

Systematische Potenzialermittlung mit Blick auf den Bedarf an Wasserstoff in Baden- Württemberg

Ergebnisbericht des Projektes SpeedH2





Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

Meitnerstraße 1

70563 Stuttgart

Bearbeiter: Maike Schmidt, Patrick Wolf, Dr. Peter Bickel, Marcel Klingler, Andreas Püttner

Titelbild

© AdobeStock / Photocreo Bednarek / terranets bw

Stuttgart, Dezember 2023

Inhalt

Inhalt	3
Zusammenfassung	4
1 Hintergrund und Überblick	6
2 Bedarfserhebung – Überblick über die Datengrundlage	8
3 Auswertung Industrie	10
3.1 Datengrundlage und Methodik	10
3.1.1 Überblick Erhebungsdaten	10
3.1.2 Methodik Bedarfsabschätzung	12
3.1.3 Einschränkungen und Hinweise zur Ergebnisinterpretation	15
3.2 Darstellung der Ergebnisse	16
3.2.1 Überblick gemeldete Bedarfe in der Industrie.....	16
3.2.2 Gesamtbedarfe nach Wirtschaftszweigen	17
3.2.3 Regionale Aufschlüsselung der Gesamtbedarfe	19
3.2.4 Exkurs: Stofflicher Einsatz von H ₂	26
4 Auswertung Straßenverkehr	28
4.1 Datengrundlage und Methodik	28
4.2 Darstellung der Ergebnisse	31
4.2.1 Gesamtbedarf nach Fahrzeugklassen.....	31
4.2.2 Regionale Aufschlüsselung	34
5 Auswertung Energieversorgung	40
5.1 Datengrundlage und Methodik	40
5.2 Darstellung der Ergebnisse	40
6 Gesamtschau & Einordnung der Ergebnisse	42
6.1 Gesamtschau	42
6.2 Abschätzung Elektrolyseleistung.....	45
6.3 Einordnung der Ergebnisse	46
7 Referenzen	48
Abbildungen	50
Tabellen	51

Zusammenfassung

Die im Rahmen der vorliegenden Studie ermittelten Wasserstoffbedarfe für Baden-Württemberg liegen kurz-, mittel- und langfristig deutlich höher als in bisherigen Erhebungen. Hierbei spielen sicherlich auch die Auswirkungen der aktuellen „Energiekrise“, ausgelöst durch den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine, eine Rolle, weil sich Unternehmen gezwungener Maßen mit Alternativlösungen zum Erdgas bei gleichzeitig sehr hohen Strompreisen auseinandersetzen mussten. Dies dürfte die Entwicklung beschleunigt und um etwa 5 bis 10 Jahre vorgezogen haben.

Auch wenn die Stichprobe der Rückmeldungen nicht repräsentativ für alle Branchen ist, stellt sie eine deutliche Verbesserung zur bisherigen Datenbasis dar. Insbesondere wurden in den Branchen mit erwartetem hohem Wasserstoffbedarf, wie der Chemieindustrie, der Papierindustrie, der Glasindustrie und der Zementindustrie zentrale Akteure erfasst, was eine belastbare Datengrundlage für eine Hochrechnung schafft.

Die Ergebnisse der Befragung belegen eindeutig, dass nicht nur die energieintensive Industrie auf Wasserstoff angewiesen sein wird, sondern auch eine breite Zahl der übrigen Industriebereiche, u.a. in den Bereichen Maschinenbau und Herstellung von Metallerzeugnissen, einen zukünftigen Einsatz von Wasserstoff plant. In der Industrie zeigen die Bedarfsmeldungen und die darauf basierenden Hochrechnungen schnell wachsende Bedarfe schon deutlich vor 2030. Dabei spiegelt die Höhe der regionalen Bedarfe Baden-Württembergs Industriestruktur wider und ist geprägt durch die Standorte der energieintensiven bzw. der Grundstoffindustrie.

Schnell wachsende Bedarfe zeigen sich auch im Straßenverkehr und dies in allen Kreisen in Baden-Württemberg. Die für den Schwerlastverkehr auf der Straße benötigten Wasserstoffmengen sind dennoch deutlich niedriger als die Industriebedarfe. Allerdings könnten sich gerade diese Anwendungen sehr gut als Anker für H₂-Hubs eignen, nicht zuletzt aufgrund von Reinheitsanforderungen für den benötigten Wasserstoff für Brennstoffzellen. Um für Baden-Württembergs Industrie den Technologievorsprung im Bereich Brennstoffzellen zu sichern, muss gerade auch die Logistikbranche schon deutlich vor 2030 Wasserstoff erhalten, gerade um entsprechende Referenzprojekte entwickeln zu können.

Die Bedarfe der großen Kraftwerke zur Stromerzeugung und einiger Großverbraucher wurden erst ab 2032 gemeldet, steigen dann aber sprunghaft an, weil diese Wasserstoff in so großem Umfang benötigen, dass sie nur über Pipelines beliefert werden können. Insofern antizipieren die Bedarfsmeldungen die Verfügbarkeit der Leitungskapazitäten ab dem Jahr 2032.

Langfristig (ab 2035/40) passen aus heutiger Sicht die für das Kernnetz geplanten Leitungskapazitäten insbesondere mit den erwartbaren großen (Einzel-)Bedarfen räumlich gut zusammen. Zur Deckung der früher, vor allem in der Zeit bis 2030, gemeldeten bzw. ermittelten Bedarfe von Industrie und Straßenverkehr, ist der Aufbau erheblicher Elektrolyse-Kapazitäten in H₂-Hubs zur lokalen Versorgung erforderlich. Dies ist darüber hinaus auch in den Regionen mit späterer Pipeline-Anbindung erforderlich. Hier sollte auf Basis der Ergebnisse zur Regionalisierung zeitnah in die Planung des Aufbaus von Wasserstoff-Hubs

und regionalen Versorgungslösungen eingestiegen werden. Darüber hinaus sollten die Bedarfsabfragen in regelmäßigen Abständen wiederholt werden, um eine Grundlage zur Präzisierung der Planungen bereitzustellen. Dies wird mit den Prozessen zur Netzentwicklungsplanung für Erdgas/Wasserstoff zukünftig sichergestellt. Für den Verkehr sind weitere Untersuchungen zum potenziellen Betankungsverhalten bei wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen durchzuführen, um die Ergebnisse der Bedarfsregionalisierung weiter schärfen zu können.

Bei der Interpretation der vorgelegten Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Bedarfsmeldungen unter der Prämisse erfolgten, dass ab 2040 aufgrund der Klimaschutzanforderungen kein fossiles Erdgas mehr zur Verfügung steht und der Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Preisen zur Verfügung steht. Vorausgesetzt die Vor-Ort-Erzeugung erfüllt das letztgenannte Kriterium und die Bedarfe aus Industrie und Verkehrssektor entwickeln sich bis 2030 wie gemeldet, ist zu deren Deckung eine Elektrolyseleistung in der Größenordnung von ca. 3,0 bis 4,1 GW erforderlich (unter Annahme von 6.000 bzw. 4.500 Volllaststunden und einem Wirkungsgrad der Elektrolyse 70 %).

Von zentraler Bedeutung für die Planungen der H₂-Hubs ist eine integrierte Infrastrukturplanung. Hier müssen Stromnetzausbau, Wasserstoffnetzausbau und Wärmenetzausbau aufeinander abgestimmt, aber auch abgestimmt mit den Erzeugungskapazitäten für erneuerbaren Strom erfolgen. Hier sind weiterführende Analysen zu empfehlen, um das Erreichen der für Baden-Württemberg festgelegten Sektorziele auch auf Infrastrukturebene zu untermauern. Weiterhin erscheint es empfehlenswert, insbesondere Informations- und Unterstützungsangebote zur Planung einer klimaneutralen Energieversorgung für kleine und mittlere Unternehmen anzubieten bzw. auszuweiten.

Die nächsten Schritte für die Fortentwicklung der Infrastrukturplanung umfassen zunächst die Konkretisierung der auf Stadtwerke- und Verteilnetzebene gemeldeten Bedarfe. Weiterhin ist die Wirtschaftlichkeit von Vor-Ort-Erzeugungsoptionen vor dem Hintergrund der Ausbauplanungen des Fernleitungsnetzes hinsichtlich der Kriterien Kapazität, Betriebsdauer, Einbindung vor Ort (Wärmenetz) sowie Stabilisierung der Stromversorgung zu analysieren. Schließlich sind ideale H₂-Hub-Konstellationen in den einzelnen Kreisen zu identifizieren. Dies umfasst die Identifizierung von Standorten, Elektrolyseleistung und H₂-Transportkonzepten unter Berücksichtigung der erneuerbaren Stromerzeugungspotenziale und der jeweiligen Stromnetzkonstellation.

1 Hintergrund und Überblick

Das erste Spitzengespräch „Wasserstoffinfrastruktur“, das unter Leitung von Umweltministerin Walker am 19.12.2022 stattfand, offenbarte einerseits einen hohen Handlungsdruck hinsichtlich der Wasserstoffinfrastrukturentwicklung andererseits aber auch verbreitete Informations- und Wissensdefizite. Um eine fundierte Wissensbasis aufzubauen, die dann erst gezielte weitere Schritte hin zu einer Konkretisierung der Infrastrukturplanung ermöglicht, wurde zu Beginn des Jahres 2023 der Fachdialog Wasserstoffinfrastruktur initiiert. Ausgangspunkt war u.a., dass durch die veränderte Energiemarktsituation und die steigenden Anforderungen an die Industrie, klimaneutral zu produzieren, die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom und vor allem von grünem Wasserstoff für die Industrie zu einem entscheidenden Standortfaktor wird. Damit Baden-Württemberg im internationalen Standortwettbewerb attraktiv bleibt, muss diese über eine adäquate Infrastrukturentwicklung gewährleistet werden. Ansonsten drohen Nachteile, wenn andere Bundesländer oder europäische Nachbarländer zu einem früheren Zeitpunkt grünen Wasserstoff bereitstellen können. Der Anspruch des Fachdialogs Wasserstoffinfrastruktur war daher, dass jedes Unternehmen in Baden-Württemberg Wasserstoff bekommen soll, unabhängig von Zeitpunkt und geografischer Lage.

Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die verschiedenen Elemente der Wasserstoffversorgung optimal aufeinander abgestimmt und eingesetzt werden. Dies sind die Vor-Ort-Erzeugung und Direktversorgung von Unternehmen, lokale Wasserstoffhubs zur Nahversorgung, die Verteilinfrastruktur zur Verbindung von Wasserstoffkunden mit den lokalen Hubs ebenso wie als Schnittstelle zum übergeordneten Fernleitungsnetz, das für den Transport großer Mengen an Wasserstoff benötigt wird. Voraussetzung für einen optimierten Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur sind detaillierte Kenntnisse zum Wasserstoffbedarf. Bestehende Analysen basierten jedoch entweder auf Szenarien, die aufgrund der Annahme, dass jeweils die energieeffizienteste Technologie zum Einsatz kommt, Wasserstoff ausschließlich in der energieintensiven Industrie, den Kraftwerken zur Stromerzeugung und in Teilen des Verkehrs vorsehen oder auf veralteten Befragungsdaten. Dabei zeigte sich schon bei dieser unzureichenden Datenbasis eine große Bandbreite der Wasserstoffbedarfe für 2040. Diese reichte von 30 Terawattstunden (TWh) bis 53,5 TWh. Im Rahmen der Fachdialoge wurde ein differenzierteres Bild der zukünftigen Wasserstoffabnehmer gezeichnet. Dabei wurde für die energieintensive Industrie, die Papier-, Chemie-, Zement- und Glasindustrie, die Mineralölverarbeitung und die Kraftwerke zur Stromerzeugung sowie zur Spitzenlastabdeckung in Kraftwärmekopplungsanlagen und Wärmenetze der Einsatz von Wasserstoff als Rohstoff und Energieträger als „alternativlos“ eingestuft. Im Schwerlastverkehr, in Rechenzentren und für die Prozesswärmebereitstellung in anderen Branchen bzw. Industriezweigen wurde der Wasserstoffeinsatz ebenso als notwendig und sinnvoll erachtet, ohne jedoch die benötigten Wasserstoffmengen in irgendeiner Weise quantifizieren zu können.

Um die für eine Wasserstoffinfrastrukturplanung erforderliche Wissensbasis zum Wasserstoffbedarf zu schaffen, wurde eine konzertierte Aktion zur Wasserstoffbedarfs-erhebung in Baden-Württemberg initiiert: Im Rahmen von Informationsveranstaltungen vor Ort,

die von Industrie- und Handelskammern intensiv beworben und unterstützt wurden, wurden die Hintergründe der Bedarfsabfrage beleuchtet, um möglichst viele Unternehmen zur Teilnahme zu motivieren. Diese erfolgte über das Ausfüllen eines Online-Fragebogens, der durch die terranets bw als Ferngasleitungsnetzbetreiber für Baden-Württemberg bereitgestellt wurde. Der Fokus der Befragung lag zwar auf dem produzierenden Gewerbe, der Fragebogen war aber für alle potenziellen Wasserstoffbedarfsträger offen, um für die Wasserstoffinfrastrukturplanung einen möglichst umfassenden und detaillierten Überblick über alle potenziellen Wasserstoffabnehmer zu erhalten.

2 Bedarfserhebung – Überblick über die Datengrundlage

Mit dem Ziel, eine möglichst große und belastbare Datenbasis für die Wasserstoffinfrastrukturplanung zu gewinnen, initiierte das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gemeinsam mit einem breiten Bündnis aus Netzbetreibern, dem baden-württembergischen Industrie- und Handelskammertag sowie Branchen- und Wirtschaftsverbänden eine Befragung mittels eines webgestützten Fragebogens. Die Abfrage wurde von mehreren Informationsveranstaltungen vor Ort begleitet.

Die nachfolgend beschriebene Auswertung umfasste alle Meldungen, die bis zum 27. Oktober 2023 eingegangen waren. Der Fragebogen ist aber bis auf weiteres unter <https://www.h2-fuer-bw.de/bedarfsmeldung> verfügbar, so dass Unternehmen auch weiterhin der terranets BW ihre Bedarfe melden können. Neben einer Reihe von Informationen zur Charakterisierung des meldenden Unternehmens bzw. der meldenden Einrichtung werden im Fragebogen Informationen zum aktuellen Energieeinsatz sowie zum geplanten zukünftigen Wasserstoffeinsatz und -bedarf abgefragt. Die Angabe des gemeldeten Wasserstoffbedarfs erfolgt dabei unter der Prämisse, dass **„ab 2040 kein kohlenstoffhaltiger Energieträger mehr verfügbar ist, und dass Wasserstoff zukünftig zu konkurrenzfähigen Preisen und in ausreichender Menge verfügbar ist“**. Ergänzend zur Online-Bedarfsabfrage wurde eine begleitende Unternehmensbefragung durchgeführt, die allerdings keine wesentliche Erweiterung der Datengrundlage erbrachte.

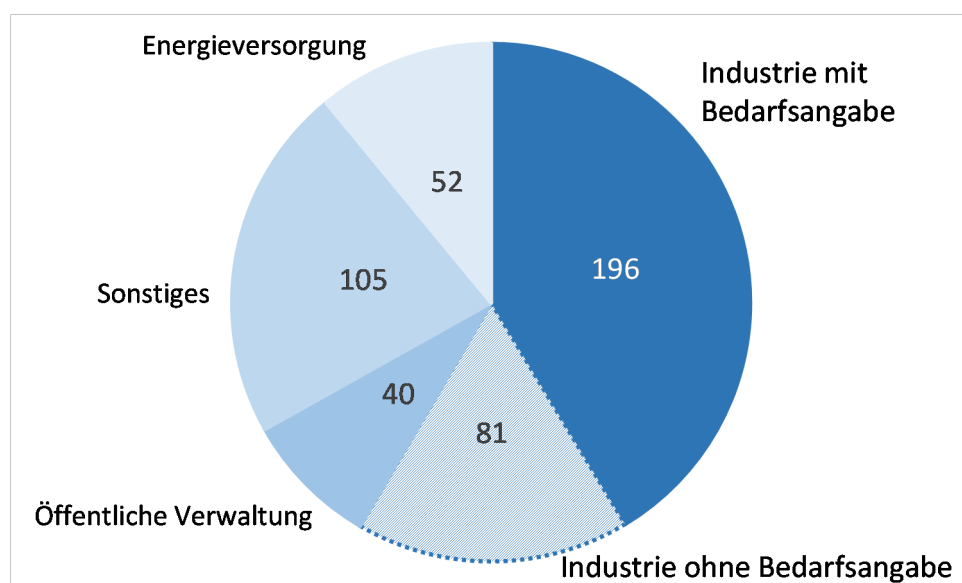


Abbildung 1: Übersicht über die Teilnehmerzusammensetzung der Gesamtstichprobe.

Insgesamt standen 474 Rückmeldungen zur Verfügung, für die eine Zustimmung zur Weitergabe der Daten zur wissenschaftlichen Auswertung vorliegt. Insgesamt 197 Meldungen entfallen auf andere Sektoren als das verarbeitende Gewerbe. Davon sind 52 Meldungen dem Bereich Energieversorgung (einschließlich Stadtwerke und Verteilnetzbetreiber) zuzurechnen, 40 dem Bereich öffentliche Verwaltung und 105 Meldungen der Kategorie Sonstiges. Logistikunternehmen haben nur sehr vereinzelt gemeldet. 277 Meldungen stammen von Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes (nachfolgend als „Industrie“ bezeichnet), von

denen 196 ihren Wasserstoffbedarf quantifiziert haben, während 81 Unternehmen den Bedarf nicht quantifizieren konnten. Für die Hochrechnung der Wasserstoffbedarfe der Industrie sind diese Meldungen trotzdem sehr hilfreich, um besser einschätzen zu können, in welchen Branchen potenziell Wasserstoff benötigt wird.

Angesichts einer Zahl von rund 8.500 Unternehmen mit mehr als 20 Mitarbeitenden im produzierenden Gewerbe in Baden-Württemberg wird mit der vorliegenden Stichprobe keine Repräsentativität erreicht. Dennoch stellen die Rückmeldungen eine solide Basis für die Hochrechnung des Wasserstoffbedarfs als erste Orientierung für die H₂-Infrastrukturplanung dar. Für eine detailliertere Planung sind allerdings weitere Datenerhebungen und Analysen erforderlich.

Die zur Verfügung stehenden Datensätze wurden umfassend auf Plausibilität geprüft und für die weitere Auswertung aufbereitet. Die Plausibilitätsprüfung des gemeldeten Wasserstoffbedarfs umfasste unter anderem einen Abgleich mit dem Erdgasverbrauch (sofern angegeben) sowie den Vergleich der angegebenen Größenordnung des Wasserstoffbedarfs mit den Angaben anderer Unternehmen derselben Branche. In Abstimmung mit der terranets bw wurden Angaben in t/a, soweit erforderlich, mit dem oberen Heizwert von Wasserstoff (39,39 MWh/t) in MWh/a umgerechnet; zur Umrechnung von Angaben in MWh/h in MWh/a wurden bei Bedarf Werte von 3000 h/a für Industrieunternehmen und 6.000 h/a für Verteilnetzbetreiber angesetzt. Im Fall von nur lückenhaft ausgefüllten Zeitreihen des H₂-Bedarfs wurde der letzte angegebene Wert bis zur Angabe eines neuen Werts bzw. bis zum Jahr 2040 fortgeschrieben.

3 Auswertung Industrie

3.1 Datengrundlage und Methodik

3.1.1 Überblick Erhebungsdaten

Betrachtet wurden für die Auswertungen im Industriebereich die Rückmeldungen aus dem verarbeitenden Gewerbe einschließlich den Bereichen Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden (Wirtschaftszweigkategorien 8 bis 33). Aus den genannten Bereichen nahmen insgesamt 277 Unternehmen an der Umfrage teil. Von diesen wiederum konnten 196 Unternehmen konkrete Wasserstoffbedarfe benennen. Die restlichen 81 Teilnehmer gaben an, in der Zukunft zwar Wasserstoff zu benötigen, machten aber keine weiteren Angaben im Hinblick auf konkrete Bedarfsmengen.

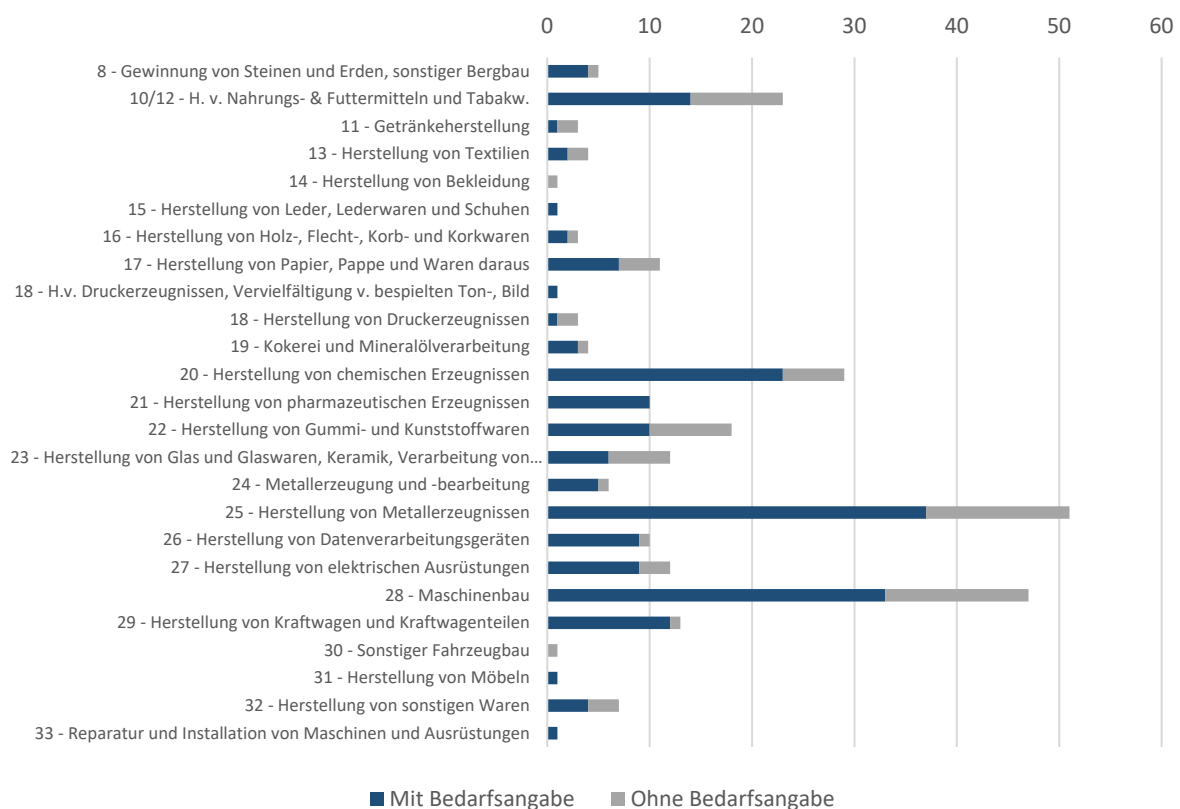


Abbildung 2: Überblick über die Anzahl an Rückmeldungen aus dem verarbeitenden Gewerbe nach Wirtschaftszweig.

Abbildung 2 zeigt nachfolgend die Anzahl der erhaltenen Rückmeldungen aufgeschlüsselt nach Wirtschaftszweig. Zudem ist die Information enthalten, ob eine Bedarfsangabe erfolgte oder nur die Information vorlag, dass zukünftig Wasserstoff benötigt wird. Die Verteilung der Rückmeldungen spiegelt hierbei relativ deutlich die Industriestruktur Baden-Württembergs wider. So stammen mit dem Maschinenbau und der Herstellung von Metallerzeugnissen die meisten Rückmeldungen aus den Wirtschaftsbereichen mit der größten Unternehmenszahl in Baden-Württemberg, während für Wirtschaftsbereiche mit einer eher geringen Zahl an Unternehmen, wie etwa die Herstellung von Bekleidung sowie Herstellung von Leder,

Lederwaren und Schuhen, nur wenige Rückmeldungen erfolgten. Insgesamt bestätigte sich die Ausgangsthese aus dem Fachdialog, dass nicht ausschließlich die energieintensive Industrie Wasserstoffbedarfe haben wird, sondern eine Vielzahl an Wirtschaftszweigen Wasserstoff als Option für eine klimaneutrale Produktion nutzen möchte.

Hervorzuheben ist, dass an der Befragung zahlreiche zentrale Akteure insbesondere aus den energieintensiven Industrien sowie den wichtigsten Branchen in Baden-Württemberg mit Blick auf die Wasserstoffnachfrage teilgenommen haben, wodurch die Bedarfe von den erwarteten Hauptverbrauchern bereits zu einem großen Anteil durch die Befragung erfasst wurden. Vor allem in den Wirtschaftsbereichen der Mineralölverarbeitung und der Herstellung chemischer sowie pharmazeutischer Erzeugnisse konnte eine sehr gute Abdeckung der wesentlichsten Unternehmen erreicht werden. Hierdurch ist die Datengrundlage trotz der nicht erreichten Repräsentativität eine solide Basis für die anschließende Hochrechnung.

Die Abfrage zu den zukünftigen Bedarfen fokussierte auf die Erhebung der jeweiligen H₂-Gesamtbedarfe. Eine konkrete mengenmäßige Aufschlüsselung nach Einsatzbereich des Wasserstoffs wurde nicht erhoben, jedoch erfolgte eine allgemeine Abfrage der zukünftig geplanten Anwendungsgebiete. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt.

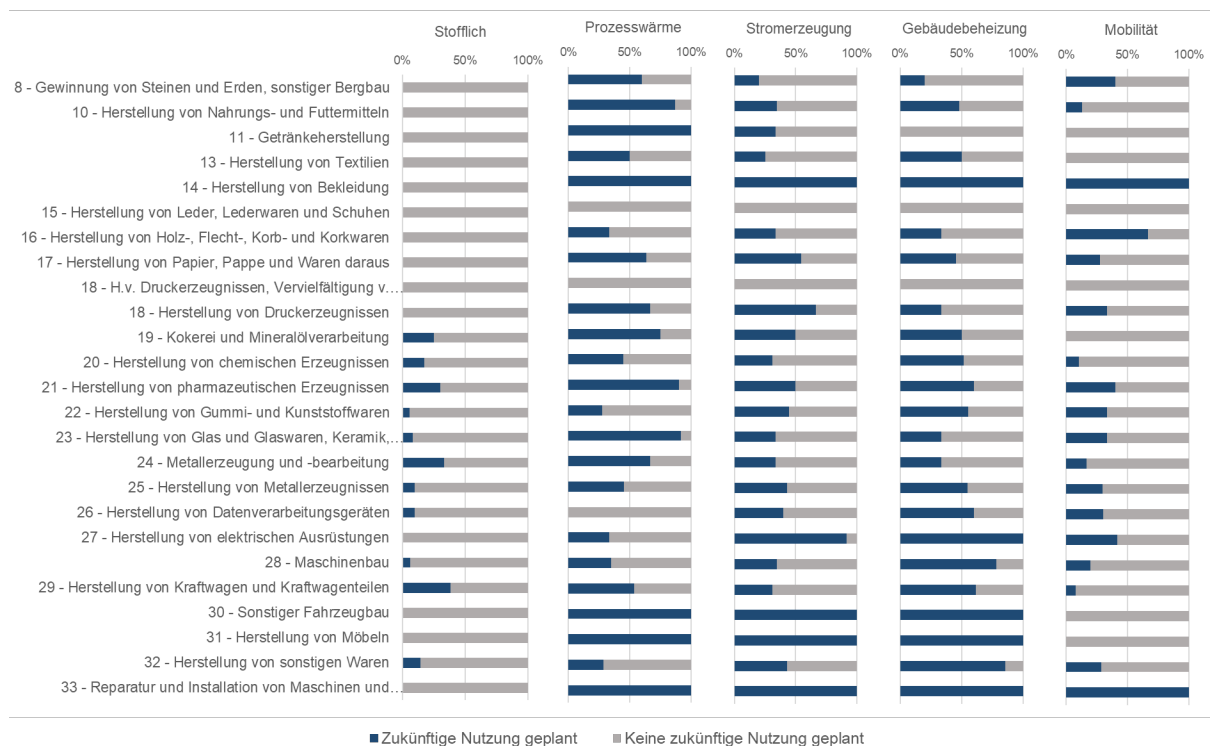


Abbildung 3: Überblick über die Rückmeldungen zu den geplanten Nutzungsarten von Wasserstoff nach Wirtschaftszweig.

Die Darstellung zeigt die Anteile der Unternehmen des jeweiligen Wirtschaftszweigs, die in den entsprechenden Bereichen eine zukünftige Nutzung gemeldet haben. Es ist jedoch zu beachten, dass die Aussagekraft der Darstellung bei Wirtschaftszweigen mit nur sehr wenigen Teilnehmenden begrenzt ist. Für eine bessere Interpretation wird deshalb auf die in Abbildung 2 dargestellten Teilnehmerzahlen je Wirtschaftszweig verwiesen.

Aus den Rückmeldungen wird ersichtlich, dass die stoffliche Wasserstoffnutzung nur in einem Teil der Industriebereiche überhaupt eine Rolle spielt und auch innerhalb dieser Wirtschaftszweige nur vereinzelt genannt wurde (siehe für einen gesonderten Überblick zur stofflichen Nutzung auch Abschnitt 3.2.4). Im Gegensatz hierzu spielt der Einsatz von Wasserstoff zur Prozesswärmebereitstellung erwartungsgemäß in nahezu allen Wirtschaftszweigen eine Rolle. Insbesondere in den Bereichen Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln, der Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen sowie der Glasherstellung und Verarbeitung von Steinen und Erden wird dieser Anwendungsbereich von nahezu allen Teilnehmern angeführt. In den übrigen Wirtschaftszweigen schwankt der Anteil der Meldungen zu den jeweiligen Einsatzgebieten deutlich stärker. Eine Ausnahme bildet der Bereich der Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, in dem keiner der Befragten einen zukünftigen Einsatz im Rahmen der Prozesswärmeerzeugung sieht, woraus auch geschlossen werden kann, dass hier keine Prozesswärme benötigt wird. Die Nutzung von Wasserstoff zur Stromerzeugung ist ähnlich zur Prozesswärme in nahezu allen Wirtschaftszweigen vertreten, wird jedoch in der Regel von weniger als der Hälfte der Teilnehmer in den Wirtschaftszweigen als zukünftig für sie relevant benannt. Die Nutzung von Wasserstoff für die Raum- bzw. Gebäudewärmeerzeugung ist der insgesamt am häufigsten genannte geplante Einsatzbereich. Hier sei aber darauf hingewiesen, dass die hier angeführte Gebäudebeheizung nicht vergleichbar mit dem Einsatz von Wasserstoff zur Wohngebäudebeheizung in Einzelheizungen ist, weil es sich überwiegend um Industriehallen handeln dürfte, die beheizt werden müssen, für die Elektrifizierungsoptionen als Alternative in der Regel nur eingeschränkt in Frage kommen. Der Einsatz von Wasserstoff im Mobilitätsbereich wurde nur vereinzelt genannt wurde.

3.1.2 Methodik Bedarfsabschätzung

Die in den nachfolgenden Abschnitten für die Industrie ausgewiesenen Bedarfe setzen sich aus zwei Bestandteilen zusammen. Zum einen sind dies die konkret im Rahmen der Umfrage mitgeteilten Wasserstoffbedarfe einzelner Unternehmen. Diese wurden in der jeweils angegebenen Höhe angesetzt und bilden somit die als gesichert angesehene Grundbasis des zukünftigen Wasserstoffbedarfs, wie sie nachfolgend in Abschnitt 3.2.1 dargestellt wird.¹ Zum anderen wurde als zweiter Bestandteil für die Unternehmen, welche sich nicht an der Umfrage beteiligt haben, eine Bedarfsbandbreite abgeschätzt. Diese bildet gemeinsam mit den konkret gemeldeten Bedarfen den in Abschnitt 3.2.2 ausgewiesenen Gesamtbedarf für die Industrie.

Die Abschätzung des nicht gemeldeten Bedarfs basiert auf den im Rahmen der Befragung erhaltenen Informationen zum Wasserstoffbedarf in den einzelnen Wirtschaftszweigen. Hierfür wurden die Unternehmen, von welchen Bedarfsangaben vorlagen, basierend auf ihrem Hauptwirtschaftszweig gruppiert und für jedes Unternehmen der jeweilige Wasserstoffbedarf

¹ Im Rahmen der Aufbereitung und Plausibilitätsprüfung der Erhebungsdaten erfolgte in seltenen Fällen eine Korrektur der Angaben, sofern diese als in hohem Maße unplausibel bzw. unrealistisch erschienen und die Fehlerursache ersichtlich war (bspw. vorliegender Einheitenfehler). Siehe hierzu auch Abschnitt 2.

je Mitarbeiter ermittelt.^{2,3} Da die im Rahmen der Befragung erhobenen Wasserstoffbedarfe auch innerhalb der gleichen Wirtschaftszweige mitunter stark streuen, wurde für jeden Wirtschaftszweig eine Bandbreite abgeschätzt, welche auf der jeweiligen Verteilung des mitarbeiterspezifischen Wasserstoffbedarfs fußt. Die Bandbreite wird durch die jeweiligen Lageparameter beschrieben, wie sie schematisch in Abbildung 4 dargestellt und auch nachfolgend kurz erläutert werden.

- **Minimum:** Niedrigster mitarbeiterspezifischer H₂-Bedarf, der im jeweiligen Wirtschaftszweig gemeldet wurde.
- **Niedrig:** Unteres Ende der Spannbreite ohne Ausreißer (auch als unterer Whisker bezeichnet). Entspricht dem letzten gemeldeten mitarbeiterspezifischen H₂-Bedarf, der noch im 1,5-fachen des Interquartilsabstands (3. Quartil - 1. Quartil) liegt. Falls die Verteilung keine Ausreißer aufweist, ist dieser Wert gleich dem Minimum.
- **1. Quartil:** Entspricht dem mitarbeiterspezifischen H₂-Bedarf, für den gilt: mindestens 25 % der Meldungen sind niedriger oder gleich und höchstens 75 % der Meldungen sind höher.
- **Median:** Medianwert aus den vorliegenden Befragungsdaten. Er entspricht dem Wert, welcher in der Mitte der Datenverteilung liegt, d.h. 50 % des mitarbeiterspezifischen H₂-Bedarfs liegt oberhalb und 50 % unterhalb dieses Wertes. Im Rahmen der Abschätzung wurde der Median dem Mittelwert als Lageparameter für den Mittelpunkt der Verteilung vorgezogen, da dieser als stabiles Maß auch bei asymmetrischen Verteilungen und Ausreißern herangezogen werden kann.
- **3. Quartil:** Entspricht dem mitarbeiterspezifischen H₂-Bedarf, für den gilt: mindestens 75 % der Meldungen sind niedriger oder gleich und höchstens 25 % der Meldungen sind höher.
- **Hoch:** Oberes Ende der Spannbreite ohne Ausreißer (auch als oberer Whisker bezeichnet). Entspricht dem letzten gemeldeten Bedarf, der noch im 1,5-fachen des Interquartilsabstands (3. Quartil - 1. Quartil) liegt. Falls die Verteilung keine Ausreißer aufweist, ist dieser Wert gleich dem Maximum.
- **Maximum:** Höchster mitarbeiterspezifischen H₂-Bedarf, der im jeweiligen Wirtschaftszweig gemeldet wurde.

² Eine mitarbeiterspezifische Betrachtung zur Beschreibung von Industriebedarfen wurde in der Vergangenheit bereits in anderen Studien genutzt, siehe bspw. Lauterbach et al. (2011) sowie Blesl et al. (2008)

³ In hoch diversifizierten Wirtschaftszweigen wurde, sofern es die Datenbasis erlaubte, eine weitere Differenzierung zwischen Unterwirtschaftszweigen vorgenommen. Dies erfolgte in den WZ-Kategorien 10, 17, 20, 23 und 24.

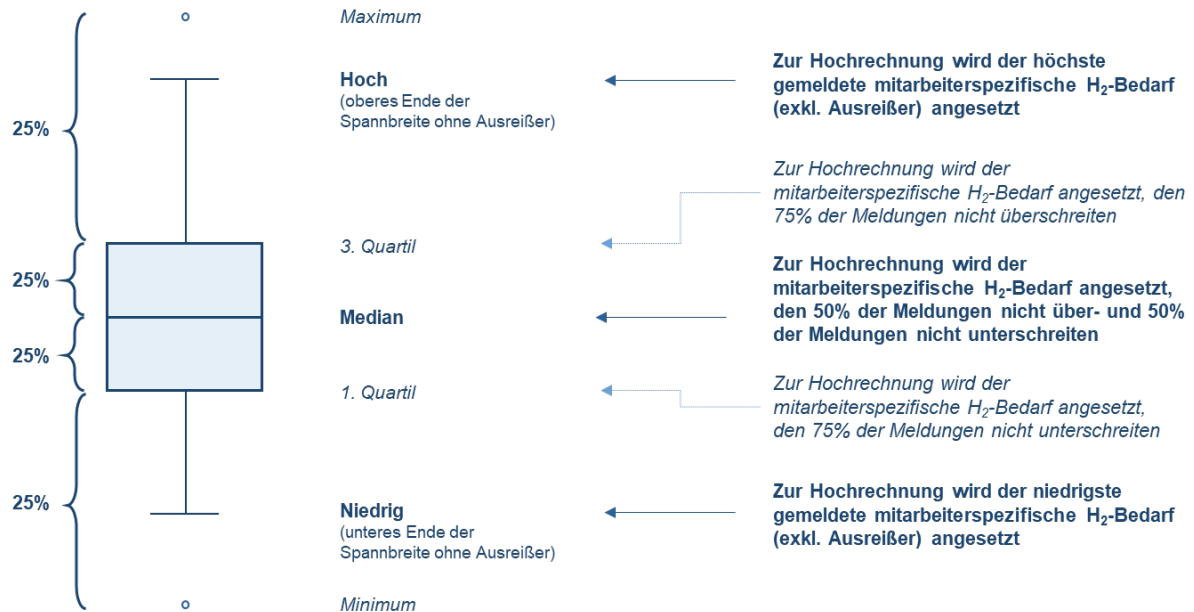


Abbildung 4: Darstellung der Lageparameter.

Sofern es die vorliegende Datenbasis erlaubte, erfolgte innerhalb der Wirtschaftszweige nochmals eine Unterscheidung im Hinblick auf die Unternehmensgrößenklasse. So wurden für Großunternehmen nach Möglichkeit eigene Bandbreiten für die mitarbeiterspezifischen Bedarfe berechnet, um hier eine Verzerrung zu vermeiden. Für einzelne bekannte Großverbraucher, die sich nicht an der Befragung beteiligt haben und bei welchen bedarfsmäßig eine Sonderrolle innerhalb des jeweiligen Wirtschaftszweigs erwartet wird, bspw. die Unternehmen der Zementherstellung im Bereich Verarbeitung von Steinen und Erden, erfolgte zudem eine separate Abschätzung der Bedarfsbandbreite basierend auf den Rückmeldungen anderer vergleichbarer Unternehmen sowie ergänzenden Informationen, wie bspw. Unternehmensankündigungen und den in Neuwirth et al. (2022) ermittelten Wasserstoffbedarfen energieintensiver Industrien.

Teilweise war die Anzahl an Rückmeldungen aus einzelnen Wirtschaftszweigen nicht ausreichend, um eine sinnvolle Verteilung zu berechnen, weshalb für diese zusätzliche, vereinfachende Annahmen getroffen werden mussten. So wurden, falls in einem Wirtschaftszweig keine konkreten Bedarfe gemeldet wurden, die mitarbeiterspezifischen H₂-Bedarfe des dem jeweiligen Wirtschaftszweig am nächsten stehenden alternativen Wirtschaftszweigs angesetzt.⁴ Sofern in einem Wirtschaftszweig nur sehr wenige Meldungen erfolgten, wurde basierend auf diesen und den Meldungen in ähnlichen Wirtschaftszweigen eine Verteilung abgeschätzt.

Die berechneten mitarbeiterspezifischen Wasserstoffbedarfe wurden anschließend mit der Anzahl der Beschäftigten im jeweiligen Wirtschaftszweig in den einzelnen Stadt- und

⁴ Im Rahmen dessen wurden für den Wirtschaftszweig der Tabakverarbeitung die sich für den Wirtschaftszweig Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln ergebenden mitarbeiterspezifischen H₂-Bedarfe angesetzt. Für den Bereich Sonstiger Fahrzeugbau wurden zudem die sich für die Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen ergebenden Werte unterstellt.

Landkreisen (abzüglich der jeweiligen Zahl an Beschäftigten in den Unternehmen, welche im Rahmen der Umfrage bereits Bedarfsangaben gemacht haben) multipliziert. Zur Ermittlung der Gesamtbedarfe wurden die im Rahmen der Hochrechnung ermittelten Bedarfe schließlich zu den in der Umfrage gemeldeten Bedarfen addiert. Dieser Schritt wurde zur Ermittlung der letztendlichen Bedarfsbandbreiten für die verschiedenen Szenarien (Niedrig, Median, Hoch) durchgeführt.

Die für die Hochrechnungen sowie die anschließende Regionalisierung der Bedarfe herangezogenen Informationen zur Industrie- und Beschäftigtenstruktur Baden-Württembergs basieren auf den vom Statistischen Landesamt veröffentlichten Strukturdaten im Verarbeitenden Gewerbe mit Bezugsjahr 2022 (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2023a, 2023b, 2023c). Ergänzend hierzu erfolgten zusätzliche Recherchen in u.a. Unternehmensdatenbanken, wie der Firmendatenbank des Baden-Württembergischen Industrie- und Handelskammertages, Veröffentlichungen von Branchenverbänden sowie dem Unternehmensregister. Die Recherchen dienten insbesondere der Identifizierung der Großunternehmen in den einzelnen Wirtschaftszweigen sowie zur Abschätzung von Beschäftigtenzahlen in Bereichen und Regionen welche, u.a. aufgrund einer geringen Unternehmensanzahl und deshalb möglichen Nachverfolgbarkeit, nicht in der amtlichen Statistik ausgewiesen wurden.

Die Ergebnisdarstellungen in den folgenden Kapiteln fokussieren auf den Median als Basis für die Hochrechnung der weiteren Bedarfe aus der Industrie. Für eine bessere Einschätzung der möglichen Schwankungsbreiten in der Hochrechnung werden jedoch auch die Ergebnisse unter Nutzung der Werte im Szenario ‚Niedrig‘ und ‚Hoch‘ ausgewiesen.

3.1.3 Einschränkungen und Hinweise zur Ergebnisinterpretation

Für eine bessere Interpretation der nachfolgend dargestellten Ergebnisse ist es notwendig, sich die bestehenden Einschränkungen in Datenbasis und Methodik sowie die allgemeinen Grundannahmen der Befragung zu vergegenwärtigen.

Eine Einschränkung betrifft hier zunächst den Umfang der für die Auswertung zugrundeliegenden Daten. So kann trotz der zahlreichen und umfassenden Rückmeldungen und Bedarfsmeldungen aus den unterschiedlichsten Industriebereichen allein aufgrund der in hohem Maße diversifizierten Industriestruktur Baden-Württembergs nicht von einer generellen Repräsentativität ausgegangen werden. Die breiten Rückmeldungen von kleinen, mittleren und auch großen Unternehmen bilden aber dennoch eine solide Grundlage für eine erste Hochrechnung der Bedarfe, wobei gerade auch die zahlreichen Bedarfsangaben von großen Unternehmen und zentralen zukünftigen Wasserstoffverbrauchern eine sehr gute und stabile Basis für die Abschätzung der zukünftigen Wasserstoffbedarfe darstellen. Es ist weiterhin zu berücksichtigen, dass die Erhebung über einen Online-Fragebogen erfolgte. Auch wenn von den Teilnehmenden durchaus häufig gemeldet wurde, dass zukünftig keine Wasserstoffbedarfe bestehen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass aufgrund des eigenen Entschlusses zur Teilnahme bevorzugt motivierte Unternehmen teilnahmen, die auch tatsächlich einen Wasserstoffbedarf sehen. Dies kann letztendlich dazu führen, dass der im Rahmen der Hochrechnung ermittelte Bedarf eher über- als unterschätzt wird. Ob dieser Effekt tatsächlich vorliegt kann allerdings nicht überprüft werden. Im Hinblick auf die Methodik ist

zudem zu berücksichtigen, dass die Hochrechnung auf Unternehmen im verarbeitenden Gewerbe mit 20 oder mehr Mitarbeitern basiert. Unternehmen mit weniger als 20 Beschäftigten konnten aufgrund der Berichtskreisgrenze in der Landesstatistik und einer somit fehlenden Datenbasis nicht in die Betrachtungen aufgenommen und auch nicht belastbar abgeschätzt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die hier anfallenden Bedarfe zu keiner wesentlichen Erhöhung führen und durch die vorliegende Schwankungsbreite in der Hochrechnung abgedeckt sind. Alternativ wäre als Bezugsgröße für die Hochrechnung der Wasserstoffbedarfe auch die Ausweisung des Bedarfs je Umsatz denkbar. Diese Größe konnte jedoch aufgrund der unzureichenden wirtschaftszweig- und unternehmensspezifischen Datenverfügbarkeiten, vor allem auch im Hinblick auf die Regionalisierung, nicht herangezogen werden.

Für die Interpretation der in den nachfolgenden Abschnitten aufgezeigten Ergebnisse ist es zusätzlich wichtig, einen Blick auf die Rahmenbedingungen und Annahmen der Befragung zu werfen. So war die unterstellte Grundannahme, auf der basierend die Teilnehmenden ihre Bedarfseinschätzungen getroffen haben die, dass spätestens 2040 in Baden-Württemberg keine fossilen Energieträger mehr eingesetzt werden dürfen bzw. ab 2040 kein fossiles Erdgas mehr per Fernleitung geliefert und dass Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Preisen und in ausreichender Menge verfügbar ist. Hintergrund war, dass das primäre Ziel der Befragung die Schaffung einer Entscheidungsgrundlage für die Infrastrukturplanung war, wofür es einer sinnvollen Entkopplung der Bedarfsabschätzungen von unsicheren ökonomischen Variablen bedurfte. Im Rahmen der Ergebnisauswertung musste zudem unterstellt werden, dass die Unternehmen ihren H₂-Bedarf sowie auch die technischen Möglichkeiten zum Einsatz von H₂ realistisch einschätzen können. So erfolgte im Rahmen der Aufbereitung der Bedarfsdaten lediglich eine generelle Plausibilitätsprüfung, mittels welcher in sehr seltenen Fällen ersichtliche Einheitenfehler korrigiert und in hohem Maße unrealistische Angaben ausgeschlossen wurden. Letztendlich ist jedoch generell zu berücksichtigen, dass es sich bei den Bedarfsangaben, gerade auch im Hinblick auf die mitunter nicht klar prognostizierbaren technischen Entwicklungsfortschritte, stets um Aussagen unter Unsicherheit handelt.

3.2 Darstellung der Ergebnisse

3.2.1 Überblick gemeldete Bedarfe in der Industrie

Abbildung 5 zeigt nachfolgend einen Überblick über die gemeldeten Bedarfe in ihrer Entwicklung von 2025 bis 2040. Bereits für das Jahr 2025 zeigt sich hier allein aus den direkt gemeldeten Bedarfen eine Wasserstoffnachfrage von 2,4 TWh. Diese setzt sich zum einen zusammen aus bereits heute bestehenden, vor allem stofflichen Bedarfen, insbesondere in der Mineralölverarbeitung und der chemischen Industrie (siehe hier auch Abschnitt 3.2.4). Zum anderen beinhaltet diese aber auch die Angaben von Unternehmen, die unter den entsprechenden Rahmenbedingungen und im Hinblick auf die genutzten Prozesse die Möglichkeit zu einem frühzeitigen Einsatz von Wasserstoff im Rahmen der Prozesswärmeerzeugung sehen.

Bis 2030 zeigt sich eine Verdopplung der Bedarfe gegenüber 2025. Der Anstieg wird insbesondere bestimmt durch steigende Bedarfe in den Bereichen der Herstellung von

pharmazeutischen Erzeugnissen, der Papierherstellung, dem Maschinenbau sowie der Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, und der Verarbeitung von Steinen und Erden.

Innerhalb des nächsten 5-Jahreszeitraums bis 2035 erhöhen sich die gemeldeten Bedarfe auf knapp 17 TWh. Aus der Entwicklung wird ersichtlich, dass diese Zeitspanne von vielen Unternehmen als Haupttransformationsphase zur klimaneutralen Produktion gesehen wird. Insbesondere die Wirtschaftszweige, die bereits in den vorherigen Jahren die Wasserstoffnachfrage dominierten, zeigen hier nochmal deutliche Bedarfssteigerungen, wobei allein die Mineralölverarbeitung und die Zementindustrie knapp 65 % der gemeldeten Bedarfe im Jahr 2035 stellen.

Der Zeitraum zwischen 2035 und 2040 ist durch nur noch vergleichsweise geringe Bedarfssteigerungen von etwa 0,3 TWh, insbesondere in den Bereichen des Maschinenbaus und der Herstellung von Metallerzeugnissen, gekennzeichnet. Dies unterstreicht, dass aus Unternehmenssicht gerade in der energieintensiven Industrie auf eine Umsetzung der wesentlichen Transformationsschritte bereits bis 2035 abgezielt wird.

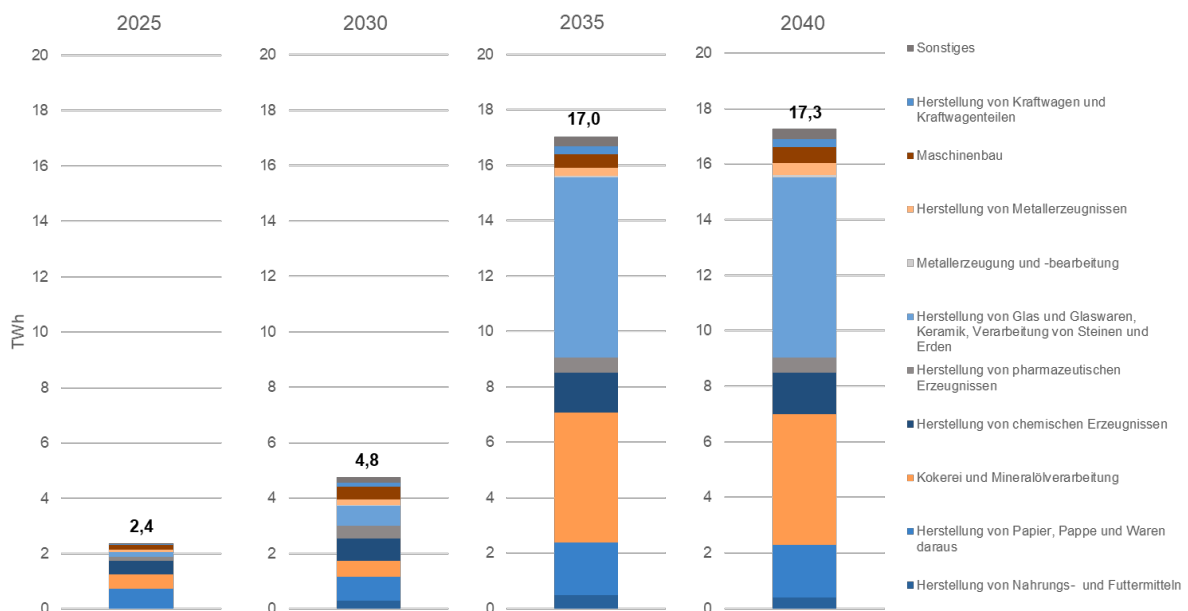


Abbildung 5: Übersicht über gemeldete Bedarfe nach Wirtschaftszweig.

3.2.2 Gesamtbedarfe nach Wirtschaftszweigen

Um einen Gesamtüberblick über die verarbeitende Industrie zu bekommen, wurden für die Unternehmen, für die keine Bedarfsangaben vorlagen, entweder weil sie sich nicht an der Umfrage beteiligt haben oder im Rahmen der Umfrage keine konkreten Bedarfe benennen konnten, zusätzlich Bedarfsbandbreiten nach der in Abschnitt 3.1.2 dargestellten Methodik hochgerechnet. Die resultierenden Ergebnisse für die einzelnen Wirtschaftszweige wurden

anschließend zu den gemeldeten Bedarfen addiert und mündeten in den in Abbildung 6 dargestellten Gesamtbedarfen der Industrie.⁵

Für das Jahr 2025 wird ein Wasserstoffbedarf von etwa 3,9 TWh ausgewiesen, welcher zu großen Teilen von einzelnen Großverbraucherfirmen insbesondere im Bereich der Chemie-, Mineralöl- und Papierindustrie dominiert wird. Die übrigen Bedarfe zeigen sich vor allem in den Bereichen Grundstoffchemie, Papierherstellung und der Herstellung von Glas u. Glaswaren sowie Keramik, in denen von den Befragungsteilnehmern vermehrt ein frühzeitiger Wasserstoffeinsatz unter den unterstellten Rahmenbedingungen gemeldet wurde.

Bis 2030 verdreifacht sich der H₂-Gesamtbedarf in der Industrie auf etwa 11,7 TWh. Starke Bedarfszuwächse zeigen sich hierbei insbesondere in den energieintensiven Bereichen Papierherstellung und Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik sowie der Verarbeitung von Steinen und Erden. Auch in der Herstellung von Metallerzeugnissen und dem Maschinenbau sind erkennbare Zuwächse zu verzeichnen, wobei die Gesamtbedarfe hier vor allem durch die große Anzahl an Betrieben und Beschäftigten in diesen Wirtschaftszweigen getrieben wird.

Von 2030 bis 2035 erfolgt erneut eine nahezu Verdreifachung der Wasserstoffbedarfe. Der Anstieg wird dominiert von enormen Bedarfen in der Zementindustrie und der Mineralölverarbeitung, welche sich für 2035 auf über 15 TWh summieren. Eine wesentliche Ursache hierfür ist, dass neben den Bedarfen zur Prozesswärmeerzeugung auch durch einzelne Akteure hohe Wasserstoffmengen zur Erzeugung synthetischer Kraftstoffe nachgefragt werden. Für das Jahr 2040 zeigen sich aufgrund der geringen Bedarfssteigerungen aus der Umfrage auch im Rahmen der Hochrechnung nur moderate Anstiege in der Wasserstoffnachfrage.

Stellt man einen Vergleich zum Hoch-Szenario an, in welchem der Bedarf im Jahr 2040 etwa doppelt so hoch wie in der Medianbetrachtung liegt, lassen sich sehr gut Rückschlüsse auf die Schwankungsbreiten und Unsicherheiten einzelner Wirtschaftsbereiche ziehen. Insbesondere in der chemischen, mineralölverarbeitenden und pharmazeutischen Industrie haben sich viele der zentralen Akteure an der Befragung beteiligt, was in einer vergleichsweise geringen Schwankungsbreite und damit einer höheren Sicherheit bei den abgeschätzten Bedarfen resultiert. In anderen Bereichen, insbesondere der Papierindustrie, der Herstellung von Metallerzeugnissen und dem Maschinenbau, liegen hingegen aufgrund stark unterschiedlicher Bedarfsmeldungen deutlich größere Unsicherheiten vor.

⁵ Die Szenarien Niedrig und Hoch dienen vornehmlich zur Darstellung der berechneten Bedarfsbandbreite und damit auch einer besseren Einschätzung der vorliegenden Schwankungen in den Bedarfsangaben. Für die nachfolgenden Ausführungen wird vor allem auf das am realistischsten eingeschätzte Medianszenario fokussiert.

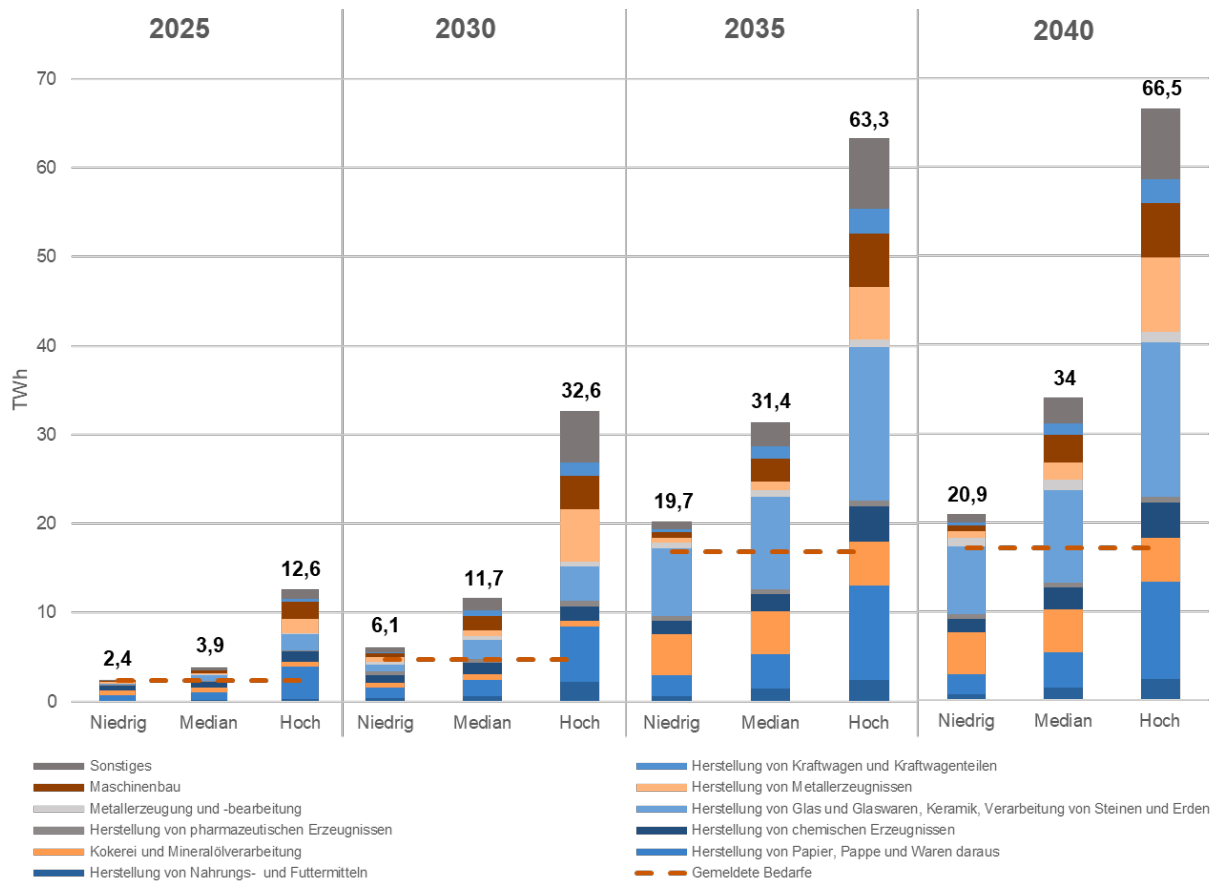


Abbildung 6: H₂-Gesamtbedarfe im Bereich Industrie nach Wirtschaftszweigen und Szenario.

3.2.3 Regionale Aufschlüsselung der Gesamtbedarfe

Abbildung 7 zeigt nachfolgend die Ergebnisse der Regionalisierung der Gesamtnachfrage auf Ebene der Stadt- und Landkreise. Die errechneten Bedarfsbandbreiten für die einzelnen Kreise werden zudem in Abbildung 8 bis Abbildung 11 für die vier Betrachtungsjahre dargestellt.

Für das Jahr 2025 zeigen sich bereits erste Bedarfe, wobei das Gesamtbild vor allem durch wenige Großverbraucher dominiert wird. Zentrale Nachfrager finden sich im Stadtkreis Karlsruhe und im Landkreis Lörrach. Aber auch im Ostalbkreis und den Landkreisen Heilbronn sowie Ravensburg ist vereinzelt ein frühzeitiger geplanter Wasserstoffeinsatz erkennbar. Im Hinblick auf die Gesamtnachfrage ist bereits in nahezu allen Kreisen ein potentieller Wasserstoffbedarf vorhanden, wobei sich insbesondere in Regionen mit ansässiger Industrie in den Bereichen Papierherstellung sowie Verarbeitung von Steinen und Erden bereits frühzeitig große Schwankungsbreiten ergeben.

Bis 2030 zeigt sich in allen Kreisen ein deutlicher Bedarfsanstieg im Medianszenario. Die regionalen Bedarfe werden dominiert vom Ostalbkreis und Ortenaukreis sowie den Landkreisen Heilbronn und Heidenheim. In den großen Bedarfsbandbreiten spiegeln sich sehr gut die deutlich unterschiedlichen Einschätzungen zum zukünftigen Wasserstoffbedarf innerhalb der einzelnen Wirtschaftszweige wider.

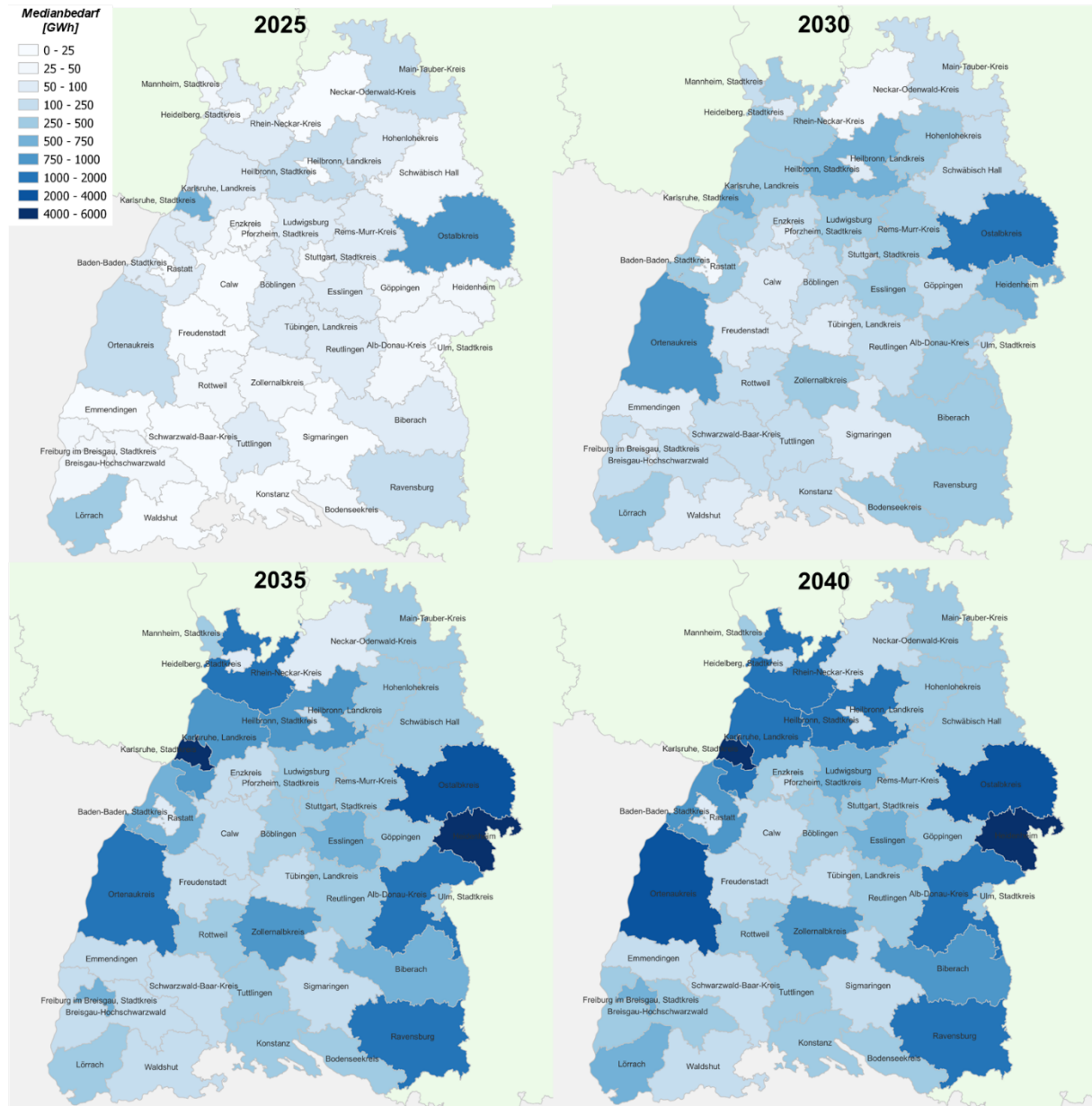


Abbildung 7: Kartendarstellung der industriellen Wasserstoffnachfrage nach Stadt- und Landkreisen im Medianszenario.

Geografisch zeigen sich spätestens 2035 deutliche Bedarfsschwerpunkte entlang des Rheins und der bayrischen Grenze und damit in Regionen, die in besonderem Maße durch energieintensive Industrien und Grundstoffindustrien geprägt sind. Zwischen 2030 und 2035 verzeichnen zudem einzelne Großverbraucher, insbesondere im Stadtkreis Karlsruhe sowie Landkreis Heidenheim, enorme Bedarfsanstiege, welche zeitlich mit den Planungen zum Ausbau des Wasserstoff-Kernnetzes zusammenlaufen (für eine Illustration des geplanten Netzausbaus siehe auch Abbildung 24). Im Zentrum Baden-Württembergs sticht vor allem der Zollernalbkreis hervor, welcher insbesondere mit Blick auf die Verarbeitung von Steinen und Erden ab 2035 erhöhte Wasserstoffbedarfe aufweist.

Wie sich bereits in der Gesamtübersicht zum Wasserstoffbedarf in der Industrie zeigte, sind die zusätzlichen Bedarfsanstiege zwischen 2035 und 2040 vergleichsweise moderat, was sich

auch auf der regionalen Betrachtungsebene widerspiegelt. Erkennbare weitere Anstiege zeigen sich in diesem Zeitraum vor allem im Ortenaukreis, dem Enzkreis sowie dem Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald.

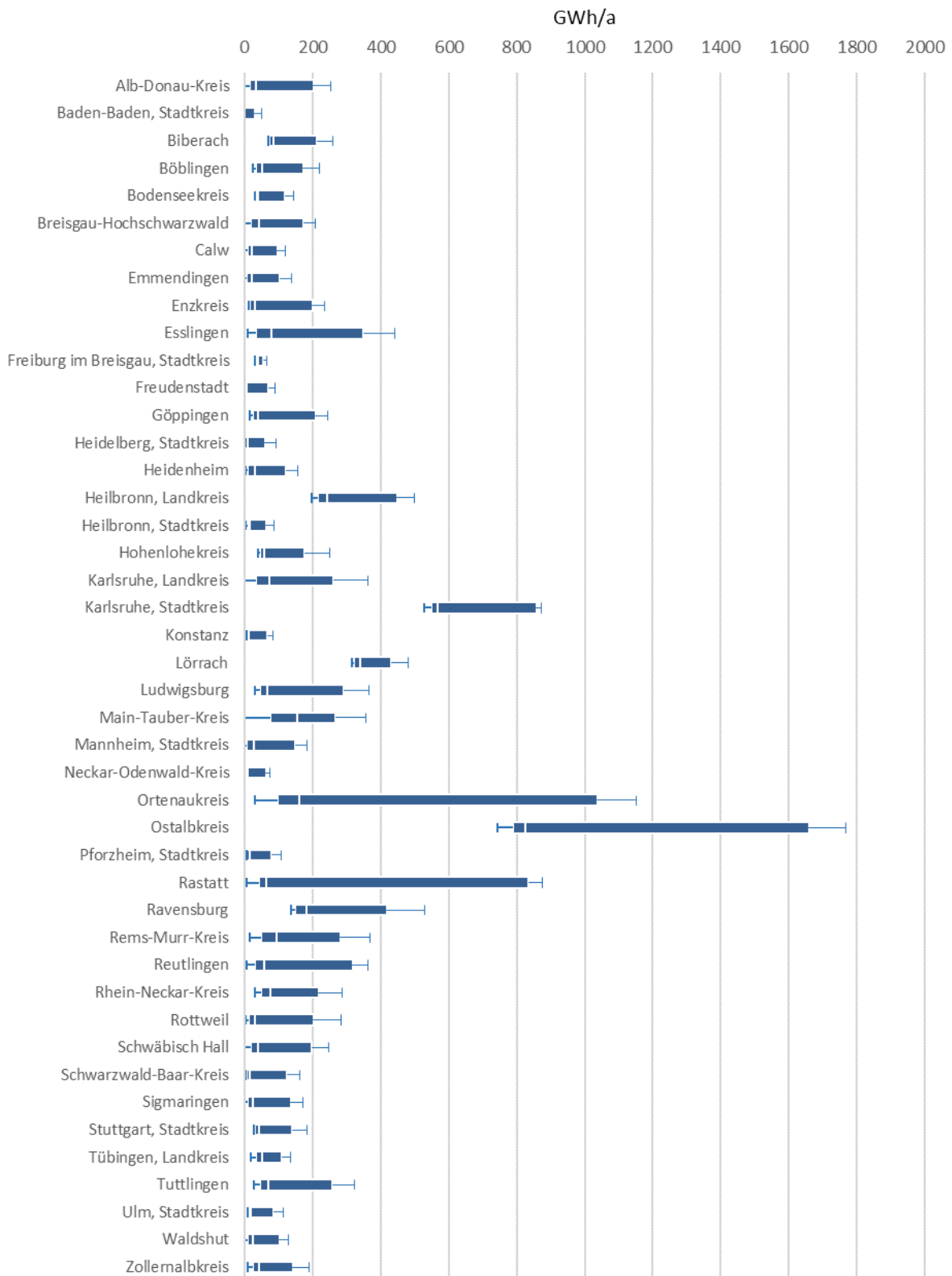


Abbildung 8: Überblick über die industrielle Wasserstoffnachfrage nach Stadt- und Landkreisen und Szenario 2025.

Die Darstellung zeigt die sich für die einzelnen Landkreise ergebenden Bandbreiten des Wasserstoffbedarfs (konkrete Meldungen zzgl. der Spannweite für die hochgerechneten Bedarfe). Der Medianwert wird hierbei durch den weißen Strich innerhalb der Balken gekennzeichnet.

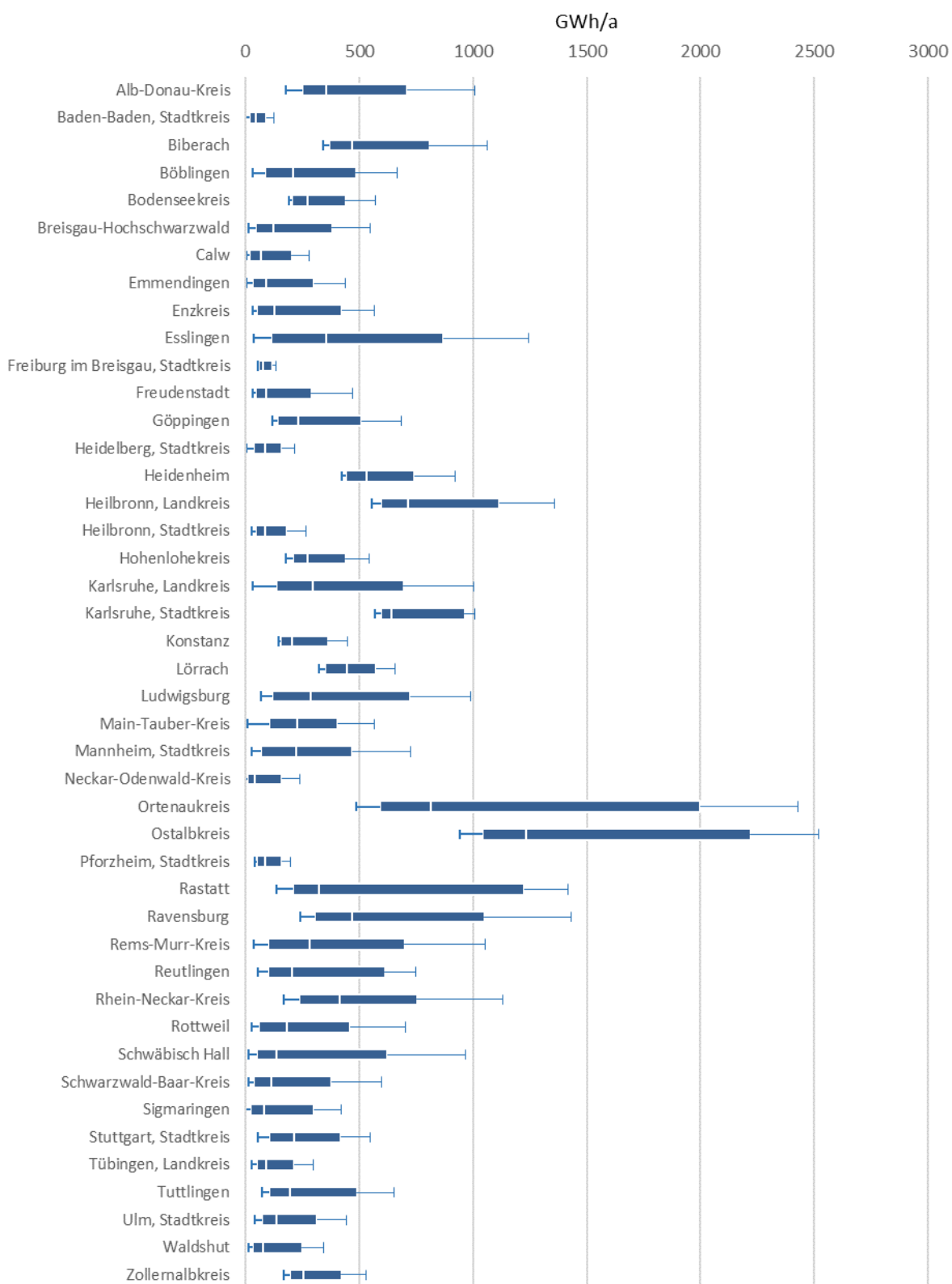


Abbildung 9: Überblick über die industrielle Wasserstoffnachfrage nach Stadt- und Landkreisen und Szenario 2030.

Die Darstellung zeigt die sich für die einzelnen Landkreise ergebenden Bandbreiten des Wasserstoffbedarfs (konkrete Meldungen zzgl. der Spannweite für die hochgerechneten Bedarfe). Der Medianwert wird hierbei durch den weißen Strich innerhalb der Balken gekennzeichnet.

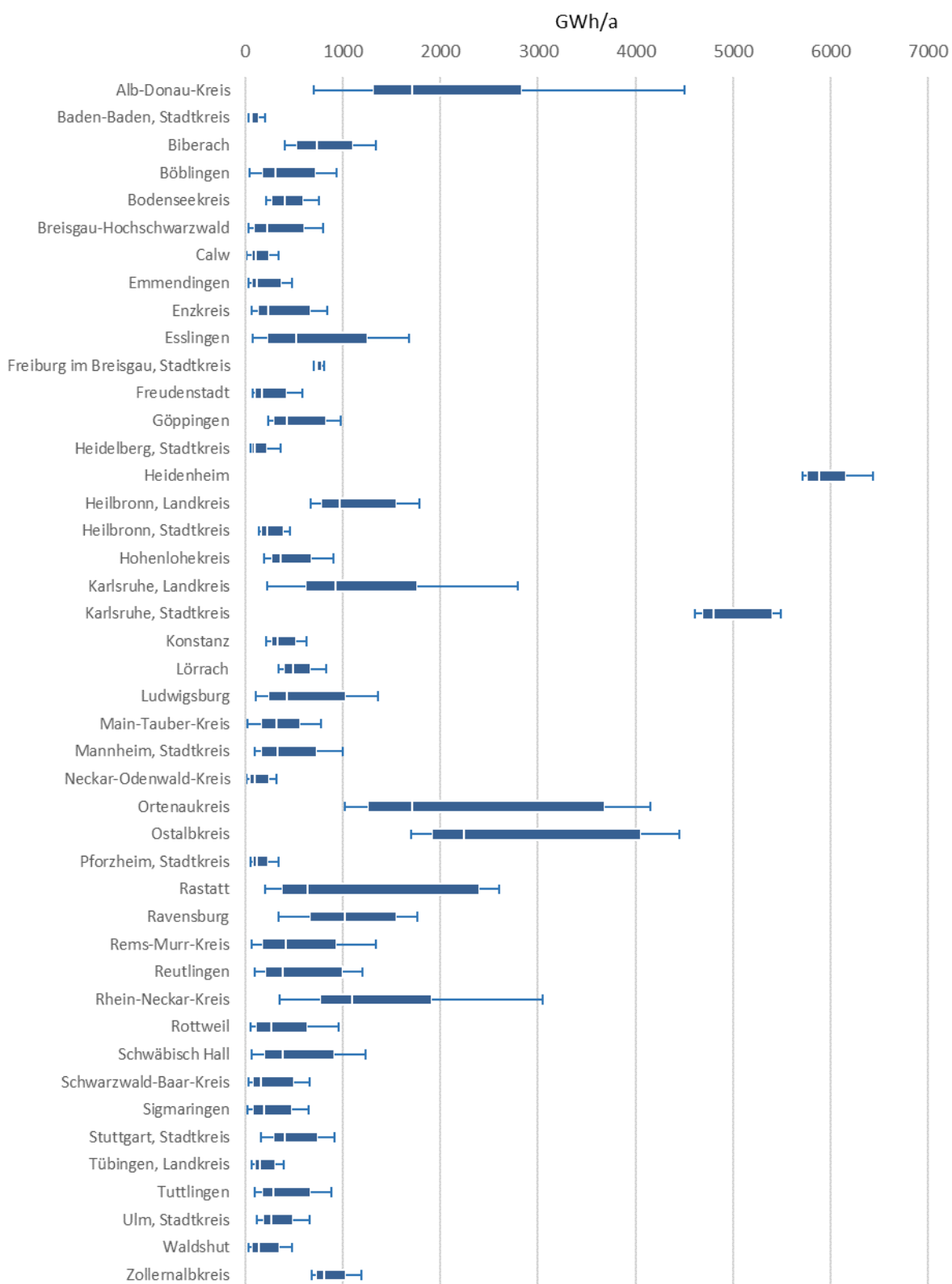


Abbildung 10: Überblick über die industrielle Wasserstoffnachfrage nach Stadt- und Landkreisen und Szenario 2035.

Die Darstellung zeigt die sich für die einzelnen Landkreise ergebenden Bandbreiten des Wasserstoffbedarfs (konkrete Meldungen zzgl. der Spannweite für die hochgerechneten Bedarfe). Der Medianwert wird hierbei durch den weißen Strich innerhalb der Balken gekennzeichnet.

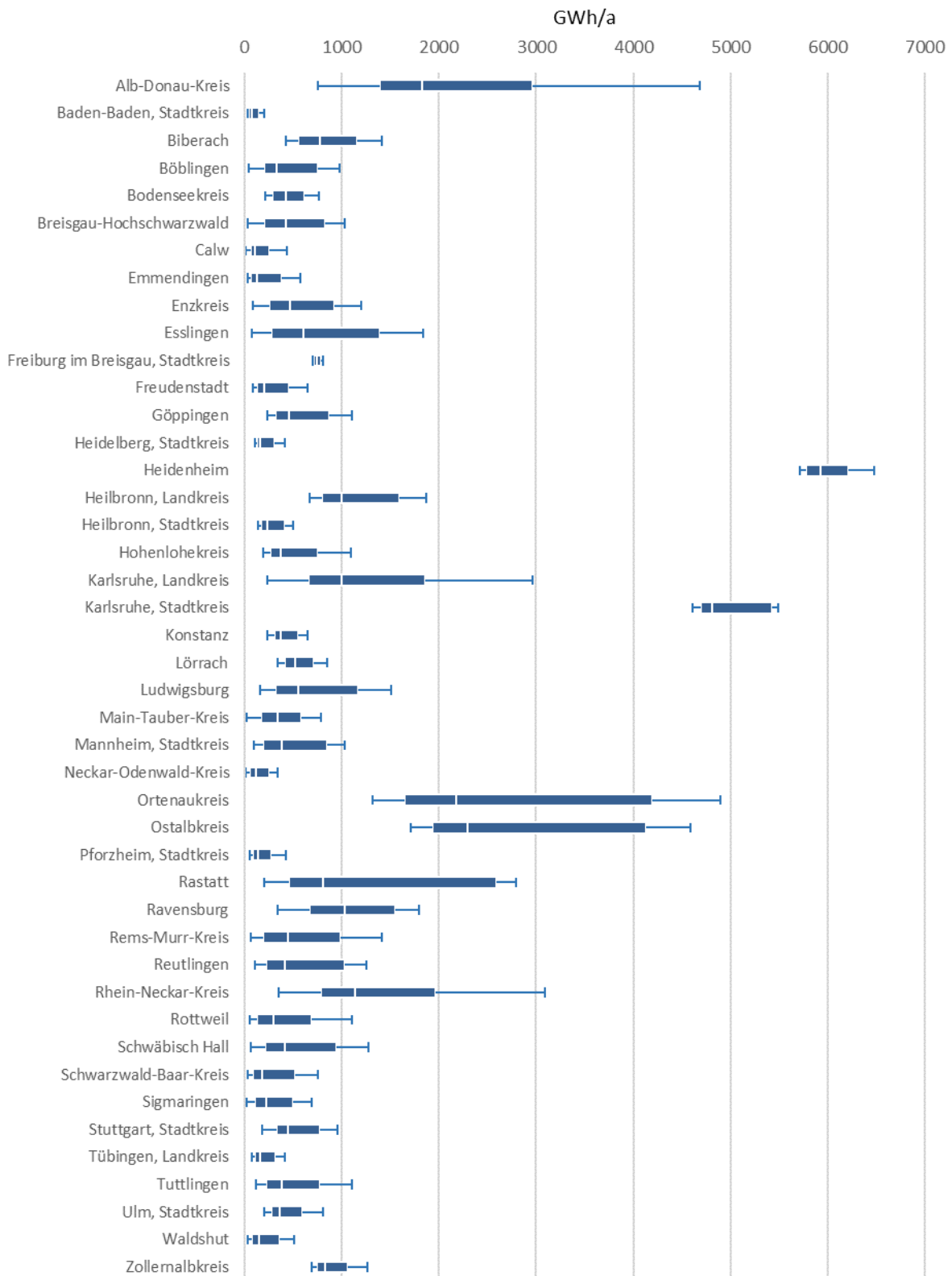


Abbildung 11: Überblick über die industrielle Wasserstoffnachfrage nach Stadt- und Landkreisen und Szenario 2040.

Die Darstellung zeigt die sich für die einzelnen Landkreise ergebenden Bandbreiten des Wasserstoffbedarfs (konkrete Meldungen zzgl. der Spannweite für die hochgerechneten Bedarfe). Der Medianwert wird hierbei durch den weißen Strich innerhalb der Balken gekennzeichnet.

3.2.4 Exkurs: Stofflicher Einsatz von H_2

Neben dem perspektivischen Einsatz von Wasserstoff im Rahmen der industriellen Prozesswärmeerzeugung spielt teilweise auch die stoffliche Nutzung eine Rolle. Diese stellt bereits heute einen wichtigen Anwendungsbereich dar. Um einen entsprechenden Einblick in den aktuellen stofflichen Bedarf, aber auch dessen Entwicklung zu bekommen, wurde im Rahmen der Befragung spezifisch auch die stoffliche Nutzung von Wasserstoff als Teil der Gesamtnachfrage adressiert. Abbildung 12 fasst nachfolgend die erhaltenen Rückmeldungen zusammen. Die Befragungsergebnisse zeigen, dass der stoffliche Einsatz von Wasserstoff in Baden-Württemberg nur in einem Teil der betrachteten Wirtschaftszweige tatsächlich eine Rolle spielt, wobei die Aussagen zum Einsatz auch innerhalb der Wirtschaftszweige variieren.

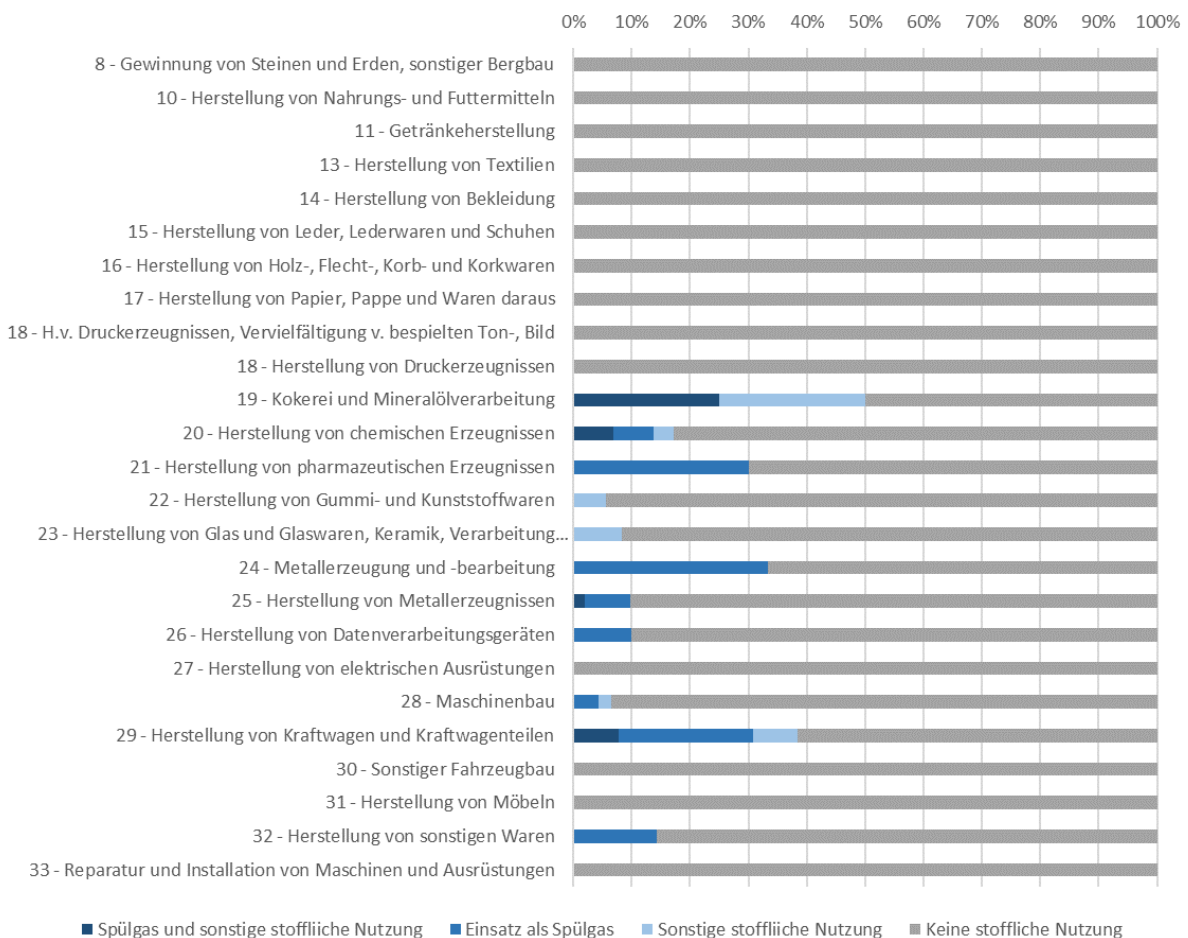


Abbildung 12: Überblick über Angaben zur stofflichen Nutzung in der Industrie nach Wirtschaftszweig.

Im Rahmen der Befragung wurde hinsichtlich des stofflichen Einsatzes zwischen dem Einsatz als Spülgas sowie der sonstigen stofflichen Nutzung differenziert. Der Einsatz als Spülgas zeigt sich in Abbildung 12 als primärer Einsatzbereich (im Hinblick auf die Häufigkeit der Meldungen) und wurde verstärkt in den Bereichen der Herstellung von Kraftwagen, der Metallerzeugung und -bearbeitung sowie der Pharmazie angeführt. Spezifische Angaben zum Spülgasverbrauch wurden im Rahmen der Befragung nur vereinzelt benannt, weshalb eine verlässliche separate Abschätzung für diesen Teilbereich des Gesamtbedarfs nicht möglich war. Die wenigen Angaben zu aktuell genutzten Mengen sind in der Regel aber

vergleichsweise niedrig und schwanken bei sowohl großen als auch mittleren Unternehmen zwischen deutlich unter 1 Tonne und 1,5 Tonnen Wasserstoff pro Jahr. Eine Ausnahme bildet der Bereich Metallerzeugung und -bearbeitung, in dem von Großunternehmen vereinzelt auch Bedarfe von aktuell bis zu 60 Tonnen benannt werden.

Die sonstige stoffliche Nutzung setzt sich aus verschiedenen Teilbereichen zusammen, wobei die konkrete Art des stofflichen Einsatzes nicht in allen Bereichen klar feststellbar war. Innerhalb der chemischen Industrie erfolgt vereinzelt ein Einsatz im Bereich der Grundstoffchemie. Bei einer vereinfachten Abschätzung, basierend auf den wenigen konkret auf den stofflichen Bedarf bezogenen Angaben und der Mitarbeiterzahl im Bereich der Grundstoffchemie, wird hier von einem Bedarf zwischen 270 bis 330 GWh ausgegangen. Da die stoffliche Nutzung von Wasserstoff hier bereits etabliert ist, ist zu erwarten, dass diese Schwankungsbreite auch zukünftig in etwa konstant bleibt. Neben der Herstellung chemischer Grunderzeugnisse werden von einzelnen Akteuren in der Mineralölindustrie sowie der Zementindustrie hohe Bedarfe für die Erzeugung synthetischer Kohlenwasserstoffe benannt. Perspektivisch zeigt sich dieser Bereich als das mengenmäßig wesentlichste Nutzungsfeld im Hinblick auf den stofflichen Bedarf, welches auch große Anteile des zukünftigen Gesamtbedarfs einnimmt. Als erwartete Bedarfe in 2040 können hier auf Basis der Befragung etwa 8,6 TWh angenommen werden. Neben den bereits genannten Anwendungsfeldern wird zusätzlich ein stofflicher Bedarf bei der Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen genannt, wobei hier keine weitere mengenmäßige oder anwendungsbezogene Spezifizierung erfolgte. Es ist jedoch anzunehmen, dass es sich hierbei um Bedarfe im Rahmen von Brennstoffzellentests handelt.

4 Auswertung Straßenverkehr

Aus der Bedarfserhebung liegen nur wenige Angaben von Unternehmen aus dem Verkehrssektor vor, so dass eine Bedarfsabschätzung basierend auf diesen Angaben nicht durchgeführt werden konnte. Zur Gewinnung einer geeigneten Datenbasis wurde deshalb eine Analyse einschlägiger Studien zur Entwicklung der Antriebssysteme und des resultierenden Energiebedarfs für den Straßenverkehr auf Bundes- und Landesebene durchgeführt. Herangezogen wurden folgende Studien:

- Klimaneutrales Deutschland 2045 – Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021)
- BMWi Langfristszenarien – Fraunhofer ISI und Consentec et al. (2021)
- Dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität sowie zugehörige Gutachterberichte – dena et al. (2021)
- Studie Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040 – ZSW et al. (2022) und ZSW et al. (2023)
- Analyse der aktuellen Situation des H₂-Bedarfs und -Erzeugungspotenzials in Baden-Württemberg – Prognos und Sphera (2022)
- Potenzialanalyse Wasserstoff in Hessen – Ernst & Young und RWTH Aachen (2023)
- Market development of climate-friendly technologies in heavy-duty road freight transport in Germany and Europe – NOW (2023)

Die Mehrzahl der betrachteten Studien untersucht die Entwicklung des Verkehrssektors mit dem Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2045 für Deutschland. Baden-Württemberg hat sich hingegen zum Ziel gesetzt, bereits im Jahr 2040 klimaneutral zu sein. Die Entwicklung in Baden-Württemberg muss daher ambitionierteren Pfaden als in den meisten betrachteten Szenarien folgen.

Für die Ermittlung des Wasserstoffbedarfs im Verkehrssektor lag der Fokus auf folgenden Fahrzeugsegmenten: Mittel- bis schwere Nutzfahrzeuge (Sattelzugmaschinen und Lkw), Kraftomnibusse sowie sonstige Nutzfahrzeuge, z. B. Abfallsammelfahrzeuge. Wasserstoff dürfte angesichts der aktuellen Entwicklungen in der rein batterieelektrischen Mobilität bei den Fahrzeugsegmenten Pkw und leichte Nutzfahrzeuge nur eine untergeordnete Rolle spielen. Aufgrund des zu erwartenden geringen Bedarfs wurde daher für diese Segmente keine Bedarfsermittlung vorgenommen. Gemäß Experteneinschätzung dürfte zudem Wasserstoff in der Land- und Forstwirtschaft ebenfalls nur eine Nischenrolle einnehmen. Gleiches gilt für den Schienenverkehr: Zum einen arbeitet das Land Baden-Württemberg an einem Elektrifizierungskonzept für die Schiene (VM BW 2023a), zum anderen sind Batterie-Hybrid-Lösungen für nicht-elektrifizierte Teilstrecken vielversprechende Ansätze (VM BW 2023b).

4.1 Datengrundlage und Methodik

Die Bedarfsabschätzung für die betrachteten Verkehrssegmente basiert auf einem Bottom-up-Ansatz, der sich auf Fahrzeuganzahl und fahrzeugspezifische technische Parameter wie Jahresfahrleistungen und Verbrauch stützt. Für die Ermittlung des zukünftigen Wasserstoffbedarfs wurden verschiedene Faktoren wie die zukünftige Entwicklung der Bestandsflotte, die Durchdringung des Bestandes mit wasserstoff- bzw.

brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen (FCEV) und die Art der Nutzung (Jahresfahrleistung, Verbrauch, etc.) je nach Fahrzeugkategorie und -typ berücksichtigt. Basierend auf den aktuellen Bestandszahlen des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) wurde für die ausgewählten Verkehrssegmente ein „unterer“ und „oberer Rand“ als Wasserstoffbedarf abgeschätzt. Die Verkehrssegmente für den unteren Rand umfassen Lkw > 20 t, Sattelzugmaschinen, Kraftomnibusse und sonstige Nutzfahrzeuge, darunter insbesondere Abfallsammelfahrzeuge. Für den oberen Rand wurden zusätzlich Lkw mit 12 bis 20 t in die Analyse einbezogen. Für den unteren Rand wurde diese Gruppe nicht berücksichtigt, da hierfür eine hohe Elektrifizierungsquote und damit verbunden ein vernachlässigbarer Wasserstoffbedarf unterstellt wird.

4.1.1 Lkw und Sattelzugmaschinen

Ausgehend vom heutigen Bestand wurde der „untere Rand“ basierend auf der zukünftigen Entwicklung der betrachteten Studien, insbesondere auf Grundlage der Agora-Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021)), berechnet. Dabei wurden die prognostizierten bundesweiten Neuzulassungen von Brennstoffzellen-Lkw (FCEV) über 20 t und Sattelzugmaschinen auf Baden-Württemberg heruntergebrochen. 11,5 % der am 01.01.2023 bundesweit zugelassenen Sattelzugmaschinen und 13,9 % der Lkw (> 20 t) sind in Baden-Württemberg zugelassen.

Im Szenario „oberer Rand“ wird der Einsatz von FCEV in den Fahrzeugklassen Sattelzugmaschinen, Lkw (> 20 t) und Lkw (12 bis 20 t) prognostiziert. Die Wasserstoffnachfrage für den oberen Rand basiert insbesondere auf prognostizierten FCEV-Neuzulassungen aus NOW (2023). Auch hier wurden die prognostizierten bundesweiten FCEV-Neuzulassungen auf Baden-Württemberg heruntergebrochen. Dies erfolgt analog zum Szenario „unterer Rand“ entsprechend der aktuellen Anteile Baden-Württembergs am bundesweiten Bestand (d.h. 11,5 % der bundesweit zugelassenen Sattelzugmaschinen, 13,9 % der Lkw > 20 t und 13,7 % der Lkw von 12 bis 20 t).

Für die Ermittlung des Wasserstoffbedarfs in Baden-Württemberg wird von folgender Fahrzeugbestandsentwicklung im Sattelzugmaschinen- bzw. Lkw-Segment ausgegangen (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Bestandsentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen in Baden-Württemberg im Segment Lkw und Sattelzugmaschinen.

	Sattelzugmaschinen		Lkw > 20 t		Lkw 12 bis 20 t	
	<i>Unterer Rand</i>	<i>Oberer Rand</i>	<i>Unterer Rand</i>	<i>Oberer Rand</i>	<i>Unterer Rand</i>	<i>Oberer Rand</i>
2025	50	100	40	80	-	40
2030	1.500	2.100	1.200	1.700	-	900
2035	5.500	6.800	3.200	5.400	-	2.800
2040	8.200	10.600	7.400	8.500	-	4.300

Unter Berücksichtigung der Entwicklung des Gesamtfahrzeugbestandes erreichen brennstoffzellenbetriebene Sattelzugmaschinen und Lkw bis zum Jahr 2040 einen Anteil von 17 % (unterer Rand) bzw. 25 % (oberer Rand) in Baden-Württemberg.

4.1.2 Kraftomnibusse

Die Entwicklung des Bestandes an Kraftomnibussen (Fernbusse und ÖPNV) wurde auf Basis des Bestandes zum 01.01.2023 von 9.258 Kraftomnibussen in Baden-Württemberg unter der Berücksichtigung einer jährlichen Bestandswachstumsrate von 0,9 % p.a. berechnet. Zusätzlich wurde die Diffusion der brennstoffzellenbetriebenen Kraftomnibusse im Zeitverlauf anhand verschiedener Entwicklungen gemäß Ernst & Young und RWTH Aachen (2023) angesetzt. Aus den dortigen Untersuchungen konnte für die Wasserstoffbedarfsermittlung für die Kraftomnibusse in Baden-Württemberg für den „unteren Rand“ ein Anteil von 20 % FCEV an den gesamten Kraftomnibussen bis zum Jahr 2040 abgeleitet werden. Für den „oberen Rand“ wurde ein Anteil von 40 % angesetzt. Die konkreten Fahrzeugzahlen, die der Wasserstoffbedarfsermittlung für Kraftomnibusse zugrunde liegen, sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Bestandsentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen in Baden-Württemberg im Segment Kraftomnibusse.

	Kraftomnibusse	
	<i>Unterer Rand</i>	<i>Oberer Rand</i>
2025	190	480
2030	500	1.000
2035	1.300	2.860
2040	2.180	4.350

Ausgehend von der Anzahl der FCEV-Kraftomnibusse wird der jährliche Wasserstoffbedarf über einen durchschnittlichen Jahresverbrauch von FCEV-Kraftbussen sowie verschiedene anteilig hinterlegte Streckenprofile berechnet.

4.1.3 Sonstige Nutzfahrzeuge

Im Bereich der Abfallwirtschaft in Baden-Württemberg wird ein Nutzungspotenzial für FCEV-Abfallsammelfahrzeuge und sonstigen Fahrzeugen, z. B. Kehrmaschinen, erwartet. Die bundesweit im Einsatz befindlichen Fahrzeuge der Abfallwirtschaft wurden anhand der Bevölkerungszahlen auf Baden-Württemberg umgelegt. Auf Basis von Experteneinschätzungen zu zukünftigen Anteilen und Entwicklungen wurden die zukünftigen Bestandszahlen von sonstigen FCEV-Nutzfahrzeugen abgeschätzt. Basierend auf den Betriebstagen pro Jahr und dem täglichen Wasserstoffverbrauch der Fahrzeuge wurde der jährliche Wasserstoffbedarf der Abfallwirtschafts- und sonstigen Fahrzeuge hochgerechnet. Tabelle 3 fasst die angesetzte FCEV-Fahrzeuganzahl für die betrachteten Szenarien zusammen.

Tabelle 3: Bestandsentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen in Baden-Württemberg im Segment Sonstige Nutzfahrzeuge.

Sonstige Nutzfahrzeuge		
	Unterer Rand	Oberer Rand
2025	140	340
2030	290	680
2035	520	1.240
2040	950	2.210

4.2 Darstellung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die auf Basis der erläuterten Methodik berechneten Ergebnisse zum Wasserstoffbedarf der betrachteten Fahrzeugsegmente dargestellt. Der Verkehrssektor Baden-Württembergs benötigt insgesamt zwischen 0,07 TWh und 0,15 TWh Wasserstoff im Jahr 2025, zwischen 0,95 TWh und 1,50 TWh im Jahr 2030, zwischen 3,05 und 4,70 TWh im Jahr 2035 und zwischen 5,34 und 7,33 TWh im Jahr 2040 (vgl. Abbildung 13).

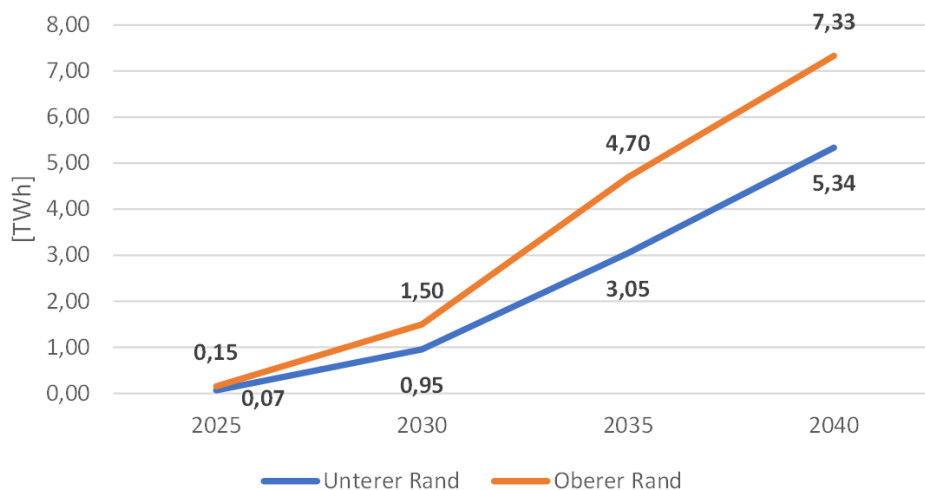


Abbildung 13: Bandbreite des Wasserstoffbedarfs im Verkehrssektor.

4.2.1 Gesamtbedarf nach Fahrzeugklassen

Die Aufschlüsselung der Wasserstoffbedarfe nach betrachteten Fahrzeugsegmenten zeigt, dass der Bedarf für Sattelzugmaschinen und Lkw mit Abstand den größten Anteil im Verkehrsbereich ausmacht. Er liegt zwischen 0,03 und 0,06 TWh im Jahr 2025, zwischen 0,86 und 1,31 TWh im Jahr 2030, zwischen 2,83 und 4,21 TWh im Jahr 2035 und steigt bis 2040 auf 4,97 TWh am unteren Rand bzw. 6,57 TWh am oberen Rand an (vgl. Abbildung 14).

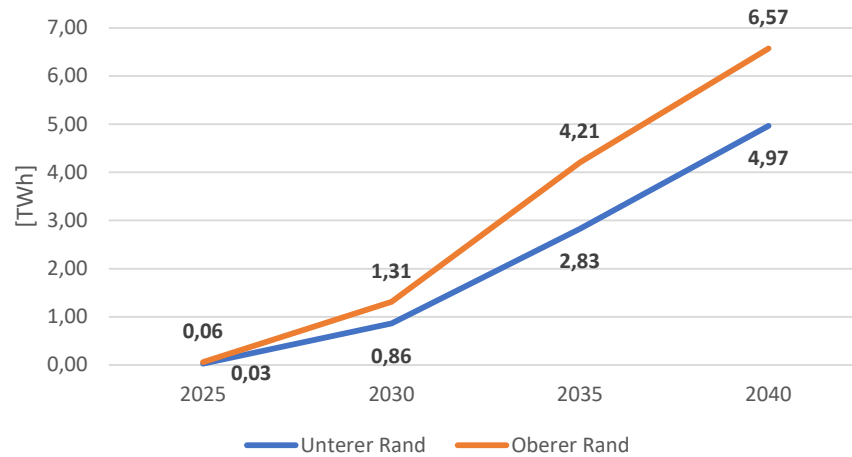


Abbildung 14: Wasserstoffbedarf der Nutzfahrzeuge (Sattelzugmaschinen und Lkw).

Das Fahrzeugsegment der Kraftomnibusse weist im Vergleich zu den Sattelzugmaschinen und Lkw einen deutlich geringeren Wasserstoffbedarf auf. Im Jahr 2025 liegt dieser zwischen 0,02 TWh und 0,06 TWh und ist damit noch vergleichbar zu Sattelzugmaschinen und Lkw. 2030 steigt der Bedarf nur leicht auf 0,06 TWh bzw. 0,12 TWh an. Im Jahr 2035 beträgt der Wasserstoffbedarf von Kraftomnibussen zwischen 0,16 TWh und 0,35 TWh und im Jahr 2040 zwischen 0,27 TWh und 0,53 TWh (vgl. Abbildung 15).

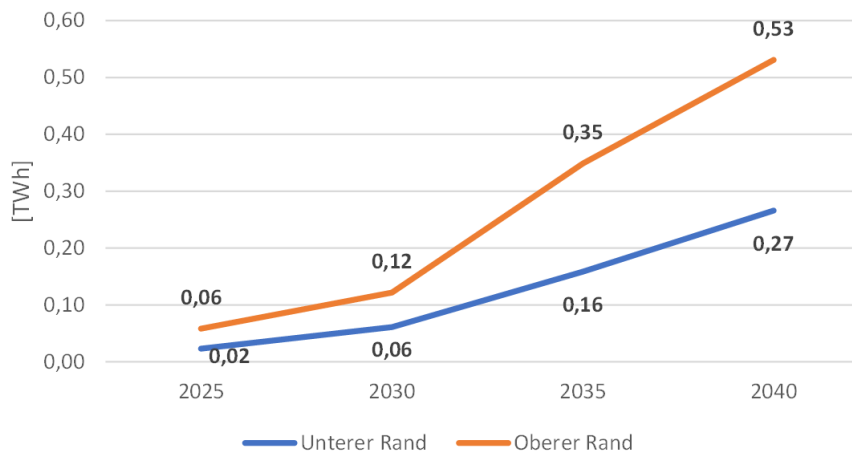


Abbildung 15: Wasserstoffbedarf der Busflotte.

Der geringste Wasserstoffbedarf im Verkehr entfällt auf den Bereich der sonstigen Nutzfahrzeuge. Von 0,01 TWh bis 0,03 TWh im Jahr 2025 steigt der Bedarf bis 2040 auf 0,10 TWh bzw. 0,22 TWh an (vgl. Abbildung 16).

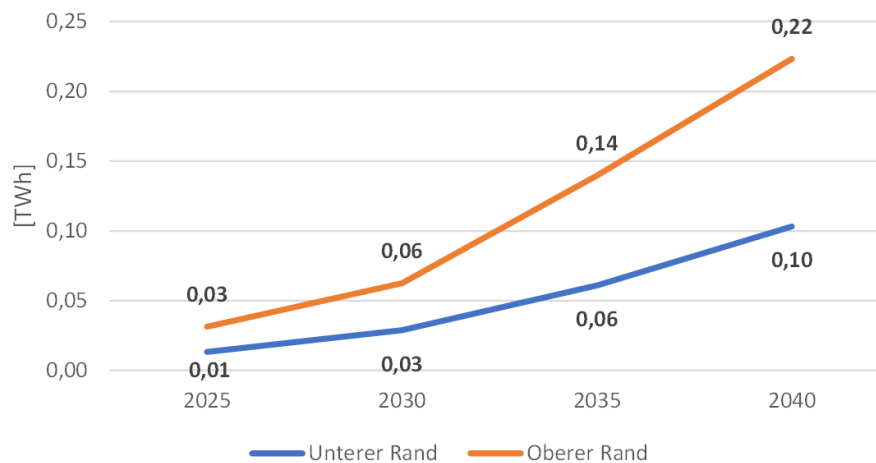


Abbildung 16: Wasserstoffbedarf der sonstigen Nutzfahrzeuge.

Im Vergleich zur Industrie ist der Wasserstoffbedarf im Verkehrssektor insgesamt relativ niedrig. Es ist jedoch zu betonen, dass Baden-Württemberg als führende Region im Bereich Brennstoffzellen mit einer Vielzahl von Herstellern in diesem Sektor auf eine frühzeitige und verlässliche Wasserstoffversorgung angewiesen ist, um den Technologievorsprung zu sichern. Daher ist es unerlässlich, eine entsprechende Wasserstofflogistik und Wasserstofftankstellen bzw. -infrastrukturen zu etablieren. Dies ist entscheidend, um Referenzfälle zu schaffen und die Logistikbranche zeitnah zu unterstützen. Der Verkehrsbereich eignet sich auch besonders als Ausgangspunkt für die Etablierung lokaler Wasserstoff-Hubs, weil Brennstoffzellenfahrzeuge sehr hohe Anforderungen an die Wasserstoffreinheit stellen. Diese wird in Elektrolyseuren ohne zusätzliche Reinigungsstufen erreicht. Wasserstoff, der per Pipeline transportiert wurde, muss dagegen in der Regel vor dem Einsatz in Brennstoffzellen aufgereinigt werden, um sicherzustellen, dass keine Verunreinigungen enthalten sind, die den Brennstoffzellen nachhaltig schaden.

Einordnung der Ergebnisse für den Verkehr

Hinsichtlich der Ergebnisse ist auf die großen technologischen und ökonomischen Unsicherheiten beim Ausbau der Lade- und Tankstelleninfrastruktur hinzuweisen. Sowohl die Stromversorgung für das Laden von Batterie-Lkw als auch die Tankstelleninfrastruktur für Brennstoffzellen-Lkw stellen jeweils eigene Herausforderungen dar, insbesondere bei größeren Infrastrukturprojekten (z. B. an Autobahnen). Zudem bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der weiteren Technologieentwicklung: Die Entwicklung rein batterieelektrischer Lkw schreitet auch aufgrund der zunehmenden Bedeutung batterieelektrischer Antriebe im Pkw-Markt kontinuierlich voran, während Brennstoffzellen-Lkw noch nicht die gleichen Lernkurven- und Skaleneffekte aufweisen können wie die Batterietechnologie. Aufgrund der derzeit noch relativ unklaren Technologiepfade im Nutzfahrzeugbereich ist die konkrete Marktdurchdringung beider Antriebskonzepte noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Daher sind weitere Untersuchungen und eine kontinuierliche Beobachtung des Wasserstoffbedarfs im Verkehr erforderlich. Zu beachten ist außerdem, dass Langstreckenfahrzeuge aus Baden-Württemberg nicht zwangsläufig in Baden-Württemberg tanken. Andererseits tanken auch Fahrzeuge, die nicht in Baden-Württemberg gemeldet sind in Baden-Württemberg, z. B. an Autobahnen (Stichwort Transitverkehr).

4.2.2 Regionale Aufschlüsselung

Die Regionalisierung der Wasserstoffbedarfe im Verkehr erfolgte im Wesentlichen auf Basis aktueller Zulassungszahlen nach Zulassungsbezirken, d. h. nach Stadt- und Landkreisen, um so die Standorte von Speditionen bzw. Unternehmen zu lokalisieren. Die relativ geringen Wasserstoffbedarfe für sonstige Nutzfahrzeuge wurden aus Gründen der Datenverfügbarkeit gemäß der Einwohnerzahl der Stadt- und Landkreise Baden-Württembergs regionalisiert. Da im Segment der sonstigen Nutzfahrzeuge Abfallsammelfahrzeuge den größten Bedarf haben dürften, erschien dies als geeignetster Ansatzpunkt zur regionalen Verteilung der Bedarfe.

Insbesondere für Lkw und Kraftomnibusse kann auf Basis von Branchenangaben angenommen werden, dass ein Großteil der Fahrzeuge über unternehmenseigene Tankstellen und damit am Zulassungsort betankt wird – zumindest ist dies aktuell bei der Nutzung von Dieselmotoren der Fall. Ein kleinerer Teil des Bedarfs wird hingegen unterwegs getankt. Hierfür und zur Berücksichtigung des Transitverkehrs durch Baden-Württemberg wurde bei der regionalen Aufschlüsselung des Bedarfs der Sattelzugmaschinen und Lkw über 20 t unterstellt, dass 20 % des Wasserstoffbedarfs an Raststätten und Autohöfen getankt werden. Dieser Bedarf wurde somit auf die aktuellen Standorte der Raststätten und Autohöfe in den jeweiligen Stadt- und Landkreisen verteilt. Für alle weiteren Verkehrssegmente wurde angenommen, dass die Betankungen am jeweiligen Zulassungsort bzw. direkt an der Betriebstankstelle erfolgt. Da Daten zum potenziellen Betankungsverhalten für wasserstoffbetriebene Logistikfahrzeuge nur eingeschränkt verfügbar sind, sollten sich nachfolgende Untersuchungen im Verkehrsbereich verstärkt dieser Fragestellung widmen.

Die folgende Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse des regionalisierten Wasserstoffbedarfs im Verkehrsbereich nach Stadt- und Landkreisen in Baden-Württemberg im Zeitverlauf. Die dargestellten Ergebnisse stellen die jeweiligen Mittelwerte aus den zuvor betrachteten Szenarien „unterer Rand“ sowie „oberer Rand“ dar. Zur Veranschaulichung und Einordnung der Ergebnisse sind die Autobahnen im Land in der Karte verzeichnet. Die größten Wasserstoffbedarfe entstehen bis 2040 insbesondere entlang der A5 im Ortenaukreis, in dem auch ein bedeutender Anteil der Raststätteninfrastruktur in Baden-Württemberg lokalisiert ist. Auch in der Mitte und im Nordwesten Baden-Württembergs können Bedarfsschwerpunkte im Straßenverkehr identifiziert werden.

Die Analyse des Wasserstoffbedarfs für den Straßenverkehr zeigt, dass bereits vor 2030 rasch wachsende Bedarfe in allen Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs zu erwarten sind. Zwar erfolgt dies insbesondere im Vergleich zu den Bedarfen der Industrie auf relativ niedrigem Niveau. Dennoch sollte auch für den Verkehr zeitnah eine entsprechende Wasserstoffinfrastruktur aufgebaut werden. Zum einen eignen sich die Anwendungen im Straßenverkehr, z. B. aufgrund der Reinheitsanforderungen an den benötigten Wasserstoff für Brennstoffzellen, sehr gut als (lokale) Anker für H₂-Hubs. Zum anderen ist die Deckung des Wasserstoffbedarfs für die Logistikbranche wichtig, um das Technologiefeld Brennstoffzelle für die baden-württembergische Industrie zu sichern.

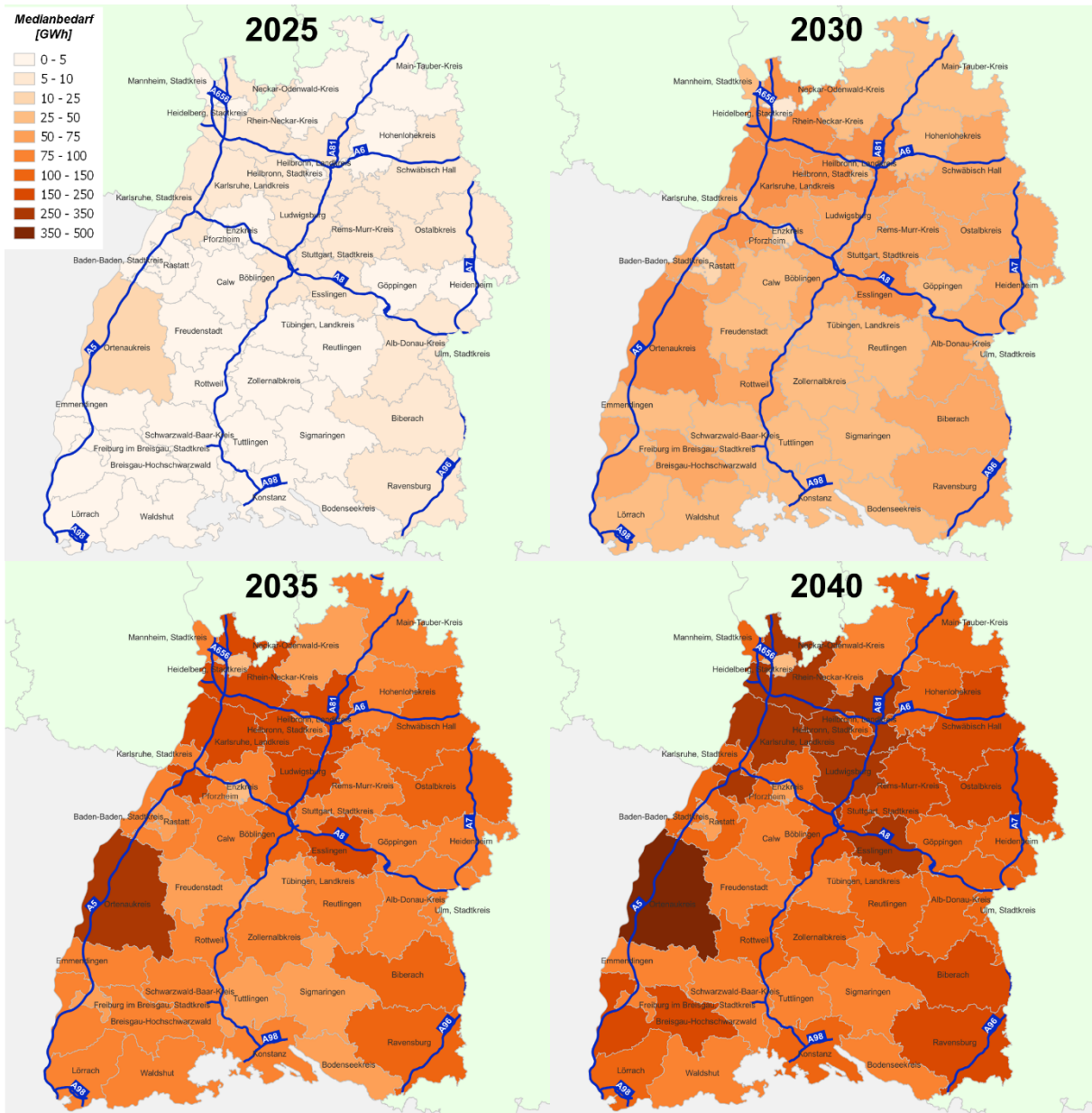


Abbildung 17: Regionalisierung der Wasserstoffbedarfe im Verkehr

Darstellung der Mittelwerte aus den betrachteten Szenarien „unterer Rand“ sowie „oberer Rand“. 2025 (links oben), 2030 (rechts oben), 2035 (links unten) und 2040 (rechts unten).

Es ist deshalb von entscheidender Bedeutung, bereits vor 2030 Betankungsinfrastrukturen entlang der Hauptverkehrsachsen und direkt bei oder zumindest in der Nähe der Logistikstandorte zu fördern. Dies ermöglicht Referenzpunkte für die Industrie und trägt zur Stärkung der Innovationsführerschaft in diesem Bereich bei. Hinzu kommt die hiermit verbundene Umsetzung der Vorgaben der AFiD im Rahmen der EU-Regulierung zum Aufbau von „Betankungs“-Infrastrukturen für alternative Antriebe.

Die nachfolgenden Abbildung 18 bis Abbildung 21 schlüsseln die Ergebnisse der Regionalisierung der Wasserstoffbedarfe im Verkehr nach Stadt- und Landkreisen im Zeitverlauf auf. Es ist jeweils die Bandbreite zwischen „unterem“ und „oberem Rand“ angegeben sowie der Mittelwert beider Szenarien hervorgehoben.

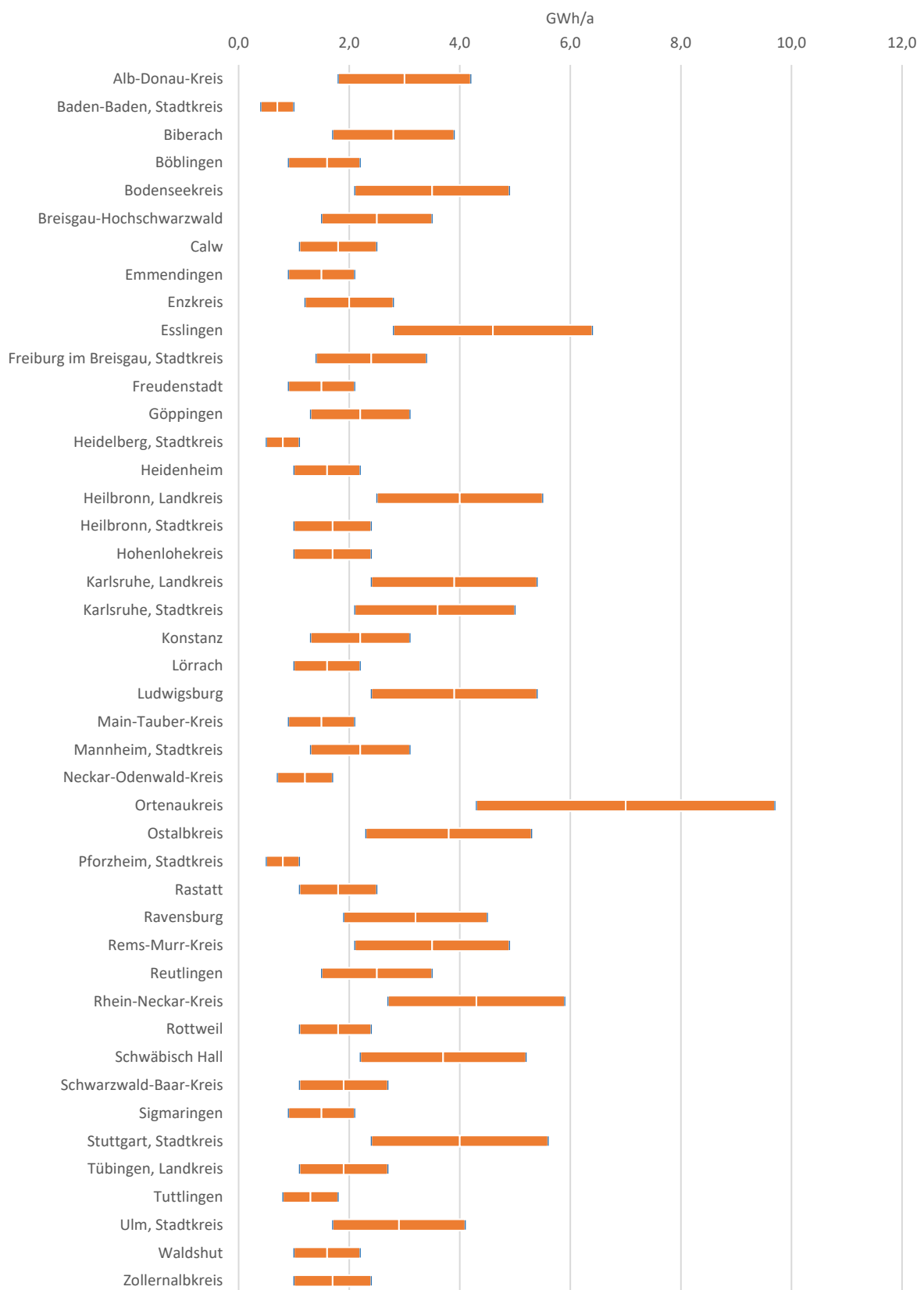


Abbildung 18: Bandbreite der Wasserstoffnachfrage im Verkehr 2025 nach Stadt- und Landkreisen.

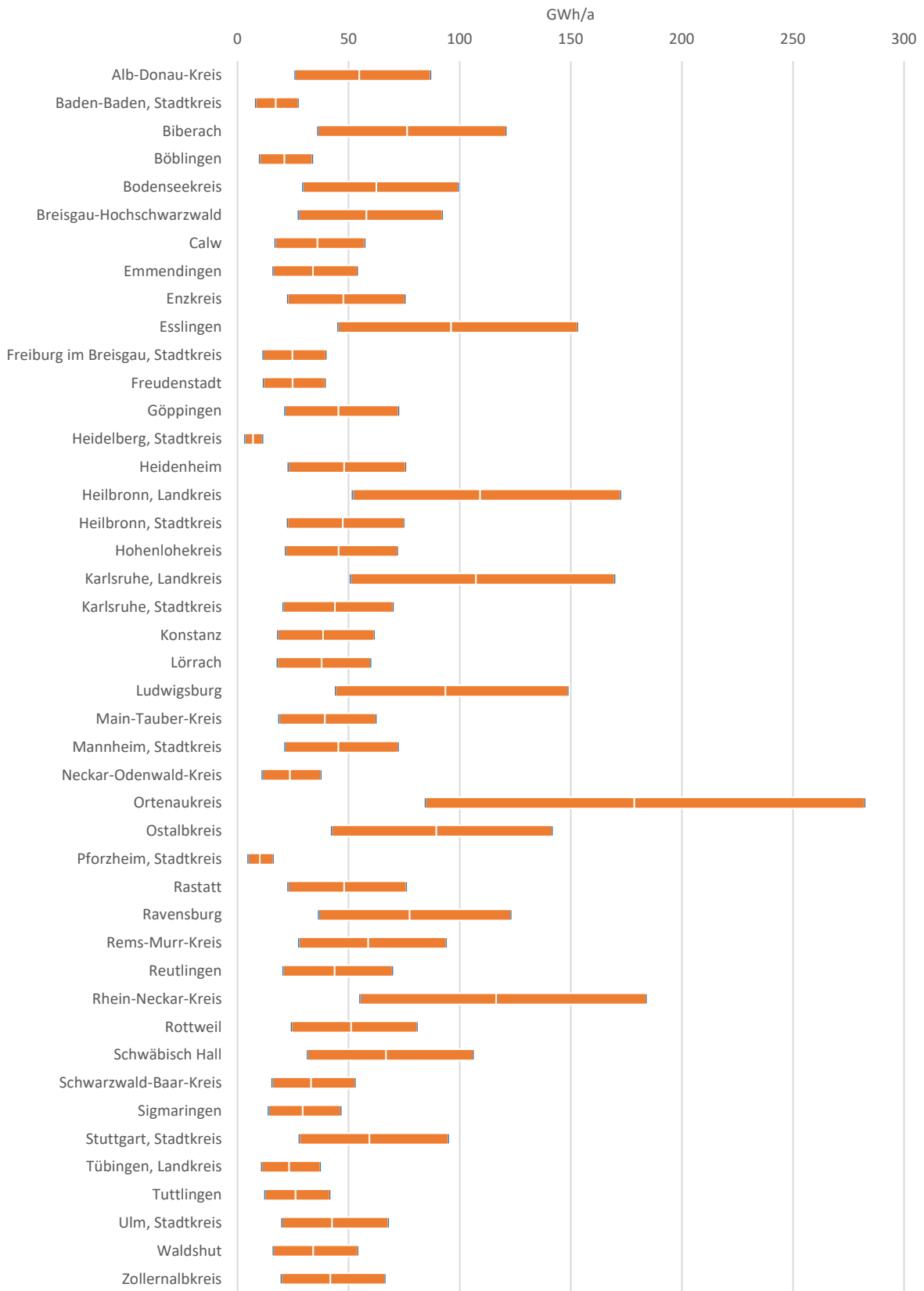


Abbildung 19: Bandbreite der Wasserstoffnachfrage im Verkehr 2030 nach Stadt- und Landkreisen.

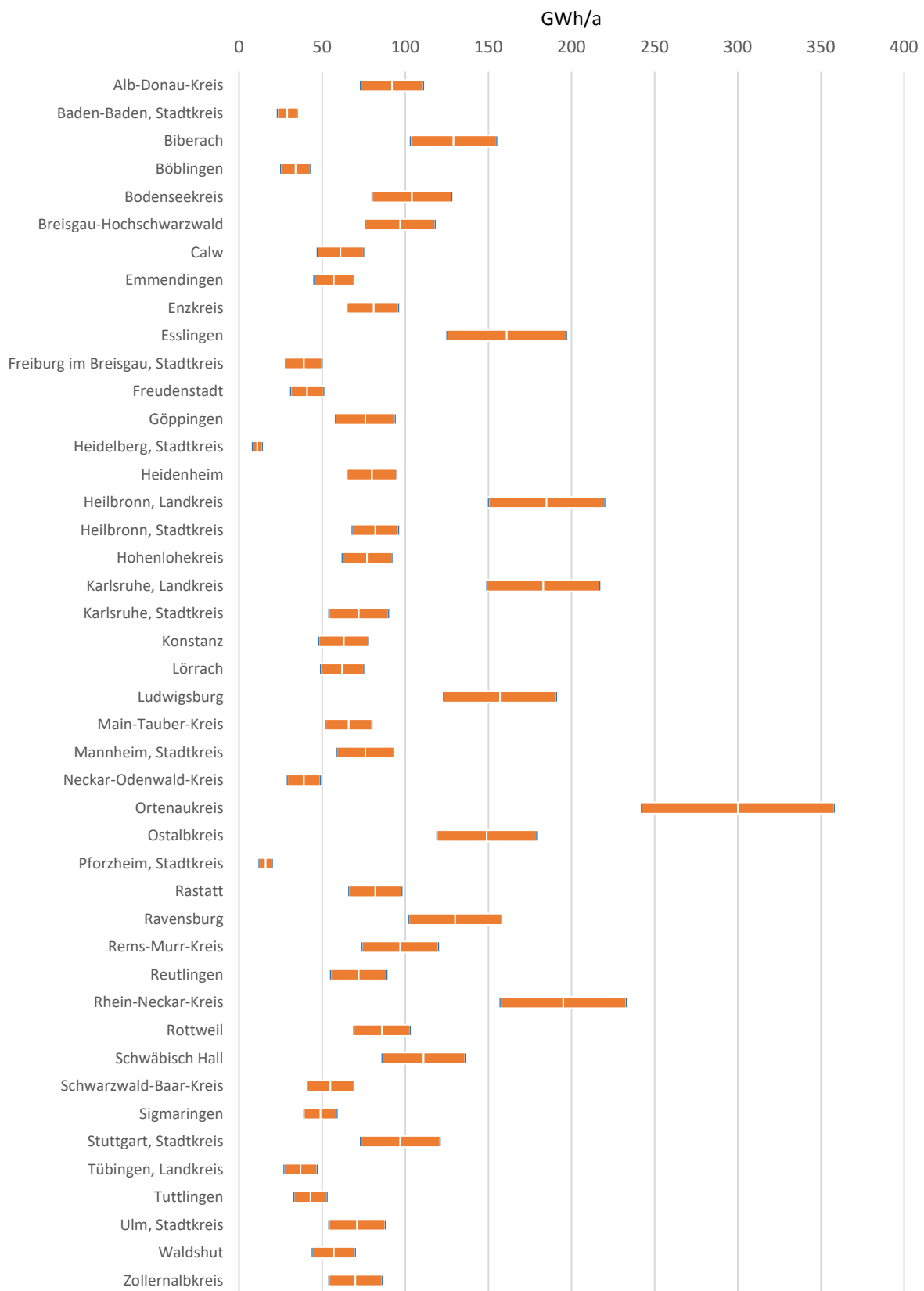


Abbildung 20: Bandbreite der Wasserstoffnachfrage im Verkehr 2035 nach Stadt- und Landkreisen.

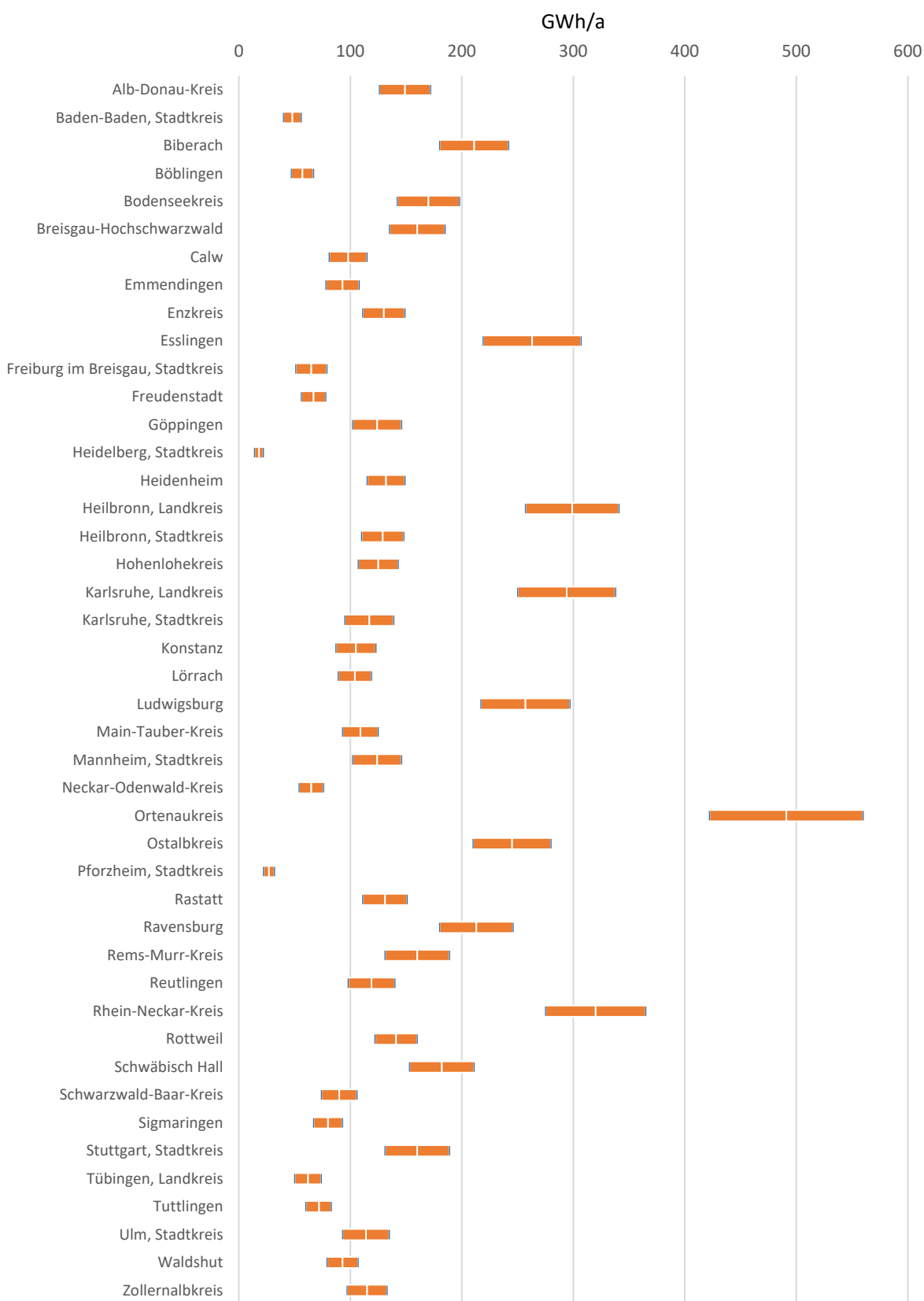


Abbildung 21: Bandbreite der Wasserstoffnachfrage im Verkehr 2040 nach Stadt- und Landkreisen.

5 Auswertung Energieversorgung

Um ein konsistentes Gesamtbild des Wasserstoffbedarfs in Baden-Württemberg darstellen zu können, wurde in Ergänzung zur Hochrechnung der Wasserstoffbedarfe im Bereich der Industrie sowie der ergänzenden Schätzung des Bedarfs im Bereich Verkehr auch der sich aus den Meldungen ergebende Gesamtbedarf ermittelt. Aus dem letztgenannten wurden durch Abzug der hochgerechneten Industriebedarfe die der Energiewirtschaft zurechenbaren Bedarfe errechnet.

Eine Regionalisierung dieser Bedarfe wurde im Rahmen des Vorhabens nicht durchgeführt, da aufgrund komplexer Netzverteilstrukturen sowie Versorgungsgebiete der verschiedenen Netzbetreiber keine Zuordnung der entsprechenden Meldungen auf Stadt- bzw. Landkreise vorgenommen werden konnte.

5.1 Datengrundlage und Methodik

In einem ersten Schritt wurde der sich aus den Meldungen ergebende Gesamtbedarf ermittelt. Hierfür wurden alle Meldungen der Bedarfsabfrage jahresscharf ausgewertet. Dabei stellte sich heraus, dass Verbrauchsmeldungen nicht nur von einzelnen Verbrauchern, wie z.B. Industrieunternehmen und Krankenhäusern, sondern auch von Versorgungsunternehmen wie Stadtwerken sowie von übergeordneten Netzbetreibern vorliegen. Hierdurch ist es sehr wahrscheinlich, dass Bedarfe mehrfach gemeldet wurden, so dass eine Addition aller Meldungen zu Mehrfachzählungen und damit einer Überschätzung des Gesamtbedarfs führen würde. Um dies zu vermeiden wurde in Zusammenarbeit mit der terranets bw eine Zuordnung der gemeldeten Industriebedarfe und Verteilnetzbetreiber zu den gemeldeten Bedarfen der (übergeordneten) Verteilnetzbetreiber vorgenommen und deren Bedarfe entsprechend bereinigt.

Anschließend wurde der Wasserstoffbedarf für den Energiesektor ermittelt. Dieser ergibt sich somit aus dem gemeldeten Gesamtbedarf der Verteilnetzbetreiber und Stadtwerke, zuzüglich der separat gemeldeten Bedarfe zur Stromerzeugung für die Großkraftwerke, abzüglich des (hochgerechneten) Industriebedarfs. Im Zweifelsfall handelt es sich eher um eine Unterschätzung, aber Mehrfachzählungen aus den Bedarfsmeldungen sind in jedem Fall ausgeschlossen.

Die Frage, ob die erfasste Strom- oder Wärmebereitstellung der Energiewirtschaft zugeordnet wird oder den Industrieunternehmen bzw. anderen Verbrauchern, ist für diese erste Abschätzung der Wasserstoffmengen mit dem Fokus auf einer Verbesserung der Datenbasis für die Infrastrukturplanung von untergeordneter Bedeutung. Die Frage der Zuordnung wird erst später relevant, wenn es um eine korrekte statistische Verbuchung geht.

5.2 Darstellung der Ergebnisse

Abbildung 22 illustriert die nach dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Vorgehen ermittelte zeitliche Entwicklung der gemeldeten Bedarfe, die dem Bereich der Energiewirtschaft zugeordnet werden können. Ausgehend von einem niedrigen Niveau ist bis 2030 ein erster starker Zuwachs der Bedarfe zu verzeichnen. Dieser ist auf die ab dem Jahr 2028 geplante

Belieferung von Industriekunden in Freiburg per Pipeline aus Frankreich im Rahmen des Projekts RHYn Interco sowie einen starken Anstieg im Jahr 2030, ab dem eine größere Zahl von Verteilnetzbetreibern erstmals Bedarfe melden zurückzuführen. Bis 2035 findet annähernd eine Vervierfachung des Bedarfs statt, was insbesondere auf einen sprunghaften Anstieg im Jahr 2032, das den erwarteten Anschluss Baden-Württembergs an das deutsche Wasserstoffpipelinennetz markiert, zurückgeht. Ab diesem Zeitpunkt steigt der Bedarf insbesondere der Großkraftwerke zur Stromerzeugung, die auf eine leitungsgebundene Belieferung angewiesen sind.

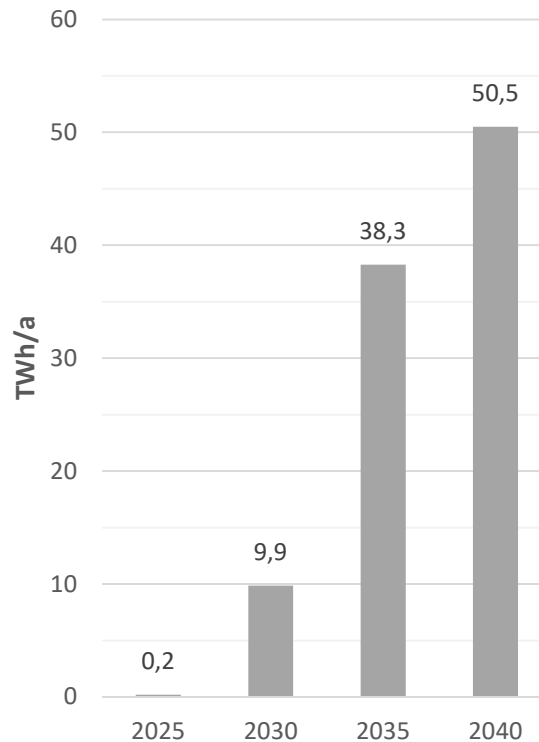


Abbildung 22: Zeitliche Entwicklung der gemeldeten Bedarfe aus dem Bereich Energiewirtschaft.

Für die Kraftwerke in der Stromversorgung wird ab 2037 ein rückläufiger Wasserstoffbedarf gemeldet. Die Wasserstoffkraftwerke stellen dann die Back-Up-Kapazität für die Zeiten sicher, in denen die Stromversorgung nicht vollständig aus erneuerbaren Energien gedeckt werden kann. Durch die geringeren Einsatzzeiten sinkt der Wasserstoffbedarf, die Leistung der Kraftwerke hingegen nicht, weshalb sich die vorzuhaltende Pipelinekapazität nicht verändert. Während Klarheit über Standorte und Wasserstoffbedarf der im Bau befindlichen Großkraftwerke zur Stromerzeugung besteht, umfassen die Meldungen keine Bedarfe möglicher zusätzlich erforderlicher Kraftwerksneubauten, die ggf. benötigt werden, um einen erhöhten Strombedarf zu decken oder auch um die Netzstabilität im Übertragungsnetz zu sichern. Ebenso bestehen weiterhin große Unsicherheiten bezüglich möglicher Wasserstoffbedarfe für die Wärmeversorgung. In diesem Bereich dürfte die kommunale Wärmeplanung, die zukünftig Wasserstoff-Vorranggebiete ausweisen soll, in den kommenden Jahren für mehr Klarheit sorgen.

6 Gesamtschau & Einordnung der Ergebnisse

6.1 Gesamtschau

Abbildung 23 zeigt die Entwicklung des gesamten Wasserstoffbedarfs im Zeitverlauf bis 2040, aufgegliedert in die Bereiche Strom- und Wärmeversorgung, Straßenverkehr und Industrie. Für die Gesamtdarstellung wurde der Mittelwert des ermittelten Verkehrsbedarfs angesetzt, der von 0,1 TWh 2025 auf 6,3 TWh im Jahr 2040 ansteigt. Für die Industrie wurde das Medianszenario verwendet.

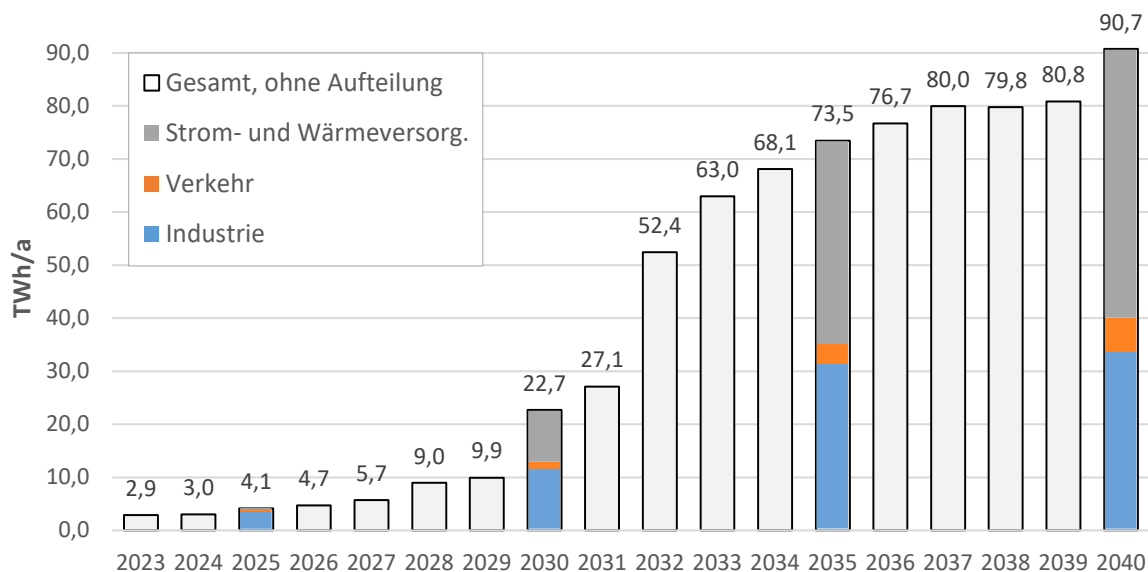


Abbildung 23: Zeitliche Entwicklung des Gesamtbedarfs.

Für die dargestellten Werte der Erhebung 2023 wurde für die Industrie der jeweilige Medianwert, für den Verkehr der Mittelwert angesetzt.

Tabelle 4: Aufteilung des Gesamtbedarfs für die Jahre 2025, 2030, 2035 und 2040.

TWh	Industrie	Verkehr	Energieversorgung	Gesamt
2025	3,8	0,1	0,2	4,1
2030	11,6	1,2	9,9	22,7
2035	31,3	3,9	38,3	73,5
2040	33,9	6,3	50,5	90,7

Unter der Prämisse, dass aus Klimaschutzgründen ab spätestens 2040 in Baden-Württemberg kein fossiles Erdgas mehr eingesetzt werden darf und der Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Preisen zur Verfügung steht, ergibt sich bereits ab dem Jahr 2023 ein Bedarf von 2,9 TWh Wasserstoff. Bis zum Jahr 2025 wird die Gesamtnachfrage durch die Industriebedarfe dominiert. Erst in den Jahren danach, erstmals zwischen 2027 und 2028, kommen Meldungen der Verteilnetzbetreiber in nennenswerten Höhen hinzu. Von 2029 auf 2030 erfolgt mehr als eine Verdopplung der Bedarfe, weil viele Verteilnetzbetreiber ab 2030 erstmals Wasserstoffbedarfe gemeldet haben. Der nächste große Sprung in den Bedarfsmeldungen ist zwischen 2031 und 2032 zu verzeichnen. Dies ist auf die erstmalige Bedarfsmeldung der

stromerzeugenden Kraftwerke sowie weiterer Großverbraucher zurückzuführen. Beide Gruppen sind auf die Zulieferung von Wasserstoff über das Pipelinesystem angewiesen, weil die großen benötigten Mengen nicht durch lokale Erzeugung gedeckt werden können.

Die Meldungen antizipieren demnach, dass ab 2032 das geplante Wasserstoffkernnetz zur Verfügung steht und Wasserstoff per Pipeline nach Baden-Württemberg transportiert werden kann. In den Folgejahren findet bis 2037 ein weiterer Aufwuchs aus der Industrie und aus den Verteilnetzbetreiber-Meldungen statt. Zwischen 2037 und 2038 ist ein leichter Rückgang zu beobachten, der darauf zurückzuführen ist, dass ab 2037/38 die Kraftwerke zur Stromerzeugung aus Wasserstoff aufgrund des fortschreitenden Ausbaus der erneuerbaren Stromerzeugung aus Windenergie und Photovoltaik einen geringeren Wasserstoffbedarf gemeldet haben, weil sie erwarten, dass die Wasserstoffkraftwerke an weniger Stunden im Jahr zum Einsatz kommen werden. Diese Entwicklung wird bezüglich des Wasserstoffgesamtbedarfs bis 2039 teilweise durch neu hinzukommende Meldungen, insbesondere von weiteren Verteilnetzbetreibern, kompensiert. Zwischen den Jahren 2039 und 2040 ist ein deutlicher Sprung um rund 10 TWh zu verzeichnen, bedingt durch die Meldung weiterer Verteilnetzbetreiber und einzelner Großverbraucher. Dieser ist auch dadurch bedingt, dass die terranets bw angekündigt hat, um die Klimaschutzziele des Landes Baden-Württemberg zu erfüllen, bis 2040 das Fernleitungsnetz vollständig auf Wasserstoff umstellen zu wollen. In den Meldungen für 2040 dürfte es sich daher auch um noch verbleibende Erdgasbedarfe der Verteilnetzbetreiber und Großverbrauchern handeln, die dann 2040 auf Wasserstoff umgestellt werden.

Im Sektor Industrie zeigt sich ein deutlicher Aufwuchs der Nachfrage bis zum Jahr 2035. Nach 2035 zeigen sich dann nur noch geringfügige Erhöhungen. Auf die Industrie entfällt im Jahr 2025 ein Anteil von rund 87% des gesamten Wasserstoffbedarfs, im Jahr 2030 ca. 52%, im Jahr 2035 ca. 40% und im Jahr 2040 noch ca. 34% des gesamten Wasserstoffbedarfs. Die Energiewirtschaft hat im Jahr 2025 einen Anteil von etwa 11% des Gesamtwasserstoffbedarfs, und im Jahr 2030 ca. 42%. Ab 2035 entfällt mit 55% der überwiegende Teil des Gesamtwasserstoffbedarfs auf die Energiewirtschaft, der bis 2040 auf 59% steigt. Der Wasserstoffbedarf im Straßenverkehr spielt im Vergleich zu Energiewirtschaft und Industrie nur eine untergeordnete Rolle. Er macht im Jahr 2030 rund 5% des Gesamtwasserstoffbedarfs aus und steigt bis 2040 auf ca. 7%.

Auf Basis der zeitlichen Entwicklung des Gesamtbedarfs wurde in einem weiteren Schritt eine Regionalisierung auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte vorgenommen. Abbildung 24 zeigt dabei die regionale Entwicklung des Wasserstoffbedarfs basierend auf der Summe der Bedarfe aus Industrie, Verkehr und den Kraftwerken zur Stromerzeugung. Darüber hinaus zeigt die schematische Darstellung den Ausbau des Wasserstoff-Kernnetzes und die geographische Verortung der Wasserstoff-Kraftwerke zur Stromerzeugung. Da gerade die Kraftwerke wichtige Ankerkunden für die Fernleitungsnetzbetreiber darstellen, verwundert es nicht, dass der geplante Leitungsnetzausbau im Zeitverlauf optimal zu den Kraftwerksstandorten passt. Auch die Stadt- und Landkreise mit einem hohen bis sehr hohen Medianbedarf könnten ab 2035 voraussichtlich über die Fernleitungsnetze versorgt werden. Bis 2040 scheint eine flächendeckende Wasserstoffversorgung für Industrie, Verkehr und

Großkraftwerke in Baden-Württemberg basierend auf dem heutigen Erdgas-Fernleitungsnetz durchaus realistisch. Um den Industriestandort Baden-Württemberg auch kurzfristig wettbewerbsfähig zu halten, ist insbesondere in den frühen Jahren eine lokale Versorgungsinfrastruktur zu entwickeln, die die ersten Bedarfe zuverlässig bedient und langfristig zu einer Gesamtinfrastruktur mit dem Fernleitungsnetz zusammenwächst. Lokale Konzepte können dabei zusätzliche Aufgaben, wie die Unterstützung der Integration der erneuerbaren Stromerzeugung ins Stromnetz, die Bereitstellung von Abwärme für lokale Anwendung oder die Bereitstellung von Sauerstoff übernehmen und langfristig einen gewissen Grad an Resilienz und damit einen Beitrag zur Versorgungssicherheit bieten.

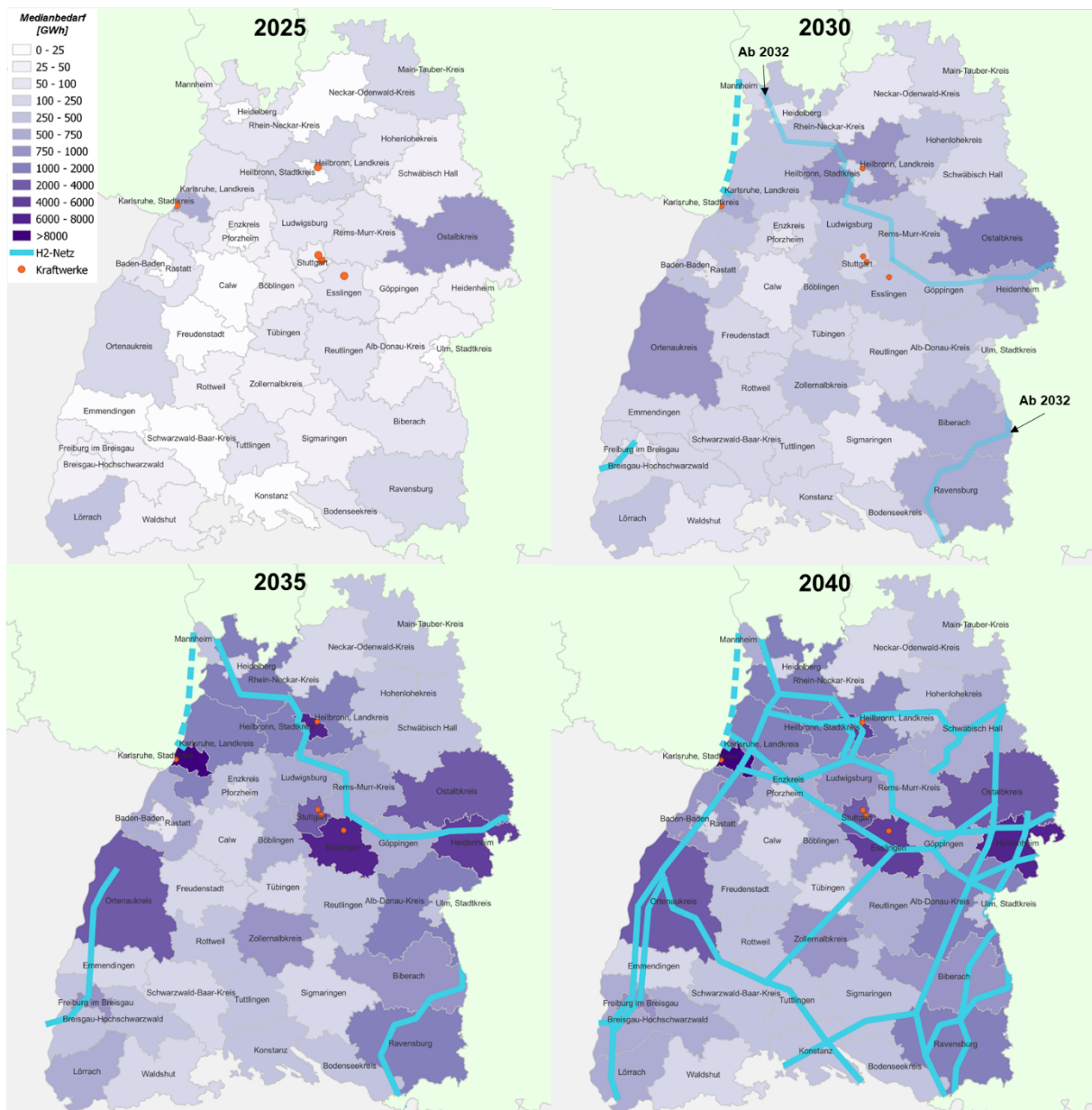


Abbildung 24: Regionale Entwicklung des Wasserstoffbedarfs basierend auf den summierten Bedarfen aus Industrie, Verkehr und Großkraftwerken.

Vereinfachte, schematische Darstellung des Ausbaus des Wasserstoffkernnetzes in Baden-Württemberg basierend auf Darstellungen der terranets BW. Darüber hinaus könnte ein Anschluss an außerhalb von Baden-Württemberg verlaufende Wasserstoffleitungen erfolgen.

6.2 Abschätzung Elektrolyseleistung

Nach den aktuellen Planungen werden bis zum Jahr 2030 in Baden-Württemberg keine Wasserstoff-Fernleitungen in Betrieb sein. Einzige Ausnahme stellt der grenzüberschreitende Wasserstofftransport im Vorhaben RHYn Interco dar, der bis 2028 zwischen Frankreich und Baden-Württemberg realisiert werden soll. Mit dem Neubau einer Verbindung nach Frankreich und der Umstellung bestehender Gasleitungen werden Großabnehmer der badenovaNETZE bei Freiburg i. Br. angebunden.

Die Inbetriebnahme des Wasserstoff-Kernnetzes der Fernleitungsnetzbetreiber ist, wie zuvor dargestellt, erst für das Jahr 2032 geplant. Bis dahin muss daher der Wasserstoffbedarf durch regionale oder überregionale Wasserstofferzeugung im Land gedeckt werden. Um eine erste Indikation dafür zu bekommen, welche Elektrolyseleistungen hierfür benötigt würden, wenn der Bedarf von Industrie und Straßenverkehr für 2025 und 2030 durch Vor-Ort-Erzeugung bereitgestellt werden müsste, wurde in einem weiteren Schritt auf Basis der regionalisierten Wasserstoffbedarfe mit den jeweils summierten Bedarfen aus Industrie und Straßenverkehr - die Großkraftwerke zur Stromerzeugung spielen auf dieser Zeitachse noch keine Rolle - der theoretisch erforderliche Zubau an Elektrolysekapazitäten berechnet. Die Elektrolyseleistung ist dabei in MW elektrischer Anschlussleistung angegeben und wurde unter der Annahme des Wasserstoffbedarfs des Medianszenarios, einer Volllaststundenzahl von 4.500 Stunden pro Jahr und einem Wirkungsgrad der Elektrolyse von 70 % berechnet. Die Volllaststundenzahl von 4.500 Stunden ist dabei bewusst gewählt, weil diese bei entsprechender Systemintegration aus Windenergie und Photovoltaik vor Ort zunächst ohne zusätzliche Inanspruchnahme des Stromübertragungsnetzes realisiert werden könnte. Höhere Volllaststundenzahlen können unter Nutzung weiterer erneuerbarer Energiequellen realisiert werden. Mit einer anteiligen Nutzung von Offshore-Windstrom, der über Power-Purchase-Agreements bezogen wird sind auch 6.000 Volllaststunden erreichbar. Dann ist die benötigte Elektrolyseleistung geringer, es muss aber zwingend das Stromübertragungsnetz genutzt und ggf. auch für diese zusätzlich zu transportierenden Strommengen ausgebaut werden. Für die benötigten Wasserstoffmengen in Höhe von 3,9 TWh im Jahr 2025 ist bei 4.500 Volllaststunden eine Elektrolyseanschlussleistung von ca. 1,2 GW bei einem Strombedarf von 5,6 TWh Strom erforderlich. Für das Jahr 2030 werden bei einem Wasserstoffbedarf von 12,8 TWh eine Elektrolyseleistung von ca. 4,1 GW bei einem Strombedarf von ca. 18,3 TWh Strom benötigt.

Die Darstellung erlaubt eine erste Indikation bezüglich der potenziell erforderlichen elektrischen Anschlussleistungen und Elektrolyseurkapazitäten in den jeweiligen Stadt- und Landkreisen, wenn zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der Industrie frühzeitig Wasserstoff zur Verfügung gestellt werden und nicht auf die Entwicklung der leitungsgebundenen Infrastruktur gewartet werden soll. Die regionale Erzeugung und Verteilung über regionale Pipelines oder LKW-Trailer-Transporte im Sinne von regionalen H₂-Hubs muss die überregionale Leitungsinfrastruktur gezielt ergänzen und dabei so entwickelt werden, dass sich langfristig tragfähige Geschäftsmodelle etablieren können.

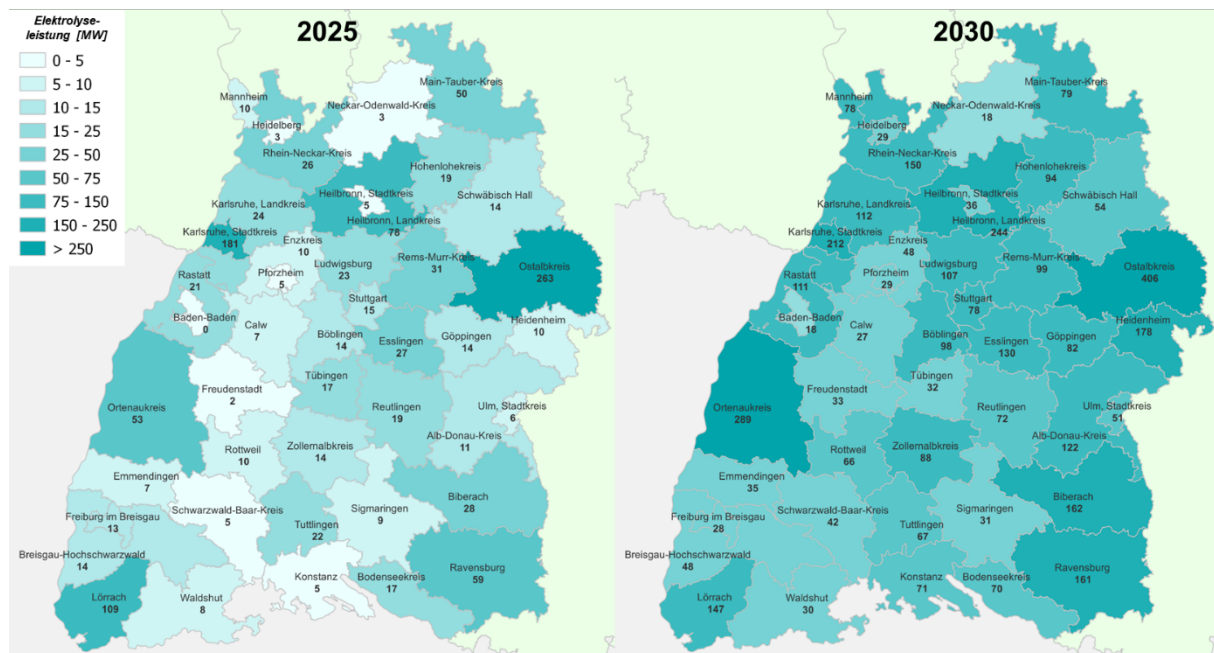


Abbildung 25: Hypothetisch erforderlicher Zubau Elektrolyseleistung in MW nach Stadt- und Landkreisen.

Abschätzung unter Annahme des Medianszenarios, einer Volllaststundenzahl von 4.500 h sowie einem Elektrolysewirkungsgrad von 70 %.

6.3 Einordnung der Ergebnisse

Die bisher verfügbaren Abschätzungen zum Wasserstoffbedarf in Baden-Württemberg gingen von wesentlich geringeren Wasserstoffbedarfen aus, weshalb an dieser Stelle eine Einordnung der Ergebnisse mit Bezug zu den bisher vorliegenden Bedarfsanalysen erfolgen muss: Neben der Wasserstoffbedarfserhebung der terranets bw aus dem Jahr 2021 (vgl. terranets BW (2021)) ist die Sektorzielstudie (vgl. ZSW et al. (2023)) zu nennen, welche ein Szenario zur Erreichung von Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2040 entwickelte – hier als „Sektorziele“ aufgeführt. Darüber hinaus weist die Studie zu Wasserstoffbedarfen von Prognos/Sphera (vgl. Prognos und Sphera (2022)) Werte für das Jahr 2035 aus.

Abbildung 26 illustriert, dass die aktuelle Bedarfserhebung bereits deutlich früher sehr viel höhere Wasserstoffbedarfe ausweist. Dies ist sicherlich auch auf die Auswirkungen der Energiekrise in Folge des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine zurückzuführen, weil sich Unternehmen gezwungener Maßen mit Alternativlösungen zum Erdgas bei gleichzeitig sehr hohen Strompreisen auseinandersetzen mussten. Dies dürfte die Transformationsaktivitäten zur klimaneutralen Produktion beschleunigt und die Entwicklung um etwa 5 bis 10 Jahre vorgezogen haben.

Für das Jahr 2025 liegt die aktuelle Erhebung um den Faktor 6 über der Erhebung 2021 und fast viermal so hoch wie Ergebnisse der Sektorzielstudie. Für das Jahr 2030 liegt zwischen den beiden Erhebungen der Faktor 3, zwischen der Sektorzielstudie und der aktuellen Erhebung liegt der Faktor 5. Das bestätigt die Annahme, dass die Energiekrise und der Ukraine-Krieg dazu geführt haben dürften, dass sich die Akteure früher mit einem Umstieg von fossilen Brennstoffen hin zu einer klimaneutralen Energieversorgung auf Basis erneuerbarer

Energien beschäftigt haben, mit der Folge eines deutlichen Vorzieheffekts für die Energieträgerumstellung. Im Jahr 2035 liegen die beiden szenarienbasierten Studien um den Faktor 4,5 unter der aktuellen Erhebung. Ein Vergleich mit der Erhebung 2021 ist nur eingeschränkt möglich, da nur ein Wert für das Jahr 2032 verfügbar ist. Im Jahr 2040 werden die Unterschiede etwas geringer - zwischen der aktuellen Erhebung und der Erhebung 2021 liegt der Faktor 1,7, zur Sektorzielstudie ergibt sich eine Abweichung um den Faktor 3. Somit wurden aktuell auch in der langen Frist deutlich höhere Bedarfe gemeldet als bisher angenommen wurden.

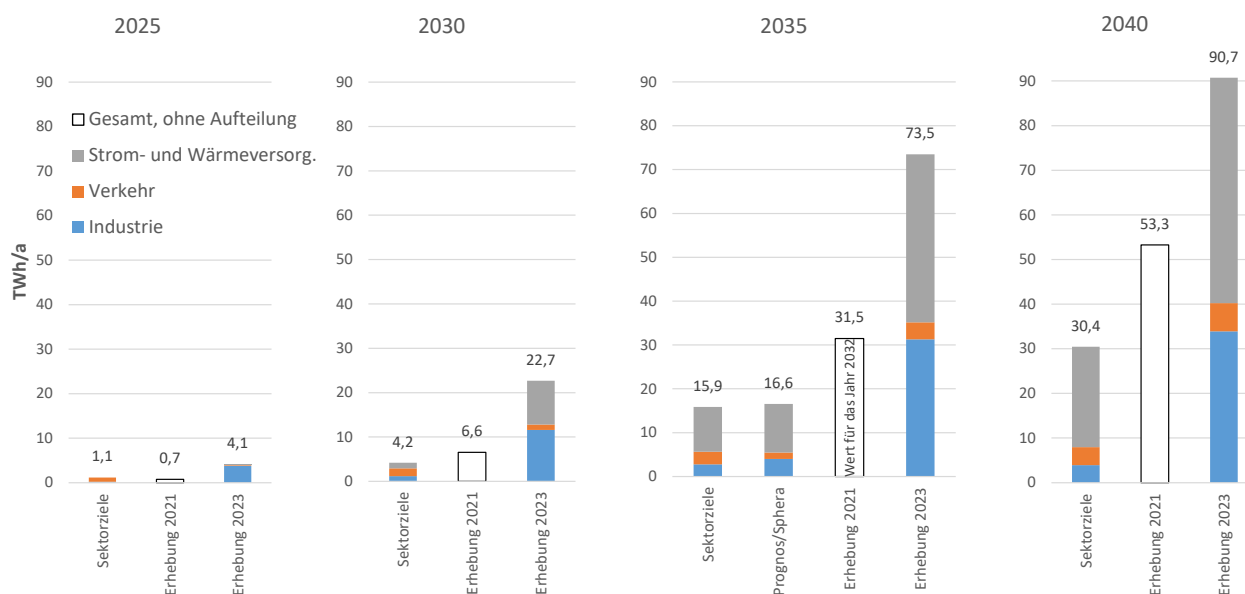


Abbildung 26: Gegenüberstellung der Ergebnisse mit bisherigen Studien und Abfragen.

Für die dargestellten Werte der Erhebung 2023 wurde für die Industrie der jeweilige Medianwert, für den Verkehr der Mittelwert angesetzt.

Es sein an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Sektorzielstudie mit den Ergebnissen einer Befragung nur sehr bedingt vergleichbar ist. Ziel der Sektorzielstudie war es, ein Zielszenario zu entwickeln, das aufzeigt, dass und wie die Klimaschutzziele für Baden-Württemberg - -65 % Treibhausgasminderung im Jahr 2030 und Treibhausgasneutralität im Jahr 2040 - erreicht werden können und welche Beiträge die jeweiligen Sektoren dazu leisten müssen. Für solche Studien wird in der Regel immer der effizienteste Weg zur Zielerreichung unterstellt, was in der Industrie bevorzugt durch eine Elektrifizierung der Prozesse erreicht werden kann. So wurde nur in ausgewählten Teilen der energieintensiven Industrie vom Einsatz von Wasserstoff ausgegangen. Dementsprechend stellt die Sektorzielstudie auch nur ein mögliches Szenario von mehreren Möglichkeiten zum Erreichen der Klimaschutzziele dar und steht daher nicht im Widerspruch zur Bedarfserhebung.

Auch im Vergleich der beiden Erhebungen aus dem Jahr 2021 und der aktuellen Erhebung zeigt sich das deutlich gewachsene Bewusstsein der Notwendigkeit des Verzichts auf fossile Energieträger in einer deutlich höheren Anzahl an Teilnehmenden ebenso wie an der gemeldeten Bedarfsstruktur.

7 Referenzen

Blesl et al. (2008): Wärmeetlas Baden-Württemberg. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart. 2008.

dena et al. (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität – Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Deutsche Energie-Agentur GmbH. Oktober 2021.

Ernst & Young und RWTH Aachen (2023): Potenzialanalyse Wasserstoff in Hessen. Studie im Auftrag der LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH. Juli 2023.

Fraunhofer ISI und Consentec et al. (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland – Treibhausgasneutrale Hauptszenarien Modul Verkehr. Studie im Auftrag Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). November 2021.

Lauterbach et al. (2011): Das Potenzial solarer Prozesswärme in Deutschland. Teil 1 des Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben „SOPREN – Solare Prozesswärme und Energieeffizienz“. Institut für Thermische Energietechnik, Universität Kassel. 2011.

Neuwirth et al. (2022): The future potential of hydrogen demand in energy-intensive industries – a site-specific approach applied to Germany, in: Energy Conversion and Management, Vol. 252, 115052. Januar 2022.

NOW (2023): Market development of climate-friendly technologies in heavy-duty road freight transport in Germany and Europe. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr. Mai 2023.

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045 – Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Studie im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende. Juni 2021.

Prognos und Sphera (2022): Analyse der aktuellen Situation des H₂-Bedarfs und – Erzeugungspotenzials in Baden-Württemberg. Studie im Auftrag der e-mobil BW GmbH. Januar 2022.

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2023a): Verarbeitendes Gewerbe in den Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs 2022. Jahresergebnis für Betriebe (Berichtskreis 20+). Statistische Berichte Baden-Württemberg. E I 1-j/22 (3). 2023.

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2023b): Verarbeitendes Gewerbe in Baden-Württemberg 2022. Jahresergebnis für Betriebe (Berichtskreis 20+). Statistische Berichte Baden-Württemberg. E I 1-j/22 (4). 2023.

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2023c): Betriebe, Beschäftigte, Entgelte und Umsatz im Verarbeitenden Gewerbe in Baden-Württemberg 2022 nach Beschäftigtengrößenklassen in ausgewählten Wirtschaftszweigen. Erreichbar unter <https://www.statistik-bw.de/Industrie/Struktur/VG-GK-BBEU.jsp>

terraneis BW (2021): Ergebnisse der Bedarfsabfrage 2021. Stand 15.12.2022. Abgerufen am 24.10.2023: <https://www.h2-fuer-bw.de/>

VM BW (2023a): Elektrifizierung von Schienenstrecken. Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg. Abgerufen am 20.12.2023: <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/mobilitaet-verkehr/schiene/elektrifizierung>

VM BW (2023b): Klimaneutral auch ohne Oberleitung. Pressemitteilung des Ministeriums für Verkehr Baden-Württemberg vom 17.10.2023. Abgerufen am 20.12.2023: <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/service/presse/pressemitteilung/pid/klimaneutral-auch-ohne-oberleitung/>

ZSW et al. (2022): Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040 – Teilbericht Sektorziele 2030. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Mai 2022.

ZSW et al. (2023): Sektorziele 2030 und klimaneutrales Baden-Württemberg 2040. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Juli 2023.

Abbildungen

Abbildung 1: Übersicht über die Teilnehmerzusammensetzung der Gesamtstichprobe.	8
Abbildung 2: Überblick über die Anzahl an Rückmeldungen aus dem verarbeitenden Gewerbe nach Wirtschaftszweig.	10
Abbildung 3: Überblick über die Rückmeldungen zu den geplanten Nutzungsarten von Wasserstoff nach Wirtschaftszweig.	11
Abbildung 4: Darstellung der Lageparameter.	14
Abbildung 5: Übersicht über gemeldete Bedarfe nach Wirtschaftszweig.	17
Abbildung 6: H ₂ -Gesamtbedarfe im Bereich Industrie nach Wirtschaftszweigen und Szenario.	19
Abbildung 7: Kartendarstellung der industriellen Wasserstoffnachfrage nach Stadt- und Landkreisen im Medianszenario.	20
Abbildung 8: Überblick über die industrielle Wasserstoffnachfrage nach Stadt- und Landkreisen und Szenario 2025.	22
Abbildung 9: Überblick über die industrielle Wasserstoffnachfrage nach Stadt- und Landkreisen und Szenario 2030.	23
Abbildung 10: Überblick über die industrielle Wasserstoffnachfrage nach Stadt- und Landkreisen und Szenario 2035.	24
Abbildung 11: Überblick über die industrielle Wasserstoffnachfrage nach Stadt- und Landkreisen und Szenario 2040.	25
Abbildung 12: Überblick über Angaben zur stofflichen Nutzung in der Industrie nach Wirtschaftszweig.	26
Abbildung 13: Bandbreite des Wasserstoffbedarfs im Verkehrssektor.	31
Abbildung 14: Wasserstoffbedarf der Nutzfahrzeuge (Sattelzugmaschinen und Lkw).	32
Abbildung 15: Wasserstoffbedarf der Busflotte.	32
Abbildung 16: Wasserstoffbedarf der sonstigen Nutzfahrzeuge.	33
Abbildung 17: Regionalisierung der Wasserstoffbedarfe im Verkehr.	35
Abbildung 18: Bandbreite der Wasserstoffnachfrage im Verkehr 2025 nach Stadt- und Landkreisen.	36
Abbildung 19: Bandbreite der Wasserstoffnachfrage im Verkehr 2030 nach Stadt- und Landkreisen.	37
Abbildung 20: Bandbreite der Wasserstoffnachfrage im Verkehr 2035 nach Stadt- und Landkreisen.	38
Abbildung 21: Bandbreite der Wasserstoffnachfrage im Verkehr 2040 nach Stadt- und Landkreisen.	39
Abbildung 22: Zeitliche Entwicklung der gemeldeten Bedarfe aus dem Bereich Energiewirtschaft.	41
Abbildung 23: Zeitliche Entwicklung des Gesamtbedarfs.	42
Abbildung 24: Regionale Entwicklung des Wasserstoffbedarfs basierend auf den summierten Bedarfen aus Industrie, Verkehr und Großkraftwerken.	44
Abbildung 25: Hypothetisch erforderlicher Zubau Elektrolyseleistung in MW nach Stadt- und Landkreisen.	46
Abbildung 26: Gegenüberstellung der Ergebnisse mit bisherigen Studien und Abfragen.	47

Tabellen

Tabelle 1: Bestandsentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen in Baden-Württemberg im Segment Lkw und Sattelzugmaschinen.....	29
Tabelle 2: Bestandsentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen in Baden-Württemberg im Segment Kraftomnibusse.....	30
Tabelle 3: Bestandsentwicklung von Brennstoffzellenfahrzeugen in Baden-Württemberg im Segment Sonstige Nutzfahrzeuge.	31
Tabelle 4: Aufteilung des Gesamtbedarfs für die Jahre 2025, 2030, 2035 und 2040.....	42