-der-chemischen-industrie-e-v-lv-baden-wuerttemberg.html>.

Dena (2013): Energieberatung in Industrie und Gewerbe – Der Schlüssel zum Kostensenken.

Dena (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende.

Dena (2019): Gebäudereport Kompakt 2019.

Destatis (2021): Energieverwendung der Betriebe im Verarb. Gewerbe. Statistik 43531. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=statistikTabellen&selectionname=43531#abreadcrumb>, zuletzt abgerufen am 29. März 2021.

Deutscher Bundestag (2019): Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestags. Sachstand. Energieverbrauch von Rechenzentren, 17.4.2019.

DLR, Universität Stuttgart IER, Zirus, ZSW (2018): Energiesystemanalyse Baden-Württemberg, Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.

DVGW (2020): H2 vor Ort – Wasserstoff über die Gasverteilnetze für alle nutzbar machen, <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/h2vorort-wasserstoff-gasverteilnetz-dvgw-broschuere.pdf>.

EWI, GWS, Prognos AG (2014), Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie.

ExxonMobil (2018): Energieprognose Deutschland 2018-2040.

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (2018): CO<sub>2</sub>-Verminderung im Papiergewerbe, [https://www.ffegmbh.de/images/stories/veroeffentlichungen/720\\_Energiewende\\_in\\_der\\_Industrie/CO<sub>2</sub>-Verminderung\\_im\\_Papiergewerbe.pdf](https://www.ffegmbh.de/images/stories/veroeffentlichungen/720_Energiewende_in_der_Industrie/CO2-Verminderung_im_Papiergewerbe.pdf).

Forschungszentrum Karlsruhe (2000): Herstellung von Zementklinker, Verfahrensbeschreibung und Analysen zum Einsatz von Sekundärbrennstoffen. Technik und Umwelt. Wissenschaftliche Berichte FZKA 6508, <https://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/fzk/6508/6508.pdf>.

Föderal Erneuerbar (2021): Landesinfo Baden-Württemberg. Online verfügbar unter [https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/kategorie/effizienz/auswahl/1078-endenergieintensitaet/bundesland/BW/#goto\\_1078](https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/kategorie/effizienz/auswahl/1078-endenergieintensitaet/bundesland/BW/#goto_1078), zuletzt abgerufen am 25. März 2021.

Fraunhofer IFAM / IREES, BHKW-Consult / Prognos AG (2014): Potenzial- und Kosten-Nutzen-Analyse zu den Einsatzmöglichkeiten von Kraft-Wärme-Kopplung (Umsetzung der EU-Energieeffizienzrichtlinie) sowie Evaluierung des KWKG im Jahr 2014, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

Fraunhofer ISI (2013): Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Prozesse – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente, [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2013/Umweltforschungsplan\\_FKZ-370946130.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2013/Umweltforschungsplan_FKZ-370946130.pdf).

Frontier Economics (2021a): Die Rolle von Wasserstoff im Wärmemarkt, Kurzstudie für Viessmann Climate Solutions, <https://www.frontier-economics.com/media/4590/wasserstoff-im-waermemarkt.pdf>.

Frontier Economics (2021b): Wasserstoff zur Dekarbonisierung des Wärmesektors, noch unveröffentlichte Studie für den DVGW.

GAV Energie (2020): Stellungnahme „Elektrische Laststeigerung Baden-Württemberg“.

Heidelberg Cement (2021): Betontechnische Daten – 1.2 Zement nach DIN EN 197-1, <https://www.betontechnische-daten.de/de/1-2-zement-nach-din-en-197>.

IVL (2019): Lithium-Ion Vehicle Battery Production. Status 2019 on Energy Use, CO2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint and Recycling. IVL Swedish Environmental Research Institute 2019.

Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Fraunhofer ISI (2019): Dekarbonisierung des Energiesystems durch verstärkten Einsatz erneuerbaren Stroms im Wärme-, Verkehrs- und Industriesektor bei gleichzeitigen Stilllegungen von Kraftwerken – Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit in Süddeutschland, Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.

Koalitionsvertrag Baden-Württemberg vom 05.05.2021: Jetzt für Morgen. Der Erneuerungsvertrag für Baden-Württemberg. [https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/dateien/PDF/210506\\_Koalitionsvertrag\\_2021-2026.pdf](https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/dateien/PDF/210506_Koalitionsvertrag_2021-2026.pdf)

Kulterer, K. (2019): Industrie 4.0 – Lösungen für effiziente Motorsysteme. Herausgegeben von der Österreichischen Energieagentur.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (2020): Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg.

Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg (2020): Klimaneutrale Kraftstoffe: CO2 aus der Zementherstellung als Rohstoff geeignet, [https://vm.baden-wuerttemberg.de/index.php?id=2022&tx\\_rsmprss\\_detail%5Bmessage%5D=114126&no\\_cache=1](https://vm.baden-wuerttemberg.de/index.php?id=2022&tx_rsmprss_detail%5Bmessage%5D=114126&no_cache=1).

Navigant, BBG und Partner, FfE, Universität Stuttgart IER (2019): Energiewende in der Industrie, Arbeitspaket 2A: Dekarbonisierungsmaßnahmen in den Fokus-Branchen, 20.02.2020.

Navigant et al. (2020a): Energiewende in der Industrie. Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Branchensteckbrief der Eisen- und Stahlindustrie. Bericht für das Bundesministerium für Energie.

Navigant et al. (2020b): Energiewende in der Industrie. Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Branchensteckbrief der NE-Metallindustrie. Bericht für das Bundesministerium für Energie.

Navigant et al. (2020c): Energiewende in der Industrie. Dekarbonisierungsmaßnahmen in den Fokusbranchen. Bericht für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a.pdf?__blob=publicationFile&v=4)

Navigant et al. (2020d): Energiewende in der Industrie. Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Branchensteckbrief der Papierindustrie. Bericht für das Bundesministerium für Energie, [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-papier.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-papier.pdf?__blob=publicationFile&v=4).

Navigant et al. (2020e): Energiewende in der Industrie. Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Branchensteckbrief der Zementindustrie. Bericht für das Bundesministerium für Energie, [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-zement.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-zement.pdf?__blob=publicationFile&v=4).

Nitsch, J. (2017): Erfolgreiche Energiewende nur mit verbesserter Energieeffizienz und einem klimagerechten Energiemarkt – Aktuelle Szenarien 2017 der deutschen Energieversorgung.

Nitsch, J., Magosch, M. (2020): Ausbau der erneuerbaren Energien für eine wirksame Klimapolitik in Baden-Württemberg - Entscheidende Schritte in den nächsten zehn Jahren, Studie im Auftrag der Plattform Erneuerbare Energien Baden-Württemberg e.V.

Papier + Technik (2021): Die Leimpresse..., <https://www.papierundtechnik.de/papiertechnik/die-leimpresse-2/>.

Prognos, Fraunhofer ISI, GWS, iinas (2020) : Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050, Dokumentation von Referenzszenario und Szenario mit Klimaschutzprogramm 2030, 10. März 2020, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

sappi (2012): Papiermaschine, <https://de.slideshare.net/SappiHouston/papiermaschine>.

Seitz, Antje (2017): Erneuerbare Energie für Prozesswärme aus Sicht der Wissenschaft, Vortrag beim Fachgespräch „Erneuerbare Energien und Abwärme in der Prozesswärme“ am 24.10.2017 in Berlin.

Statistisches Bundesamt (2008): Klassifikation der Wirtschaftszweige.

Statistisches Landesamt BW (2020): Energiebericht 2020. Online verfügbar unter: <https://www.statistik-bw.de/Service/Veroeff/Querschnittsver!F6ffentlichungen/806120001.pdf>, zuletzt abgerufen am 25. März 2021.

Statistisches Landesamt BW (2021): Erzeugung und Verwendung. Energieverbrauch der Industrie seit 2003. Online verfügbar unter <https://www.statistik-bw.de/Energie/ErzeugVerwend/EV-Industrie.jsp>, zuletzt abgerufen am 29. März 2021.

Szenariorahmen NEP 2035: Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2035, Version 2021, Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. 50Hertz Transmission, Amprion, TenneT TSO, TransnetBW.

TransnetBW (2020): Stromnetz 2050.

Umweltbundesamt (UBA) (2010): 2050: 100 %, Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen.

Umweltbundesamt (2016): CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe.

Umweltbundesamt (UBA) (2019): Wohnen und Sanieren, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-23\\_cc\\_22-2019\\_wohnenundsanieren\\_hintergrundbericht.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-23_cc_22-2019_wohnenundsanieren_hintergrundbericht.pdf).

Umweltbundesamt (UBA) (2020): Abschätzung der Treibhausgasmindernwirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung, Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politikszenerien IX“), Studie des Öko-Instituts, Fraunhofer ISI, IREES im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit sowie des Umweltbundesamtes.

Umweltbundesamt (2020b): Bilanz 2019: CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilowattstunde Strom sinken weiter. Pressemitteilung vom 08.04.2020 <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bilanz-2019-co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom>

Umweltbundesamt (2020c): Zellstoff- und Papierindustrie, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriebereiche/holz-zellstoff-papierindustrie/zellstoff-papierindustrie#anlagenbestand-in-deutschland>.

Umweltbundesamt (2020d): Dekarbonisierung der Zementindustrie, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/factsheet\\_zementindustrie.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/factsheet_zementindustrie.pdf).

Umweltbundesamt (2020e): Abfallmitverbrennung in Zementwerken, Sachverständigen Gutachten, Texte 202/2020, [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020\\_11\\_05\\_texte\\_202\\_2020\\_abfallverbrennung\\_zementwerke\\_1.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_11_05_texte_202_2020_abfallverbrennung_zementwerke_1.pdf).

Verband der Chemischen Industrie (2012a): Basischemie 2030, <https://www.vci.de/langfassungen-pdf/basischemie-2030.pdf>.

Verband der Chemischen Industrie (2012b): VCI-Analyse zur Basischemie 2030, <https://www.vci.de/die-branchen/chemie-2030/vci-analyse-zur-basischemie-2030-wertschöpfungsketten-in-der-chemischen-industrie.jsp>.

Verband der Chemischen Industrie (2020): Auf einen Blick: Chemische Industrie 2020, <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/chemische-industrie-auf-einen-blick.pdf>.

Verband Deutscher Papierfabriken (2015): Papier machen, [https://www.vdp-online.de/fileadmin/0002-VDP/07\\_Dateien/7\\_Publikationen/Papiermachen.pdf](https://www.vdp-online.de/fileadmin/0002-VDP/07_Dateien/7_Publikationen/Papiermachen.pdf).

Verband Deutscher Papierfabriken (2020a): Papierkompass, [https://www.vdp-online.de/fileadmin/0002-VDP/07\\_Dateien/7\\_Publikationen/Kompass\\_de.pdf](https://www.vdp-online.de/fileadmin/0002-VDP/07_Dateien/7_Publikationen/Kompass_de.pdf).

Verband Deutscher Papierfabriken (2020b): Presse Zahlen 2020.

Verband Deutscher Zementwerke (2020a): Zementindustrie im Überblick 2020/21.

Verband Deutscher Zementwerke (2020b): Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien, <https://www.vdz->

[online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie Dekarbonisierung Zement Beton 2020.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_Dekarbonisierung_Zement_Beton_2020.pdf).

Verband Deutscher Zementwerke (2020c): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2019, [https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/umweltschutz/Umweltdaten/VDZ\\_Umweltdaten Environmental Data 2019.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/umweltschutz/Umweltdaten/VDZ_Umweltdaten_Environmental_Data_2019.pdf).

Verband Deutscher Zementwerke (2021): Energieeffizienz, <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/energieeffizienz>.

Wolf, Stefan (2017). Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme – Potenziale und Instrumente zur Potenzialerschließung, Forschungsbericht und Dissertation an der Universität Stuttgart.

ZKG International (2015): ZKG-Handbuch Zementanlagenbau 2015/16, <https://www.zkg.de/media/downloads/handbuch-zementanlagenbau-2016-auszug.pdf>.

ZSW, IFEU, Fraunhofer ISI, Öko-Institut e.V., Hamburg Institut, Nitsch, J. (2017): Energie- und Klimaschutzziele 2030, Studie gefördert durch das Programm „Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg.

## ANNEX A FRAGEBOGEN DER ONLINE- UMFRAGE

### Befragung zu zukünftiger Stromnachfrage in der Industrie

Der VfEW Baden-Württemberg hat Frontier Economics und Fichtner Consulting damit beauftragt, eine Studie zur Entwicklung des Stromverbrauchs in Baden-Württemberg bis 2050 durchzuführen. Der Fokus der Studie liegt dabei auf dem industriellen Stromverbrauch (Großindustrie und Mittelstand).

Ein wesentlicher Bestandteil der Studie ist die Befragung von Unternehmen. Mit Ihrer Teilnahme an der Befragung können Sie aktiv dazu beitragen, dass die zukünftige Versorgungssicherheit mit Energie in Baden-Württemberg gewährleistet bleibt.

Herzlichen Dank für Ihr Mitwirken!

Die Beantwortung der einzelnen Fragen ist selbstverständlich freiwillig. Wenn Sie zu einer bestimmten Frage keine Informationen haben oder keine Einschätzung abgeben können, können Sie die entsprechende Frage einfach unausgefüllt lassen.

Kontakt für Rückfragen: Joscha Krug ([joscha.krug@frontier-economics.com](mailto:joscha.krug@frontier-economics.com))

Section 1

...

#### Aktueller Energiebedarf (2019)

Um die zukünftige Entwicklung des Strombedarfs in Baden-Württemberg abschätzen zu können, interessieren wir uns zunächst für den aktuellen Energiebedarf Ihres Unternehmens. Wir bitten Sie daher im Folgenden, den Verbrauch an verschiedenen Energieträgern in Baden-Württemberg oder an Ihrer bedeutendsten Betriebsstätte in Baden-Württemberg anzugeben. (Hierbei können Sie uns auch gerundete Werte nennen. Uns geht es an dieser Stelle um eine Einschätzung der ungefähren Größenordnung ihres Verbrauchs der einzelnen Energieträger.)

#### 1. Stromverbrauch in Baden-Württemberg oder an Ihrer bedeutendsten Betriebsstätte in Baden-Württemberg im Jahr 2019:

*GWh; Dezimalzahlen bitte mit . eingeben*

The value must be a number

## TRENDS DES ZUKÜNFTIGEN STROMVERBRAUCHS DER INDUSTRIE IN BADEN-WÜRTTEMBERG

2. Verbrauch von Erdgas in Baden-Württemberg oder an Ihrer bedeutendsten Betriebsstätte in Baden-Württemberg im Jahr 2019:

*GWh; Dezimalzahlen bitte mit . eingeben*

The value must be a number

3. Verbrauch von Kohle in Baden-Württemberg oder an Ihrer bedeutendsten Betriebsstätte in Baden-Württemberg im Jahr 2019:

*GWh; Dezimalzahlen bitte mit . eingeben*

The value must be a number

4. Verbrauch von Heizöl in Baden-Württemberg oder an Ihrer bedeutendsten Betriebsstätte in Baden-Württemberg im Jahr 2019:

*GWh; Dezimalzahlen bitte mit . eingeben*

The value must be a number

5. Verbrauch von Nah- und Fernwärme in Baden-Württemberg oder an Ihrer bedeutendsten Betriebsstätte in Baden-Württemberg im Jahr 2019:

*GWh; Dezimalzahlen bitte mit . eingeben*

The value must be a number

6. Verbrauch von biogenen Energieträgern in Baden-Württemberg oder an Ihrer bedeutendsten Betriebsstätte in Baden-Württemberg im Jahr 2019:

*GWh; Dezimalzahlen bitte mit . eingeben*

The value must be a number

## Mögliche und geplante Dekarbonisierungsmaßnahmen

In diesem Abschnitt geht es um Ihre Erwartungen hinsichtlich des zukünftigen Strombedarf Ihres Unternehmens in Baden-Württemberg und den Einfluss der dahinter stehenden Treiber, wie Dekarbonisierungsmaßnahmen, Energieeffizienzgewinne oder die Entwicklung neuer Geschäftsfelder.

7. Welche Dekarbonisierungsmaßnahmen halten Sie an Ihren Betriebsstätten in Baden-Württemberg für denkbar?

	Einsatz geplant	Einsatz nicht geplant, aber grundsätzlich möglich (bis 2030)	Einsatz nicht geplant, aber grundsätzlich möglich (bis 2050)	Einsatz nicht möglich
Elektrifizierung von Anwendungen und Prozessen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Einsatz von grünem Wasserstoff	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Einsatz von biogenen Kraftstoffen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Einsatz von synthetischen Kraftstoffen (synthetisches Methan, E-Fuels, ...)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Andere	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

## TRENDS DES ZUKÜNFTIGEN STROMVERBRAUCHS DER INDUSTRIE IN BADEN-WÜRTTEMBERG

8. Falls Sie den Einsatz der entsprechenden Dekarbonisierungsmaßnahmen planen, welchen Anteil Ihres fossilen Energiebedarfs können Sie damit vermutlich bis 2030 dekarbonisieren?

	Maßnahme nicht geplant	0% - 20%	20% - 50%	50% - 90%	90 bis 100%
Elektrifizierung von Anwendungen und Prozessen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Einsatz von grünem Wasserstoff	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Einsatz von biogenen Kraftstoffen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Einsatz von synthetischen Kraftstoffen (synthetisches Methan, E-Fuels, ...)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Andere	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

9. Wie schätzen Sie die Potentiale der entsprechenden Dekarbonisierungsmaßnahmen langfristig ein: Welchen Anteil Ihres fossilen Energiebedarfs können Sie damit vermutlich bis 2050 dekarbonisieren?

	Maßnahme nicht anwendbar	0% - 20%	20% - 50%	50% - 90%	90 bis 100%
Elektrifizierung von Anwendungen und Prozessen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Einsatz von grünem Wasserstoff	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Einsatz von biogenen Kraftstoffen	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Einsatz von synthetischen Kraftstoffen (synthetisches Methan, E-Fuels, ...)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Andere	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

## TRENDS DES ZUKÜNFTIGEN STROMVERBRAUCHS DER INDUSTRIE IN BADEN-WÜRTTEMBERG

10. In welchem Ausmaß erwarten Sie eine Verringerung des Strombedarfs durch steigende Energieeffizienz an Ihren Betriebsstätten in Baden-Württemberg?

	Keine Veränderung	Bedarfsverringerung zwischen 0 und 0,5% pro Jahr	Bedarfsverringerung zwischen 1% und 0,5% pro Jahr	Bedarfsverringerung > 1% pro Jahr
bis 2025	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2025 - 2030	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2030 - 2050	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

11. Eventuell sind in Ihrer Branche die Entwicklung neuer Geschäftsfelder oder ein Strukturwandel in der Produktion abzusehen. Haben Sie eine Vermutung, inwiefern solche Entwicklungen Ihren Strombedarf beeinflussen werden?

	Erhöhen den Strombedarf	Haben keinen Einfluss auf den Strombedarf	Verringern den Strombedarf	Keine Entwicklungen abzusehen
bis 2030	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2030 - 2050	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

## Fragen zu Ihrem Unternehmen

Um die Ergebnisse Ihres Fragebogens besser einordnen zu können, haben wir abschließend noch ein paar Fragen zu allgemeinen Eckdaten Ihres Unternehmens.

14. Welchem Wirtschaftszweig würden Sie Ihr Unternehmen zuordnen?

Select your answer



15. Wie hoch war der Umsatz Ihres Unternehmens im Jahr 2019?

- Weniger als 2 Mio. €
- 3 bis 10 Mio. €
- 11 bis 40 Mio. €
- Mehr als 40 Mio. €

16. Wie viele Mitarbeiter hatte Ihr Unternehmen im Jahr 2019?

- 1 bis 10 Mitarbeiter
- 11 bis 50 Mitarbeiter
- 51 bis 250 Mitarbeiter
- > 250 Mitarbeiter

17. Wenn wir Sie kontaktieren dürfen, hinterlassen Sie gerne hier Ihre E-Mail-Adresse:

Enter your answer

18. Sie sind einverstanden mit der Kontaktaufnahme für...

- Rückfragen
- Zusendung der finalen Studie

# TRENDS DES ZUKÜNFTIGEN STROMVERBRAUCHS DER INDUSTRIE IN BADEN-WÜRTTEMBERG

## Gesamteinschätzung des zukünftigen Strombedarfs

Bisher haben wir einzelne Treiber der zukünftigen Stromnachfrage beleuchtet. Im Folgenden soll es nun um Ihre Gesamteinschätzung des zukünftigen Strombedarfs Ihres Unternehmens gehen.

12. Wie schätzen Sie den zukünftigen Strombedarf Ihrer Betriebsstätten in Baden-Württemberg insgesamt ein, wenn Sie die diskutierten Einflussfaktoren auf die zukünftige Stromnachfrage (Energieeffizienzsteigerungen, Dekarbonisierungslösungen und neue Geschäftsfelder/Strukturwandel) berücksichtigen?

	Höher als heute	Genau wie heute	Niedriger als heute
2030	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2050	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

13. Falls Sie eine Veränderung des Strombedarfs in der Gesamtsumme vermuten: Haben Sie eine ungefähre Vorstellung davon, in welcher Größenordnung sich diese Veränderung bewegen könnte?

	Keine Veränderung oder Verringerung	Steigerung zw. 0% und 10%	Steigerung zw. 10% und 20%	Steigerung zw. 20% und 50%	Steigerung um mehr als 50%
bis 2030	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
bis 2050	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

## ANNEX B VORGEHENSWEISE SZENARIENBERECHNUNG ZUM EINFLUSS VON ELEKTRIFIZIERUNGSMÄßNAHMEN AUF DEN INDUSTRIELLEN STROMVERBRAUCH

Im Folgenden beschreiben wir im Detail, wie wir den Stromverbrauch in den in Abschnitt 4 beschriebenen Szenarien ermittelt haben.

### Vorgehensweise bei der Berechnung des Maßnahmenkombinations- und Elektrifizierungsszenarios

Die Vorgehensweise zur Ermittlung des überschlägigen industriellen Stromverbrauchs in den Jahren 2030 und 2045 ist für das Maßnahmenkombinations- und das Elektrifizierungsszenario identisch. Wir greifen auf den **Strom-Endenergieverbrauch in Baden-Württemberg im Jahr 2019** (siehe Abbildung 13 in Abschnitt 3.1) für die **Branchen** Papier und Pappe, Chemie, Metallherzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallzeugnissen, Maschinenbau, Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen, Sonstiger Fahrzeugbau, Steine und Erden sowie die Summe der weiteren Branchen zurück. Dieser aktuelle Stromverbrauch (inklusive Eigenerzeugung) wird anschließend mit einer jährlichen Veränderungsrate bis zum Jahr 2030 und anschließend mit einer jährlichen Veränderungsrate für die Jahre 2030 bis 2045 multipliziert.

Zur Ermittlung der **branchenweiten jährlichen Veränderungsrate**n haben wir auf die bereits in Abschnitt 2.3 für die weiteren Sektoren genannten Studien zurückgegriffen. In jeder Studie bzw. für jedes dort enthaltene Szenario wurde die jährliche (konstante) Veränderungsrate bis zum Jahr 2030 – basierend auf dem prognostizierten industriellen Stromverbrauch im Jahr 2030 und dem jeweiligen Basisjahr – kalkuliert. Ebenso wurde für jedes Szenario die jährliche (konstante) Veränderungsrate für die Jahre 2030 bis 2045 unter Rückgriff auf bestehende Stromverbrauchsprognosen ermittelt. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 24 dargestellt.

Für das **Maßnahmenkombinations-Szenario** nehmen wir folgende jährliche Veränderungsrate an:

- **Bis zum Jahr 2030:** Wir lassen die in Abbildung 24 dargestellten oberen Werte (über 1 % p. a.) außer Acht, da diese Szenarien umfassende Elektrifizierungsmaßnahmen betrachten. Die niedrigsten Werte (bis 0,1 %) schließen wir ebenfalls aus, da die befragten Unternehmen i. d. R. von einem Wirtschaftswachstum ausgehen und oftmals bereits Pläne zur Elektrifizierung existieren. Dementsprechend erhalten wir eine Bandbreite von jährlichen Veränderungsrate des industriellen Stromverbrauchs von ca. **0,2 bis 0,8 % p. a.** Wir weisen dementsprechend im Folgenden für das

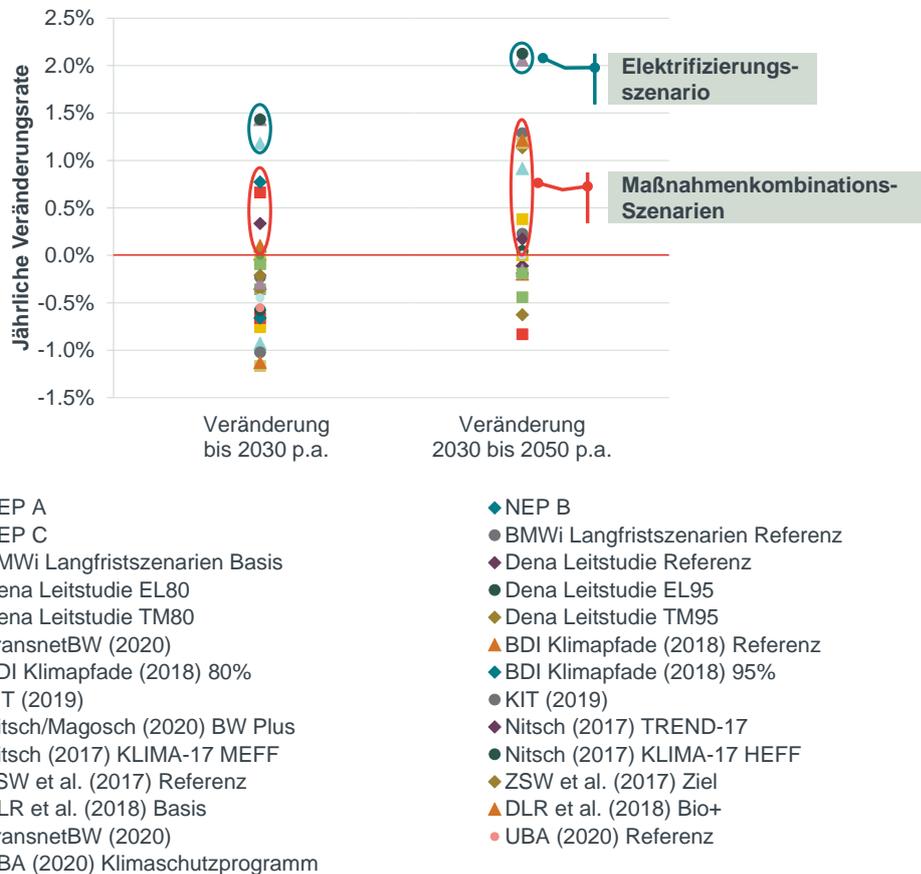
Maßnahmenkombinations-Szenario bis 2030 einen unteren und einen oberen Wert aus.

- Für die Jahre von **2030 bis 2045**: Für den Zeitraum nach 2030 zeigen die Erkenntnisse aus den Interviews, dass eine große Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung des Stromverbrauchs besteht. Eine Elektrifizierung ist zwar in der überwiegenden Zahl der Fälle technisch möglich, die Umsetzung hängt aber von der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Dekarbonisierungsoptionen sowie der (zukünftig) verfügbaren Infrastruktur ab. Erneut lassen wir die Werte sinkender Stromverbräuche außer Acht, die überwiegend auf Referenzszenarien (also die Klimaziele nicht erreichenden) Szenarien basieren. Die jährlichen Veränderungsrate für die Szenarien ohne umfassende Elektrifizierung liegen somit zwischen gut 0 und 1,3 % p. a. (für den Zeitraum 2030-2050). Aus dieser Bandbreite wählen wir für die jährliche Steigerungsrate einen Wert etwas oberhalb des Durchschnitts von **1 % p. a.** (2030-2050) und nehmen zusätzlich an, dass der hierdurch resultierende Stromverbrauch im Jahr 2050 durch eine Beschleunigung der Dekarbonisierung gemäß KSK 2021, bereits im Jahr 2045 erreicht wird.

Für das **Elektrifizierungsszenario** kommen wir bei Betrachtung der Elektrifizierungsszenarien von Dena (2018) und dem Szenario C des Szenariorahmens des Netzentwicklungsplans 2035 auf folgende jährliche Veränderungsrate:

- **Bis zum Jahr 2030** gehen die Elektrifizierungsszenarien von Dena (2018) sowie das Szenario C des NEP 2035 von einem 1,2%- bis 1,4%-igen Anstieg des industriellen Stromverbrauchs pro Jahr aus. Wir wählen aus dieser Spannbreite den Mittelwert i. H. v. **1,3 % p. a.**
- Für die Jahre von **2030 bis 2045/2050** sind lediglich Prognosen von Dena (2018) verfügbar. Die dort enthaltenen Elektrifizierungsszenarien prognostizieren einen Anstieg des industriellen Stromverbrauchs von gut **2 % p. a.** im Zeitraum 2030-2050. Diese Steigerungsrate legen wir auch in unseren Berechnungen zugrunde und nehmen wiederum an, dass der hierdurch resultierende Stromverbrauch im Jahr 2050 durch eine Beschleunigung der Dekarbonisierung gemäß KSK 2021 bereits im Jahr 2045 erreicht wird.

**Abbildung 24** Jährliche Veränderungsrate des Stromverbrauchs in Deutschland und Baden-Württemberg bis zum Jahr 2030 sowie zwischen den Jahren 2030 bis 2050 in Deutschland und Baden-Württemberg in verschiedenen Studien



Quelle: Frontier Economics/FICHTNER auf Basis der genannten Studien

### Vorgehensweise bei der Berechnung des maximalen Elektrifizierungsszenarios

Für die Ermittlung der Abschätzung eines maximalen Stromverbrauchs je Branche greifen wir zunächst - analog zu den beiden anderen Szenarien - auf den **Strom-Endenergieverbrauch (inklusive Eigenerzeugung) in Baden-Württemberg im Jahr 2019** (siehe Abbildung 13 in Abschnitt 3.1) für die o. g. Branchen zurück.

Dazu addieren wir den **Anteil des heutigen energetischen<sup>145</sup> und nicht zur Eigenerzeugung von Strom verwendeten<sup>146</sup> Endenergieverbrauchs fossiler**

<sup>145</sup> Der nach Wirtschaftszweig ausgewiesene fossile Energieverbrauch für Baden-Württemberg enthält auch den nicht-energetischen Verbrauch. Wir bereinigen diesen um die zur Eigenstromerzeugung verwendete Menge an fossilen Energieträgern. Hierfür greifen wir – mangels bundeslandspezifischer Daten – auf den Anteil an nicht-energetischer Nutzung je Wirtschaftszweig deutschlandweit zurück, vgl. Destatis, „Energieverbrauch der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Nutzung des Energieverbrauchs, Wirtschaftszweige, Energieträger“ für das Jahr 2019. Eine nicht-energetische Nutzung findet bei den von uns betrachteten Sektoren insbesondere in der Chemie-Industrie (25 %) statt.

<sup>146</sup> Der nach Wirtschaftszweig ausgewiesene fossile Energieverbrauch für Baden-Württemberg enthält auch den von den Unternehmen zur Eigenerzeugung von Strom verwendeten Verbrauch fossiler Energieträger. Da der eigenerzeugte Strom bereits in den aktuellen Stromverbrauch enthalten ist, bereinigen wir den aktuellen fossilen Energieverbrauch je Wirtschaftszweig für Baden-Württemberg. Dies geschieht wiederum anhand deutschlandweiter wirtschaftszweigspezifischer Anteile für den zur Eigenerzeugung von Strom

**Energieträger in der jeweiligen Branche in Baden-Württemberg, der maximal durch Strom ersetzt werden kann.** Hierbei nehmen wir an, dass **max. 90 %** des fossilen Energieträgerverbrauchs **elektrifiziert** werden kann, und angesichts **höherer Wirkungsgrade bei direkter Elektrifizierung** 1 kWh fossiler Energieträger durch **0,85 kWh** Strom ersetzt werden kann.<sup>147</sup>

Auf Basis des so ermittelten Stromverbrauchs im Jahr 2045 und des aktuellen Stromverbrauchs im Jahr 2019 leiten wir dann branchenspezifische jährliche Wachstumsraten sowie eine industrieweite jährliche Wachstumsrate für Baden-Württemberg ab und vergleichen diese mit den jährlichen Wachstumsraten der anderen beiden Szenarien. Es zeigt sich, dass die resultierenden Werte für das Jahr 2045 nahe an der Stromverbrauchsindikation aus dem Elektrifizierungsszenario liegen. Die Werte dieses Szenarios lassen sich somit durch die „Kontrollrechnung“ mit maximalen Elektrifizierungspotenzialen in ihrer Größenordnung plausibilisieren.

---

verwendeten fossilen Energieträgereinsatz. Diese liegen bei Papier und Pappe bei 38 %, im Maschinenbau bei 22 %, bei der Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen bei 12 %, in der Chemieindustrie bei 12 %, bei der Metallerzeugung und -bearbeitung bei 8 % und für die Summe über weitere Branchen bei 9 %. Vgl. Destatis, „Elektrizitätserzeugung, Nettowärmeerzeugung, Kraft-Wärme-Kopplung: Deutschland, Jahre, Wirtschaftszweige, Energieträger, Erh.ü. Elektrizitäts- u. Wärmeerzeug. i. Verarb. Gew.“ für das Jahr 2019.

<sup>147</sup> So benötigt bspw. ein Elektrokessel zur Wärmeerzeugung ca. 10 % weniger kWh als ein Erdgaskessels. Bei Strombezug und Wärmeerzeugung durch Power-to-Heat anstelle eines Gas-KWK-Kraftwerks bedarf es hingegen eines 20 % geringeren Energieeinsatzes.



