

KURZSTUDIE

Die Wärmewende und das grüne Gas

Jens Clausen

Michael Huber

Helge Ehrhardt



IMPRESSUM

AUTOREN

Jens Clausen (Borderstep Institut)

Michael Huber (Scientists for Future)

Helge Ehrhardt (Scientists for Future)

HERAUSGEBER

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH
Clayallee 323 | 14169 Berlin | +49 (0)30 306 45 100-1 | www.borderstep.de

ZITIERVORSCHLAG

Clausen, J., Huber, M. & Ehrhardt, H. (2023). Die Wärmewende und das grüne Gas. Berlin: Borderstep Institut.

TITELBILD

© Jens Clausen - Biogasanlage in Langenhagen Kaltenweide

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|-----------|
| Impressum..... | II |
| Inhaltsverzeichnis | III |
| 1 Zusammenfassung..... | 1 |
| 2 Einleitung..... | 3 |
| 3 Das Fallbeispiel..... | 4 |
| 4 Der Wärmebedarf | 5 |
| 4.1 Die vollständige Versorgung mit Biogas | 5 |
| 4.2 Die vollständige Versorgung mit Wasserstoff | 7 |
| 4.3 Die vollständige Versorgung mit Wärmepumpen | 9 |
| 5 Gasnetz oder Wärmepumpen? Ein Fazit..... | 11 |
| Quellen..... | 14 |

1 Zusammenfassung

Der Geschäftsführer der Versorgungsbetriebe Bordesholm (VBB) gab im Juni 2023 den „Kieler Nachrichten“ ein Interview zur Frage der kommunalen Wärmeplanung, welches am 19. Juni 2023 in der Regionalausgabe der Kieler Nachrichten, der „Holsteiner Zeitung“ auf der Seite 33 abgedruckt wurde. In diesem Interview erwähnt er, dass der kommunale Wärmeplan für Bordesholm so gut wie fertig sei: *„Wir priorisieren grünes Gas und Wasserstoff. Wir wollen unser Erdgasnetz weiterhin nutzen, darin aber Biomethan-Gas zum Kunden transportieren. Das Konzept ist aus unserer Sicht sanft und flexibel.“* Dieser Satz ist gegenwärtig typisch für viele, die sich mit der Wärmewende in Deutschland beschäftigen. Dieser Satz nimmt die Ängste vieler Menschen und auch vieler Energieversorger vor einer radikalen Wende hin zu Wärmenetzen und Wärmepumpen auf und verspricht, auch weiter durch Verbrennung zu heizen. Dann können die Thermen einfach an der Wand hängen bleiben, denn *„bei vielen Heizungen ist überhaupt kein neuer Brenner notwendig, weil die meisten auch mit grünem Gas laufen“*. Das klingt erstmal überzeugend. Aber was wäre, wenn alle oder auch nur viele Regionalversorger diesen Weg einschlagen wollen? Wie würde sich die Produktion des dafür nötigen Biogases auf die Landwirtschaft und die Flächennutzung auswirken? Wieviel Strom müsste produziert werden, um die notwendige Wärmemenge durch Wasserstoff bereitstellen zu können? Am Beispiel der einer Stadt mit einer Fläche von ca. 10 km² und eines umliegenden Amtes mit 14 Gemeinden und einer Fläche von 100 km² zeigt diese Studie beispielhaft und auf Basis bundesdeutscher Durchschnittsdaten Konsequenzen auf. Eine Reihe von Zahlen wurde errechnet:

Tabelle 1: Vergleich idealtypischer Szenarien der Wärme-Vollversorgung einer Kleinstadt

| | Biomethan | Wasserstoff | Wärmepumpen |
|---|--|---|--|
| Benötigte Energiemenge (Heizung + Warmwasser) | 61,5 GWh/a Biomethan | 86,1 GWh/a grüner Strom | 18,3 GWh/a grüner Strom |
| Flächenbedarf für die Versorgung der Stadt | 1.233 ha Silomais (10,2 km ²) | 7 Bauplätze für WKA | 1 bis 2 Bauplätze für WKA |
| Flächenbedarf für die Versorgung des Amtes | 2.312 ha Silomais (23,1 km ²) | 13 Bauplätze für WKA | 2 bis 3 Bauplätze für WKA |
| Versorgungssicherheit | Versorgungssicherheit bei Dürre/Missernte gefährdet | Abhängigkeit von der Stabilität des Stromnetzes und der Wasserversorgung der Elektrolyse | Abhängigkeit von der Stabilität des Stromnetzes |
| Klimarisiken | Biogas ist mit THG-Emissionen von 75 bis 140 g CO _{2eq} /kWh nicht klimaneutral | Klimagefährdung durch undichte H ₂ -Leitungen | Klimagefährdung durch (demnächst nicht mehr zulässige) Kältemittel |
| Investitionsbedarf | <ul style="list-style-type: none"> • Biogasanlagen • Ca. 20 GWh Biogasspeicher | <ul style="list-style-type: none"> • Windkraftanlagen • Elektrolyseanlagen • Stromspeicher (vorh.) • Ca. 20 GWh Wasserstoffspeicher • Neue H₂-Ready Thermen in Einzelgebäuden | <ul style="list-style-type: none"> • Wärmepumpen in Einzelgebäuden • Wärmepumpen im Wärmenetz • Stromnetzertüchtigung |

Quelle: Borderstep Institut

DIE WÄRMEWENDE UND DAS GRÜNE GAS

Die Umstellung auf Biogas erfordert in unserem Szenario, in Zukunft 48 % der Ackerfläche mit Silomais zu bebauen. Dadurch stände zukünftig kaum noch Fläche für den Futtermittelanbau zur Verfügung. Zudem ist Biogas aufgrund der Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft nicht klimaneutral und die Maisernte ist abhängig von der Verfügbarkeit von Grundwasser für die Bewässerung.

Die Umstellung auf Wasserstoff erfordert hohe Investitionen in zusätzliche Stromerzeugung mit Wind oder Solar, Elektrolyseanlagen, einen Wasserstoffspeicher und überall dort neue Heizthermen, wo diese nicht wirklich H₂-Ready sind. Aufgrund der geringen Energiedichte von Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas ist u.U. auch notwendig, das Gasnetz auszubauen.

Die in der öffentlichen Debatte wenig geliebte Wärmepumpe steht in diesem Vergleich recht gut da. Sie erfordert eine im Vergleich zu Wasserstoff sehr geringe Stromproduktion und die Investitionskosten für die Ausstattung aller Gebäude der Stadt mit Wärmepumpen dürften deutlich niedriger liegen als die für die Wasserstoffproduktion- und Verteilung.

2 Einleitung

Diese Arbeit hat das Ziel, die Schwierigkeiten der Umstellung des Gasnetzes von Erdgas auf grüne Gase an einem Beispiel exemplarisch herauszuarbeiten. Dafür war ein Interview in den Kieler Nachrichten der Anlass (Scheer, 2023). Die Kurzstudie entstand an der Schnittstelle zwischen den Projekten „Wasserstoff als Allheilmittel“ sowie „Solare Wärmepumpe – Heizen und Kühlen mithilfe der Sonne“, welche gegenwärtig vom Borderstep Institut bearbeitet werden, und dem Projekt „Keypoints der Wärmewende“, welches die Scientists for Future durchführen.

3 Das Fallbeispiel

Im Zentrum der Betrachtung steht eine typische Norddeutsche Kleinstadt. Knapp 8.000 Einwohnerinnen und Einwohner leben hier. Zum Amt gehören 14 Gemeinden mit insgesamt knapp 15.000 Einwohnerinnen und Einwohnern. Die Fläche der Stadt umfasst ca. 1.000 Hektar (ha), alle Gemeinden zusammen kommen auf 10.000 ha. Die Stadt ist mit ca. 780 Personen auf 1 km² relativ dicht besiedelt, während das Amt mit seinen 14 Gemeinden nur eine Bevölkerungsdichte von 150 Personen auf 1 km² aufweist. Zum Vergleich: In der Bundesrepublik Deutschland sind es 238 Personen auf 1 km² (Destatis, 2023a).

Der Geschäftsführer der Versorgungsbetriebe Bordesholm gab im Juni 2023 den „Kieler Nachrichten“ ein Interview zur Frage der kommunalen Wärmeplanung, welches am 19. Juni 2023 in der Regionalausgabe der Kieler Nachrichten, der „Holsteiner Zeitung“ auf der Seite 33 abgedruckt wurde (Scheer, 2023). In diesem Interview erwähnt er, dass der kommunale Wärmeplan für Bordesholm so gut wie fertig sei:

„Wir priorisieren grünes Gas und Wasserstoff. Wir wollen unser Erdgasnetz weiterhin nutzen, darin aber Biomethan-Gas zum Kunden transportieren. Das Konzept ist aus unserer Sicht sanft und flexibel.“

Dieser Satz ist gegenwärtig typisch für viele, die sich mit der Wärmewende in Deutschland beschäftigen (müssen). Er nimmt die Ängste vieler Menschen und auch vieler Energieversorger vor einer radikalen Wende zu Wärmenetzen und Wärmepumpen auf und verspricht, auch weiter durch Verbrennung zu heizen. Dann können die Thermen einfach an der Wand hängen bleiben, denn *„bei vielen Heizungen ist überhaupt kein neuer Brenner notwendig, weil die meisten auch mit grünem Gas laufen“*.

Das klingt erstmal überzeugend. Aber was wäre, wenn alle oder auch nur viele Regionalversorgende diesen Weg einschlagen wollen? Wie würde sich die Produktion des dafür nötigen Biogases auf die Landwirtschaft und die Flächennutzung auswirken? Wieviel Strom müsste produziert werden, um die notwendige Wärmemenge durch Wasserstoff bereitstellen zu können? Am Beispiel einer norddeutschen Kleinstadt und des umliegenden Amtes soll dies hier einmal konsequent durchgerechnet werden. Um die Übertragbarkeit der Überlegungen zu sichern, arbeiten wir dabei an vielen Stellen mit Durchschnittsdaten der Bundesstatistik.

Wir gehen in dieser Kurzstudie nicht davon aus, dass wesentliche Energiemengen über die Gemeindegrenze „importiert“ werden können, da sämtliche Gemeinden bundesweit vor der Herausforderung stehen, ihre Wärmeversorgung umzustellen und insoweit die Gewinnung erneuerbarer Wärme überall deutlich gesteigert werden muss. Regionen mit Energie-Überschüssen werden ggf. Ballungszentren und Industriestandorte beliefern, aber für ländliche Gemeinden mit unterdurchschnittlicher Bevölkerungsdichte wird i. d. R. kein Strom oder Wasserstoff aus den Fernnetzen zur Verfügung stehen.

4 Der Wärmebedarf

Die Stadt hat ca. 8.000 Einwohnende. In ganz Schleswig-Holstein wohnen 2,922 Mio. Menschen auf einer Wohnfläche von 143 Mio. m² (Statistik Nord, 2023a, 2023b). Pro Person sind das 48,9 m². Der Durchschnittsbedarf an Raumwärme (ohne Warmwasser) liegt nach Angabe des Umweltbundesamtes in Deutschland bei jährlich 125 kWh/m²*a (Umweltbundesamt, 2023). Für das warme Wasser kommen noch einmal ungefähr 1.000 kWh pro Person hinzu (Kloth, 2023). Inklusive Warmwasserverbrauch ergibt sich ein Gesamtverbrauch von ca. 145 kWh/m²*a.

In den folgenden Ausführungen gehen wir davon aus, dass sich dieser Wärmebedarf nicht ändert. In der Realität wird er durch die Sanierung von Gebäuden langsam sinken. Laut Klimaschutzgesetz des Bundes muss bis 2045 der Wärmeverbrauch in Wohngebäuden auf durchschnittlich 40 kWh/m²*a und in Gewerbegebäuden auf 52 kWh/m²*a sinken. (Die Bundesregierung, 2021a)

Für unsere Kleinstadt ergibt sich so folgender Bedarf an Wärme: 8.000 Menschen mit je 48,9 m² Wohnfläche verfügen zusammen über 391.200 m² Wohnfläche, die jährlich durchschnittlich 125 kWh/m² an Raumwärme verbrauchen. Insgesamt sind dies 48,9 GWh/a. Hinzu kommen nochmal ca. 8 GWh für das warme Wasser. Der Bedarf an Wärme beträgt also insgesamt 56,9 GWh/a. Zur Bereitstellung dieser Wärmemenge werden jetzt (idealtypisch) drei Technologien alternativ durchgerechnet:

- (1) Eine vollständige Versorgung mit Biogas¹
- (2) eine vollständige Versorgung mit grünem Wasserstoff
- (3) eine vollständige Versorgung über Wärmepumpen

4.1 Die vollständige Versorgung mit Biogas

Die Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe gibt den Ertrag von Silomais pro Hektar mit 3.956 - 5.934 Nm³ Methan an, wobei die Silierverluste bereits berücksichtigt sind (FNR, 2023). Grundsätzlich kann Biomethan auch durch den Anbau von Zuckerrüben, Getreide, Silphie und Sudangras oder durch die Nutzung von Grünland produziert werden. Die Hektarerträge bzw. Gaserträge liegen dann aber teils deutlich niedriger.² Um den Flächenbedarf für eine Vollversorgung von Stadt und Amt abzuschätzen, rechnen wir mit einem Hektarertrag von 5.000 Nm³ Methan. Ein Normkubikmeter (Nm³) Methan hat einen Heizwert von 9,97 kWh (FNR, 2023), womit sich ein Hektarertrag von 49,85 MWh/ha ergibt.

Der Wirkungsgrad von Gasheizungen liegt typischerweise zwischen 90 und 95 % (Reiche, 2023), im Folgenden werden 92,5 % angenommen. Um 56,9 GWh/a Heizwärme incl. Warmwasser bereitstellen zu können, werden also 61,5 GWh Methan benötigt. Um wiederum 61,5 GWh Methan produzieren zu können, benötigt man im Fall von Silomais eine Fläche von 1.233 ha.

Nun hat die Kleinstadt zwar eine Gesamtfläche von 10 km² oder 1.000 ha. Diese Gesamtfläche teilt sich aber auf in 279 ha Siedlungsfläche, 85 ha Verkehrsfläche, 560 ha Vegetationsfläche und 76 ha Gewässerfläche (Stadtistik, 2023). Zu den 560 ha Vegetationsfläche gehören unter anderem 403 ha

¹ Wobei zu beachten ist, dass sich Biogas nicht so ohne weiteres in ein öffentliches Erdgasnetz einspeisen lässt, sondern dafür auf Erdgasqualität zu Biomethan aufbereitet werden muss.

² Bei Grünschnitt oder ökologischen Blühmischungen liegen sie im Vergleich zu Mais bei nur ca. 50 %.

DIE WÄRMEWENDE UND DAS GRÜNE GAS

landwirtschaftlich genutzte Fläche, 102 ha Waldfläche, 1 ha Gehölz, 51 ha Moor, 1 ha Sumpfgebiet und 2 ha vegetationslose Fläche. Innerhalb der Stadt könnte also nur ein Drittel des benötigten Silomais angebaut werden (403 von 1233 ha) und dies auch nur, wenn jeder andere landwirtschaftliche Anbau unterbleibt.

Betrachtet man nicht nur die Stadt, sondern das Amt mit seinen 14 Gemeinden mit insgesamt knapp 15.000 Einwohnenden und einer Fläche von zusammen 10.000 ha, dann lassen sich diese Zahlen hochrechnen. Die nötige Menge Biomethan steigt von 61,5 GWh Methan für 8.000 Menschen auf 115,3 GWh für 15.000 Menschen, die dafür nötige Anbaufläche von 1.233 ha auf 2.312 ha. Es müsste also allein für die Versorgung mit Raumwärme und Warmwasser der privaten Haushalte (das Gewerbe wurde bisher nicht berücksichtigt) auf 23 % der Gesamtfläche des Amtes Silomais angebaut werden. Nun werden in Deutschland aber nur 50,6 % der Gesamtfläche überhaupt landwirtschaftlich (Umweltbundesamt, 2022) und nur etwa 70 % davon für den Ackerbau genutzt. (Destatis, 2023b). 29 % sind Dauergrünland und 1 % sind Obst- und Weinbauflächen. In Schleswig-Holstein liegt der Anteil der landwirtschaftlichen Fläche mit 68,3 % besonders hoch (Umweltbundesamt, 2022), woraus sich ein Anteil der Ackerfläche an der Gesamtfläche von 47,8 % ergibt.

Bezogen auf die ackerbaulich genutzte Fläche steigt der Anteil des Silomais auf über 48 %. Durchschnittlich wiederum werden in Deutschland 13 % der landwirtschaftlichen Fläche für den Anbau von Energiepflanzen genutzt (BMEL, 2020). Dieser Anteil müsste im Amt mehr als verdreifacht werden, um allein den Bedarf an Raumwärme und Warmwasser zu decken. Etwa ein Drittel der landwirtschaftlichen Fläche müsste umgestellt werden vom Anbau von Nahrungs- und Futtermittel auf Silomais für die Energieerzeugung.

Ob bei zunehmender Wasserknappheit im Sommer der enorme Bewässerungsbedarf dieser großen Silomaisfläche gedeckt werden kann, ist unsicher. Darüber hinaus ist Biogas aus dem Anbau von Energiepflanzen mit besonders hohem Gasertrag wie Mais, Getreide oder Zuckerrüben aufgrund der erforderlichen Stickstoffdüngung und der damit verbundenen Freisetzung des Treibhausgases N₂O („Lachgas“ ca. 320-mal stärker wirksam als CO₂) klimaschädlich. So setzt die Bundesregierung inzwischen in ihrer Langfristplanung auf die Reduzierung von Biogas aus Energiepflanzenanbau und priorisiert in ihrer Nachhaltigkeitsstrategie den Anbau von Lebensmittelpflanzen sowie im Rahmen der fossilen Dekarbonisierungsstrategie den Anbau von stofflich nutzbaren Pflanzen für die Industrie (Die Bundesregierung, 2021b). So gehen auch die Langfristszenarien der Energieversorgung nicht von einem weiteren Anstieg der Nutzung von Biomasse für Energieerzeug aus (Ariadne Projekt, 2021; BCG, 2021; Dambeck et al., 2021; Dena, 2021; Gierkink et al., 2022; Sensfuß, 2022).

Auch die Kosten des statt Erdgas einzusetzenden Biogases sind langfristig ein Risikofaktor. Eine im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) erstellte Analyse (Fraunhofer IEE, DBFZ & ESE-Consult, 2023) resümiert:

„Auch wenn das Weizenpreisniveau, als Indikator für den Preis für Maissilage, für die Ernte 2023 insgesamt wieder gesunken ist, dürften die Substratpreise für Biogas auf einem höheren Niveau als vor dem Februar 2022 bleiben.“

Weitere externe Schocks wie die jetzt begonnene erneute Blockade der ukrainischen Schwarzmeerhäfen stellten aus Sicht des Frühjahrs 2023 Preisrisiken dar. Eine wichtige Frage ist deshalb, ob die Betreibenden von Biogasanlagen in einer unsubventionierten Zukunft bezahlbares Biogas zum Heizen liefern können?

Und im Vergleich mit Erdgas ist Biomethan ohnehin - aufgrund der Kosten der Aufbereitung - bereits jetzt deutlich teurer als Erdgas (Schinnerl, Bleyl-Androschin & Eder, 2010). Denn bei der Einplanung von Biogas zur Wärmeversorgung müssten auch die Anforderungen an die Gasqualität beachtet werden. Erdgas ist hochreines Methan, während Biogas eine „schmutzige“ Mischung aus Methan und bis zu 50 % CO₂, bis zu 10 % Wasser, bis zu 1 % Ammoniak und bis zu 1 % Schwefelwasserstoff ist. Dies mindert einerseits den Brennwert und andererseits besteht die Gefahr der Korrosion von Rohrleitungen und Heizthermen (Plöchl, 2007). Da der Betrieb der Brenner einen konstanten Brennwert erfordert, um Korrosionsprobleme zu vermeiden und Abgasgrenzwerte einzuhalten, muss deshalb laut dena (2019) das Biogas vor dem Einspeisen in das Erdgasnetz zu reinem Biomethan aufbereitet werden. Das ist technisch aufwändig und verursacht zusätzliche Kosten.

Da der Wärmebedarf saisonal schwankt, die Produktion von Biogas aber kontinuierlich erfolgt, müssten für das Biomethan Gasspeicher gebaut werden, was bei den Gesamtinvestitionskosten zu berücksichtigen ist. Auch die Nutzung des bestehenden Erdgasnetzes als „externen Gasspeicher“ scheidet aus, da es längerfristig nicht mehr sicher zur Verfügung stehen wird. Denn die Versorgung einzelner Kommunen mit Biogas wird, wenn sie denn überhaupt realisierbar ist, eine seltene Ausnahme bleiben.

Der Weg zu 100 % Wärme aus Biomethan ist deshalb mengenmäßig eher unrealistisch und mit erheblichen Kosten verbunden. Diese müssten im Interesse der mittel- und langfristigen Bezahlbarkeit durch die Gaskundinnen und -kunden mit berücksichtigt werden. Wird Biomethan dagegen nur für einen kleinen Anteil der Versorgung eingeplant, dann erhöhen sich die anteiligen Kosten für die Aufrechterhaltung der Gasnetze entsprechend.

Und auch das Ziel der Klimaneutralität ist durch die Versorgung mit Biogas nicht zu erreichen. Die CO₂-Emissionen von gebäudenah erzeugtem Biogas veranschlagt das Gebäudeenergiegesetz auf 75 g CO_{2eq}/ kWh (Die Bundesregierung, 2020). Und sollte das Biogas doch aus dem Netz bezogen werden, dann erhöht sich der entsprechende Wert auf 140 g CO_{2eq}/ kWh. Beide Werte liegen zwar unterhalb der Treibhausgasemissionen der Verbrennung von Erdgas, aber leider keineswegs bei null. Ein Überblick über Argumente, die Biogas zu einem Irrweg der Energiewende werden lassen, findet sich bei Huber (Huber, 2023).

4.2 Die vollständige Versorgung mit Wasserstoff

Aufbauend auf den Berechnungen zu der Versorgung mit Biomethan wird auch der Wirkungsgrad von Gasheizungen, die Wasserstoff verbrennen, auf 90 bis 95 % geschätzt (Reiche, 2023). Im Folgenden werden ebenso wie bei Biomethan 92,5 % angenommen. Um 56,9 GWh/a Heizwärme incl. Warmwasser bereitstellen zu können, werden also 61,5 GWh Wasserstoff benötigt.

Um wiederum diesen grünen Wasserstoff herstellen zu können, ist die Elektrolyse von Wasser erforderlich. Der Zusammenhang von installierter Elektrolyseleistung und Wasserstoff-Output wird in der Wasserstoff-Roadmap (Fraunhofer ISI & Fraunhofer ISE, 2019, S. 12) wie folgt charakterisiert:

- ▶ Elektrolyseleistung: 1 GW
- ▶ Stromverbrauch der Elektrolyse: 1 GWh/h bzw. 8.760 GWh/a (24/7)
- ▶ Produktionskapazität: 20 t H₂/h bzw. 175.000 t H₂ p.a. (24/7)
- ▶ Energiegehalt Wasserstoff: 714 MWh/h bzw. 5,83 TWh/a (24/7)
- ▶ Wasserstoff-Wirkungsgrad: 71,4 %

DIE WÄRMEWENDE UND DAS GRÜNE GAS

Um also 61,5 GWh Wasserstoff herstellen zu können, wären bei einem Wirkungsgrad von 71,4 % dann 86,1 GWh grüner Strom erforderlich.

Auf dem Weg über die Windkraft wird hier angenommen, dass zur Stromerzeugung Windräder mit einer Nennleistung von 5 MW aufgestellt werden, deren Stromproduktion pro Jahr bei ca. 12,9 GWh liegt (IG Windkraft, 2023). Für die Erzeugung der notwendigen Strommenge von 86,1 GWh wären also ungefähr sieben große Windräder erforderlich. Bei Investitionskosten um die 7,5 Mio. € pro Windrad (Fraunhofer IEE, 2023) fallen allein für die Versorgung der Kleinstadt ca. 50 Mio. € Investitionskosten für die Windräder an.

Weiter müsste mindestens eine Elektrolyseanlage mit einer Leistung von ca. 10 MW aufgestellt werden, die ganzjährig 24/7 zu betreiben wäre. Da Windkraft aber nicht ganzjährig zur Verfügung steht, sondern sich auf einige tausend Stunden beschränkt, sollten mindestens zwei oder sogar drei dieser Anlagen zur Verfügung stehen, um den selbst erzeugten Strom möglichst schnell in Wasserstoff umwandeln zu können. Denn auch wenn die Kleinstadt einer der wenigen Orte ist, die bereits über einen Stromspeicher im Stromnetz verfügen (SMA, 2020), hat dieser Speicher nur eine Leistung von 15 MW. Bei einer Kapazität von 15 MWh (SMA, 2020) kann er den Stromertrag der sieben 5 MW Windräder von zusammen 35 MW bei Vollast knapp zur Hälfte (15 von 35 MW) und auch nur eine Stunde lang aufnehmen, bis er voll ist. Bei Investitionskosten für den Elektrolyseur von 400 € bis 500 € pro kW (Solarserver, 2022) fallen für 10 MW Elektrolyseleistung ca. 4 bis 5 Mio. € an Kosten an. Dazu kommen die Kosten für die Installation. Je nach Anzahl der erforderlichen Geräte können auch hierfür 10 bis 20 Mio. € zusammenkommen.

Zudem ist der Bau eines Speichers für Wasserstoff notwendig, da dieser zum Heizen eingesetzt werden soll und daher vorwiegend in der Zeit von September bis April verbraucht wird. Das notwendige Speichervolumen schätzen wir auf knapp ein Drittel des Jahresverbrauchs bzw. ca. 20 GWh Wasserstoff. Bei einem Energiegehalt von 3 kWh/Nm³ wäre also die Speicherung von 6,7 Mio. Nm³ Wasserstoff erforderlich. Unter Berücksichtigung der um zwei Drittel niedrigeren Energiedichte von Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas wäre dafür ein Speicher erforderlich, der etwa 10 % des Volumens der Kieler Erdgasspeicher hat (Kiel Speicher GmbH, 2023), was etwa 60.000 m³ Volumen entsprechen würde. Die Kosten für eine solche kleine Speicherkaverne dürften gleichfalls im Millionenbereich liegen.

Da Wasserstoff nur etwa ein Drittel der Energiedichte von Erdgas hat, müsste voraussichtlich auch das Erdgasnetz deutlich umgebaut werden, um die im Vergleich zum Erdgas größere Wasserstoffmenge transportieren zu können. Das würde zumindest den Einsatz zusätzlicher Verdichter im Wasserstoffnetz nötig machen. Bezüglich der Rohrleitungen kann ein Niederdrucknetz zwar problemlos auf Wasserstoff umgestellt werden, doch müssen eine ganze Reihe von Dichtungen und Ventilen ausgetauscht werden, da Wasserstoff wesentlich höhere Ansprüche an die Dichtigkeit stellt und die bisher verwendeten Materialien in den Ventilen nicht wasserstofftauglich sind. Nicht nur die Brennerdüsen in den Heizthermen müssen ausgetauscht werden, sondern auch die Nachrüstung mit einem Verbrennungs-, Flammenüberwachungs- und Regelsystem ist erforderlich (Viessmann, 2023). In der Regel wird entweder eine Umrüstung oder der Neukauf einer Wasserstofftherme erforderlich sein. Sowohl die Kosten der Umrüstung im Gasverteilnetz als auch die der Gaskundinnen und -kunden müssen realistischerweise berücksichtigt werden.

4.3 Die vollständige Versorgung mit Wärmepumpen

Ausgangspunkt ist wiederum der Bedarf an Heizwärme incl. Warmwasser von 56,9 GWh/a. Die Effizienz von Erdwärmepumpen wie auch von Luft-Wasser Wärmepumpen wurde z.B. durch das Fraunhofer ISE im Projekt WP-Smart untersucht. Der Ergebnisbericht gibt für Luft-Wasser Wärmepumpen auf der Basis von 29 gemessenen Anlagen Jahresarbeitszahlen in einem Bereich von 2,5 bis 3,8 (Mittelwert 3,1) an (Fraunhofer ISE, 2020; Scientists for Future, 2022a). Auf Basis von 12 gemessenen Erdwärmepumpen wurde für die Jahresarbeitszahlen eine Spanne von 3,3 bis 4,7 (Mittelwert 4,1) ermittelt (a.a.O.). Auch eine Schweizer Untersuchung findet ähnliche Werte (energie Schweiz & Bundesamt für Energie, 2021).

Konservativ wird für die Abschätzung des zu erwartenden Strombedarfs der Gebäude in der Stadt eine durchschnittliche Arbeitszahl von 3,1 angenommen, woraus sich ein Strombedarf für den Betrieb von Wärmepumpen für den gesamten Gebäudebestand von ca. 18,3 GWh/a ergibt. Es wären zur Bereitstellung dieses Stroms keine sieben (wie im Fall des Wasserstoffs), sondern nur 1,5 Windräder erforderlich. Hinzu kommt, dass bei guter Auslegung einer gebäudeintegrierten Photovoltaikanlage mit Stromspeicher ein bis zwei Drittel des zum Heizen benötigten Stroms direkt und sehr kostengünstig im beheizten Gebäude selbst erzeugt werden kann. Es wäre insoweit nicht unwahrscheinlich, dass die Wärmeversorgung der Stadt mit Wärmepumpen mit nur einem Windrad mit Strom versorgt werden könnte, wobei auch hier den Netzbetreibern die Aufgabe trifft, die zeitliche Verfügbarkeit von Angebot und Nachfrage zur Deckung zu bringen. Für die Versorgung der Wärmepumpen mit Strom muss allerdings auch die Leistungsfähigkeit des Niederspannungsnetzes geklärt werden. Hier könnte es vor allem im dichter bebauten Bestand Engpässe geben.

Da von den 3.500 Gebäuden in der Stadt 700 mit Fernwärme versorgt werden, wäre es nötig, 2.800 Gebäude auf Wärmepumpe umzurüsten. Mit Blick darauf, dass nach dem Wärmepumpenboom 2022 die Preise wieder auf das international normale Niveau, wie es z.B. der finnische Wärmepumpenverband dokumentiert (SULPU, 2023), zurückfallen, werden für Luft-Wasser Wärmepumpen Kosten von ca. 15.000 € angesetzt. Für alle 2.800 Gebäude wären das 42 Mio. €.

Neben der Installation der Wärmepumpen muss auch der Zustand der Häuser verbessert werden mit dem Ziel, dass das Gros der Gebäude auf ein Niveau der Effizienzklassen D oder besser hin saniert wird. Die Kosten dieser Sanierung, die mit Blick auf die zu erwartenden hohen Kosten des grünen Gases bei allen Versorgungsoptionen anfallen, werden insoweit in den Vergleich nicht mit einbezogen. Von zentraler Bedeutung ist in diesem Kontext die anteilige Sanierung im Do-it-yourself Verfahren (Scientists for Future, 2023), um so einerseits dem Fachkräftemangel abzuhelpen und andererseits die Kostenbelastung privater Hauseigentümerinnen und -eigentümer in Grenzen zu halten.

Neben den Einzelhäusern muss auch das bisher mit Erdgas beheizte Fernwärmenetz auf regenerative Wärmequellen umgestellt werden. Die Hauptlast der Wärmeversorgung im bestehenden Wärmenetz könnten in Zukunft Großwärmepumpen abdecken, die ihre Wärme aus Erdsonden oder der im städtischen vorhandenen Wärme beziehen (Urbansky, 2021). Die Nutzung der Wärme im See wäre besonders in der Heizzentrale Eiderstede (VBB, 2023) zu überlegen, welche als einzige nahe am See liegt.

Die bestehenden Gasheizwerke bzw. Blockheizkraftwerke (BHKW) würden zunächst zur Spitzenlastabdeckung mit Erdgas weiterbetrieben und im Zuge der weiteren Sanierung des Gebäudebestandes im Laufe der Jahre immer seltener genutzt werden. Eine Alternative zu einer großen Zahl dezentraler Wärmepumpen könnte auch die Ausdehnung des bereits vorhandenen Fernwärmenetzes in den

DIE WÄRMEWENDE UND DAS GRÜNE GAS

dichter bebauten Gebieten sein. Auch könnte das Fernwärmenetz an geeigneten Stellen durch Quartiernetze ergänzt werden.

5 Gasnetz oder Wärmepumpen? Ein Fazit

Zunächst ist anzumerken, dass die Wärmeversorgung in Zukunft grundsätzlich auf einen Mix aus verschiedenen Wärmequellen und Wärmetechnologien hinauslaufen wird. Dies wird auch in unserer Kleinstadt so sein. Neben einzelnen Gebäuden, die bereits mit Wärmepumpe ausgerüstet sind, wird auch ein Wärmenetz betrieben, welches 700 der insgesamt 3.500 Haushalte mit Wärme versorgt (Scheer, 2023).

Über das Netz geben die Versorgungsbetriebe allerdings kaum detaillierte Informationen auf ihrer Website. Es wird lediglich aus den Bescheinigungen der energetischen Bewertung der drei Heizzentralen deutlich, dass fast ausschließlich Erdgas als Brennstoff eingesetzt wird und teilweise KWK-Anlagen genutzt werden (VBB, 2023).

Was wäre also jetzt aus den drei fiktiven und idealtypischen Szenarien einer Vollversorgung mit Biomethan, Wasserstoff oder Wärmepumpen zu lernen? Eine Reihe von Fakten konnten dargestellt werden:

Tabelle 2: Vergleich idealtypischer Szenarien der Wärme-Vollversorgung einer Kleinstadt

| | Biomethan | Wasserstoff | Wärmepumpen |
|---|--|---|--|
| Benötigte Energiemenge (Heizung + Warmwasser) | 61,5 GWh/a Biomethan | 86,1 GWh/a grüner Strom | 18,3 GWh/a grüner Strom |
| Flächenbedarf für die Versorgung der Stadt | 1.233 ha Silomais (10,2 km ²) | 7 Bauplätze für WKA | 1 bis 2 Bauplätze für WKA |
| Flächenbedarf für die Versorgung des Amtes | 2.312 ha Silomais (23,1 km ²) | 13 Bauplätze für WKA | 2 bis 3 Bauplätze für WKA |
| Versorgungssicherheit | Versorgungssicherheit bei Dürre/Missernte gefährdet | Abhängigkeit von der Stabilität des Stromnetzes und der Wasserversorgung der Elektrolyse | Abhängigkeit von der Stabilität des Stromnetzes |
| Klimarisiken | Biogas ist mit THG-Emissionen von 75 bis 140 g CO _{2eq} /kWh nicht klimaneutral | Klimagefährdung durch undichte H ₂ -Leitungen | Klimagefährdung durch (demnächst nicht mehr zulässige) Kältemittel |
| Investitionsbedarf | <ul style="list-style-type: none"> • Biogasanlagen • Ca. 20 GWh Biogasspeicher | <ul style="list-style-type: none"> • Windkraftanlagen • Elektrolyseanlagen • Stromspeicher (vorh.) • Ca. 20 GWh Wasserstoffspeicher • Neue H₂-Ready Thermen in Einzelgebäuden | <ul style="list-style-type: none"> • Wärmepumpen in Einzelgebäuden • Wärmepumpen im Wärmenetz • Stromnetzertüchtigung |

Quelle: Borderstep Institut

DIE WÄRMEWENDE UND DAS GRÜNE GAS

Einer Einordnung bedarf die Zahl der notwendigen Windkraftanlagen (WKA). Im Kreis Rendsburg-Eckernförde gibt es gegenwärtig 192 in Betrieb befindliche WKA und 48 WKA, die sich vor der Inbetriebnahme befinden (Landesamt für Umwelt, 2023). Letztere weisen eine durchschnittliche Leistung von ca. 5 MW und eine durchschnittliche Nabenhöhe von 116 m auf. Der Landkreis ist 2.185 km² groß, es kommt also im Durchschnitt auf 9,1 km² eine WKA. Im Amt mit seinen ca. 100 km² wären also mit Blick auf die anteilige Fläche im Landkreis schon heute 11 WKA zu erwarten. Real sind es sogar schon 17 Anlagen, die in den Gemeinden Groß Buchwald (9 Stück), Loop (6) und Schönbek (2) stehen (Open-Data Schleswig-Holstein, 2023). Die Anlagen haben eine Leistung von 3.450 kW (2), 4.200 kW (3), 5.000 kW (5), 5.500 kW (6) und 6.600 kW (1). Die für die Wärmeversorgung durch Wärmepumpen notwendigen ein bis drei zusätzlichen Anlagen zu errichten, klingt da realistischer, als weitere 7 bis 13 Anlagen für die Wasserstoffversorgung zu bauen.

- ▶ Die Investitionskosten dürften für die Versorgung mit Biogas am niedrigsten sein. Eine 3 MWel Biogasanlage, die in etwa ausreichen müsste, kann für 3.500 €/kWel errichtet werden, was zu Gesamtkosten von 10 bis 15 Mio. € führen könnte (C.A.R.M.E.N., 2020). Allerdings kommen noch Kosten für die Aufbereitung des Biogases auf reines Biomethan sowie für den Zubau von Gasspeichern dazu. Mit Blick auf den Flächenbedarf ist aber sehr wahrscheinlich, dass die Lösung letztlich nur in wenigen Ausnahmefällen realisiert werden kann. Keines der Szenarien, die die Zukunft der Energieversorgung auf nationaler Ebene abschätzen, rechnet mit einer stark steigenden Menge an Bioenergie (Ariadne Projekt, 2021; BCG, 2021; Dambeck et al., 2021; Dena, 2021; Gierkink et al., 2022; Sensfuß, 2022).
- ▶ Die Versorgung mit Wärmepumpen erfordert die Ausstattung von ca. 2.800 Gebäuden mit Wärmepumpen. Gehen die gegenwärtig überhitzten Preise wieder zurück und fallen auf das finnische Niveau von ca. 15.000 € für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe (SULPU, 2023), dann müssten hierfür ca. 42 Mio. € investiert werden.
- ▶ Mit Abstand am teuersten würde voraussichtlich die Versorgung mit Wasserstoff werden. Neben den Kosten für die Windräder (50 Mio. €) und den Elektrolyseur (10 bis 20 Mio. €) ist auch ein Wasserstoffspeicher erforderlich, dessen Kosten nicht abgeschätzt werden können.

Bei einer zukünftigen Umsetzung eines der dargestellten Versorgungssysteme wäre auch zu erwägen, wie der Einsatz von Wärmespeichern und Power-to-Heat Kesseln oder auch die Integration von Solarthermie und Saisonspeichern den Einsatz von Biogas oder Wasserstoff zur Versorgung der Fernwärme Kundinnen und -kunden auf das unbedingt nötige Maß reduzieren und damit die Energie auch verbilligen könnte.

Insgesamt ist die Entscheidung, vor der die beispielhafte Kleinstadt und das Amt wie auch tausende andere Gemeinden stehen, schwierig. Der Reiz, das Gasnetz aufrechtzuerhalten und nach anderen Gasen zum Einspeisen zu suchen ist groß, aber problematisch. Biogas mag hier und da einen Beitrag leisten können, den wertvollsten wohl bei der winterlichen Spitzenlastdeckung in Wärmenetzen. Soll Biogas jedoch zur Grundlastdeckung eingesetzt werden, dann wird der Bedarf schnell höher, als Landwirtschaft und Natur ihn decken können. Zudem ist eine zu große Abhängigkeit vom Maisanbau auch mit Blick auf die Klimaprognosen problematisch. Schon heute beginnen die ersten Regionen damit, die Bewässerung von Gärten und Feldern zu beschränken. Ohne Zugang zu reichlich Wasser wackelt aber die Versorgungssicherheit, denn mit zu wenig Mais kann auch nur zu wenig Biogas erzeugt werden.

DIE WÄRMEWENDE UND DAS GRÜNE GAS

Auch Wasserstoff hat seine Tücken. Die Nachfrage wird aller Voraussicht nach noch für Jahrzehnte das Angebot übersteigen, was zu hohen Preisen führen wird (Clausen, 2022; Clausen, Fichter, Kern & Schmelzle, 2022; Scientists for Future, 2022b). Die Produktion großer Mengen an Wasserstoff für ein lokales System der Wärmeversorgung mag dabei technisch möglich sein, erfordert aber neben sehr viel Strom auch extrem hohe Investitionen.

QUELLEN

- Amt Bordesholm. (2022). Zahlen | Daten | Fakten. Zugriff am 30.7.2023. Verfügbar unter: <https://www.bordesholm.de/amt-bordesholm/herzlich-willkommen/zahlen-daten-fakten>
- Ariadne Projekt. (2021). *Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich*. Potsdam. Zugriff am 24.7.2022. Verfügbar unter: <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet-2045-szenarienreport/#weiterfuehrende-kapitel-110-appendix-modellbeschreibungen-glossar>
- BCG. (2021). *Klimapfade 2.0*. Berlin. Verfügbar unter: <https://www.bcg.com/de-de/klimapfade>
- BMEL. (2020). Flächen für die Rohstoffe der Zukunft. Zugriff am 3.8.2023. Verfügbar unter: <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/bioeconomie-nachwachsende-rohstoffe/nachwachsende-rohstoffe-flaechen.html>
- C.A.R.M.E.N. (2020). Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen. Zugriff am 4.8.2023. Verfügbar unter: <https://www.carmen-ev.de/2020/11/11/wirtschaftlichkeit-von-biogasanlagen/>
- Clausen, J. (2022). *Das Wasserstoffdilemma: Verfügbarkeit, Bedarfe und Mythen*. Berlin: Borderstep Institut. Zugriff am 27.6.2022. Verfügbar unter: https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2022/06/AP2-Wasserstoff-Potenziale-Bedarfe_27-6-2022.pdf
- Clausen, J., Fichter, K., Kern, F. & Schmelzle, F. (2022). *Wasserstoff sparsam einsetzen. Erste Ergebnisse aus dem Vorhaben „Wasserstoff als Allheilmittel?“*. Policy Insights. Berlin. Zugriff am 11.11.2022. Verfügbar unter: <https://www.borderstep.de/publikationen/>
- Dambeck, H., Ess, F., Falkenberg, H., Kemmler, A., Kirchner, A., Kreidelmeyer, S. et al. (2021). *Klimaneutrales Deutschland 2045 Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann*. Berlin: Prognos AG, Öko-Institut, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt Energie. Zugriff am 16.12.2021. Verfügbar unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf
- dena. (2019). *biogaspartner – gemeinsam einspeisen Biogaseinspeisung und -nutzung in Deutschland und Europa Markt, Technik und Akteure*. Berlin. Zugriff am 3.8.2023. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/biogaspartner_-_gemeinsam_einspeisen.pdf
- Dena. (2021). *Dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf
- Destatis. (2023a). Basistabelle Bevölkerungsdichte. Zugriff am 30.7.2023. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Internationales/Thema/Tabellen/Basistabelle_Bevoelkerungsdichte.html
- Destatis. (2023b). Feldfrüchte und Grünland. Zugriff am 3.8.2023. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/_inhalt.html
- Die Bundesregierung. (2020). *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden* (Gebäudeenergiegesetz - GEG)*. Berlin. Zugriff am 5.8.2023. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/>
- Die Bundesregierung. (2021a). *Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) zuletzt geändert August 2021*. Zugriff am 14.1.2023. Verfügbar unter: www.gesetze-im-internet.de/ksg/
- Die Bundesregierung. (2021b). *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie: Weiterentwicklung 2021*. Berlin: Die Bundesregierung. Verfügbar unter:

DIE WÄRMEWENDE UND DAS GRÜNE GAS

- <https://www.bundesregierung.de/re-source/blob/998194/1875176/3d3b15cd92d0261e7a0bc8f43b7839/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-2021-langfassung-download-bpa-data.pdf>
- energie Schweiz & Bundesamt für Energie. (2021). *Bericht «Feldmessungen von Wärme-pumpen-Anlagen. Heizsaison 2020/21»*. Iffingen und Bern. Zugriff am 4.3.2023. Verfügbar unter: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/suche?keywords=&q=Feldmessungen&from=&to=&nr>
- FNR. (2023). Faustzahlen. Zugriff am 30.7.2023. Verfügbar unter: <https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen>
- Fraunhofer IEE. (2023). Investitionskosten. Zugriff am 4.8.2023. Verfügbar unter: https://windmonitor.iee.fraunhofer.de/windmonitor_de/3_Onshore/5_betriebsergebnisse/3_investitionskosten/
- Fraunhofer IEE, DBFZ & ESE-Consult. (2023). *Kurzfristanalyse zu den Kostensteigerungen von Biomasseanlagen*. Kassel, Leipzig, Schrobenhausen. Zugriff am 7.8.2023. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/kurzfristanalyse-zu-den-kostensteigerungen-von-biomasseanlagen-2171342>
- Fraunhofer ISE. (2020). *Wärmepumpen in Bestandsgebäuden*. Freiburg. Zugriff am 7.12.2021. Verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Forschungsprojekte/BMWi-03ET1272A-WPsmart_im_Bestand-Schlussbericht.pdf
- Fraunhofer ISI & Fraunhofer ISE. (2019). *Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland*. Karlsruhe und Freiburg. Zugriff am 16.1.2022. Verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf
- Gierkink, M., Wagner, J., Czock, Lilienkamp, A., Moritz, Mi., Pickert, L. et al. (2022). *Vergleich der „Big 5“ Klimaneutralitätsszenarien*. Köln. Zugriff am 20.7.2022. Verfügbar unter: <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/vergleich-big-5/>
- Huber, M. (2023). *Biogas – ein Irrweg der Energiewende*. Celle. Zugriff am 9.10.2023. Verfügbar unter: <https://drive.google.com/file/d/1VTPoEd8-Ka0yt4KFuGLh6gpSHItcFmCc/view?usp=d>
- IG Windkraft. (2023). Wieviel Strom produziert ein Windrad? Zugriff am 4.8.2023. Verfügbar unter: https://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY%5b0%5d=1147
- Kiel Speicher GmbH. (2023). Entdecken Sie die Kieler Erdgasspeicher. Zugriff am 4.8.2023. Verfügbar unter: <https://www.swkiel-speicher.de/speicher/speicherdaten/unser-speicher>
- Kloth, P. (2023). 2023: Durchschnittlicher Energieverbrauch. Zugriff am 30.7.2023. Verfügbar unter: <https://www.energieheld.de/foerderung/energieberater/durchschnittlicher-energieverbrauch>
- Landesamt für Umwelt. (2023). *Windkraftanlagen (WKA) in Schleswig-Holstein*. Zugriff am 4.8.2023. Verfügbar unter: https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/W/windenergie/Downloads/WKA_Tabelle.pdf?__blob=publicationFile&v=7
- Open-Data Schleswig-Holstein. (2023). Windkraftanlagen. Zugriff am 4.8.2023. Verfügbar unter: <https://opendata.schleswig-holstein.de/dataset/windkraftanlagen-2021-07-13>
- Plöchl, M. (2007). *Technische Nutzung von Biogas*. Zugriff am 3.8.2023. Verfügbar unter: <https://opus4.kobv.de/opus4-slbp/frontdoor/deliver/index/docId/1301/file/biogas05.pdf>
- Reiche, F. (2023). Wirkungsgrad der Heizung – wichtige Kennzahl für die Effizienz des Heizgeräts. *Thermondo*. Zugriff am 30.7.2023. Verfügbar unter: <https://www.thermondo.de/info/rat/vergleich/wirkungsgrad-der-heizung/>

DIE WÄRMEWENDE UND DAS GRÜNE GAS

- Scheer, F. (2023, Juni 19). Wir priorisieren grünes Gas. *Kieler Nachrichten*, S. 33.
- Schinnerl, D., Bleyl-Androschin, J. W. & Eder, M. (2010). *Wirtschaftlichkeit von Biomethan Nutzungspfaden*. Graz, Wien. Zugriff am 7.8.2023. Verfügbar unter: https://boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H73000/H73300/pub/Biogas/2010_Schinnerl__Bleyl__Eder_Biomethan-Nutzungspfade_EnInnov2010_100202.pdf
- Scientists for Future. (2022a). *Wärmepumpen. Die klimaneutrale Wärmeversorgung im Neubau und für Bestandsgebäude*. Berlin. Zugriff am 4.1.2023. Verfügbar unter: <https://de.scientists4future.org/keypoints-kommunale-waermewende/>
- Scientists for Future. (2022b). *Wasserstoff in der Energiewende: unverzichtbar, aber keine Universal-lösung*. Berlin. Zugriff am 9.12.2022. Verfügbar unter: <https://de.scientists4future.org/keypoints-kommunale-waermewende/>
- Scientists for Future. (2023). *Ein energieeffizienter Gebäudebestand. Eine kommunalpolitische Herausforderung*. Berlin. Verfügbar unter: <https://de.scientists4future.org/keypoints-kommunale-waermewende/>
- Sensfuß, F. (2022, November 15). Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Karlsruhe. Zugriff am 10.12.2022. Verfügbar unter: <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php>
- SMA. (2020). Inselnetz Bordsesholm: Stromversorgung auch bei Netzausfall. Zugriff am 4.8.2023. Verfügbar unter: <https://www.sma-sunny.com/inselnetz-bordesholm/>
- Solarserver. (2022). Fraunhofer ISE erwartet Kosten von 400 bis 500 Euro pro kW für Wasserelektrolyse im Jahr 2030. Zugriff am 4.8.2023. Verfügbar unter: <https://www.solarserver.de/2022/02/09/kostenanalyse-wasserelektrolyse-systeme/>
- Stadistik. (2023). Bordsesholm – Zahlen, Daten und Fakten. Zugriff am 3.8.2023. Verfügbar unter: <https://stadistik.de/stadt/bordesholm-01058022/>
- Statistik Nord. (2023a). Bevölkerungsstand und -entwicklung. Zugriff am 30.7.2023. Verfügbar unter: <https://www.statistik-nord.de/zahlen-fakten/bevoelkerung/bevoelkerungsstand-und-entwicklung>
- Statistik Nord. (2023b). Wohngebäude- und Wohnungsbestand. Zugriff am 30.7.2023. Verfügbar unter: <https://www.statistik-nord.de/zahlen-fakten/bautaetigkeit-wohnen/wohngebäude-und-wohnungsbestand>
- SULPU. (2023). *Sales statistics and charts for 2022*. Turku. Zugriff am 5.3.2023. Verfügbar unter: <https://drive.google.com/file/d/1-BcNbYIY5nAGCnejc9t7uNWE6EaWC2m-/view>
- Umweltbundesamt. (2022). Struktur der Flächennutzung. Zugriff am 3.8.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/struktur-der-flaechennutzung#die-wichtigsten-flaechennutzungen>
- Umweltbundesamt. (2023). Mehr Haushalte, größere Wohnflächen – Energieverbrauch pro Wohnfläche sinkt. Zugriff am 30.7.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#mehr-haushalte-grossere-wohnflaechen-energieverbrauch-pro-wohnflaechen-sinkt>
- Urbansky, F. (2021). Nutzung von Seethermie technisch und wirtschaftlich möglich. Zugriff am 4.8.2023. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/energieeffizienz/energie---nachhaltigkeit/nutzung-von-seethermie-technisch-und-wirtschaftlich-moeglich/19678154>
- VBB. (2023). Fernwärme. Zugriff am 4.8.2023. Verfügbar unter: <https://www.vb-bordesholm.de/waerme.html>

DIE WÄRMEWENDE UND DAS GRÜNE GAS

Viessmann. (2023). Durchbruch für klimafreundliches Heizen mit Wasserstoff. Zugriff am 4.8.2023.
Verfügbar unter: <https://www.viessmann.family/de/newsroom/unternehmen/durchbruch-fuer-klimafreundliches-heizen-mit-wasserstoff.html>

DIE WÄRMEWENDE UND DAS GRÜNE GAS

| | |
|-------------------|-------------------------------|
| a | Jahr |
| a.a.O. | am angegebenen Ort |
| BHKW | Blockheizkraftwerk |
| CO ₂ | Kohlendioxid |
| CO _{2eq} | Kohlendioxid-Äquivalente |
| el | elektrisch |
| g | Gramm |
| GWh | Gigawattstunde |
| H ₂ | Wasserstoff |
| ha | Hektar |
| i. d. R. | in der Regel |
| km ² | Quadratkilometer |
| kWh | Kilowattstunde |
| KWK | Kraft-Wärme-Kopplung |
| m ² | Quadratmeter |
| Mio. | Millionen |
| MWh | Megawattstunde |
| N ₂ O | Distickstoffmonoxid (Lachgas) |
| Nm ³ | Normkubikmeter |
| p.a. | pro Jahr |
| t | Tonne |
| WKA | Windkraftanlage |