

Heuristischer Ansatz für eine nachhaltige und CO₂-neutrale Energieversorgung

Heuristic Approach Towards a Sustainable and CO₂-neutral Energy Supply

Stand: Dez. 2023

Autor: Wolfgang Beier

wolfgang.beier@eets-consulting.eu

Dieser Beitrag wurde durch Diskussionen über Aktionen von Endnutzern zum Klimaschutz angeregt. Jeder wollte einen Beitrag leisten aber keiner wusste, was dieser Beitrag im Großen und Ganzen für das Klima ausmacht oder ob er überhaupt notwendig ist. Oder vielleicht sogar „Nebenwirkungen“ in ganz anderen Bereichen hervorrufen würde.

Deshalb hier ein Vorschlag, der der Erkenntnis folgt, dass sehr komplexe Projekte auch von den besten Experten nicht vollständig in der gesamten Breite und in der gesamten technologischen Tiefe jedes Details verstanden werden kann.

Es ist auch deshalb üblich, große Projekte in Schichten zu beschreiben. Zuerst Ziele (das „**was**“ wollen wir haben) dann eine abstrakte Funktionsbeschreibung (das „**wie**“ soll das alles funktionieren) und schließlich viele Detailspezifikationen einschließlich der Interaktionen untereinander (das „**womit**“ werden wir das hinbekommen).

Für das „wie“ ist das „was“ verbindlich. Für das „womit“ ist wiederum das „wie“ verbindlich“. So braucht sich nicht jeder Experte um Details eines anderen Bereiches zu kümmern.

Der nachfolgende Beitrag ist ein Vorschlag für das „wie“ – also eine eher abstrakte Beschreibung für das Gesamtsystem, das z.B. unsere Energiewende in Deutschland beschreibt.

Jeder Leser kann sich weiter innerhalb dieses Beitrages noch entscheiden entweder
nur bis einschließlich Kapitel 3 und die Zusammenfassung im Kapitel 6, oder
... weiter die leicht abstrakten Beschreibungen der einzelnen Sektoren ohne die Fußnoten, oder
... auch die Fußnoten, oder
... auch die in den Anhängen angegebenen externen Informationen über einzelne Schlüsseltechnologien zu lesen.

Vorwort

Den Satz "...der Weg ist das Ziel" möchte man gerne benutzen, um mit einem Großprojekt anzufangen. Oder „Es ist doch klar, dass wir das brauchen - also fange ich schon mal an“. Das zu tun beruht auf einem Irrglauben, der mindestens bei Großprojekten am Ende zu fatalen Folgen führt.

Das **Ziel** ist das Ziel und das erste, was wir unmissverständlich festlegen müssen, bevor wir den ersten Schritt dahin machen.

Also die Fragen, wo wollen wir hin - welches Problem wollen wir lösen - was gehört dazu und was nicht - welche Teilaufgaben mit welchen Verantwortungen müssen wir definieren - wie interagieren die Akteure untereinander...? Also alles relativ abstrakte Ausgangspunkte, die aber dann die weiteren Schritte oder Ebenen des Gesamtproblems auflösen und das herunter bis zu passenden Technologien in den richtigen Mengen und Vorstellungen der Umsetzungsdauer und anfallenden Kosten.

Das scheint eine banale Erkenntnis zu sein, wird aber allzu oft übergangen und dann fehlt einfach so etwas wie eine von allen unterstützte technische Gesamtarchitektur¹. Diese wird am Ende Kompromisse, Änderungen, Verzögerungen und Verteuerungen verhindern.

Wir brauchen also eine (technische) Architektur für die Implementierung der Energiewende in Deutschland. Und diese muss technologische Weiterentwicklungen und marktwirtschaftliche Mechanismen zulassen und auch berücksichtigen, dass wir in der Welt keine Insellösung schaffen dürfen.

Die nachfolgende Arbeit schlägt so eine technische Architektur vor.

Preamble

One would like to use the phrase "...the way is the goal" to start a major project. Or "It's obvious that we do need this - so I'll get started." Doing this is based on a misconception that ultimately leads to fatal consequences, at least in large projects.

The goal is the goal and is the first thing we must clearly define before we take the first step towards it. So, the questions are, where do we want to go - what problem do we want to solve - what is included and what is not - which subtasks with which responsibilities do we have to define - how do the actors interact with each other...? So, they are all relatively abstract starting points, but they then break down the further steps or levels of the overall problem, all the way down to suitable technologies in the right quantities and ideas about the implementation time and costs involved.

This seems like a banal insight, but it is all too often ignored and then there is simply no such thing as an overall technical architecture that is supported by everyone. In the end, this will prevent compromises, changes, delays and increases in prices.

So, we need a (technical) architecture for the implementation of the energy transition in Germany. And this must allow technological developments and market economy mechanisms and also take into account that we must not create an isolated solution in the world.

The following document proposes such a technical architecture.

¹ der Begriff „Architektur“ wird hier wie in der Bautechnik verwendet und meint eine Vorgabe, definierte Teilbereiche zu einer gewollten Gesamtfunktionalität zusammenzufügen. Diese Teilbereiche haben dann wieder jeweils eine funktionale Architektur, so dass dieser Begriff auch rekursiv angewendet wird.

Inhalt	Seite
Heuristischer Ansatz für eine	1
nachhaltige und CO ₂ -neutrale Energieversorgung.....	1
Heuristic Approach Towards a Sustainable and CO ₂ -neutral Energy Supply	1
Vorwort	2
1 Welches Problem müssen wir lösen	4
2 Vorgehensweise	5
2.1 Konzeptvorgaben	5
3 Konzeptvorschlag	5
3.1 Das Ziel	5
3.2 Der Weg	7
3.3 Gegenseitige Abhängigkeiten	8
4 Das Konzept für die einzelnen Sektoren	9
4.1 Für die Sektoren Haushalte und GHD	9
4.1.1 Arbeitsweise	9
4.1.2 Zusammenfassung für die Sektoren Haushalte und GHD	11
4.2 Für den Sektor Verkehr	14
4.2.1 Der Bedarf der Endnutzer	15
4.2.2 Aufbereitung von Sekundärenergieträgern und Bereitstellung für Endnutzer	17
4.2.3 Zusammenfassung des Sektors Verkehr	17
4.3 Für den Sektor Industrie	20
4.3.1 Arbeitsweise	20
5 Stromspeicherung	23
5.1 Kurzzeitspeicher	23
5.2 Wetterphasenspeicher	24
5.3 Jahresspeicher	25
6 Zusammenfassung	26
Anhang A	27
Schlüsseltechnologien	27
A.1 Große thermische Speicher	27
A.1.1 Carnot-Speicher	27
A.2 Methan-Pyrolyse	28
A.2.1 H₂-Ausbeute aus LNG	29
A.3 Brennstoffzellen	29
A.4 Direct Air Capture (DAC) also CO₂ direkt aus der Luft und weiterverwenden	30
A.4.1 DAC durch Natriumhydroxid:	30
Anhang B	31
Überschlagsrechnungen	31
B.1 CO₂ Physik	31
B.1.1 Optimales Zusammenspiel von KWK und Wärmepumpen	31
B.1.2 CO₂ Zahlen	32
B.1.3 LNG nach Methan	32
B.1.4 Modell der Überschlagsrechnung für den Sektor Verkehr	33
Impressum	34

1 Welches Problem müssen wir lösen

Um eine Idee zu entwickeln, Deutschland vollständig auf erneuerbare und CO₂-freie Energieversorgung umzustellen können wir zunächst einmal Erkenntnisse aus der vergangenen Anfangsphase gewinnen. Das ist u.a. die Erkenntnis, dass wir erneuerbare Primärenergien fast nur aus Sonnenstrahlung², Wind³, erneuerbaren Energien⁴ und Laufwasser⁵ gewinnen können. Und diese neuen Primärenergien haben außer Laufwasser alle jeweils neue Anforderungen an die Vorbereitung, diese den Verbrauchern anzubieten.

Die Herausforderung ist also, den unregelmäßigen und nicht steuerbaren Verlauf der Gewinnung der neuen Primärenergien auf den ebenfalls - aber anders - verlaufenden Bedarf der Verbraucher anzupassen. Bei der Betrachtung des Energieverbrauchs müssen wir zudem verschiedene „Sektoren“ unterscheiden.

Sektoren sind Verbraucherklassen, die jeweils ähnliche Anforderungen an den Verlauf der Höhe und des Zeitpunkts der Bereitstellung von Energieträgern haben.

Heute hat sich eingebürgert diese in „Haushalte“, in „Gewerbe/Handel/Dienstleistungen“⁶, „Verkehr“⁷ und „Industrie“⁸ zu unterteilen.

Hinweis: Die hier verwendete Darstellung einer 1:1 Zuordnung von Energiequellen zu Energienutzern in den einzelnen Sektoren vereinfacht nur das Verständnis. Später in der realen Welt gibt es keinen Unterschied der Stromquellen oder Gasquellen. Lediglich die Verfügbarkeit der Energieträger muss in Ort und Zeit genau den Bedarf der Endnutzer decken.

Deshalb müssen die hier vorgeschlagenen Zuordnungen rechnerisch gesehen werden. In einer realen Welt sind Primärenergieträger austauschbar solange sie aus Sicht der Endnutzer bedarfsgerecht sind und die Anforderungen erfüllen.

² Sonnenstrahlung wird in Deutschland fast nur mit PV-Anlagen gewonnen und das in ähnlich großen Anteilen mit Anlagen auf Gebäudedächern oder im Freiland

³ der Anteil der Windenergie ist größer als der aus PV-Anlagen und wird zum größten Teil an Land und weniger off-shore gewonnen

⁴ zu den erneuerbaren Energien zählen hier neben Bio-Masse auch Umweltwärme und Tiefen-Geothermie. Mit Bio-Masse wird allerdings etwas zurückhaltend umgegangen, weil Bio-Masse der einzige Energieträger ist der einen negative CO₂-Fußabdruck hat und somit eher nicht verbrannt, sondern möglichst nur dessen Wasserstoffanteil genutzt werden sollte.

⁵ Zur Energie aus Laufwasser wird nur der Zulauf in Rückstauanlagen von Flüssen gewertet.

⁶ wird auch oft nur GHD genannt

⁷ einschließlich Binnenschiffe und Flugzeuge

⁸ in der Industrie setzt sich das noch aus dem Verbrauch bei den industriellen Prozessen sowie der ungewollten Erzeugung von CO₂ durch die Produkterzeugung (z.B. Zement) zusammen

2 Vorgehensweise

Die Energiewende wird funktionieren, wenn von vorn herein alle Teilprobleme „auf den Tisch gelegt“ werden und als erstes ein leicht abstraktes Gesamtkonzept definiert und beschlossen wird. Dieses Grobkonzept wird anschließend in Aufgaben und Verantwortungen zerlegt, die dann jeweils durch Spezialisten der relevanten Technologien umgesetzt werden. Diese Spezialisten müssen sich nicht mehr mit dem Gesamtkonzept auseinandersetzen – es sei denn es gibt für einen Bereich des Gesamtkonzeptes keine Lösung. Dann muss es ein neues Gesamtkonzept – wie das unten beschriebene - geben aber keine neue Definition nur des bisherigen nicht lösbaren Teilsystems.

2.1 Konzeptvorgaben

was nicht

Z.T anders als die meisten Technologievorschläge folgt der nachfolgende Vorschlag einem anderen Paradigma. Es ist nicht der Strom auf dem alles andere aufbaut. Es ist auch nicht die Abkehr von fossilen Energieträgern. Es ist auch nicht der schnelle Ausstieg aus existierenden Fahrzeugen mit Verbrennungsmaschinen. Es ist auch nicht das Abtrennen von CO₂ aus Abgasen um es auf ewig zu speichern. Es ist auch nicht der Ausstieg aus Heizungen, die nicht Wärmepumpen sind. Es ist auch nicht die übertriebene Wärmeisolation von Häusern, die bei CO₂-freier Energieversorgung diese nicht mehr verbessert und es ist auch nicht der Ersatz von fossilen Brennstoffen durch Bio-Treibstoffe.

sondern

Die Menge an nicht steuerbar produziertem grünem Strom (aus PV und Wind) muss mit der Menge der machbaren Speicher zusammenpassen. Der dann noch verbleibende Rest wird als Wasserstoff auf Langzeit (< 1 Jahr) gespeichert. Aus fossilen Energieträgern (nur Kohlenwasserstoffe) wird der Wasserstoff CO₂-frei herausgelöst und der verbleibende Kohlestaub industriell verarbeitet. Existierende klassische Fahrzeuge werden mit e-fuel so lange weiter betrieben, bis ihr vertretbares Nutzungsende erreicht ist. E-fuel wird aus Wasserstoff (nicht aus Strom) und rückgewonnenem CO₂ hergestellt. Es wird zunehmend CO₂ statt aus Industrieabgasen nur aus der Luft entnommen und so entsteht kein zu lagernder CO₂ Abfall. Die Anzahl (in thermischer Heizleistung) an Wärmepumpen muss so auf die Anzahl (in Stromliefermenge) der KWK-Anlagen abgestimmt werden, dass die Außentemperaturabhängige Stromproduktion aus KWK der Strommenge entspricht, die die Wärmepumpen brauchen, um die gewünschte Gesamtheizleistung zu erzeugen. KWK-Anlagen können Fernwärme-Gaskraftwerke sein, die dann auch als Reservekraftwerke eingesetzt werden können oder auch dezentrale BHKW für Gegenden ohne Fernwärmenetz. Biogas sollte nicht verbrannt, sondern nur dessen Wasserstoffanteil verwendet werden oder als Biomasse mit negativem CO₂-Fußabdruck großflächig wachsen und verrotten.

3 Konzeptvorschlag

Der Entwurf eines Konzeptes für 30 Jahre in der Zukunft, ohne dass es schon Beispiele für ähnliches gibt, kann nur auf Annahmen, aus Extrapolationen aus der Vergangenheit und Diskussionen über die Konsequenzen der Vorschläge bestehen.

3.1 Das Ziel

Trotzdem kann man heute schon ein Gerüst so eines Konzeptes für eine zukünftige Energieversorgung aufzeigen.

- I. Heute brauchen die 4 definierten Sektoren im Energieversorgungssystem je etwa 600 TWh pro Jahr an Endenergie in Form von verschiedenen Energieträgern. Hier wird angenommen, dass die Nachfrage der Endverbraucher am Ergebnis der Energienutzung (Wärme, mechanische Arbeit, Fahrleistung...) in den nächsten Dekaden in etwa konstant bleibt. Lediglich die Verwendung neuer effektiverer Technologien

wird zu einer Einsparung an Primärenergien führen. Weitere Einsparungen sind willkommen aber nicht zwingend notwendig, um das Ziel „Zero CO₂ Emission“ zu erreichen.

- II. Die Primärenergien der Zukunft werden fast ausschließlich aus grünem Strom (z.B. aus Sonnen- und aus Windenergie), aus Biomasse und aus Laufwasser bestehen.
- III. Es gilt eine Balance zu finden, die die Energienutzungstechnologien der Endnutzer so definieren, dass ein möglichst großer Teil der Primärenergien in Deutschland gewonnen und aufbereitet werden kann. Das wird nicht leicht werden. Mit der breiten Nutzung von grünem Strom muss deshalb sehr vorsichtig umgegangen werden.
- IV. Das hier vorgestellte Konzept basiert auf der Annahme, dass lokal produzierter PV- und Windstrom bis zum Ende der Energieumstellungsphase (etwa 2050) jeweils in der 4-fachen der heutigen Menge zur Verfügung stehen. Energie aus Biomasse und Laufwasser wird eher gleich bzw. leicht zunehmend nutzbar sein.
Hinweis: Von der Energie in der Biomasse sollte wegen ihres negativen Fußabdrucks nur der H₂-Anteil energetisch verwendet werden. Der Kohlenstoff sollte dagegen dauerhaft erhalten bleiben - nicht verbrannt werden. (z.B. in Baustoffen)
- V. Daraus folgt, dass alle Haushalte und auch alle Gewerbebetriebe, Handel- und Dienstleistungsunternehmen (GHD) mit PV-Strom - und kleinen Zwischenspeichern - versorgt werden können (ohne Heizung). Der gesamte PV-Strom (das 4-fache von heute) kann damit in diesen Sektoren „aufgebraucht“ werden.
- VI. Als Heizungstechnologie in den Haushalten und GHD wird der eine Teil der Haushalte/Geschäfte/Werkstätten Wärmepumpen benutzen und der andere Teil Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) durch Fernwärme Kraftwerke oder BHKWs. Dabei muss deren Mengenverhältnis zwischen beiden Nutzungsanteilen möglichst genau einer Vorgabe folgen siehe dazu auch Kapitel B.1.1 in Anhang B. Das resultiert dann darin, dass die KWK-Anlagen neben der Heizleistung für den einen Teil der Nutzer zusätzlich noch genau den Strom liefern, den der andere Teil der Nutzer für seine Wärmepumpen braucht. Damit brauchen die Heizungen keinen Strom direkt aus den Primärenergien, sondern nutzen den Überschussstrom aus Wind und PV, der in günstigen Wetterbedingungen erzeugt aber nicht gebraucht wurde. Dieser Anteil des grünen Stroms wurde in Wasserstoff umgewandelt und als Gas gespeichert. Die KWK-Anlage nutzt ihn später, um Heizungswärme und Strom für die Wärmepumpen zu erzeugen.
- VII. Der bedarfsgerechte Windstrom – also der, den man direkt oder mit nur kurzem⁹ zwischenspeichern verwenden kann – wird zwischen den Sektoren Verkehr und Industrie etwa gleichwertig aufgeteilt. Damit reicht der für Verkehr verfügbare Anteil als Ladestrom am Ende der Übergangsphase für etwa $\frac{2}{3}$ der Pkws und die Hälfte der Zuliefer-Fahrzeuge (BEV). Die verbleibenden Pkws und die Langstrecken-Lkws¹⁰ werden mit Wasserstoff und Brennstoffzellen (FCEV) elektrisch angetrieben. Der dafür notwendige Wasserstoff wird aus importiertem Wasserstoff, durch Methan- oder Bio-Pyrolyse (CO₂-frei) und aus der Überschuss-Windenergie bereitgestellt, die zu Wasserstoff umgeformt und gespeichert wurde.
- VIII. Während der Übergangsphase der Energiewende – also bis etwa 2050 – werden die bestehenden Fahrzeuge, die erst am Ende ihrer individuellen Lebenszeit durch solche mit Antrieben durch erneuerbare Energien ersetzt werden, zunächst weiter mit fossilen Treibstoffen versorgt. Diese werden aber in ihrem Anteil zunehmend durch synthetische Kraftstoffe wie e-Diesel und e-Benzin ergänzt. Am Ende der Übergangszeit sind dann alle fossilen Treibstoffe durch e-fuels ersetzt aber in ihrer Gesamtmenge auch bei null angelangt, weil alle Fahrzeuge durch solche mit neuen Antrieben ersetzt sind. Die

⁹ hier ist mit „kurzem“ zwischenspeichern der Ausgleich über die Dauer von Wetterschwankungen gemeint

¹⁰ auch international fahrende Lkws können als FCEV fahren, weil die Reichweite des Wasserstofftanks pan-europäische Fahrten ohne zu tanken zulässt.

Produktionskapazität von e-fuels bleibt aber durchgehend genutzt, weil Flugzeuge ihren Bedarf an Kerosin auch passend dazu auf e-Kerosin umstellen und weiterhin verwenden.

- IX. Das für die e-fuel-Herstellung benötigte CO₂ wird anfangs aus den Abgasen von industriellen Prozessen gewonnen. Mit der dann zunehmenden Nutzung von e-fuels aus grünem Wasserstoff und wiederverwendetem CO₂ Ausstoß als Ersatz für fossile Kraftstoffe wird der CO₂-Fingerabdruck insgesamt deutlich verringert¹¹. Am Ende der Umstellungsphase, wenn kaum noch CO₂ aus den Abgasen zur Verfügung steht und weiter e-Kerosin produziert werden muss, wird als CO₂ Quelle Direct Air Capture (DAC) (siehe dazu auch Kapitel A.4 in Anhang A), also die direkte Rückgewinnung von Flugzeug CO₂ Abgasen aus der Luft gewonnen und ist damit nachhaltig CO₂-neutral.
- X. Im Laufe der Umstellungsphase der Energieversorgung müssen auch alle Industrie-Prozesse CO₂-neutral werden. Das wird bei den bisher wärmeerzeugenden Energien durch Ersatz mit Wasserstoff erreicht und bei den bisherigen Kraftstoffen zur für Gewinnung mechanischer Arbeit wird zunehmend grüner Strom verwendet.
- XI. Lediglich die Herstellung von Zement hat zwar moderate Anforderungen an die benötigte Energiemenge erzeugt aber chemisch bedingt einen sehr großen Anteil an CO₂. Hier muss tatsächlich Schritt für Schritt die hergestellte Menge an Zement und Kalk auf ein Maß reduziert werden so, dass es am Ende der Umstellungsphase möglich ist, den restlichen unvermeidbaren Ausstoß von CO₂ durch Abtrennung des Kohlenstoffs am Ende einen CO₂-neutralen Prozess zu erreichen. Da hilft es, wenn die Nutzung von Zement in großen Mengen reduziert und durch z.B. kohlenstoffbasierte Baumaterialien ersetzt wird¹². Eine Entsorgung von CO₂ im Erdreich sollte man vermeiden, um eine neue Protestwelle wegen Sicherheitszweifel zu umgehen.

3.2 Der Weg

Die oben formulierten „11 Gebote der Energiewende“ beschreiben (außer Punkt VIII.) die Funktionsweise nach Abschluss der Umstellung auf erneuerbare Energien – also etwa 2050. Bis dahin müssen sowohl die Endnutzer als auch die Technik der Bereitstellung der neuen Energieträger anspruchsvollen Aufwand betreiben was dazu führt, dass es doch eine erhebliche Zeit braucht, bis das erreicht ist – es besteht aber kein technischer Grund warum das nicht auch schneller gehen könnte.

Die Aufgaben in gleichmäßigen Schritten bis zum Ende der Übergangsphase durchzuführen sind:

- (1) die lokale Wind- und PV-Produktion auf das 4-fache ausbauen,
- (2) Ladestationen für BEV-Fahrzeuge mit festen Dauerparkplätzen (über Nacht und am Arbeitsplatz) komplettieren,
- (3) am Ende der jeweiligen Nutzungszeit von Pkws und Kleintransportern diese durch BEV ersetzen,
- (4) aus der Überschussproduktion von Wind- und PV-Strom Wasserstoff gewinnen und als Gas speichern und es bei Bedarf KWK-Anlagen für die Heizungen, alten Gasheizungen und e-fuel-Produktion zur Verfügung stellen,
- (5) das CO₂ aus den Abgasen der Industrie einschließlich aus der Zement- und Kalk-Produktion zurückgewinnen und der e-fuel Produktion bereitstellen,
- (6) eine e-fuel-Produktion aufbauen und damit e-Benzin, e-Diesel und später e-Kerosin herstellen und den fossilen Kraftstoffen zumischen,
- (7) Wasserstoff aus Methan- Bio- und LNG-Pyrolyse CO₂-frei herstellen und als Gas speichern,

¹¹ rechnerisch muss man dafür 50% annehmen, da von 2 Prozessen – Industrieprozess und Fahrleistung – nur „einer“ CO₂-frei wird.

¹² Da hilft auch die Kohlenstoff Produktion in Methan-Pyrolyseprozessen, die in großen Mengen bei der Wasserstoffherstellung anfallen.

- (8) fossile Kraftstoff- und fossile Stromproduktion zurückfahren, wenn die neuen Energieträger bereitstehen,
- (9) Brennstoffzellen massentauglich und langlebig herstellen,
- (10) europaweit standardisierte Wasserstofftankstellen zunächst an Speditionen, später an Laderampen großer Firmen und Autobahntankstellen installieren,
- (11) am Ende der Nutzungszeit und entsprechend der Verfügbarkeit von Wasserstoff (siehe Punkte (4). und (6).) vielfahrende Pkws und Langstrecken-Lkws durch FCEV ersetzen,
- (12) Direct Air Capture (DAC) Anlagen einrichten und Lieferung des aus der Luft gewonnenem CO₂s an die e-Kerosin-Produktionsstellen und damit die weniger werdende CO₂ Filterung aus Industrieabgasen ersetzen

3.3 Gegenseitige Abhängigkeiten

In der Übergangszeit während der Implementierung der neuen Energieträger sind die Zieltechnologien und Nutzer mengenmäßig erst schrittweise vorhanden. Da aber Primärenergieträger, Sekundärenergieträger und Umwandlungstechnologien mengenmäßig auch in der Übergangszeit aufeinander abgestimmt sein und quasi parallel zueinander skaliert werden müssen, gilt es eine Reihe von Regeln einzuhalten.

- a. Die PV-Stromproduktion muss zusammen mit den Kurzzeitspeichern¹³ linear bis zum Ende der Umstellungsphase ausgebaut werden – siehe Punkt (1).
- b. Die Windstromproduktion muss ebenfalls bis zum Ende der Umstellungsphase auf das 4-fache der jetzigen ausgebaut werden – siehe Punkt (1)
- c. Anteil der BEV muss linear gesteigert werden
- d. Kapazität der Speicher hochfahren und dafür weniger steuerbare klassische Kraftwerke einsetzen
- e. H₂ Produktion aus Überschussproduktion von PV und Wind und LNG-Pyrolyse hochfahren und speichern
- f. Passend zu a. und b. muss die klassische Stromproduktion entsprechend zurückgefahren und Schritt für Schritt die freiwerdenden fossilen Kraftwerke stillgelegt oder in thermische Speicher umgewandelt werden¹⁴.
- g. Ladeinfrastruktur für BEV und FCEV dem Bedarf anpassen
- h. entsprechend der hochfahrenden alternativen Antriebe weniger Benzin produzieren

¹³ z.B. vielen kleinen dezentralen Speichern z.T. auch in Privathäusern

¹⁴ siehe dazu Kapitel 3.1 Punkt V. und weiteren eher Wetteranomalien kompensierende Speicher

4 Das Konzept für die einzelnen Sektoren

4.1 Für die Sektoren Haushalte und GHD

4.1.1 Arbeitsweise

In Abbildung 1 ist der Jahresverlauf der Sektoren Haushalte zusammen mit GHD dargestellt¹⁵. Wie man sieht, ließe sich der gesamte Bedarf an **Strom (ohne Heizung)** durch PV-Strom abdecken. Da reicht rechnerisch eine PV-Leistung von etwa 3,5 kW_{peak} auf dem Dach von jedem Haushalt und noch einmal so viel für Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD).

Jahresverlauf Endenergie 2050 der Sektoren Haushalte und Gewerbe [GWh pro Tag]

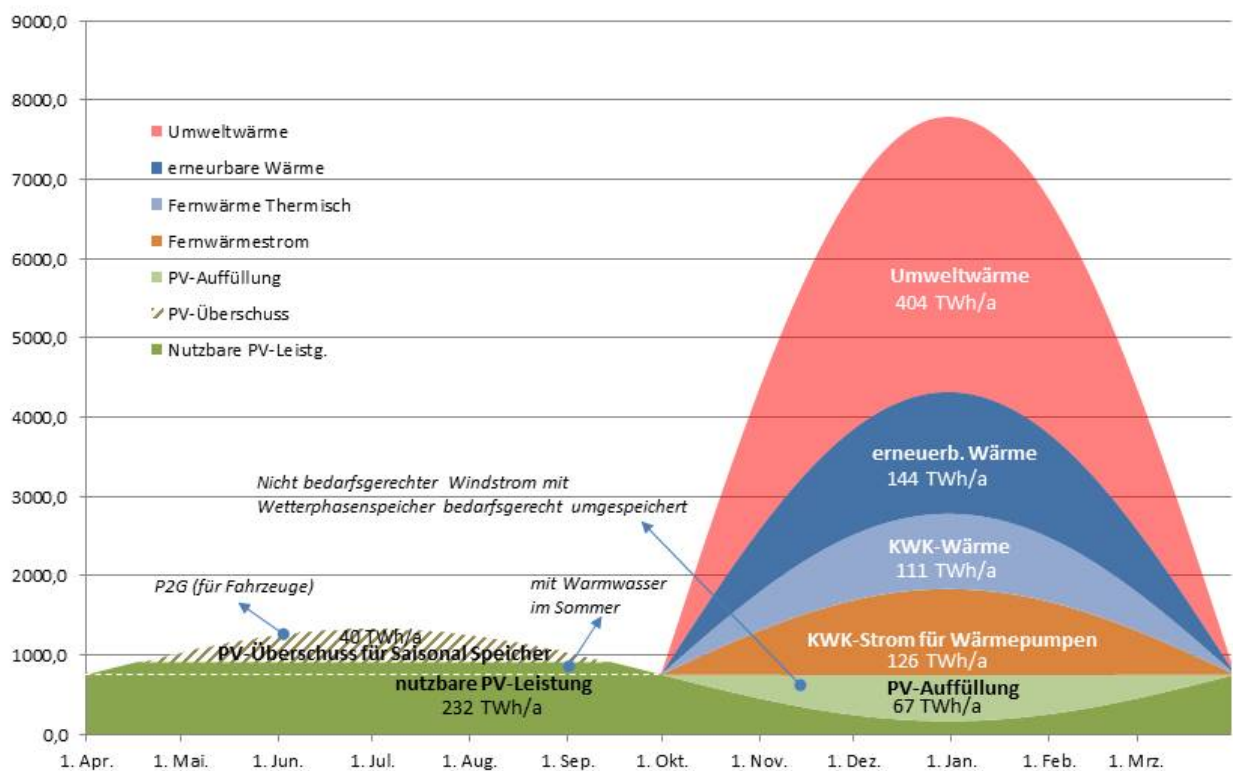


Abbildung 1: Jahresverlauf und Zuordnung des Energiebedarfs von Haushalten und GHD

Das Problem dabei ist die zeitliche Bereitstellung des Stroms. So wie der PV-Strom zeitlich erzeugt wird ist er nur teilweise direkt verwendbar. Dazu müssen zusätzliche entsprechend große Speicher verwendet werden¹⁶.

Der naheliegende Ansatz ist die mittlere zu erwartende Überproduktion der PV-Anlagen im Sommer über P2G in die großen Gasspeicher zu laden¹⁷. Dadurch unterstützt man die H₂-Produktion für die anderen Sektoren und

¹⁵ üblicherweise findet man in den Statistiken nur Darstellungen der Jahreswerte und deren Änderung über mehrere Jahre. Hier wird dafür sichtbar, wie komplex das Angebot der Bereitstellung sein muss, um die Versorgung über ein Jahr bedarfsgerecht zu gestalten. Dazu kommt noch die Anpassung des Angebots an die Bedarfsschwankungen über jeden Tag

¹⁶ den Windstrom zeitlich genau einzupassen löst hier nicht das Problem, weil der bedarfsgerechte Anteil des Windstroms anders gebraucht wird - siehe weiter unten

¹⁷ Dazu können die Elektrolyseure der Windanlagen benutzt werden. Man braucht also keine neue elektrische Leitung und keinen Gas-Anschluss am Ort der PV-Anlage

nimmt im Gegenzug dafür im Winter einen Teil des bedarfsgerechten Windstroms zum Auffüllen des Strombedarfs für Haushalte und GHD zurück. Die gebrauchten Mengen sind in etwa gleich groß.

Damit hat man das jahreszeitlich bedingte PV-Winterloch und die Überproduktion von PV-Anlagen im Sommer geglättet, ohne dass dadurch in der Summe Windstrom oder andere Primärenergien gebraucht werden.

PV-Anlagen haben aber noch eine weitere nicht planbare wetterbedingte Reduktion der Stromproduktion und zusätzlich die eher planbare tageszeitlichen Abhängigkeiten. Dazu müssen Speicher bzw. steuerbare Lasten/Generatoren verwendet werden, die aber keine weitere Primärenergie brauchen.

Die Auswahl der geeignetsten Technologien für diese zwei Speicheraufgaben sollte wegen der unterschiedlichen Speicherzyklusverluste und wegen der Investitionskosten die relativ hohe Zahl von jährlichen Speicherzyklen bei Tagesrhythmus-Speichern berücksichtigt werden. Dort sollte man effektive (guter Lade/Entladewirkungsgrad) aber vielleicht teurere Speicher einsetzen, die dann mit den vielen Vollzyklen pro Jahr und den geringen Verlusten bei jedem Zyklus diese Mehrkosten wett machen.

Bei Wetterphasen-Speichern gibt es das Potential z.B. Pumpspeicherkraftwerke und Wärmespeicher (z.B. „Carnot-Speicher“¹⁸) zu verwenden, die zwar schlechtere Wirkungsgrade haben dafür aber große Kapazitäten und bescheidenere Kosten pro kWh Speicherkapazität. Die schlechteren Wirkungsgrade können aber eher hingenommen werden, weil in diesen Speichern Speicherverluste nur in wenigen Wetterphasen pro Jahr auftreten.

Es ist so also möglich, dass PV-Anlagen mit Hilfe von Speichern den Jahresstrombedarf (ohne Heizungen) von Haushalten und GHD bedarfsgerecht bereitstellen können.

Soweit die Bereitstellung von „Haushaltsstrom“. Jetzt fehlt noch für diese Sektoren die bereitzustellende Energie für die **Heizungen**. Da gibt es jetzt andere Anforderungen. Bei Heizungen geht es am Ende um Wärme. Dafür stehen weitere „Primärenergien“ zur Verfügung als die für die Energieform „Arbeit“. Das sind erneuerbare Wärme¹⁹, Umweltwärme²⁰ und direkte Wärmelieferungen²¹. Diese Energieformen gilt es besonders intensiv zu nutzen, da sie erhebliche Energiemengen z.T. ohne Kosten umweltfreundlich bereitstellen.

Die Bereitstellung von Energie für Heizungen beschränkt sich somit fast ausschließlich auf Wärme aus wärmegeführten Fernwärmeanlagen²² und Strom für Wärmepumpen. Fernwärmeanlagen oder auch Block-Heiz-Kraftwerke (BHKW) werden dafür als wärmegeführte Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) betrieben damit die dort verbrauchte Primärenergie vollständig verwertet wird - auch die damit zwangsläufig erzeugte Wärme. Da KWK-Anlagen je nach verwendeter Technologie ein festes Verhältnis von Wärme und Strom

¹⁸ eine vielversprechende Idee sind sogenannte Carnot-Speicher. Das sind Zusammenstellungen von Wärmepumpen, die einen Vorrat an Wärme speichernden Gasen erhitzen und eine Wärme-Kraft-Maschine, die später dieses heiße Gas wieder über einen Generator in Strom umwandelt. Das interessante daran ist, dass von bestehenden (und abzuschaltenden) Gaskraftwerken der Anteil der Stromerzeugung und seine Einbindung ins Stromnetz wiederverwendet werden kann. Siehe dazu auch Anhang A Kapitel A.1.1

¹⁹ zu der Energieform „erneuerbare“ Wärme zählen Holz und Pellets, sowie Tiefen-Geothermie. Diese brauchen keine Unterstützung durch weitere Bereitstellungen. Die Leistung einer Umwälzpumpe wird hier vernachlässigt, da ihre Verlustenergie ja auch zur Heizenergie beiträgt

²⁰ zur Umweltwärme wird die Temperaturkapazität der Umgebungsluft und die bodennahe Erdwärme einer Wärmepumpe gezählt

²¹ Wärmelieferungen sind meistens Warmwasserlieferungen durch Fernwärmenetze, dessen Wärme durch ein Fernwärmekraftwerk oder z.B. ein Müllheizkraftwerk erzeugt wird. Wärmelieferungen können aber auch dezentral erzeugte Wärmeträger aus z.B. Block-Heiz-Kraftwerken sein.

²² beide „Fernwärme“ Anlagen Technologien nutzen Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und sind somit energetisch gleichwertig. KWK-Anlagen eignen sich besonders aushilfsweise als Reservekraftwerke, wenn sie bei reiner Reservestromproduktion die dann aber überschüssig produzierte Wärme in die Umwelt abgeben

erzeugen sollten auch die Abnehmer, die Raumheizungen, genau dieses Verhältnis zwischen genutzten Wärmepumpen und Fernwärmenutzung aufweisen.²³

Soweit das Konzept für die Bereitstellung von Heizungsenergie für Haushalte und GHD. Am Ende der Energieumstellungsphasen wird das dann CO₂-neutral sein. Und das ohne PV- und bedarfsgerechtem Windstrom oder anderen Energieformen, nur durch mit P2G-gespeichertem überschüssigem Windstrom.

Voraussetzung ist aber, dass der Kraftstoff für die KWK-Anlagen schrittweise bis zum Ende der Übergangsphase CO₂-frei aufbereitet und bereitgestellt wurde. Wärmepumpen mit Strom aus fossilem Gas zu verwenden ist zwar auch schon CO₂ einsparend sollte aber nur in der Übergangsphase verwendet werden.

Heute haben wir als Kraftstoff für KWK-Anlagen fast nur fossiles Erdgas²⁴. Aber wir können heute schon so viel erneuerbaren Wasserstoff in das Erdgas einmischen wie es die Standards für Haushalts-Gas erlauben²⁵. Dann müssen wir für die Übergangszeit den Anteil erneuerbaren Energien schrittweise mit z.B. Bio-Gas oder e-Methan erhöhen bis am Ende kein fossiles Erdgas mehr benötigt wird.

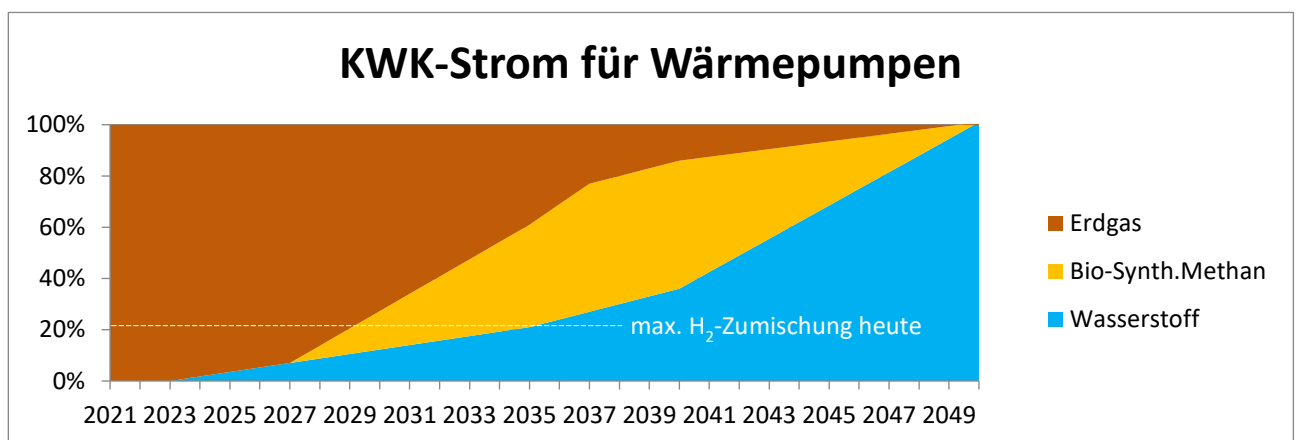


Abbildung 2: Energieformen für die KWK-Anlagen für Heizungen für Haushalte und GHD

In der ersten Phase der Umstellung der Energieversorgung werden die Geräte der Verbraucher ggf. geändert und müssen dann Anteile²⁶ von H₂ bis ca. 20% verarbeiten können. Dann wird in einer weiteren Phase - wenn es keine „alten“ Geräte bei den Verbrauchern mehr gibt - der Wasserstoffanteil im Gasnetz schrittweise weiter erhöht. Das sollte dann bis zu 100% erfolgen²⁷. Dann hat man ein reines Wasserstoffnetz und ein CO₂-freies Heizungssystem von der Primärenergie bis nach dem Verbrauch. Siehe dazu Abbildung 2.

4.1.2 Zusammenfassung für die Sektoren Haushalte und GHD

Um eine Gemeinschaft vollständig auf eine CO₂-neutrale Energieversorgung umzustellen, braucht man:

²³ Siehe dazu in Abbildung 1 KWK-Strom für Wärmepumpen und KWK-Wärme. Die Umweltwärme wird in der Wärmepumpe durch Verwendung des KWK-Stroms eingebunden.

²⁴ und etwas Hausmüll zur Verbrennung

²⁵ siehe auch <https://www.dvgw.de/der-dvgw/aktuelles/presse/presseinformationen/dvgw-presseinformation-vom-28102021-start-h2-beimischung-in-gasnetze>

²⁶ das frühere Stadtgas hatte z.B. einen Anteil von 51% Wasserstoff

²⁷ die benötigte Menge e-Methan (CH₄) wird dann geringer, gleichzeitig werden aber die Produktionsanlagen dafür weiterverwendet, um damit e-Diesel und e-Kerosin zu produzieren (siehe dazu das Kapitel zum Sektor „Verkehr“)

- für die **allgemeine Stromversorgung** die Nutzung der Sonnenstrahlung – z.B. durch PV-Anlagen – die pro Jahr so viel el. Energie liefern, wie in diesen Sektoren gebraucht wird (auch wenn Produktion und Bedarf zeitlich noch nicht zusammenpassen)²⁸
- für die Umwandlung der gewonnenen Primärenergie (hier Sonnenstrahlung) in bedarfsgerechte Energie werden gleichzeitig 3 Arten von **Speichern** gebraucht:
 - Speicher für ca. 250 Zyklen pro Jahr – ggf. dezentral – die z.B. bei PV-Strom die fehlende Leistung bei untergegangener Sonne ausgleichen²⁹
 - Speicher für ca. 24 Zyklen pro Jahr, die etwa 1 Woche unterdurchschnittlichen Ertrag wegen trübem Wetter ausgleichen³⁰
 - Speicher (z.B. mit H₂ als chemisch gespeichertem Windstrom) für einen Zyklus pro Jahr, der den Unterschied des PV-Ertrages im Sommer bzw. Winter ausgleicht³¹
- für die **Raumheizung**, betriebsbereit vor dem Ende der ersten Umstellungsphase (z.B. im Jahr 2035), je Haushalt/GHD eine der folgenden Heizungsarten:
 - diese müssen (ohne „verlorene“ Investitionen³² und) innerhalb der vorgegebenen Verteilungsmenge gewählt werden und mit einem der folgenden Heizungsprinzipien kompatibel sein. Dazu gehören
 - Wärme-Pumpen – optimal wären bei Nutzung von Brennstoffzellen 36% KWK-Anlagen und 64% Wärmepumpen und bei Gasmotoren 21% KWK und 79% Wärmepumpen – dann passt die temperaturabhängige Stromproduktion der KWK-Anlagen mit dem Bedarf von Wärmepumpen zusammen
 - KWK-Fernwärme bzw. BHKW, die den Strom für die Wärmepumpen bedarfsgerecht liefern
 - Tiefen-Geothermie
 - Bio-Brennstoffe³³ und erneuerbares CO₂-neutrales synthetisches Methan
 - reine Gasheizungen, die jeden Methan-H₂-Mix bis 100% H₂ nutzen können
 - oder „klassische“ Erdgasheizungen oder BHKWe, die nur wenig Wasserstoffanteil erlauben, die dann aber am Ende der ersten Phase umgerüstet oder **außer Betrieb genommen** werden müssen
- für die Raumheizung dieser Sektoren, müssen den Endnutzern folgende Energieträger zeitlich und örtlich **bedarfsgerecht** angeboten werden:
 - bis zum Ende der ersten Umstellungsphase (z.B. bis zum Jahr 2035) wird Erdgas in Schritten auf 20% Wasserstoff erhöht – das vertragen auch ältere Gasheizungen
 - ab der Mitte der Umstellung wird erwartet, dass jede klassische Gasheizung jede Beimischung von Wasserstoff verträgt, bis hin zu 100% und das

²⁸ das werden ohne künftige Einsparungen ca. 3,5 kW_{peak} pro Haushalt plus ca. 60% für GHD sein

²⁹ z.B. Akkumulatoren (ggf. Li-Ionen), die in den Häusern betrieben werden

³⁰ z.B. Pumpspeicherwerke oder sogenannte Carnot-Speicher (thermische Stromspeicher)

³¹ z.B. über Power-2-Gas aus der überschüssigen Produktion des Sonnenstrahlungsstroms (z.B. im Sommer oder Schönwetterperioden) und Speicherung in einem Gasspeicher. Im Winter dann Nutzung einer ähnlichen Energiemenge durch Nutzung von nicht bedarfsgerechtem Windstrom und dem im Winter nicht ausgelasteten „PV-Wetterspeicher“ (siehe oben)

³² also alles neu investierte kann nach dem Ende der zweiten Phase der Umstellung weiter genutzt werden

³³ dabei muss in Betracht gezogen werden, dass die verbleibende CO₂-Ausschüttung bei Verrottung von Biomasse wegen der Verhinderung der Verrottung zu CO₂-Abgaben führen kann

- mit CO₂-frei produziertem Wasserstoff zunächst bis auf die dafür zulässige Menge von ca. 20%³⁴ ergänzt
- mit etwa 50% Biogas oder synthetisches Methan enthalten³⁵
- bis zum Ende der zweiten Umstellungsphase (z.B. bis zum Jahr 2050) wird Erdgas nach weiteren Schritten
 - in dem Energieträger Gas für diese Sektoren nicht mehr enthalten sein
 - nur noch Wasserstoff und kein Biogas³⁶ oder keine anderen Gase mehr enthalten
- zur Umstellung der Zusammensetzung von Gas gehören frühzeitig auch Regeln, die für den Betrieb von Fernwärmanlagen und BHKW als Reservekraftwerke eingehalten werden müssen

³⁴ dieser Wert wird noch in entsprechenden Studien endgültig bestätigt werden müssen.

³⁵ das entspricht etwa der Hälfte des heute produzierten Biogases

³⁶ Biogas wird in den anderen Sektoren verwendet

4.2 Für den Sektor Verkehr

Auch die Energieversorgung des Sektors Verkehr erfolgt nach der Übergangsphase (z.B. 2050) nachhaltig und vollständig CO₂-neutral.

Die heutige Verteilung der Energieträger wird von der bisherigen fast ausschließlich fossilen Kraftstoffversorgung, wie in Abbildung 3 dargestellt, auf neue nachhaltige und CO₂-neutrale Energieträger umgestellt. Diese Aufgabe bzw. Verantwortung kann man in 3 voneinander abhängigen Rollen aufteilen. Das sind die Endnutzer, die neue Antriebsenergien verwenden und ggf. ihre Fahrzeuge auf die Verwendbarkeit dieser neuen Kraftstoffe umstellen. Das sind weiter die Aufbereitung und Bereitstellung von Sekundärenergieträgern die von klassischen Endnutzern als Kraftstoff verwendet werden können. Und natürlich die Gewinnung bzw. den Einkauf von Primärenergien, die örtlich, zeitlich und mengenmäßig dem fehlenden Bedarf entsprechen.

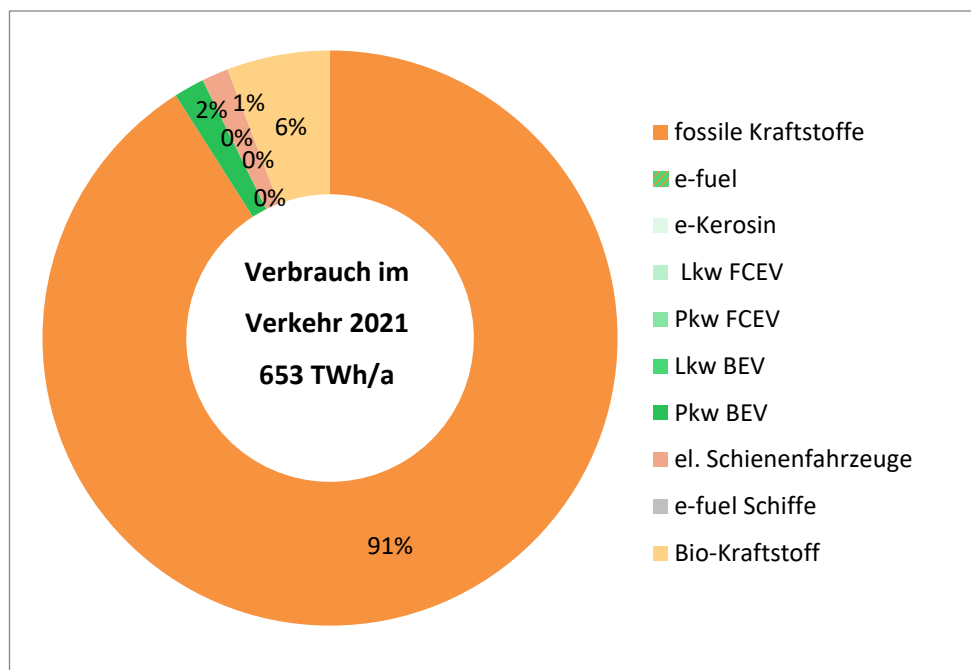


Abbildung 3: Endenergieverbrauch 2021^{37,38}

Dieses Vorgehen tauscht die bisherigen Kraftstoffe in kleinen Schritten kontinuierlich in die neuen nachhaltigen Kraftstoffe aus. Und zwar so, dass Änderungen am Fahrzeug-, an der Herstellungstechnologie- und am Infrastrukturbestand ebenfalls in kleinen und vorzugsweise am Ende des Lebenszyklus der Fahrzeuge stattfindenden Änderungen möglich sind. Am Ende der Umstellungsphase (z.B. 2050) ist dann der gesamte Verkehr sanft auf nachhaltige und gleichzeitig wie in Abbildung 4 dargestellt CO₂-neutrale Energien umgestellt.

³⁷ Quelle: Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, Stand 09/2022

³⁸ <https://www.umweltbundesamt.de/bild/endenergieverbrauch-2021-nach-sektoren>

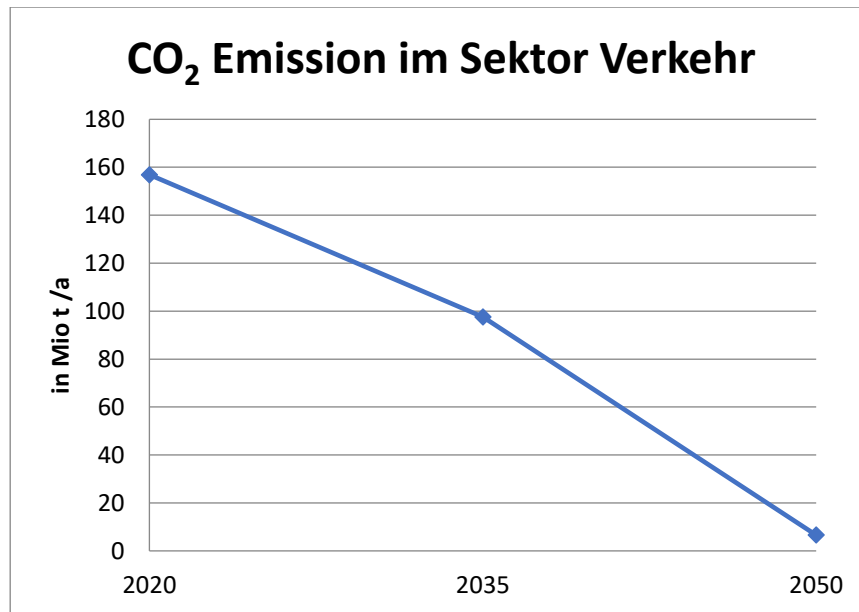


Abbildung 4: CO₂ Emissionen während der Übergangsphase

4.2.1 Der Bedarf der Endnutzer

Die Endnutzer bereiten sich in Absprache mit den Akteuren, die zeitgerecht die neuen „Kraftstoffe“ bereitstellen müssen, auf einen technologisch machbaren und preislich besten Kompromiss vor.

Dabei ist die attraktivste Lösung - die rein auf der Primärenergie Strom basierende Gesamtlösung - wegen der bei weitem nicht ausreichenden herstellbaren Menge grünen Stroms nicht machbar.

Deshalb hier das Konzept der End-Energieträger aus der Sicht der Endverbraucher:

1. Es gibt batterie-elektrische Fahrzeuge (BEV) mit Ladestationen die öffentlich für die Dauer des Ladevorgangs zugänglich sind und an privaten z.B. an Firmenparkplätzen oder eigenen Garagen bzw. Stellplätzen.
2. Es gibt weiter Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge und -Langstrecken-Pkws (FCEV), die den Wasserstoff wie Benzin oder Diesel tanken und auch eine vergleichbare Reichweite haben. Am Anfang der Umstellungsphase werden zunächst Speditionshöfe und Logistikzentren oder große Firmen Wasserstoff-Tankstellen bereitstellen. Später dann auch alle Tankstellen, die leicht darauf erweitert werden können (ähnlich LPG).
3. Es gibt weiterhin Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, die noch mit fossilen Brennstoffen aber mit einer in der Menge stetig zunehmenden Beimischung von synthetischem Kraftstoff (e-fuel) versorgt werden. Die synthetischen Kraftstoffe enthalten die evtl. notwendigen Additive.
4. Flugzeuge werden weiterhin mit Kerosin versorgt. Dieser wird aber ab der Mitte der Umstellungsphase zunehmend aus türkischem Wasserstoff und aus der Luft zurückgewonnenem CO₂ hergestellt (direct air capture DAC, also ein nachhaltig CO₂-neutraler Kreislauf).

Der mengenmäßige Bedarf an Energieträgern sollte so gerechnet werden, dass die Transportleistung – also die Personenkilometer und die Tonnenkilometer - in der Zukunft nicht unbedingt abnehmen werden. Falls das doch geschieht, hat das zwar einen monetären oder flächenverbrauchenden aber keinen ökologischen Effekt mehr.

In Tabelle 1 sind die zukünftigen benötigten nachhaltigen „Kraftstoffe“ und deren hochgerechnete Mengen für Endnutzer aus der Extrapolation der 2020er Werte³⁹ dargestellt. Die zugehörigen Annahmen basieren auf der Beobachtung des Verhaltens der Endnutzer in den letzten Jahren. Die Annahme, dass man mit der Befolgung der Empfehlungen Geld verdienen ist präsenter als die Einsicht, dass die Energiewende allen Nutzern Geld kosten wird.

Daraus folgt, dass die Annahme, wieviel erneuerbarer Strom durch PV-Anlagen, Laufwasser oder Windgeneratoren mit Akzeptanz der Bevölkerung erzeugbar ist, hier deutlich pessimistischer ist als in anderen Diskussionen. Eine (nur) Vervierfachung der jeweiligen Erträge wurde aber angenommen. Das schließt dann aber die Nutzung von strombasierten synthetischen Kraftstoffen aus. Die Nutzung von bedarfsgerechtem Strom mit BEV ist hier mit $\frac{2}{3}$ der Pkws und etwa $\frac{1}{3}$ der Lkws (vorwiegend Lieferfahrzeuge) begrenzt angenommen. Der Rest wird mit Wasserstoff als Energieträger betrieben. Bei Flugzeugen bleiben nur e-fuels, die auf der Basis von türkischem Wasserstoff und zunächst CO₂ aus Industrieabgasen, später nur noch aus DAC hergestellt werden.

Weiter wurde die Annahme getroffen, dass man bestehende voll funktionsfähige Fahrzeuge mit klassischem Antrieb nicht verschrotten oder exportieren kann bevor die normale Nutzungsdauer abgelaufen ist. Das gilt insbesondere auch für Flugzeuge. Deshalb ist die Verwendung von e-Diesel und e-Benzin in der Übergangsphase der Energiewende nicht zu vermeiden. Man kann aber damit gleichzeitig die CO₂-Abgase der Industrie solange wenigstens mit 50% CO₂-Einsparung (zusammen mit der Industrie) reduzieren bis die Industrie kein CO₂ mehr abgibt und somit die e-fuel Produktion auf DAC umgestellt werden muss. Das gilt dann aber nur noch für Flugzeuge, weil die klassischen Fahrzeugantriebe bis dahin alle ausgemustert worden sind.

Ein Rest von Nutzern fossiler Energieträger werden Land- und Baumaschinen oder selten fahrende Einsatzfahrzeuge sein. Diese wird man weiterhin mit e-fuels aus DAC oder Biokraftstoffen versorgen.

Tabelle 1: Nutzung der Sekundärenergieträger im Verkehr

	2020	2035	2050
fossile Kraftstoffe	605,4	368,0	19,9
e-fuel	0,0	79,5	9,2
e-Kerosin	0,0	0,0	79,5
Lkw FCEV	0,0	75,0	199,7
Pkw FCEV	0,0	17,5	89,5
Lkw BEV	0,0	8,3	37,8
Pkw BEV	11,4	39,3	100,1
el. Schienenfahrzeuge	10,0	10,0	10,0
e-fuel Schiffe	0,0	1,7	2,9
Bio-Kraftstoff	38,6	38,6	29,5
TWh/a	665,4	638,0	578,3

³⁹ Quelle: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren> und 2_abb_entwicklung-eev_2022-03-22_0.xlsx

4.2.2 Aufbereitung von Sekundärenergieträgern und Bereitstellung für Endnutzer

Die Liste der „Kraftstoffarten“ wie in Tabelle 1 dargestellt müssen also aus Primärenergien gewonnen und sowohl mengenmäßig als auch zeitlich und örtlich bedarfsgerecht bereitgestellt werden.

Bei manchen Energieformen braucht man dazu z.B. nur Transporte bei anderen braucht man dagegen industrielle Prozesse um z.B. aus LNG oder Methan Wasserstoff CO₂-frei herzustellen. Oder auch Speicher, die den Zeitpunkt der Nutzung von Energie verschieben.

Ein mathematisches Modell (siehe Anhang B Kapitel B.1.4) unter Berücksichtigung der Annahmen, wie die Endenergieabnehmer sich auf die neuen CO₂-freien „Kraftstoffe“ umstellen werden, ergibt dann den zeitlich veränderlichen Bedarf an den entsprechenden Sekundär-Energieträgern wie in Abbildung 5 dargestellt.

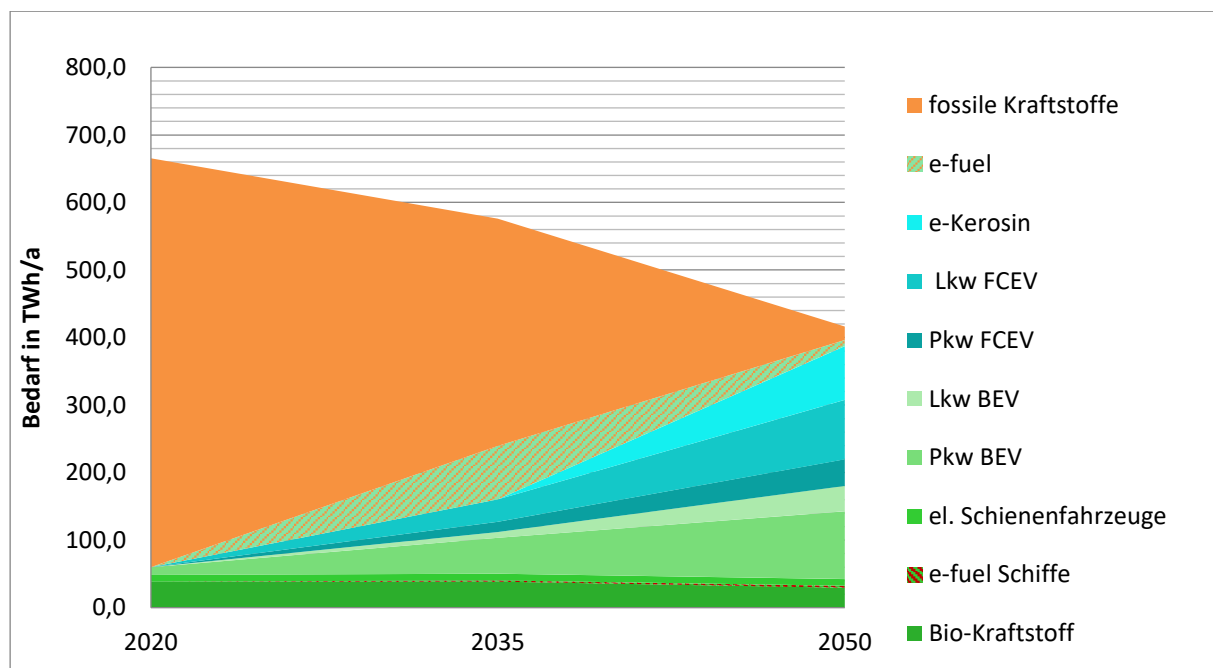


Abbildung 5: Sekundärenergie für den Verkehr

Man erkennt dort, dass e-fuels als Beimischung für die klassischen Diesel- und Benzinutzer nur vorübergehend gebraucht werden, um den CO₂-Fußabdruck möglichst früh zu reduzieren. Die abnehmende Produktionskapazität dafür kann ab der zweiten Hälfte der Energiewende und auch danach weiter für Flugzeuge verwendet werden.

4.2.3 Zusammenfassung des Sektors Verkehr

Wie auch die Sektoren „Haushalte“ und „Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD)“ wird auch der Sektor „Verkehr“ nach den zwei Stufen der Energieumstellung - also bis etwa 2050 - vollständig CO₂-neutral sein. Die Endenergieträger für den Verkehr basieren ab dem Ende der Energieumstellung zu

- etwa $\frac{2}{3}$ auf Strom – das werden Landfahrzeuge mit planbaren eher kurzen Fahrten nutzen (BEV)
- und etwa $\frac{1}{3}$ auf Wasserstoff – hier werden es eher Langstrecken Lkws, Schiffe, Flugzeuge und Pkws nutzen, die eher längere Fahrten machen und das hohe Gewicht der Akkus im Fahrzeug vermeiden (FCEV).
- und noch ein Rest von etwa 5% Bioenergie wird eher zum „putzen“ des CO₂s der Atmosphäre verwendet als für Antriebe. Das könnten aber auch landwirtschaftliche Fahrzeuge, Baumaschinen, Einsatzfahrzeuge mit kurzen bzw. seltenen Fahrten wie Feuerwehr oder THW nutzen.

Der Ertrag der Windgeneratoren reicht (im Jahr 2050) bei der wie heute gleichgebliebenen Fahrleistung und einer 50%igen Zurückstellung für den Sektor Industrie, nur für die rein elektrisch angetriebenen Fahrzeuge (BEV) (siehe oben). Und dass nur wenn der heutige Windstromertrag vervierfacht⁴⁰ und durch weitere etwa 20% durch Stromimporte und Laufwassergeneratoren aufgestockt wird.

Weiter muss der Windstromertrag für eine höhere bedarfsgerechte Nutzbarkeit umgespeichert werden. Denn nur etwa 40% des Windstromertrages können ohne die heute dafür genutzten Gaskraftwerke dann genutzt werden, wenn er erzeugt wird. Weitere etwa 30% müssen im Mittel für die halbe Dauer einer Wetterperiode zwischengespeichert werden⁴¹ und genau dann, wenn sie gebraucht werden, zurück ins Netz eingespeist werden. Die notwendige Speicherkapazität mit passenden Zykluszahlen pro Jahr bieten z.B. Pumpspeicherwerke und neuere Technologien wie thermische Speicher. Aber auch (Laufwasser)-Speicherkraftwerke, die ihren Ertrag konträr zum Windstromertrag steuern, können verwendet werden. Hierfür müssten die heutigen Speicherkapazitäten durch Kapazitäten in den Alpen oder Skandinavien ergänzt werden.⁴² Mit Hilfe von importierter Speicherleistung gibt es eine hinreichende Lösungsmöglichkeit.

Bei vollen strombasierten Speichermedien wird weiterer momentan nicht verbrauchbarer Windstrom in Wasserstoff umgewandelt und chemisch in Großspeichern als Gas gespeichert und später wie andere Wasserstoffquellen auch CO₂-neutral verwendet.

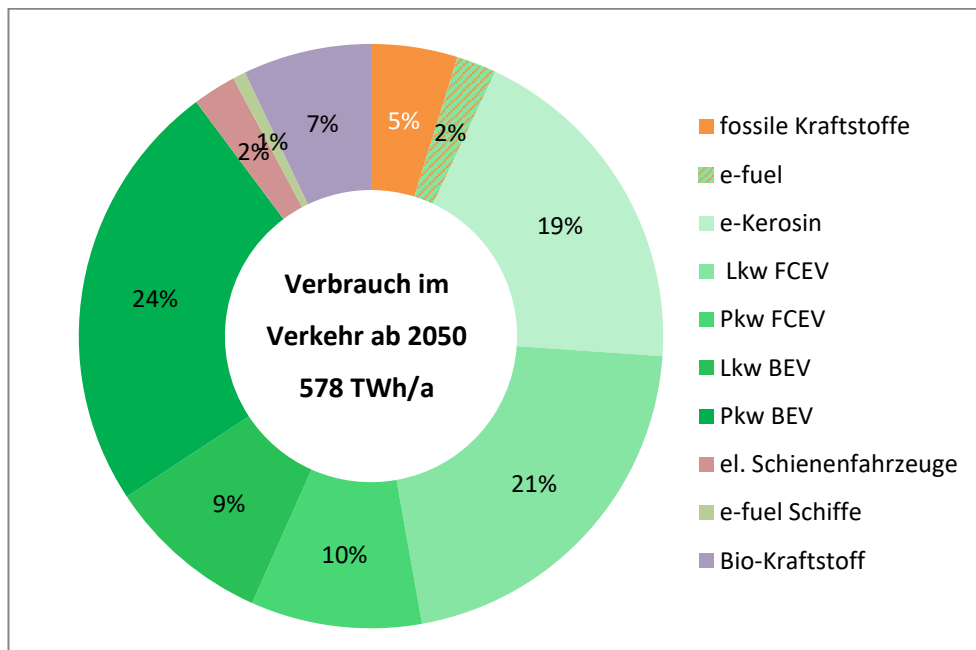


Abbildung 6: nach erfolgter Übergangsphase

Wasserstoff muss erst durch einen Prozess aufbereitet und bereitgestellt werden. Dafür ist, neben dem Import von Wasserstoff, der dominierende Prozess die CO₂-freie Spaltung von Methan Molekülen z. B. durch

⁴⁰ z.B. 3-mal so viel on-shore Ertrag und 8-mal so viel off-shore (ausgehend von 100 TWh/a on-shore und 23 TWh/a off-shore heute). Dieser Bedarf deckt den heutigen Bedarf an Fahrleistung ab. Einsparungen in der Fahrleistung reduzieren dann weiter den Aufwand, der CO₂-Fußabdruck bleibt aber Null.

⁴¹ Siehe dazu auch Kapitel 5

⁴² Auch die Sektoren Haushalte, GHD und Industrie muss noch in gleicher Größenordnung einbezogen werden

Pyrolyse⁴³. Der so entstehende Wasserstoff kann in großen Mengen für die Verwendung in FCEV verwendet werden.

Während der Übergangszeit der Energiewende, in der noch große Mengen an Bestandsfahrzeugen ohne Änderung ihres Antriebs versorgt werden müssen, bleibt nur die Nutzung von synthetischen Kraftstoffen – aus den „Zutaten“ Wasserstoff und CO₂ –, die auch das Problem der noch stattfindenden Emission von CO₂ im Sektor Industrie rechnerisch um 50% reduziert.

Die so aufgebaute Prozesskapazität für e-Diesel und e-Benzin kann am Ende der Energiewende weiter für die Produktion von e-Kerosin für Flugzeuge verwendet werden. Hier muss jetzt aber die CO₂-Gewinnung aus der Luft erfolgen (direct air capture, DAC), was ja wegen der jetzt fehlenden CO₂-Abscheidung in Schornsteinen der Industrie nicht mehr gehen würde und was ja auch einen gewollten Effekt hat, dass das so gewonnene e-Kerosin so auch vollständig CO₂-neutral genutzt werden kann. Und dass ohne die Flugzeuge umzurüsten.

In Abbildung 6 sind die neuen Energieträger für den Verkehr nach der Umstellungsphase mit ihren relativen Anteilen dargestellt. Es ist dort zu erkennen, dass die Nutzung von e-fuels wieder auf fast Null zurückgegangen ist, weil jetzt die Antriebe fast aller Fahrzeug umgestellt sind. Die Mengenangaben ergeben sich, wenn die Verkehrsleistung – also Tonnen km und Personen km – so wie 2022 bleiben sollte. Das Rechenmodell aus dem sich die numerischen Ergebnisse ergeben ist im Anhang A Kapitel B.1.4 grob dargestellt.

Die Wirkung der Umstellung der Antriebe im Verkehr ist im Vergleich von Abbildung 3 und Abbildung 6 besonders deutlich zu erkennen.

⁴³ Wasserstoffherstellung durch Elektrolyse von Wasser o.ä. ist nicht vorgesehen, da dafür mit weitem Abstand kein Strom mehr zur Verfügung steht. Siehe auch Anhang A Kapitel A.2.

4.3 Für den Sektor Industrie

4.3.1 Arbeitsweise

Heute verwendet die Industrie insgesamt mehr als die Hälfte ihres Energieverbrauchs als fossile Brennstoffe – also um Wärme zu erzeugen und nicht wie im Sektor Verkehr, um mechanische Arbeit zu leisten. Mechanische Arbeit wird in der Industrie vornehmlich aus Strom gewonnen. Das bedeutet, dass die Umstellung auf die Nutzung von Wasserstoff zur Erzeugung von Wärme statt der Nutzung fossiler Brennstoffe möglich sein sollte.

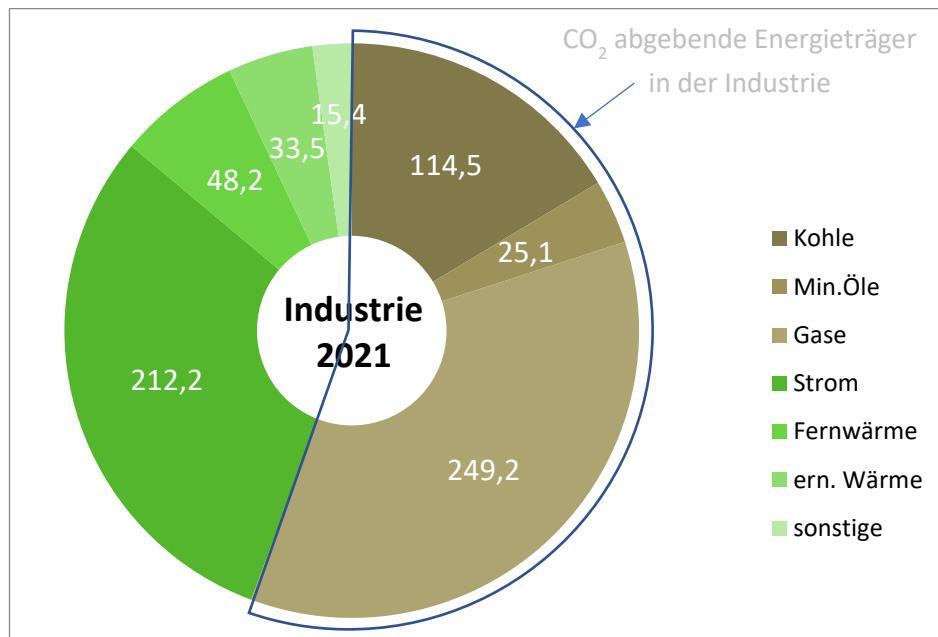


Abbildung 7: Sekundärenergien für die Industrie im Jahr 2021 in TWh^{44 45}

Verwendung von Wasserstoff und Erdgas in der Übergangsphase

Die wegen ihrer chemischen Zusammensetzung genutzten fossilen Stoffe müssen dagegen gesondert betrachtet werden. Da sind zunächst Anwendungen, die zwar das Potential haben, durch Wasserstoff ersetzt zu werden, die aber erst zeitlich verzögert kommen. Hier muss dann das erzeugte CO₂ statt in die Umgebung abzugeben, aufgefangen werden und wie in Kapitel 4.2.1 Punkt 3. beschrieben im Sektor Verkehr ebenfalls als Zwischenlösung für die Produktion von e-fuels verwendet werden. Eine zeitliche und mengenmäßige Abstimmung zwischen diesen Sektoren ist notwendig insbesondere auch deshalb, weil der Bedarf zur Produktion von e-fuels im Sektor Verkehr am Ende der Energieumstellungsphase auf null reduziert ist und somit kein zurückgewonnenes CO₂ mehr abgenommen wird. Spätestens dann darf auch der Sektor Industrie kein CO₂ mehr in die Luft abgeben.

Es gibt aber noch weitere Nutzungen von fossilen Brennstoffen, die zeitlich und mengenmäßig über den Bedarf für eine e-fuel Wiederverwendung im Verkehr hinausreichen. Diese so weiter emittierten CO₂-Anteile müssen

⁴⁴ Quelle: Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Auswertungstabellen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2019, Stand 09/2020

⁴⁵ Strom CO₂-frei anzubieten ist Aufgabe der Netzbetreiber und somit ist keine Umstellung in der Industrie nötig. Natürlich kann ein Industriezweig einen Teil der Rolle „netzbetreiben“ übernehmen. Dann gelten gleiche Regeln

dann über DAC aus der Umgebungsluft herausgefiltert werden⁴⁶ und selber genutzt werden. Z.B. um e-Methan oder andere e-Kohlenwasserstoffe herzustellen und statt der jetzigen fossilen Brennstoffe zu verwenden.

CO₂ im Boden zu entsorgen (CCS) sollte man auf keinen Fall verwenden – dazu haben wir genug aus den Problemen mit Atomabfällen gelernt⁴⁷.

Bleiben darüber hinaus noch erhebliche Quellen von CO₂, die nicht durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen entstehen aber trotzdem vermieden werden müssen. Das trifft z.B. für die Produktion von Zement zu. Im Jahr 2018 wurden 33,8 Mio. Tonnen Zement produziert. Das führte zu einer CO₂ Emission von etwa 20 Mio. Tonnen CO₂. Bis in die Mitte der Übergangsphase, also bis etwa 2035, kann dieses CO₂ aus den Abgasen der Betonindustrie zurückgewonnen werden und für etwa 140 TWh/a in der e-Dieselproduktion verwendet werden. Das ist etwa die Menge, die langsam ansteigend dem fossilen Diesel im Sektor Verkehr in dieser Zeitspanne beigemischt werden soll, um möglichst früh wenigstens eine 50%ige Reduktion des CO₂ Ausstoßes zu erreichen. Danach, in der 2. Hälfte der Energieumstellungsphase, reduzieren sich die Bestands-Diesel-Fahrzeuge und die CO₂ emittierende Betonproduktion gleichermaßen auf null, so dass beides CO₂-neutral wird.

Der Wasserstoff, der neben dem Strom (siehe weiter unten) als Energieträger für den Sektor Industrie dient, wird so bereitgestellt:

- aus dem verbleibenden Rest des H₂-Jahresspeichers (ca. 112 TWh/a) (ursprünglich aus der Windstrom-Überproduktion und einem Überschuss der PV-Stromproduktion stammend),
- aus einem der Industrie zugeordneten Pyrolyse-Prozess der H₂ (etwa 153 TWh/a) (und festen Kohlenstoffstaub) aus LNG trennt
- und zusätzlichem grünen Wasserstoff-Import (von etwa 123 TWh/a)

Das ergibt zusammen die heute in Form von fossilen Brennstoffen benötigten 389 TWh/a ohne eine Einsparung an Energie.

Der durch die Pyrolyse gewonnene Kohlenstaub sollte durch geeignete Prozesse so nutzbringend verwendet werden, dass er den Bedarf an erneuerbaren Energien reduziert. Also z.B. durch die Bereitstellung von Kohlefaser-Kunststoffen als Ersatz von Beton und Stahl. Der Prozess Kohlestaub in Baustoffen zu verarbeiten sollte zügig massentauglich optimiert werden.

Verwendung von bedarfsgerechtem Strom

Strom wird heute schon im Sektor Industrie vornehmlich für die Erzeugung mechanischer Arbeit bzw. Beleuchtung eingesetzt. Das darf nicht auf die Erzeugung von Wärme ausgedehnt werden.

Die insgesamt in diesem Konzept vorgesehene Erzeugung von grünem Strom beruht, wie oben mehrfach erwähnt, auf der Annahme, dass sowohl der Ertrag von Strom aus PV als auch aus Wind relativ zu 2022 jeweils maximal vervierfacht werden kann.⁴⁸

Bleiben wir bei dieser Annahme, dann steht am Ende der Energieumstellungsphase z.B. 2050 pro Jahr für alle Sektoren zusammen aus PV-Anlage etwa 4-60,8⁴⁹ also 243 TWh/a zu Verfügung. Abzüglich der 40 TWh/a aus

⁴⁶ siehe dazu auch in Anhang A Kapitel A.4

⁴⁷ Es gibt in der Physik grundsätzlich keine Möglichkeit zu beweisen, dass es etwas nicht gibt. Man kann nur aus langer Erfahrung schließen, dass es kein Beispiel für so eine Möglichkeit gibt, und dass es somit wahrscheinlich das es sie nicht gibt. Es gibt aber keine Beispiele für ewig dichte Speicherholräume. Endlose Diskussionen sind somit nicht vermeidbar.

⁴⁸ Diese Grenze ist wegen einer begrenzten Akzeptanz der Bevölkerung so angenommen worden und reicht so gerade aus, um CO₂-freie Energieversorgung mit moderaten Zukäufen für alle Sektoren einzurichten

⁴⁹ Quelle. Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat); Stand: Februar 2013

den für H2-Produktion abgegebenen Überschussstrom im Sommer reicht der Rest gerade für die Sektoren Haushalte und GHD. Es verbleibt rechnerisch nichts mehr von PV-Stromertrag für die Industrie⁵⁰.

Der Ertrag der Windstrom-Anlagen lag 2022 bei 123 TWh/a der angenommen bis 2050 vervierfacht – also 492 TWh/a wird. Dieser teilt sich zunächst in einen bedarfsgerechten Anteil auf, der direkt oder durch Zwischenspeicherung in Stromspeichern bedarfsgerecht umgeformt werden kann. Das macht nach bisherigen Erfahrungen etwa 70% des Windstromertrages aus. Der restliche Teil von etwa 30% kann bestenfalls als Wasserstoff umgeformt werden und in Jahresspeichern gelagert werden.

		Windstrom			
Windstrom 4-fach 2022	in TWh/a	4-fache 2020 Windprodukt.	Haushalte, GHD	Verkehr	Industrie
492	inherent bedarfsgerecht	197	67	104	130
	bedarfsgerecht durch Zwischenspeicher	103			
	nicht bedarfsg. und als H2 umgeformt	111	30	29	112
	bed.ger. importiert		0	44	0

Abbildung 8: Aufteilung verschiedener Anteile des Windstromertrages auf verschiedene Sektoren

In Abbildung 8 ist dargestellt, dass für den Sektor Industrie vom lokalen bedarfsgerechten Windstromertrag 130 TWh/a zur Verfügung stehen. Gebraucht werden heute – und angenommen in der Zukunft auch – aber etwa 212 TWh/a. Deshalb müssen für den Sektor Industrie noch weitere ca. 82 TWh/a an bedarfsgerechtem Strom Importiert werden⁵¹.

⁵⁰ natürlich können Firmen aus dem Sektor Industrie eigene PV-Anlagen betreiben. Das sollte auch vor allem auf Industriegebäuden intensiv gemacht werden. Solche PV-Anlagen zählen hier rechnerisch aber auch als Teil des 4-fachen PV-Ertrages 2050

⁵¹ dazu ist wiederum Österreich oder Norwegen eine geeignete Quelle

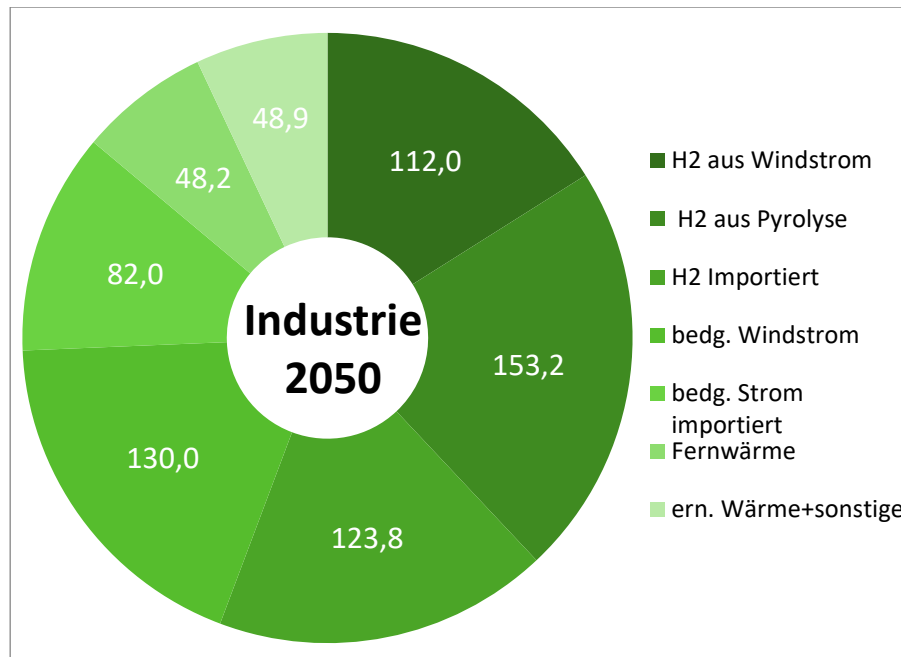


Abbildung 9: Sekundärenergieträger für die Industrie 2050

Darüber hinaus sollte angenommen werden, dass Fernwärme, erneuerbare Energien und sonstige genauso zur Verfügung stehen wie heute. Somit sind alle Bestandteile der Energieversorgung der Industrie nachhaltig und CO₂-neutral umgestellt. Siehe dazu Abbildung 9.

5 Stromspeicherung

Eine der wesentlichen Verantwortungen in allen Sektoren ist die Zwischenspeicherung der Erträge der nicht steuerbaren Energiequellen. Diese Speicher sind wegen der Möglichkeit der gegenseitigen Ergänzung für alle Sektoren gleichermaßen zuständig. Deshalb hier die Vorstellung des Zusammenspiels aller Speicherklassen. Neben der oben erwähnten PV-Energie hier aber insbesondere der Zwischenspeicherung der Windenergie⁵².

Die Produktion von erneuerbarer Energie durch PV und Wind variiert durch 3 verschiedene Einflüsse. Wie oben schon erwähnt, ist deshalb die Nutzung von 3 verschiedenen Klassen von Speichertechnologien mit jeweils auf diese Einflüsse optimierten Eigenschaften für diese Aufgaben bzw. Ziele sinnvoll.

5.1 Kurzzeitspeicher

Da ist zunächst der Kurzzeitspeicher⁵³, der rechnerisch nur in den Sektoren Haushalte und GHD wegen deren Nutzung von PV notwendig ist. Dieser Speichertyp ist für eine hohe Anzahl von Vollzyklen ausgelegt, die an der Anzahl der Sonnentage im Jahr ausgerichtet ist und sollte sehr schnell⁵⁴ auf Änderungen des Bedarfs reagieren, bleibt aber im Mittel⁵⁵ neutral.

⁵² für den Sektor Verkehr ist rechnerisch kein Anteil am Ertrag von PV-Anlagen vorgesehen. Dieser ist wie oben beschrieben den Sektoren Haushalte und GHD vorbehalten.

⁵³ in sehr viele kleine Speicher aufgeteilt und örtlich verstreut

⁵⁴ Im Bereich deutlich kleiner als eine Minute. Für noch schnellere Wirkungen eignen sich z.B. Schwungradspeicher, die früher indirekt durch die mechanische Masse der Generatoren gebildet wurde.

⁵⁵ Im Bereich größer als etwa 2 Tage

Für diese Speicherklasse sind die Technologien geeignet, die den besten Wirkungsgrad⁵⁶ haben und dezentral betrieben werden können. Ihre Kapazität sollte den Bedarf in den Dunkelphasen des PV-Ertrages von etwa 2 Tagen abdecken. Speicher, die einem Haushalt zugeordnet sind sollten deshalb jeweils eine Kapazität von etwa 5 bis 8 kWh und eine Leistung entsprechend des Bedarfs für Haushalte im Nachtbetrieb haben⁵⁷. Das ergibt eine Gesamtspeicherkapazität einschließlich der für GHD im Bereich von 400 GWh womit damit etwa 70% des PV-Stroms bedarfsgerecht bereitgestellt werden kann.

5.2 Wetterphasenspeicher

Weiter gibt es ein Cluster von Strom-Speichern⁵⁸ für wetterbedingte Abweichungen des Ertrags. Dessen ausgelegte Anzahl von Vollzyklen sollte entsprechend der üblichen Anzahl von Wetterzyklen im Jahr ausgelegt sein. Seine Reaktionszeit auf Schwankungen des Ertrags und des momentanen Bedarfs sollte gleich oder langsamer als die der Kurzzeitspeicher sein aber schneller als der für den Ausgleich des Jahreszyklus. Auch er ist aber im Mittel⁵⁹ neutral⁶⁰. Dieses Zusammenspiel ermöglicht eine effektive Nutzung der Speicherkapazitäten und Lade/Entladeleistungen von verschiedenen Technologien innerhalb des „Wetterspeicher“-Systems. Das Problem dabei ist die stochastische Modellierung des Profils der Ertragsschwankungen - was nur näherungsweise gelingt⁶¹. Dieses Speichersystem formt also etwa 70% des wetterbedingten un stetig produzierten Windstrom⁶² in ein für den Verbraucher bedarfsgerechtes Profil um⁶³.

Die dazu geeigneten Speichertechnologien sind z.B. große Akkus, die vor allem die sehr schnellen Änderungen ausgleichen können aber eine Lade/Entladekapazität von nur wenigen Stunden haben.

Da sind andere Speichertechnologien besser geeignet. Das sind die Speicher, die zwar die kurzen Schwankungen im Sekunden- oder Minutenbereich nicht ausgleichen können die aber längere Speicherzeiten von mehreren Tagen erlauben wie z.B. Pumpspeicherwerke oder thermische Speicher.

Zusammen mit den Akkus könnten damit die wetterbedingten Schwankungen bis in den Bereich einiger Tage ausgeglichen werden. Das reicht aber noch nicht für längere Wetterperioden, die mit einigen Wochen angenommen werden müssen.

Für solche Stromspeicher, die Überschussstrom von einigen Wochen speichern und dann in Phasen einer andauernden Flaute diesen wieder zurückführen können, eignen sich vor allem sehr große Mengen von sehr großen Pumpspeicherwerken, die wir in Deutschland bei Weitem nicht aufbauen können. Das geht nur zusammen mit ausländischen Partnern⁶⁴. Gut geeignet wären z.B. die Länder Norwegen und Österreich. Zusammen mit den lokalen Speichern könnte man so den deutschen Bedarf an „Wetterspeichern“ decken.

Es bleibt aber noch die Überproduktion von Windstrom.

⁵⁶ z.B. besser als 95%

⁵⁷ Eine vorteilhafte Technologie für diese Speicherklasse wären z.B. Li-Ionen Akkus oder Redox-Flow Akkus. Siehe auch <https://de.wikipedia.org/wiki/Redox-Flow-Batterie>

⁵⁸ in verschiedenen Regionen verstreut

⁵⁹ die untere (niederfrequente) Reaktionszeit sollte etwas länger als eine Wetterperiode sein

⁶⁰ Eine vorteilhafte Technologie für diese Klasse von Speichern wären Pumpspeicherkraftwerke oder steuerbare Laufwasserwerke

⁶¹ Für den Kurzzeitspeicher und den Jahresspeicher kann man dagegen mit der Geometrie des Sonnenstandes gute Vorhersagen machen, die dann aber durch das Wetter überlagert werden.

⁶² nur gelegentlich auch den PV-Strom

⁶³ der restliche Teil des Rohertrages (etwa 30%) wird in Wasserstoff umgeformt und im Jahresspeicher gespeichert.

⁶⁴ dabei müssen aber auch beachtet werden, dass unsere Nachbarländer dieselben Probleme und auch zur gleichen Zeit haben.

5.3 Jahresspeicher

Bleibt noch der dritte Speichertyp, der für nur einen Vollzyklus pro Jahr ausgelegt wird - also entsprechend des Einflusses der Jahreszeiten. Hier wird der nicht bedarfsgerechte Anteil der elektrischen Energie des Windstroms⁶⁵ (und des PV-Stroms), der nicht mehr vom „Wetterspeicher“ kompensiert werden kann, zunächst in Wasserstoff gewandelt und dann gespeichert⁶⁶.

Die Größe bzw. Kapazität der jeweiligen Speicherklassen ergeben sich aus der Energiemenge, die rechnerisch in der Hälfte der Dauer der geplanten Anzahl von Vollzyklen pro Jahr geladen bzw. entladen werden muss.

⁶⁵ und auch des Überschussstroms des PV-Stroms im, Sommer

⁶⁶ dieses wären die Klasse der saisonalen Speicher, die große Mengen an Energie in nur einem Vollzyklus pro Jahr aufnehmen bzw. abgeben. z.B. chemische Speicher von Methan oder Wasserstoff in unterirdischen Speichern bzw. in den Landesweiten Rohrleitungen durch unterschiedliche Drücke

6 Zusammenfassung

Mit der Erkenntnis - die ja allgemein mitgetragen wird - dass Deutschland seinen Bedarf an Primärenergien und deren Umformung zu Sekundärenergien nicht selbst gewinnen oder leisten kann, erhebt sich die Frage auf welche der Schwerpunkte wir uns hier konzentrieren sollten. Nach kurzem rechnen wird klar, dass unsere schwächste Stelle die Menge der notwendigen Speicher darstellt, die durch Wetterschwankungen die un stetige Produktion von grünem Strom kompensieren müssen. Das und die gesellschaftliche Akzeptanz begrenzen die handhabbare Menge an PV- und Wind-Anlagen (obwohl die Möglichkeit z.B. restliche Pumpspeicherleistungen aus Norwegen und Österreich zu importieren vernünftig erscheint).

Deshalb geht dieser Konzeptvorschlag am Ende der Energieumstellungsphase maximal von einer Vervierfachung sowohl des PV- als auch des Windstromertrages relativ zu 2022 aus. Das reicht rechnerisch mit dem PV-Strom und etwas Unterstützung durch Windstrom den Strombedarf der Sektoren Haushalte und GHD zu decken.

Der Windstrom reicht dann zusammen mit moderaten Stromimporten sowohl für die elektrischen Kurzstrecken-Pkws und Liefer-Lkws (BEV) als auch für die Versorgung des Sektors Industrie mit Strom in der Höhe wie heute auch.

Pkws, die häufig auch längere Strecken fahren, sowie auch Langstrecken-Lkws werden mit Wasserstoff und Brennstoffzellen elektrisch angetrieben (FCEV). Der Wasserstoff, der dafür notwendig ist, stammt aus einem großen Langzeitspeicher wie er auch heute für Erdgas benutzt wird. Dieser Speicher wird zusätzlich durch Methan-Pyrolyse von LNG und importiertem Wasserstoff aufgeladen.

Wasserstoff wird weiter für die Raumheizungen aller Sektoren verwendet. Dieser wird in KWK-Anlagen in Wärme und Strom genau passend für die Wärmepumpen umgewandelt, die beide zusammen die Heizungsenergie bereitstellen. Wasserstoff wird in Strom nur in KWK-Anlagen umgesetzt.

Ein weiterer großer Anteil am gespeicherten Wasserstoff wird in der e-fuel-Produktion benutzt. Dort wird e-Benzin und e-Diesel hergestellt und in der Übergangszeit, wenn noch nicht alle Fahrzeuge auf neue Antriebstechniken umgestellt sind, den fossilen Kraftstoffen zugemischt. Am Ende der Umstellungsphase gibt es keine Bestandsfahrzeuge mehr und deshalb auch kein e-Benzin oder e-Diesel.

Anders geht es mit e-Kerosin für Flugzeuge. E-Kerosin wird ab der Mitte der Umstellungsphase zunehmend aus Wasserstoff und aus der Luft gewonnenem CO₂ hergestellt (DAC). Damit werden auch Flugzeuge nachhaltig CO₂-neutral, ohne dass man sie umbauen müsste.

Das für die Herstellung von e-fuels benötigte CO₂ wird in der Umstellungsphase aus den Abgasen der Industrie insbesondere aus der Zementherstellung gewonnen und wiederverwendet (CCU). Es gibt somit nirgendwo CO₂, das z.B. im Boden oder Gestein auf ewig entsorgt werden müsste.

Der bei der H₂-Herstellung durch Methan-Pyrolyse anfallende Kohlenstoff wird nicht verbrannt, sondern dient als Rohstoff für die Herstellung von Kohlefaser-Kunststoffen (CFK), die den Zement- und Stahlbedarf reduzieren.

Biomasse-Produkte sollten nicht als Kraftstoff oder anders verbrannt werden. Damit würde man die Chance verspielen, den negativen CO₂-Fußabdruck von Bio-Stoffe zu nutzen, um unvermeidliche Reste von CO₂-Ausstoß z.B. in der Landwirtschaft, von Baumaschinen, Einsatzfahrzeugen usw. zu kompensieren.

Am Ende der Umstellungsphase (etwa 2050) sind alle Prozesse auf CO₂-freie Energienutzung umgestellt, alle Primärenergieimporte sind nachhaltig und in der Menge marginal und alle fossilen Kraftwerke haben ihren Betrieb eingestellt – oder sind zu Wetterphasenspeichern (Carnot-Speichern) umgebaut.

Damit hat Deutschland eine dauerhaft 100% CO₂-neutrale Energieversorgung.

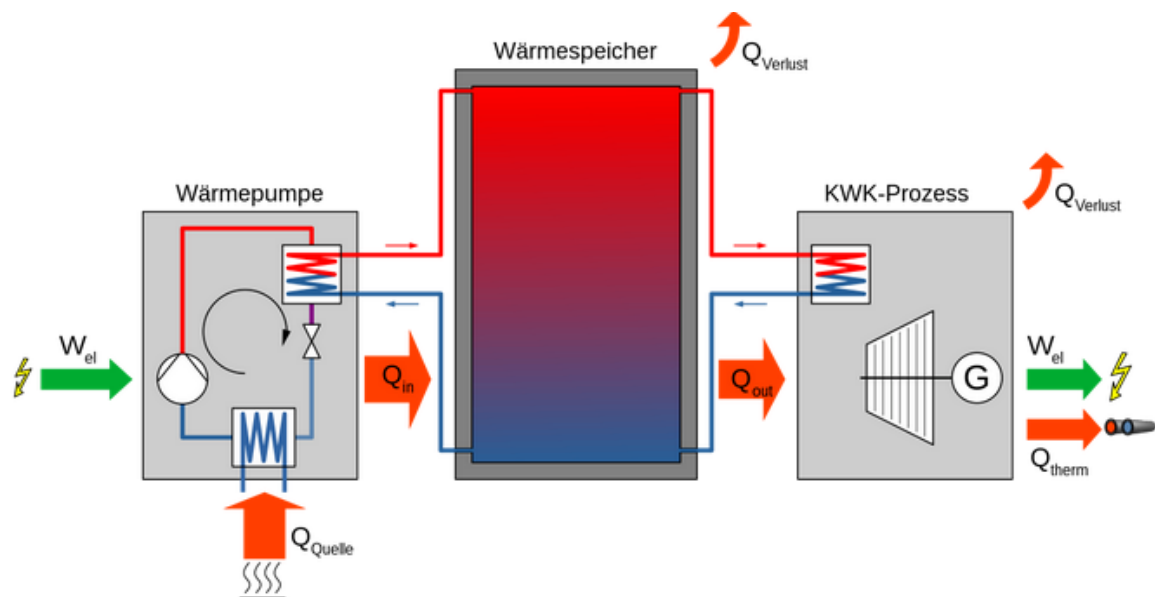
Anhang A

Schlüsseltechnologien

A.1 Große thermische Speicher

A.1.1 Carnot-Speicher

Eine Carnot-Batterie besteht aus einer Wärmepumpe und einer Kraft-Wärmekopplungsanlage

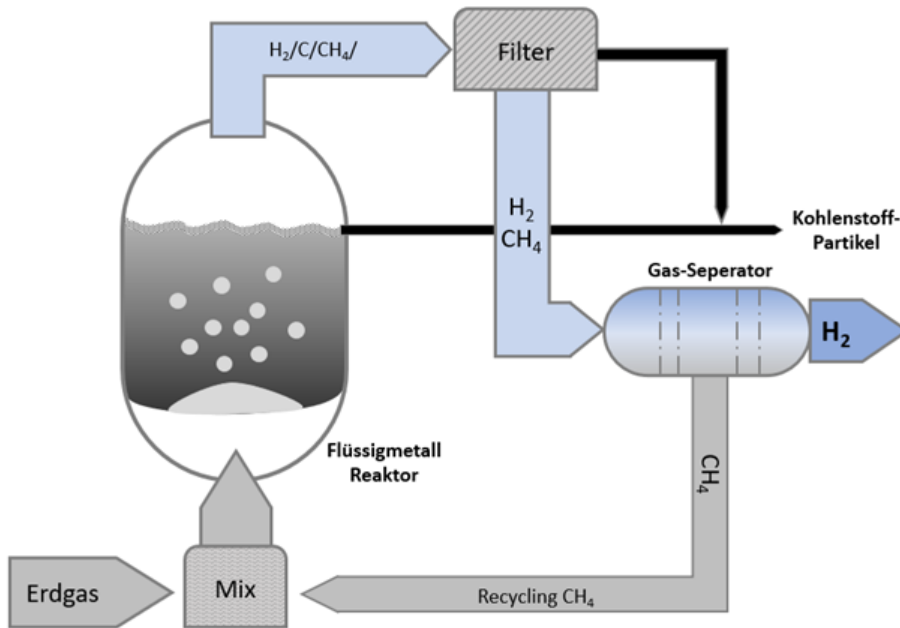


Quelle: de.wikipedia.org/wiki/Carnot-Batterie

Dieser Grundaufbau hat das Potential, aus bestehenden Gaskraftwerken hergestellt/umgerüstet werden zu können. Das betrifft auch den Anschluss an die bestehenden Hochspannungs-Fernnetze.

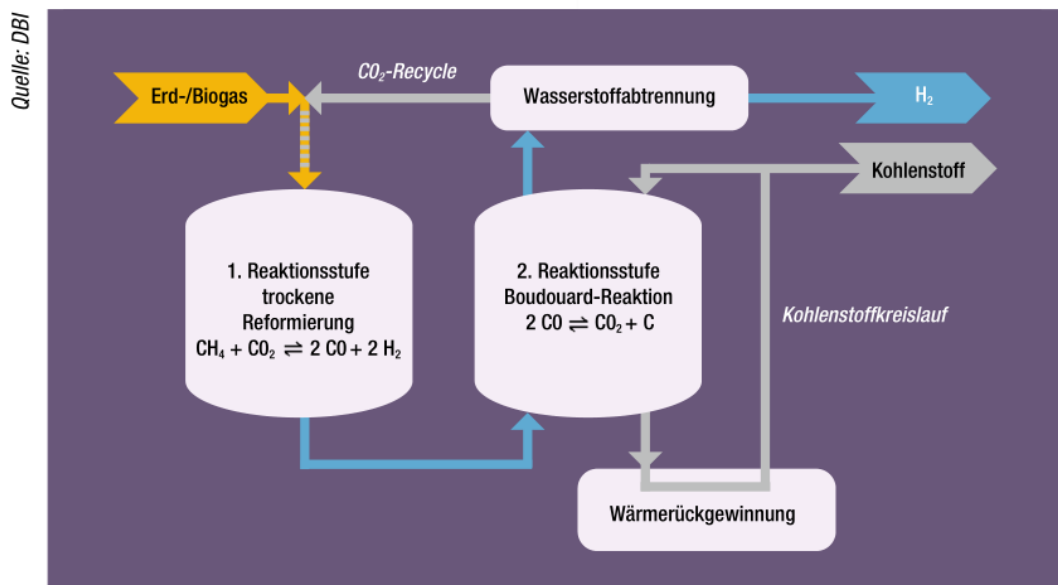
A.2 Methan-Pyrolyse

klassische Form der Pyrolyse



Hinweis: Die Methan-Pyrolyse ist ein endothermer Prozess, der mit ca. 5% der gewonnenen H₂-Energie aufrechterhalten werden muss (zusätzlich Wirkungsgradverlust, der von der Bauart abhängt). Dafür grünen Strom zu verwenden ist in der Gesamtbilanz ungünstiger als Wasserstoff.

neue Form der Pyrolyse



Schematische Darstellung des angestrebten Prozesses in zwei Teilschritten

Quelle: <https://www.dvgw-ebi.de/themen/publikationen/publikation-2022-mai-ewp-moers>

A.2.1 H₂-Ausbeute aus LNG

Ein wesentlicher Aspekt ist der Energiegehalt der erhaltenen Stoffe im Vergleich zu dem des verbrauchten Methans. Gehen wir aus von 1 kg Methan, so erhalten wir daraus ca. 0,75 kg Kohlenstoff und 0,25 kg Wasserstoff. Die Heizwerte sind:

- 1 kg Methan: 50 MJ
- 0,75 kg Kohlenstoff (als Graphit): $0,75 \cdot 32,8 \text{ MJ} = 24,6 \text{ MJ}$
- 0,25 kg Wasserstoff: $0,25 \cdot 120 \text{ MJ} = 30 \text{ MJ}$

Wenn man also sowohl den erhaltenen Wasserstoff als auch den Kohlenstoff verbrennen würde, erhielt man insgesamt 52,6 MJ, also ein wenig mehr als durch die direkte Verbrennung des Methans – entsprechend der bei der Pyrolyse investierten Energie. Verzichtet man dagegen auf die Verbrennung des Kohlenstoffs, beispielsweise um die Bildung des klimaschädlichen CO₂ zu vermeiden, hat man nur noch 60 % des Heizwerts des eingesetzten Methans – und dies trotz des zusätzlichen Energieaufwands für die Pyrolyse.

A.3 Brennstoffzellen

Aktivitäten des Landes BW

siehe dazu: <https://www.e-mobilbw.de/themen/brennstoffzellentechnologie>

siehe dazu: <https://www.e-mobilbw.de/service/meldungen-detail/weiterbildungsangebot-des-landes-zum-thema-wasserstoff-startet>

Aktivitäten bei BOSCH

siehe dazu <https://www.bosch.com/de/stories/brennstoffzellen-lkw-nikola-two/>

Aktivitäten bei SCANIA

siehe dazu <https://www.scania.com/de/de/home/newsroom/news/2021/how-does-a-hydrogen-fuel-cell-electric-truck-work.html>

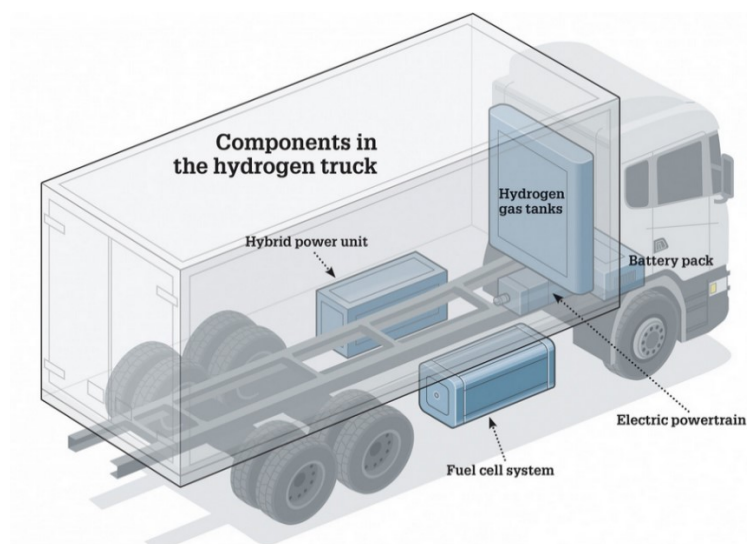
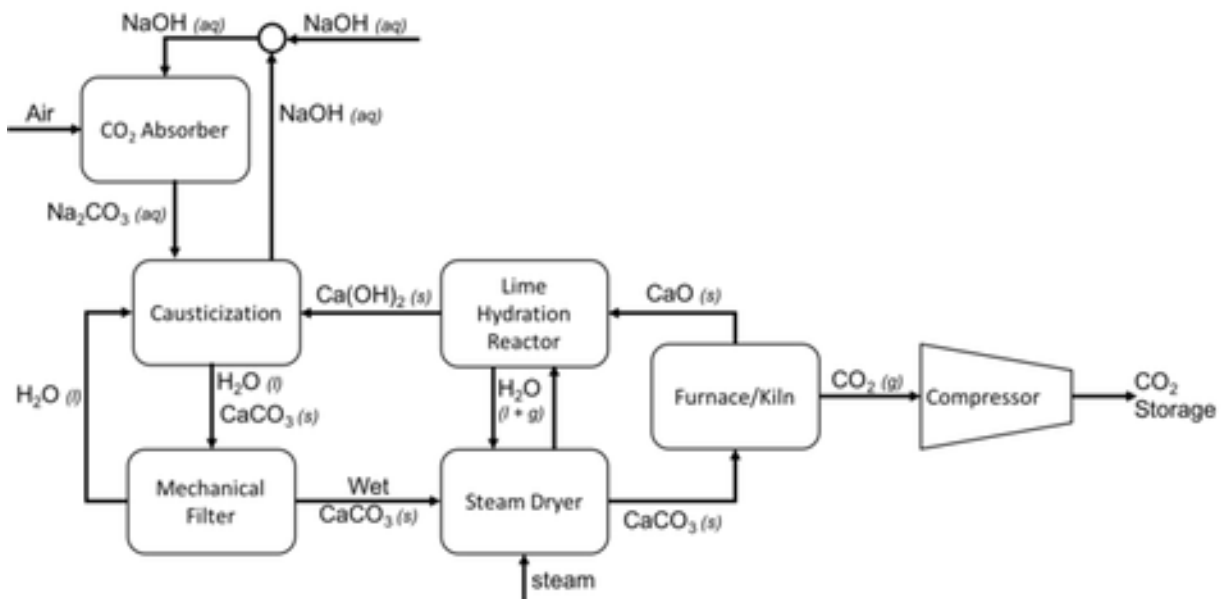


Abbildung 10: Komponenten eines fuel cell electric vehicle (FCEV) von Scania

A.4 Direct Air Capture (DAC) also CO₂ direkt aus der Luft und weiterverwenden

A.4.1 DAC durch Natriumhydroxid:



Flussdiagramm des direkten Luftfilterprozesses unter Verwendung von Natriumhydroxid als Absorptionsmittel und mit Regeneration des Lösungsmittels.

Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Direct_Air_Capture

Hinweis: DAC und Wiederverwendung in Form von Verbrennung des CO₂s führt zu einer endlosen Kette dieselbe Menge CO₂ immer wieder zu verwenden, die man zuvor aus der Luft geholt hat – also ein 100%ig CO₂-neutraler Kreislaufprozess ohne Abfall. Dagegen ist ein CCU – also die nochmalige Verwendung von CO₂ aus Abgasen rechnerisch nur 50%ig CO₂-neutral, weil ja nach der 2. Nutzung das CO₂ dann doch in der Luft ist. Es gibt natürlich noch den carbon capture and storage (CCS) Prozess. Der ist kurzfristig CO₂-neutral erzeugt aber ein ewig andauerndes Lagerproblem wie z.B. auch Atomabfall, weil ein späteres entweichen des CO₂s aus dem Bodenspeicher dann doch das Klima zerstört und in größeren Mengen auch für die Menschen in der Nähe gesundheitsgefährdend ist (wie auch die CO₂ Löschmethode von Bränden z.B. in Rechenzentren). Das Speichern von CO₂ in Gesteinen ist perfekt kann aber bei weitem nicht die notwendigen Mengen umsetzen und dauert außerdem zu lange.

Anhang B

Überschlagsrechnungen

B.1 CO₂ Physik

B.1.1 Optimales Zusammenspiel von KWK und Wärmepumpen

$$P_{th,WP} = P_{el,WP} \cdot \eta_{WP} \cdot COP$$

$$P_{th,KWK} = P_{ch,KWK} \cdot \eta_{KWK} \cdot \eta_{th,KWK}$$

$$P_{el,KWK} = P_{ch,KWK} \cdot \eta_{KWK} \cdot \eta_{el,KWK}$$

$$P_{el,WP} = P_{el,KWK}$$

$$P_{th,WP} = P_{el,KWK} \cdot \eta_{WP} \cdot COP$$

$$P_{th,WP} = P_{ch,KWK} \cdot \eta_{KWK} \cdot \eta_{el,KWK} \cdot \eta_{WP} \cdot COP$$

$$\frac{P_{th,WP}}{P_{th,KWK}} = \frac{P_{ch,KWK} \cdot \eta_{KWK} \cdot \eta_{el,KWK} \cdot \eta_{WP} \cdot COP}{P_{ch,KWK} \cdot \eta_{KWK} \cdot \eta_{th,KWK}}$$

$$\frac{P_{th,WP}}{P_{th,KWK}} = \frac{\eta_{el,KWK} \cdot \eta_{WP} \cdot COP}{\eta_{th,KWK}}$$

$$P_{Heizg} = P_{Gas,KWK} \cdot \eta_{KWK} \cdot (\eta_{th,KWK} + \eta_{el,KWK} \cdot \eta_{WP} \cdot COP)$$

Für Brennstoffzellen:

$$\frac{P_{th,WP}}{P_{th,KWK}} = \frac{\eta_{el,KWK} \cdot \eta_{WP} \cdot COP}{\eta_{th,KWK}} = \frac{0,28 \cdot 0,9 \cdot 4,2}{0,67} = 1,58$$

für Verbrennungsmaschine:

$$\frac{P_{th,WP}}{P_{th,KWK}} = \frac{\eta_{el,KWK} \cdot \eta_{WP} \cdot COP}{\eta_{th,KWK}} = \frac{0,48 \cdot 0,9 \cdot 4,2}{0,42} = 4,32$$

B.1.2 CO₂ Zahlen

Energiedichten im Vergleich

Brenn- und Heizwerte

Brennstoff	Brennwert / Masse	Dichte	Brennwert / Vol	Heizwert / Vol
Wasserstoff ^[30]	39,39 kWh/kg = 141,8 MJ/kg	0,090 kg/m ³	3,54 kWh/m ³ = 12,7 MJ/m ³	3,0 kWh/m ³ = 10,8 MJ/m ³
Methan CH ₄ ^[33]	13,9 kWh/kg = 50 MJ/kg	0,72 kg/m ³	10 kWh/m ³ = 36 MJ/m ³	9,0 kWh/m ³ = 32,4 MJ/m ³
Erdgas „H“ ^[34]	13,9 kWh/kg = 50 MJ/kg	0,80 kg/m ³	11,1 kWh/m ³ = 40 MJ/m ³	10 kWh/m ³ = 36,0 MJ/m ³
Diesel ^[35]	12,5 kWh/kg = 45 MJ/kg	0,83 kg/L	10,5 kWh/L = 37,8 MJ/L	9,8 kWh/L = 35,3 MJ/L
Benzin ^[32]	12,0 kWh/kg = 43 MJ/kg	0,75 kg/L	9,0 kWh/L = 32,4 MJ/L	8,3 kWh/L = 30,0 MJ/L

Brennstoff	Emissionen in kg CO ₂ / kWh
Holz*	0,39 (CO ₂ -neutral)
Torf	0,38
Braunkohle	0,36
Steinkohle	0,34
Heizöl	0,28
Diesel	0,27
Rohöl	0,26
Kerosin	0,26
Benzin	0,25
Raffineriegas	0,24
Flüssiggas	0,23
Naturgas	0,20

Quelle: <https://www.volker-quaschning.de/datserv/CO2-spez/index.php>

*bei nicht-nachhaltiger Nutzung ohne Wiederaufforstung

B.1.3 LNG nach Methan

Das Unternehmen RWE hat beispielsweise zwei etwa 300 Meter lange FSRU im Auftrag der Bundesregierung gechartert. Laut RWE kann jedes der Schiffe in einem Entladevorgang bis zu 170.000 Kubikmeter LNG aufnehmen, an Bord in den gasförmigen Aggregatzustand überführen und anschließend ins Gasnetz einspeisen. Jährlich können damit etwa zehn Milliarden Kubikmeter Erdgas verarbeitet werden. Der Jahresverbrauch in Deutschland liegt bei etwa 90 Milliarden Kubikmeter.

B.1.4 Modell der Überschlagsrechnung für den Sektor Verkehr

	max	2020	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2035	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	wenn 1 dann mit	CO2		
		603,5	667,7	831,5	496,1	460,3	424,4	388,6	352,8	334,9	271,8	229,7	187,6	145,5	103,4	61,3	19,2	100%	0,26		
fossile-Öle		0,0	20,4	40,9	61,3	81,7	102,0	122,6	143,0	153,2	127,0	109,8	92,4	75,0	57,6	40,3	22,9	53%	0,13		
LNG für e-Benzin/Diesel CCU		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	53%	0,00		
LNG für e-Kerosin DACU		0,0	4,1	8,1	12,2	16,3	20,4	24,4	28,5	30,5	40,5	47,2	53,0	60,6	67,3	73,9	80,6	60%	0,00		
LNG für H2 für FCEV		0,0	1,5	2,9	4,4	5,9	7,3	8,8	10,3	11,0	14,6	17,0	19,6	21,9	24,3	26,7	29,1	70%	0,00		
2 auslag. Windst. mit Speicherrf. FCEV		0,0	3,0	5,9	8,9	11,8	14,8	17,7	20,7	22,2	42,2	55,5	68,8	82,2	95,5	108,8	122,2	100%	0,00		
import. grüner (Bio)-H2 für FCEV		6,4	8,4	10,4	12,4	14,5	16,5	18,5	20,5	21,5	26,1	29,1	32,2	35,2	38,3	41,3	44,4	100%	0,00		
Strom Import und Laufwasser		15,0	19,7	24,4	29,0	33,7	38,4	43,1	47,8	50,1	60,8	67,9	75,1	82,2	89,3	96,4	103,5	100%	0,00		
bed. ger. Windstrom BEV		40,5	40,4	40,3	40,2	40,1	40,0	39,9	39,9	39,9	38,0	36,7	35,4	34,4	32,8	31,5	30,2	100%	0,00		
erneuerbar (Bio-Gas und Bio-Diesel)		665,4	665,1	664,9	664,6	664,3	664,1	663,8	663,5	663,4	627,1	603,0	578,8	554,6	530,5	506,3	482,1	Summe	100%	0,00	
		20%	38%	30%	30%	30%	30%	38%	30%	30%	38%	30%	38%	30%	30%	30%	30%	wenn 1 dann mit			
		80%	16%	70%	70%	70%	70%	16%	70%	70%	16%	70%	16%	70%	70%	70%	70%				
		46%	46%	46%	46%	46%	46%	46%	46%	46%	46%	46%	46%	46%	46%	46%	46%				
		2020	2022	2024	2026	2028	2030	2032	2034	2035	2038	2040	2042	2044	2046	2048	2050	2020	2050	Arbeits	
0,0	Summe	179,0	166,8	154,6	142,4	130,2	118,0	105,8	93,6	87,5	70,2	58,7	47,2	35,6	24,1	11,6	1,0	100%	1,0	Pkw Vergaser-Bestandsfahrzeug	
-2,5		33,6%	116,7	108,7	100,7	92,7	84,8	76,8	68,8	60,8	56,8	46,1	39,0	31,9	24,8	17,7	10,6	3,5	100%	3,5	Pkw-Diesell-Bestandsfahrzeug
-3,3		0,0%	0,0	2,8	5,6	8,4	11,2	14,0	16,8	19,6	21,0	17,7	15,5	13,3	11,1	8,9	6,8	4,6	1,0%	3,5	Pkw Bestandsfahrzeug mit e-fuel (SE = H2)
14,2		0,0%	0,0	2,0	4,1	6,1	8,1	10,1	12,1	14,2	15,2	20,3	26,5	29,7	32,9	36,2	39,4	3,5	17,0%	59,1	Pkw FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) (SE = H2)
-6,7		11,1%	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	39,4	29,5	8,5%	29,5	Bio-Kraftstoff Beimischungen
4,5		0,0%	0,0	3,3	6,6	9,9	13,2	16,5	19,8	23,1	24,8	30,1	33,7	37,2	40,8	44,3	47,9	51,4	37,0%	128,6	BEV (Akku-Speicher) zugeteilte Strom Lades.
-2,3		3,3%	11,4	13,7	16,0	18,2	20,5	22,8	25,1	27,4	28,5	32,5	35,2	37,9	40,6	43,3	46,0	48,7	35,0%	121,7	BEV (Akku-Speicher) öffentliche Strom Lades.
-3,8		0,5%	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,2%	0,7	Autogas Fahrzeuge (fossil)
0,0		10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	100%	10,0	Bahn Schienenfahrzeuge (SE = Strom)
0,0		100,0%	233,3	218,0	202,7	187,3	172,0	156,7	141,4	126,1	118,4	95,4	80,1	64,8	49,5	34,1	18,8	3,5	1,5%	3,5	Lkw Bestandsfahrzeuge (fossil)
42,8		0,0%	0,0	7,8	15,6	23,4	31,2	39,0	46,8	54,6	58,6	47,8	40,6	33,4	26,2	19,0	11,8	4,6	1,5%	7,6%	Lkw Bestandsfahrzeuge mit e-fuel (SekEn = H2)
-26,4		0,0%	0,0	1,1	2,2	3,3	4,4	5,5	6,7	7,8	8,3	14,2	18,1	22,1	26,0	29,9	33,9	37,8	40,5%	94,5	Lkw BEV (SekEn = Strom)
-16,4		0,0%	0,0	4,4	8,8	13,2	17,6	22,0	26,4	30,8	33,0	44,0	51,3	58,6	65,9	73,2	80,6	87,9	56,5%	131,8	Lkw FCEV aus LNG-türkischem H2
26,9		100,0%	71,7	70,7	69,8	68,8	67,9	66,9	65,9	65,0	64,5	52,3	44,2	36,1	27,9	19,8	11,7	3,6	5%	3,6	Kerosin für Bestandsflugzeuge
3,6		0,0%	0,0	0,9	1,9	2,8	3,8	4,7	5,7	6,6	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	10%	7,1	Kerosin (DACs vor- oder nachher aus Atmosphäre)
-30,2		0,0%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,9	26,5	37,1	47,7	58,3	68,9	79,5	85%	60,4	e-Kerosin aus türkischem H2 und DAC (SE = H2)
-1,1		100,0%	2,8	2,5	2,2	1,9	1,6	1,3	1,0	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	20%	0,6	Bestandsdiesel fossil
0,2		0,0%	0,0	0,2	0,5	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6	1,7	2,0	2,1	2,3	2,4	2,6	2,8	2,9	80%	2,2	e-Diesel aus türkischem H2 und CCU (SE = H2)
	TWh/a	665,4	653,5	641,5	629,6	617,6	605,7	593,8	581,8	575,8	543,9	522,7	501,4	480,1	458,8	437,6	416,3	664,8	100%		
		347,6	337,7	327,9	318,0	308,2	298,3	288,5	278,6	273,7	254,7	242,1	229,4	216,8	204,1	191,5	178,8				
	Pkw	233	231	229	227	225	223	221	219	218	201	190	179	168	156	145	134				
	LKW	71,7	71,7	71,7	71,7	71,7	71,6	71,6	71,6	71,6	75,3	77,8	80,3	82,8	85,2	87,7	90,2				
	Air																				
		* https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endeenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs#:~:energyverbrauch=steigt-seit-2010-wieder-an																			

Tabelle 2: verwendetes mathematisches Modell für den Sektor Verkehr

Impressum

Autor und Herausgeber:

Wolfgang Beier, Dipl. Ing. für Nachrichtentechnik, Mathematik und Datenverarbeitung

wolfgang.beier@eets-consulting.eu

Der Autor

Wolfgang Beier war freier beratender Ingenieur zuletzt für Konzept Design von Großprojekten und ist seit einigen Jahren in Ruhestand. Diese Arbeit hat niemand beauftragt und niemand hat Rechte daran. Sie folgt auch keinerlei kommerziellen Eigeninteressen.

Es ist die Hoffnung des Autors, dass dieser Beitrag einen Einfluss auf die z.Z. nicht sichtbare Systemarchitektur der Deutschen Energiewende hat was offensichtlich auch erklärt, wieso so viele Vorschläge auf der Detailebene gemacht und zurückgenommen werden und offenbar keine abgestimmte und von allen getragene (zunächst abstrakte) Lösung der Gesamtaufgabe sichtbar ist.

Dieser Beitrag könnte z.B. als Vorgabe für einen neuen DIN oder EN-Standard „Systemarchitektur einer nachhaltigen und CO₂-neutralen Energiewende“ dienen.