



Wasserstoff für Aachen

Leitfaden für die
Stadt Aachen

www.aachen.de

B E T
Energie. Weiter denken

stadt aachen

Auftraggeberin

Stadt Aachen

Dezernat VI – Wohnen, Soziales und Wirtschaft
Verwaltungsgebäude Katschhof
Johannes-Paul-II.-Straße 1
52058 Aachen

Bearbeitet durch

Fachbereich Wirtschaft, Wissenschaft, Digitalisierung und Europa

Dieter Begaß, Catharina Gottschalk, Christoph Cormann
Fachbereich Wirtschaft, Wissenschaft, Digitalisierung und Europa (FB 02/000)
Verwaltungsgebäude Katschhof
Johannes-Paul-II.-Straße 1
52058 Aachen
Tel.: 0241 432-7610

BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH

Dr. Olaf Unruh, Sebastian Seier, Lukas Wammes, Nikolai Falter, Samuel Guthörl, Michelle Friedrich
Alfonsstraße 44
52070 Aachen
Tel.: +49 201 47062-0

Titelbild: Carolina Nichitin/unsplash.com

Stand: November 2022

Inhalt

1	Zusammenfassung	7
2	Wasserstoff für eine klimaneutrale Zukunft	12
2.1	Die Bedeutung von Wasserstoff im Rahmen der Energiewende	12
2.2	Vorgehensweise bei der Erstellung des Wasserstoffleitfadens	15
3	Grundlagen der Wasserstoffwirtschaft	17
4	Bestandsaufnahme für die Stadt Aachen	27
4.1	Aktueller kommunalpolitischer Rahmen in der Stadt Aachen.....	27
4.2	Status quo der Wirtschaftsstruktur in Aachen	31
4.3	Status quo der Verkehrsstruktur in Aachen.....	34
4.4	Status quo der Energie- und Gebäudeinfrastruktur in Aachen.....	37
4.5	Akteure im Themenfeld Wasserstoff	46
4.6	Geplante und laufende Wasserstoffprojekte	49
4.7	Erzeugung und Verbrauch von Wasserstoff in Aachen.....	54
4.8	Fazit zur Bestandsaufnahme.....	56
5	Zukunftsbilder für die Wasserstoffwirtschaft in Aachen	58
5.1	Die Aachener Wasserstoffwirtschaft in der „Welt der Moleküle“	59
5.2	Die Aachener Wasserstoffwirtschaft in der „Welt der Elektronen“	64
5.3	Fazit zu den Zukunftsbildern	69
6	Handlungsempfehlungen	71
6.1	SWOT-Analyse für die Stadt Aachen	71
6.2	Handlungsempfehlungen für die Stadt Aachen.....	74
7	Anhang	79
8	Fußnoten	80

Abbildungen

Abbildung 1: Vergleich des Wasserstoffbedarfs im Status quo und in den Zukunftsbildern einer klimaneutralen Zukunft	9
Abbildung 2: Phasenmodell für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Aachen	11
Abbildung 3: Netto-Leistung zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland 2002 – 2045	12
Abbildung 4: Wertschöpfungskette der Wasserstoffwirtschaft.....	17
Abbildung 5: Anteile der Energieträger zur Wasserstofferzeugung in Deutschland (stoffliche und energetische Nutzung).....	18
Abbildung 6: Wasserstoff-Farbpalette	18
Abbildung 7: Potenzielle Use Cases für Wasserstoff	23
Abbildung 8: Wasserstoffverbrauch 2050 in NRW	24
Abbildung 9: Erzeugung von synthetischem Methan.....	25
Abbildung 10: CO ₂ -Emissionen der Stadt Aachen (2018)	27
Abbildung 11: CO ₂ -Minderungspotenziale durch kommunale Maßnahmen	28
Abbildung 12: Bestimmung des höherrangigen Verfahrens bei der Genehmigung von Wasserstoffinfrastruktur	31
Abbildung 13: Wirtschaftszweige in der Stadt Aachen im Jahr 2019 nach Jahresumsatz (in Mrd. Euro)	32
Abbildung 14: Bereiche des verarbeitenden Gewerbes mit > 200 Mio. Euro Jahresumsatz (2019, in Mrd. Euro)	33
Abbildung 15: Kfz-Bestand in der Stadt Aachen am 1. Januar 2021	35
Abbildung 16: Anteile der Antriebsarten am Pkw-Bestand in der Städtereion Aachen am 1. Januar 2021	36
Abbildung 17: Hochspannungsnetz der Regionetz GmbH und Anschluss an das Übertragungsnetz im Aachener Stadtgebiet	39
Abbildung 18: Ausschnitt aus dem Netzentwicklungsplan Gas für 2027 (links) und 2032 (rechts)	40
Abbildung 19: Endenergiebedarf der Stadt Aachen 2020 nach Energieträgern	41
Abbildung 20: Endenergiebedarf der Stadt Aachen 2020 nach Sektoren	42
Abbildung 21: Wärmebedarf in der Stadt Aachen	43
Abbildung 22: Fern- und Nahwärmeinfrastruktur in der Stadt Aachen	44
Abbildung 23: Verteilung des Gebäudebestands in Aachen nach Baujahren	45
Abbildung 24: Anzahl Wohnungen nach Heiztechnologie und Baujahr	46
Abbildung 25: Akteure im Bereich Wasserstoff in Aachen und im Umland	47
Abbildung 26: Skizze möglicher Leitungsverläufe im Rahmen des Projekts "Green Octopus"	51
Abbildung 27: Wasserstoffeinspeisungen in das Fernleitungsnetz im Jahr 2032	55
Abbildung 28: Ein- bzw. Auspeisemengen der in der Stadt Aachen gemeldeten Wasserstoffprojekte für den NEP 2022-2032	56
Abbildung 29: Endenergieverbrauch in Deutschland – Vergleich der Zukunftsbilder mit dem Status quo	59
Abbildung 30: Moleküle-Welt – Endenergieverbrauch im Mobilitätssektor.....	60
Abbildung 31: Moleküle-Welt – Endenergieverbrauch im Haushaltssektor	61
Abbildung 32: Moleküle-Welt – Endenergieverbrauch im GHD-Sektor	62

Abbildung 33: Moleküle-Welt – Endenergieverbrauch im Industriesektor	63
Abbildung 34: Moleküle-Welt – Endenergiebedarf an Wasserstoff & synthetischen Gasen.....	64
Abbildung 35: Elektronen-Welt – Endenergieverbrauch im Mobilitätssektor	65
Abbildung 36: Elektronen-Welt – Endenergieverbrauch im Haushaltssektor	66
Abbildung 37: Elektronen-Welt – Endenergieverbrauch im GHD-Sektor.....	67
Abbildung 38: Elektronen-Welt – Endenergieverbrauch im Industriesektor.....	68
Abbildung 39: Elektronen-Welt – Endenergiebedarf an Wasserstoff & synth. Gasen	69
Abbildung 40: Vergleich des Wasserstoffbedarfs im Status quo und in den Zukunftsbildern einer klimaneutralen Zukunft	70
Abbildung 41: Phasenmodell für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Aachen	75

1. Zusammenfassung

Der Klimaschutz ist eine der größten Aufgaben unserer Zeit. Staaten weltweit haben sich (unterschiedlich ambitionierten) Klimazielen verschrieben. Auch Deutschland hat sich ein klares klimapolitisches Ziel gesetzt: die Erreichung der Treibhausgasneutralität bis 2045.

Klimaneutralität – ohne grünen Wasserstoff kaum möglich

Um die Klimaneutralität zu erreichen, muss das gesamte Energiesystem grundlegend transformiert und die erneuerbaren Energien ausgebaut werden. Wasserstoff ist ein wichtiger Baustein zur Vollendung der Energiewende. Aufgrund seiner chemischen Eigenschaften als Energieträger eignet sich das Gas, um die volatile Erzeugung von Wind- und Solarenergie auszugleichen. Wasserstoff lässt sich – anders als Strom – über Wochen und Monate hinweg mit nur geringen Verlusten speichern und ermöglicht einen saisonalen Ausgleich der wetterbedingten Schwankungen von erneuerbaren Energien. Nicht (effizient) elektrifizierbare Anwendungen lassen sich mithilfe von Wasserstoff dekarbonisieren. Klimaneutralität gänzlich ohne Wasserstoff ist kaum vorstellbar.

Auch die Stadt Aachen möchte ihren Beitrag zum Klimaschutz leisten. Die Stadt hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2030 klimaneutral zu sein. Nicht zuletzt durch zwei im Mai 2021 gestellte Ratsanträge beschäftigt sich die Stadt intensiv mit der Frage, welche Rolle Wasserstoff im zukünftig treibhausgasneutralen Energiesystem von Aachen spielen kann. Der vorliegende Leitfaden soll hierbei als fachliche Grundlage und Anregung für die öffentliche Diskussion dienen.

Gute Ausgangsbedingungen für die Wasserstoffwirtschaft in Aachen

Die für diesen Wasserstoffleitfaden durchgeführte Analyse der Ausgangssituation in Aachen zeigt, dass der aktuelle Wasserstoffverbrauch von ca. 1,5 Gigawattstunden pro Jahr vor allem durch Forschungsinstitute der RWTH Aachen und die Aachener Wasserstofftankstelle verursacht wird. Hier und in weiteren Bereichen ist die Tendenz für den Wasserstoffbedarf klar steigend. Unter anderem in der Aachener Lebensmittelindustrie, die einen Großteil der wirtschaftlichen Wertschöpfung in Aachen ausmacht, könnte in Zukunft die notwendige Prozesswärme zu beachtlichen Teilen aus Wasserstoff gewonnen werden.

Aachen kann beim Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft zudem auf eine starke Akteurslandschaft im Bereich der Wissenschaft und Wirtschaft zurückgreifen. Zahlreiche Unternehmen und verschiedene Forschungsinstitute verfügen bereits über einschlägige technische Expertise. Konkrete Projekte, wie der von STAWAG und ASEAG geplante Elektrolyseur am Windpark Aachen Nord, ermöglichen zudem, wichtige Erfahrungen zu sammeln, um den künftigen Hochlauf zielorientiert und effizient gestalten zu können.

Zwischen den zahlreichen Akteuren besteht durch Initiativen wie dem Hydrogen Hub Aachen und das Zukunftskluster H₂ bereits eine intensive Vernetzung mit einem regen Erfahrungs- und Wissensaustausch. Auch auf politischer Ebene bietet die Kooperation mit umliegenden Gebietskörperschaften (z. B. über das HyExpert Projekt Aachen PLUS oder den EMR Booster) Möglichkeiten, Synergieeffekte zu heben, gegenseitig von Erfahrungen zu lernen und eine regionenübergreifende Wasserstoffwirtschaft aufzubauen.

Aachen benötigt für die Klimaneutralität mindestens 777 Gigawattstunden Wasserstoff pro Jahr

Im Rahmen dieser Studie wurden zwei Szenarien für den zukünftigen Wasserstoffbedarf in Aachen entwickelt, die unterschiedliche technologische Entwicklungspfade darstellen. Im ersten Szenario werden zum Erreichen der Klimaneutralität Anwendungen, die heute mit Erdgas, Benzin oder Diesel betrieben werden, zu großen Teilen auf Wasserstoff umgestellt. Dementsprechend trägt das Szenario den Namen „Moleküle-Welt“.

In der Moleküle-Welt kann im Zielzustand der Klimaneutralität insgesamt mit einem Wasserstoff-Endenergiebedarf von 1.269 GWh pro Jahr gerechnet werden. Im Umwandlungssektor, also zur Erzeugung von Fernwärme sowie zur Rückverstromung, kämen ca. 190 GWh pro Jahr hinzu. Im Vergleich zu heute würde also fast 1.000 mal mehr Wasserstoff benötigt werden. Gewerbe, Handel und Dienstleistungen sowie die Industrie stellen dabei die größten Abnehmer dar. Doch auch im Haushalts- und Verkehrssektor ist in diesem Szenario mit einem signifikanten Wasserstoffbedarf zu rechnen. Der erfolgreiche Hochlauf von Wasserstoff in allen Bereichen der Wirtschaft und des täglichen Lebens im Stadtgebiet Aachen ist in diesem Szenario also ein essenzieller Faktor für das Erreichen der Klimaneutralität.

Im zweiten Szenario werden zum Erreichen der Klimaneutralität Anwendungen, die heute mit Erdgas, Benzin oder Diesel betrieben werden, größtenteils elektrifiziert. Nur wenige Anwendungen, bei denen eine (kosten-)effiziente Elektrifizierung nicht möglich ist, werden auf Wasserstoff umgestellt. Dementsprechend trägt das Szenario den Namen „Elektronen-Welt“.

In der Elektronen-Welt nehmen Wasserstoff und seine Derivate eine weniger wichtige Rolle ein als in der Moleküle-Welt, sind aber dennoch zur Vollendung der Energiewende und vollständigen Dekarbonisierung der Wirtschaft unerlässlich. Insbesondere im Haushaltssektor spielen Wasserstoff bzw. synthetisches Methan in der Elektronen-Welt nur eine untergeordnete Rolle. Der prognostizierte Wasserstoff-Endenergiebedarf liegt in diesem Szenario im Zielzustand in Aachen bei 555 GWh pro Jahr. Dies entspricht etwas weniger als der Hälfte der benötigten Menge in der Moleküle-Welt. Auch hier käme weiterer Bedarf aus dem Umwandlungssektor zur Erzeugung von Fernwärme oder zur Rückverstromung hinzu. In der Elektronen-Welt belief sich diese Menge auf 222 GWh pro Jahr. In Summe würden in diesem Zukunftsbild also 777 GWh pro Jahr benötigt. Im Vergleich zum Status quo bedeutet dies in Summe einen mehr als 500-fachen Anstieg des Wasserstoffverbrauchs.

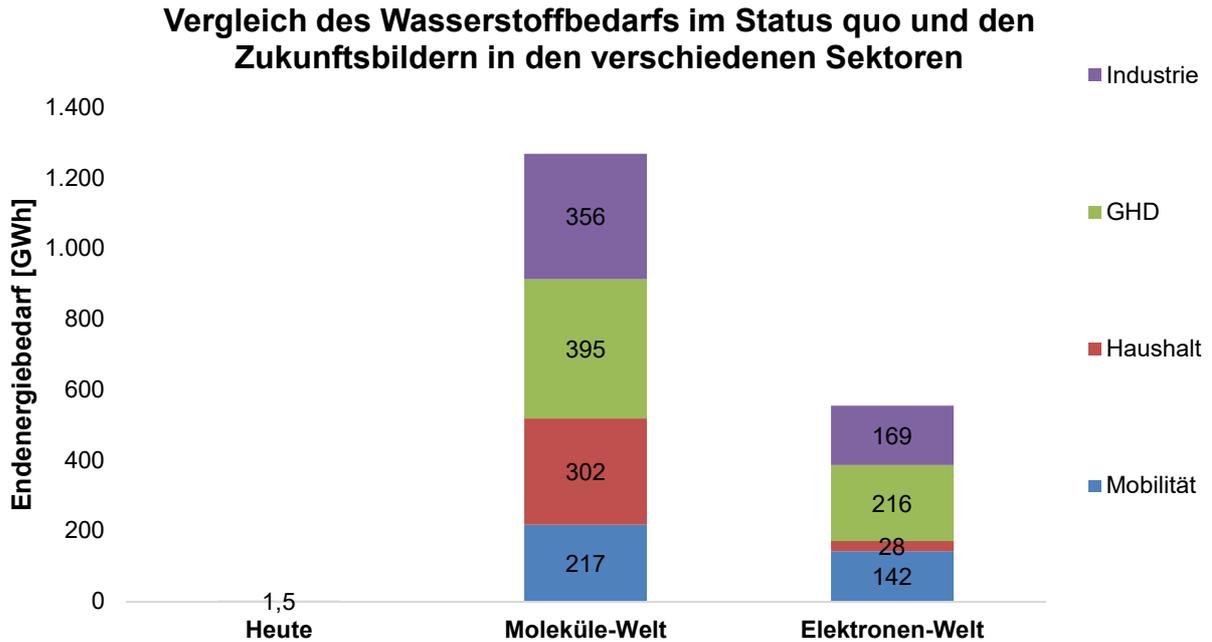


Abbildung 1: Vergleich des Wasserstoffbedarfs im Status quo und in den Zukunftsbildern einer klimaneutralen Zukunft

Industrie, Gewerbe und Verkehr sind „No-Regret-Bereiche“ für den Einsatz von Wasserstoff

Wenn auch die Verbräuche in den Sektoren Industrie, GHD und Verkehr in der Elektronen-Welt deutlich geringer ausfallen als in der Moleküle-Welt, erweist sich ihr Bedarf im Szenarienvergleich jedoch als relativ robust, sodass der Einsatz von Wasserstoff in diesen Sektoren eine sogenannte „No-Regret-Option“ ist. Zumindest kurz- und mittelfristig sollten also diese Bereiche im Fokus einer Hochlaufstrategie für die Wasserstoffwirtschaft in Aachen liegen. Die Entwicklung im Haushaltssektor ist hingegen mit der größten Unsicherheit behaftet, da es hier unterschiedliche Wärmeversorgungsoptionen wie dezentrale Wärmepumpen, klimaneutrale Fernwärme und den Einsatz von Wasserstoff gegeneinander abzuwägen gilt. Letztlich ist davon auszugehen, dass die zukünftige Wärmeversorgung alle genannten Optionen beinhalten wird – lediglich die Verteilung auf die unterschiedlichen Technologien ist höchst unsicher. Gleichzeitig erscheint es jedoch als wahrscheinlich, dass Wasserstoff auch bei der Erzeugung und Besicherung von Fernwärme in Aachen eine wichtige Rolle spielen wird.

Die zentrale strategische Frage für die Stadt Aachen: Woher kommt der Wasserstoff?

Ein zentrales Risiko für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in der Stadt Aachen ist die Frage, ob der benötigte grüne Wasserstoff angesichts der ambitionierten Klimaschutzziele der Stadt rechtzeitig beschafft und zur Verfügung gestellt werden kann. Fehlende Wasserstoffmengen stellen hierbei auch ein Risiko für die klimaschutzpolitische Zielerreichung dar, da eine vollständige Energiewende ohne Wasserstoff kaum gelingen kann. Auch die voraussichtlich notwendige Umrüstung der Gasnetze für die Verteilung von Wasserstoff ist hinsichtlich der Klimaschutzziele zeitlich sensibel.

Gelingt der Hochlauf der Wasserstoffnutzung in Aachen nicht, besteht zudem das Risiko, dass auf Wasserstoff angewiesene Unternehmen in umliegende Industriezentren, die ggf. über eine bessere Wasserstoffversorgung verfügen, abwandern. Die Energiewende und der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft sind somit Bausteine eines modernen, nachhaltigen und damit attraktiven Wirtschaftsstandorts.

Die zentrale strategische Frage für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft ist daher, woher Forschung, Wirtschaft, und ggf. Privathaushalte aus Aachen künftig grünen Wasserstoff beziehen können. Wie auch für andere urbane Ballungszentren üblich, existiert auf dem Gebiet der Stadt Aachen nur beschränktes Potenzial für den weiteren Ausbau von erneuerbaren Energien, die für die hiesige Produktion von grünem Wasserstoff erforderlich wären. Abhängig von der sich noch in der Ausarbeitung befindlichen europäischen Regulierung besteht womöglich auch die Option, Elektrolyseure auf dem Gebiet der Stadt Aachen zu betreiben. Diese könnten über sogenannte „Power-Purchase-Agreements“ (PPAs) bilanziell mit grünem Strom versorgt werden, um grünen Wasserstoff zu erzeugen.

Dennoch erscheint es als unwahrscheinlich, dass Aachen den benötigten Wasserstoff vollständig im eigenen Stadtgebiet erzeugen können. Ein Anschluss an ein Wasserstofftransportnetz ist somit strategisch essenziell. Ein Anschluss Aachens an das von den deutschen Fernleitungsnetzbetreibern geplante Wasserstofftransportnetz könnte Anfang der 2030er Jahre über den Grenzübergangspunkt Eynatten erfolgen.

Daneben existieren im Umland bereits einige Vorhaben zum Ausbau von erneuerbaren Energien (z. B. „Gigawattpakt“ im Rheinischen Revier). Diese Projekte könnten auch für die Erzeugung von grünem Wasserstoff mit anschließender Lieferung nach Aachen und in andere Ballungsgebiete genutzt werden.

Der Aufbau der Wasserstoffwirtschaft muss schon kurzfristig entschieden vorangetrieben werden

Um die gesetzten Klimaschutzziele erreichen zu können, ist ein zielgerichtetes, entschlossenes und zügiges Handeln sowohl von Politik und Verwaltung aber auch der lokalen Wirtschaft unabdingbar. In einer ersten Phase, beginnend mit dem Jahr 2022, sollte es deshalb darum gehen, die Grundlagen für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in Aachen zu legen. Hierzu gehört die eindeutige politische Zielformulierung, Wasserstoff zu einem zentralen Baustein der Energiewende in Aachen zu machen. Des Weiteren sollte die überregionale Vernetzung aller Akteure weiter intensiviert werden, insbesondere um mögliche Quellen für den Bezug von grünem Wasserstoff (Anschluss an ein zukünftiges Fernleitungssystem, H₂-Produktion im Umland) zu erschließen. Zudem gilt es, in Pilotprojekten Erfahrungen zum Aufbau der Wasserstoffwirtschaft zu sammeln und hierbei mit allen beteiligten Akteuren Wege und Möglichkeiten für den zügigen Aufbau von notwendiger Infrastruktur zu entwickeln. Die Inhalte dieser ersten Phase tragen auch dazu bei, Unternehmen Planungssicherheit für Investitionen in Wasserstofftechnologien zu geben.

Die Pilotprojekte in Phase 1 werden voraussichtlich einen besonderen Fokus auf den Verkehrssektor legen, wie es auch bei dem bereits geplanten STAWAG-Projekt oder im Rahmen des HyExpert-Projekts Aachen PLUS der Fall ist. Hintergrund ist hierbei, dass im Verkehrssektor die Zahlungsbereitschaft für Wasserstoff (aktuell ca. 9 Euro pro Kilogramm) höher ist als in anderen Sektoren. Die Szenarien zeigen jedoch, dass neben dem Verkehrssektor mittel- und langfristig insbesondere die Sektoren Industrie und Gewerbe potenzielle Abnehmer für grünen Wasserstoff sein werden. Deshalb sollte es in einer Mitte der 20er Jahre beginnenden zweiten Phase vor allem um die – möglichst leitungsgebundene – Versorgung von Ankerkunden in diesen Bereichen gehen.

In einer dritten Phase steht dann die Verdichtung der leitungsgebundenen Wasserstoffversorgung in Aachen im Mittelpunkt, d. h. der Anschluss weiterer Unternehmen und ggf. Haushalte an die dann existierende Verteilungsinfrastruktur für Wasserstoff. Wie stark in dieser Phase nachverdichtet wird, hängt zum einen an Verfügbarkeit und Preis von Wasserstoff zu diesem Zeitpunkt und zum anderen an der Nachfrage in den verschiedenen Sektoren, die insbesondere durch Verfügbarkeit und Preise von Alternativtechnologien bestimmt sein

wird. Erst hier entscheidet sich endgültig, ob die Aachener Zukunft eher der Moleküle- oder eher der Elektronen-Welt entspricht. Das hier beschriebene Phasenmodell ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 2: Phasenmodell für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Aachen

In Kapitel 6 sind neben den Phasen konkrete Handlungsempfehlungen dargestellt, wie die Stadt Aachen den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft unterstützen kann.

2. Wasserstoff für eine klimaneutrale Zukunft

2.1. Die Bedeutung von Wasserstoff im Rahmen der Energiewende

Die Energiewende ist seit Anfang der 2000er Jahre zum Markenzeichen der deutschen Energiepolitik geworden. Insbesondere Photovoltaik- und Windenergie wurden in Deutschland in den letzten beiden Jahrzehnten stark ausgebaut. Um die Klimaschutzziele zu erreichen, muss die installierte Leistung der erneuerbaren Energien (EE) innerhalb der nächsten 8 Jahre nochmals mehr als verdoppelt werden, vor allem unter dem Gesichtspunkt des künftig höheren Stromverbrauchs. Zum Erreichen der Klimaneutralität bis 2045 ist gar mehr als eine Vervielfachung notwendig (vgl. Abbildung 3).ⁱ

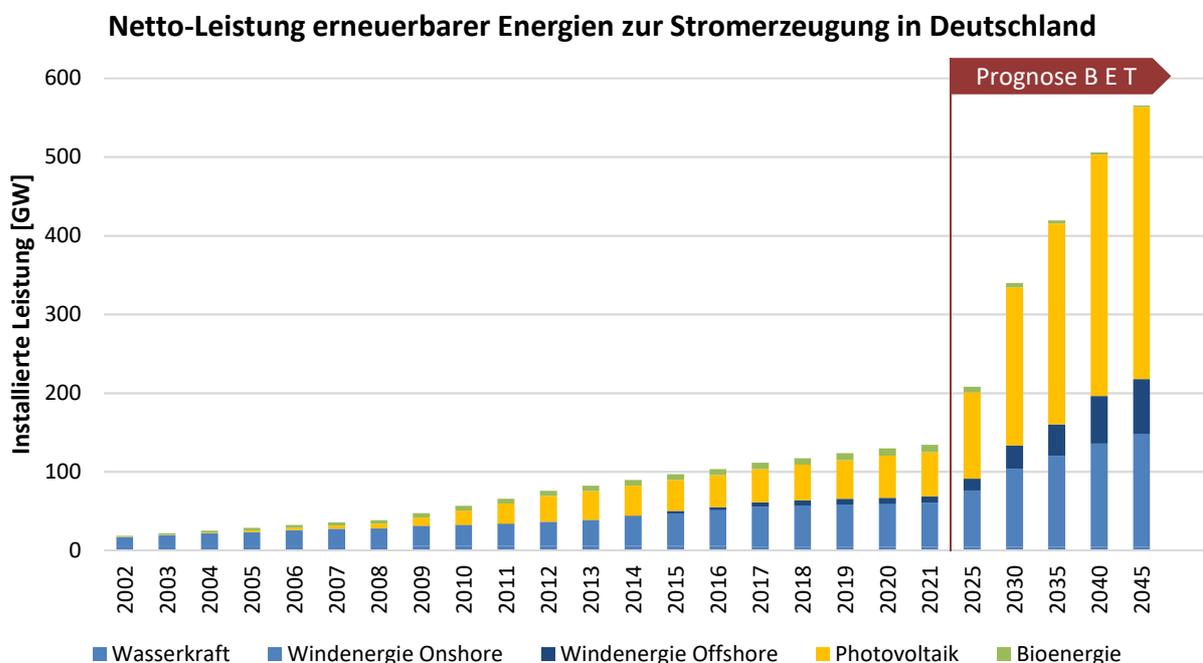


Abbildung 3: Netto-Leistung zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland 2002 – 2045 ⁱⁱ

Die Energiewende bringt neue Herausforderungen mit sich

Mit dem Voranschreiten der Energiewende ergeben sich neue Herausforderungen. So sind die dominanten Technologien, die Photovoltaik (PV) und die Windenergie, volatil. Das heißt, ihre Erzeugungsleistung ist wetterabhängig. Um die Stromnetze nicht zu überlasten und stets ein ausgeglichenes Verhältnis von Angebot und Nachfrage an elektrischer Energie sicherstellen zu können, sind Flexibilität von Last und Erzeugung sowie Energiespeicher erforderlich.

Zudem lassen sich nicht alle Energieverbraucher problemlos auf erneuerbare Energien umstellen. Beispielsweise reichen die durch erneuerbare Wärmequellen wie Solarthermie oder Biomasse erreichbaren Temperaturniveaus nicht aus, um damit Hochtemperaturprozesse in der Industrie dekarbonisieren zu können. Ein weiteres Beispiel ist der Flug-, Schiffs- und Schwerlastverkehr. Während die Neuzulassungen elektrischer Pkw rapide steigen, wird eine

EE-basierte Elektrifizierung den Anforderungen in den drei genannten Transportsektoren nicht gerecht. Insbesondere hinsichtlich der Reichweite und des Masseverhältnisses zwischen Batteriespeicher und Fahrzeug stößt die Elektrifizierung hier an ihre Grenzen. Alternative klimafreundliche Energieträger sind zwingend erforderlich.

Wasserstoff als zentraler Baustein für eine erfolgreiche Energiewende

Im zuletzt im August 2021 geänderten Bundes-Klimaschutzgesetz ist verbindlich festgeschrieben, dass die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 im Vergleich zu 1990 um mindestens 65 % vermindert werden sollen.ⁱⁱⁱ Langfristig verfolgt die Bundesregierung das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045. Durch die geplante Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG 2023) erfolgt eine zusätzliche Anhebung der Ausbauziele. Demnach sollen bis 2030 80 % des Bruttostromverbrauchs in Deutschland durch erneuerbare Energien gedeckt werden. Bereits bis 2035 soll die gesamte Stromerzeugung im Bundesgebiet „nahezu treibhausgasneutral“ erfolgen.^{iv}

Dazu bedarf es eines weiterhin steigenden Anteils erneuerbarer Energien und einer zunehmenden Umstellung des Verkehrs- und des Wärmesektors auf strombasierte Technologien. Eine reine Elektrifizierung in allen Anwendungsbereichen ist jedoch volkswirtschaftlich nicht sinnvoll und technisch schwer umsetzbar. Wasserstoff ist somit ein entscheidender Baustein für die Vollendung der Energiewende.

Aufgrund seiner chemischen Eigenschaften eignet sich Wasserstoff, um die durch den Wegfall von fossilen Energieträgern entstehenden Lücken zu schließen. Im Vergleich zu Strom lässt sich Wasserstoff auch über Wochen und Monate hinweg mit nur geringen Verlusten speichern und ermöglicht einen saisonalen Ausgleich der wetterbedingten Schwankungen von erneuerbaren Energien. Nicht (effizient) elektrifizierbare Anwendungen lassen sich mithilfe von Wasserstoff dekarbonisieren.

Schon heute kommt in vielen Bereichen Wasserstoff zum Einsatz

Bereits heute spielt Wasserstoff für verschiedene Anwendungen eine wichtige Rolle. In der 2020 erschienenen nationalen Wasserstoffstrategie wird der jährliche H₂-Verbrauch auf ca. 55 Terrawattstunden (TWh) beziffert. Historisch betrachtet sind die chemische Industrie sowie die Herstellung von Kraft- und Schmierstoffen die Hauptverbraucher von Wasserstoff. Schätzungen gehen davon aus, dass ca. 50 % des jährlichen Verbrauchs auf die Ammoniak- und Methanolherstellung in der Chemieindustrie zurückgehen, 44 % auf Raffinerieprozesse entfallen und die restliche Menge von sonstigen industriellen Abnehmern wie der Glas-, Stahl- und Lebensmittelindustrie verwendet wird.^v Bisher übersteigt dabei die stoffliche Nutzung von Wasserstoff mit über 90 % die energetische deutlich.^{vi}

Neben der Industrie wird Wasserstoff auch im Verkehrsbereich bereits verwendet. Insgesamt waren im Mai 2022 in Deutschland 94 öffentliche Wasserstofftankstellen in Betrieb, wobei 21 dieser Tankstellen in NRW zu finden sind. Die Wasserstoffnachfrage an den in Deutschland vorhandenen Tankstellen betrug im Jahr 2020 etwa 120 Tonnen (0,004 TWh).^{vii} Bis 2023 will das Joint Venture H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG bundesweit mindestens 400 Wasserstofftankstellen aufbauen.^{viii}

Der Hochlauf des Wasserstoffs wird politisch bereits forciert

In der Politik ist der Handlungsbedarf zur Unterstützung des Hochlaufs der Wasserstoffwirtschaft erkannt. Seit dem Jahr 2020 ist eine Reihe von Strategien veröffentlicht worden.

Die vorherige Bundesregierung hat am 10. Juni 2020 ihre Wasserstoffstrategie vorgestellt. Darin bezifferte sie den im Jahr 2030 existierenden stofflichen und energetischen H₂-Bedarf auf insgesamt 90 bis 110 TWh. In den nächsten zehn Jahren sollen in Deutschland 5 GW Elektrolysekapazität aufgebaut werden. Allein zur Versorgung dieser Elektrolyseure sind ca. 18 TWh EE-Strom erforderlich, was etwa der Jahresproduktion von 3.000 Windenergieanlagen an Land entspricht.

Ein Instrument zur Umsetzung der klimapolitischen Ziele und ein Treiber für den Einsatz grünen Wasserstoffs ist der CO₂-Preis. Die Kosten für fossile Energieträger wie Kohle, Öl oder Erdgas sind dadurch in den vergangenen Jahren im Vergleich zu klimafreundlichen Energieformen deutlich gestiegen. Im Mai 2022 erreichte der Preis für eine Tonne Kohlenstoffdioxid innerhalb des Europäischen Emissionshandelssystems einen bisherigen Höchststand von über 100 Euro. Dieser gilt vor allem für weite Teile der Energiewirtschaft und energieintensive Industriebranchen.

Der neueingeführte deutsche CO₂-Preis auf fossile Brennstoffe betrifft den bisher nicht im europäischen Emissionshandel eingeschlossenen CO₂-Ausstoß, beispielsweise in den Sektoren Gebäude und Verkehr. Der CO₂-Preis ist für 2022 mit 30 Euro pro Tonne vorgegeben und soll schrittweise steigen.^{ix} Um eine Lenkungswirkung zu entfalten, müsste für eine 95%ige Reduktion der Treibhausgasemissionen der CO₂-Preis bis 2050 auf über 140 Euro steigen.^x

Auch andere europäische Länder verabschiedeten Wasserstoffprogramme mit hohen Investitionsbeträgen. Dazu gehören zum Beispiel Spanien (8,9 Milliarden Euro), Frankreich (7,2 Milliarden Euro), Italien (4,0 Milliarden Euro), Österreich (2,0 Milliarden Euro) und Portugal (1,0 Milliarde Euro).^{xi}

Die Europäische Union hat das Potenzial von Wasserstoff ebenfalls erkannt und am 8. Juli 2020 eine europäische Wasserstoffstrategie verabschiedet. Die Ziele der Strategie sind in mehrere Schritte aufgeteilt. Bis 2024 sollen Elektrolyseure mit einer Gesamtleistung von mindestens 6 GW errichtet und bis 2030 auf 40 GW erweitert werden. Von 2030 bis 2050 sollen die Technologien für erneuerbaren Wasserstoff ausgereift sein und in großem Maßstab in allen Sektoren, in denen die Dekarbonisierung mit EE allein schwierig ist, eingesetzt werden. Die EU-Kommission geht von einer resultierenden Gesamtinvestition in der erneuerbaren Wasserstoffwirtschaft von bis zu 470 Milliarden Euro bis 2050 aus.^{xii}

Auch mehrere Bundesländer haben Wasserstoffstrategien verabschiedet, darunter die Wasserstoff-Roadmap NRW, die die Landesregierung Anfang November 2020 veröffentlichte. Darin werden Ziele für die Jahre 2025 und 2030 definiert. Der Schwerpunkt liegt auf den Sektoren Industrie, Mobilität und Energieinfrastruktur:

- Die Stahlindustrie liegt in NRW besonders im Fokus. Bis zum Jahr 2025 soll die erste großtechnische Direktreduktionsanlage zur Erzeugung von Stahl auf Basis von Wasserstoff entstehen.
- Bis 2025 sollen mindestens 400 und bis 2030 11.000 Brennstoffzellen-Lkw in NRW unterwegs sein.
- Die Elektrolysekapazität will die Landesregierung bis zum Jahr 2030 auf 1 bis 3 GW steigern.
- Insgesamt ergibt sich für NRW gemäß der Roadmap über alle Sektoren ein Wasserstoffbedarf von 104 TWh im Jahr 2050. ^{xiii}

Die Stadt Aachen will die Chancen der Wasserstoffwirtschaft nutzen

Auch die Stadt Aachen möchte ihren Beitrag zum Klimaschutz leisten. Die Stadt hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2030 klimaneutral zu sein. Ein wichtiger Baustein zum Erreichen der Ziele ist grüner Wasserstoff. Gleichzeitig kann über eine moderne Wasserstoffinfrastruktur der hiesige Wirtschafts- und Forschungsstandort nachhaltig gestärkt werden.

Um Wasserstoff auch in der lokalen Wirtschaft nutzen zu können, sind Rahmenbedingungen notwendig, die eine zukunftsfähige und ökologische Energieversorgung ermöglichen. In diesem Zusammenhang wurde der vorliegende Wasserstoffleitfaden für die Stadt Aachen verfasst. Dieser beinhaltet sowohl eine Bestandsaufnahme des Ist-Zustands als auch einen Ausblick in die Zukunft. Zudem gibt er Handlungsempfehlungen für die Stadt zum Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft.

2.2. Vorgehensweise bei der Erstellung des Wasserstoffleitfadens

Der vorliegende Wasserstoffleitfaden stellt zunächst die technischen und energiewirtschaftlichen Grundlagen der Wasserstoffwirtschaft dar, um ein einheitliches Verständnis für die technologischen und ökonomischen Möglichkeiten im Zusammenhang mit dem nachhaltigen Gas zu schaffen.

Dem schließt sich mit der Bestandsaufnahme eine Analyse des Status quo in der Stadt Aachen an. Hierfür wurden neben einer Analyse der kommunalpolitischen Rahmenbedingungen statistische Daten zu Wirtschaft, Verkehr, Energie- und Gebäudeinfrastruktur in der Stadt Aachen ausgewertet. Darüber hinaus wurden insgesamt 10 Interviews mit Stakeholdern aus Politik, Forschung und Wirtschaft durchgeführt, um die Recherchen um qualitative Hintergrundinformationen anzureichern und Handlungsoptionen für Politik und Unternehmen zu diskutieren. Durch individuelle Interview-Fragebögen konnte die Sicht der unterschiedlichen Akteure auf die gegenwärtige und zukünftige Entwicklung von H₂ in Aachen erfasst werden. Die ausgewählten Stakeholder prägen die Umsetzung der Energiewende in Aachen maßgeblich und konnten durch diese Interviews in die strategischen Planungen für den Hochlauf von Wasserstoff in Aachen entlang der gesamten Wertschöpfungskette einbezogen werden. Eine Liste der Interviewpartner findet sich im Anhang. Zusätzlich wurde eine Übersicht über Akteure, Netzwerke und Projekte im Bereich Wasserstoff in Aachen zusammengetragen. Über eine Abfrage bei relevanten Akteuren wurde zum Abschluss der Bestandsaufnahme eine Schätzung für den aktuellen Wasserstoffverbrauch in Aachen erstellt.

Auf Basis der in der Bestandsaufnahme ermittelten Strukturparameter im Status quo wurden anschließend Zukunftsbilder für die Energieversorgung in einem klimaneutralen Aachen entwickelt. Die beiden Zukunftsbilder unterscheiden sich hinsichtlich der jeweils dominierenden Technologieoptionen und damit auch im jeweils entstehenden Wasserstoffverbrauch. Die Basis dieser Zukunftsbilder bilden zwei B E T-Szenarien, welche mögliche Pfade zur deutschlandweiten Klimaneutralität im Jahr 2045 vorzeichnen. Diese Szenarien, die die Namen „Elektronen-Welt“ und „Moleküle-Welt“ tragen, sind das Ergebnis einer umfassenden Meta-Analyse aus aktuellen Energiesystemstudien und einer darauf aufbauenden Modellierung des Energiesystems mit allen Sektoren und Wertschöpfungsstufen. Der sich in den beiden Szenarien ergebende Energiemix beim Erreichen der Klimaneutralität wurde vor dem Hintergrund der Status-quo-Analyse mittels Aachen-spezifischer Strukturparameter (z. B. Bevölkerungsanzahl, demografische Entwicklung, Wirtschaftsstruktur, Verkehrsstruktur) regionalisiert, um eine Abschätzung des Energie- und insbesondere des Wasserstoffbedarfs in einem klimaneutralen Aachen vornehmen zu können.

Die Erkenntnisse aus der Bestandsaufnahme und aus den Zukunftsszenarien wurden anschließend in einer Stärken-Schwächen-Chancen-Risiken-Analyse (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats – SWOT) zusammengefasst. Aus der SWOT-Analyse konnten wiederum ein Phasenmodell für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft sowie konkrete Handlungsempfehlungen entlang der entwickelten Phasen abgeleitet werden. Die Empfehlungen berücksichtigen dabei die politischen Handlungsmöglichkeiten, die einer Stadt im Rahmen der Aufgabenteilung zwischen Bund, Land und Kommune zur Verfügung stehen.

3. Grundlagen der Wasserstoffwirtschaft

Das Element Wasserstoff wurde im Jahr 1766 vom englischen Physiker und Chemiker Henry Cavendish bei Experimenten mit Metallen und Säuren entdeckt. Im Folgenden wurde das Element in der Ballonfahrt, in Fahrzeugen sowie Flugzeugen eingesetzt. Stadtgas, das aus 51 % Wasserstoff bestand, wurde ab Mitte des 19. Jahrhunderts u. a. zur Beleuchtung und zur Wassererwärmung genutzt. Im Laufe des 20. Jahrhunderts ersetzte Erdgas das zumeist aus Kohle hergestellte Stadtgas. In den Jahren 1969/1970 wurde die Aachener Gasversorgung von wasserstoffhaltigem Kokereigas auf Erdgas umgestellt.^{xiv}

Die zukünftige Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland ist von der Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffnutzung sowie der Verfügbarkeit des Gases und der für dessen Produktion notwendigen erneuerbaren Energien abhängig. Die Wirtschaftlichkeit von grünem Wasserstoff hängt einerseits von Faktoren wie der Entwicklung der H₂-Elektrolyseur- und Transporttechnologien sowie dem Ausbau erneuerbarer Energien und dem Strompreis ab. Andererseits wirken sich auch steigende Preise konkurrierender fossiler Brennstoffe (v. a. Erdgas und Kohle) sowie des CO₂-Preises positiv auf die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffanwendungen aus.

Der politisch forcierte Markthochlauf von (grünem) Wasserstoff soll die Kostendegression der Technologien vorantreiben. Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zukünftiger Geschäftsmodelle müssen die einzelnen Wertschöpfungsstufen berücksichtigt werden (Abbildung 4).

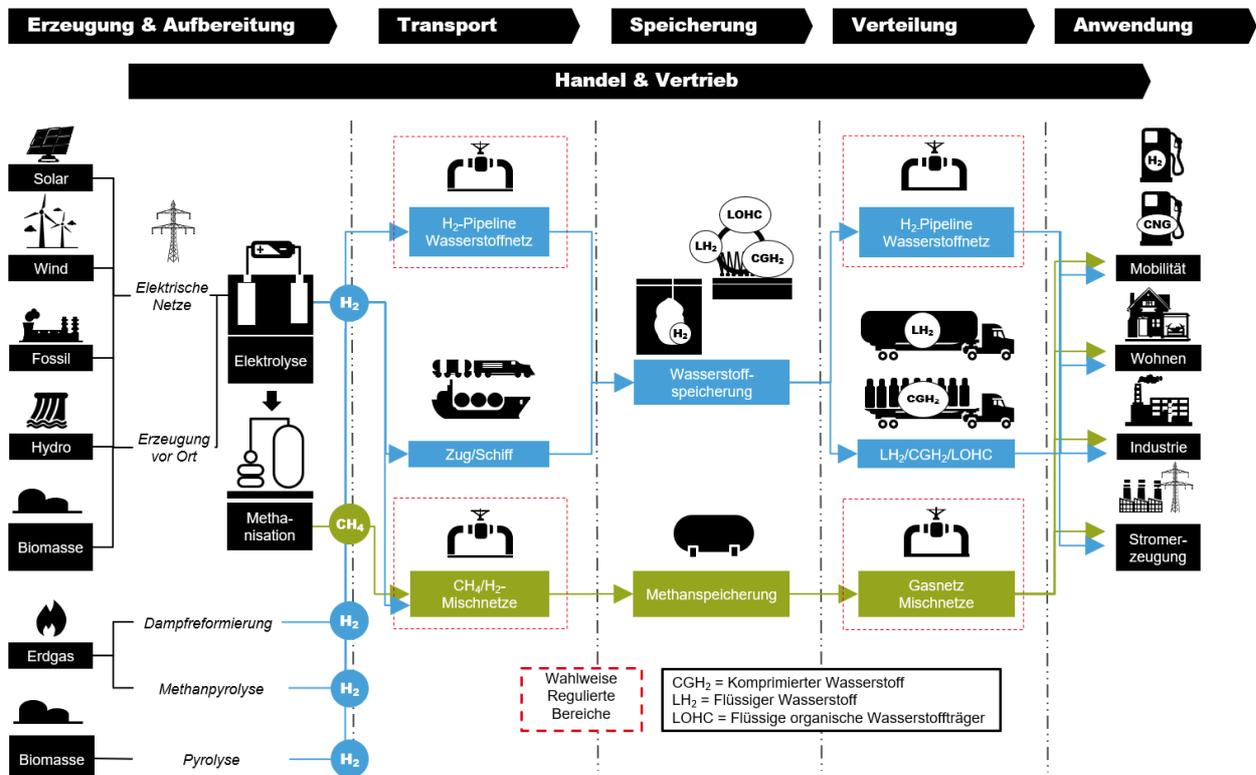


Abbildung 4: Wertschöpfungskette der Wasserstoffwirtschaft

Erzeugung und Aufbereitung

Deutschlandweit sind Rohöl und Erdgas bisher die wichtigsten Quellen zur Erzeugung von Wasserstoff (Abbildung 5). Dabei ist der hohe Anteil von Rohöl auf die Mineralölindustrie zurückzuführen, die den erzeugten Wasserstoff innerhalb des Raffinerieprozesses vollständig stofflich weiterverwendet.^{xv}

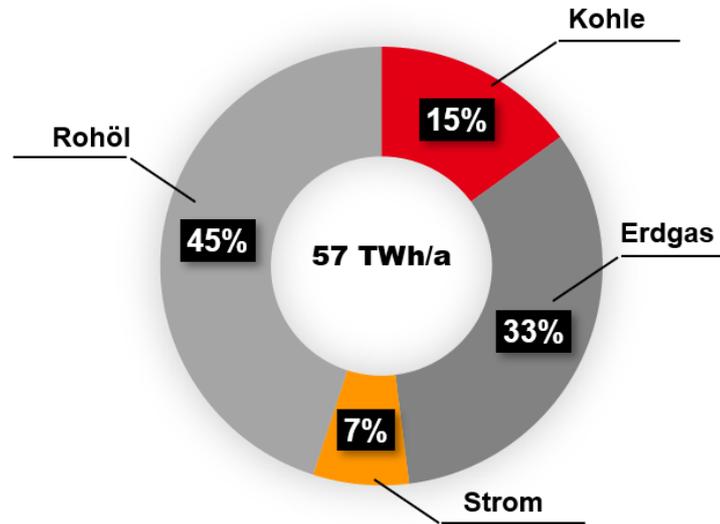


Abbildung 5: Anteile der Energieträger zur Wasserstoffherzeugung in Deutschland (stoffliche und energetische Nutzung)^{xvi}

Für die Erzeugung von Wasserstoff können verschiedene Technologien und Verfahren zur Anwendung kommen, die jeweils farblich codiert sind (Abbildung 6).^{xvii}

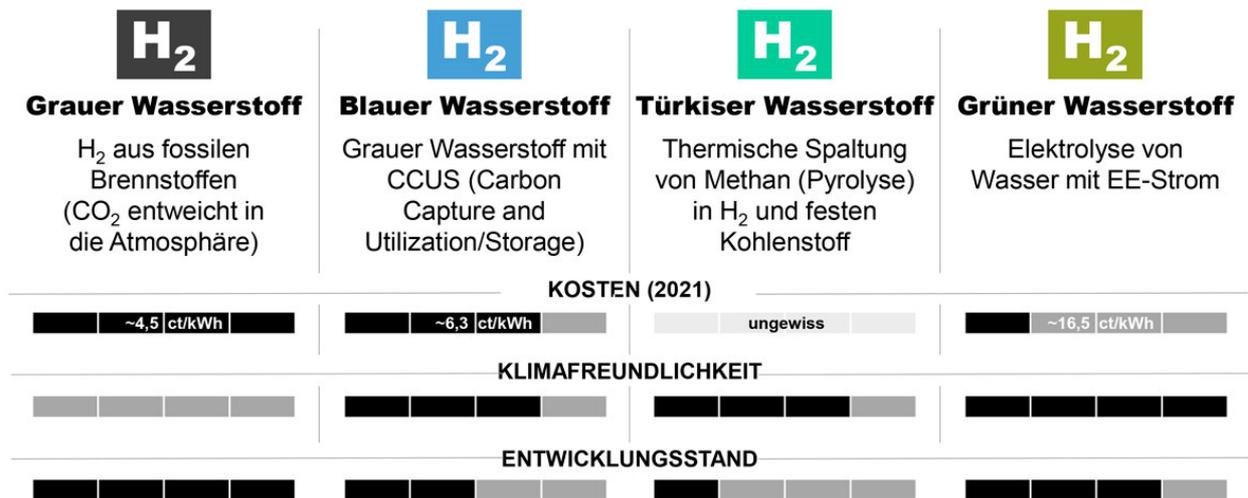


Abbildung 6: Wasserstoff-Farbpalette

Grauer Wasserstoff wird unter Hitze aus Erdgas (Dampfreformierung) oder Kohle (Vergasung) gewonnen. Bei der Herstellung entweicht das entstehende CO₂ in die Atmosphäre.

Eine höhere Klimafreundlichkeit des gleichen Verfahrens kann durch Abscheidung und Speicherung (CCS, Carbon Capture and Storage) oder Nutzung (CCU, Carbon Capture and Utilization) des Treibhausgases erreicht werden.

Dem so hergestellten Wasserstoff wird die Farbe „blau“ zugeordnet. Problematisch ist dabei, dass eine dauerhafte Speicherung des CO₂ sichergestellt werden muss. Die Speicherung von Kohlenstoffdioxid ist in Deutschland derzeit de facto durch das Gesetz zur Demonstration der dauerhaften Speicherung von Kohlendioxid ausgeschlossen, sodass bis zu einer Änderung dieses Gesetzes blauer Wasserstoff in Deutschland lediglich als Importgut in Frage kommt bzw. in Deutschland abgeschiedener Kohlenstoffdioxid direkt wiederverwendet oder zur Speicherung ins Ausland transportiert werden muss.

Bei der Herstellung von türkischem Wasserstoff entsteht statt gasförmigem CO₂ fester Kohlenstoff, da bei der Pyrolyse das Methan unter deutlich höheren Temperaturen vom Erdgas abgespalten wird als bei der Dampfreformierung. Der feste Kohlenstoff kann entweder gelagert werden (wobei die Gefahr von Leckagen im Vergleich zur Speicherung von gasförmigen CO₂ deutlich reduziert ist) oder er wird als Rohstoff in der Industrie weiterverwendet.

Für grünen Wasserstoff werden reines Wasser und Strom aus erneuerbaren Energien genutzt. Neben dem Wasserstoff entsteht Sauerstoff, der entweder in die Atmosphäre entlassen oder anderweitig genutzt werden kann (z. B. für Verbrennungs-, Oxidations- und Heizprozesse in der Industrie). Zukünftig könnte die Wasserstofferzeugung auch ein Geschäftsmodell für EEG-Anlagen werden, die nach 20 Jahren aus der EEG-Förderung ausscheiden. Dies betrifft in NRW bis einschließlich 2025 Wind- und PV-Anlagen mit einer Leistung von über 2.000 MW.^{xviii} Damit könnten jährlich knapp 3 TWh Wasserstoff erzeugt werden. Hierbei ist jedoch die in der Entstehung befindliche europäische Definition von grünem Wasserstoff zu berücksichtigen. Die EU-Kommission schlägt vor, dass grüner Wasserstoff nur mit Strom aus neu installierten EE-Anlagen erzeugt werden darf (Kriterium der „Zusätzlichkeit“). Hierbei würde eine Übergangsfrist bis Ende 2026 gelten. Damit wäre die Nutzung von sog. „Post-EEG-Anlagen“ für die Produktion von grünem Wasserstoff ab 2027 nicht mehr zulässig. Mitte September 2022 verabschiedete das EU-Parlament jedoch einen alternativen Vorschlag, der das Kriterium der Zusätzlichkeit nicht vorsieht. Eine Einigung zwischen den EU-Institutionen auf eine gemeinsame Regelung ist jedoch frühestens im Laufe des Jahres 2023 zu erwarten.^{xix}

Momentan ist die Elektrolyse mit grünem Strom noch die teuerste Art der H₂-Produktion. Es gibt mehrere Arten der Elektrolyse. Bei der alkalischen Elektrolyse (AEL) wird eine Kalilauge als Elektrolyt eingesetzt. Die beiden Elektroden werden durch eine durchlässige Membran (Diaphragma) voneinander getrennt. Wird eine Spannung an den Elektroden angelegt, entsteht an der Anode Sauerstoff und an der Kathode Wasserstoff.

Eine weitere Elektrolyseart ist die Proton-Austausch-Membran-Elektrolyse (Proton Exchange Membrane, PEM), wobei als Elektrolyt eine dünne Membran aus thermoplastischem Kunststoff (Ionomer) verwendet wird. Kathode und Anode sind durch diese gasdichte Membran separiert und nur positive Wasserstoffionen können die Membran passieren.

Eine Mischform von AEL- und PEM-Elektrolyse ist die Anionen-Austausch-Membran-Elektrolyse (Anion Exchange Membrane, AEM). Hier wird Wasser eingesetzt, um die Membran im Stack zu durchnässen und um das Wasser letzten Endes in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten. So wandert das Wasser dann von der Anode zur Kathode; hier an der Kathode entsteht dann Wasserstoff, welcher durch eine Gasdiffusionsschicht entweichen kann. Das verbleibende Hydroxid wandert zurück zur Anode und dort bildet sich daraus dann Sauerstoff, welcher ebenfalls über die Diffusionsschicht abtransportiert wird. Im Gegensatz zur PEM-Elektrolyse kann in der AEM-Elektrolyse auf Platingruppenmetalle verzichtet werden, da die Elektrolyseumgebung weniger korrosiv und sauer ist. Auch aus diesem Grund können die Kosten entsprechend gesenkt werden.

Während die oben genannten Elektrolysearten bei einer Temperatur von ca. 70 bis 80 Grad Celsius ablaufen, setzt die Hochtemperaturelektrolyse auf Temperaturen von 600 bis 900 Grad Celsius, um im sogenannten Feststoffoxid-Elektrolyse-Verfahren einen Teil der notwendigen elektrischen Energie durch Wärmeenergie zu ersetzen. Dabei wird als Elektrolyt ein fester keramischer Werkstoff verwendet, welcher die beiden Halbzellen trennt.

Bei steigenden CO₂-Preisen, weiter sinkenden Kosten für grünen Strom und der zu erwartenden Kostendegression bei Elektrolyseuren ist davon auszugehen, dass 2050 grüner Wasserstoff etwa genauso teuer oder günstiger als grauer und blauer Wasserstoff sein wird.^{xx} Zukünftige Kosten für türkisen Wasserstoff sind noch ungewiss, da sich diese Technologie noch in der Entwicklungsphase befindet. Forscher gehen davon aus, dass türkiser Wasserstoff halb so teuer werden könnte wie grüner Wasserstoff.^{xxi}

Neben den oben genannten existieren weitere Erzeugungsarten: Die Chloralkali-Elektrolyse wird in der Chemieindustrie zur Herstellung von Chlor aus einer Salzlösung verwendet. Als Nebenprodukte entstehen Natron- oder Kalilauge sowie Wasserstoff. Eine noch in der Entwicklung befindliche Technologie ist die Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse. Bei diesem Verfahren wandeln Mikroorganismen Biomasse zu grünem Wasserstoff um.^{xxii}

Transport und Verteilung

Bei der Erzeugung von grünem Wasserstoff sind der Ort der Stromerzeugung und der Ort des Wasserstoffverbrauchs oft nicht derselbe. In Deutschland liegen EE-Kapazitäten eher im windreichen Norden, während Deutschlands Industrie- und Bevölkerungsschwerpunkte tendenziell im Westen und Süden zu verorten sind. Zudem liegt der Bedarf an Wasserstoff eher in den urbanen und industriellen Zentren, während die Erzeugung von EE-Strom und H₂ vor allem im ländlichen Umland erfolgen kann. Der Wasserstoff kann somit entweder am Ort der Stromerzeugung produziert und dann zu den Verbrauchern befördert werden oder der Strom wird über vorhandene Leitungen zu den Abnehmern transportiert, die den Wasserstoff vor Ort erzeugen.

Die wirtschaftlichste Transportvariante für Wasserstoff hängt von Faktoren wie der Transportstrecke, -menge und der Verwendungsform am Verbrauchsort ab. Im Vergleich zum Stromtransport ist der Energietransport in Gaspipelines kosteneffizienter und die transportierbaren Energiemengen sind höher. Auch wirkt das Pipelinennetz für das darin vorhandene Gas als Speicher. Im Gegensatz zum Stromnetz sind Erzeugung und Verbrauch für das Gasnetz daher weniger zeitkritisch.

Soll der Wasserstoff transportiert und verteilt werden, muss dies aufgrund seiner geringen Dichte komprimiert gasförmig, auf -253 °C gekühlt flüssig oder in Trägermaterialien gebunden erfolgen. Bei letzterer Option sind flüssige und feste Wasserstoffträger möglich. Als feste Wasserstoffträger werden Metallhydridspeicher u. a. in U-Booten eingesetzt. Als flüssiges Trägermaterial fungieren z. B. Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) wie Dibenzyltoluol, die sich in einer chemischen Reaktion mit Wasserstoff verbinden. Vor der Nutzung des Wasserstoffs muss dieser wieder aus dem Trägermaterial herausgetrennt werden (Dehydrierung, z. B. durch Erhitzen). Eine (energetisch) unaufwändige Dehydrierung ist neben anderen Eigenschaften entscheidend für die Nutzung eines Stoffes als Trägermaterial. Für den komprimiert gasförmigen oder gekühlt flüssigen Transport müssen die Kosten und der Energiebedarf der Erzeugung und Aufrechterhaltung der Zustände bis zur Weiterverwendung berücksichtigt werden.

Der Transport des erzeugten Wasserstoffs kann sowohl durch Pipelines als auch mithilfe von Lkw, Zügen und Schiffen erfolgen. Während der Transport durch Lkw bereits erprobt und hauptsächlich für geringe Transportmengen und kurze Distanzen geeignet ist, wurde mit Zug- und Schiffstransporten bisher wenig Erfahrung gesammelt. Für den Zugtransport ist die Nutzung der für den Lkw-Transport verwendeten Behälter denkbar, wenn auch bisher nicht zugelassen.^{xxiii} Das erste Tankschiff für Flüssigwasserstoff namens "Suiso Frontier" wurde durch die Firma Kawasaki Heavy Industries Ltd. gebaut und 2021 fertiggestellt. Im Frühjahr 2022 konnte mit diesem Schiff der weltweit erste Transport von flüssigem Wasserstoff von Australien nach Japan durchgeführt werden.^{xxiv}

Für den Transport von großen Mengen über Strecken von bis zu einigen tausend Kilometern erscheint aus heutiger Sicht die Nutzung von Rohrleitungen als wirtschaftlichste Variante. Möglich ist sowohl ein Neubau von Wasserstoffpipelines als auch eine Umwidmung vorhandener Erdgasinfrastruktur, die bereits in einzelnen Projekten erprobt wird. Schätzungen gehen davon aus, dass die Umwidmung vorhandener Erdgasleitungen etwa 10 bis 25 % der Neubaukosten für Wasserstoffpipelines verursachen würde. Nötig ist beispielsweise eine Untersuchung der Leitungen auf Risse und ein Austausch von Teilen der Ventile. PE-Leitungen, deren wachsender Anteil im Verteilnetz bereits dominiert^{xxv}, können ohne Einschränkungen für Wasserstoff genutzt werden. Auch wird davon ausgegangen, dass eine Umnutzung von Stahlleitungen grundsätzlich möglich ist. Allerdings müssen Vorkehrungen getroffen werden, wie der Einsatz eines geringeren Druckes, zusätzlicher Innenbeschichtung oder moderner Wartungstechnik zur Risserkennung.^{xxvi}

Des Weiteren ist eine Zumischung von Wasserstoff in das Erdgasnetz möglich. Allerdings würden voraussichtlich an unterschiedlichen Stellen im Gasnetz verschieden große Mengen Erdgas und Wasserstoff eingespeist, wodurch die Wasserstoffkonzentration bzw. das Mischungsverhältnis ortsabhängig variiert. Hierdurch ergeben sich Herausforderungen durch die daraus bedingte Schwankung der Zusammensetzung und des Brennwertes des Gases, was sich auf die Energieausbeute und die Messung der erbrachten Leistung auswirkt.

Zudem ist die Zumischung in ihrer Höhe heute sowohl technisch als auch regulatorisch begrenzt. So sind viele Erdgasturbinen nur für Wasserstoffanteile von ein bis fünf Prozent geeignet. Das Regelwerk des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches (DVGW) erlaubt zum aktuellen Zeitpunkt eine maximale Beimischung von höchstens zehn Volumenprozent Wasserstoff im Gasnetz.^{xxvii} Vor der Nutzung des Gases kann außerdem je nach Anwendung eine Entmischung notwendig werden, um die benötigte Reinheit von Erdgas oder Wasserstoff zu garantieren. Eine Wasserstoffkonzentration über zwei Volumenprozent kann z. B. zu einer Versprödung der Stahltanks von Erdgasfahrzeugen führen.^{xxviii}

Zur Deckung des deutschen Wasserstoffbedarfs werden in Zukunft Importe notwendig. Grund ist die beschränkte Flächenkulisse für erneuerbare Energien in Deutschland. Innerhalb Europas kommen Staaten als Lieferländer in Frage, die aufgrund hoher Wind- oder Solarenergieleistung grünen Strom oder Wasserstoff an Deutschland liefern könnten. Unterschiedliche Untersuchungen nennen z. B. Irland, Norwegen, das Vereinigte Königreich, Island, Spanien, Italien, Frankreich und Griechenland als mögliche Exporteure.^{xxix} Darüber hinaus strebt die Bundesregierung Importe aus außereuropäischen Ländern an. Beispielsweise könnten sonnenreiche nordafrikanische Länder wie Marokko Wasserstoff aus Solarenergie herstellen, der dann per Pipeline oder Schiff nach Deutschland transportiert wird. Auch Pläne für Wasserstofflieferungen aus Katar und Australien existieren bereits.^{xxx}

Auch heutige Erdgasproduzenten wie Norwegen könnten zur blauen und türkisen Wasserstoffproduktion beitragen. Für NRW und die Stadt Aachen sind bezüglich zukünftiger Importe die bereits vorhandenen Transportleitungen für Erdgas zu den Niederlanden interessant, die im März 2020 ihrerseits eine Wasserstoffstrategie beschlossen haben. Mit dem geplanten Ende der Erdgasförderung in den Niederlanden in diesem Jahr (2022) könnten vorhandene Leitungen umgewidmet werden. Aufgrund des russischen Angriffskriegs in der Ukraine und der damit verbundenen Bestrebung einer zunehmenden Unabhängigkeit von russischen Gasimporten wird eine Fortsetzung der Förderung in den Niederlanden allerdings aktuell vermehrt diskutiert.

Speicherung

Die Speicherung von Wasserstoff kann erforderlich werden, wenn Erzeugung bzw. Anlieferung und Verbrauch zeitlich auseinanderfallen. Zur Nutzung des Wasserstoffs als Speichermedium für EE-Strom ist eine (saisonale) Speicherung des erzeugten Wasserstoffs bis zur Rückverstromung notwendig. Für die Speicherung von Wasserstoff können die auch zum Transport genutzten Behältertechnologien verwendet werden, d. h. Druck- und Flüssiggasspeicherbehälter bzw. eine Speicherung mithilfe von Trägermaterialien.

Für die gasförmige Lagerung großer Wasserstoffmengen sind voraussichtlich unterirdische Kavernenspeicher geeignet, die heute zur Erdgasspeicherung genutzt werden. Dabei sind in NRW 39 TWh von 270 TWh deutschen Erdgasspeicherkapazitäten (Poren- und Kavernenspeicher) vorhanden. Der allergrößte Teil der 39 TWh in NRW befindet sich im Kavernenspeicher im Raum Gronau/Epe – knapp 200 km nordöstlich von Aachen.^{xxxix}

Wasserstoff hat eine sehr geringe Moleküldichte, wodurch er durch viele Materialien hindurchdiffundiert. Zudem kann Wasserstoff Metalle verspröden, indem er sich in deren Gitterstruktur einlagert. Dies muss bei der Auswahl geeigneter Materialien für Speicher berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist die volumetrische Energiedichte verhältnismäßig gering. Bei mobilen Speichern besteht somit die Gefahr, den Vorteil der hohen gewichtsspezifischen Energiedichte des Wasserstoffs durch das Gewicht des Speichers zu verspielen.

Die Kompression des Wasserstoffs kostet etwa 10 % des Energiegehalts des Wasserstoffs, die Verflüssigung unter Kühlung 30 %, was die Wirtschaftlichkeit beeinflusst.^{xxxix} Erwärmt sich der verflüssigte Wasserstoff im Speicherbehälter und verdampft, muss Wasserstoff abgelassen werden, um den Druck konstant zu halten, was zu Speicherverlusten führt. Der Einsatz von Trägermaterialien soll diesen Nachteilen begegnen. Problematisch sind bei vielen Trägermaterialien heute der Energieaufwand bei der Dehydrierung und das hohe Gewicht der Stoffe selbst im Vergleich zur darin speicherbaren Wasserstoffmenge. Bisher werden daher vor allem Kompression und Verflüssigung kommerziell eingesetzt.

Anwendung

Bei der Anwendung von Wasserstoff kann zwischen energetischer und nicht-energetischer bzw. stofflicher Nutzung unterschieden werden. Während in der Industrie sowohl die stoffliche als auch energetische Nutzung von Wasserstoff relevant ist, spielen in den anderen Sektoren (Haushalte, Gewerbe, Verkehr, Energieerzeugung) energetische Anwendungsfälle potenziell eine Rolle.

Abbildung 7 gibt einen Überblick über Anwendungsmöglichkeiten für Wasserstoff. Dabei wird zwischen vier Sektoren unterschieden. Zum einen gibt es Anwendungsfälle in der Industrie bzw. im Gewerbe. In diesem Bereich kann

Wasserstoff sowohl in energetischen als auch nicht-energetischen Use Cases zum Einsatz kommen. So besteht zum Beispiel die Möglichkeit, dass Wasserstoff zur Erzeugung von Hochtemperatur-Prozesswärme, die schwer zu elektrifizieren ist, oder in der chemischen Industrie als Ausgangsstoff bspw. für die Produktion von Ammoniak eingesetzt wird.

Im Umwandlungs- bzw. Energiesektor können die chemischen Eigenschaften von Wasserstoff ausgenutzt werden, um die Energiewende zu beschleunigen. Im Gegensatz zu Strom lässt sich Wasserstoff (oder auch seine Derivate) gut speichern. Durch Speicherung und eine nachgelagerte Rückverstromung kann es so möglich werden, die fluktuierende EE-Erzeugung auszugleichen. Da Deutschland und auch Aachen als Stadt vermutlich auch zukünftig abhängig von Energieimporten sein werden, ist es von Vorteil, dass Wasserstoff eine alternative Form des Energietransportes ermöglicht, welcher möglicherweise über bereits existierende Infrastrukturen abgewickelt werden kann.

Der Mobilitätssektor bietet ebenfalls eine Menge Anwendungsgebiete für Wasserstoff. Dabei stehen einige in direkter Konkurrenz zu elektrischen Alternativen. Insbesondere im Personenverkehr sind hier zum Beispiel auch batterieelektrische Alternativen vorhanden. Im Schwerlastverkehr oder auch im Schiffsverkehr erscheint eine Wasserstoffnutzung langfristig als sinnvolle klimaneutrale Option. Insbesondere im Langstrecken-Flugverkehr könnten Wasserstoff-Derivate wie zum Beispiel synthetisches Kerosin zukünftig einen klimaneutralen Betrieb ermöglichen.

Im Gebäudebereich existieren ebenfalls einige Möglichkeiten für den Einsatz von Wasserstoff. Zukünftig könnte Wasserstoff so beispielsweise in der Erzeugung bzw. Besicherung von Fernwärme zum Einsatz kommen. Darüber hinaus könnten Brennstoffzellen in Gebäuden für die Versorgung mit Strom und/oder Wärme verantwortlich sein.

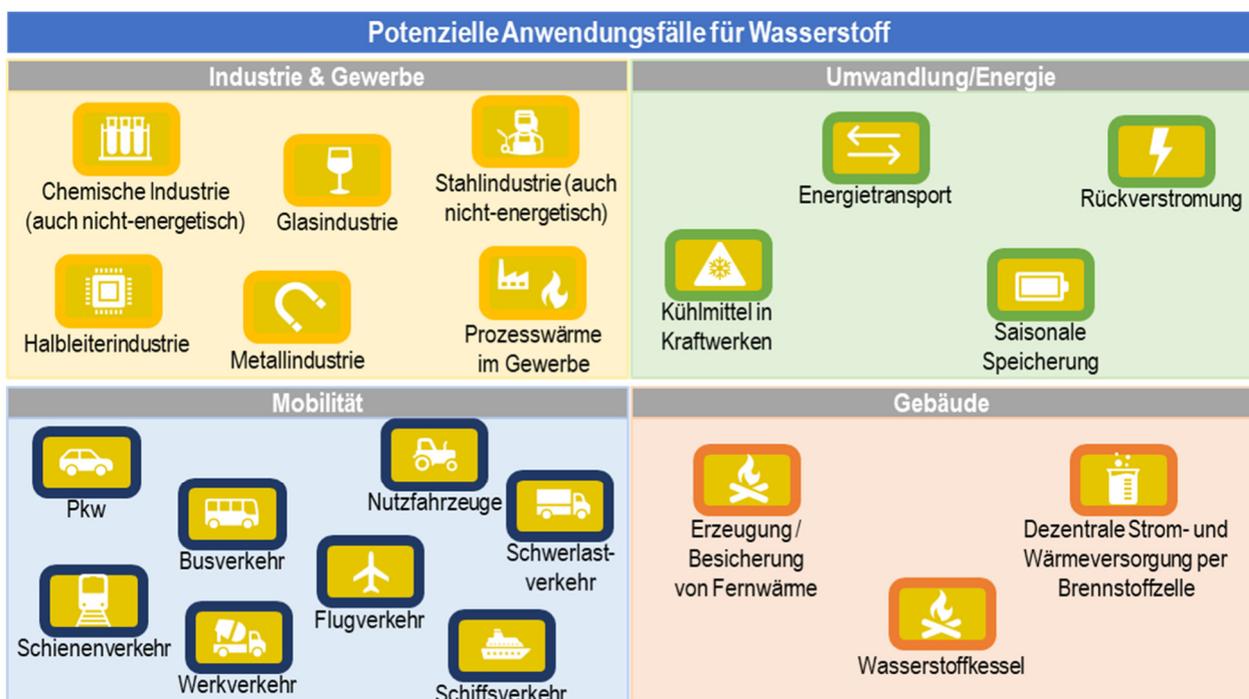


Abbildung 7: Potenzielle Use Cases für Wasserstoff

Für die energetische Nutzung in NRW schätzt das Forschungszentrum Jülich im Rahmen einer Begleitstudie zur Wasserstoff-Roadmap NRW einen Bedarf von 104 TWh im Jahr 2050. Davon entfallen 42 TWh auf den

Industriesektor, 33 TWh auf den Verkehr und 26 TWh auf Rückverstromung. Der Verband der Chemischen Industrie geht für Deutschland von einem stofflichen Verbrauch von 227 TWh im Jahr 2050 aus, wovon etwa 30 % NRW zugerechnet werden. Damit ergibt sich für NRW im Jahr 2050 insgesamt ein prognostizierter Verbrauch von 172 TWh.

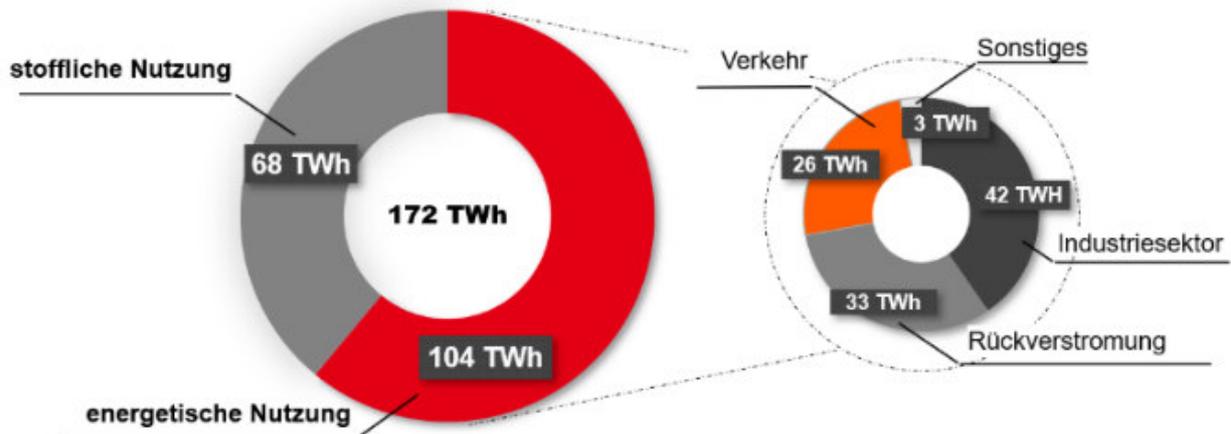


Abbildung 8: Wasserstoffverbrauch 2050 in NRW ^{xxxiii}

Wasserstoff wird bereits in der Industrie eingesetzt. Heute liegt der Gesamtwasserstoffverbrauch in Deutschland je nach Quelle bei 55 bzw. 57 TWh pro Jahr, der vor allem durch die Grundstoff- und Petrochemie entsteht. Der heute eingesetzte graue Wasserstoff kann zukünftig durch grünen Wasserstoff ersetzt werden. Bis 2050 könnte grüner Wasserstoff abhängig von Elektrolyseur- und CO₂-Preisen günstiger als grauer Wasserstoff werden.^{xxxiv}

Weitere Potenziale für den Einsatz von Wasserstoff sind in der Stahl- und Zementindustrie sowie der Glas- und Kunststoffherstellung vorhanden. Das Gas kann in diesen Bereichen sowohl stofflich als auch energetisch zur Erzeugung von Prozesswärme genutzt werden. Lange Investitionszyklen führen bereits vor dem Zeitpunkt der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von grünem Wasserstoff zu Handlungsbedarf, um eine Dekarbonisierung der Industrie bis 2050 erreichen zu können.

Eine Nutzung von Wasserstoff im Verkehrssektor ist vor allem für den Lastenverkehr und schwere Nutzfahrzeuge wahrscheinlich. Im Pkw-Bereich erscheint aus heutiger Sicht der flächendeckende Einsatz von Wasserstoff aufgrund des im Vergleich zu Batteriefahrzeugen geringen Wirkungsgrads von etwa 25 % (von elektrischer Energie zum Antrieb des Fahrzeugs)^{xxxv} volkswirtschaftlich ineffizient.

Handel

Bisher wird Wasserstoff vor allem lokal produziert und verbraucht. Daher ist ein Wasserstoffhandel heute nur räumlich begrenzt vorhanden. So dient die Rhein-Ruhr-Pipeline, die zwischen Castrop-Rauxel und Leverkusen Wasserstoffproduktionsstätten mit Industriekunden verbindet, der Versorgung der angeschlossenen Unternehmen in der Region. In der Nationalen Wasserstoffstrategie wird ein Fokus auf Handelsbeziehungen mit geeigneten Partnerländern gelegt. Ein System zur Festlegung von international einheitlichen Standards und Zertifizierungen von grünem Wasserstoff wird auf europäischer Ebene im Rahmen des Projektes CertifHy entwickelt.

Um das Erreichen der Ziele der nationalen Wasserstoffstrategie zu ermöglichen und Angebot und Nachfrage von Wasserstoff zu verbinden, wurde die Initiative H2Global ins Leben gerufen. Über eine staatliche Förderung soll damit die Differenz zwischen dem höchsten Gebot und dem niedrigsten Angebotspreis für grünen Wasserstoff durch sogenannte Contracts for Difference geschlossen werden.^{xxxvi}

Wasserstoffderivate

Neben der direkten stofflichen oder energetischen Nutzung kann Wasserstoff auch für die Herstellung von Wasserstoffderivaten verwendet werden. Ein wichtiges Derivat ist synthetisches Methan, das in seinen Eigenschaften mit Erdgas nahezu identisch ist. Wird Wasserstoff für die Herstellung synthetischen Methans genutzt, läuft dieser „Methanisierung“ genannte Prozess wie in der rechten Hälfte von Abbildung 9 dargestellt ab.

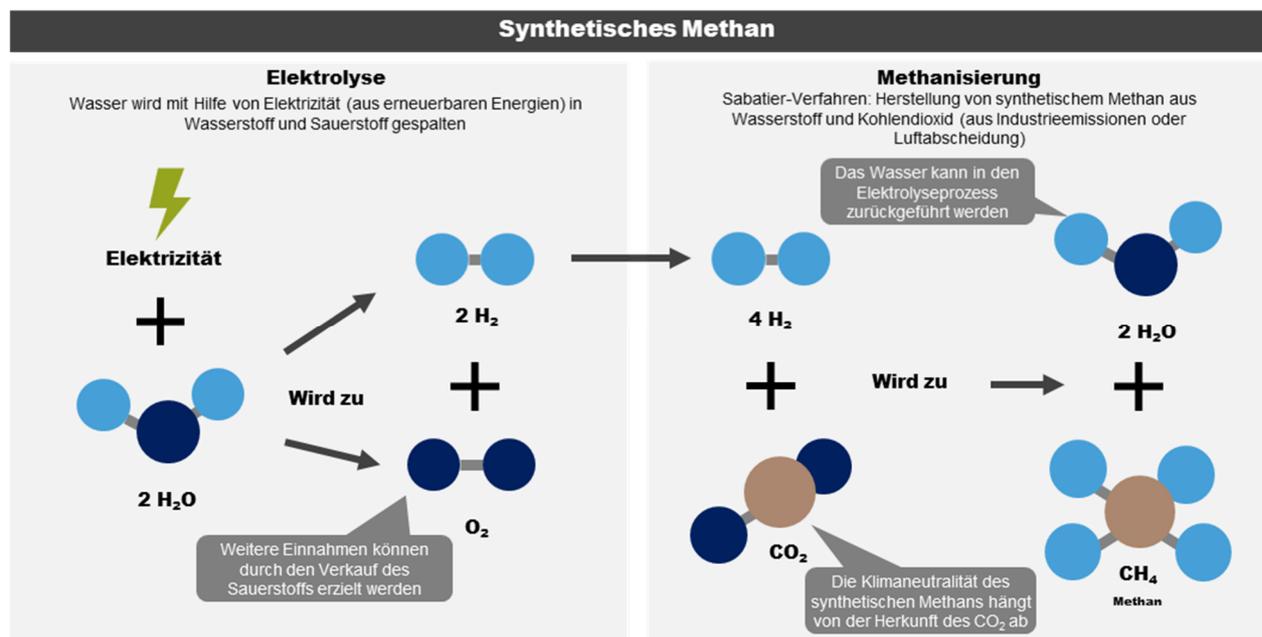


Abbildung 9: Erzeugung von synthetischem Methan

Zusätzlich zum Wasserstoff (H_2) wird Kohlenstoffdioxid (CO_2) benötigt. Beide Stoffe reagieren im sogenannten Sabatier-Verfahren zu Wasser (H_2O) und Methan (CH_4). Das benötigte CO_2 kann dabei beispielsweise aus Industrieemissionen oder auch direkt aus der Umgebungsluft gewonnen werden. Kommt für die Methanisierung grüner Wasserstoff sowie klimaneutral aus der Luft gewonnenes CO_2 zum Einsatz, kann auf diese Weise klimaneutrales synthetisches Methan erzeugt werden.

Potenzial hat die Verwendung von synthetischem Methan in Anwendungsfällen, in denen heute Erdgas zum Einsatz kommt und die nicht – oder nur mit großem Aufwand – elektrifiziert werden können. Beispiele sind industrielle Prozesse, in denen Bestandsanlagen nicht ersetzt werden können oder aber auch die Beheizung von Wohngebäuden, die ans Gasnetz angeschlossen sind und deren Umstellung auf alternative Heiztechnologien bzw. Wasserstoff nur unter großem Aufwand und hohen Kosten möglich ist. Letztlich ist abzuwägen, ob die höheren Kosten bei der Herstellung von synthetischem Methan im Vergleich zum Wasserstoff die bei der Nutzung synthetischen Methans wegfallenden Kosten zur Umrüstung der Gasinfrastruktur und Verbrauchsanlagen auf Wasserstoff kompensieren.

Weitere Wasserstoffderivate sind sogenannte E-Fuels, also mit Elektrizität hergestellte Treibstoffe wie künstliches Benzin oder synthetischer Dieselmotoren. Sie ermöglichen den bilanziell CO₂-freien Betrieb von Verbrennungskraftmaschinen, wie beispielsweise Otto- oder Dieselmotoren in Fahrzeugen. Wie bei der Methanisierung werden Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid als Eingangsstoffe benötigt, die dann in chemischen Verfahren zur Herstellung von Benzin oder Dieselmotoren genutzt werden.

Neben synthetischem Methan und Kraftstoffen gehört auch die Herstellung von Ammoniak zu den diskutierten Anwendungsfeldern für Wasserstoff. Synthetisches Ammoniak (NH₃) lässt sich im sogenannten Haber-Bosch-Verfahren durch eine Reaktion von Wasserstoff (H₂) mit Stickstoff (N₂) herstellen. Zum einen kann auf diese Weise Wasserstoff gespeichert werden, zum anderen kann das so erzeugte Ammoniak auch direkt, beispielsweise bei der Herstellung von Düngemitteln, verwendet werden und das dort heute oftmals zum Einsatz kommende Erdgas ersetzen.

Ein gemeinsamer Kritikpunkt aller Wasserstoffderivate ist der durch die zahlreichen Umwandlungsschritte niedrigere Wirkungsgrad und die entsprechend höheren Kosten im Vergleich zur direkten Nutzung der eingesetzten Elektrizität (sofern dies möglich ist). Für die Klimaneutralität der Derivate ist zudem die Herkunft sowohl des eingesetzten Stroms als auch die des beispielsweise bei der Methanisierung zum Einsatz kommenden CO₂ entscheidend. Unter ökologischen Gesichtspunkten machen Wasserstoffderivate daher vor allem dann Sinn, wenn sie mit überschüssigem Strom aus erneuerbaren Energien produziert werden und weitere Eingangsstoffe der Umgebungsluft entnommen werden können.

4. Bestandsaufnahme für die Stadt Aachen

4.1. Aktueller kommunalpolitischer Rahmen in der Stadt Aachen

Der regulatorische und politische Rahmen für die Entwicklung der Energieversorgung wird neben der europäischen, der Bundes- und der Landesebene auch durch die Stadt Aachen selbst geprägt. Der für die Energie- und Wasserstoffwirtschaft relevante kommunalpolitische Rahmen wird in Aachen v. a. durch das „Integrierte Klimaschutzkonzept“, einen Ratsentscheid zum Thema Klimaneutralität, das EU-Projekt „100 klimaneutrale Städte“, das anlaufende Verbundprojekt AachenPLUS sowie kommunale Genehmigungsverfahren für Energieinfrastruktur bestimmt.

Integriertes Klimaschutzkonzept

Im Juni 2020 wurde das für die Stadt Aachen konzipierte Klimaschutzkonzept veröffentlicht. Es beinhaltet die klimapolitische Strategie der Stadt bis 2030 mit dem dazugehörigen Handlungsprogramm bis 2025 und strebt die Beschleunigung der CO₂-Emissionsreduktion an. Ziel ist es laut der aktuellen Fassung des Klimaschutzkonzeptes, dass Aachen bis 2030 seine CO₂-Emissionen im Vergleich zum Referenzjahr 1990 halbiert. Um dies zu erreichen, ist es notwendig, die Emissionen zwischen 2021 und 2030 jedes Jahr mindestens um 76.900 t CO₂ zu reduzieren.

Die meisten CO₂-Emissionen der Stadt Aachen stammen bislang aus dem Bereich Verkehr, dicht gefolgt von Gewerbe, Handel und Dienstleistungen sowie den privaten Haushalten (Stand 2018).^{xxxvii}

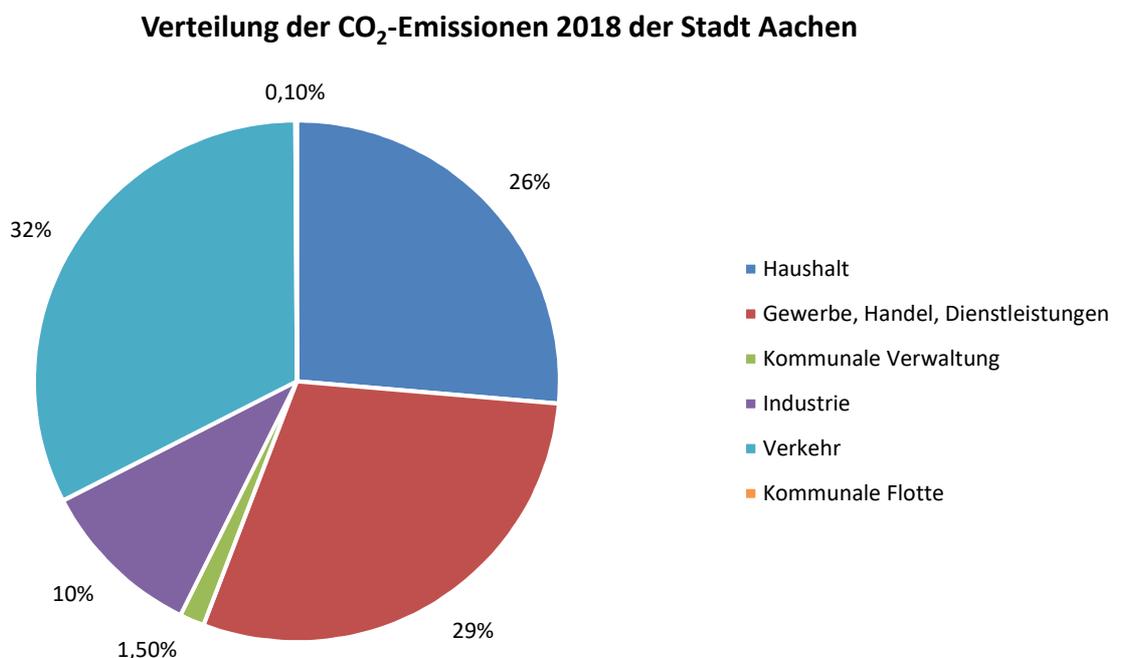


Abbildung 10: CO₂-Emissionen der Stadt Aachen (2018) ^{xxxviii}

Da das kumulierte Einsparziel von 310.900 t für den Zeitraum zwischen 2014 und 2020 verfehlt wurde (106.800 t wurden zu wenig eingespart), müssen zwischen 2021 und 2030 noch 768.500 t CO₂ reduziert werden, woraus sich die oben erwähnte jährliche Reduktion von rund 76.900 t ergibt.

Diesbezüglich ist es laut Klimaschutzkonzept notwendig, ergänzende Maßnahmen zu ergreifen. Diese betreffen vor allem die Handlungsfelder Entwicklungsplanung, Raumordnung, kommunale Gebäude und Anlagen, Kommunikation und Kooperation, Ver- und Entsorgung, Ausbau der Wind- und Solarenergie, KWK-Anlagen in Aachen, Energetische Sanierung von Gebäuden und die Infrastruktur.

Der im Klimaschutzkonzept dargestellte Pfad zur CO₂-Minderung in den verschiedenen Sektoren geht von einer linearen Verteilung der CO₂-Mengen im Zeitraum von 2021 bis 2030 aus. Demnach können durch kommunale Maßnahmen 445.700 t bis 2030 eingespart werden, was 58 % der insgesamt notwendigen Reduktion in Höhe von 768.500 t entspricht. Die sich dadurch rechnerisch ergebenden Reduktionspotenziale pro Jahr können der nachfolgenden Abbildung 11 entnommen werden. Demnach besteht der größte Handlungsbedarf in der Energieerzeugung sowie -versorgung^{xxxix}

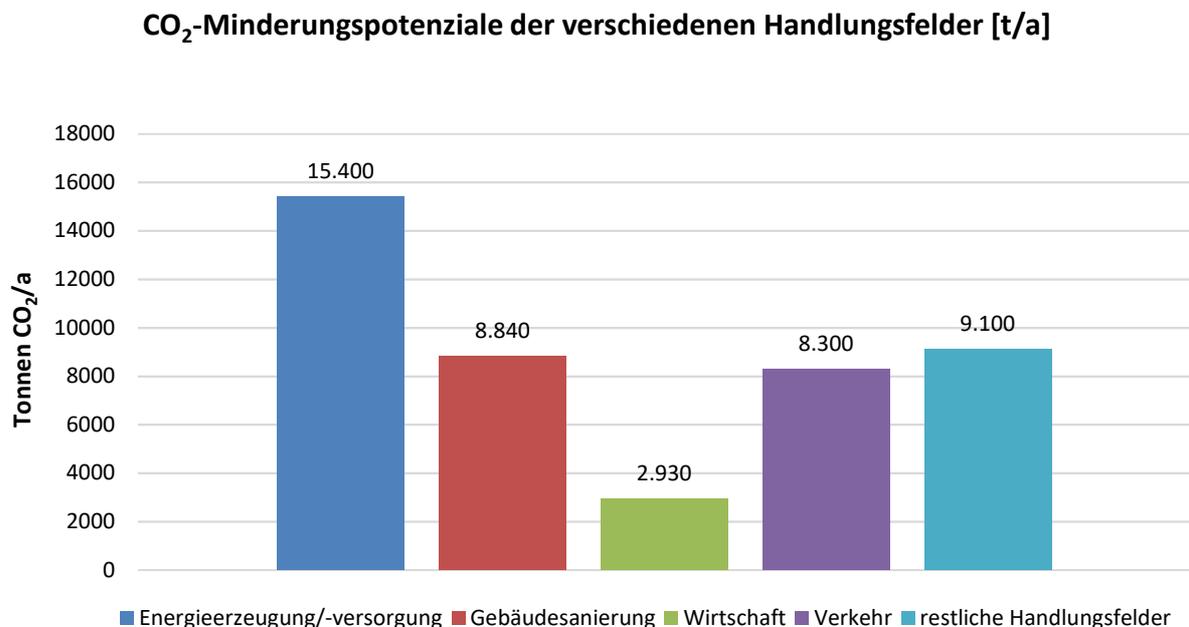


Abbildung 11: CO₂-Minderungspotenziale durch kommunale Maßnahmen ^{xl}

In diesem Kontext wird auch Wasserstoff als Energieträger thematisiert. So findet das Pilotprojekt der STAWAG Erwähnung, bei dem Wasserstoff aus Windenergie erzeugt werden soll (siehe „Geplante und laufende“). Als weitere Projekte werden wasserstoffbetriebene Abfallsammelfahrzeuge und eine Pilotanlage von Siemens am Campus Melaten genannt. Letzteres Projekt wird jedoch nicht mehr weiterverfolgt.

Das Klimaschutzkonzept wird aktuell (Stand: November 2022) durch die Stadt Aachen fortgeschrieben und aktualisiert.

Ratsentscheid zur Klimaneutralität

Anfang 2020 hat der Rat der Stadt Aachen beschlossen, dass die Stadt das 1,5-Grad-Ziel des Pariser Klimaabkommens anstrebt und ein CO₂-Restbudget zugrunde legt. In diesem Zusammenhang werden im Ratsbeschluss verschiedene Pfade zur CO₂-Emissionsreduktion dargestellt. Eine Möglichkeit wäre demzufolge eine jährliche Reduktion der THG-Emissionen in Höhe von 6 %, wodurch im Jahr 2030 noch 1,1 Mio. t CO₂eq emittiert würden. Die durchschnittliche jährliche Reduktion von 6 % richtet sich dabei nach einer Empfehlung des Sachverständigenrates für Umweltfragen für ganz Deutschland und ist mit dem 1,5-Grad-Ziel kompatibel. Während dieser Pfad im Jahr 2030 jedoch zu den oben genannten 1,1 Mio. t CO₂ führt, würde das im Klimaschutzkonzept postulierte Ziel einer 50%igen Reduktion im Vergleich zum Referenzjahr 1990 „nur“ eine Absenkung auf 1,37 Mio. t CO₂ im Jahr 2030 bedeuten. Für dieses Ziel wird ein Pfad mit linearer Reduktion der jährlichen Emissionsmenge im Zeitraum von 2020 bis 2030 beschrieben, wobei die Emissionen jährlich um 76.900 t sinken müssten.^{xii}

EU-Mission „100 klimaneutrale Städte bis 2030“

Ziel des EU-Projektes „100 klimaneutrale Städte bis 2030“ ist ein Wandel der Städte zu klimaneutralen „Smart Cities“ durch die Nutzung sauberer Mobilitätsformen, der Steigerung der Energieeffizienz und grüner Stadtplanung. Bis Ende 2023 erhalten die 100 ausgewählten Städte innerhalb Europas sowie zwölf außereuropäische Städte, die mit dem Forschungsprogramm Horizon Europe assoziiert sind, Fördermittel aus dem Programm Horizon Europe in Höhe von insgesamt 360 Mio. Euro. Mit Hilfe dieser Mittel und neuen Innovationen soll die angestrebte Klimaneutralität 2030 erreicht werden. Aachen und acht weitere Städte, wie München, Dortmund und Dresden, wurden als Experimentier- und Innovationszentren innerhalb Deutschlands ausgewählt. Neben der finanziellen Unterstützung profitieren die ausgewählten Städte zudem von externer Beratung, internationalem Erfahrungsaustausch und einer erhöhten Sichtbarkeit für Investoren und Unternehmen. Des Weiteren kann das Programm als Grundlage für Synergien mit anderen EU-Programmen dienen und bietet die Möglichkeit zur Entwicklung gemeinsamer Initiativen.

Der nächste Schritt innerhalb des Projektes stellt die Ausarbeitung eines Klimastadt-Vertrages dar. Im Zuge dessen muss die Stadt Aachen einen Gesamtplan zum Erreichen der Klimaneutralität in allen Sektoren, unter anderem Energie, Abfallwirtschaft und Verkehr verfassen.^{xiii}

HyExperts II: Region AachenPLUS

AachenPLUS ist ein durch das Bundesverkehrsministerium im Rahmen des HyLand-Programms gefördertes Wasserstoffprojekt der Städteregion Aachen, der Stadt Aachen, der Kreise Düren, Euskirchen, Heinsberg und Kerpen. Die Kreise und Kommunen fungieren als eine Wasserstoff-Modellregion mit einer regionenübergreifenden Wasserstoffwirtschaft. In dem Projekt soll ein ökologisches und ökonomisches Verkehrssystem geschaffen werden. Allgemein wird angestrebt, nicht nur Wasserstoff als nachhaltigen Energieträger zu betrachten, sondern auch dessen Folgeprodukte sowie Biomasse und Reststoffe.

Das HyExpert-Projekt AachenPLUS befindet sich noch im Anfangsstadium. Es sollen zunächst umfassende Analysen des Ist-Zustandes in den Bereichen Erzeugungspfade und -strukturen, Speicherung, Transport, Infrastruktur sowie der Nutzung im Verkehr und weiteren Bereichen durchgeführt werden. Darauf basierend können anschließend Ausbau- und Entwicklungspotenziale definiert werden. Zusätzlich wird die Betrachtung alternativer

Nutzungspfade von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten angestrebt. Abschließend soll eine regionenübergreifende Gesamt-Roadmap erarbeitet werden.^{xliii}

Genehmigungsverfahren

Um Wasserstoff in Aachen nutzbar zu machen, muss die vorhandene Energieinfrastruktur modernisiert und neue errichtet werden. Insbesondere die Errichtung neuer Anlagen geht jedoch mit entsprechenden Genehmigungsverfahren einher. Im Rahmen des Hochlaufs der Wasserstoffwirtschaft betrifft dies v. a. – aber nicht nur – die Elektrolyseure. Genehmigungsbedürftig sind bspw. auch Wasserstoffspeicher mit einer Kapazität von mehr als 3 Tonnen.

Je nach Art und Größe der zu errichtenden Infrastruktur existieren unterschiedliche rechtliche Grundlagen für das Genehmigungsverfahren. In einigen Fällen benötigen Elektrolyseure keine besondere Genehmigung. Dies ist in der Regel dann der Fall, wenn es sich um ein verfahrensfreies Bauvorhaben nach § 62 der Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen (BauO NRW) handelt. Darunter fallen Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung sowie bauliche Anlagen der allgemeinen Energieversorgung bis 20 m² Grundfläche und 5 m Höhe.

Wasserstoffanlagen, die nicht unter diese Punkte fallen, benötigen mindestens eine baurechtliche Genehmigung. In Aachen ist der Fachbereich Bauaufsicht (FB 63) für das entsprechende Verfahren zuständig. Im Rahmen der baurechtlichen Genehmigung ist ggf. eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen und sind weitere naturschutzrechtliche Belange zu untersuchen. Auch eine mögliche, genehmigungspflichtige Abwassereinleitung ist in diesem Kontext zu prüfen. Die Anlage ist gemäß Gashochdruckleitungsverordnung außerdem bei der Energieaufsicht NRW (Bezirksregierung Arnsberg) zu melden, wenn der maximal zulässige Betriebsdruck 16 bar übersteigt und die Leitungslänge der zugehörigen Gasleitung mindestens 1.000 m beträgt.

Unter Umständen ist zusätzlich eine Genehmigung nach Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) erforderlich. Dies ist vor allem dann notwendig, wenn die Sicherheit und die Gesundheit von Beschäftigten durch den Betrieb oder die Nutzung der Anlage beeinträchtigt werden können. In der Regel ist das bei Hochtemperaturelektrolyseuren, Methanisierungsanlagen und Gasabfüllstationen (inkl. Trailerbefüllung und Gastankstellen) der Fall. Genehmigungen nach BetrSichV werden für Aachen durch die Dezernate 55 und 56 der Bezirksregierung Köln bearbeitet.

In den meisten Fällen wird bei der Errichtung von Elektrolyseuren auch eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung erforderlich sein. Dies ist immer dann der Fall, wenn es sich um eine Anlage im „industriellen Maßstab“ handelt. Anlagen fallen regelmäßig in diese Kategorie, wenn sie zu kommerziellen Zwecken errichtet werden. Die immissionsschutzrechtliche Genehmigung umfasst u. a. ein formelles Öffentlichkeitsbeteiligungsverfahren. Anträge nach Bundesimmissionsschutzgesetz werden für Aachen vom Dezernat 53 der Bezirksregierung Köln bearbeitet.

Bei sehr großen Projekten, bei denen ein Anschluss an eine Hochspannungsleitung (≥ 110 kV) oder Gasversorgungsleitungen mit einem Durchmesser von mehr als 30 cm erforderlich sind, ist ein Planfeststellungs- bzw. Plangenehmigungsverfahren durchzuführen. Für Aachen ist die hierfür zuständige Behörde die Bezirksregierung Köln.

Bei der Genehmigung von Wasserstoffanlagen wie Elektrolyseuren ist die rechtliche Regelungshierarchie zu berücksichtigen. Dabei steht das zuletzt genannte Planfeststellungs- bzw. Plangenehmigungsverfahren an oberster

Stelle, gefolgt von der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung, der Erlaubnis nach Betriebssicherheitsverordnung und der Baugenehmigung. Die einzelnen Genehmigungsverfahren entfalten dabei eine sogenannte Konzentrationswirkung. Das heißt, eine höherrangige Genehmigung ersetzt bzw. umfasst auch die untergeordneten Genehmigungen, sodass der Prozess in einem Verfahren gebündelt werden kann. Dieses Prinzip ist in Abbildung 12 dargestellt.^{xiv}

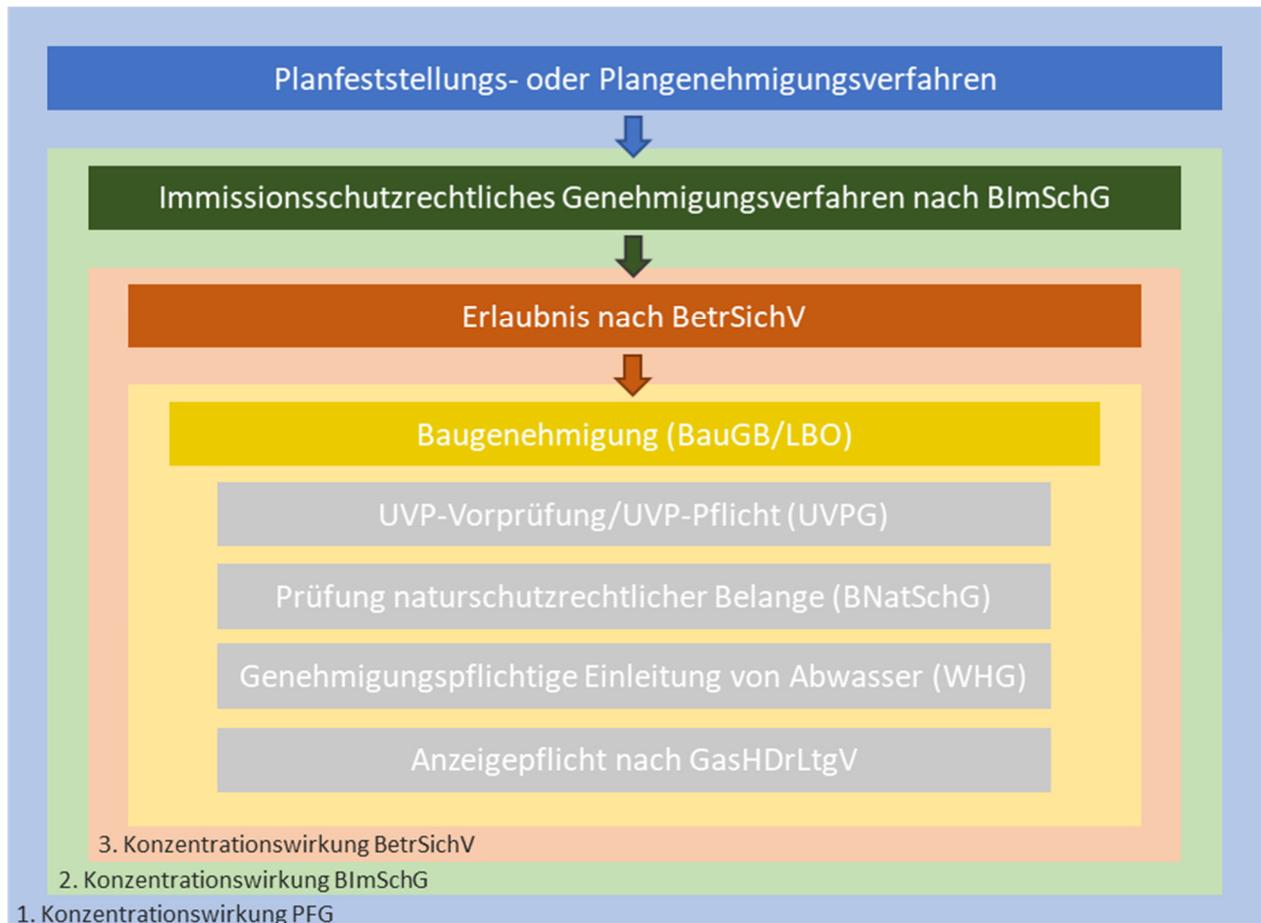


Abbildung 12: Bestimmung des höherrangigen Verfahrens bei der Genehmigung von Wasserstoffinfrastruktur ^{xiv}

4.2. Status quo der Wirtschaftsstruktur in Aachen

Um im Rahmen des Wasserstoffleitfadens für die Stadt Aachen künftige Potenziale für den Einsatz von Wasserstoff identifizieren zu können (vgl. Kapitel 5), ist eine Analyse der aktuellen Wirtschaftsstruktur erforderlich. Wie in Kapitel 3 dargestellt, finden sich potenzielle Anwendungsfelder für Wasserstoff in vielen Wirtschaftszweigen, im Verkehrssektor, bei der Energieerzeugung (Strom und Wärme) und im Gebäudesektor. Während die aktuelle Situation im Verkehrsbereich und der Status quo im Energie- und Gebäudesektor in Aachen in nachfolgenden Abschnitten dargestellt werden, ist im Folgenden die Wirtschaftsstruktur der Stadt Aachen beschrieben.

Wirtschaftsstruktur der Stadt Aachen

In der industriellen Anwendung liegen zahlreiche potenzielle Einsatzfelder für Wasserstoff. Dies sind bspw.:

- Energetischer Einsatz:

- Erzeugung von Prozesswärme, bspw. in der Lebensmittelindustrie, Konsumgüter- oder chemischen Industrie
- Nutzung als Kraftstoff für Güterverkehr und Logistik (Speditionen, Gabelstapler etc.), im Baugewerbe (z. B. Baufahrzeuge) oder beim Stadtbetrieb (z. B. Abfallsammelfahrzeuge)
- Stofflicher Einsatz in industriellen Prozessen:
- Einsatz in der Lebensmittelindustrie als Zusatzstoff (E 949), bspw. bei der Verarbeitung von Pflanzenölen^{xlvi}
- H₂ als Prozessgas, z. B. in der Stahlproduktion
- H₂ als Ausgangsstoff in der Chemieindustrie, z. B. für die Ammoniakproduktion

Neben der energetischen und stofflichen Verwendung von Wasserstoff bieten sich auch Chancen für Hersteller von Komponenten für die Erzeugung, die Speicherung, den Transport und die Verwendung von Wasserstoff. Dies sind v. a. Unternehmen aus dem Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus.

In der Stadt Aachen ist eine Vielzahl von national und international agierenden Unternehmen beheimatet. Zusammen erzielten sie im Jahr 2019 einen Umsatz von mehr als 21 Mrd. Euro. Fast 8,3 Mrd. Euro – und damit ein Anteil von 39 % an der gesamten städtischen Wertschöpfung – werden dabei allein im verarbeitenden Gewerbe erwirtschaftet, in dem ein Großteil des zukünftigen Potenzials zur Partizipation an der Wasserstoffwirtschaft zu erwarten ist (vgl. Abbildung 13).^{xlvii} Zum Vergleich: An der gesamtdeutschen Bruttowertschöpfung betrug der Anteil des verarbeitenden Gewerbes im Jahr 2019 lediglich knapp 22 %.^{xlviii} Bei der Einordnung des Umsatzes aus dem Bereich des verarbeitenden Gewerbes in Aachen ist allerdings zu berücksichtigen, dass ein wesentlicher Anteil auf den Aachener Standort des Automobilzulieferers Continental entfällt, welcher Ende 2022 geschlossen werden soll.^{xlix} Eine Wertschöpfung von weiteren 3,3 Mrd. Euro entfällt auf die Energieversorgung, die in einem separaten Abschnitt weiter unten detaillierter betrachtet wird.^{xlvii}

**Wirtschaftszweige in der Stadt Aachen im Jahr 2019
nach Jahresumsatz (in Mrd. EUR)**

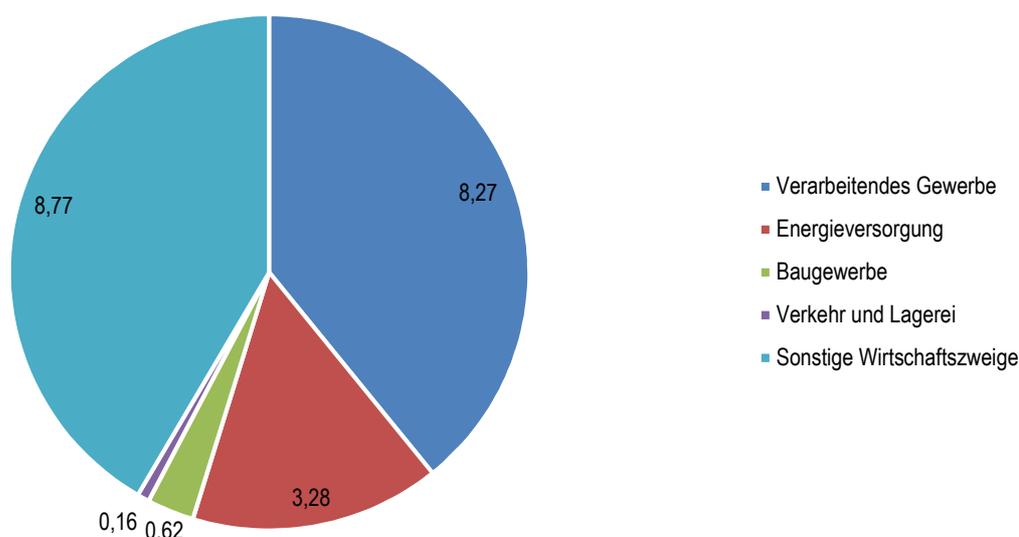


Abbildung 13: Wirtschaftszweige in der Stadt Aachen im Jahr 2019 nach Jahresumsatz (in Mrd. Euro)^{xlvii}

Verarbeitendes Gewerbe

Mehr als ein Viertel (2,3 Mrd. Euro) des gesamten Umsatzes im verarbeitenden Gewerbe werden durch in Aachen ansässige Hersteller der Nahrungs- und Futtermittelindustrie Erlöse (vgl. Abbildung 14). Insbesondere sind dies national und international erfolgreiche und energieintensive Unternehmen wie die Süßwarenhersteller Lambertz, Lindt & Sprüngli und Zentis oder die Aachener Kaffeerösterei Plum's Kaffee. Dieser Wirtschaftszweig trägt knapp 11 % des gesamten Umsatzes aller Aachener Unternehmen bei. Nach der Energieversorgung (3,3 Mrd. Euro Umsatz) ist die Nahrungs- und Futtermittelindustrie damit der zweitgrößte separat ausgewiesene Wirtschaftszweig in der Stadt Aachen bezüglich der erzielten Erlöse. Insgesamt 4.385 sozialversicherungspflichtig Beschäftigte sind in diesem Bereich in Aachen tätig. Dies entspricht lediglich einem Anteil von etwas mehr als 3 % bezogen auf alle sozialversicherungspflichtig Beschäftigten in der Stadt Aachen. ^{xlvii}

Bereiche des verarbeitenden Gewerbes mit > 200 Mio. Euro Jahresumsatz
(2019, in Mrd. Euro)

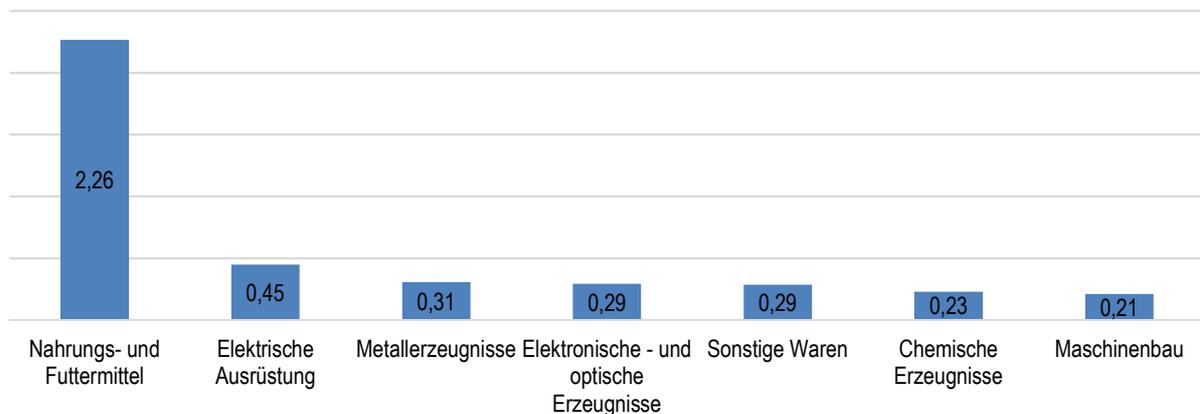


Abbildung 14: Bereiche des verarbeitenden Gewerbes mit > 200 Mio. Euro Jahresumsatz (2019, in Mrd. Euro) ^{xlvii}

Neben der Nahrungsmittelindustrie sind v. a. bei der in Aachen ebenfalls anzufindenden Herstellung von Metallerzeugnissen sowie in der chemischen Industrie Anwendungspotenziale für Wasserstoff zu erwarten. Unternehmen aus den Zweigen der Herstellung von elektrischer Ausrüstung und dem Maschinenbau könnten darüber hinaus perspektivisch bei der Produktion von Komponenten für die Wasserstoffwirtschaft aktiv werden.

Forschung und Entwicklung

Eine zentrale Rolle für Aachen als Wirtschafts- und Wissenschaftsstandort spielen die insgesamt sechs Hochschulen, die ihren Standort in Aachen haben und zusammen mit einer Vielzahl privatwirtschaftlicher Einrichtungen Aachens Position als einem der weltweit führenden Forschungs- & Entwicklungsstandorte begründen. Bezogen auf die Forschung zu Wasserstoffthemen sind die RWTH Aachen University und die FH Aachen University of Applied Sciences hervorzuheben.¹

Insbesondere in den folgenden Forschungs- & Entwicklungsfeldern besteht ein Bezug zu Wasserstoff:

- Automotive: Im Bereich der alternativen Antriebe ist der Einsatz von Wasserstoff bereits seit vielen Jahren ein Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt, welcher weiter an Bedeutung gewinnt. Die Wasserstoffnachfrage von in Aachen ansässigen Hochschulinstituten und privatwirtschaftlichen Entwicklungsdienstleistern, welche die Entwicklung von Antrieben mit Brennstoffzellen und

Wasserstoffverbrennungsmotoren vorantreiben, wird daher perspektivisch steigen. Stellvertretend für die Aachener Forschungslandschaft im Bereich Automotive sind die RWTH-Institute ika (Institut für Kraftfahrzeuge), ISEA (Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe) und TME (Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme).

- **Materialtechnik:** Die Entwicklung hochleistungsfähiger Membran- und Faserverbundwerkstoffe sowie innovativer Technologien für deren Verarbeitung ist eine notwendige Voraussetzung für zukünftige Optimierungen der Wasserstoffproduktion und -speicherung. Entsprechende Werkstoffe werden z. B. für die Fertigung von stationären oder mobilen Wasserstofftanks benötigt. Im Bereich der Textiltechnik ist insbesondere das ITA (Institut für Textiltechnik) zu nennen. Das IKV (Institut für Kunststoffverarbeitung) konzentriert sich auf die Entwicklung zukunftsweisender Verarbeitungstechnologien für Kunst- und Faserverbundwerkstoffe.
- **Umwelttechnik:** Für die Entwicklung von Maßnahmen zur Emissionsreduzierung und -vermeidung in der Industrie und der Versorgung der Bevölkerung sowie der Gebäudetechnik wird Wasserstoff in Zukunft eine noch wichtigere Rolle einnehmen. Der Bereich der Umwelttechnik wird beispielsweise durch das INaB (Institut für Nachhaltigkeit im Bauwesen) vertreten.
- **Produktionstechnik:** Der umfassende Einsatz von Wasserstoff in diversen Industriesektoren erfordert den Aufbau einer effizienten und qualitätssichernden Serienproduktion der dafür benötigten Komponenten. Im Umfeld der Aachener Hochschulen werden hierfür innovative Fertigungstechnologien und Produktionsabläufe – z. B. für Brennstoffzellen – erforscht und in die Praxis gebracht. Beispielhaft für den Bereich Produktionstechnik stehen das WZL (Werkzeugmaschinenlabor) und das PEM (Chair of Production Engineering of E-Mobility Components) an der RWTH Aachen University.
- **Informationstechnik:** Die Weiterentwicklung der Digitalisierung und Automatisierung ist ein wichtiger Hebel für die Energiewende, beispielsweise bei der flexiblen Steuerung von Elektrolyseuren zur Nutzung von Erzeugungsspitzen aus erneuerbaren Energien. An der RWTH Aachen ist der Forschungsbereich der Informatik in insgesamt 14 Fachbereiche mit mehreren Professuren aufgeteilt.

4.3. Status quo der Verkehrsstruktur in Aachen

Der Verkehrssektor ist neben Industrieprozessen sowie der Energie- und Wärmeversorgung eines der möglichen Haupteinsatzfelder von Wasserstoff. In diesem Kapitel wird daher der Status quo der Verkehrsstruktur in Aachen näher untersucht. An eine Analyse des Kraftfahrzeugbestands und eine Zusammenfassung des gegenwärtigen Angebots im ÖPNV schließt sich eine Bestandsaufnahme zur Verkehrsinfrastruktur im Stadtgebiet an.

Kraftfahrzeugbestand und Antriebsarten

Insgesamt waren in der Stadt Aachen zum Stichtag 1. Januar 2022 133.881 Kraftfahrzeuge zugelassen. Wie Abbildung 15 zu entnehmen ist, machen hiervon Pkw mit mehr als 86 % den größten Anteil aus. Zusammen knapp 6 % entfallen auf Lkw und Zugmaschinen, während Krafträder ca. 7 % der Kfz in Aachen ausmachen. ⁱⁱ

Kraftfahrzeugbestand in der Stadt Aachen am 1. Januar 2022

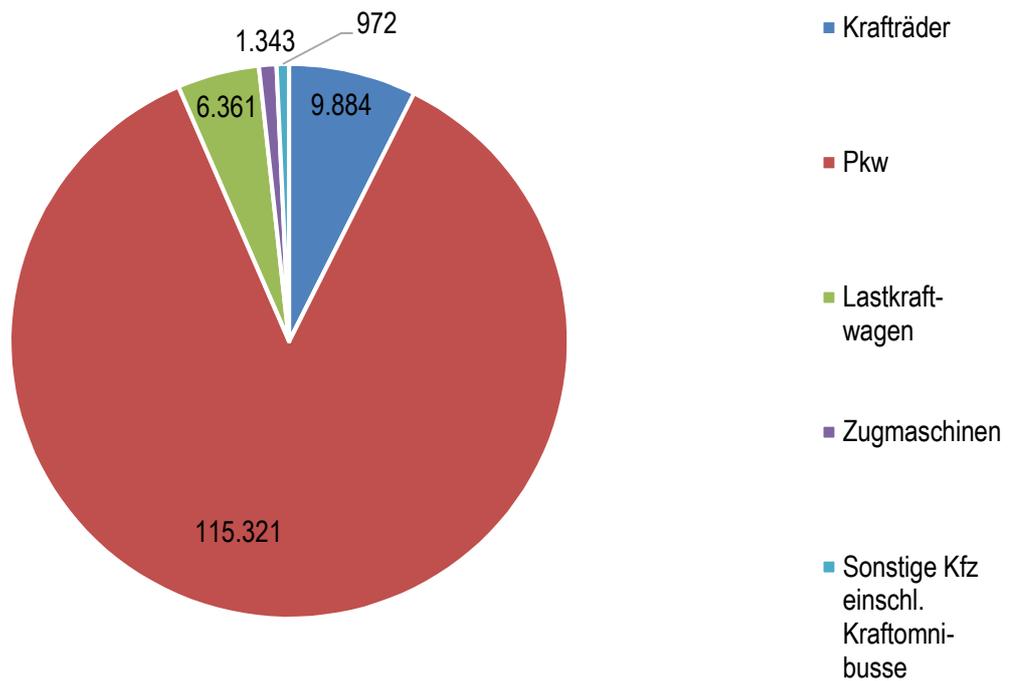


Abbildung 15: Kfz-Bestand in der Stadt Aachen am 1. Januar 2021 ⁱⁱ

Für die Analyse der Antriebsartenverteilung im Pkw-Bestand liegen Daten nur auf Ebene der Städteregion Aachen, ebenfalls zum Stichtag 1. Januar 2022 vor. Mit einem Anteil von 66 % dominieren Pkw mit klassischem benzinbetriebenen Verbrennungsmotor (vgl. Abbildung 16). Dieselfahrzeuge machen knapp 27 % des Bestands aus, während alternative Antriebe (batterieelektrisch, Plug-in-Hybrid, Gas, Sonstige) am Stichtag lediglich auf einen Anteil von zusammen weniger als 5 % kamen. ^{v & lii}

Anteile der Antriebsarten am Pkw-Bestand in der Städteregion Aachen am 1. Januar 2021

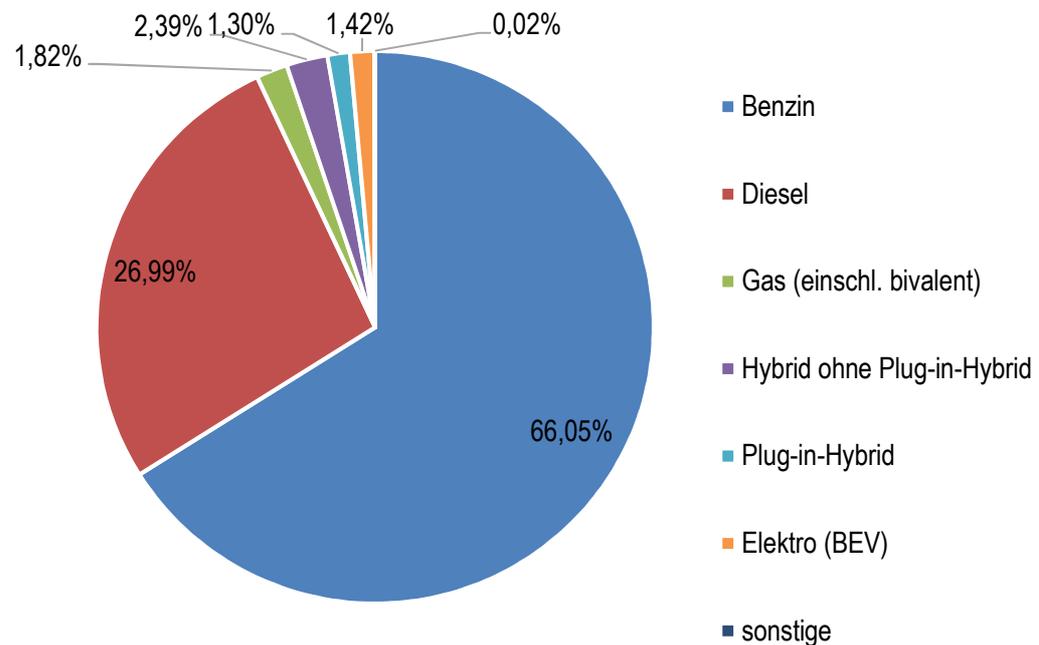


Abbildung 16: Anteile der Antriebsarten am Pkw-Bestand in der Städteregion Aachen am 1. Januar 2021 ⁱⁱⁱ

Der Bestand von Fahrzeugen mit Wasserstoffantrieb in der Stadt Aachen oder der Städteregion Aachen wird (noch) nicht durch das Kraftfahrtbundesamt ausgewiesen. Unter Annahme der anteiligen Verteilung des gesamtdeutschen Pkw-Bestands ergäben sich aus den zum 01. April 2022 in Deutschland zugelassenen 1.426 Brennstoffzellenfahrzeugen für die Stadt Aachen zum selben Stichtag rechnerisch ein Bestand von 3 bis 4 Brennstoffzellen-Pkw.ⁱⁱⁱ Aufgrund der mit der vorhandenen Wasserstofftankstelle am Prager Ring verhältnismäßig gut ausgeprägten Infrastruktur ist jedoch davon auszugehen, dass die tatsächliche Anzahl an Wasserstofffahrzeugen über dem bundesdeutschen Durchschnitt liegt.

Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV)

Das Angebot des öffentlichen Personennahverkehrs wird in der Stadt Aachen sowie im Gebiet der Städteregion Aachen durch den Mobilitätsdienstleister ASEAG erbracht. Auf insgesamt 108 Buslinien werden pro Jahr knapp 71,5 Mio. Menschen befördert. Die dabei jährlich zurückgelegten 20,5 Mio. Wagenkilometer verteilen sich auf insgesamt 501 Fahrzeuge, wovon 248 Fahrzeuge der ASEAG selbst gehören. Die restlichen Fahrzeuge stammen von Subunternehmen, welche im Unterauftrag der ASEAG tätig sind.^{iv} Laut dem für diesen Leitfaden geführten Interview mit Herrn Michael Carmincke, dem Vorstand der Aachener Straßenbahn und Energieversorgungs-AG (ASEAG), sind zukünftig 15 Wasserstoffbusse geplant. Nach aktuellen Planungen soll die ASEAG zukünftig 80 bis 90 batterieelektrische Busse in ihrem Fuhrpark betreiben.

Verkehrsinfrastruktur

Durch seine direkte Grenzlage im „Dreiländereck“ mit Belgien und den Niederlanden erhält Aachen eine besondere Bedeutung als Transitort für innereuropäischen Verkehr sowohl auf der Straße als auch auf der Schiene.

Aachen verfügt im Stadtgebiet über Anschlussstellen zur südöstlich verlaufenden Europastraße 40 (E40), in Deutschland Bundesautobahn A 44, welche das Ruhrgebiet mit der belgischen Nordseeküste und der belgischen Hauptstadt Brüssel verbindet. Des Weiteren existieren Anschlüsse an die nördlich von Aachen verlaufende A 4, welche Teil der durch die Niederlande verlaufenden Verbindung zwischen Köln und dem Seehafen Antwerpen (Belgien) ist. Ebenfalls Teil des Autobahnnetzes in der Stadt Aachen ist die A 544, eine Zubringerstrecke zum Autobahnkreuz Aachen.

An das deutschland- und europaweite Schienennetz ist Aachen über insgesamt fünf in Betrieb befindliche Bahnhöfe angeschlossen. Dem Aachener Hauptbahnhof kommt dabei eine Rolle als Fernverkehrsknotenpunkt zu. Direkte Fernverbindungen ins Ausland gibt es mit dem Thalys (ein Gemeinschaftsunternehmen der französischen Eisenbahngesellschaft SNCF und der belgischen SNCB) über Brüssel nach Paris und mit dem Nightjet der Österreichischen ÖBB nach Wien. Mehrmals täglich verkehrt zudem ein ICE der Deutschen Bahn nach Frankfurt.^{lv, lvi, lvii} Darüber hinaus ist der Güterbahnhof Aachen-West Haltepunkt der Europäischen Schienen-Güterverkehrskorridore „Corridor Rhine-Alpine“ sowie „Rail Freight Corridor North Sea-Baltic“, welche die Seehäfen Rotterdam (Niederlande) bzw. Zeebrugge (Belgien) an das Europäische Güterverkehrsnetz anbinden.^{lviii, lix}

4.4. Status quo der Energie- und Gebäudeinfrastruktur in Aachen

Neben den Sektoren Industrie, Gewerbe und Verkehr finden sich auch im Energieumwandlungssektor (Strom- und Wärmeerzeugung) und im Gebäudebereich mögliche zukünftige Anwendungsfelder für Wasserstoff. Insbesondere könnte das Gas in Zukunft in Gaskraftwerken oder Brennstoffzellen verstromt werden, um Lastspitzen bzw. durch die volatilen erneuerbaren Energien entstehende Angebotsdellen flexibel ausgleichen zu können. Auch im Aachener Fernwärmesystem könnte Wasserstoff für die Wärmeerzeugung in modernen Blockheizkraftwerken zukünftig eine wichtige Rolle spielen. Ebenso könnte die Abwärme von großen Elektrolyseuren und Brennstoffzellen in das Wärmenetz eingespeist werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Gebäude mittels dezentraler Brennstoffzellen mit Strom und Wärme zu versorgen. Dies würde eine ausgedehnte Verteilnetzinfrastruktur für Wasserstoff oder die Belieferung von einzelnen Gebäuden mit Gasflaschen erfordern. Heute spielt der Wasserstoff jedoch noch keine Rolle für die Energieversorgung in Aachen.

Energiebezug – wo die Aachener Energie herkommt

Der innerhalb der Aachener Stadtgrenzen verbrauchte Strom und die Wärme stammen zum größten Teil von Kraftwerken und Erneuerbare-Energie-Anlagen außerhalb der Stadt und werden über Strom- und Wärmeleitungen nach Aachen transportiert. Selbes gilt für die Gasversorgung, die über Fernleitungen sichergestellt wird. Hinzu kommen flüssige Kraftstoffe, wie Benzin und Diesel, die per Lkw nach Aachen transportiert werden. Wie für urbane Regionen üblich ist die Stadt also auf „Energieimporte“ aus dem Umland angewiesen.

Der Erzeugungspark für die öffentliche Energieversorgung innerhalb der Stadt Aachen ist recht übersichtlich und wird von einer steigenden Anzahl an mit Erdgas betriebenen BHKWs für die Versorgung mit Strom und Wärme dominiert. Aktuell beträgt die Erzeugungsleistung aus Heizkraftwerken und BHKWs im Aachener Stadtgebiet,

inklusive des noch im Bau befindlichen BHKWs Schwarzer Weg, ca. 157 MW_{th} und ca. 28 MW_{el}.^{lx} Darüber hinaus sind im Aachener Stadtgebiet insgesamt 22 Windkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von 53,58 MW und 3.027 PV-Anlagen mit insgesamt 37,6 MW in Betrieb. Hierin enthalten sind auch zwei durch die STAWAG betriebene Freiflächen-PV-Anlagen im Aachener Gewerbegebiet „Avantis“ mit einer Bruttoleistung von 1.260 bzw. 747 kW (Stand: 30. November 2022).^{lxi}

Der Ausbau erneuerbarer Energieerzeugung mittels PV- und Windkraftanlagen führt zu steigenden Einspeisemengen in den ländlichen Stadtteilen. Insgesamt erwartet der lokale Verteilnetzbetreiber Regionetz GmbH im Zeitraum von 2021 bis 2031 für die Stadt Aachen einen Zuwachs der Erzeugungsleistung um 10 MW.^{lxii} In Aachen Vetschau/Butterweiden sind neben dem Aufbau neuer Anlagen auch Repowering-Maßnahmen von Bestandsanlagen in der Planung. Das Planungsverfahren steht jedoch aktuell vor der Herausforderung, dass zwei der betroffenen Anlagen den gesetzlich geforderten Mindestabstand zur Wohnbebauung von 1.000 m unterschreiten.^{lxiii}

Zur Förderung des Solarenergieausbaus hat die Stadt Aachen bereits im Jahr 2020 ein eigenes Solarförderprogramm aufgelegt. Im Rahmen der seit dem 1. Januar 2022 geltenden Förderrichtlinie können Privatpersonen und Unternehmen Zuschüsse u. a. für den Neubau von PV-Anlagen und Stromspeichern, aber auch für die Umrüstung von Post-EEG-Anlagen erhalten.^{lxiv}

Berechnungen der durch Aachener Vereine und Bürger*innen initiierten Arbeitsgemeinschaft „Aachen hat Energie“ weisen für das Aachener Stadtgebiet ein Ausbaupotenzial für Freiflächen-PV-Anlagen von ca. 324 ha aus. Dies entspricht ja 250 bis 300 MWp installierter Leistung.^{lxv}

Die Netzinfrastruktur für die Strom- und Gasversorgung wird in der Stadt Aachen durch die Regionetz GmbH, ein 2018 gegründetes Gemeinschaftsunternehmen der STAWAG und der EWW betrieben.^{lxvi} In Abbildung 17 ist das 110-kV-Hochspannungsnetz der Regionetz GmbH im Gebiet der Stadt Aachen inklusive angeschlossener Umspannwerke dargestellt. Es ist über den Netzübergabepunkt Verlautenheide an das 380-kV-Übertragungsnetz der Amprion GmbH angeschlossen.^{lxvii lxviii} Von dort aus wird der Strom auf die unterlagerten Netzebenen verteilt und zu den Endkund*innen transportiert.

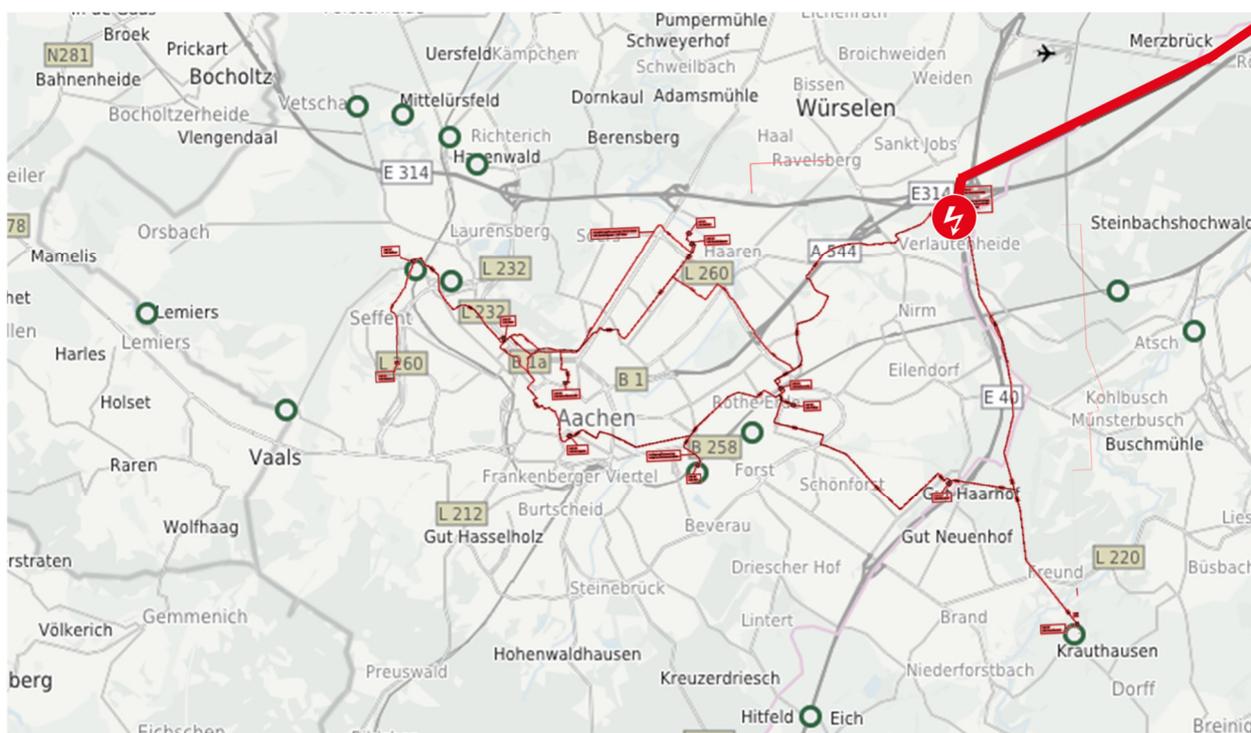


Abbildung 17: Hochspannungsnetz der Regionetz GmbH und Anschluss an das Übertragungsnetz im Aachener Stadtgebiet ^{lxvii} ^{lxviii}

Insgesamt umfasste das Stromnetz der Regionetz GmbH in der Städtereion Aachen zum Stichtag 31. Dezember 2020 53 km Hochspannungsleitungen und 2.247 km Mittelspannungsleitungen. Hinzu kommen inklusive Hausanschlüssen 5.826 km Niederspannungsleitungen. Im Bereich Hoch- und Mittelspannung existieren 1.305 Entnahmestellen. Weitere 355.363 Entnahmestellen sind an das Niederspannungsnetz angeschlossen. ^{lxix} An das Mittelspannungsnetz der Regionetz GmbH ist aktuell ein 5,4-MWh-Batteriegroßspeicher des Instituts für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe (ISEA) der RWTH Aachen University angeschlossen. Darüber hinaus waren am Stichtag 30. November 2022 weitere 633 Batteriespeicher mit insgesamt 3,7 MWh ans Aachener Stromverteilnetz angeschlossen. ^{lxxii} ^{lxxi}

Das Gasverteilnetz der Regionetz GmbH wird in der Stadt Aachen für die Verteilung von sog. „H-Gas“ genutzt. ^{lxxx} Dieses unterscheidet sich von sogenanntem „L-Gas“ durch seinen höheren Brennwert. „High calorific gas“ hat einen Brennwert von ca. 11,5 kWh/m³, während „low calorific gas“ auf ca. 10,3 kWh/m³ kommt. ^{lxxx} ^{lxxxi} Im Vergleich dazu kommt Wasserstoff nur auf einen Brennwert von 3 kWh/m³, wodurch über dasselbe Leitungsvolumen mittels Wasserstoff weniger Energie transportiert werden kann als mittels Erdgas.

Das Erdgasverteilnetz der Regionetz GmbH hatte im Netzgebiet, welches über die Stadt Aachen hinaus die gesamte Städtereion sowie einzelne Gemeinden des Kreises Heinsberg und des Kreises Düren abdeckt, zum Stichtag 31. Dezember 2021 eine Gesamtlänge ohne Hausanschlussleitungen von 2.379 km. Fast die Hälfte (1.095 km) entfällt dabei auf Niederdruckleitungen, an welche 63.405 Auspeisepunkte angeschlossen sind. Weitere 46.058 Auspeisepunkte sind ans Mittel- und Hochdrucknetz angeschlossen. Im Aachener Stadtgebiet gibt es insgesamt drei Übergabestationen im Gasnetz. ^{lxxii} ^{lxxiii} ^{lxxiv}

Südlich von Aachen verläuft die durch Gascade betriebene Ferngasleitung „WEDAL“ von Westen nach Nord-Osten. An der Grenze zu Belgien wird der Netzkopplungspunkt „Eynatten“ sowohl zur Ein- als auch zur Auspeisung genutzt. Einen weiteren Auspeisepunkt im Aachener Stadtgebiet gibt es am innerdeutschen Netzkopplungspunkt

„Aachen Süd“. Dieser kann sowohl für den Transport russischen als auch (nord-)westeuropäischen (H-)Erdgases genutzt werden.^{lxxv} Weitere H-Ferngasleitungen, die durch das Aachener Stadtgebiet verlaufen, werden durch die Thyssengas GmbH betrieben. Südlich von Aachen wird der Einspeise- und Grenzübergabepunkt durch eine weiter nach Nord-Osten verlaufende Ferngasleitung angeschlossen. Ein Anschluss an die Niederlande erfolgt am Einspeise- und Grenzübergabepunkt „Bocholtz-Vetschau“ an eine von Westen nach Osten verlaufende Gasleitung im Aachener Norden.^{lxxvi}

Ein Anschluss Aachens an das von den deutschen Fernleitungsnetzbetreibern geplante Wasserstofftransportnetz könnte Anfang der 2030er Jahre über den Grenzübergangspunkt Eynatten erfolgen, wie die Darstellung in Abbildung 18 zeigt. Der Kopplungspunkt Eynatten hat dabei eine Importkapazität von 3,8 GW.

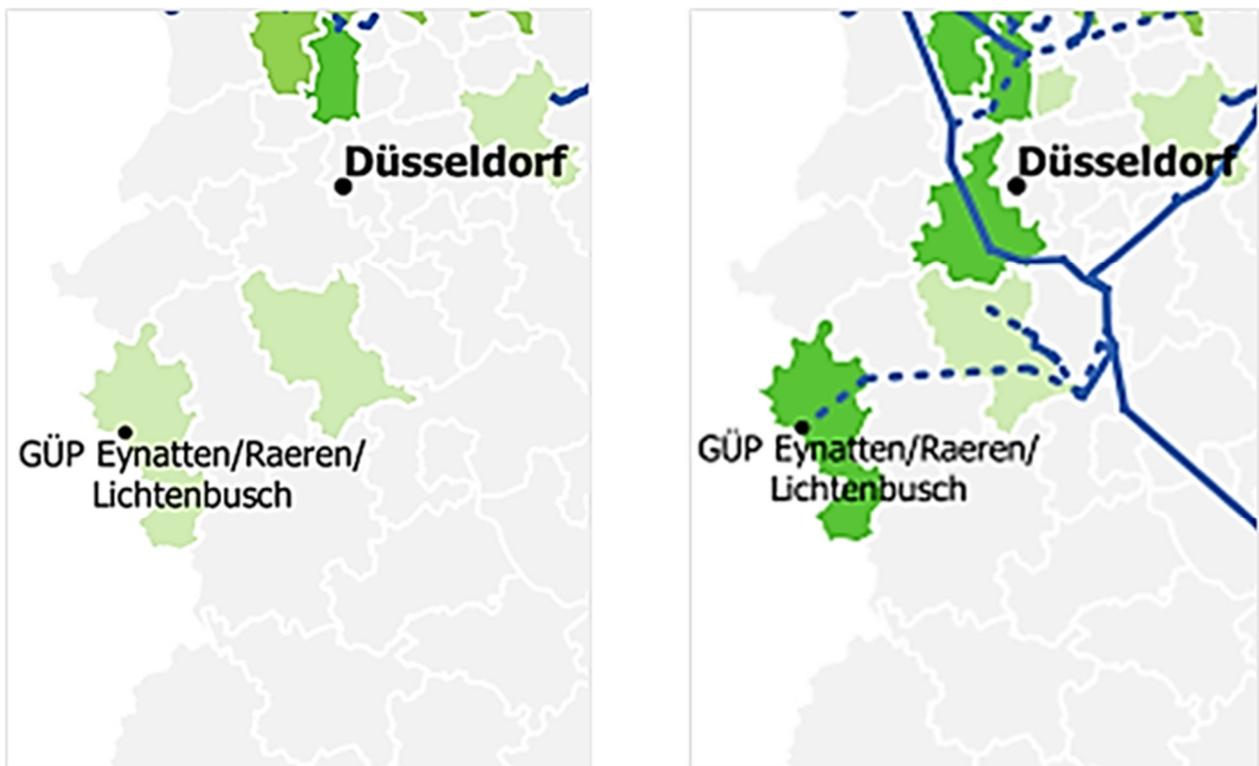


Abbildung 18: Ausschnitt aus dem Netzentwicklungsplan Gas für 2027 (links) und 2032 (rechts) ^{lxxvii}

Sowohl für das Gas- als auch für das Stromverteilnetz in der Stadt Aachen laufen die Betriebskonzessionen noch bis zum 23. Februar 2029.

Überblick über den Energieverbrauch in der Stadt Aachen

Im Jahr 2020 betrug der in Abbildung 19 dargestellte Endenergieverbrauch der Stadt Aachen insgesamt 6.386 GWh. ^{lxxviii}

Endenergiebedarf der Stadt Aachen 2020 nach Energieträgern
Gesamt: 6.386 GWh

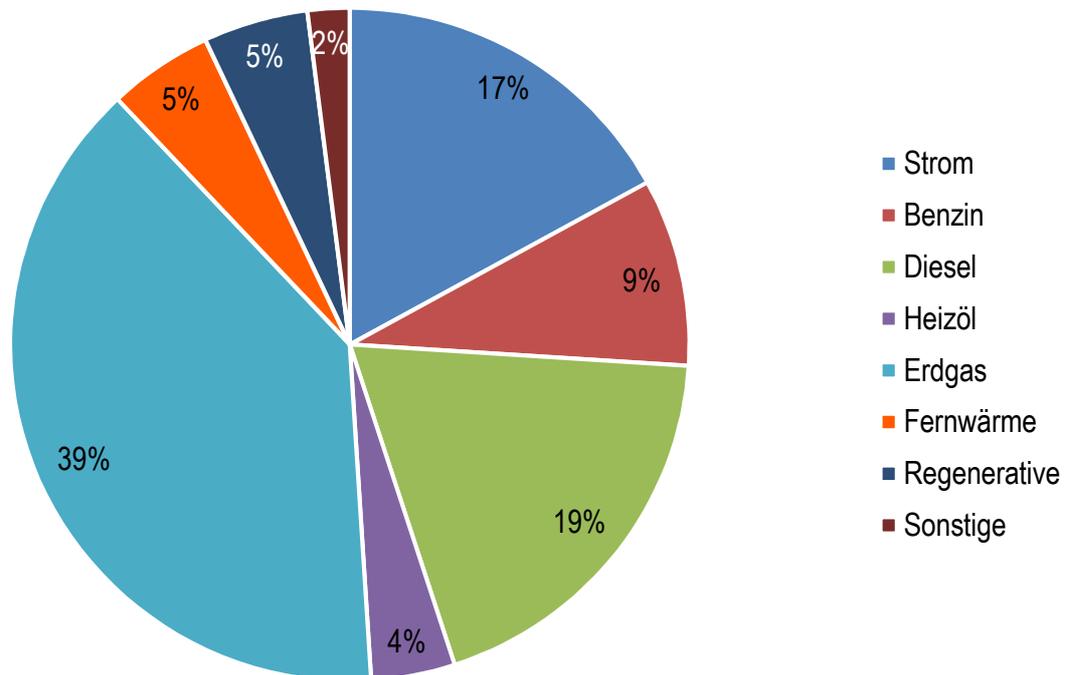


Abbildung 19: Endenergiebedarf der Stadt Aachen 2020 nach Energieträgern ^{lxxviii}

Davon entfielen 2.489 GWh auf den Energieträger Erdgas. Dies entspricht einem Anteil von 39 % (zum Vergleich: Deutschlandweit betrug der Erdgasanteil 2020 26,4 %^{lxxix}). Auf den Energieträger Strom entfielen 1.105 GWh oder ca. 17 % des gesamten Energiebezugs, wovon knapp 174 GWh aus erneuerbaren Energien (EE) stammten.^{lxxviii} Etwa 79 % der Einspeisungen ins Aachener Stromnetz kommen von der STAWAG.^{lxxx} Laut Geschäftsbericht wird die eigene Stromproduktion der STAWAG aus EE von heute bereits mehr als 530 GWh/Jahr weiter ausgebaut. Der größte Teil der EE-Erzeugungsanlagen befindet sich jedoch außerhalb Aachens.^{lxxxi} Insgesamt 5 % der Endenergie wurden in Form von Fernwärme zu Heizzwecken genutzt (s. u. für weitere Informationen zur Fernwärmeerzeugung in Aachen).

Betrachtet man den Endenergiebezug aufgeschlüsselt nach Sektoren, so ergibt sich folgendes Bild: ^{lxxviii}

Endenergiebedarf der Stadt Aachen 2020 nach Sektoren Gesamt: 6.386 GWh

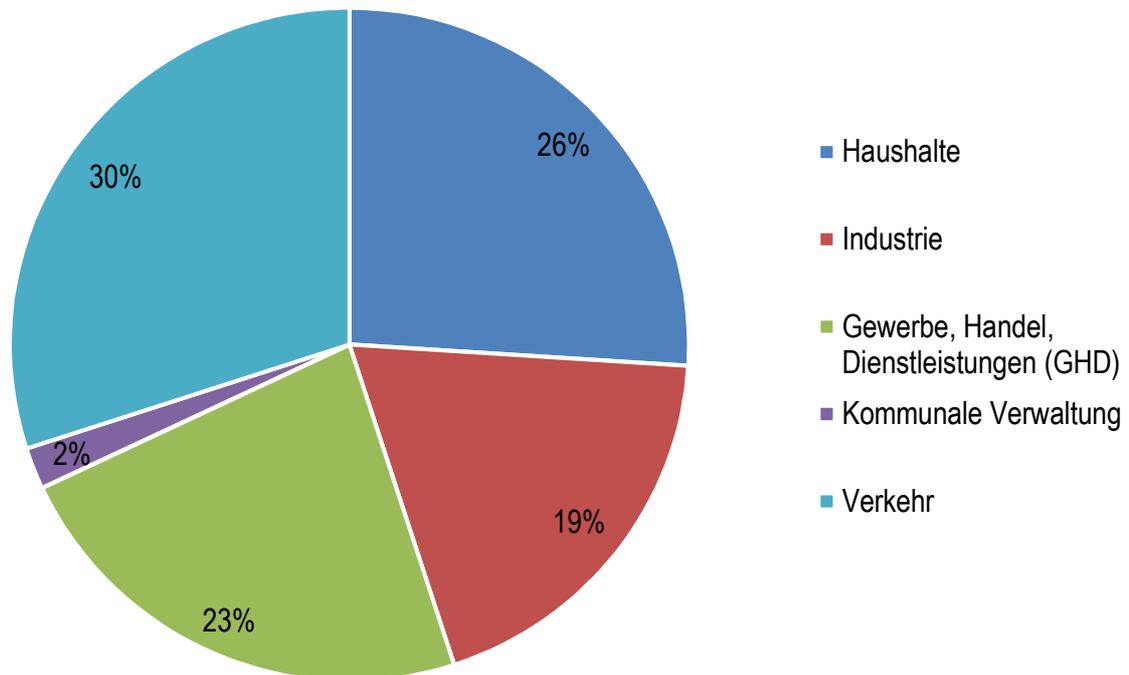


Abbildung 20: Endenergiebedarf der Stadt Aachen 2020 nach Sektoren ^{lxxviii}

Der Verkehrssektor hatte 2020 trotz des aufgrund der Corona-Pandemie reduzierten Verkehrsaufkommens mit einem Anteil von 1.922 GWh (30 %) den größten Energiebedarf in der Stadt Aachen, gefolgt von den privaten Haushalten (1.685 GWh/26 %) sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (1.447 GWh/23 %). Mit einem Endenergiebezug von 1.231 GWh verursachten die Industrieunternehmen in Aachen ca. 19 % der Energienachfragen. 2 % oder 100 GWh entfielen auf die kommunale Verwaltung inklusive des städtischen Fuhrparks. ^{lxxviii}

Das Aachener Fernwärmesystem

Die STAWAG konnte 2020 insgesamt 278 GWh Wärme absetzen, wovon 222,7 GWh auf das Fernwärmenetz in der Aachener Innenstadt entfielen. Weitere 49,2 GWh wurden über Inselnetze und Contractingverträge verkauft. Die Wärmemenge für verbundene Unternehmen und den Eigenverbrauch betrug 6,1 GWh. Insgesamt versorgte die STAWAG im Jahr 2020 2.120 Kunden mit Wärme. ^{lxxxix}

In Abbildung 21 ist der Wärmebedarf im Stadtgebiet dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die in rot eingefärbten Bereiche mit dem höchsten Wärmebedarf: Das dicht bebaute und bewohnte Zentrum der Aachener Innenstadt sowie im Aachener Westen die Uniklinik der RWTH Aachen. Auch in den Übergangsbereichen des Zentrums zu den umliegenden Stadtteilen werden aufgrund der auch hier relativ hohen Siedlungsdichte in hellrot dargestellte hohe Wärmebedarfe sichtbar. In diesen Bereichen ist die Nutzung von Fernwärme wirtschaftlich attraktiv. Bereiche mit mittlerem bis geringem Wärmebedarf sind grün bzw. blau dargestellt.

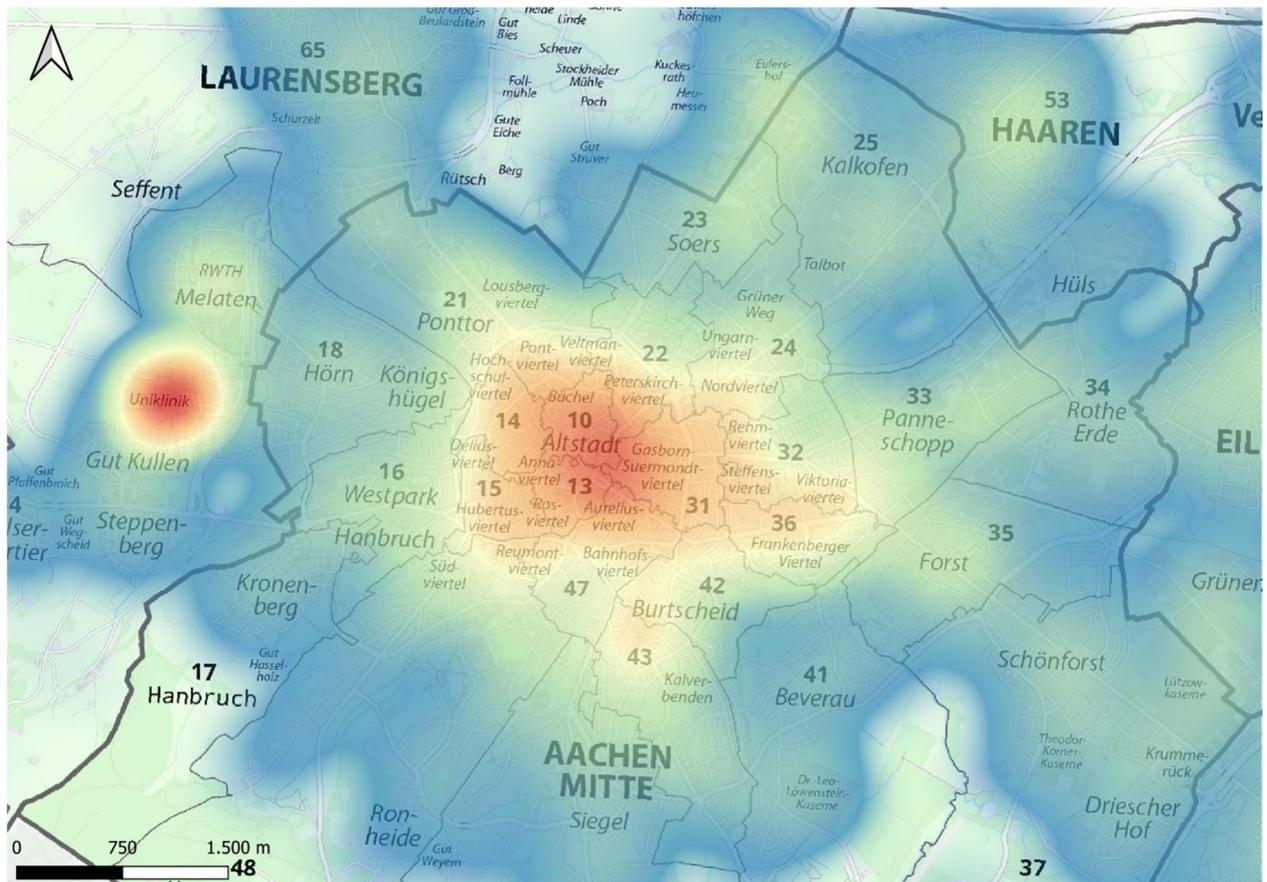


Abbildung 21: Wärmebedarf in der Stadt Aachen ^{lxxxii}

Ein Großteil der über das Aachener Fernwärmenetz bereitgestellten Wärme kommt heute noch aus dem außerhalb Aachens gelegenen Braunkohlekraftwerk Weisweiler, welches jedoch Ende 2029 vollständig vom Netz genommen werden wird. ^{lxxxiii} Bereits heute arbeitet die STAWAG am Ausbau alternativer Lösungen für die Wärmeversorgung wie Blockheizkraftwerke, welche zunehmend eine wichtige Rolle spielen. Durch den Betrieb mit Biomethan oder perspektivisch grünem Wasserstoff können diese klimaneutral betrieben werden. ^{lxxxiv} Aktuell beträgt die Wärmeleistung aus Heizkraftwerken und BHKWs im Aachener Stadtgebiet inklusive des noch im Bau befindlichen BHKWs Schwarzer Weg ca. 157 MW_{th}.

Zukünftig sollen auch bei der Wärmeversorgung verstärkt erneuerbare Energien zum Einsatz kommen. Die STAWAG setzt hierbei neben der Nutzung klimaneutraler Gase auch auf Geo- und Solarthermie, wie bspw. im geplanten Projekt „Solare Nahwärme in (Aachen-)Walheim“. ^{lxxxv} Für den zukünftigen Zubau klimaneutraler Wärmeerzeugung in Aachen wird auch die im „Osterpaket“ der Bundesregierung vorgenommene Anpassung des KWKGs zu beachten sein, welche an neu installierte Biomethan- und KWK-Anlagen mit einer installierten Leistung von über 10 MW die technische Anforderung stellt, ab 2028 auch mit 100 % Wasserstoff betrieben werden zu können. ^{lxxxv}

Wie sich Abbildung 22 entnehmen lässt, deckt das Fernwärmenetz der STAWAG einen Großteil der Bereiche mit besonders hohem Wärmebedarf ab. ^{lxxxvi} Neben dem Fernwärmenetz existieren auch einige Nahwärmeinseln, wie bspw. im Stadtteil Laurensberg oder am Campus Melaten Nord.

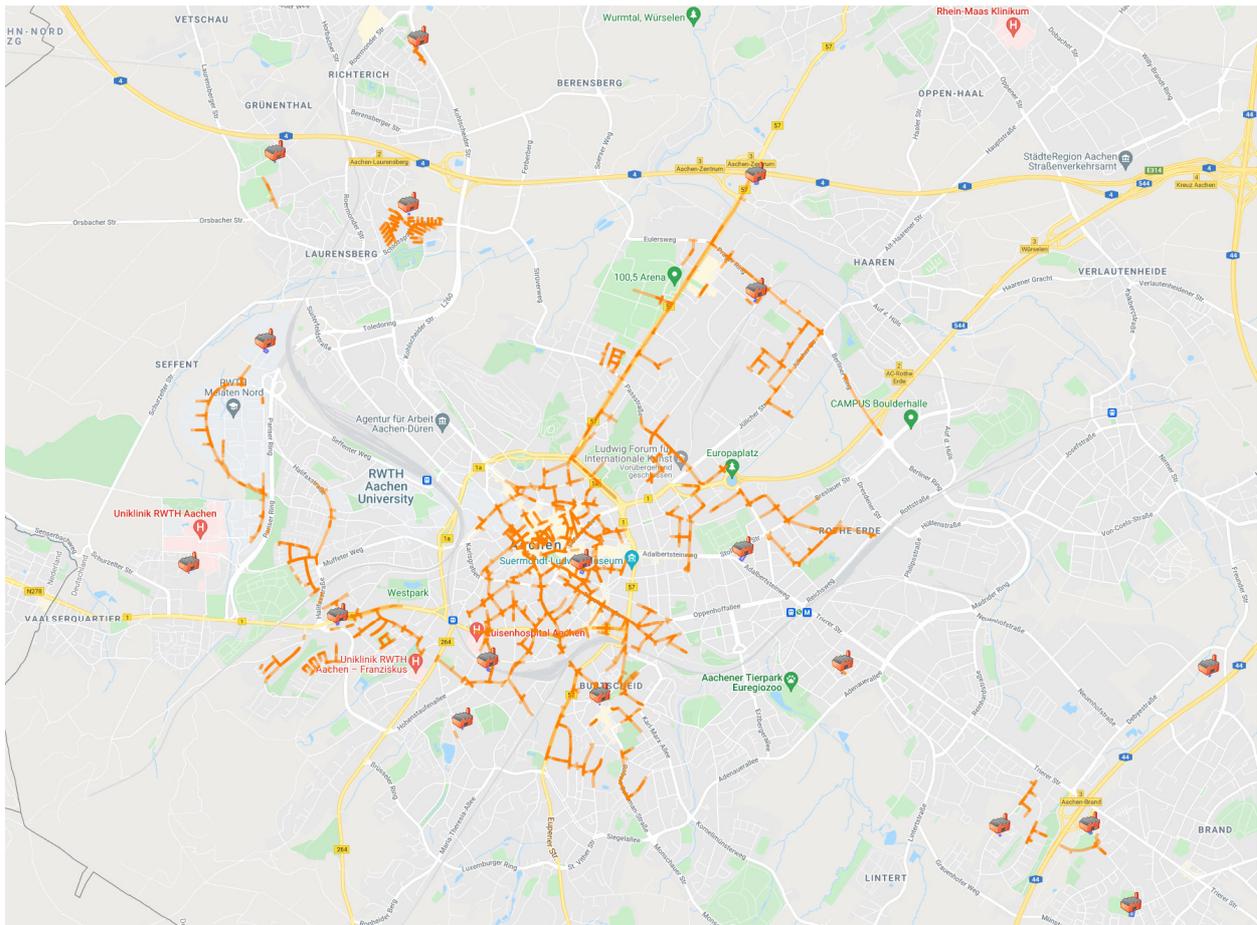


Abbildung 22: Fern- und Nahwärmeinfrastruktur in der Stadt Aachen ^{lxxxvi}

Die Gebäudestruktur in der Stadt Aachen

Verschiedene Gebäudetypen sind unterschiedlich gut für alternative Wärmetechnologien geeignet. Während bspw. Neubauten dank moderner Isolierung eine hohe Energieeffizienz haben und somit gut für den Einsatz von umweltfreundlichen Wärmepumpen geeignet sind, ist deren Einsatz in Altbauten häufig technisch schwierig und wirtschaftlich vergleichsweise teuer. Wie oben ausgeführt, sind dicht bebaute und von Mehrfamilienhäusern geprägte Siedlungsstrukturen besonders für leitungsgebundene Wärmeversorgung geeignet (Fernwärme oder Gas) – auch und insbesondere, wenn es sich dabei zu einem großen Teil um Altbauten handelt. Da Wasserstoff perspektivisch sowohl in der Fernwärme, im Gasverteilnetz als auch in dezentralen Lösungen wie Brennstoffzellenheizungen eine wichtige Rolle spielen könnte, ist die aktuelle Gebäudestruktur in Aachen ein wichtiger Anhaltspunkt für das künftige H₂-Potenzial.

Der Gebäudebestand in Aachen wird durch Wohngebäude dominiert. Deren Bestand betrug in Aachen im Jahr 2017 (neueste Zensusdaten) 39.596. Der Bestand der Nichtwohngebäude lag bei 787. 2017 wurden in Aachen insgesamt 107 Wohngebäude und 18 Nichtwohngebäude neu errichtet. Zusammen mit Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden konnten 1.165 neue Wohnungen fertiggestellt werden. Die Zahl der Wohnungen wuchs von 137.912 im Vorjahr auf 138.918 im Jahr 2017. Der Anteil der 2017 neu gebauten oder durch Umbaumaßnahmen hinzugekommenen Wohnungen am Gesamtbestand betrug folglich 0,8 %. ^{lxxxvii}

Im Jahr 2011 (neuste verfügbare Daten) betrug der Anteil der vor 1990 errichteten Gebäude im Bestand noch mehr als 85 %. Mehr als ein Viertel der Gebäude in Aachen wurden vor 1950 erbaut (vgl. Abbildung 23).

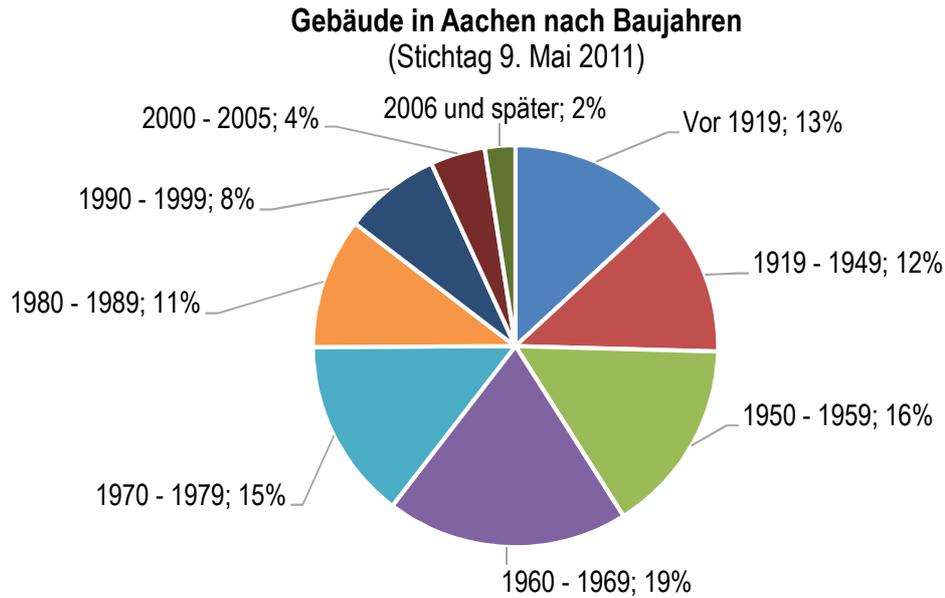


Abbildung 23: Verteilung des Gebäudebestands in Aachen nach Baujahren ^{lxxxvii}

In Abbildung 24 ist die Beheizungsstruktur der Wohnungen in Aachen nach Baujahren dargestellt. Es wird ersichtlich, dass Zentralheizungen dominieren, die i. d. R. mit Heizöl oder Erdgas betrieben werden, und auch bei den jüngeren Wohngebäuden, die 1990 oder später errichtet wurden, die am weitesten verbreitete Heiztechnologie darstellen, während etwa Öfen und Nachtspeicherheizungen bei neueren Gebäuden kaum noch eine Rolle spielen. Etagenheizungen sind in allen Altersklassen die zweithäufigste Heiztechnologie. Analog zum Gesamtbestand ist auch die Anzahl der Fernwärmeanschlüsse in vor 1990 erbauten Wohnungen am höchsten. ^{lxxxvii}

Anzahl Wohnungen nach Heiztechnologie und Baujahr (Stichtag: 9. Mai 2011)

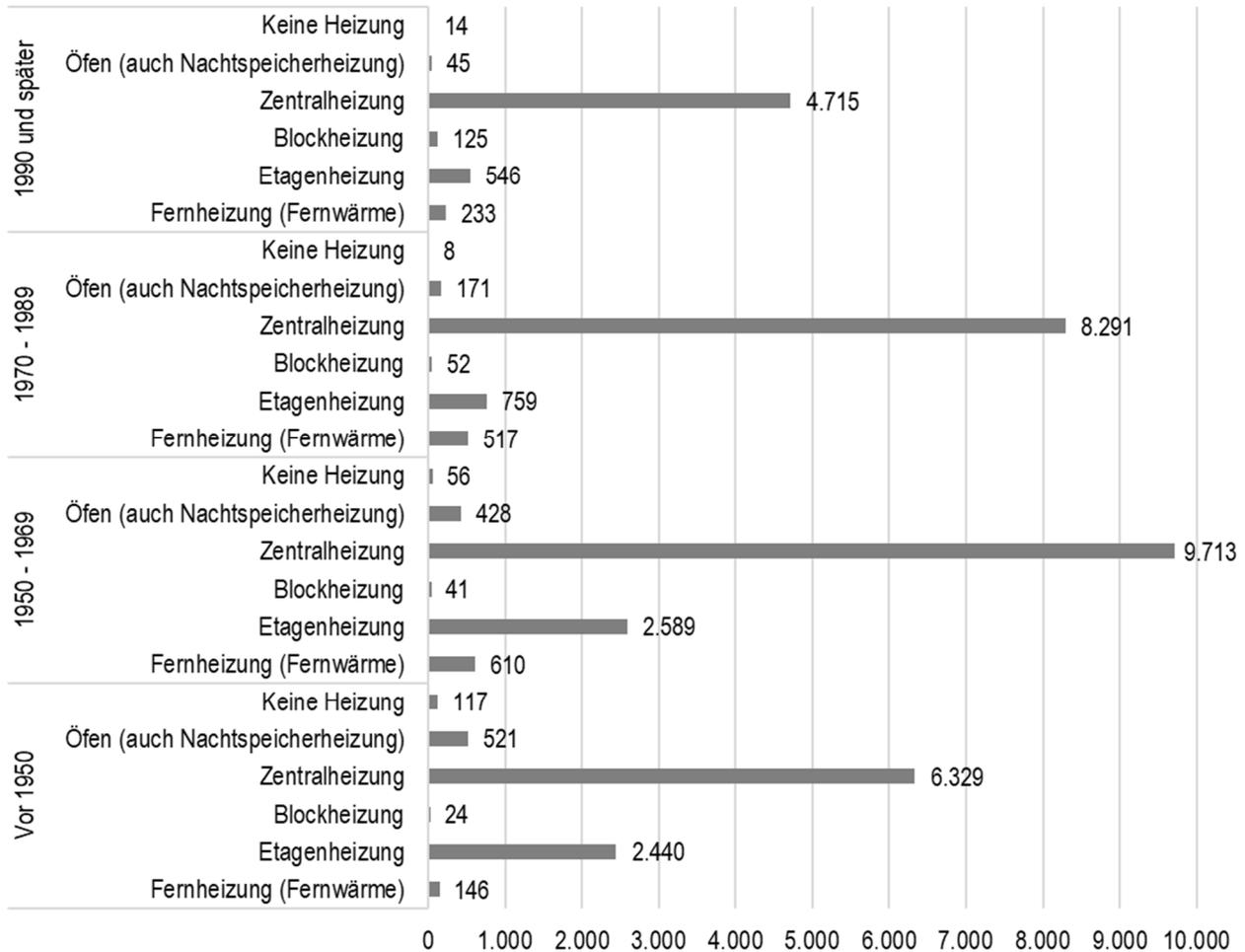


Abbildung 24: Anzahl Wohnungen nach Heiztechnologie und Baujahr ^{lxxxvii}

Um die Umstellung auf nachhaltige Wärme- und Energieversorgung insbesondere bei älteren Wohngebäuden zu unterstützen, hat der Rat der Stadt Aachen 2021 ein Förderprogramm für Energieeinsparmaßnahmen in Bestandsgebäuden beschlossen. Voraussetzungen für den Erhalt des Zuschusses sind unter anderem der Einsatz nachhaltiger Baumaterialien und regenerativer Energien. ^{lxxxviii}

4.5. Akteure im Themenfeld Wasserstoff

In Aachen gibt es einige Akteure, die sich bereits heute mit dem Thema Wasserstoff beschäftigen oder für die der Einsatz des Gases in den nächsten Jahren interessant werden könnte. Die Akteure lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

- Unternehmen, die Wasserstoff im Rahmen der wirtschaftlichen Tätigkeiten einsetzen (werden),
- Unternehmen, die Anlagen oder Komponenten für die Wasserstoffwirtschaft herstellen,
- Netzwerke und Verbände, die den Einsatz von Wasserstoff fördern, und
- Forschungsinstitute, die neues Wissen zur Thematik Wasserstoff schaffen.

Unternehmen

Unternehmen, die Wasserstoff im Rahmen ihrer wirtschaftlichen Aktivität nutzen, sind entlang der gesamten Wasserstoffwertschöpfungskette angesiedelt. Hierzu gehören Erzeugung und Aufbereitung, Handel und Vertrieb, Speicherung, Transport und Verteilung sowie die Anwendung. In der folgenden Grafik sind die einzelnen Unternehmen aus Aachen sowie dem Umland, bei denen entsprechende Pläne oder Aktivitäten bekannt sind, den verschiedenen Schritten der Wertschöpfungskette zugeordnet. Zusätzlich gibt es in Aachen zahlreiche energiewirtschaftliche Beratungsunternehmen, die auch im Bereich Wasserstoff entlang der ganzen Wertschöpfungskette ihre Dienstleistungen anbieten. Auch die regionale Wirtschaftsfördergesellschaft AGIT Aachener Gesellschaft für Innovation und Technologietransfer mbH unterstützt Firmen aus Aachen, der Städteregion sowie den Kreisen Düren und Euskirchen durch Innovationsberatung, Wissensnetzwerke und andere Tätigkeiten aktiv im Bereich Wasserstoff.

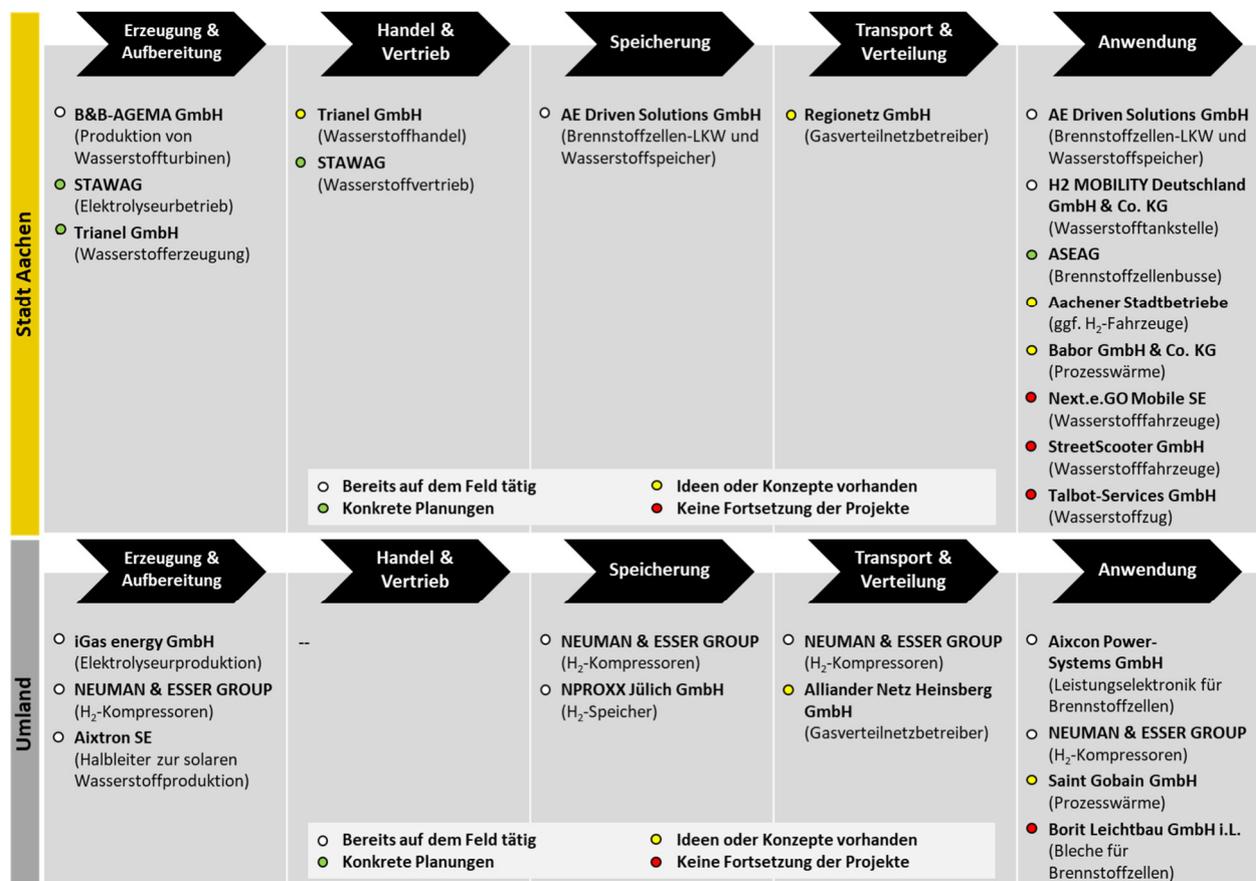


Abbildung 25: Akteure im Bereich Wasserstoff in Aachen und im Umland

Erzeugung & Aufbereitung

Die STAWAG, als lokaler Versorger, ist momentan eine treibende Kraft hinter dem Ausbau der Wasserstofferzeugung in der Stadt Aachen. Als Leuchtturmprojekt kann hier der Bau eines Elektrolyseurs mit 2 MW Erzeugungsleistung am Windpark Aachen Nord gelten. Dieser soll ab Ende 2023 200 t Wasserstoff pro Jahr erzeugen, welcher in modernen Brennstoffzellenbussen der ASEAG zum Einsatz kommen wird. Auch ein Einsatz in Fahrzeugen der Aachener Stadtbetriebe ist geplant.

Des Weiteren gibt es einige Unternehmen, die neue Möglichkeiten der Wasserstofferzeugung entwickeln. Das Unternehmen Aixtron SE ist etwa an einem Forschungsprojekt beteiligt, welches die Wasserstoffsynthese direkt in den solaren Energiegewinnungsprozess mit Hilfe von monolithischen, auf Silizium gewachsenen III-V-Dreifachzellen verlagert und so den Wirkungsgrad erheblich verbessern könnte.^{lxxxxix} Die Firma iGas energy aus Stolberg ist ein Anlagenhersteller, welcher PEM-Elektrolyseure produziert.

Die Firma Neumann & Esser aus Übach-Palenberg nördlich von Aachen ist ein weltweit aktiver Hersteller von Kompressoren, die sowohl bei der Erzeugung als auch bei der Speicherung, dem Transport und der Verteilung von Wasserstoff zum Einsatz kommen.

Transport & Verteilung

Eine zentrale Rolle bei der Verteilung von Wasserstoff wird zukünftig voraussichtlich der lokale Verteilnetzbetreiber Regionetz spielen. Dieser muss mittel- und langfristig das Gasverteilnetz auf die Nutzung von Wasserstoff umrüsten (vorausgesetzt, es kommt zukünftig Wasserstoff und nicht synthetisches Methan zum Einsatz). Außerdem sind die vorgelagerten Fernleitungsbetreiber Thyssengas und Gascade relevant, die an verschiedenen Übergabepunkten in das Netz der Regionetz einspeisen. Diese planen zwar den Aufbau von Wasserstoffnetzen, allerdings noch nicht in der Region Aachen.

Speicherung

In der Region gibt es einige mittelständische Unternehmen, die Wasserstoffspeichersysteme konzipieren oder in der Hochdruckspeicherung von Wasserstoff tätig sind. Das Unternehmen AE Driven Solutions aus Aachen bietet Wasserstoffspeichersysteme an. Der in Jülich ansässige Hersteller produziert ebenfalls Hochdruck-Wasserstoffspeicher für stationäre und mobile Anwendungen.

Handel & Vertrieb

Zentrale Akteure im Vertrieb von Wasserstoff werden zukünftig wahrscheinlich die regionalen Versorger sein. In Aachen ist das insbesondere die STAWAG. Für die Versorgungsunternehmen könnte das Wasserstoffgeschäft den rückläufigen Erdgasvertrieb zumindest teilweise kompensieren.

Ein Unternehmen mit ausgeprägter Expertise im Handel von Energiemarktprodukten ist die Stadtwerkekooperation Trianel mit Sitz in Aachen. Durch erste Wasserstoffprojekte, u. a. mit den Stadtwerken Hamm, sammelt das Unternehmen bereits Erfahrungen in der Erzeugung von Wasserstoff und könnte zukünftig auch im Handelsbereich aktiv werden, sobald sich ein entsprechender Markt entwickelt. Die STAWAG ist als Gesellschafter an der Trianel beteiligt und kann so von deren Marktposition und Know-how profitieren.

Anwendung

Eine Vielzahl von Unternehmen im Aachener Raum wird wohl zukünftig Wasserstoff verbrauchen. Ein großes Industrieunternehmen mit Plänen, den Energiebezug für die Produktion zu einem signifikanten Teil auf Wasserstoff umzustellen, ist Saint-Gobain. Das Werk in Herzogenrath soll bis 2030 CO₂-neutral werden und dafür für den Eigenbedarf grünen Wasserstoff produzieren. Auch andere große Unternehmen der Region planen den Einsatz von Wasserstoff zur Erreichung ihrer Klimaziele. So plant das Kosmetikunternehmen Babor, seine Produktion und den Vertrieb energietechnisch nachhaltiger zu gestalten und setzt hierbei auch auf die Zukunftstechnologie Wasserstoff.^{xc}

Netzwerke



Hydrogen Hub Aachen

Ein bedeutender Zusammenschluss von über 300 wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Akteuren im Bereich Wasserstoff ist der Hydrogen Hub Aachen. Initiiert wurde das Projekt durch die Stadt Aachen, die Städteregion sowie die Landkreise Düren, Euskirchen und Heinsberg. Als Koordinatorin fungiert die IHK Aachen. Ziel des Zusammenschlusses ist es, die Region zur Wasserstoff-Modellregion zu transformieren und so Wertschöpfung vor Ort zu generieren, neue Arbeitsplätze zu schaffen und zu einem nachhaltigen Hotspot der deutschen Wasserstoffwirtschaft zu werden. Als Instrument der Umsetzung dieser Ziele dienen die Entwicklung passgenauer Förderprogramme und die Definition der Regularien. Der Hydrogen Hub selbst wird mit 400.000 Euro vom BMVI gefördert.



Zukunftcluster H₂ (Hydrogen Clusters4Future)

Das Zukunftcluster H₂ ist ein Forschungszusammenschluss der RWTH Aachen und des Forschungszentrums Jülich zur Bündelung der Forschungsaktivitäten im Bereich Wasserstoff. Ziele der Kooperation sind es, die Akteure des Wasserstoffs in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft zusammenzubringen, Wasserstoffanwendungen von Forschungsprojekten in Alltagsanwendungen zu überführen sowie der Einsatz von Wasserstoff zur Energiespeicherung und als alternativer Treibstoff. Die primären Tätigkeiten lassen sich in die Bereiche Erzeugung, Übertragung und Speicherung unterteilen. Gefördert wird das Cluster durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Die unten im Abschnitt „Wissenschaft und Forschung“ genannten HyInno-Cluster sind Teil dieser Forschungsoffensive.



EMR H₂ Booster

Der Euregio Maas-Rhein H₂-Booster ist ein Konsortium euroregionaler Partner mit der Zielsetzung, die innovative Entwicklung im Bereich grüner Wasserstoff in der Euregio Maas-Rhein voranzutreiben und damit Schritte in Richtung einer groß angelegten Einführung einer sauberen Wasserstoffwirtschaft zu machen. Beteiligt sind die Regionen niederländisch Limburg, belgisch Limburg, Lüttich sowie Aachen. Das Konsortium setzt sich aus regionalen Wirtschaftsförderungen, Wasserstoff-Cluster-Organisationen und Forschungseinrichtungen zusammen und kombiniert so umfangreiche Erfahrungen im Wasserstoffsektor mit dem Wissen des lokalen Mittelstands. Gefördert wird das Projekt von der europäischen Union mit 500.000 Euro sowie durch lokale Gebietskörperschaften, sodass sich ein Gesamtbudget von 1,8 Mio. Euro ergibt.

4.6. Geplante und laufende Wasserstoffprojekte

Grüner Wasserstoff für Aachen

Der kommunale Energieversorger STAWAG plant den Bau eines Elektrolyseurs am Standort Schwarzer Weg. Der Elektrolyseur soll mit einer Leistung von zunächst 2 MW ca. 180 Tonnen Wasserstoff pro Jahr produzieren, wobei der notwendige Grünstrom über einen Stromliefervertrag mit einem Windpark aus der Region beschafft wird. Der

grüne Wasserstoff soll in Brennstoffzellenbussen der ASEAG eingesetzt werden. Geprüft wird in Zusammenarbeit mit dem Verteilnetzbetreiber Regionetz der Bau einer ca. 2 Kilometer langen Wasserstoffleitung vom Schwarzen Weg zum Gelände der ASEAG. Das Projekt wird mit 3,5 Mio. Euro durch das BMDV gefördert. Perspektivisch ist eine Erweiterung des Elektrolyseurs auf 5 MW Leistung möglich, um weitere Abnehmer mit grünem Wasserstoff zu versorgen. Auch das am Schwarzen Weg im Bau befindliche BHKW könnte zukünftig Wasserstoff des Elektrolyseurs nutzen, um die Aachener Fernwärmeversorgung zu besichern.

CO₂-neutrale Glasproduktion in Herzogenrath

Das Glaswerk von Saint-Gobain in Herzogenrath soll langfristig grünen Wasserstoff zur Erzeugung von Prozesswärme nutzen. Der Wasserstoff würde somit das heute genutzte Erdgas verdrängen. Dadurch soll bis 2030 die CO₂-Neutralität erreicht werden. Durch das Projekt Cosima wird der Aufbau mit 1,9 Millionen Euro durch das Land Nordrhein-Westfalen gefördert. Aus anderen Töpfen werden weitere 1,7 Millionen Euro Förderung zur Verfügung gestellt. Der Gesamtprojektumfang wird auf 5,6 Millionen Euro geschätzt.

Nutzung von Brennstoffzellenantrieben im ÖPNV im Kreis Düren

Der Kreis Düren plant, zusammen mit den Unternehmen RurtalBahn GmbH und Rurtalbus GmbH im öffentlichen Personennahverkehr Brennstoffzellenfahrzeuge einzusetzen. Der Austausch erster Busse ist bereits angestoßen. Die Beschaffung von H₂-betriebenen Schienenfahrzeugen wird noch etwas Zeit in Anspruch nehmen, da es bisher kaum Anbieter gibt. Im Mittelpunkt des Projektes stehen die Erzeugung von grünem Wasserstoff, der Aufbau einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur, die Anschaffung von vier Wasserstoffzügen und der Betrieb dieser. Unter anderem sollen mit Solarstrom auf der Merscher Höhe in Jülich jährlich bis zu 170 t Wasserstoff produziert werden.^{xci}

Grüne Talachse Stolberg

Die grüne Talachse Stolberg ist eine Kooperation verschiedener Stolberger Industrieunternehmen mit dem Ziel, die energieintensive Industrie der Region nachhaltig zu transformieren. Durch die Flutschäden im Sommer 2021 besteht ein großer Investitionsbedarf. Die Pläne für den nachhaltigen Wiederaufbau bzw. Umbau sollen im Sommer 2022 durch eine Roadmap konkretisiert werden. Wichtiges Element soll hierbei grüner Wasserstoff sein, für dessen Einsatz eine gemeinsame Infrastruktur geplant ist. Das Projekt begann im September 2021.

H2HS – Wasserstoff-Versorgungssystem am Standort Industriepark Heinsberg-Oberbruch

Der Kreis Heinsberg arbeitet zusammen mit der zu Neumann & Esser gehörenden Unternehmensmarke NEA GREEN, dem Gasnetzbetreiber Alliander Netz Heinsberg und weiteren Unternehmen an der Entwicklung und Umsetzung eines vollumfänglichen Wasserstoffsystems. Hierfür soll Strom aus regenerativen Quellen vor Ort in einem Elektrolyseur in grünen Wasserstoff umgewandelt werden. Ziel ist die Demonstration der zukünftigen Wasserstoffwirtschaft, inkl. Erzeugung, Speicherung, Verteilung und Verbrauch, im industriellen Maßstab.

Green Octopus

Green Octopus ist ein niederländisch-belgisches Projekt im Rahmen der Kooperation WaterstofNet. Ziel des Projekts ist es, bis 2030 eine grenzüberschreitende Wasserstoffpipelineinfrastruktur in Belgien und den Niederlanden

aufzubauen. Hierbei soll Strom aus den großen Windparks der Nordsee in Wasserstoff umgewandelt werden und über verschiedene Pipelines in die industriellen Zentren transportiert werden. Langfristig sollen auch Deutschland, Frankreich und Dänemark an das Netz angeschlossen werden. Für Aachen bestünde somit die Gelegenheit, einen Anschluss an ein Wasserstofffernleitungsnetz zu erhalten und somit die eigene H₂-Versorgung zu sichern. Hierbei könnte eine geplante Wasserstoffleitung vom Chemiepark Chemelot in der Nähe von Maastricht nach Aachen verlängert werden. Zudem soll eine Leitung aus dem Ballungsgebiet Maastricht-Lüttich in Richtung der deutschen Grenze verlängert werden. Auch hier könnte zukünftig ein Netzzugang für die Stadt Aachen entstehen. ^{xcii}



Abbildung 26: Skizze möglicher Leitungsverläufe im Rahmen des Projekts "Green Octopus" ^{xcii}

Wissenschaft und Forschung

Die Forschungsprojekte der RWTH Aachen und des Forschungszentrums Jülich sind in einzelne Untercluster unterteilt, die im Rahmen des Zukunftskusters H₂ gebündelt sind. Jedes Untercluster kann einem Forschungsschwerpunkt zugeordnet werden. Innerhalb der Projekte arbeiten die Forschungseinrichtungen der RWTH und des Forschungszentrums Jülich eng mit Partnern der freien Wirtschaft und der Industrie zusammen. ^{xciii}

HynnoNets

In diesem Cluster wird die Befähigung von Fernleitungsnetzen zum H₂-Betrieb erforscht. Der Schwerpunkt liegt in der Erforschung neuer Materialien, wie z. B. Faser-Kunststoff-Verbünden, und den Oberflächeneigenschaften der Rohrleitungen. Beteiligte Institute sind der Lehrstuhl für Digital Additive Production und das Institut für Textiltechnik. Des Weiteren sind die Industriepartner F.A. Kumpers GmbH & Co. KG, HD Sonderoptiken für die Lasertechnik und die PPS Pipeline Systems GmbH beteiligt.

HylInnoSep

Schwerpunkt dieses Clusters ist die Erforschung elektrochemischer Membranreaktoren zur Bereitstellung von Wasserstoff aus dem Erdgasnetz. Die Lehrstühle für Chemische Verfahrenstechnik, für Elektrochemische Reaktionstechnik, für Systemverfahrenstechnik, für Thermodynamik und das Institut für Makromolekulare Chemie sind auf Seiten der RWTH beteiligt sowie die FUMATECH BWT GmbH, die Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG und die TLK Energy GmbH als externe Partner.

HylInnoLyze

Die Erforschung und Weiterentwicklung von Elektrolyseverfahren der nächsten Generation ist der Fokus dieses Projekts. Dazu wird an der Modellierung, an dynamischen Einflüssen sowie an der Korrosion und Stabilität der Anlagen und Materialien geforscht. Seitens des FZ Jülich wird das Cluster durch die Institute für Elektrochemische Verfahrenstechnik, für Grundlagen der Elektrochemie und für Techno-ökonomische Systemanalyse vertreten. Die RWTH Aachen ist mit dem Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe beteiligt. Außerdem ist die Siemens AG Projektpartner.

HylInnoICE

Die Entwicklung eines Fahrzeugs mit hochinnovativem Wasserstoffverbrennungsmotor ist die Vision und das Ziel dieses Zusammenschlusses. Grundlagenforschung an Verbrennungsmotoren, funktionale Entwicklung und Kalibrierung sowie die Integration in das Fahrzeug sind wichtige Bausteine hierfür. Beteiligt sind der Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme, das Institut für Regelungstechnik und das Institut für Technische Verbrennung der RWTH sowie die FEV Europe GmbH, das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie und die Ford-Werke GmbH.

HylInnoCells

Das Forschungsziel des HylInnoICE-Clusters ist die flexible Produktion elektrochemischer Zellen. Hierzu wird ein Bautyp mit aufeinandergelegten Schichten aus Metallgittern entwickelt. Außerdem soll die Möglichkeit, günstigere Metalle zu verwenden, um Produktionskosten zu sparen, erforscht werden. Im Anschluss sollen die Prototypen getestet und Verfahren zur Serienproduktion entwickelt werden. Die Institute für Werkstoffsynthese und Herstellungsverfahren und für Elektrochemische Verfahrenstechnik des FZ Jülich sind zusammen mit dem Lehrstuhl für Digital Additive Production und dem Lehrstuhl für Production Engineering of E-Mobility Components der RWTH Aachen beteiligt. Unterstützt werden diese durch die Industriepartner Bender GmbH Maschinenbau- und Steckmetallfabrik, GKN Sinter Metals Filters GmbH Radevormwald, MeliCon GmbH, Precors GmbH und Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie.

HylInnoSOFC

Dieses Forschungsprojekt beschäftigt sich mit Hochtemperatur-Brennstoffzellen mit flexibler Brennstoffnutzung zur autarken Energieversorgung. Es soll analysiert werden, in welchem Rahmen diese Brennstoffzellen eingesetzt werden können, welche Betriebskonzepte wirtschaftlich sind und wie die Hochtemperatur-Brennstoffzelle die klassische Gasverbrennung ersetzen oder ergänzen kann. Das Institut für Elektrochemische Verfahrenstechnik des FZ Jülich, das Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (RWTH) und der Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (RWTH) sind die beteiligten Institute.

HylInnoBurn

Forschungsziel dieses Clusters ist die Industriegasbrennerentwicklung für Erdgas-Wasserstoff-Gemische. Basierend auf experimentellen und simulativen Ergebnissen werden optimierte, skalierbare und brennstoffflexible Industriegasbrenner entwickelt. Der zur RWTH gehörende Lehrstuhl für Digital Additive Production sowie die Institute für Kraftwerkstechnik, Dampf und Gasturbinen, für Technische Verbrennung und für Regelungstechnik sind zusammen mit der Kueppers Solutions GmbH und der SMS Group GmbH für dieses Projekt verantwortlich.

HylInnoSys

Das Cluster beschäftigt sich mit innovationsbegleitenden Maßnahmen zur Marktvorbereitung sowie dem Technologie- und Wissenstransfer in der Wasserstoffwirtschaft. So sollen neue Geschäftsmodelle und Innovationsökosysteme erschaffen und Regularien für zukünftige Wasserstoffmärkte abgeleitet werden. Das Institut für Techno-ökonomische Systemanalyse des FZ Jülich unterstützt dabei das Institut für Technologie- und Innovationsmanagement, die Lehrstühle für Technik und Gesellschaft, für Energiesystemökonomik und für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme der RWTH Aachen.

HylInnoPEM

Tätigkeitsschwerpunkt dieses Clusters ist die Erforschung mobiler Antriebe mit zukunftsweisenden Brennstoffzellensystemen. Dazu soll mit verschiedenen Analysetools das Brennstoffzellendesign langlebiger gemacht und die verschiedenen Vorhersagemethoden zum Verhalten im Laufe des Lebenszyklus der Brennstoffzelle verbessert werden. In diesem Projekt arbeiten der Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme, das Institut für Regelungstechnik, der Lehrstuhl für Production Engineering of E-Mobility Components und das Institut für Strahlantriebe und Turbomaschinen zusammen mit den Industriepartnern EKPO Fuel Cells Technologies GmbH, FEV Europe GmbH und Pierburg GmbH.

HylInnoTank

Dieses Cluster beschäftigt sich mit der Speicherung Wasserstoffs und der Entwicklung neuer wartungsarmer mobiler Hochdruckspeicher. Forschungsschwerpunkt ist hierbei die sensorgestützte Überwachung und die Analyse auftretender Schadensereignisse. Das Institut für Textiltechnik und das Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH forschen in diesem Themenfeld zusammen mit der F.A. Kumpers GmbH & Co. KG, der ISATEC GmbH und der NPROXX Jülich GmbH.

HylInnoChem

In diesem Cluster werden Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoffperoxiden und Methanol aus grünem Wasserstoff entwickelt. Als Beispiel ist hier die Forschung an Katalysatoren zur Synthese und neuen Membranen und Elektroden zu nennen. Das FZ Jülich beteiligt sich hier mit dem Institut für Elektrochemische Verfahrenstechnik und die RWTH Aachen mit den Lehrstühlen für Chemische Verfahrenstechnik und für Systemverfahrenstechnik. Außerdem unterstützen die Carbon Minds GmbH, die Covestro Deutschland AG, die FUMATECH BWT GmbH, die New Power Pack GmbH und die TLK Energy GmbH als externe Partner.

4.7. Erzeugung und Verbrauch von Wasserstoff in Aachen

Der gegenwärtige Bedarf von Wasserstoff in Aachen fällt in unterschiedlichen Sektoren an. Heute sind vor allem die Aachener Wasserstofftankstelle, welche dem Verkehrssektor zuzuordnen ist, und verschiedene Institute der RWTH Aachen University (Sektor Forschung und Entwicklung) Wasserstoffhauptverbraucher in Aachen. Perspektivisch könnte insbesondere die Lebensmittelindustrie als weiterer zentraler Verbraucher sowie der Energiesektor sowohl auf der Erzeugungs- als auch der Verbrauchsseite hinzukommen. In diesem Kapitel wird der aktuelle Verbrauch – soweit ermittelbar – näher betrachtet. Eine lokale Wasserstoffherzeugung gibt es in Aachen noch nicht. Der aktuelle Bedarf wird daher durch Wasserstofflieferungen mit Tankfahrzeugen von außerhalb des Stadtgebiets gedeckt.

Wasserstoffeinsatz heute vor allem in der Forschung

Seit 2019 ist in Aachen eine von deutschlandweit knapp 100 (Stand: November 2022) Wasserstofftankstellen in Betrieb. Nach Angaben des Betreibers H2 MOBILITY wurden hier im Jahr 2021 insgesamt 850 Betankungsvorgänge durchgeführt und 4.500 kg H₂ „vertankt“ (ca. 0,15 GWh). Bei einem für Mittelklasse-Pkw üblichen Tankvolumen von 5 kg entspricht dies der für die vollständige Betankung von 900 Fahrzeugen benötigte Menge an Wasserstoff oder einer Reichweite von 450.000 km (bei einem Verbrauch von 1 kg H₂/100 km).

Über das Jahr 2021 konnte ein starker Nachfrageanstieg verzeichnet werden: Von 130 kg H₂ im Januar auf 400 kg H₂ im Monat Dezember. Die sich daraus ergebende durchschnittliche Nachfrage von 375 kg/Monat war damit laut H2 MOBILITY mehr als doppelt so hoch wie im deutschlandweiten Durchschnitt von 181 kg/Monat.^{xciv}

Zu den Kund*innen der Aachener Wasserstofftankstelle gehört auch der Aachener Stadtbetrieb. Seit Sommer 2021 befinden sich zwei Abfallsammelfahrzeuge mit Wasserstoffantrieb im Einsatz der Stadt, welche die Wasserstofftankstelle nutzen. Perspektivisch könnte auch eine eigene Wasserstofftankstelle auf dem städtischen Betriebshof errichtet werden.^{xcv}

Im Sektor Forschung und Entwicklung konnten mehrere Institute der RWTH Aachen University als zentrale Wasserstoffnachfrager identifiziert werden: Am Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) mit dem angeschlossenen Center for Mobile Propulsion (CMP) werden auf verschiedenen Prüfständen im Durchschnitt ca. 36.000 kg Wasserstoff jährlich verbraucht. Dieser Wert unterliegt aufgrund der Nutzung in Forschungsprojekten jedoch Schwankungen. Insgesamt wird am TME aber von einem steigenden Bedarf ausgegangen.^{xcvi}

Das Institut für Kraftwerkstechnik, Dampf- und Gasturbinen (IKDG) führt Forschungsversuche zur Verbrennung von Wasserstoffgemischen oder reinem Wasserstoff in Gasturbinen durch. Für das laufende Jahr 2022 wird mit einem Gesamtverbrauch von ca. 2.250 bis 3.600 kg Wasserstoff gerechnet. Auch dieser Wert unterliegt einer großen jährlichen Schwankung, da er von einer Vielzahl von Faktoren abhängig ist.^{xcvii}

An den Lehrstühlen der Aachener Verfahrenstechnik (AVT) wurden in den letzten Jahren im Schnitt ca. 18.000 l Wasserstoff im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten verbraucht.^{xcviii} Bei Speicherung in flüssiger Form unterhalb des Siedepunktes (ca. -253 °C) entspricht dies ungefähr 1.280 kg Wasserstoff.

Umgerechnet in Terrawattstunden ergibt sich ein jährlicher Gesamtbedarf der RWTH-Institute von ca. 1,4 GWh Wasserstoff. Gemeinsam mit der Wasserstofftankstelle ergibt sich aktuell also ein ermittelbarer jährlicher

Gesamtbedarf von ca. 1,5 GWh. Darüber hinaus existieren einige weitere Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen, die bereits heute Wasserstoff nutzen, von denen allerdings keine genauen Verbrauchsdaten vorliegen.

Ausblick auf Erzeugung und Verbrauch von Wasserstoff in Aachen

Die Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber (FNB Gas) führte im Rahmen der Erstellung des Szenariorahmens 2022-2032 im Jahr 2021 eine erste Marktabfrage zu geplanten Projekten durch, die in den Bereich „Wasserstoff Erzeugung und Bedarf (WEB) und grüne Gase“ fallen.^{xcix} Des Weiteren erfolgte ein zweiter, bis ins Jahr 2022 verlängerter Aufruf an Infrastrukturbetreiber zur Meldung von geplanten Projekten zur Schaffung von Wasserstoffleitungen durch Neubau oder Umrüstung existierender Erdgasleitungen. Ziel des FNB Gas ist es, mit Hilfe der in den Marktabfragen zusammengetragenen Informationen eine zusätzliche Wasserstoffvariante des Netzentwicklungsplans (NEP) 2022-2032 zu entwickeln.^c

Durch die erste – bereits abgeschlossene – Marktabfrage konnten insgesamt 488 Wasserstoffprojekte erfasst werden, davon 175 aus Nordrhein-Westfalen.^{xcix} Aus der in Abbildung 27 dargestellten Karte geht hervor, dass allein für die Städteregion Aachen im Jahr 2032 aus den Projekten Wasserstoffeinspeisungen in das Fernleitungsnetz von mehr als 5 TWh geplant sind. Die für dasselbe Jahr geplanten Ausspeisungen hingegen betragen weniger als 0,5 TWh.^{xcix}

Gemeldete WEB-Wasserstoffeinspeisungen im Jahr 2032 für die Projekte der Kategorie 1

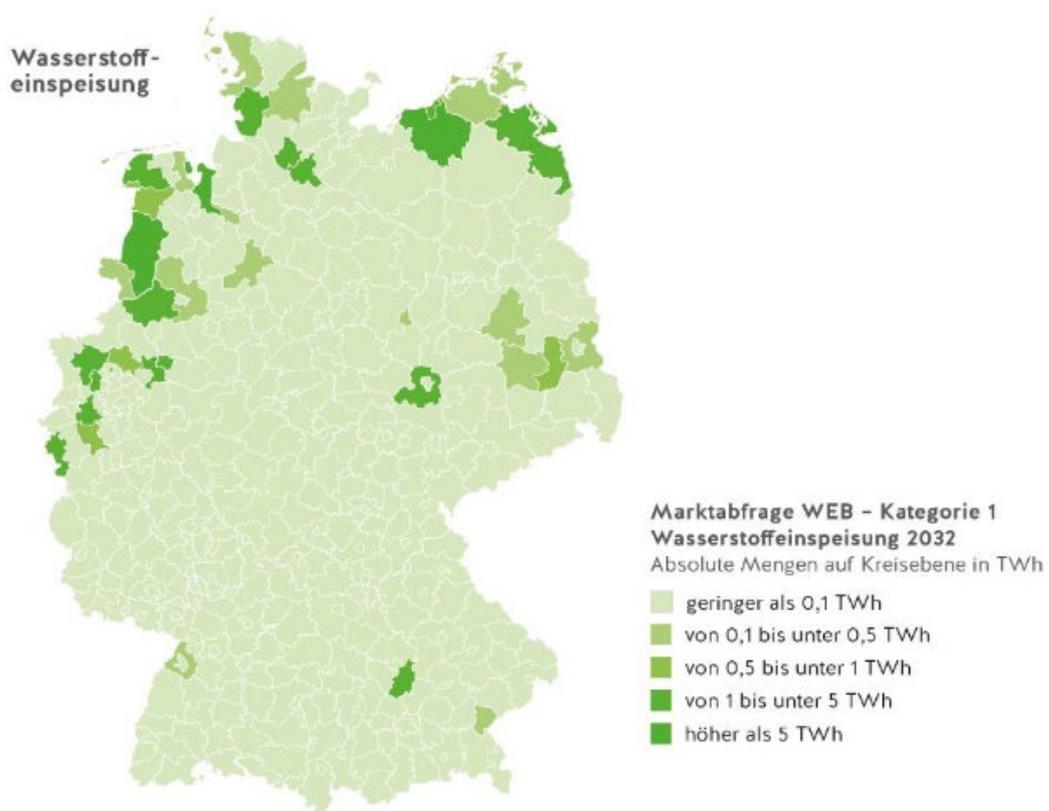


Abbildung 27: Wasserstoffeinspeisungen in das Fernleitungsnetz im Jahr 2032 ^{ci}

Insgesamt wurden dem FNB Gas fünf Einzelprojekte in der Städteregion Aachen gemeldet, wovon drei nach wie vor innerhalb der Stadt Aachen geplant sind: ^{ci}

- Wasserstoffherzeugung mit Windenergie durch die STAWAG: Die geplante Elektrolyseanlage mit 2 MW Leistung soll Ende 2023 die Wasserstoffproduktion starten. Ab 2024 wird mit einer konstanten Wasserstoffeinspeisung von 7.200 MWh gerechnet. ^{ci cii}
- Nutzung von Wasserstoffbussen durch die ASEAG: In diesem Pilotbetrieb ist die Nutzung des durch die STAWAG produzierten Wasserstoffs vorgesehen. Der Bedarf steigt kontinuierlich von initial 3,8 MWh im Jahr 2023 auf mehr als 105.000 MWh im Jahr 2025. ^{ci}
- Nutzung von Wasserstoff durch die RWTH Aachen University: Für die RWTH wird ein steigender jährlicher Wasserstoffbedarf prognostiziert von 2,8 MWh im Jahr 2023 auf mehr als 18,5 MWh im Jahr 2050. ^{ci}

Die Entwicklung der geplanten Ein- und Ausspeisungen der Projekte innerhalb der Stadt Aachen ist in Abbildung 28 dargestellt. Zu erkennen ist, dass der anhand der für den NEP gemeldeten Projekte prognostizierte Wasserstoffbedarf (Ausspeiseleistung) in Aachen kontinuierlich steigt und durchgängig über der bisher geplanten prognostizierten Wasserstoffeinspeisung aus lokaler Erzeugung liegt.

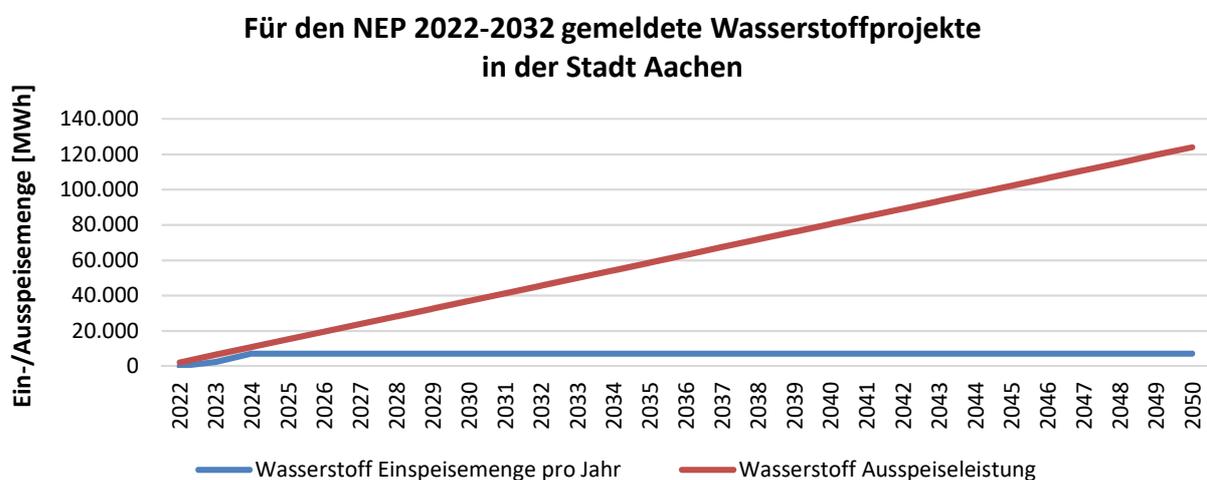


Abbildung 28: Ein- bzw. Ausspeisemengen der in der Stadt Aachen gemeldeten Wasserstoffprojekte für den NEP 2022-2032 ^{ciii}

4.8. Fazit zur Bestandsaufnahme

Die Bestandsaufnahme hat gezeigt, dass ein großer Teil des in Aachen erwirtschafteten Umsatzes auf eine relativ kleine Zahl großer Unternehmen und Einrichtungen zurückgeht. Hervorzuheben sind hier insbesondere die Bereiche Lebensmittelindustrie sowie Forschung & Entwicklung. Insbesondere in der Aachener Lebensmittelindustrie könnte in Zukunft die notwendige Prozesswärme zu beachtlichen Teilen aus Wasserstoff gewonnen werden. Auch in der Forschung wird der Wasserstoffbedarf voraussichtlich steigen.

Der Aachener Energiebedarf wird heute noch zu mehr als einem Drittel durch Erdgas gedeckt. Dies hängt auch mit der stark von fossilen Brennstoffen abhängigen Beheizung der Aachener Gebäude zusammen. Hierfür braucht es zeitnah klimaneutrale Alternativen wie Wärmepumpen, Solarthermie, Biomasse, wasserstoffbasierte Heizungen oder synthetisches Methan. Der Ausbau von Fern- und Nahwärme wird ebenfalls eine wichtige Rolle spielen – perspektivisch auch unter Nutzung von Wasserstoff.

Entlang der Wasserstoff-Wertschöpfungskette existieren in Aachen sowie im Umland zahlreiche Unternehmen, Forschungseinrichtungen, Netzwerke und konkrete Projekte, in denen praktisches Know-how für die Wasserstoffwirtschaft aufgebaut und verbreitet wird. Wie auch in anderen Bereichen ist Aachen im Themenfeld Wasserstoff ein starker Standort für industriennahe Forschung und Entwicklung.

Der aktuelle Wasserstoffverbrauch wird – soweit er zu erheben ist – vor allem durch Forschungsinstitute der RWTH Aachen University und die Aachener Wasserstofftankstelle verursacht. Trotz eines geringen Bestands an Wasserstofffahrzeugen liegt die Auslastung der Aachener Tankstelle über dem deutschen Durchschnitt. Grund hierfür ist die Mitnutzung der Tankstelle durch das Umland sowie durch Entsorgungsfahrzeuge des Aachener Stadtbetriebs. Hier und in weiteren Bereichen ist die Tendenz für den Wasserstoffbedarf klar steigend.

Aus den für den Netzentwicklungsplan 2022-2032 gemeldeten Projektvorhaben geht hervor, dass die geplanten Erzeugungskapazitäten nur einen Bruchteil des Aachener Wasserstoffbedarfs werden decken können. Gleichzeitig ist der Anschluss der Stadt Aachen an eines der geplanten Wasserstofftransportnetze (Green Octopus oder Startnetz) momentan noch nicht absehbar oder terminierbar.

Im Ergebnis lässt die Bestandsaufnahme einen steigenden Wasserstoffbedarf und sich anbahnende daraus resultierende Engpässe bei Erzeugungs- und Verteilungsinfrastruktur erkennen. Die größten Herausforderungen liegen hier in den Sektoren Energie/Versorgung und Industrie. Insbesondere in diesen Bereichen sollte sich die Stadt daher auf einen potenziell schnell steigenden Wasserstoffbedarf in den kommenden Jahren einstellen.

5. Zukunftsbilder für die Wasserstoffwirtschaft in Aachen

Die politischen Ziele der Bundesregierung geben das Ziel der Klimaneutralität Deutschlands bis zum Jahr 2045 vor. Dies bedeutet, dass bis zu diesem Zeitpunkt in keinem der Sektoren des deutschen Energiesystems mehr Treibhausgase emittiert werden dürfen. Die Stadt Aachen hat sich selbst ein deutlich ambitionierteres Ziel als der Bund gesetzt und strebt an, bereits bis zum Jahr 2030 klimaneutral zu sein.

Um den Zielzustand der Klimaneutralität erreichen zu können, muss also das bisherige Energiesystem über die kommenden Jahre und Jahrzehnte hinweg umgebaut und transformiert werden. Dabei teilt sich der Endenergieverbrauch auf den Mobilitätssektor, den Haushaltssektor, den Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungssektor und den Industriesektor auf. Es existieren mehrere mögliche Pfade auf dem Weg zur Dekarbonisierung des deutschen und Aachener Energiesystems. Diese unterscheiden sich zum Beispiel durch die verwendeten Technologien oder Energieträger. Freilich lassen sich die tatsächlichen Entwicklungen der Zukunft nicht vorhersehen. Um sich dennoch auf eine ungewisse Zukunft vorbereiten zu können, ist es hilfreich, sich nicht nur *eine* mögliche Zukunft anzusehen, sondern mehrere.

Aus diesem Grund werden im Rahmen dieses Leitfadens zwei grundsätzlich verschiedene Zukunftsbilder für die Stadt Aachen entwickelt. Diese werden im Folgenden als „Moleküle-Welt“ und „Elektronen-Welt“ bezeichnet. Als Basis der Zukunftsbilder für die Stadt Aachen werden die nationalen B E T-Szenarien „Klimaneutralität 2045 – Moleküle“ und „Klimaneutralität 2045 – Elektronen“ verwendet. Diese bilden, wie bereits der Name vermuten lässt, den Zielzustand der Klimaneutralität für ganz Deutschland in zwei grundsätzlich verschiedenen Zukunftsbildern ab. Während in der Moleküle-Welt Technologieentscheidungen tendenziell eher zugunsten von Wasserstoff ausfallen (z. B. Wasserstoffheizungen im Gebäudesektor, Brennstoffzellenantriebe im Verkehrssektor, Prozesswärme in der Industrie), wählt das Modell in der Elektronen-Welt in denselben Bereichen nach Möglichkeit eine elektrische Option (z. B. Wärmepumpen, E-Antriebe, elektrische Industrieöfen). Dabei berücksichtigen die Szenarien jedoch die eindeutige technische und/oder ökonomische Überlegenheit von Technologielösungen in bestimmten Anwendungsgebieten, sodass in Summe gegensätzliche und dennoch ökonomisch und technologisch sinnvolle Zielszenarien entstehen. Abbildung 29 zeigt die resultierenden Endenergieverbräuche im Status quo und in den genannten Zielszenarien für Deutschland.

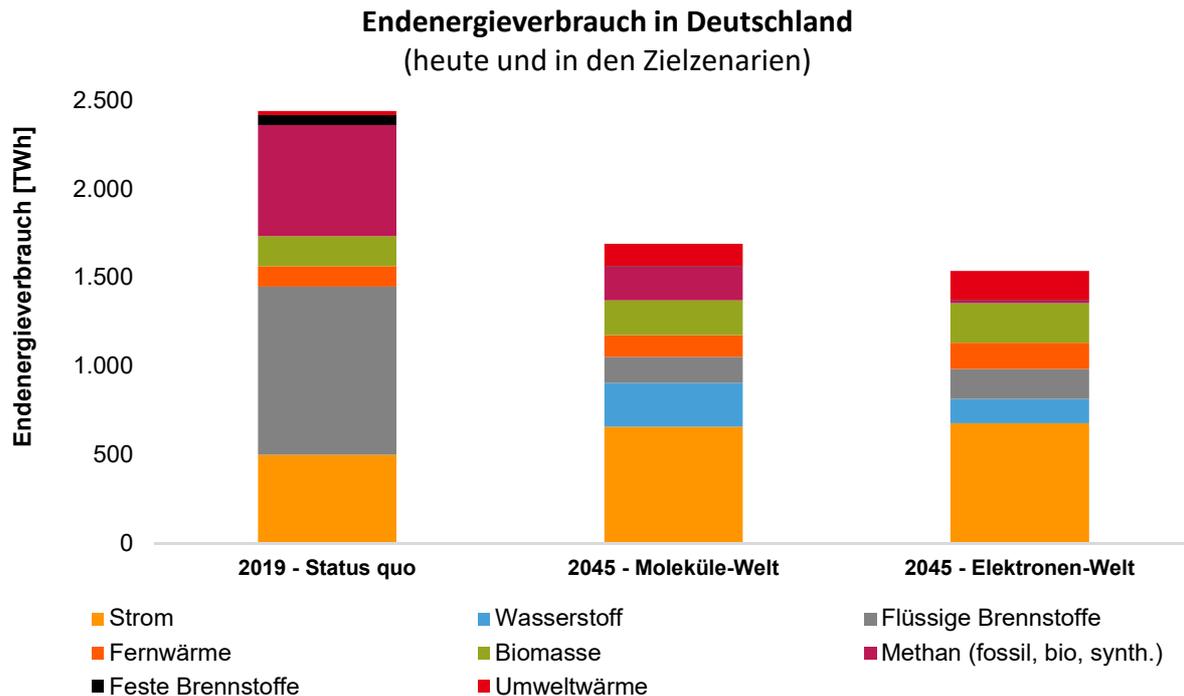


Abbildung 29: Endenergieverbrauch in Deutschland – Vergleich der Zukunftsbilder mit dem Status quo

In den Szenarien wird die Klimaneutralität in Deutschland gemäß der politischen Zielsetzung im Jahr 2045 erreicht. Für die Darstellung möglicher Zielbilder für die Klimaneutralität in Aachen dienten die sich in den bundesweiten Szenarien für 2045 ergebenden Werte als Ausgangsbasis. Um die deutschlandweiten Szenarien auf das Stadtgebiet von Aachen zu übertragen, wurde eine Regionalisierung durchgeführt. Über lokal-spezifische Einflussfaktoren, wie beispielsweise die Einwohnerzahl, die demographische Entwicklung, die Fahrzeugflotte etc., wurden die deutschlandweiten Zukunftsbilder an das Gebiet der Stadt Aachen angepasst.

Auf Basis dieser Methodik konnten Zielbilder für den Zustand der Klimaneutralität in der Stadt Aachen erstellt und sektorspezifische Energiemixe abgeleitet werden. Da die Stadt Aachen das Zieljahr 2030 für das Erreichen der Klimaneutralität anstrebt, führt die notwendige Steigerung der Transformationsgeschwindigkeit zu einer Stauchung des zeitlichen Transformationspfades, was zu methodischen Ungenauigkeiten führen kann, die jedoch die allgemeine Aussagekraft des Modells nur geringfügig schmälern. Dennoch sei darauf hingewiesen, dass Ziel dieser Untersuchung lediglich eine Abschätzung des Wasserstoffbedarfs der Stadt Aachen beim Erreichen des Zielzustands „Klimaneutralität“ war und nicht die exakte Modellierung des gesamten Energiesystems für die Stadt Aachen bzw. der zur Erreichung der Zielbilder notwendigen Transformationspfade.

5.1. Die Aachener Wasserstoffwirtschaft in der „Welt der Moleküle“

Die Grundidee hinter der Moleküle-Welt ist, dass Wasserstoff und seine Derivate in vielen Bereichen eine zentrale Rolle spielen. Die bestehende Infrastruktur der Gasnetze auf Fernleitungs- und Verteilnetzebene bleibt in großen Teilen in Betrieb und wird entweder auf Wasserstoff umgerüstet oder mit synthetischem Methan gespeist. Dies wird jedoch auch in diesem Szenario von einer – im Vergleich zu heute – zunehmenden Elektrifizierung in allen Sektoren begleitet.

Mobilitätssektor

Innerhalb des Stadtgebietes von Aachen wird im Mobilitätssektor ausschließlich der Straßenverkehr berücksichtigt. Schienen-, Luft- und auch Schiffsverkehr spielen im gesamtdeutschen System zwar eine Rolle, fließen in diese lokale Betrachtung allerdings nicht ein.

Abbildung 30 stellt die Zusammensetzung des Endenergiebedarfes des Mobilitätssektors im Stadtgebiet Aachen in einem klimaneutralen Zielzustand dar. Dabei besteht ein gesamter Endenergiebedarf von 561 GWh. Im Status quo beträgt der Endenergiebedarf des Aachener Mobilitätssektors etwa 1.916 GWh. Das bedeutet, dass bis zum Zielzustand der Energiebedarf in diesem Sektor um fast 75 % gesenkt werden muss. Dies geschieht v. a. über die signifikant höhere Energieeffizienz von E-Motoren im Vergleich zu fossilen Verbrennungsmotoren.

In der Moleküle-Welt spielt Wasserstoff in einem klimaneutralen Zielzustand im Pkw-Bereich eine untergeordnete Rolle und kommt vor allem im Oberklassensegment zum Einsatz. Dahingegen besteht im Frachtverkehr und auch im öffentlichen Nahverkehr (z. B. durch Busse) ein relativ hoher Anteil an Wasserstofffahrzeugen. Der Wasserstoffverbrauch im Verkehrssektor beläuft sich somit in diesem Zukunftsbild für Aachen auf 219 GWh/a bzw. 39 % des Endenergieverbrauchs im Mobilitätsbereich. Mit 13 % machen flüssige Brennstoffe (v. a. H₂-Derivate) im Zielzustand nur noch einen sehr kleinen Anteil am Endenergieverbrauch im Mobilitätssektor aus. Um diesen Zielzustand zu erreichen, müssen nahezu alle in Aachen gemeldeten Fahrzeuge ausgetauscht oder umgerüstet werden.

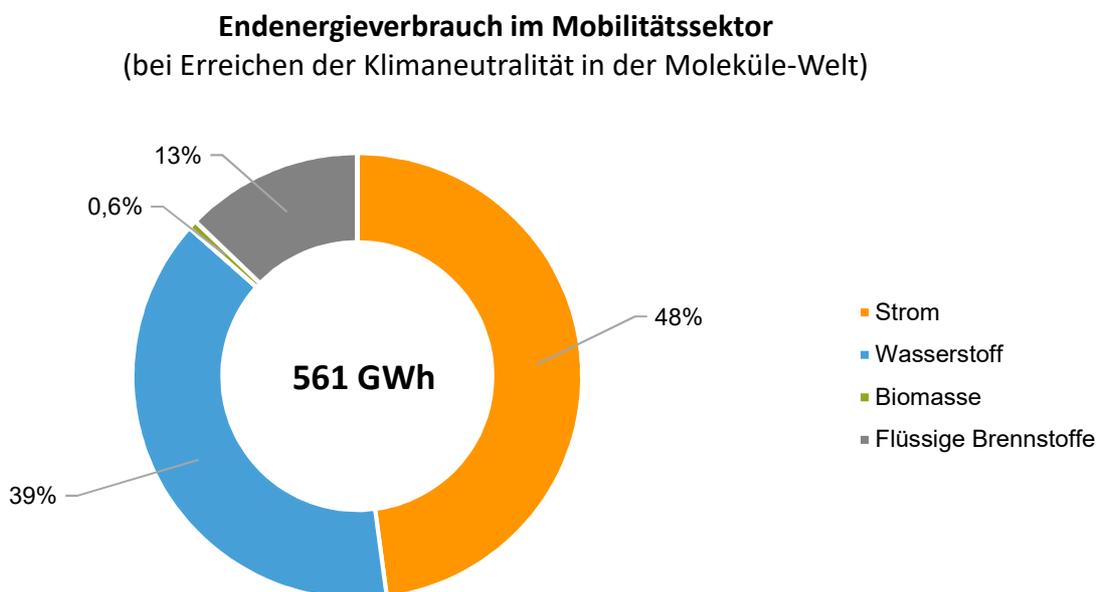


Abbildung 30: Moleküle-Welt – Endenergieverbrauch im Mobilitätssektor

Haushaltssektor

Im Zuge dieser Studie wird der Endenergiebedarf des Haushaltssektors in die Untersegmente Raumwärme, Warmwasser und Kochen unterteilt. Rein strombasierte Verbraucher wie z. B. Kühlschränke, Waschmaschinen etc. wurden im Rahmen dieses Papiers nicht berücksichtigt, da sie für den zukünftigen Wasserstoff-Endenergiebedarf keine entscheidende Rolle spielen. Eine wichtige Voraussetzung zur Erreichung der Klimaneutralität ist das generelle

Absenken des Endenergiebedarfs im Haushaltssektor. In dem in Abbildung 31 gezeigten Zielbild der Moleküle-Welt handelt es sich dabei um eine Absenkung um ca. 31 % im Vergleich zum Status quo.

In Summe geht selbst in der Moleküle-Welt wegen der zunehmenden Nutzung von elektrischen Wärmepumpen (in Abbildung 31 und allen folgenden Abbildungen repräsentiert durch die Positionen „Strom“ und „Umweltwärme“) der Gasbedarf im Vergleich zu heute deutlich zurück. Wasserstoff wird entweder in seiner Reinform durch das Gasverteilnetz geleitet, das zu diesem Zweck ebenso modernisiert werden müsste wie die Heizungsanlagen der Endkunden, oder es kommt synthetisches Methan zum Einsatz, das in seiner Herstellung teurer ist als Wasserstoff, jedoch keinen zusätzlichen Umstellungsbedarf im Netz und bei den Verbrauchern nach sich zieht.

Insgesamt sind im Zukunftsbild der klimaneutralen Moleküle-Welt in Aachen 302 GWh Wasserstoff oder synthetisches Methan im Haushaltssektor notwendig. Wie Abbildung 31 zeigt, würde dies einem Anteil von 26 % am gesamten Endenergiebedarf (1.141 GWh) in diesem Sektor entsprechen.

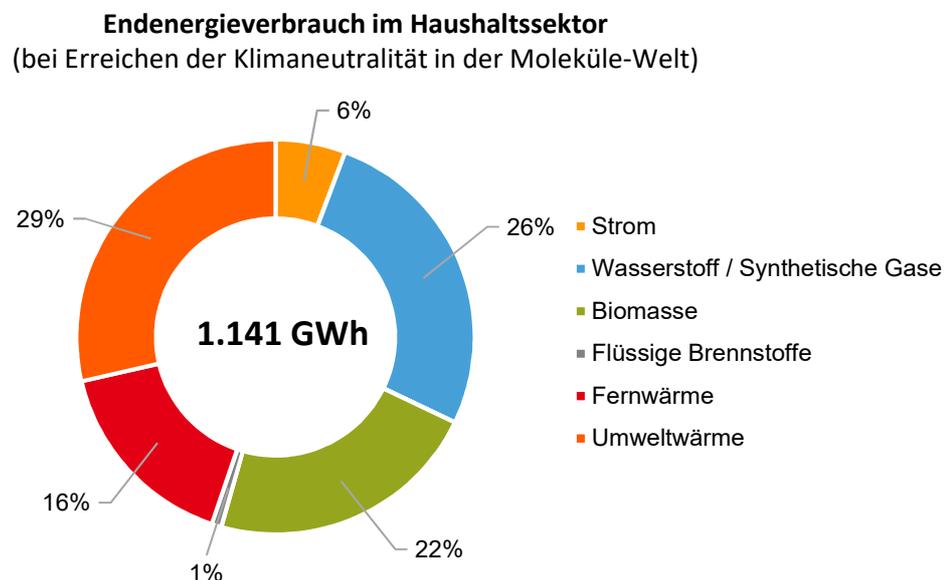


Abbildung 31: Moleküle-Welt – Endenergieverbrauch im Haushaltssektor

GHD-Sektor

Im Zuge dieser Studie wird der Endenergiebedarf des GHD-Sektors in die Untersegmente Raumwärme, Warmwasser, Kochen sowie mechanische Energie und Prozesswärme unterteilt. Reine elektrische Verbraucher werden analog zum Haushaltssektor nicht in den Fokus dieses Leitfadens gestellt. Bezüglich der Anforderung der Senkung des Endenergiebedarfes gelten im GHD-Sektor ähnliche Anforderungen wie im Haushaltssektor. Im Vergleich zum Status quo muss der Endenergieverbrauch um etwa 38 % sinken. Dies muss zu großen Teilen ebenfalls über eine energetische Sanierung des Gebäudebestands erfolgen.

Darüber hinaus besteht aber auch die Anforderung an die mechanischen Prozesse und die Prozesswärme, deutlich energieeffizienter zu werden. Insbesondere im Bereich der Prozesswärme kommen in der Moleküle-Welt zukünftig zu großen Anteilen Wasserstoff oder – je nach Verfügbarkeit – andere synthetische Gase zum Einsatz.

In der klimaneutralen Zukunft im Szenario der Moleküle-Welt in Aachen sind 395 GWh Wasserstoff oder synthetisches Methan im GHD-Sektor notwendig. Wie in Abbildung 32 zu sehen ist, würde dies einen Anteil von 43 % am gesamten Endenergiebedarf (916 GWh) in diesem Sektor ausmachen.

Endenergieverbrauch im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (bei Erreichen der Klimaneutralität in der Moleküle-Welt)

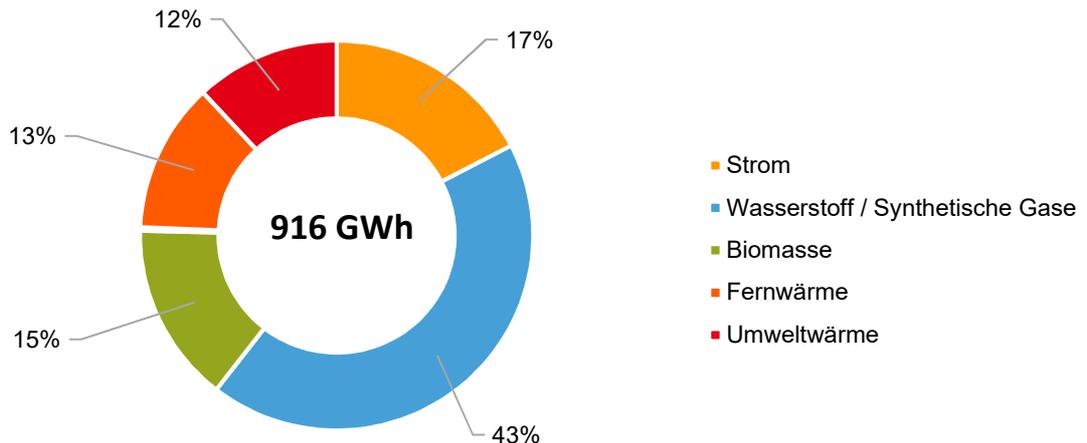


Abbildung 32: Moleküle-Welt – Endenergieverbrauch im GHD-Sektor

Industriesektor

Im Zuge der Regionalisierung der gesamtdeutschen Szenarien auf das Stadtgebiet Aachen wird in der Industrie der Fokus auf den energetischen Endenergiebedarf gelegt. Der v. a. in der Stahl- und Chemieindustrie anfallende nicht-energetische Endenergiebedarf spielt in Aachen kaum eine Rolle.

Um einen klimaneutralen Zielzustand zu erreichen, muss im Industriesektor eine Umstellung der Energieträger erfolgen. So wird im Zielzustand ein Großteil des Endenergiebedarfs auf Strom entfallen, aber auch ein großer Wasserstoffbedarf entstehen. Entsprechend müssen v. a. Prozesse, die heute noch auf Erdgasbasis funktionieren, auf nachhaltige Energieträger (in der Moleküle-Welt v. a. Wasserstoff) umgestellt werden.

Im Zielzustand müssen die industriellen Großverbraucher in Aachen an ein leistungsfähiges Wasserstoffverteilnetz angeschlossen sein, um verlässlich mit nachhaltigem Gas versorgt zu werden. Denn wie Abbildung 33 zu entnehmen ist, wird insgesamt ein Bedarf von 356 GWh an Wasserstoff zu decken sein, was 32 % des gesamten Endenergiebedarfs (1.113 GWh) in diesem Sektor ausmacht.

Endenergieverbrauch im Industriesektor
(bei Erreichen der Klimaneutralität in der Moleküle-Welt)

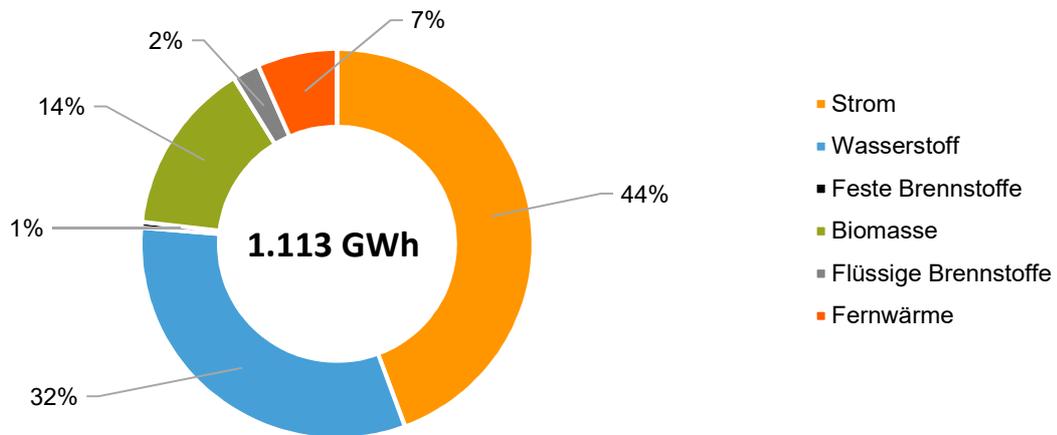


Abbildung 33: Moleküle-Welt – Endenergieverbrauch im Industriesektor

Bedarf an Wasserstoff bzw. synthetischem Methan in Aachen im Zielzustand der Moleküle-Welt

In einem Zielbild für ein klimaneutrales Aachen besteht in der Moleküle-Welt ein Bedarf an Wasserstoff in Höhe von 1.269 GWh. Dabei besteht die Möglichkeit, dass in den Sektoren Haushalt und GHD – je nach Verfügbarkeit – statt oder ergänzend zu Wasserstoff auch synthetisches Methan genutzt wird. In den Sektoren Mobilität und Industrie wird in diesem Szenario davon ausgegangen, dass v. a. Wasserstoff zum Einsatz kommt. Der größte Abnehmer wäre in diesem Zielbild der GHD-Sektor, dicht gefolgt von der Industrie und dem Haushaltssektor, die alle mehr als 300 GWh Wasserstoff pro Jahr benötigen würden. Im Mobilitätssektor entstünde ein jährlicher Bedarf von 217 GWh.

Für die Produktion solcher Mengen H_2 ist eine Elektrolyseleistung von ca. 500 MW erforderlich sowie eine Grünstrommenge von 2 TWh pro Jahr. Allein für diese Menge erneuerbaren Stroms wären ca. 350 Windkraftanlagen erforderlich. Eine ausschließliche Produktion auf dem Aachener Stadtgebiet erscheint somit eher unwahrscheinlich. Daher ist der Anschluss an ein Fernleitungsnetz zum Import der beschriebenen Gasmengen im Zielzustand zwingend notwendig. Darüber hinaus müssen im Zielzustand der Moleküle-Welt industrielle Großverbraucher von Wasserstoff und schwer zu renovierende Bestandsgebäude in Aachen an ein Wasserstoffverteilnetz angeschlossen sein.

In Abbildung 34 ist bisher nur der Endenergiebedarf an Wasserstoff bzw. synthetischen Gasen auf Wasserstoff-Basis dargestellt. Im Umwandlungssektor besteht im Stadtgebiet im klimaneutralen Zielzustand ebenfalls ein gewisser Wasserstoffbedarf. Die Prognose dieses Bedarfes fällt aufgrund der Komplexität der regionalen Zuordnung des Bedarfes schwer. In der Moleküle-Welt wird der maximale Wasserstoffbedarf im Umwandlungssektor in Aachen auf etwa 190 GWh pro Jahr geschätzt (insbesondere zur Erzeugung und Besicherung von klimaneutraler Fernwärme). Dies würde die notwendige Elektrolysekapazität um ca. weitere 75 MW erhöhen.

Wasserstoffbedarf in den verschiedenen Sektoren (bei Erreichen der Klimaneutralität in der Moleküle-Welt)

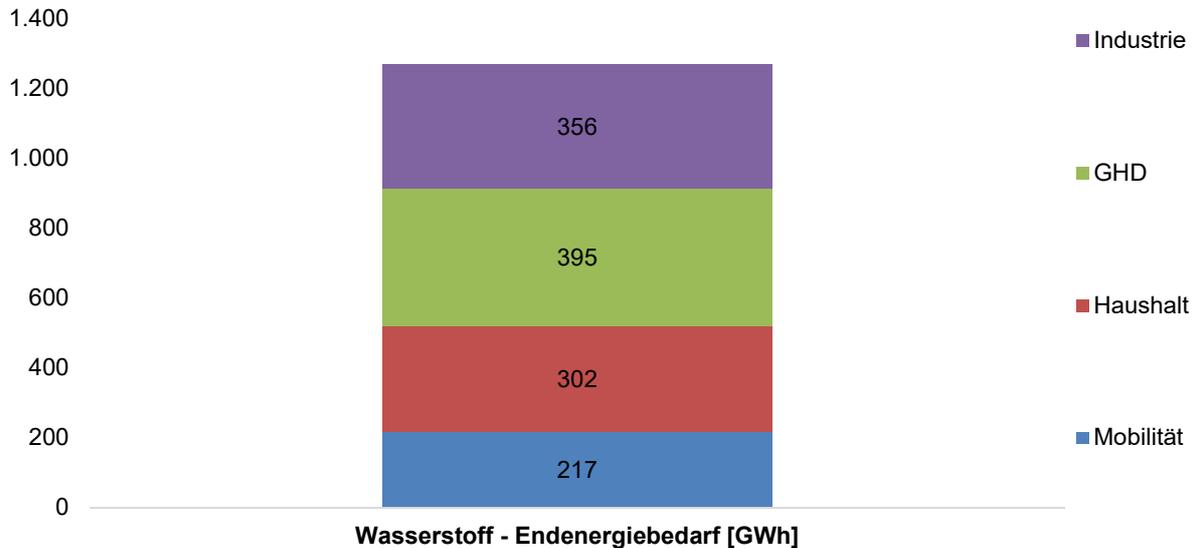


Abbildung 34: Moleküle-Welt – Endenergiebedarf an Wasserstoff & synthetischen Gasen

5.2. Die Aachener Wasserstoffwirtschaft in der „Welt der Elektronen“

Die Grundidee hinter der Elektronen-Welt ist, dass insbesondere durch eine starke Elektrifizierung die Klimaneutralität erreicht wird. Dabei helfen Förderprogramme, bei der Gebäudesanierung die notwendigen hohen Sanierungsraten zu erreichen, da der Einsatz von Wärmepumpen eine gute Gebäudeisolierung voraussetzt. Die Nachfrage an Gas ist stark rückläufig, sodass lediglich wenige Gasleitungen zur Versorgung von industriellen Abnehmern und ggf. Rückverstromungskraftwerken (Backup-Kraftwerke) übrigbleiben. Das heute bestehende Gasverteilnetz müsste zum größten Teil zurückgebaut werden.

Mobilitätssektor

Innerhalb des Stadtgebietes von Aachen wird im Mobilitätssektor ausschließlich der Straßenverkehr berücksichtigt. Schienen-, Luft- und auch Schiffsverkehr spielen im gesamtdeutschen System zwar eine Rolle, fließen in diese lokale Betrachtung allerdings nicht ein. Abbildung 35 stellt die Zusammensetzung des Endenergiebedarfes des Mobilitätssektors im Stadtgebiet Aachen in einem klimaneutralen Zielzustand dar. Dabei besteht ein gesamter Endenergiebedarf von 533 GWh. Im Status quo beträgt der Endenergiebedarf des Aachener Mobilitätssektors etwa 1.916 GWh. Das bedeutet, dass bis zum Zielzustand der Energiebedarf in diesem Sektor um fast 75 % gesenkt werden muss.

In der Elektronen-Welt herrscht insbesondere im öffentlichen Nahverkehr ein höherer Elektrifizierungsgrad als in der Moleküle-Welt. Aber auch in den Anwendungsfällen im leichten Lieferverkehr kommen hier vermehrt batterieelektrische Fahrzeuge zum Einsatz. Aus diesem Grund steigt der Anteil an Strom am Gesamtenergiebedarf.

Auch in der Elektronen-Welt muss eine radikale Veränderung der Aachener Fahrzeugflotte erfolgen. Der Endenergieverbrauch im Zielzustand beträgt fast nur noch ein Viertel des aktuellen Wertes. Entsprechend müssen nahezu alle in Aachen gemeldeten Fahrzeuge bis zur Erreichung des Zielzustandes ausgetauscht werden.

Endenergieverbrauch im Mobilitätssektor (bei Erreichen der Klimaneutralität in der Elektronen-Welt)

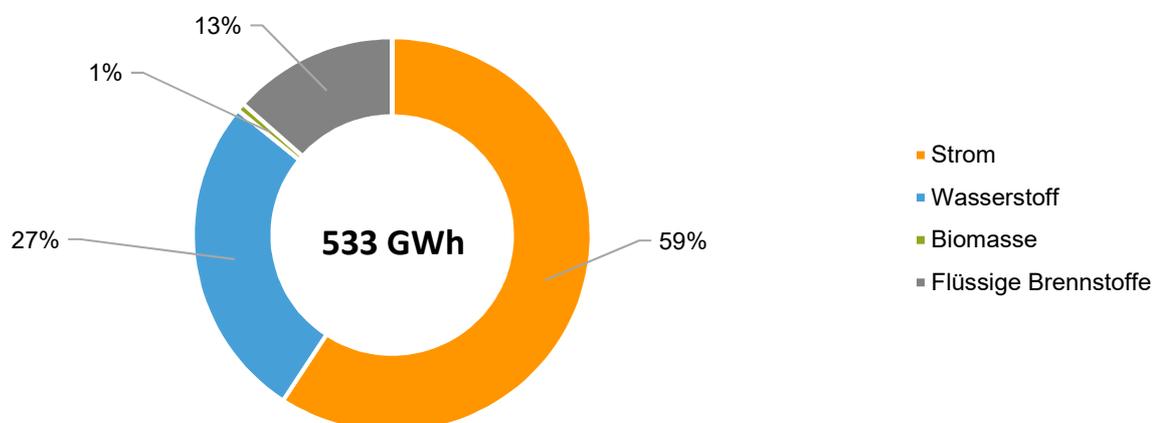


Abbildung 35: Elektronen-Welt – Endenergieverbrauch im Mobilitätssektor

Haushaltssektor

Im Zuge dieser Studie wird der Endenergiebedarf des Haushaltssektors in die Untersegmente Raumwärme, Warmwasser und Kochen unterteilt. Rein strombasierte Verbraucher wie z. B. Kühlschränke, Waschmaschinen etc. wurden im Rahmen dieses Papiers nicht berücksichtigt, da sie für den zukünftigen Wasserstoff-Endenergiebedarf keine entscheidende Rolle spielen. Eine wichtige Voraussetzung zur Erreichung der Klimaneutralität ist das generelle Absenken des Endenergiebedarfs im Haushaltssektor. In dem hier gezeigten Zielbild der Elektronen-Welt handelt es sich dabei um eine Absenkung um ca. 37 % im Vergleich zum Status quo.

Dabei spielen Wasserstoff bzw. synthetische Gase nur für wenige dezentrale Gebäudeheizungen, die per Gasflasche beliefert werden können, eine Rolle. Fern- und Umweltwärme (d. h. elektrisch betriebene Wärmepumpen) decken den größten Anteil des Endenergiebedarfs.

Das heute bestehende Gasverteilnetz zur Versorgung der Haushalte mit Erdgas wird in diesem Szenario im Zielzustand nicht mehr benötigt und kann zurückgebaut werden.

Insgesamt sind im Zukunftsbild der klimaneutralen Elektronen-Welt in Aachen 28 GWh Wasserstoff oder synthetisches Methan im Haushaltssektor notwendig. Wie in Abbildung 36 zu sehen ist, würde dies einem Anteil von nur 3 % am gesamten Endenergiebedarf (1.052 GWh) in diesem Sektor entsprechen.

Endenergieverbrauch im Haushaltssektor (bei Erreichen der Klimaneutralität in der Elektronen-Welt)

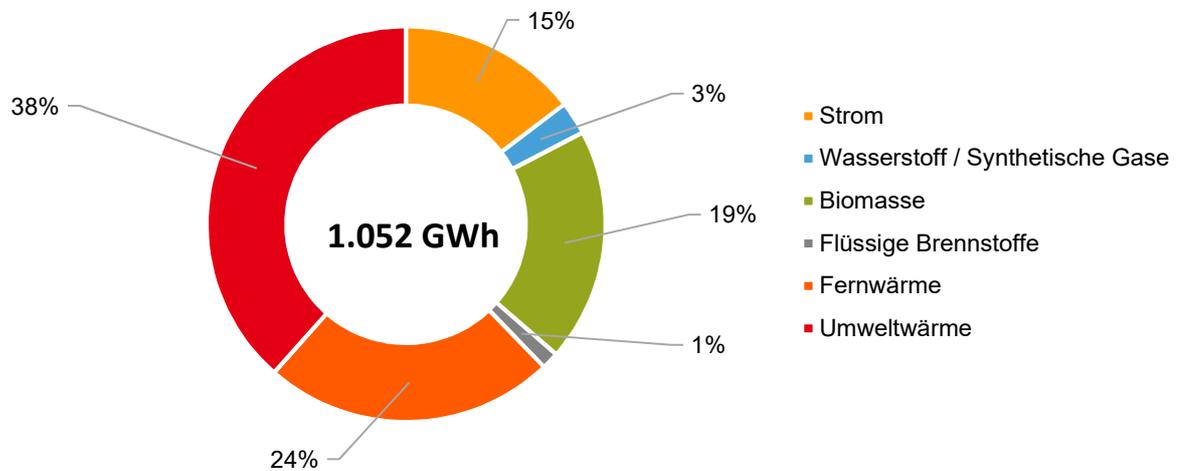


Abbildung 36: Elektronen-Welt – Endenergieverbrauch im Haushaltssektor

GHD-Sektor

Im Zuge dieser Studie wird der Endenergiebedarf des GHD-Sektors in die Untersegmente Raumwärme, Warmwasser, Kochen und mechanische Energie und Prozesswärme unterteilt. Reine elektrische Verbraucher werden analog zum Haushaltssektor nicht in den Fokus dieses Papiers gestellt. Der Anteil von Wasserstoff bzw. synthetischen Methans am Endenergieverbrauch reduziert sich im Vergleich zur Moleküle-Welt um etwa 20 Prozentpunkte. Analog zum Haushaltssektor steigen dafür im Gegenzug die Anteile von Fern- und Umweltwärme stark an.

Entsprechend muss auch die Fernwärmeinfrastruktur in der Stadt Aachen weiter ausgebaut werden, wobei nicht vernachlässigt werden darf, dass im Zielzustand bei der Wärmeerzeugung keine Emissionen mehr freigesetzt werden dürfen. Wasserstoff würde hierbei voraussichtlich im Umwandlungssektor – d. h. bei der Erzeugung der Fernwärme – eine wichtige Rolle spielen.

Dezentrale Wärmepumpen müssen in diesem Szenario in hoher Stückzahl ausgebracht werden, wobei die Dämmung vieler Gebäude dafür noch deutlich verbessert werden muss.

In der klimaneutralen Zukunft im Szenario der Elektronen-Welt in Aachen sind 216 GWh Wasserstoff oder synthetisches Methan im GHD-Sektor notwendig. Wie Abbildung 37 zu entnehmen ist, würde dies einen Anteil von 23 % am gesamten Endenergiebedarf (940 GWh) in diesem Sektor ausmachen.

Endenergieverbrauch im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (bei Erreichen der Klimaneutralität in der Elektronen-Welt)

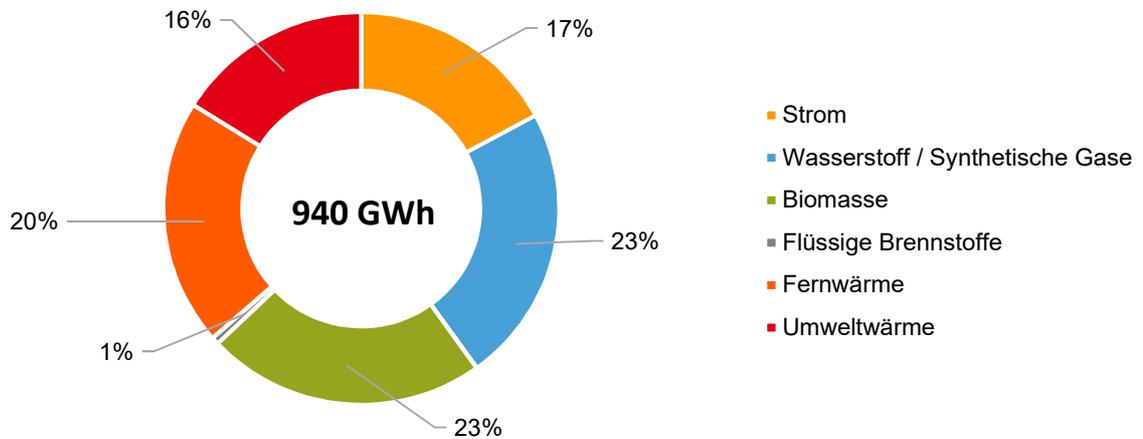


Abbildung 37: Elektronen-Welt – Endenergieverbrauch im GHD-Sektor

Industriesektor

Im Zuge der Regionalisierung der gesamtdeutschen Szenarien auf das Stadtgebiet Aachen wird in der Industrie der Fokus auf den energetischen Endenergiebedarf gelegt. Der vor allem in der Stahl- und Chemieindustrie anfallende nicht-energetische Endenergiebedarf spielt in Aachen kaum eine Rolle.

Im Zielzustand des Industriesektors in der Elektronen-Welt wächst der ohnehin schon hohe Anteil von Strom am Endenergiebedarf in der Moleküle-Welt noch um weitere 10 Prozentpunkte an. Im Gegenzug dazu reduziert sich der Wasserstoffanteil um etwa die Hälfte.

Auch in diesem Szenario ist eine Wasserstoffverteilinfrastruktur notwendig, die Industriekunden anbindet. Allerdings wird eine geringere Netzlänge mit geringeren Leitungsdurchschnitten als im Moleküle-Szenario benötigt. Denn wie in Abbildung 38 zu sehen ist, wird insgesamt ein Bedarf von 169 GWh an Wasserstoff zu decken sein, was 16 % des gesamten Endenergiebedarfs (1.113 GWh) in diesem Sektor ausmacht.

Endenergieverbrauch im Industriesektor (bei Erreichen der Klimaneutralität in der Elektronen-Welt)

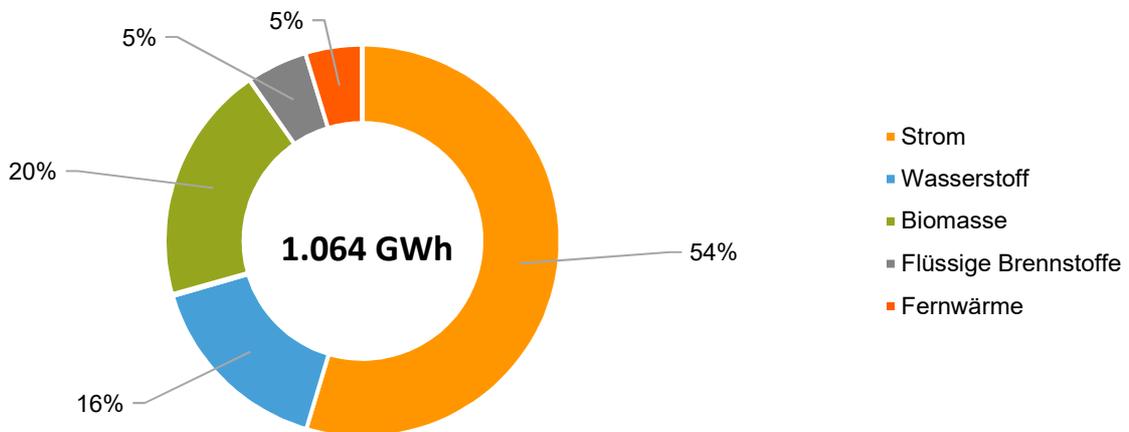


Abbildung 38: Elektronen-Welt – Endenergieverbrauch im Industriesektor

Bedarf an Wasserstoff bzw. synthetischem Methan in Aachen im Zielzustand der Elektronen-Welt

Im Zielbild für ein klimaneutrales Aachen besteht in der Elektronen-Welt ein Bedarf nach Wasserstoff bzw. synthetischem Methan in Höhe von ca. 555 GWh. Damit entspricht er etwa einem Drittel der Menge in der Moleküle-Welt. Die notwendige Elektrolyseleistung läge bei ca. 198 MW, die – wie in der Moleküle-Welt – voraussichtlich nur zu einem geringen Anteil auf dem Gebiet der Stadt Aachen errichtet würden, sodass mittel- und langfristig eine Anbindung an eine Fernleitung erforderlich wird. Die erforderliche Grünstrommenge läge bei knapp 800 GWh pro Jahr, was 130 Windkraftanlagen an Land entspräche.

Insbesondere im Haushaltssektor ist in der Elektronen-Welt ein eher geringer Anteil an Wasserstoff bzw. anderen synthetischen Gasen zu erwarten. Der Betrieb eines dezidierten Gasverteilernetzes mit dem Anschluss vieler Haushaltskunden ist in einer solchen Welt nicht mehr erforderlich. Dies stellt auch einen strukturellen Unterschied zur Moleküle-Welt dar: Während dort der Haushaltssektor fast einen genauso hohen Wasserstoffbedarf hat wie die Industrie und der GHD-Sektor, liegt der Haushaltsbereich in der Elektronen-Welt mit einem Bedarf von lediglich 28 GWh pro Jahr abgeschlagen auf dem letzten Platz.

Nichtsdestotrotz stellt H₂ bzw. synthetisches Methan auch in einer Elektronen-Welt eine wichtige Säule für das Erreichen der Klimaneutralität dar. Entsprechend ist ein Hochlauf von Wasserstoff für die erfolgreiche Transformation weiterhin notwendig.

In Abbildung 39 ist bisher nur der Endenergiebedarf an Wasserstoff bzw. synthetischen Gasen auf Wasserstoff-Basis dargestellt. Im Umwandlungssektor besteht im Stadtgebiet im klimaneutralen Zielzustand ebenfalls ein gewisser Wasserstoffbedarf. Die Prognose dieses Bedarfes fällt aufgrund der Komplexität der regionalen Zuordnung des Bedarfes schwer. In der der Elektronen-Welt wird der maximale Wasserstoffbedarf im Umwandlungssektor in Aachen auf etwa 220 GWh pro Jahr geschätzt (insbesondere zur Erzeugung und Besicherung von klimaneutraler Fernwärme). Dies würde die notwendige Elektrolysekapazität um ca. weitere 84 MW erhöhen.

Wasserstoffbedarf in den verschiedenen Sektoren (bei Erreichen der Klimaneutralität in der Elektronen-Welt)

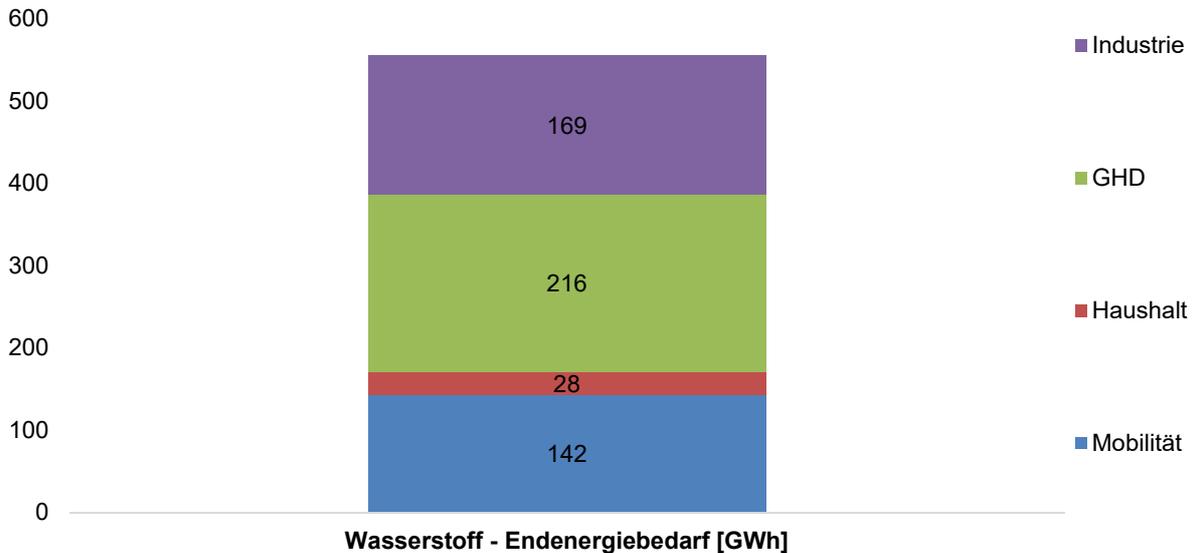


Abbildung 39: Elektronen-Welt – Endenergiebedarf an Wasserstoff & synth. Gasen

5.3. Fazit zu den Zukunftsbildern

In jedem der beiden Zukunftsbilder ist die Stadt Aachen zur Erreichung des Zieles der Klimaneutralität darauf angewiesen, fossile Energieträger vollständig aus dem Energiesystem zu verbannen. Die genaue Zusammensetzung der zukünftig genutzten Energieträger unterscheidet sich zwischen den beiden Zukunftsbildern jedoch enorm.

Wie in Kapitel „Erzeugung und Verbrauch von Wasserstoff in Aachen“ beschrieben ist, liegt die untere Grenze des heute in Aachen vorhandenen Wasserstoffbedarfs bei ca. 1,5 GWh pro Jahr. Im Verhältnis dazu kann nun der in den Zukunftsbildern prognostizierte Wasserstoffbedarf für Aachen verglichen werden.

In der Moleküle-Welt ist grundsätzlich davon auszugehen, dass Wasserstoff und seine Derivate als gasförmige Energieträger eine bedeutende Rolle spielen werden. Insgesamt kann mit einem zukünftigen Gesamtbedarf von 1.269 GWh pro Jahr gerechnet werden, wobei Gewerbe, Handel und Dienstleistungen sowie die Industrie die größten Abnehmer darstellen. Im Vergleich mit der Schätzung der heute verbrauchten Menge liegt der Anstieg im Wasserstoffbedarf fast bei einem Faktor 850. Der erfolgreiche Hochlauf von Wasserstoff im Stadtgebiet Aachen über die gesamte Wertschöpfungskette ist dementsprechend ein integraler Bestandteil für das Erreichen der Klimaneutralität.

In der Elektronen-Welt nehmen gasförmige Energieträger wie Wasserstoff und seine Derivate eine weniger wichtige Rolle ein als in der Moleküle-Welt, sind aber dennoch zur Vollendung der Energiewende und vollständigen Dekarbonisierung der Wirtschaft unerlässlich. Insbesondere im Haushaltssektor spielt Wasserstoff bzw. synthetisches Methan nur eine untergeordnete Rolle. Nichtsdestotrotz liegt der prognostizierte Gesamtbedarf an Wasserstoff in der Elektronen-Welt im Zielzustand in Aachen bei immer noch 555 GWh pro Jahr. Dies entspricht etwa der Hälfte der Menge der Moleküle-Welt. Im Vergleich zum Status quo bedeutet dies allerdings einen Anstieg um den Faktor 370.

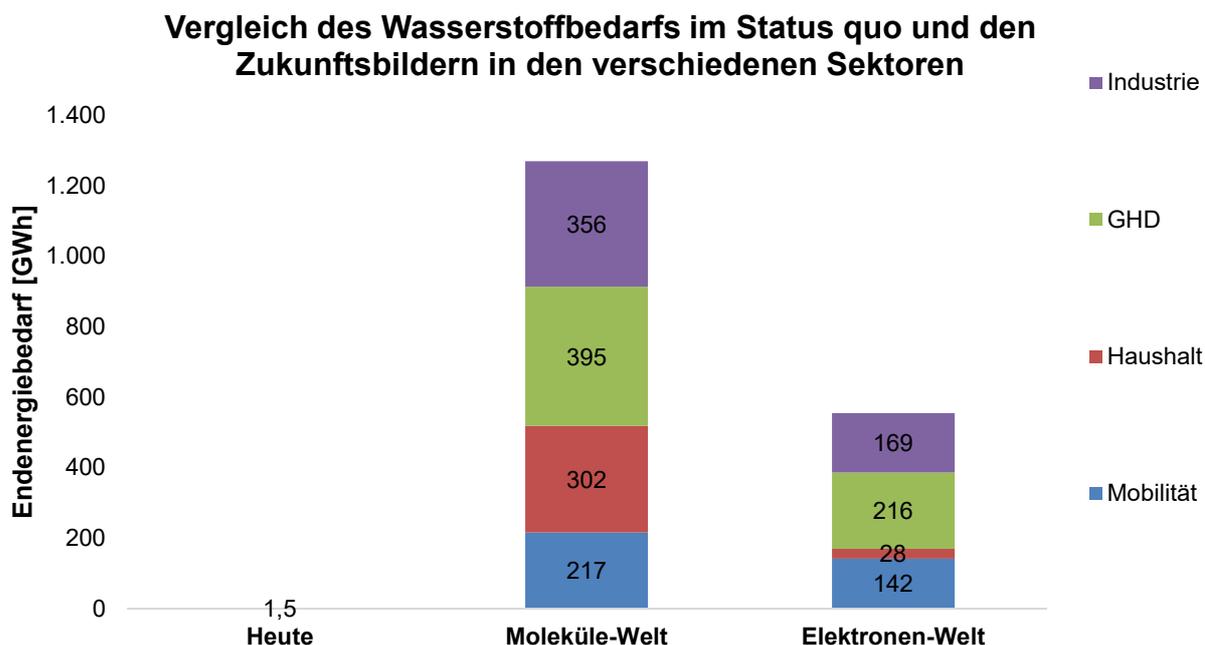


Abbildung 40: Vergleich des Wasserstoffbedarfs im Status quo und in den Zukunftsbildern einer klimaneutralen Zukunft

Wenn auch die Verbräuche in den Sektoren Industrie, GHD und Verkehr in der Elektronen-Welt deutlich geringer ausfallen als in der Moleküle-Welt, erweist sich ihr Bedarf im Szenarienvergleich jedoch als relativ robust, sodass diese Sektoren zumindest kurz- und mittelfristig im Fokus einer Hochlaufstrategie für die Wasserstoffwirtschaft in Aachen liegen sollten. Die Entwicklung im Haushaltssektor ist hingegen mit der größten Unsicherheit behaftet.

Die beiden analysierten Zukunftsbilder unterscheiden sich stark hinsichtlich der verwendeten Technologien, Energieträger und Infrastrukturen. Sie eröffnen einen möglichen Lösungsraum für das Erreichen des Zustandes der Klimaneutralität in Aachen. Aufgrund der hohen Unsicherheit hinsichtlich der tatsächlichen Entwicklung des Aachener Energiesystems ist es umso wichtiger, seine Handlungen nicht ausschließlich auf Basis eines einzelnen Szenarios zu treffen. Umso wichtiger ist die Erkenntnis, dass der Energieträger Wasserstoff in jeder der beiden Zukunftsbilder eine wichtige Rolle für die zukünftige Energieversorgung der Aachener Wirtschaft, Forschung und Haushalte spielen wird.

6. Handlungsempfehlungen

Die Erkenntnisse aus der Analyse der grundsätzlichen Rolle von Wasserstoff im Rahmen der Energiewende (Kapitel 1 und 3), der Bestandsaufnahme für die Stadt Aachen (Kapitel 4) sowie möglichen Zukunftsbildern für den Wasserstoffverbrauch im Stadtgebiet (Kapitel 5) werden in diesem Kapitel zusammengefasst und in Form einer Stärken-Schwächen-Chancen-Risiken-Analyse (SWOT: Strength, Weakness, Opportunities, Threats) dargestellt. Auf dieser Basis werden im zweiten Teil dieses Kapitels Handlungsempfehlungen dargestellt, die dazu beitragen, Stärken auszuspielen, Schwächen zu mindern, Chancen zu ergreifen und Risiken zu meiden.

6.1. SWOT-Analyse für die Stadt Aachen

Stärken

Die Analysen zeigen hinsichtlich des Aufbaus einer Wasserstoffwirtschaft in der Stadt Aachen zahlreiche Stärken auf, die aktiv bei der weiteren Gestaltung des zukünftigen Energiesystems im Stadtgebiet genutzt werden sollten. Insbesondere die starke Position Aachens im Bereich der Wissenschaft verschafft der Stadt im Vergleich zu anderen Städten und Kommunen einen Startvorteil. Das speziell im Bereich Wasserstoff vorhandene Know-how und die vergleichbar gute Verfügbarkeit von akademisch geschulten Fachkräften mit technischer Expertise sind Ressourcen, die beim Umbau der lokalen Energieversorgung gewinnbringend eingesetzt werden können.

Daneben bestehen mit verschiedenen Instituten der RWTH, an denen zum Thema Wasserstoff geforscht wird, sowie mit einigen Unternehmen bereits heute Abnehmer von Wasserstoff, die einerseits ihre Erfahrungen mit anderen Akteuren teilen und andererseits als Ankerkunden für eine zukünftige Wasserstoffversorgung fungieren können. Die wichtige Rolle der Fernwärme in Aachen bietet zudem einen Ansatzpunkt für die zukünftige klimaneutrale Wärmeversorgung der Stadt, wobei Wasserstoff perspektivisch im Sinne einer „No-Regret-Option“ mit großer Wahrscheinlichkeit eine bedeutsame Rolle spielen wird.

Auch der intensive Austausch auf politischer und wirtschaftlicher Ebene zwischen der Stadt Aachen und weiteren nahegelegenen Kommunen mit Plänen im Bereich Wasserstoff (z. B. Düren, Stolberg, Maastricht und Lüttich) sind als bedeutsamer Vorteil zu werten, der es ermöglicht, Synergieeffekte zu heben und gegenseitig von Erfahrungen zu profitieren. Insbesondere erste laufende Wasserstoffprojekte innerhalb der Stadt Aachen aber auch im Umland reichern diesen Erfahrungsschatz zunehmend an.

Schwächen

Neben den zahlreichen Stärken weist die Ausgangslage der Stadt Aachen auch einige Schwachpunkte auf, die für den möglichen Hochlauf der Wasserstoffverwendung eine bedeutsame Rolle spielen. Insbesondere geht es hierbei um die Frage, woher Akteure aus Aachen künftig grünen Wasserstoff beziehen können. Wie auch für andere urbane Ballungszentren üblich, existiert auf dem Gebiet der Stadt Aachen nur beschränktes Potenzial für den weiteren Ausbau von erneuerbaren Energien, die für die hiesige Produktion von grünem Wasserstoff erforderlich wären. Gleichzeitig ist momentan nicht zu erwarten, dass Aachen bereits bis 2030 an eines der geplanten Wasserstofftransportnetze (Startnetz, Green Octopus) angeschlossen werden wird. Die Frage des Bezugs von

grünem Wasserstoff ist für Aachen strategisch überaus bedeutsam und die zentrale Erfolgsbedingung für den Aufbau einer funktionierenden Wasserstoffwirtschaft.

Chancen

Hinsichtlich der oben angesprochenen Frage nach der Herkunft des benötigten grünen Wasserstoffs ergeben sich für Aachen jedoch auch einige Chancen bzw. Optionen für den Bezug von Wasserstoff. So durchlaufen zwei Fernleitungen für Erdgas das Stadtgebiet, die theoretisch zukünftig auf Wasserstoff umgestellt werden könnten. Auch ein Anschluss an das Projekt „Green Octopus“ stellt eine Möglichkeit für die leitungsgebundene Wasserstoffversorgung der Stadt dar. Konkret sieht der Netzentwicklungsplan Gas vor, dass Aachen über den Grenzübergangspunkt Eynatten Anfang der 2030er Jahre an das Wasserstofftransportnetz angeschlossen wird. Daneben existieren im Umland bereits einige Vorhaben zum Ausbau von erneuerbaren Energien (z. B. „Gigawattpakt“). Diese Projekte könnten künftig auch für die Erzeugung und Lieferung von grünem Wasserstoff in die umliegenden Ballungsgebiete genutzt werden.

Risiken

Mit Blick auf die möglichen zukünftigen Entwicklungen bestehen jedoch auch einige Risiken, die nicht aus den Augen verloren werden sollten. Insgesamt wird sich die für urbane Ballungszentren übliche energetische Abhängigkeit vom Umland bzw. „Energieimporten“ ins Stadtgebiet auch mit der Energiewende wohl nur geringfügig reduzieren lassen. Hierbei gilt es, die Not zur Tugend zu machen und über enge Kooperationen mit Akteuren im Umland die Wasserstoffversorgung für Aachen zu sichern.

Ein zentrales Risiko ist hierbei die Frage, ob der benötigte grüne Wasserstoff angesichts der ambitionierten Klimaschutzziele der Stadt Aachen rechtzeitig beschafft und zur Verfügung gestellt werden kann. Fehlende Wasserstoffmengen stellen hierbei auch ein Risiko für die klimaschutzpolitische Zielerreichung dar.

Auch die voraussichtlich notwendige Umrüstung der Gasnetze für die Verteilung von Wasserstoff ist hinsichtlich der Klimaschutzziele zeitlich sensibel. In diesem Zusammenhang muss energiewirtschaftliche Infrastruktur, wie Elektrolyseure, Wasserstoffspeicher oder -netze, zügig und möglichst aufwandsarm beantragt und genehmigt werden können.

Gelingt der Hochlauf der Wasserstoffnutzung in Aachen nicht, besteht zudem das Risiko, dass auf Wasserstoff angewiesene Unternehmen in umliegende Industriezentren, die ggf. über eine bessere Wasserstoffversorgung verfügen, abwandern könnten. Die Energiewende und der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft sind somit Bausteine eines modernen, nachhaltigen und damit attraktiven Wirtschaftsstandorts.

Auf der folgenden Seite sind die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der Stadt Aachen mit Blick auf den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 1: SWOT-Analyse für die Stadt Aachen im Bereich Wasserstoff

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Großer und innovativer F&E-Sektor, auch im Bereich H₂ • Gute Fachkräfteverfügbarkeit durch starken Wissenschaftsstandort und hohes wissenschaftliches Prestige der Institute • RWTH und mehrere Industrieunternehmen sind bereits heute oder potenziell H₂-Verbraucher und können wichtige „Ankerkunden“ für die zukünftige Wasserstoffinfrastruktur in Aachen sein • Erste laufende H₂-Pilotprojekte bei kommunalen und privaten Unternehmen sowie intensive Vernetzung von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft • Geografische Nähe und gute politische und wirtschaftliche Verbindung zu Industriezentren mit H₂-Ambitionen (Stolberg, Düren, Lüttich und Maastricht) • Ambitionierte Klimaschutzziele der Stadt ermöglichen Wasserstoff eine zentrale Rolle im Energiesystem • Hoher Anteil an fernwärmeversorgten Kunden ermöglicht einen signifikanten Beitrag von grünem H₂ bei der Wärmewende 	<ul style="list-style-type: none"> • Lokale Erzeugungskapazitäten erneuerbarer Energien (v. a. Wind und PV) sind flächenmäßig stark begrenzt und werden voraussichtlich nicht zur Deckung des Bedarfs an grünem H₂ ausreichen • Aktuell keine konkreten Pläne zur Anbindung an Wasserstofftransportnetze für den Zeitraum vor 2030 (Startnetz, Green Octopus)
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Steigender H₂-Verbrauch in Wirtschaft und Wissenschaft zu erwarten • Zwei Fernleitungen für Erdgas, die potenziell H₂ transportieren könnten, durchlaufen das Stadtgebiet • Bei einer Verbindung der Industriezentren Lüttich/Maastricht und Köln könnte Aachen an eine H₂-Transportleitung angeschlossen werden („Green Octopus“), ebenso ist Anfang der 2030er Jahre eine Wasserstoffumstellung des Grenzübergangspunkts Eynatten geplant 	<ul style="list-style-type: none"> • Starke Abhängigkeit von überregionalen Entwicklungen beim Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft und bei der Erreichung der kommunalen Klimaschutzziele (EU-, Bundes- und Landespolitik, Planungen zu EE- und Elektrolyseursausbau im Umland, Planungen zu H₂-Transportnetz) • Gefahr einer zu geringen/zu späten Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff im Kontext der ambitionierten Klimaschutzziele • Modernisierung und H₂-Umrüstung der Gasnetze und Gebäude nicht in ausreichendem Tempo möglich, um Klimaschutzziele zu

<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von EE-Anlagen im Umland (z. B. im Rahmen des „Gigawattpakts“) zur Produktion von Wasserstoff für Aachen • Ausbau und Umrüstung der heute schon wichtigen Fern- und Nahwärmenetze auf EE und Wasserstoff als zentraler Baustein der Dekarbonisierung • Durch die gute Einbindung ins europäische Straßennetz kann Aachen zu einem wichtigen Standort für die Versorgung des Güterverkehrs mit H₂ werden 	<p>erreichen/ Genehmigungsprozesse nicht in ausreichendem Tempo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fehlende Planungssicherheit für Unternehmen, die H₂ nutzen wollen, kann zur Verzögerung des H₂-Hochlaufs führen („Abwarten“) • H₂-Senken im Umland (z. B. Grüne Talachse, Düren) könnten früher als Aachen mit H₂ versorgt werden bzw. stellen bei geringer H₂-Verfügbarkeit Konkurrenz beim H₂-Bezug dar – Risiko der Abwanderung von Unternehmen
--	---

6.2. Handlungsempfehlungen für die Stadt Aachen

Die Stadt Aachen hat sich ambitionierte Klimaschutzziele gesetzt. Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft ist ein wichtiger Baustein, um diese Ziele zu erreichen. Auch wenn heute noch nicht vollständig absehbar ist, in welchen Sektoren Wasserstoff in welchem Ausmaß eine Rolle spielen wird, lassen sich doch erste Handlungsempfehlungen aus der Analyse des Status quo sowie möglicher Zukunftsszenarien ableiten.

Wasserstoffhochlauf in drei Phasen

Um die gesetzten Klimaschutzziele erreichen zu können, ist ein zielgerichtetes, entschlossenes und zügiges Handeln sowohl von Politik und Verwaltung als auch der lokalen Wirtschaft unabdingbar. In einer ersten Phase, beginnend mit dem Jahr 2022, sollte es deshalb darum gehen, die Grundlagen für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in Aachen zu legen. Hierzu gehört die eindeutige politische Zielformulierung, Wasserstoff zu einem zentralen Baustein der Energiewende in Aachen zu machen. Des Weiteren sollte die überregionale Vernetzung aller Akteure weiter intensiviert werden, insbesondere um mögliche Quellen für den Bezug von grünem Wasserstoff (Anschluss an ein zukünftiges Fernleitungssystem, H₂-Produktion im Umland) zu erschließen. Zudem gilt es, in Pilotprojekten Erfahrungen zum Aufbau der Wasserstoffwirtschaft zu sammeln und hierbei mit allen beteiligten Akteuren Wege und Möglichkeiten für den zügigen Aufbau von notwendiger Infrastruktur zu entwickeln. Die Inhalte dieser ersten Phase tragen auch dazu bei, dass Unternehmen Planungssicherheit erhalten.

Die Pilotprojekte in Phase 1 werden sich voraussichtlich auf den Verkehrssektor konzentrieren, wie es auch bei dem bereits geplanten STAWAG-Projekt oder im Rahmen des HyExpert-Projekts Aachen PLUS der Fall ist. Hintergrund ist hierbei, dass im Verkehrssektor die Zahlungsbereitschaft für Wasserstoff (ca. 9 EUR pro kg) höher ist als in anderen Sektoren. Die Szenarien zeigen jedoch, dass neben dem Verkehrssektor mittel- und langfristig insbesondere die Sektoren Industrie und Gewerbe potenzielle Abnehmer für grünen Wasserstoff sein werden. Deshalb sollte es in einer Mitte der 20er Jahre beginnenden zweiten Phase vor allem um die – möglichst leitungsgebundene – Versorgung von Ankerkunden in diesen Bereichen gehen.

In einer dritten Phase steht dann die Verdichtung der leitungsgebundenen Wasserstoffversorgung in Aachen im Mittelpunkt, d. h. der Anschluss weiterer Unternehmen und ggf. Haushalte an die dann existierende Verteilungsgrundstruktur für Wasserstoff. Wie stark in dieser Phase nachverdichtet wird, hängt zum einen an

Verfügbarkeit und Preis von Wasserstoff zu diesem Zeitpunkt und zum anderen an der Nachfrage in den verschiedenen Sektoren, die insbesondere durch Verfügbarkeit und Preise von Alternativtechnologien bestimmt sein wird. Das hier beschriebene Phasenmodell ist schematisch in *Abbildung 41* dargestellt.



Abbildung 41: Phasenmodell für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Aachen

Empfehlungen für Maßnahmen der Stadt Aachen

Im Folgenden sind Empfehlungen für Maßnahmen dargestellt, mit denen die Stadt Aachen den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft aktiv unterstützen und begleiten könnte. Dabei können die Startzeitpunkte der Maßnahmen grob den oben genannten Phasen zugeordnet werden.



Recht & Regulierung

Berücksichtigung von Wasserstoffinfrastruktur und EE bei der Raumplanung (Phase 1)

Zur Unterstützung des Aufbaus von notwendiger neuer Infrastruktur für die Wasserstoffwirtschaft sollten entsprechende Vorhaben bei der Raum- und Flächennutzungsplanung berücksichtigt werden, um zügig ausreichend Flächen für Infrastruktur zur Verfügung zu stellen. Hierfür ist ein enger Austausch mit potenziellen Investoren und Betreibern von Wasserstoffinfrastruktur erforderlich.

Auch der Ausbau von Erneuerbare-Energien-Anlagen auf dem Stadtgebiet sollte in diesem Zuge unterstützt werden. Insbesondere das Repowering, aber auch der Neubau von Windenergieanlagen spielt für eine wirtschaftliche Wasserstoffherstellung eine wichtige Rolle. Kombinierte Wind- und PV-Kraftwerke können die Vollbenutzungszahl und damit die Wirtschaftlichkeit von Elektrolyseuren zusätzlich erhöhen.

Vorgaben innerhalb der Konzessionsverfahren für Gas- und Stromnetze (Phase 2)

Am 23. Februar 2029 laufen die Konzessionen für den Betrieb der Gas- und Stromnetze im Stadtgebiet Aachen aus und müssen neu vergeben werden. Bei der Neuvergabe sollte das Thema Wasserstoff berücksichtigt werden. Im Rahmen der Bewerbung auf die Gasnetzkonzession sollten die Bieter darstellen, wie die Umrüstung des Verteilnetzes zur Durchleitung einer zunehmenden Menge klimaneutraler Gase (inkl. Wasserstoff) gelingen kann und welche Maßnahmen sie ergreifen wollen, um bei Bedarf den zügigen Anschluss von Elektrolyseuren an das Gasnetz gewährleisten zu können. Auch bei der Stromnetzkonzession sollte der Anschluss von Elektrolyseuren (analog zu den Erneuerbaren Energien) berücksichtigt werden.

Für die Stadt beginnt die Vorbereitung auf die Konzessionsverfahren schon deutlich früher als im Jahr 2029. Spätestens bis zum 23. Februar 2027 muss eine offizielle Ausschreibung der Konzessionen im Bundesanzeiger

veröffentlicht werden. Spätestens im Laufe des Jahres 2027 muss die Stadt – unter Berücksichtigung der oben genannten Punkte – dann die Kriterien festlegen, nach denen die Vergabe erfolgen soll. Eine frühere Festlegung der Kriterien als im Jahr 2027 ist möglich und üblich.



Governance

Beschleunigung von Genehmigungsverfahren (Phase 1)

Die Beschleunigung von Genehmigungsverfahren für den Neubau von Energieinfrastruktur ist kein Aachen-spezifisches Thema, sondern eine Grundvoraussetzung für das Gelingen der Energiewende in ganz Deutschland. Die Stadtverwaltung kann mit der zusätzlichen Beschleunigung bei der Erteilung von Genehmigungen einen Beitrag zum Klimaschutz und zum Aufbau der Wasserstoffwirtschaft leisten. Hierbei gilt es insbesondere, immissions- und baurechtliche Anträge mit den notwendigen Ressourcen zügig abzuarbeiten. Hierzu zählt auch der Aufbau von zusätzlicher Expertise im neuen Themenfeld Wasserstoff.

Klare Ansprechpartner*innen und Vernetzung innerhalb der Verwaltung (Phase 1)

Die verschiedenen Ansprechpartner*innen zum Thema Wasserstoff innerhalb der Stadtverwaltung sollten eindeutig benannt und ihre Kontaktdaten intern sowie extern transparent kommuniziert werden.

Um kommunale und privatwirtschaftliche Akteure beim Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur optimal unterstützen zu können, erscheint eine intensive Vernetzung aller mit dem Thema Wasserstoff befassten Personen innerhalb der Verwaltung als zielführend. Hierdurch können Erfahrungen ausgetauscht und eine breite Expertise aufgebaut werden.

Die Stadtverwaltung steht somit der Aachener Industrie, dem Gewerbe und der Wissenschaft rund um das Themenfeld Wasserstoff als kompetenter Ansprechpartner zur Verfügung.



Koordination

Koordination und Unterstützung von Verbundprojekten (Phase 1)

Aktuelle Pilotprojekte in der Wasserstoffwirtschaft werden in der Regel als Verbundprojekte gestaltet, das heißt, alle Schritte der Wertschöpfungskette von der Erzeugung bis zum Verbrauch werden berücksichtigt und in das Vorhaben integriert. Solche Projekte haben durch die zahlreichen Lerneffekte, die dabei für die vielen beteiligten Akteure möglich sind, einen hohen Mehrwert. Insbesondere mit dem HyExpert-Projekt Aachen PLUS und dem Wasserstoffprojekt der STAWAG und der ASEAG kann entsprechende Expertise aufgebaut werden. In der Rolle der Koordinatorin und „Enablerin“ sollte die Stadtverwaltung diese und ähnliche Projekte nach Kräften unterstützen und begleiten.

Matchmaking für Erzeuger und Abnehmer (Phase 1)

Eine zentrale Frage – und ein sogenanntes „Henne-Ei-Problem“ – beim Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft ist das Zusammenfinden von potenziellen Erzeugern und Abnehmern von Wasserstoff. Erst wenn beide Seiten erkennen, dass sowohl Erzeuger als auch Abnehmer vorhanden sind, besteht Planungssicherheit für konkrete Projekte.

Die Stadt Aachen kann diesen „Matchmaking-Prozess“ aktiv unterstützen, indem sie bspw. über Veranstaltungen oder ein digitales Tool, wie es bereits in anderen Regionen Deutschlands Anwendung findet, die Verknüpfung der Akteure befördert. Hierbei kann auf bestehende Formate wie den Hydrogen Hub aufgesetzt werden.

Unternehmen aus Aachen sollten auch auf die regelmäßigen Wasserstoffbedarfsabfragen der Fernleitungsnetzbetreiber hingewiesen werden, bei denen Pläne zur Wasserstoffherzeugung und zum potenziellen Bedarf angegeben werden können. Die Fernleitungsnetzbetreiber nutzen die Informationen für die Planung und Weiterentwicklung eines zukünftigen Wasserstofftransportnetzes. Eine rege Beteiligung aus Aachen könnte also die Aussichten auf eine Anbindung der Region an eine Wasserstofffernleitung steigern.

Überregionale Vernetzung zur Beschaffung von Wasserstoff (Phase 1)

Als eine der zentralen strategischen Aufgaben für die Stadt Aachen konnte in der vorliegenden Untersuchung die Beschaffung von grünem Wasserstoff identifiziert werden. Hierbei kann die Stadtverwaltung unterstützen, indem bestehende überregionale Kooperationen, wie z. B. der EMR H2 Booster, weiter intensiviert werden, um potenzielle Bezugsquellen von Wasserstoff zu identifizieren und für Aachen nutzbar zu machen. Als mögliche Ansatzpunkte dienen hierbei unter anderem das belgisch-niederländische Wasserstoffnetzprojekt „Green Octopus“, das von den deutschen Fernleitungsbetreibern geplante Wasserstoff-Startnetz sowie der Gigawattpakt des Rheinischen Reviers, der große Mengen erneuerbaren Stroms unter anderem zur Produktion von grünem Wasserstoff bereitstellen könnte.



Wissensaufbau & Kommunikation

Einrichtung einer zentralen Webseite zum Thema Wasserstoff (Phase 1)

Um Wissen zu verbreiten und die Kommunikation zwischen der Stadtverwaltung und sonstigen Akteuren zu vereinfachen, empfiehlt es sich, Informationen und Kontaktmöglichkeiten auf einer themenspezifischen Webseite der Stadt Aachen zu bündeln. Hier kann z. B. eine Übersicht über wichtige Akteure und Netzwerke, aktuelle Projekte und Vorhaben, Fördermöglichkeiten, Ansprechpartner*innen innerhalb der Stadtverwaltung und weiterführende Informationen zusammengetragen werden.

Unterstützung von Netzwerken (Phase 1)

Zum Erfahrungsaustausch und Wissensaufbau innerhalb der Stadt Aachen existieren bereits verschiedene Netzwerke wie der Hydrogen Hub oder das Zukunftscluster H2. Diese und ggf. weitere Netzwerken sollten von der Stadt aktiv gefördert und unterstützt werden, da die Vernetzung verschiedener Akteure für den Aufbau der Wasserstoffwirtschaft und die Entwicklung innovativer Lösungen essenziell ist.

Informationsveranstaltungen (Phase 2)

Im Rahmen des Hochlaufs der Wasserstoffnutzung in Aachen wird das Thema voraussichtlich nicht nur für Politik, Wirtschaft und Wissenschaft von großer Bedeutung sein, sondern auch für Bürgerinnen und Bürger eine Relevanz entwickeln. Dies können z. B. konkrete Wasserstoffinfrastrukturprojekte sein, an denen insbesondere Anwohnerinnen und Anwohner ein Interesse entwickeln, oder auch Wasserstoffanwendungen im Verkehrs- und Haushaltsbereich, die im Alltag der Menschen zunehmend an Präsenz gewinnen werden. Zielgerichtete Angebote (Webseiten, Broschüren, Veranstaltungen etc.) kommen dem berechtigten Informationsinteresse der Bürgerinnen und Bürger entgegen und sind die Grundlage für die notwendige Akzeptanz im Rahmen der Energiewende.



Kommunale Wärmeplanung (Phase 1)

Auf bundespolitischer Ebene wird aktuell (Stand: November 2022) die Einführung einer verpflichtenden kommunalen Wärmeplanung vorbereitet. Die bereits eingeleiteten Aktivitäten der Stadt Aachen zur Wärmewende können hier genutzt werden, um – gemeinsam mit den kommunalen Versorgungsunternehmen – die besten Optionen für eine klimaneutrale Wärmeversorgung der Stadt Aachen zu identifizieren. Neben Wärmepumpen, Solarthermie, Biogas und -masse sollte auch der Einsatz von Wasserstoff für die Fernwärmebesicherung betrachtet werden. Darüber hinaus gilt es zu prüfen, ob dezentrale Brennstoffzellen oder Wasserstoffkessel bei Privathaushalten und im Gewerbe zukünftig für eine wirtschaftliche Wärmebereitstellung sorgen können. Auch die Nutzung von Abwärme großer Elektrolyseure sowie Leitlinien für die Energie- und Wärmeversorgung von Neubaugebieten sind mögliche Themen für die Wärmeplanung.

Zusammenarbeit mit den kommunalen Unternehmen (Phase 1)

Kommunale Unternehmen in Aachen wie die STAWAG, die Regionetz oder der Aachener Stadtbetrieb spielen eine wichtige Rolle beim Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft. Entsprechend empfiehlt sich eine enge Abstimmung und Zusammenarbeit mit diesen Akteuren – sowohl über die Aufsichtsgremien als auch auf operativer Ebene. Die Stadt Aachen sollte die enge Abstimmung mit den Unternehmen weiter intensivieren, um im Rahmen der Ver- und Entsorgungsaufgabe gemeinsam Wege zur Erreichung der klimapolitischen Ziele zu entwickeln und dabei die Möglichkeiten zur Erzeugung, Verteilung und Nutzung von Wasserstoff (H₂-ready BHKW, Beschaffung von H₂-Fahrzeugen, Errichtung von Elektrolyseuren, Umstellung des Gasnetzes etc.) auszuloten.

Ergebnisabführung kommunaler Unternehmen an die Anforderungen der Energiewende anpassen (Phase 2)

Energieversorgungsunternehmen stehen durch die Energiewende großen Herausforderungen gegenüber. Die Dekarbonisierung der Energieversorgung erfordert massive Investitionen in neue Infrastruktur (EE-Anlagen, Netzausbau, Elektrolyseure, Ladesäulen etc.) und in die Digitalisierung. Gleichzeitig steigt der Regulierungs- und Wettbewerbsdruck in der Energiewirtschaft zunehmend. Um der kontinuierlichen Versorgungsaufgabe gerecht zu werden und gleichzeitig den ökologischen Wandel zu bewältigen, ist also ein hohes Maß an Kapital und Liquidität bei den Versorgungsunternehmen erforderlich. Hier sollte zwischen der Kommunalpolitik und den kommunalen Unternehmen ein Übereinkommen gefunden werden, wie die Kapitalbeschaffung und Gewinnabführung so gestaltet werden können, dass sie den gemeinsamen Interessen und den großen Herausforderungen im Rahmen der Energiewende gerecht werden.

Beschaffung von H₂-Fahrzeugen (Phase 2)

Bei der Umstellung der Fahrzeugflotten von Kommunen und deren kommunalen Unternehmen liegt der Fokus aktuell auf den technisch erprobten, serienmäßig verfügbaren und sehr wirtschaftlichen elektrischen Pkw. Mittelfristig stellt sich aber auch die Frage, wie andere Fahrzeugsegmente – v. a. Nutz- und Baufahrzeuge sowie auch Baumaschinen – dekarbonisiert werden können. Hier stellen Wasserstoffantriebe eine Option dar, die von der Stadt bei der Beschaffung von Fahrzeugen und Maschinen geprüft werden sollte, wobei neben ökonomischen auch die ökologischen Effekte in die Beschaffungsentscheidung einzubeziehen sind.

7. Anhang

Übersicht über geführte Interviews

Michael Carmincke
Vorstand
ASEAG – Aachener Straßenbahn und Energieversorgungs-AG

Horst Robertz
Geschäftsführer
Dr. Babor GmbH & Co. KG

Raphael Jonas
Geschäftsführer Innovation, Umwelt, Standort
Industrie- und Handelskammer Aachen

Stefan Ohmen
Geschäftsführer
Regionetz GmbH

Stefan Sterlepper
Oberingenieur
RWTH Aachen University | Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme und Institut für Thermodynamik

Heiko Thomas
Beigeordneter für Klima und Umwelt, Stadtbetrieb und Gebäude (Dezernat VII)
Stadt Aachen

Dr. Maria Vankann
Koordinierung Nachhaltigkeit & Klimaschutz
Stadt Aachen

Frank Brösse
Geschäftsführer
STAWAG Energie GmbH

Davine Janssen
Projektmanagerin
WaterstofNet VZW

Jürgen Born
Leiter Bauwesen, Sicherheit und Umwelt
Fabio Kraemer
Verfahreningenieur
Zentis GmbH & Co. KG

8. Fußnoten

- ⁱ Gesetzentwurf der Bundesregierung Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/04_EEG_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=8 [05.04.2022]
- ⁱⁱ Eigene Darstellung auf Basis von: Energy-Charts (2022): Installierte Netto-Leistung zur Stromerzeugung in Deutschland, https://energy-charts.info/charts/installed_power/chart.html?l=de&c=DE&stacking=stacked_absolute&chartColumnSorting=default&year=-1&download-format=image%2Fjpeg [22.04.2022] sowie: B E T (2022): Fernglas PLUS. Energiemarktszenario KN 45 Elektronen.
- ⁱⁱⁱ Die Bundesregierung: Klimaschutzgesetz 2021: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> [05.04.2022]
- ^{iv} Gesetzentwurf der Bundesregierung: Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/04_EEG_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=8 [05.04.2022]
- ^v Die verfügbaren Daten zur Aufteilung des bisherigen Verbrauchs auf verschiedene Industriezweige sind veraltet und beruhen häufig auf Schätzungen. Dena (2016): Potenzialatlas Power to Gas, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9144_Studie_Potenzialatlas_Power_to_Gas.pdf [14.01.2021].
- ^{vi} Adolf, Jörg et al. (2017): Wasserstoff – Energie der Zukunft?, https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6893/file/6893_Arnold.pdf [08.02.2021].
- ^{vii} Auskunft von H₂-Mobility.
- ^{viii} NOW GmbH: H₂ Mobility – Mission Infrastruktur, <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/h2mobility/> [03.12.2020].
- ^{ix} Flüssiggas.de (2021): CO₂-Steuer 2022, <https://fluessiggas.de/aktuelles/co2-steuer-2022/> [01.04.2022]
- ^x Der World Energy Outlook geht für Industrieländer im Szenario „Sustainable Development“ bis 2040 von einem Preis von 140 Euro pro Tonne CO₂ aus. IEA (2020): World Energy Outlook.
- ^{xi} Menn, Andreas (2020): Wasserstoff: Das Wettrennen um das neue Öl in Grafiken erklärt, <https://www.wiwo.de/technologie/forschung/infografik-wasserstoff-das-wettrennen-um-das-neue-oel-in-grafiken-erklart/26628002.html> [08.02.2021].
- ^{xii} European Commission (2020): A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe, [01.02.2021].
- ^{xiii} Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung & Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020): Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen, https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Dateien/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barrierefrei.pdf [01.02.2021].
- ^{xiv} STAWAG (2013): 175 Jahre Gasversorgung: https://www.stawag.de/fileadmin/stawag/content/Dokumente/Gas/175_Jahre_Gasversorgung.pdf
- ^{xv} Deutsche Energie-Agentur (2018): Erdölraffinerie, https://www.powertogas.info/fileadmin/Power_To_Gas/Dokumente/Factsheets/DENA-Factsheet8_Eroelraffinerie.pdf [02.02.2021].
- ^{xvi} Die Angaben zum heutigen Wasserstoffverbrauch sind widersprüchlich. Während die Nationale Wasserstoffstrategie von 55 TWh/a spricht, nennen andere Quellen einen Wert von 57 TWh/a. Grafik auf Basis von: Dena (2016): Potenzialatlas Power to Gas, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9144_Studie_Potenzialatlas_Power_to_Gas.pdf [14.01.2021]. Daten von 2014, Datenlage insgesamt schwierig.
- ^{xvii} Kosten aus: Greenpeace Energy EG (2020): Blauer Wasserstoff Lösung oder Problem der Energiewende?, https://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/user_upload/broschuere-wasserstoff.pdf [01.02.2021].
- ^{xviii} Conrads (2020): Post-EEG: aktueller Stand zum Weiterbetrieb von EE-Anlagen nach Auslaufen der gesetzlichen Vergütung, <https://www.energieagentur.nrw/blogs/erneuerbare/beitraege/fachbeitrag-post-eeg-aktueller-stand-zum-weiterbetrieb-von-ee-anlagen-nach-auslaufen-der-gesetzlichen-verguetung/> [01.02.2021].
- ^{xix} European Parliament (2022): 2021/0218(COD). Renewable Energy Directive. Procedure file, [https://oeil.secure.europarl.europa.eu/oeil/popups/ficheprocedure.do?reference=2021/0218\(COD\)&l=en](https://oeil.secure.europarl.europa.eu/oeil/popups/ficheprocedure.do?reference=2021/0218(COD)&l=en) [01.11.2022].
- ^{xx} Greenpeace Energy EG (2020): Blauer Wasserstoff Lösung oder Problem der Energiewende?, <https://www.greenpeace->

[energy.de/fileadmin/user_upload/broschuere-wasserstoff.pdf](https://www.energy.de/fileadmin/user_upload/broschuere-wasserstoff.pdf) [01.02.2021].

xxi Energate (2020): Agar: "Türkiser Wasserstoff nur halb so teuer wie grüner", <https://www.energate-messenger.de/news/201843/agar-tuerkiser-wasserstoff-nur-halb-so-teuer-wie-gruener-> [01.02.2021].

xxii University of Oxford (2020): Turning plastic waste into hydrogen and high-value carbons, <https://www.ox.ac.uk/news/2020-10-13-turning-plastic-waste-hydrogen-and-high-value-carbons> [01.02.2021] und Energate (2020): Bock: "Aus einer Tonne Abfall lassen sich 140 Kilogramm Wasserstoff gewinnen", <https://www.energate-messenger.de/news/202600/bock-aus-einer-tonne-abfall-lassen-sich-140-kilogramm-wasserstoff-gewinnen-> [01.02.2021].

xxiii Wiedemann (2020): Wasserstofftransport per Schiene unproblematisch, <https://www.energate-messenger.de/news/204548/wasserstofftransport-per-schiene-unproblematisch> [01.02.2021].

xxiv Offshore Energy (2022): Suiso Frontier brings worlds 1st LH₂ shipment to Japan, <https://www.offshore-energy.biz/suiso-frontier-brings-worlds-1st-lh2-shipment-to-japan/> [01.02.2021].

xxv Lange, Ronny et al. (2019): Bestands- und Ereignisdatenerfassung Gas – Ergebnisse aus den Jahren 2011 bis 2017, <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/sicherheit/energie-wasser-praxis-dvgw-bestands-ereignisdatenerfassung-gas.pdf> [22.02.2021].

xxvi Wang et al. (2020): European Hydrogen Backbone, https://gasforclimate2050.eu/sdm_downloads/european-hydrogen-backbone/ [22.02.2021].

xxvii DVGW (2021): Erstmals 20 Prozent Wasserstoff im deutschen Gasnetz, <https://www.dvgw.de/der-dvgw/aktuelles/presse/presseinformationen/dvgw-presseinformation-vom-28102021-start-h2-beimischung-in-gasnetze>

xxviii DVGW (2013): Management Summary Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz, https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g1_07_10.pdf [01.02.2021].

xxix FZJ Begleitstudie und EWI.

xxx BMBF (2022): Wasserstoff aus Australien für die Energiewende in Deutschland, <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/2022/05/wasserstoff-australien-energiewende-deutschland.html> [21.05.2022]. Und: BMWK (2022): Deutschland und Katar unterzeichnen Energiepartnerschaft, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/05/20220520-deutschland-und-katar-unterzeichnen-energiepartnerschaft.html> [21.05.2022].

xxxi Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung & Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020): Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen, https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Dateien/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barrierefrei.pdf [01.02.2021].

xxxii Shell Deutschland Oil GmbH (2017): Shell Wasserstoff-Studie: Energie der Zukunft?, https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6647/file/6647_Wasserstoff-Studie.pdf [01.02.2021].

xxxiii Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung & Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (2020): Wasserstoff-Roadmap Nordrhein-Westfalen, https://www.klimaschutz.nrw.de/fileadmin/Dateien/Download-Dokumente/201120_H2_Roadmap_Web_barrierefrei.pdf [01.02.2021] nach Daten des Forschungszentrum Jülich (FZJ) und des Verbandes der Chemischen Industrie (VCI).

xxxiv Greenpeace Energy EG (2020): Blauer Wasserstoff Lösung oder Problem der Energiewende?, https://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/user_upload/broschuere-wasserstoff.pdf [22.02.2021].

xxxv VDI/VDE (2019): Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge, <https://www.vde.com/resource/blob/1927182/ebf217d10a1fd89769029fc2cb54d252/elektromobilitaet-studie-data.pdf> [01.02.2021].

xxxvi H2Global (2022): Our purpose: <https://www.h2-global.de/>

xxxvii Stadt Aachen (Juni 2020), Integriertes Klimaschutzkonzept – Strategiekonzept 2030 mit Handlungsprogramm bis 2025, https://www.aachen.de/DE/stadt_buerger/energie/konzepte_veranstaltungen/klimaschutzkonzept/IKSK_Juni_2020.pdf [05.04.2022]

xxxviii Eigene Darstellung nach: Stadt Aachen (Juni 2020), Integriertes Klimaschutzkonzept – Strategiekonzept 2030 mit Handlungsprogramm bis 2025, https://www.aachen.de/DE/stadt_buerger/energie/konzepte_veranstaltungen/klimaschutzkonzept/IKSK_Juni_2020.pdf [05.04.2022]

-
- xxxix Stadt Aachen (Juni 2020), Integriertes Klimaschutzkonzept – Strategiekonzept 2030 mit Handlungsprogramm bis 2025, https://www.aachen.de/DE/stadt_buerger/energie/konzepte_veranstaltungen/klimaschutzkonzept/IKSK_Juni_2020.pdf [05.04.2022]
- xl Eigene Darstellung nach: Stadt Aachen (Juni 2020), Integriertes Klimaschutzkonzept – Strategiekonzept 2030 mit Handlungsprogramm bis 2025, https://www.aachen.de/DE/stadt_buerger/energie/konzepte_veranstaltungen/klimaschutzkonzept/IKSK_Juni_2020.pdf [05.04.2022]
- xli Stadt Aachen (04. Juli 2019): Niederschrift öffentliche/nichtöffentliche Sitzung des Rates der Stadt Aachen, https://klimanotstand-aachen.de/wp-content/uploads/2019/08/20190619_Rat_Niederschrift_oeffentlicher_Teil.pdf [18.05.2022]
- xlii Europäische Kommission (28.04.2022): Neun Städte in Deutschland nehmen an der EU-Mission 100 klimaneutrale Städte teil, https://germany.representation.ec.europa.eu/news/neun-stadte-deutschland-nehmen-der-eu-mission-100-klimaneutrale-stadte-teil-2022-04-28_de [16.05.2022]
- xliii HyExperts: <https://www.hy.land/hyexpert-ii-region-aachenplus/> [16.05.2022]
- xliv Power-to-Gas-Leitfaden zur Integration Erneuerbare Energien (Dezember 2020) - ISBN 978-3-949088-10-0.
- xlv Eigene Darstellung auf Basis von: Power-to-Gas-Leitfaden zur Integration Erneuerbare Energien (Dezember 2020) - ISBN 978-3-949088-10-0.
- xlvi Lebensmittellexikon.de (2022): Wasserstoff, E949, <https://www.lebensmittellexikon.de/w0000910.php> [09.03.2022].
- xlvii Statistikstelle der Stadt Aachen (2022): Auswertung Melderegister Stadt Aachen
- xlviii Deutschland in Zahlen (2022): Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen, <https://www.deutschlandinzahlen.de/tab/deutschland/volkswirtschaft/entstehung/bruttowertschoepfung-nach-wirtschaftsbereichen> [14.03.2022]
- xlix Automobil Produktion (2021): Continental-Werk Aachen produziert bis 2022, <https://www.automobil-produktion.de/zulieferer/continental-werk-aachen-produziert-bis-2022-124.html> [14.03.2022]
- ¹ Städteregion Aachen (2022): Hochschullandschaft, (b) <https://www.staedteregion-aachen.de/de/navigation/staedteregion/wirtschaft/hochschulen>, [13.04.2022]
- ⁱⁱ Kraftfahrt-Bundesamt (2022): Fahrzeugzulassungen (FZ) - Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Gemeinden 1. Januar 2022 – FZ3, https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/ZulassungsbezirkeGemeinden/zulassungsbezirke_node.html [30.05.2022]
- ⁱⁱⁱ Kraftfahrt-Bundesamt (2022): Fahrzeugzulassungen (FZ) - Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken 1. Januar 2021 – FZ1, https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/ZulassungsbezirkeGemeinden/zulassungsbezirke_node.html [30.05.2022]
- ⁱⁱⁱⁱ Kraftfahrt-Bundesamt (2021): Fahrzeugzulassungen (FZ) - Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Bundesländern, Fahrzeugklassen und ausgewählten Merkmalen 1. Oktober 2021 – FZ27, https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Vierteljaehrlicher_Bestand/vierteljaehrlicher_bestand_node.html [15.03.2022]
- ^{lv} ASEAG – Aachener Straßenbahn und Energieversorgungs-AG (2022) – Zahlen, Daten, Fakten, <https://www.aseag.de/ueber-uns> [15.03.2022]
- ^{lv} Thalys (2022), <https://www.thalys.com/de/de> [15.03.2022]
- ^{lvi} Nightjet (2022), <https://www.nightjet.com/> [15.03.2022]
- ^{lvii} DB Vertrieb GmbH (2022), <https://www.bahn.de/> [15.03.2022]
- ^{lviii} Corridor Rhine-Alpine (2022), <https://www.corridor-rhine-alpine.eu/home.html> [15.03.2022]
- ^{lix} Rail Freight Corridor North Sea-Baltic (2022), <https://rfc8.eu/> [15.03.2022]
- ^{lx} BET (2022): Abschätzung basierend auf internen Daten.
- ^{lxi} Bundesnetzagentur (2022), Marktstammdatenregister, Auszug der Stromerzeugungseinheiten in Aachen am 15.03.2022, <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Einheit/Einheiten/OeffentlicheEinheitenuebersicht> [15.03.2022]
- ^{lxii} Regionetz GmbH (2021), Planungsgrundlagen zur Entwicklung von Ein- und Auspeisungen 2021, https://www.regionetz.de/fileadmin/regionetz/content/Dokumente/Netzinformationen/Planungsgrundlagen_zur_Entwicklung_von

[Ein- und Ausspeisungen 2021.pdf](#) [15.03.2022]

lxiii Stadt Aachen (2022), Ratsinfo - Vorlage - FB 61/0336/WP18, <https://ratsinfo.aachen.de/bi/vo020.asp?VOLFDNR=24789> [15.03.2022]

lxiv Stadt Aachen (2022), Solarförderprogramm der Stadt Aachen, https://www.aachen.de/DE/stadt_buerger/energie/erneuerbare_energien/solkataster/foerderung_verguetung_kosten/index.html [15.03.2022]

lxv Arbeitsgemeinschaft „Aachen hat Energie“ (2022), Freiflächen PV-Anlagen, https://aachen-hat-energie.de/sonne/freiflaechen_ahe.htm [30.05.2022]

lxvi Regionetz GmbH (2022), Über uns, <https://www.regionetz.de/ueber-uns/ueber-uns-1/> [15.03.2022]

lxvii Regionetz GmbH (2022), Hochspannungsnetz Aachen, https://www.regionetz.de/fileadmin/regionetz/content/Dokumente/Netzinformationen/Hochspannungsnetz_Aachen.pdf [16.03.2022]

lxviii 123map GmbH & Co.KG (2022), Stromnetzkarte, <https://www.flosm.de/html/Stromnetz.html?lat=50.7507195&lon=6.16575504&r=11312.819&st=0&sw=powerbusbar,powercompensator,powerconverter,powerline380k,powerline400k,powerline420k,powerline750k,powerline765k,powerlinedchigh,transformer> [16.03.2022]

lxix Regionetz GmbH (2021), Netzstrukturdaten Strom gemäß §27 StromNEV, https://www.regionetz.de/fileadmin/regionetz/content/Dokumente/Netzinformationen/Netzstrukturdaten_Strom_RN_31.12.2020.pdf [16.03.2022]

lxx Regionetz GmbH (2022), Abrechnungsrelevante Monatsbrennwerte und Brennwertgebietsliste Regionetz GmbH <https://www.regionetz.de/privatkunden/gasanschluss/gasabrechnung-g-685/> [16.03.2022]

lxxi Bundesnetzagentur (2022), Umstellung von L- auf H-Gas, <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Vportal/Energie/UmstellungGas/start.html> [16.03.2022]

lxxii Regionetz GmbH (2021), Netzstrukturdaten Gas (1/2) gemäß §27 GasNEV, https://www.regionetz.de/fileadmin/regionetz/content/Dokumente/Netzinformationen/Netzstrukturdaten_Gas_RN_1v2_31.12.2020_06.09.2021.pdf [17.03.2022]

lxxiii Netzstrukturdaten Gas (2/2) gemäß § 27 GasNE, https://www.regionetz.de/fileadmin/regionetz/content/Dokumente/Netzinformationen/Netzstrukturdaten_Gas_RN_2v2_31.12.2020.pdf [17.03.2022]

lxxiv Regionetz GmbH (2022), Netzkarte Regionetz, https://www.regionetz.de/fileadmin/regionetz/content/Dokumente/Downloads/Netzkarte_Regionetz.pdf [17.03.2022]

lxxv GASCADE Gastransport GmbH (2022), Die WEDAL. Versorgung für NRW., <https://www.gascade.de/netzinformationen/unser-leitungsnetz/wedal> [16.03.2022]

lxxvi Thyssengas GmbH (2022), Netzkarten, <https://thyssengas.com/de/netzauskunft/transparenzinformation/netzkarten.html> [16.03.2022]

lxxvii Eigene Darstellung auf Basis von: FNB Gas (2020): H2-Startnetz 2030 (aus dem NEP Gas 2020-2030), <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz/h2-startnetz-2030/> [21.05.2022].

lxxviii Stadt Aachen (2021), CO₂-Bilanz der Stadt Aachen für das Jahr 2020, https://www.aachen.de/de/stadt_buerger/energie/konzepte_veranstaltungen/co2_bilanz_neu/CO2_Bilanz_2020.pdf [17.03.2022]

lxxix Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022), Zahlen und Fakten: Energiedaten, <http://www.bmwi.de/Navigation/DE/Themen/energiedaten.html> [17.03.2022]

lxxx Stadt Aachen (2020), Integriertes Klimaschutzkonzept – Strategiekonzept 2030 mit Handlungsprogramm bis 2025

lxxxi STAWAG (2021), Geschäftsbericht 2020, https://www.stawag.de/fileadmin/user_upload/STAWAG_GB2020_Web_210617.pdf [17.03.2022]

lxxxii Eigene Darstellung basierend auf dem Energieatlas NRW.

lxxxiii RWE (2022), Kraftwerk Weisweiler, <https://www.rwe.com/unser-portfolio-leistungen/betriebsstandorte-finden/kraftwerk-weisweiler> [17.03.2022]

-
- lxxxiv STAWAG (2022), Arbeiten am neuen Blockheizkraftwerk laufen auf Hochtouren, <https://www.stawag.de/ueber-uns/presse/aktuelles/pressemeldungen/arbeiten-am-neuen-blockheizkraftwerk-laufen-auf-hochtouren-1/> [17.03.2022]
- lxxxv Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022), Referentenentwurf – Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor (Bearbeitungsstand 04.03.2022), https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/referentenentwurf-erneuerbaren-energien-und-weiteren-massnahmen-im-stromsektor.pdf?__blob=publicationFile&v=6 [31.03.2022]
- lxxxvi STAWAG (2022), Fernwärmeplan, <https://www.stawag.de/produkte/waerme/> [17.03.2022]
- lxxxvii Eigene Darstellung nach: Stadt Aachen/Statistisches Bundesamt (2022): Zensus 2011.
- lxxxviii Stadt Aachen (2021), Förderprogramm: Energiesparende Maßnahmen im Gebäude, https://www.aachen.de/DE/stadt_buerger/energie/gebaeude_effizienz/altbau/index.html [17.03.2022]
- lxxxix Fraunhofer ISE (2020): Presseinformation. Höhere Wirkungsgrade im Tandem – neuer Solarzellenrekord, https://www.aixtron.com/innovation/Informationen%20Forschungsprojekte/2020_ISE_d_PI_III-V-aufSi_EpitaxieRekord.pdf [21.05.2022].
- xc Eschweiler (2021): BABOR investiert 60 Mio. Euro in Eschweiler, <https://www.eschweiler.de/aktuelles/news/babor-investiert-60-mio-euro-in-eschweiler/> [21.05.2022].
- xcI Eifeler Presse Agentur (2021): Sonnenstrom und Wasserstoffproduktion gehen in Jülich erstmals Hand in Hand, <https://eifeler-presse-agentur.de/2021/10/sonnenstrom-und-wasserstoffproduktion-gehen-in-juelich-erstmal-hand-in-hand/> [21.05.2022].
- xcii WasserstoffNet (2022): Ambitious collaboration between Belgium-the Netherlands-Germany on the development of the hydrogen value chain. Green Octopus, <https://www.wasserstoffnet.eu/en/knowledge-centre/roadmaps-and-studies/green-octopus> [21.05.2022].
- xciii RWTH Aachen (2022): Zukunftscluster Wasserstoff. Projects, <https://h2-cluster.de/projects> [21.05.2022].
- xciv H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG (2022): Auskunft der Pressestelle.
- xcv Eifelschau (2021), Pionierarbeit: Aachen nimmt zwei Wasserstoff-Fahrzeuge für die Abfallsammlung in Betrieb (Artikel vom 03.07.2021), <https://www.eifelschau.de/2021/07/03/pionierarbeit-aachen-nimmt-zwei-wasserstoff-fahrzeuge-fuer-die-abfallsammlung-in-betrieb/> [31.03.2022]
- xcvi Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME) RWTH Aachen University (2022), Auskunft vom 21.03.2022
- xcvii Lehrstuhl und Institut für Kraftwerkstechnik, Dampf- und Gasturbinen (IKDG) RWTH Aachen University (2022), Auskunft vom 22.03.2022
- xcviii Lehrstühle der Aachener Verfahrenstechnik (AVT) an der RWTH Aachen University (2022), Auskunft vom 30.03.2022
- xcix Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. - FNB Gas (2021), Netzentwicklungsplan Gas 2022–2032, https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2021/09/210909_DE_FNB_GAS_2022_SR.pdf [28.03.2022]
- c Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. - FNB Gas (2021), Entwicklung des zukünftigen deutschen Wasserstoffnetzes im Rahmen der Wasserstoffvariante des NEP Gas 2022-2032, <https://fnb-gas.de/news/wasserstoffvariante-des-netzentwicklungsplans-gas-2022-2032/> [28.03.2022]
- ci Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. - FNB Gas (2021), Übersicht Projektmeldungen Marktabfrage WEB und grüne Gase, https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2021/09/anlage_2_uebersicht_projektmeldungen_marktabfrage_web_und_gruene_gase_fuer_sr_2022_1.xlsx [28.03.2022]
- cii NOW GmbH (2021), STAWAG startet Innovationsprojekt: Grüner Wasserstoff für die Region Aachen, <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/stawag-startet-innovationsprojekt-gruener-wasserstoff-fuer-die-region-aachen/> [18.03.2022]
- ciiii Die Werte für 2032-2039 und 2041-2049 wurden interpoliert. Eigene Darstellung auf Basis von: Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. - FNB Gas (2021): Übersicht Projektmeldungen Marktabfrage WEB und grüne Gase, https://fnb-gas.de/wp-content/uploads/2021/09/anlage_2_uebersicht_projektmeldungen_marktabfrage_web_und_gruene_gase_fuer_sr_2022_1.xlsx [28.03.2022].