

# **Technische Hochschule Ulm**

Fakultät Produktionstechnik

Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen

## **Bachelorarbeit**

Kosten und Realisierbarkeit von Autarkie im Eigenheim

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades  
"Bachelor of Engineering"

vorgelegt von

Simon Schenk

Ausgegeben am: 02.05.2023

Abgegeben am: 23.08.2023

Erstprüfer: Herr Prof. Dr. Stephan Schlüter

Zweitprüfer: Herr Prof. Dr.-Ing. Klaus-Peter Franke

# Erklärung des Verfassers

Ich erkläre, dass ich die Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Quellen- und Literaturverzeichnis angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

München, den 23.08.2023

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'S. Schenk', written in a cursive style.

Simon Schenk

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b><i>Einführung</i></b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b><i>Definition des Begriffs Autarkie im Rahmen dieser Arbeit</i></b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b><i>Einblick in die heutige Versorgung von Häusern</i></b> .....	<b>5</b>
<b>4</b>	<b><i>Energieformen und dazugehörige Technologien</i></b> .....	<b>7</b>
<b>4.1</b>	<b>Elektrische Energie</b> .....	<b>7</b>
4.1.1	Photovoltaische Stromerzeugung .....	7
4.1.2	Brennstoffzelle .....	10
4.1.3	Windkraftanlagen .....	12
<b>4.2</b>	<b>Heizwärme und Warmwasseraufbereitung</b> .....	<b>13</b>
4.2.1	Wärmepumpe .....	13
4.2.2	Heizen mit Holz .....	16
4.2.3	Geothermie .....	16
4.2.4	Solarthermie .....	18
<b>5</b>	<b><i>Energiespeicherung</i></b> .....	<b>20</b>
<b>5.1</b>	<b>Elektrische Energie</b> .....	<b>20</b>
5.1.1	Elektrochemische Speicher .....	20
5.1.2	Mechanische Speicher .....	23
<b>5.2</b>	<b>Thermische Energie</b> .....	<b>24</b>
5.2.1	Sensible Wärmespeicher .....	24
5.2.2	Latente Wärmespeicher .....	25
<b>5.3</b>	<b>Chemische Energie</b> .....	<b>25</b>
5.3.1	Wasserstoffspeicher .....	25
<b>6</b>	<b><i>Definition eines Standardhauses</i></b> .....	<b>27</b>
<b>7</b>	<b><i>Energiepreise</i></b> .....	<b>29</b>
<b>7.1</b>	<b>Erdgas</b> .....	<b>29</b>
<b>7.2</b>	<b>Strom</b> .....	<b>30</b>
<b>7.3</b>	<b>Heizöl</b> .....	<b>31</b>
<b>8</b>	<b><i>Berechnung der Anschaffungs- und Betriebskosten</i></b> .....	<b>33</b>
<b>8.1</b>	<b>Anschaffungs- und Betriebskosten Wärmepumpe</b> .....	<b>33</b>

8.2	Anschaffungskosten Photovoltaikanlage .....	34
9	<i>Klimaeinflüsse</i> .....	36
10	<i>Fazit und Ausblick</i> .....	38
11	<i>Literaturverzeichnis</i> .....	40

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: n- und p-dotierte Halbleiter.....	9
Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer Solarzelle mit p-n-Übergang.....	9
Abbildung 3: Brennstoffzellentypen .....	11
Abbildung 4: Funktionsprinzip einer PEMFC-Brennstoffzelle .....	11
Abbildung 5: Arten der Wärmepumpen .....	13
Abbildung 6: Schema einer Luft/Wasser-Wärmepumpe.....	14
Abbildung 7: Querschnitt eines Flachkollektors .....	18
Abbildung 8: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle.....	21
Abbildung 9: Erdgaspreisentwicklung in Euro pro MMBTU.....	30
Abbildung 10: Strompreisentwicklung in Euro pro MWh.....	31
Abbildung 11: Heizölpreisentwicklung in Euro pro Gallone.....	32
Abbildung 12: Jährliche mittlere Tagesmitteltemperatur in Deutschland.....	36
Abbildung 13: Eintreffende Globalstrahlung in Deutschland von 1983-2020.....	37

# 1 Einführung

Im Jahre 2021 trat die letzte Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes in Kraft, in der die Bundesregierung die Klimaschutzvorgaben verschärfte. In Deutschland soll bis zum Jahre 2045 Treibhausgasneutralität umgesetzt werden, was bedeutet, dass es dann ein Gleichgewicht zwischen Treibhaus-Emissionen und deren Abbau geben soll. Das Gesetz regelt zudem, dass bereits bis zum Jahr 2030 eine Reduzierung der Emissionen um mindestens 65 % gegenüber dem Jahr 1990 erfolgen soll. Umgesetzt werden sollen diese Ziele in den Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr, Landwirtschaft und im Gebäudebereich.<sup>1</sup>

Zur Erreichung dieses ersten Ziels bis 2030 müssen die Emissionen künftig pro Jahr um 6 % reduziert werden, das Ziel verfehlt hatten Ende 2021 der Gebäude- und Verkehrssektor. Im Gebäudesektor konnten zwar seit dem Jahr 1990 die Emissionen um insgesamt 45 % reduziert werden, jedoch hat dieser Sektor immer noch einen Anteil von 15 % an den Gesamtemissionen, absolut waren das im Jahr 2021 115 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>. Den größten Anteil daran hatten fossile Energieträger zur thermischen Energieerzeugung und der Bezug von elektrischer Energie.

Bis zum Jahr 2030 soll diese Zahl auf 67 Millionen reduziert werden. Um dies zu erreichen, muss die Energieeffizienz der Gebäude und der Ausbau der erneuerbaren Energien deutlich gesteigert werden.<sup>2</sup> Bei Neubauten sind diese Aspekte durch moderne Baustoffe und entsprechende Anlagen zur Energieerzeugung relativ einfach umzusetzen. Die Verbesserung der Energieeffizienz bei bestehenden Gebäuden ist jedoch meist mit großem Aufwand verbunden. Dagegen ist die Nachrüstung mit erneuerbaren Energien im privaten Bereich verhältnismäßig unkompliziert.

Neben den Vorgaben der Bundesregierung und der Umweltorientierung eines jeden Einzelnen wurde durch den Krieg in der Ukraine die Notwendigkeit zur Steigerung der Unabhängigkeit von Rohstoffimporten letztlich deutlich. Getrieben durch zeitweise hohe Rohstoffpreise und die Angst vor einem Versorgungsausfall wurde die Nachfrage nach selbstständiger Energieerzeugung bei Gebäuden immer höher. Denn dadurch werden Eigentümer von Wohngebäuden weniger vom Markt und seinen Preisen abhängig.

---

<sup>1</sup> vgl. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2022

<sup>2</sup> vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2022

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der selbstständigen Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie im Eigenheim, wobei komplette Selbstständigkeit Autarkie bedeuten würde. Es soll untersucht werden, ob dies möglich ist und welche Kosten dabei auf den Eigentümer eines solchen Eigenheims zukommen, also ob dies wirtschaftlich ist.

Um diese Thematik aufzugreifen, wird zunächst der Begriff Autarkie definiert und im Folgenden für diese Arbeit eingeordnet. Daraufhin erfolgt ein kurzer Einblick in die heutige energetische Versorgung von Wohngebäuden, also wie diese versorgt werden und welche Anteile dabei die verschiedenen Energieträger haben. Danach werden die verschiedenen technischen Systeme behandelt, mit welchen theoretisch eine autarke energetische Versorgung möglich wäre. Im Detail geht es dabei um elektrische Energie zur Versorgung von Lichtquellen und elektrischen Verbrauchern sowie die Bereitstellung von thermischer Energie für Heizwärme und Warmwasseraufbereitung zur Versorgung eines Eigenheims und deren Bewohner. Im Anschluss daran wird auf mögliche Energiespeicher eingegangen. Bevor eine Kostenrechnung für den Einbau solcher Systeme durchgeführt wird, wird für diese Arbeit ein Haus definiert, in das die Systeme eingebaut werden sollen.

## 2 Definition des Begriffs Autarkie im Rahmen dieser Arbeit

Zu Beginn soll im Folgenden Klarheit über die Definition des Begriffs Autarkie geschaffen und der Begriff darüber hinaus für die vorliegende Arbeit abgegrenzt werden. Grundsätzlich bezieht sich die Definition des Begriffs Autarkie auf die materiellen Ressourcen, auf die das Handeln abzielt. In der Literatur wird der Begriff den Adjektiven unabhängig, selbstständig und sich selbst versorgend zugeordnet.<sup>3</sup> Ferner ist es wichtig, bei der Verwendung des Begriffs die Weite der Systemgrenzen genau zu definieren, dabei könnte sich der Begriff beispielsweise auf ein Gebäude, eine Stadt oder ein Land beziehen. Dieses Verständnis der Systemgrenzen, in denen Autarkie vorherrscht, hatten bereits klassische griechische Autoren wie Platon und Aristoteles. Zu dieser Zeit hatten bäuerliche Haushalte schon das Bestreben nach einem autarken Leben: „Der ökonomische Austausch gilt als sekundär, denn der Haushalt strebt nach Selbstgenügsamkeit, nach Autarkie.“<sup>4</sup> Des Weiteren wird per Definition eine Festlegung der Bezugsgrößen getroffen, wobei es hierbei theoretisch denkbar ist, neben Energie- auch Stoff- oder Wertströme mit einzubeziehen. Zuletzt wird in der Literatur zwischen bilanzgerechter und lastgerechter Autarkie unterschieden. Im Falle der lastgerechten Autarkie wäre ein Austausch von Bezugsgrößen über die festgelegten Systemgrenzen hinaus gar nicht möglich. Bei der Definition der bilanzgerechten Autarkie wird die Summe der erzeugten Bezugsgrößen mit der Summe der verbrauchten Bezugsgrößen über einen vorgegebenen Zeitraum (meist über ein Jahr) gegengerechnet, also bilanziert. Ist das Ergebnis dieser Rechnung null oder positiv, dann ist Autarkie bei dieser Definition erreicht. Schwachpunkt bei dieser Überlegung ist, dass bei der Verwendung nachhaltiger Energien der Energieverbrauch und die Energieerzeugung naturgemäß häufig nicht auf denselben Zeitpunkt fallen. So ist zum Beispiel die photovoltaische Stromerzeugung im Sommer in der Regel höher als im Winter, die Lücken der Energiegewinnung werden dann oftmals über das regionale Stromnetz geschlossen. Aufgrund dieser weit gefassten Definition wird im Folgenden der Begriff Autarkie als lastgerechte Autarkie verstanden. Bei dieser ist es notwendig, dass das Angebot die Nachfrage zu jedem Zeitpunkt mindestens erreicht oder auch darüber hinausgeht. Da dies in der Praxis schwer

---

<sup>3</sup> vgl. Wahrig 2007, S. 143

<sup>4</sup> vgl. Starbatty 2008, S. 20



umzusetzen ist, hat sich der erweiternde Begriff der Teilautarkie verbreitet. Dabei wird ein Autarkiegrad berechnet, der dann eine Prozentzahl ausweist, die ein vorgegebenes System erreicht, um sich selbst zu versorgen. Bei der Energieautarkie, um die es in der vorliegenden Arbeit geht, werden Stoff- und Wertströme nicht berücksichtigt. Zudem spielt der Begriff der „grauen Energie“, der in der Literatur ebenfalls thematisiert wird und die Energiemenge beschreibt, die für die Herstellung, Transport, Lagerung, Verkauf und Entsorgung eines Produktes benötigt wird, keine tragende Rolle.<sup>5</sup>

Es handelt sich in der vorliegenden Arbeit also um ein energieautarkes Haus, das sich zu jedem Zeitpunkt selbst mit Energie versorgen kann. Ist ein Autarkiegrad von 100% nicht zu erreichen, spricht man von Teilautarkie. Aufgrund der Realisierbarkeit eines solchen Hauses, welches in einem urbanen Lebensraum (z. B. Großstadt) umgesetzt werden kann, herrschen andere Voraussetzungen, als sie beispielsweise in der Wildnis gegeben wären. So ist es in Deutschland beispielsweise Vorschrift, dass Wohngebäude an das lokale Abwassernetz angeschlossen werden, was von den Gemeinden durch die sogenannte Entwässerungssatzung geregelt wird.<sup>6</sup> Wasser ist zwar ohnehin ein sogenannter Stoffstrom, soll aber verdeutlichen, wie schwierig umsetzbar ein komplett autarkes Haus ist. Anstatt eines Kanalanschlusses wäre zwar auch rein theoretisch ein Brunnen und eine Sickergrube möglich, jedoch könnte ein solcher Brunnen bei längerer Trockenheit nicht genügend Wasser liefern. Auch eine Sickergrube ist in einer belebten Umgebung nicht einfach umzusetzen. Aber auch bei der Energieautarkie gibt es Einschränkungen, so ist ein Anschluss an das Stromnetz als Backup für die Bewohner, aber auch für die Einspeisung des erzeugten Stroms aus Sicherheitsgründen und aus Gründen der Wirtschaftlichkeit vorgesehen.

---

<sup>5</sup> vgl. Deutsche 2015

<sup>6</sup> vgl. Landeshauptstadt München 2018

### 3 Einblick in die heutige Versorgung von Häusern

Bevor die Technologien für ein autarkes Eigenheim behandelt werden sollen, soll dieser Abschnitt einen Überblick darüber verschaffen, wie der Großteil an Eigenheimen in Deutschland heutzutage energetisch versorgt wird.

Im Allgemeinen wird Energie als die Fähigkeit Arbeit zu verrichten definiert. Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden, bei jedem energierelevanten Prozess wird sie lediglich in eine andere Energieform umgewandelt. Im Allgemeinen werden hierbei Primärenergieträger in Sekundärenergie umgewandelt. Der Unterschied zwischen diesen beiden Energiebegriffen besteht darin, dass Primärenergieträger in der Natur vorkommen und noch nicht durch einen technischen Prozess umgewandelt wurden (z. B. Erdgas, Rohöl oder auch erneuerbare Energien). Sekundärenergie kann dann beispielsweise Heizöl, elektrischer Strom oder auch Benzin sein.<sup>7</sup>

In Deutschland gibt es rund 40 Millionen Haushalte, die alle mit Energie versorgt werden müssen, damit ihre Bewohner beheizten Wohnraum, Elektrizität und warmes Wasser haben. Strom wird hierzulande größtenteils von Stromanbietern bezogen, dies bedeutet zwar keine Autarkie, jedoch wird bereits knapp die Hälfte des Stromangebots großer Energieversorger durch regenerative Energien gedeckt. Rund 51 % werden durch konventionelle Energieträger (vorrangig Kohle und Erdgas) in das Stromnetz eingespeist, die restlichen 49 % werden durch erneuerbare Energieträger (Windkraft, Biogas, Photovoltaik, Wasserkraft) gewonnen.<sup>8</sup>

Bei den Heizenergieträgern werden hier nur die am häufigsten genutzten Primärheizsysteme betrachtet: Erdgas, Heizöl, Fernwärme und ein bereits zunehmend wachsender Anteil an erneuerbaren Energien. Die überwiegend verwendete Energieart für Heizenergie in Deutschland ist nach wie vor Erdgas mit etwa 50 %, womit ein Heizkessel betrieben und das erwärmte Wasser dann zur Beheizung der Wohnräume und zur Warmwassernutzung verwendet werden kann. Die gleiche Systematik findet man beim Bezug von Heizöl wieder, wobei dieses mit 20 % einen wesentlich geringeren Anteil hat. Mit einem Anteil von 17 % werden in Deutschland Häuser durch Fernwärme versorgt. Fernwärme ist ein System zur zentralen Versorgung von Gebäuden mit Wärmeenergie, dabei wird meist Heizwasser zentral von Heizkraftwerken über ein Netzwerk von Rohrleitungen verteilt. Die Wärmeenergie kann aus verschiedenen Quellen

---

<sup>7</sup> vgl. Statistisches Bundesamt 2023b

<sup>8</sup> vgl. Statistisches Bundesamt 2023c

in den Kraftwerken gewonnen werden, wie beispielsweise aus konventionellen Kraftwerken, Müllverbrennungsanlagen oder auch industriellen Prozessen entnommen werden.<sup>9</sup> Letztlich tragen auch die erneuerbare Energien bereits mit 7 % zur Wärmeversorgung von Häusern bei, den restlichen Anteil bilden sonstige Energiearten wie Strom oder Kohle.<sup>10</sup>

---

<sup>9</sup> vgl. Konstantin/Konstantin 2022, S. 1

<sup>10</sup> vgl. Statistisches Bundesamt 2023a

## 4 Energieformen und dazugehörige Technologien

Nachdem das letzte Kapitel etwas Aufschluss über die heutige Versorgung von Häusern liefern konnte, sollen in diesem Kapitel mögliche Technologien zur Steigerung des Autarkiegrades eines Gebäudes näher behandelt werden. Abschnitt 4.1 beschäftigt sich mit elektrischer Energie und 4.2 mit thermischer Energie (Heizung und Warmwasser).

### 4.1 Elektrische Energie

#### 4.1.1 Photovoltaische Stromerzeugung

Bei der photovoltaischen Stromerzeugung wird die Strahlungsenergie der Sonne durch direkte Nutzung mittels Solarzellen in elektrische Energie umgewandelt.

Erstmals wurde diese Technologie 1958 in der amerikanischen Raumfahrt angewandt, dabei wurde der US-Satellit Vanguard 1 mit Solarzellen ausgestattet.<sup>11</sup> Das Prinzip von Solarzellen hat sich seitdem bewährt, jedoch hat sich das Einsatzgebiet verlagert. In den Anfängen der Technologie wurde photovoltaische Stromerzeugung bei netzautarken Anwendungen verwendet, Satelliten oder bei elektrischen Kleinverbrauchern wie beispielsweise Taschenrechnern. Heutzutage werden sie größtenteils als netzgekoppelte Solarkraftwerke in sogenannten Solarparks oder aber auch im privaten Bereich auf Hausdächern verwendet und leisten damit einen immer wachsenden Beitrag zur Stromversorgung.<sup>12</sup>

Bevor auf die Funktionsweise einer Solarzelle genauer eingegangen werden kann, ist es von Vorteil, die Physik elektrisch leitfähiger Feststoffe zu verstehen. **Nichtleiter** (z. B. Gummi und Keramik) besitzen eine mit Elektronen voll aufgefüllte Außenhülle, sie besitzen also keine frei beweglichen Valenzelektronen (Elektronen der äußersten Atomhülle). Erst wenn viel Energie aufgebracht wird (starke thermische Anregung), schaffen es wenige Elektronen, sich aus der äußersten Atomhülle zu lösen. So zeigt beispielsweise Keramik bei sehr hohen Temperaturen eine geringe Leitfähigkeit.<sup>13</sup> Um eine elektrische Leitfähigkeit aufzuweisen ist es also notwendig, dass Valenzbindungen aufgebrochen und Elektronen als Ladungsträger freigesetzt werden oder dass bereits freie

---

<sup>11</sup> vgl. Schmidt 2013, S. 276

<sup>12</sup> vgl. Wesselak 2013, S. 192

<sup>13</sup> vgl. Watter 2022, S. 17

Valenzbindungen vorliegen.<sup>14</sup> **Leitende Materialien** (z. B. Metalle und Legierungen) besitzen freie Elektronenlücken in ihrer äußersten Atomhülle, die den Elektronentransport ermöglichen und daher eine gute elektrische Leitfähigkeit aufweisen.<sup>15</sup> **Halbleiter** (z. B. Silicium) besitzen bei tiefen Temperaturen die Eigenschaften von Nichtleitern und bei hohen die von leitenden Materialien. Silicium, einer der am häufigsten verwendeten Halbleiter, besitzt vier Valenzelektronen. Wird es erwärmt, so lösen sich Elektronen aus ihren Bindungen und der Stoff beginnt leitfähig zu werden. Die aufgebrochenen Bindungen, die zurückbleiben, verhalten sich wie positive Ladungen, ziehen also Elektronen an. Die Leitfähigkeit eines Materials wird also durch freie Elektronen (negative Ladungsträger) als auch durch freie Bindungen (positive Ladungsträger) gefördert.<sup>16</sup> Um sich die Eigenschaft von Halbleitern aber auch bei geringeren Temperaturen zunutze zu machen, kann man die Gitterstruktur mit Hilfe von Fremdatomen technisch beeinflussen, die sogenannte Dotierung. Wirksam sind dabei Fremdatome mit einer abweichenden Valenzelektronenzahl von der des Grundstoffes, im Falle von Silicium beispielsweise Phosphor (fünf Valenzelektronen) oder Bor (drei Valenzelektronen). So entstehen dann entweder n-dotierte Halbleiter (Überschuss an Elektronen) oder p-dotierte Halbleiter (Mangel an Elektronen), in beiden Fällen wird das vorliegende Material leitfähiger. Der Überschuss an frei beweglichen Elektronen bei n-dotierten Halbleitern erhöht infolge der Dotierung die Leitfähigkeit des Grundmaterials. Im zweiten genannten Fall sorgen die Fremdatome dafür, dass Valenzelektronen aus dem Grundstoff herausgelöst werden, denn die freien Bindungsstellen, welche durch die Fremdatome geschaffen wurden, wirken wie positive Ladungsträger.<sup>17</sup>

---

<sup>14</sup> vgl. Wesselak/Voswinckel 2016, S. 30

<sup>15</sup> vgl. Watter 2022, S. 17

<sup>16</sup> vgl. Wesselak/Voswinckel 2016, S. 30 f.

<sup>17</sup> vgl. Watter 2022, S. 18

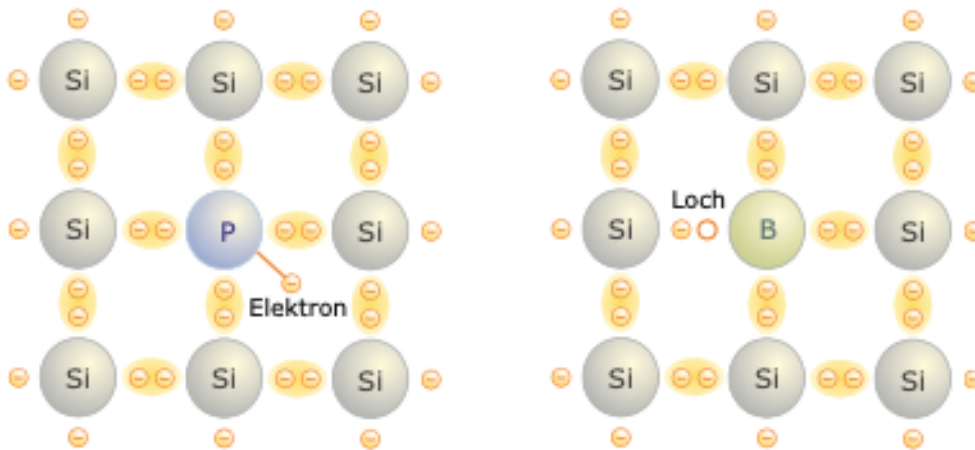


Abbildung 1: n- und p-dotierte Halbleiter

Quelle: Quaschnig 2019, S. 195

Fügt man nun eine p-dotierte Schicht an eine n-dotierte Schicht, dann erhält man einen sogenannten p-n-Übergang, die häufigste Ausführung von produzierten Solarzellen. Geschieht dies, dann kommt es an der Fügegrenze zu einer Verarmung an Ladungsträgern, denn die Elektronen aus dem n-Gebiet bewegen sich in Richtung des p-Gebiets und umgekehrt geschieht dies mit den freien Bindungen. Zurück bleiben dann die fest in das Halbleitermaterial (Silizium) eingebauten ionisierten Dotierungsatome. Diese ionisierte Grenzschicht sorgt dafür, dass eine weitere Abwanderung an Ladungsträgern verhindert wird.

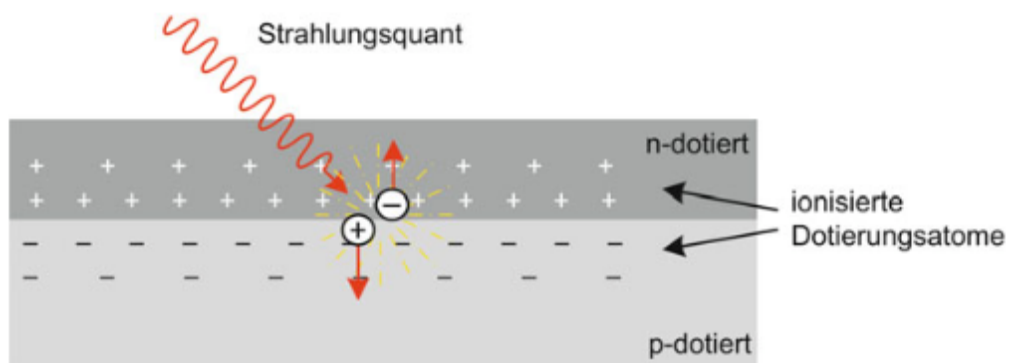


Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer Solarzelle mit p-n-Übergang

Quelle: Wesselak/Voswinckel 2016, S. 37

Trifft nun Sonnenenergie auf den Halbleiter, werden die Elektronen-Loch-Paare in Folge der thermischen Erwärmung in der Grenzschicht voneinander getrennt. Die Elektronen werden in Richtung des positiv geladenen n-Gebiets bewegt und die Löcher in Richtung des p-Gebiets beschleunigt.<sup>18</sup> Verbindet man nun beide Oberflächen der Materialien mittels eines leitenden Kontakts, so entsteht ein Stromfluss.

#### 4.1.2 Brennstoffzelle

Innerhalb einer Brennstoffzelle „verbrennt“ ein Brennstoff, aber im Unterschied zu einem gewöhnlichen Feuer geschieht dies nicht mit einer Feuererscheinung. Genau genommen wird in einer Brennstoffzelle ein Stoff nicht verbrannt, sondern verstromt beziehungsweise es findet eine sogenannte kalte Verbrennung statt, analog zu einer haushaltsüblichen Batterie. Üblicherweise werden Brennstoffzellen mit Wasserstoff betrieben, dieser verstromt durch elektrochemische Vorgänge und so wird die im Wasserstoff gespeicherte chemische Energie direkt in Elektrizität umgewandelt.<sup>19</sup>

Bei einer solchen Funktionsweise spricht man von Direktverstromung, da die chemische Energie nicht erst in thermische Energie umgewandelt werden muss, sondern eine direkte Umwandlung in elektrische Energie stattfindet. Der entscheidende Vorteil dabei ist, dass dadurch der Wirkungsgrad höher ist. Im Wesentlichen werden die nachfolgenden Brennstoffzellentypen unterschieden, kategorisiert werden sie entsprechend des eingesetzten Elektrolyts, dem Brennstoff und dem Oxidationsmittel sowie der Arbeitstemperatur.<sup>20</sup>

---

<sup>18</sup> vgl. Wesselak/Voswinckel 2016, S. 37 f.

<sup>19</sup> vgl. Kurzweil 2016, S. 2

<sup>20</sup> vgl. Schmidt 2013, S. 309

Brennstoffzelle	Elektrolyt	Brennstoff/Oxidationsmittel	Arbeitstemperatur in °C
AFC	wässrige Kalilauge	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	60-120
PEMFC	protonenleitende Elektrolytmembran	H <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> oder Luft	20-120
DMFC	Polymermembran	Methanol/Luft	90-120
PAFC	Phosphorsäure	Erd- oder Kohlegas/Luft	160-220
MCFC	geschmolzene Karbonate	Erd- oder Kohlegas/Luft	600-650
SOFC	Oxidkeramischer Elektrolyt	Erd- oder Kohlegas/Luft	850-1000

FC steht für Fuel Cell (Brennstoffzelle)

Abbildung 3: Brennstoffzellentypen

Quelle: in Anlehnung an Schmidt 2013, S.310, Kurzweil 2016, S.5, Watter 2022, S.364

Moderne Brennstoffzellen werden in der PEMFC Ausführung gebaut (Polymer-Elektrolyt-Membran oder auch Proton-Exchange-Membrane). Da diese mit Wasserstoff und Sauerstoff betrieben werden, ist hier auch der Gedanke der Nachhaltigkeit und Autarkie naheliegend.

Der Aufbau einer Brennstoffzelle ist nicht sonderlich komplex, es bedarf zweier Elektroden und einem Elektrolyt. Die Anode wird mit dem oxidierbaren Brennstoff

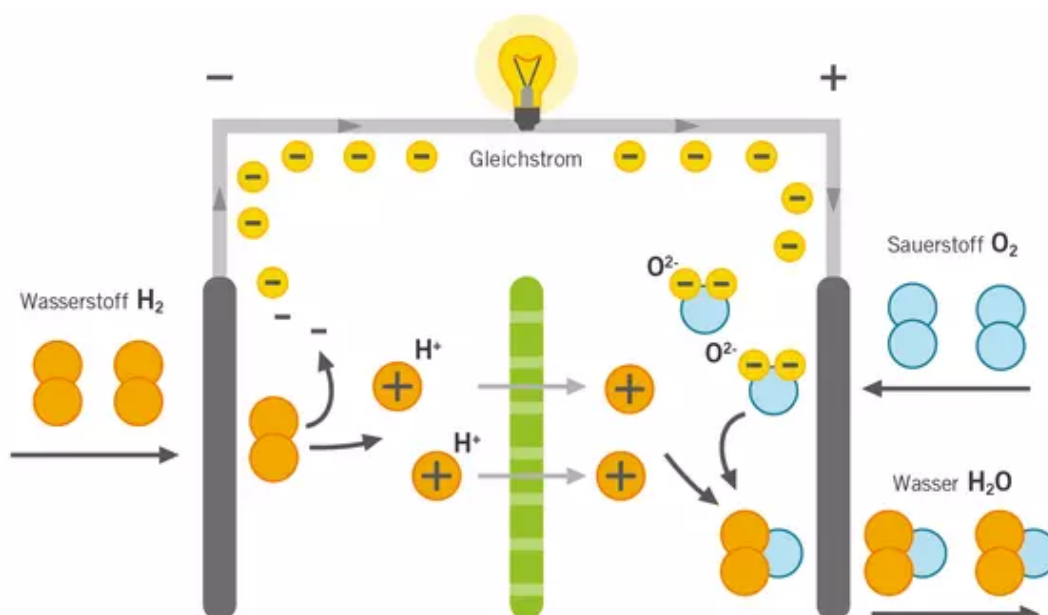


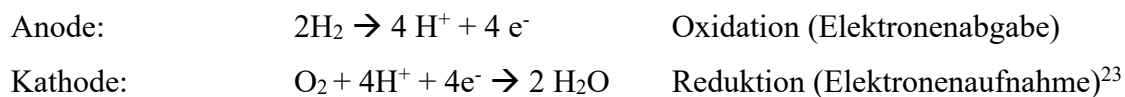
Abbildung 4: Funktionsprinzip einer PEMFC-Brennstoffzelle

Quelle: Hakenes 2014



(Wasserstoff) versorgt und die Kathode mit dem Oxidationsmittel (Sauerstoff), der Elektrolyt befindet sich zwischen den beiden Elektroden.<sup>21</sup>

An der Anode beziehungsweise dem Minuspol wird der Wasserstoff oxidiert, es werden Elektronen freigegeben. Die abgegebenen Elektronen fließen über den Stromkreis hin zur Kathode (Pluspol). Der oxidierte Wasserstoff (H<sup>+</sup>) diffundiert durch die Elektrolytmembran. Auf der Kathodenseite wird der zugeführte Sauerstoff durch die Elektronen, die zuvor im Stromkreis elektrische Arbeit verrichtet haben, reduziert. Zusammen mit den transportierten Wasserstoff-Protonen, die durch das Elektrolyt transportiert wurden, entsteht Wasser. Der Ladungstransport innerhalb der Brennstoffzelle wird also durch die positive Ionenbewegung im Elektrolyt realisiert.<sup>22</sup> Folglich finden an Anode und Kathode die jeweiligen chemischen Reaktionen statt:



Werden nun Anode und Kathode mit einem elektrischen Verbraucher verbunden, fließt ein elektrischer Strom zwischen diesen beiden.

### 4.1.3 Windkraftanlagen

Stromerzeugung mittels kinetischer Energie des Windes ist weit verbreitet, jedoch als große Windkraftanlagen, die elektrische Energie für die Allgemeinheit erzeugen und nicht für den privaten Nutzer. Die Methodik ist bei kleinen privaten Anlagen jedoch die gleiche, die Bewegungsenergie der Windströmung trifft auf die Rotorblätter der Anlage und setzt den Rotor auf diese Weise in eine Drehbewegung. Diese Drehbewegung wird dann mit Hilfe eines Generators in Strom umgewandelt. Jedoch kommen kleine private Anlagen kaum zum Einsatz, da diese im Vergleich zu großen kaum Strom liefern und daher für den privaten Gebrauch andere Systeme vorzuziehen sind.<sup>24</sup>

---

<sup>21</sup> vgl. Wosnitza/Hilgers 2012, S. 131

<sup>22</sup> vgl. Watter 2022, S. 367 f.

<sup>23</sup> vgl. Wosnitza/Hilgers 2012, S. 131 f.

<sup>24</sup> vgl. Frey 2019, S. 229

## 4.2 Heizwärme und Warmwasseraufbereitung

### 4.2.1 Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe ist ein technisches Gerät, das Energie in Form von Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau aufnimmt und nach Zufuhr von Antriebsenergie auf einem höheren Temperaturniveau wieder abgibt.<sup>25</sup> Es gibt verschiedene Arten von Wärmepumpen, grundlegend werden sie nach ihren Wärmequellen und Wärmesenken eingeteilt. Als Wärmequelle stehen die Luft, das Wasser und das Erdreich zur Verfügung, die Wärmesenke kann durch das Heizwasser oder die Raumluft realisiert werden.<sup>26</sup> In Abbildung 5 sind entsprechende Kombinationsmöglichkeiten aufgelistet.

	Quelle	Senke
Luft/Luft-Wärmepumpe	Atmosphäre	Raumluft
Luft/Wasser-Wärmepumpe	Atmosphäre	Heizwasser
Wasser/Wasser-Wärmepumpe	See, Bach, Teich	Heizwasser
Wasser/Luft-Wärmepumpe	See, Bach, Teich	Raumluft
Erdreich/Wasser-Wärmepumpe	Sole, Wärmerohr, direkt	Heizwasser
Erdreich/Luft-Wärmepumpe	Sole, Wärmerohr, direkt	Raumluft

Abbildung 5: Arten der Wärmepumpen

Quelle: in Anlehnung an von Böckh/Stripf 2018, S. 229

Nach den Gesetzen der Thermodynamik kann ein Wärmestrom nur von einem höheren Temperaturniveau zu einem tieferen fließen, mit Hilfe einer Wärmepumpe kann man die Fließrichtung jedoch umgekehrt nutzen.<sup>27</sup> Wie dies funktioniert, wird im Folgenden genau erläutert.

Wie anfangs in diesem Kapitel schon erwähnt wurde, muss dem Medium in der Wärmepumpe Antriebsenergie zugeführt werden. Dies kann je nach Funktionsprinzip der Anlage in Form von mechanischer Energie oder von Wärme realisiert werden, entsprechend wird grundsätzlich zwischen Kompressions- und Sorptionswärmepumpen unterschieden. Jedoch gibt es auch noch weitere Anlagentypen wie beispielsweise

<sup>25</sup> vgl. Kaltschmitt 2014, S. 624

<sup>26</sup> vgl. von Böckh/Stripf 2018, S. 229 f.

<sup>27</sup> vgl. Kaltschmitt 2014, S. 624

magnetische Wärmepumpen, Stirling- oder Phillips-Wärmepumpen, Dampfstrahl- und Vuilleumier-Wärmepumpen, diese Funktionstypen sind bisher jedoch nur in ganz speziellen Segmenten zu finden.<sup>28</sup> Auch auf die Sorptionswärmepumpen wird im Folgenden nicht weiter eingegangen, da diese in der Regel mit Erdgas betrieben werden und so kein autarker Betrieb dieses Anlagentyps möglich ist.<sup>29</sup>

Kompressionswärmepumpen sind am weitesten verbreitet und verfügen über den am weitesten entwickelten technischen Standard. Sie können auch mit einem Verbrennungsmotor angetrieben werden, jedoch wird die elektrisch betriebene Kompressionswärmepumpe am häufigsten verwendet und findet ihren Einsatz vor allem im Wohnungssektor.<sup>30</sup>

Zur Gebäudeklimatisierung wird am häufigsten die Kombination aus Luft und Wasser verwendet, dementsprechend eine Luft/Wasser-Wärmepumpe, wobei eine solche Anlage meist nach dem Kaltdampfprozess abläuft. Das erwärmte Wasser kann dann zur Gebäudetemperierung und für die Warmwasseraufbereitung genutzt werden. Um diesen zu verwirklichen, benötigt man folgende Komponenten in der Wärmepumpe: Verdichter, Kondensator, Expansionsventil, Verdampfer, Ventilator und Anschlüsse an das Strom- und Heizungswassersystem.<sup>31</sup>

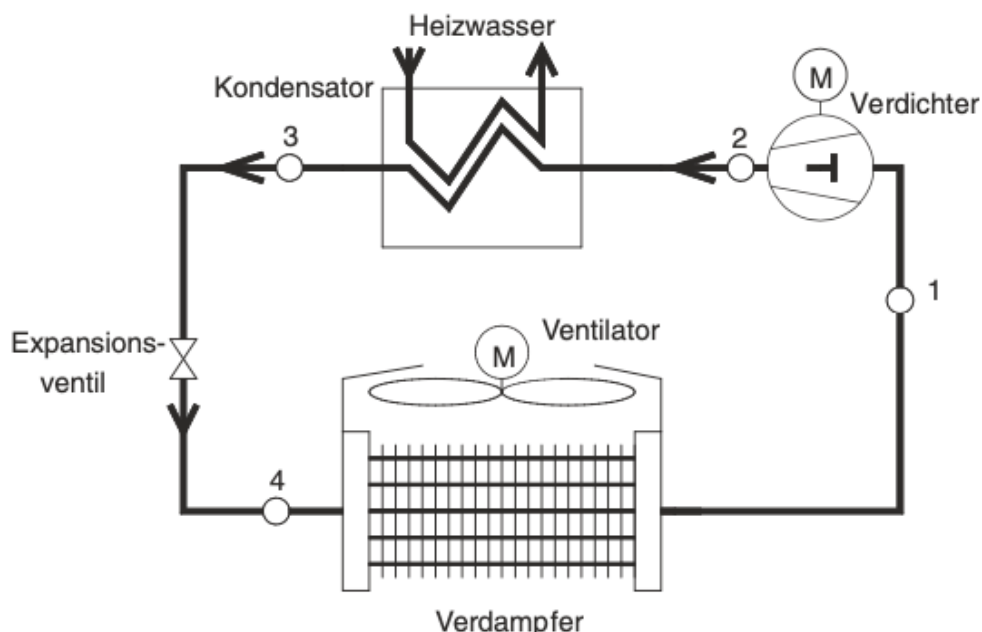


Abbildung 6: Schema einer Luft/Wasser-Wärmepumpe

Quelle: von Böckh/Stripf 2018, S. 232

<sup>28</sup> vgl. Kaltschmitt 2014, S. 624 f.

<sup>29</sup> vgl. Wietschel 2015, S. 385

<sup>30</sup> vgl. Wietschel 2015, S. 384

<sup>31</sup> vgl. von Böckh/Stripf 2018, S. 231

Um den Kalt dampfprozess zu realisieren, zirkuliert in dem geschlossenen Kreislauf der Wärmepumpe ein Kältemittel, das einen besonders niedrigen Siedepunkt besitzt. So ist es möglich, das Kältemittel sogar bei Außentemperaturen unter dem Gefrierpunkt zum Verdampfen zu bringen. Das Kältemittel wird also im Verdampfer in Form eines Rippenrohr-Wärmeübertragers erwärmt, der elektrisch angetriebene Ventilator liefert dafür den benötigten Luftmassenstrom. Dadurch, dass das Kältemittel eine noch geringere Temperatur als der aufgenommene Luftstrom aufweist, siedet und verdampft das Kältemittel kontinuierlich. Im nächsten Schritt wird dem dampfförmigen Kältemittel mit Hilfe eines Verdichters (meist ein Hubkolbenkompressor) Energie zugeführt. Dadurch steigen Druck und Temperatur des Dampfes an, der Energiegehalt erhöht sich. Im Kondensator wird dann die Wärme des Dampfes an das kältere Wasser der Heizungsanlage übertragen. Durch die abgegebene Energie des Kältemittels kondensiert dieses und verflüssigt sich wieder. Im letzten Schritt des Kreislaufs entspannt sich das flüssige Kältemittel durch ein Expansionsventil, dadurch verliert dieses noch mehr Temperatur, da der Druck sinkt. Der Kreislauf beginnt im Verdampfer nun wieder von vorne.<sup>32 33</sup>

Wärmepumpen arbeiten leistungstechnisch am besten, je dichter Verdampfungs- und Kondensationstemperatur beieinander liegen. In der Realität ist es jedoch so, dass wenn die Außenluft am wärmsten ist und die Wärmepumpe die größte Leistung bringen könnte, ist der Heizbedarf am geringsten und umgekehrt. Nachdem die Verdampfungs-temperatur nicht zu beeinflussen ist und es entsprechend kalt im Winter sein kann, können Wärmepumpen also nur wirtschaftlich betrieben werden, wenn die Heizungstemperatur möglichst gering ist. Dies bedeutet, dass die Heizleistung von Wärmepumpen in den kältesten Wintertagen eventuell nicht ausreicht und zusätzliche Wärmeerzeuger genutzt werden müssen. Aufgrund der Effizienz der Wärmepumpen bei geringen Temperaturunterschieden eignen sich Fußbodenheizungen in Kombination mit Wärmepumpen gut, da diese geringere Vorlauftemperaturen als konventionelle Heizkörper haben.<sup>34</sup>

---

<sup>32</sup> vgl. Kaltschmitt 2014, S. 624 f.

<sup>33</sup> vgl. von Böckh/Stripf 2018, S. 232

<sup>34</sup> vgl. Glaesmann 2022, S. 66 f.

## 4.2.2 Heizen mit Holz

Eine Möglichkeit, mit Holz sowohl Raumwärme als auch Warmwasser zu erzeugen sind Holzpellet-Heizungen. Pellets ist ein Brennstoff, der aus naturbelassenem Restholz wie Sägemehl oder Spänen hergestellt wird, die Abfälle aus der Holzproduktion sind. Unter hohem Druck und ohne Zugabe von jeglichen Bindemitteln werden diese Abfallprodukte verdichtet. Die Funktionsweise des Heizens ist einfach: Über eine Förderschnecke gelangen die Pellets, die in einem Vorratsbehälter aufbewahrt werden, in den Brennraum der Heizung und werden dort durch einen Heizstab oder ein Heißluftgebläse erwärmt. Durch die Erwärmung wird ein Holzgasgemisch freigesetzt und entzündet die Holzpellets.

Holz ist in diesem Sinne für eine autarke und umweltfreundliche Energieerzeugung geeignet, da es auf der einen Seite regenerativ ist, da Holz durch das Pflanzen neuer Bäume nachwächst. Und zum anderen wird Holz als CO<sub>2</sub>-neutral bezeichnet, da die bei der Verbrennung freigesetzte Menge an CO<sub>2</sub> der gleichen entspricht, die der Baum beim Wachsen aufgenommen hat.<sup>35</sup>

## 4.2.3 Geothermie

Geothermie nutzt mit Hilfe verschiedener Systeme die im Untergrund vorhandene Erdwärme, wobei grundsätzlich die tiefe und die oberflächennahe Geothermie unterschieden werden. Von der Definition her reicht die oberflächennahe Geothermie bis 400 Meter Tiefe, die jedoch nur selten erreicht wird. Gewöhnlich wird in privater Nutzung von 10 bis maximal 50 Meter tief gebohrt. In diesen Tiefen kann man sich dann in Deutschland die vorzufindenden 7 bis 12 Grad zur Gebäudetemperierung nützlich machen. Aufgrund der nicht allzu hohen Temperaturen in diesen Tiefen wird die oberflächennahe Geothermie meist in Verbindung mit einer Wärmepumpe eingesetzt, um die effektiv zu nutzende Temperatur zu erhöhen.<sup>36</sup> Die Funktionsweise dieser wurde bereits in Kapitel 4.2.1 erläutert. Untergliedern lässt sich die oberflächennahe Geothermie in geschlossene und offene Systeme, die dem Betreiber eine Auswahl verschiedener Nutzungssysteme ermöglichen. Welches System dann zum Einsatz kommt, hängt meist von den Gegebenheiten des jeweiligen Standorts ab. Kriterien dafür sind oftmals die vorliegenden hydrogeologischen Verhältnisse, regionale Vorgaben zur Nutzung des

---

<sup>35</sup> vgl. Wosnitza/Hilgers 2012, S. 92

<sup>36</sup> vgl. Dachroth 2017, S. 665

Grundwassers, das oberirdische Platzangebot oder die jeweiligen Bedürfnisse des Anwenders.<sup>37</sup>

Bei geschlossenen Systemen zirkuliert ein Wärmeträgermedium zwischen dem Untergrund und dem Gebäude, das dem Energietransport der Erdwärme dient und meist aus einem Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel besteht. Somit besteht kein direkter Kontakt zwischen Erdreich und der Flüssigkeit, im Prinzip handelt es sich somit um einen Wärmetauscher. Vorteil der geschlossenen Systeme ist somit, dass kein Grundwasser in den Bohrungen vorhanden sein muss, somit kein Fündigkeitsrisiko besteht und die Planung der Systeme in dieser Hinsicht sehr viel einfacher und sicherer sind.<sup>38</sup> Zu den im privaten Bereich am häufigsten eingesetzten Bauarten der geschlossenen Systeme zählen Geothermiesonden und Erdwärmekollektoren. Sonden sind Polyethylenrohre mit Durchmessern von 25-40 mm, die in vertikale oder geneigte Bohrlöcher eingebracht werden. Meist besteht ein System aus zwei Röhren, die unten zusammengeführt sind und somit eine U-Form bilden. In der einen Röhre strömt das kalte Medium in das Erdreich herab, in der anderen das dann temperierte Medium wieder an die Oberfläche.<sup>39</sup>

Erdwärmekollektoren sind horizontal verlegte Wärmetauscherrohre, die für gewöhnlich in einer Tiefe von 0,8 bis 1,6 Meter verbaut werden. Da dieses Nutzungssystem in mehreren Schleifen im Untergrund verbaut wird, ist der Platzbedarf um einiges größer, was auch der entscheidende Nachteil dieser Bauform ist.<sup>40</sup>

Die andere Möglichkeit, oberflächennahe Geothermie zu betreiben sind die offenen Systeme. Diese arbeiten mit einer direkten thermischen Nutzung des vorhandenen Grundwassers, das Grundwasser fungiert also selbst als Energieträger. Im Vergleich zu den geschlossenen Systemen bieten diese die wirtschaftlichere Nutzung der geothermischen Energie. Jedoch müssen vorab umfangreiche Analysen des zu bebauenden Gebiets in Bezug auf ausreichende Grundwassermenge sowie Wasserqualität und -ergiebigkeit durchgeführt werden, was Grundvoraussetzung für einen effizienten und störungsfreien Betrieb dieser Systeme ist. Üblich sind Brunnenanlagen, die aus mindestens einem Förder- und einem Schluckbrunnen bestehen und in Form von PVC- oder Edelstahlrohren im Untergrund verbaut werden. Mit Hilfe einer Pumpe wird durch den Förderbrunnen das Grundwasser entnommen, meist einer Wärmepumpe zugeführt

---

<sup>37</sup> vgl. Bayerisches Landesamt für Umwelt 2010

<sup>38</sup> vgl. Bauer 2018, S. 458

<sup>39</sup> vgl. Stober/Bucher 2020, S. 76-78

<sup>40</sup> vgl. Dachroth 2017, S. 686

und im Anschluss, nachdem es seine geothermische Energie abgegeben hat, wieder mittels des Schluckbrunnens in den Untergrund geleitet.<sup>41</sup>

#### 4.2.4 Solarthermie

Im Vergleich zur photovoltaischen Stromerzeugung wandeln solarthermische Kollektoren die einfallende Sonnenstrahlung nicht in elektrische, sondern in thermische Energie um. Die technischen Möglichkeiten dieser gewonnenen Energie sind sehr unterschiedlich, im privaten Gebrauch wird sie zur Bereitstellung von Wärme für Raumheizung und für die Warmwasserbereitung genutzt.<sup>42</sup> Der Vorgang wird im Folgenden genauer anhand eines Flachkollektors erläutert, dies ist die am meisten verbreitete Art der Solarthermie.

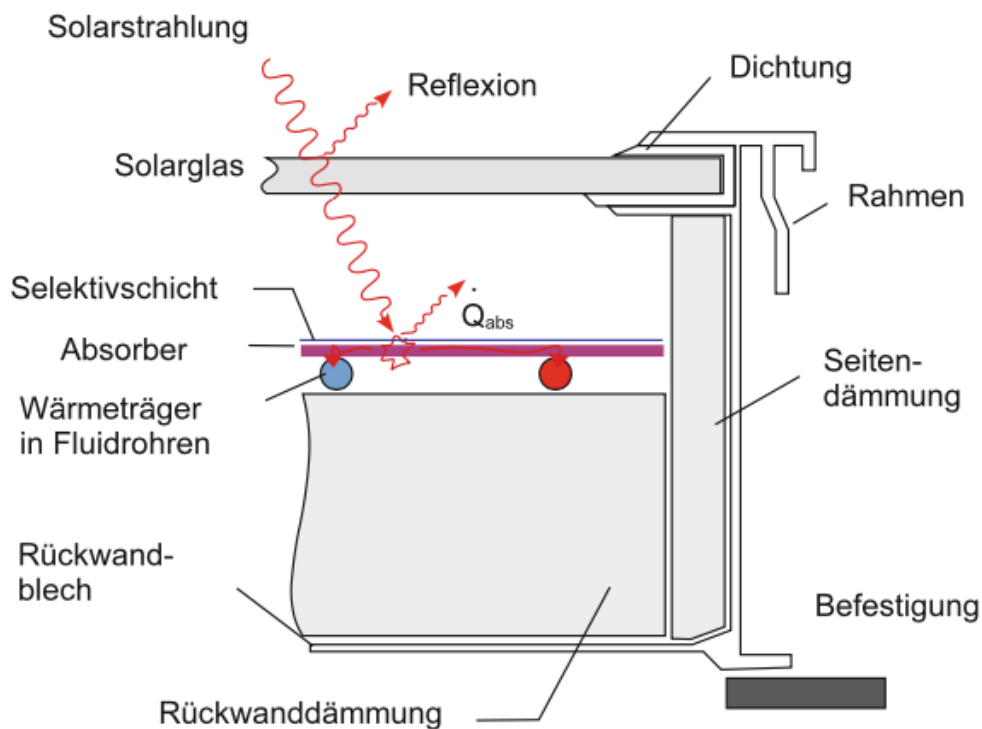


Abbildung 7: Querschnitt eines Flachkollektors

Quelle: Schabbach/Leibbrandt 2021, S. 26

Die Solarstrahlung trifft auf das Solarglas des Kollektors, dort werden rund 90 % der Sonnenstrahlung transmittiert, gelangen also durch das Glas hindurch. Nur rund 8 % der Photonen werden vom Glas reflektiert und 2 % absorbiert. Danach trifft die

<sup>41</sup> vgl. Bauer 2018, S. 453

<sup>42</sup> vgl. Quaschnig 2019, S. 107

Sonnenstrahlung auf den im Inneren des Flachkollektors montierten Absorber, dieser absorbiert die eintreffende Strahlung und wandelt sie in thermische Energie um.<sup>43</sup>

Die Absorberschicht ist dabei mit einem gut wärmeleitenden Blech aus Kupfer oder Aluminium beschichtet. Das Absorberblech erwärmt sich und gibt im Anschluss die thermische Energie über angeschweißte Fluidrohre aus Kupfer an das darin befindliche Wärmeträgermedium weiter. Das Wärmeträgermedium besteht meist aus einem Gemisch von Wasser, Frostschutzmittel und Korrosionsschutz. Ein hochwertiger Kollektor kann so rund 80 bis 85 % der eintreffenden Strahlung in thermische Energie umwandeln. Jedoch kann davon auch nicht alles auf das Wärmeträgermedium übertragen werden, da durch das Aufheizen des Absorbers ein Temperaturgefälle zwischen Umgebung und Kollektorinnerem entsteht. Je größer diese Temperaturdifferenz ist, desto höher ist auch der Verlust an Wärmeenergie an die Umgebung.

Der Absorber emittiert aufgrund seiner hohen Temperatur auch Wärmestrahlung in Richtung des Glases zurück, das Austreten dieser Wärme kann nur zum Teil durch die Scheibe wie in einem Treibhaus verhindert werden. Eine besser isolierte Scheibe würde zwar die Wärmeverluste deutlich verringern, würde jedoch auch den Anteil der durchgelassenen Sonnenstrahlung reduzieren. Wärmeverluste sollen zudem auch durch eine gute Dämmung auf der Rückseite des Kollektors sowie im Rahmen und der Seiten verhindert werden.<sup>44</sup>

---

<sup>43</sup> vgl. Quaschnig 2019, S. 124 f.

<sup>44</sup> vgl. Schabbach/Leibbrandt 2021, S. 25-29



## 5 Energiespeicherung

In diesem Abschnitt werden einige Energiespeichersysteme erörtert, die sich für die Nutzung im privaten Haushalt eignen. Diese Systeme besitzen unterschiedliche Eigenschaften und werden dementsprechend nach den Anforderungen eingesetzt. Doch im Grundlegenden geht es darum, eine sichere Energieversorgung herzustellen. Durch den zunehmenden Einsatz von regenerativen Energiequellen, die zu einem großen Teil eine fluktuierende Versorgung von Energie darstellen, gewinnen Energiespeicher immer mehr an Bedeutung. So ist es möglich Zeiträume zu überbrücken, in denen keine oder wenig Energie erzeugt werden kann, beispielsweise nachts im Falle von Solaranlagen oder an Tagen ohne Sonnenstunden.

Speicher dienen dazu, elektrische, thermische und chemische Energie unabhängig von ihrer primären Erzeugung als Endenergien jederzeit für den Nutzprozess verfügbar zu halten.<sup>45</sup> Entsprechend dieser Kategorisierung von speicherbarer Energie werden im Folgenden Systeme beschrieben, die dies ermöglichen und für den Zweck eines autark betriebenen Gebäudes geeignet sind.

### 5.1 Elektrische Energie

#### 5.1.1 Elektrochemische Speicher

Grundsätzlich findet eine Unterscheidung in Speichersysteme mit externem und internem Speicher statt. Zu den externen Speichern gehören Redox-Flow-Batterien und Wasserstoffspeicher (wohl eher rein chemische Speicher), die der internen Speicher angehörig sind sind Akkumulatoren.<sup>46</sup>

Eines der gängigsten Speichersysteme ist der **Akkumulator**, umgangssprachlich als Batterie bezeichnet, es handelt sich dabei um eine wiederaufladbare Batterie. Darin wird elektrische Energie als chemisch gebundene Energie in relativ kleinen Systemen gespeichert, daher auch der Überbegriff elektrochemische Speicher. In diesen in sich geschlossenen Systemen laufen reversible elektrochemische Reaktionen ab, so ist ein Wechsel von Lade- und Entladeprozess möglich.<sup>47</sup> Ein solches Speichersystem besteht aus einer Kaskade von galvanischen Zellen, die einen stationären Energiespeicher bilden.

---

<sup>45</sup> vgl. Schmidt 2013, S. 318

<sup>46</sup> vgl. Wesselak 2013, S. 677

<sup>47</sup> vgl. Wietschel 2015, S. 157

Die Einzelzellen bestehen, wie auch bei einer Brennstoffzelle, aus folgenden Komponenten: zwei Elektroden (Kathode und Anode), ein ionenleitender Elektrolyt und ein Separator. Entsprechend einer Vielzahl von Materialkombinationen der Elektroden und Elektrolyte bestehen deutliche Unterschiede hinsichtlich der technischen Parameter wie Energie- und Leistungsdichte, Nennspannung, Betriebstemperatur, Zyklenzahl und Entladetiefe. Je nach Anwendungsfall sind dementsprechend unterschiedliche Batterietypen geeignet.<sup>48</sup>

Das Funktionsprinzip der elektrochemischen Speicher wird im Folgenden anhand eines Lithium-Ionen-Akkumulators beschrieben.

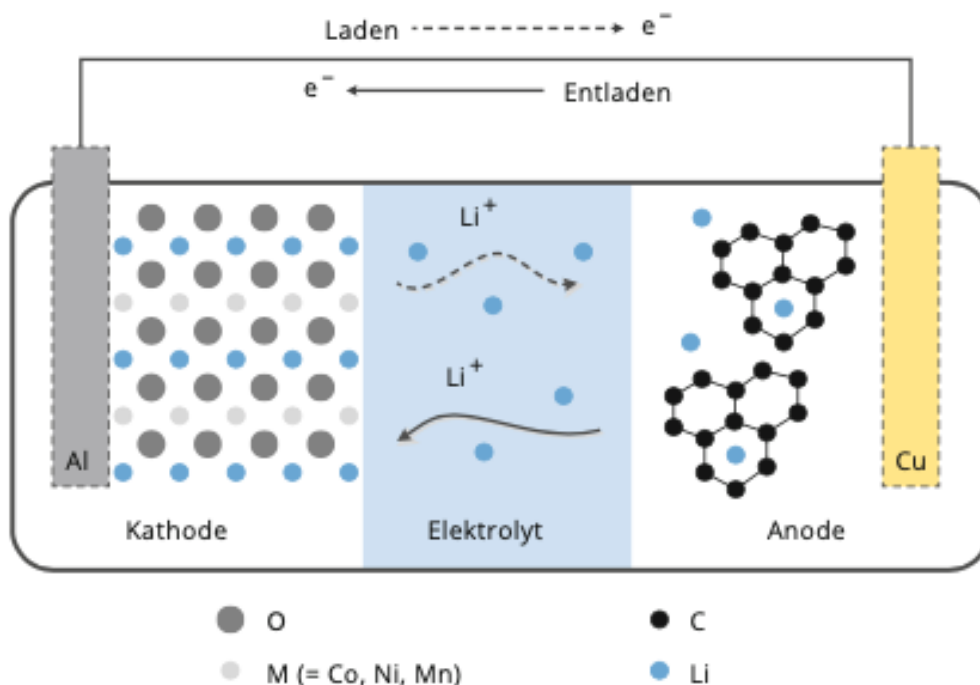


Abbildung 8: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle

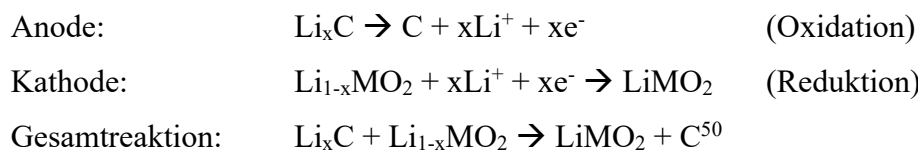
Quelle: Wietschel 2015, S. 161

Das Prinzip basiert auf dem Austausch von Lithium-Ionen zwischen der Kathode und Anode, beim Ladevorgang bewegen sich die Ionen von der Kathode zur Anode und beim Entladevorgang umgekehrt. Das Kathodenmaterial besteht aus anorganischen Metalloxiden und die Kathode selbst aus Aluminium. Das Anodenmaterial besteht in diesem Fall aus amorphem Kohlenstoff (sonst auch oft aus Kobaltoxid) und die Anode selbst ist Kupfer.<sup>49</sup> Wird dem Akkumulator nun elektrische Energie zugeführt, er wird also geladen, bewegen sich Lithium-Ionen von der Kathode durch den Elektrolyten zur

<sup>48</sup> vgl. Wietschel 2015, S. 157

<sup>49</sup> vgl. Wesselak 2013, S. 678

Anodenseite und werden dort in die Kohlenstoffstruktur eingelagert. Beim Entladen des Akkumulators erfolgt der Ionentransport in entgegengesetzter Richtung: Lithium-Ionen werden aus dem Anodenmaterial herausgelöst und bewegen sich durch den Elektrolyten zur Kathode. Durch diesen Vorgang werden an der Anode Elektronen freigesetzt, diese bewegen sich über den externen Stromkreis zur Kathode und erzeugen dadurch einen elektrischen Strom. Die Reaktionsgleichungen der Redoxreaktion während des Entladevorgangs sind:



Lithium-Ionen Akkumulatoren sind aufgrund fortgeschrittener Forschung und Entwicklung und ihrer Verwendung in portablen Systemen (z. B. Mobiltelefone) mittlerweile auch im privaten Bereich zur energetischen Versorgung von Eigenheimen vertreten. Entscheidender Vorteil dieser Technologie ist ihre hohe Energie- und Leistungsdichte, weshalb sie aktuell auch nicht von mobilen Anwendungen wegzudenken ist. Eine weitere Materialkombination, die sich in Verbindung mit autarken Häusern seit geraumer Zeit durchgesetzt hat, sind Lithiumeisenphosphat- (Eisenphosphat bildet das Anodenmaterial) Akkumulatoren. Sie besitzen zwar geringere Energie- und Leistungsdichten, jedoch sind sie für stationäre Anwendungen bei denen Gewicht und Platzbedarf eine untergeordnete Rolle spielt, sehr interessant.<sup>51</sup>

**Redox-Flow-Batterien** (Red steht dabei für Reduktion und Ox für Oxidation) oder auch als Flüssigbatterien bezeichnet, basieren ebenso wie Akkumulatoren auf dem Prinzip der Redoxreaktion. Sie gehören den externen Systemen unter den elektrochemischen Speichern an, in zwei voneinander getrennten Tanks befindet sich flüssiges Elektrolyt. Diese Tanks, die mit zwei voneinander unabhängigen Kreisläufen verbunden sind, sind jeweils mit ihren Elektroden gekoppelt, die durch eine Membran voneinander getrennt sind und den Austausch von Ionen erlaubt. Der Unterschied zu Akkumulatoren besteht

---

<sup>50</sup> vgl. Wietschel 2015, S. 160

<sup>51</sup> vgl. Wietschel 2015, S. 162

darin, dass die elektrische Energie nicht in den Elektroden gespeichert wird, sondern in den mit Elektrolyten gefüllten externen Tanks. Dadurch ist die Kapazität dieser Art von Speichersystemen leicht zu variieren, anhand der Größe der Elektrolyttanks und anhand der darin befindlichen Elektrolytlösung. Durch die externe Speicherung der Energie kann so die Speicherkapazität unabhängig von ihrer elektrischen Leistung skaliert werden. Jedoch wird diese Art von Speichersystemen im privaten Gebrauch momentan nicht verbreitet eingesetzt, da im Vergleich zu Akkumulatoren geringe Energiedichten bei gleichem Platzbedarf erzielt werden. Zudem ist diese Technologie aufgrund des Entwicklungsstandes teurer und der Platzbedarf fällt größer aus.<sup>52</sup>

### 5.1.2 Mechanische Speicher

In **Druckluftspeichern** wird direkt keine elektrische Energie gespeichert, jedoch wird elektrische Energie benötigt, um sie mechanisch in Form von komprimierter Luft zu speichern. Man unterscheidet im Allgemeinen zwischen diabaten, adiabaten und isothermen Konzepten, das Grundprinzip ist aber bei allen drei Varianten dasselbe. Umgebungsluft wird unter Einsatz eines elektrisch betriebenen Kompressors verdichtet und in einem Drucklufttank gespeichert. Zur Rückgewinnung der elektrischen Energie wird bei Bedarf die verdichtete Luft entspannt und treibt einen Generator an. Der Unterschied zwischen den drei genannten Bauarten ist die Verwendung der bei der Kompression entstehenden Wärme. Bei einem diabaten Druckluftspeicher wird diese nicht verwendet und entweicht in die Umwelt, bevor die verdichtete Luft gespeichert wird. Bei einem adiabaten System wird die Wärme in einem separaten Tank gespeichert und entspannter Luft zugeführt, bevor diese den Generator antreibt, womit sich der Gesamtwirkungsgrad wesentlich steigern lässt. Bei diesen beiden Varianten wird somit Luft als Arbeits- als auch Speichermedium eingesetzt, bei einem isothermen System wird als Arbeitsmedium hingegen eine Flüssigkeit (oftmals Öl) verwendet. Mit Hilfe dieser Flüssigkeit wird Luft in dem Speicher komprimiert, indem die Flüssigkeit in den Tank gepumpt wird. Gegenüber den beiden anderen Systemen weist diese Möglichkeit der Druckluftspeicherung jedoch geringere volumetrische Energiedichten auf.<sup>53</sup>

---

<sup>52</sup> vgl.Árpád Funke/Wietschel 2012

<sup>53</sup> vgl.Wietschel 2015, S. 215-218

## 5.2 Thermische Energie

### 5.2.1 Sensible Wärmespeicher

Die verbreitetste Methode zur Speicherung von thermischer Energie ist die Änderung der Temperatur eines Speichermaterials. Diese Temperaturveränderung ist für uns Menschen „fühlbare“, daher der Begriff der sensiblen Wärmespeicherung.

Eines der bekanntesten Systeme ist der **Warmwasserspeicher**, in dem Wasser aufgeheizt oder abgekühlt wird. Diese Speicher werden schon seit Jahrzehnten eingebaut, sie dienen zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser oder auch zur Heizungsunterstützung.<sup>54</sup>

Wichtige Parameter bei sensiblen Wärmespeichern sind die spezifische Wärmekapazität und die Masse des Speicherstoffes sowie die Temperaturdifferenz zwischen Außentemperatur und Innentemperatur des Speichers. Aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität von Wasser kommen in der Regel Flüssigkeitsspeicher (Wasserspeicher) zum Einsatz. Aufgrund des Temperaturunterschieds innerhalb und außerhalb des Speichers ist eine gute Isolierung notwendig, um so wenig wie möglich Energie durch Wärmeabstrahlung zu verlieren. Da sich die Wärmeverluste proportional zur Oberfläche des Speichermediums verhalten, die darin gespeicherte Energie jedoch proportional zum Volumen des Materials ist, steigt die Effizienz dieser Systeme bei größerem Speichervolumen. Da das Volumen im Gebäudebereich aber limitiert ist, kommen dort nur kleinere Speicher in Frage, die als Pufferspeicher für das bestehende Heizungssystem dienen, sogenannte Kurzzeitspeicher. So kann die Energie im Speicher über mehrere Stunden bis wenige Tage zwischengespeichert werden. Aufgrund des guten Oberflächen-Volumen-Verhältnisses, das die Wärmeverluste reduziert, kommen in der Haustechnik meist zylinderförmige Speicher mit Fassungsvermögen bis zu 1.000 Litern zum Einsatz.<sup>55</sup> Innerhalb des Speichers findet eine Temperaturschichtung statt, kaltes Wasser sammelt sich im unteren Bereich und warmes im oberen. Durch die Schichtung ist im oberen Bereich immer maximal erwärmtes Wasser verfügbar, daher erfolgt die Einspeisung des kalten Rücklaufwassers im unteren Bereich. Mittels einer Heizspirale, die als Wärmetauscher fungiert, wird das Wasser erwärmt und steigt so in den oberen Bereich des Speichers und kann dort entnommen werden. Die Heizspirale wird mit Wasser der

---

<sup>54</sup> vgl. Goeke 2021, S. 19 f.

<sup>55</sup> vgl. Wesselak 2013, S. 682 f.

Solarthermieanlage durchströmt, der Speicher kann jedoch auch durch einen Heizstab für solararme Tage ergänzt werden.<sup>56</sup>

## 5.2.2 Latente Wärmespeicher

Im Vergleich zu sensiblen Speichern nutzen latente Wärmespeicher den Phasenübergang eines Materials, um Wärmeenergie zu speichern und freizusetzen. Eines der bekanntesten Systeme sind **Eisspeicher**, meist zylinderförmige Tanks aus Beton, die im Erdreich versenkt und komplett mit Wasser (Leitungswasser oder Grundwasser) gefüllt werden. Der Eisspeicher nutzt die im Wasser enthaltene Energie, die beim Aggregatswechsel von flüssig zu fest frei wird. Ein solches System funktioniert nur in Verbindung mit einer Wärmepumpe. Mittels eines Sekundärkreislaufs aus spiralförmigen Kunststoffleitungen entzieht die Wärmepumpe dem im Speicher befindlichen Wasser Energie, solange sich das Wasser so stark abkühlt, bis es gefriert. Bei diesem Phasenübergang wird zusätzlich die sogenannte Kristallisationswärme freigesetzt, die zusätzlich ein hohes Maß an Energie freisetzt. Das gebildete Eis in den Wintermonaten kann im Sommer dann zu Kühlzwecken verwendet werden und durch solare Wärme von Solarthermiekollektoren und Erdwärme wird dem Eis beziehungsweise Wasser erneut Energie zugeführt, um den Kreislauf von Neuem beginnen zu lassen.<sup>57</sup>

## 5.3 Chemische Energie

### 5.3.1 Wasserstoffspeicher

Im Vergleich zu elektrischer und thermischer Energie kann man Wasserstoff nicht durch ein technisches System aus der Umwelt entnehmen und es dann speichern. Wasserstoff kommt in keiner natürlichen Form auf der Erde vor, deshalb muss er erzeugt werden. Die Gewinnung erfolgt über energieintensive Spalt- und Zerlegungsverfahren aus chemischen Verbindungen, das am verbreiteten Verfahren, das praktische Anwendung findet, ist die Elektrolyse. Andere Verfahren zur Erzeugung von reinem Wasserstoff werden in Kapitel 6 vorgestellt.

---

<sup>56</sup> vgl. Watter 2022, S. 43 ff.

<sup>57</sup> vgl. Goeke 2021, S. 23

Eine der gängigsten Technologien der Wasserstoffspeicher sind **Druckgasspeicher**, wohl auch aus dem Grund, da diese im Verkehrssektor ebenfalls häufig angewendet werden. Die Herausforderung bei der Speicherung von gasförmigem Wasserstoff ist, dass dieser eine geringe Energiedichte und ebenfalls eine geringe gravimetrische Speicherdichte aufweist. Die gravimetrische Speicherdichte beschreibt das Gewichtsverhältnis zwischen eingelagertem Wasserstoff und Speicher. Die Speicher werden meist durch zylinderförmige Stahltanks realisiert und mit Kohlefasern umwickelt, um die Speicherdrücke von bis zu 700 Bar aufzunehmen. Um diese hohen Drücke zu erreichen und dementsprechend viel Wasserstoff in einem solchen Tank zu speichern, muss dieser stark verdichtet werden, was einen hohen Energieaufwand bedeutet.<sup>58</sup>

---

<sup>58</sup> vgl. Neugebauer 2022, S. 200

## 6 Definition eines Standardhauses

Um die in den vorangegangenen Kapiteln erwähnten Technologien in eine betriebswirtschaftliche Rechnung einzubinden und damit die Kosten für eine Steigerung der Autarkie zu identifizieren, müssen zunächst statistische Daten zu Gebäuden in Deutschland herangezogen werden.

Im Folgenden wird Datenmaterial des Statistischen Bundesamts verwendet, Zahlenangaben werden gerundet.

Zum Ende des Jahres 2021 wurden in Deutschland 19,4 Mio. Wohngebäude ermittelt, den größten Anteil daran haben Gebäude mit einer Wohnung. Es wird davon ausgegangen, dass es sich dabei um Einfamilienhäuser (allein stehende Häuser, Doppelhaushälften, Reihenhäuser) handelt, da diese laut Definition eine in sich abgeschlossene Zusammenfassung von Wohnräumen mit eigenem Zugang bilden. Knapp 13 Mio. Einfamilienhäuser sind in Deutschland vorzufinden, der Rest besteht aus Wohngebäuden mit mindestens zwei Wohnungen und Wohnheimen.<sup>59</sup> Aufgrund der hohen Anzahl an Einfamilienhäusern konzentriert sich diese Arbeit im Weiteren darauf, die Kosten und Realisierbarkeit erneuerbarer Technologien für diese Art von Gebäuden zu untersuchen. Um Aussagen darüber zu treffen, werden jedoch noch genauere Daten benötigt.

Relevant für autarke Häuser ist nicht nur, wie nachhaltig Energie bezogen wird, es ist ebenfalls sehr wichtig, wie effizient damit umgegangen wird. Größtenteils geht es dabei um den Erhalt der Wärmeenergie über möglichst lange Zeit, wobei der Zustand des Gebäudes beziehungsweise dessen Alter eine große Rolle spielt. Während es für Neubauten hierzulande strikte Vorgaben für die Energieeffizienz gibt, sind diese hohen Anforderungen mit älteren Gebäuden nicht zu erreichen. Dabei ist das Ziel der Energiewende, einen bis im Jahr 2050 nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen, alleine über Neubauten nicht realisierbar. Denn der Bestand an Einfamilienhäusern im Jahr 2019 umfasste zu mehr als 65 % Gebäude, die vor 1976 erbaut wurden und somit nicht einmal der ersten Wärmeschutzverordnung unterlagen, die ein Jahr später eingeführt wurde. Um also die Autarkie im Eigenheim zu erhöhen, ist es ebenso von Bedeutung, die Energieeffizienz des Gebäudes zu kennen und diese gegebenenfalls durch Sanierungsaufwand zu verbessern.<sup>60</sup>

---

<sup>59</sup> vgl. Statistisches Bundesamt 2022a

<sup>60</sup> vgl. Umweltbundesamt 2019



Von erheblicher Bedeutung ist zudem auch die zu beheizende Wohnfläche des Einfamilienhauses. Je größer das Gebäude, desto mehr Energie muss aufgebracht werden, um dieses zu beheizen und die gewünschte Temperatur zu halten. Gemittelte Daten zur Wohnfläche des gesamten Bestands an Einfamilienhäusern werden nicht erhoben. Jedoch wurden 2019 rund 84.000 Einfamilienhäuser neu gebaut, die durchschnittlich zwischen 150 und 160 Quadratmeter Wohnfläche hatten. 20 Jahre zuvor, also im Jahr 1999, wurden mehr als doppelt so viele Häuser gebaut (etwa 178.000), die ihren Bewohnern mit 129 Quadratmetern rund 14 % weniger Platz boten.<sup>61</sup>

Die zwei wichtigsten Faktoren, die den Energieverbrauch in einem Haushalt beeinflussen, sind die Anzahl der Bewohner und die Größe des zu beheizenden Gebäudes. Das Alter des Gebäudes beziehungsweise die Effizienz der Dämmung sowie der individuelle Lebensstil haben ebenfalls einen großen Einfluss, können hier aber nicht berücksichtigt werden. Im Folgenden dieser Arbeit wird bei der Berechnung für die Kosten einer Autarkiesteigerung von einer Bewohneranzahl von zwei Personen ausgegangen. Da kein statistisches Datenmaterial vorliegt, das den Stromverbrauch in Abhängigkeit von Bewohneranzahl und Wohnfläche angibt, wird von einem durchschnittlichen Stromverbrauch von 3.000 kWh pro Jahr ausgegangen. Dieser Wert ist ein grober Richtwert, der sich aus Datenmaterial des Stromverbrauchs privater Haushalte nach Haushaltsgröße ergibt.<sup>62</sup> Beim Energieverbrauch für Heizwärme wird in der folgenden Rechnung nur der Gasverbrauch berücksichtigt, da Gas im Vergleich zu Heizöl deutlich mehr verwendet wird, was in Kapitel 3 bereits beschrieben wurde. Im Gegensatz zum Stromverbrauch existieren hier Daten zu durchschnittlichen Verbräuchen pro Quadratmeter Wohnfläche. Zudem hat der Energieträger Erdgas für Heizung und Warmwasser deutlich mehr Einflussfaktoren als elektrische Energie, der Verbrauch ist also sehr individuell. Im Folgenden wird der durchschnittliche Verbrauch eines Einfamilienhauses herangezogen, der laut Heizspiegel 2022 166 kWh pro Quadratmeter beträgt. Bei einer angenommenen Wohnfläche von 120qm wären das 19.920 kWh pro Jahr, wobei der Einfachheit halber hier auf 20.000 kWh aufgerundet wird.<sup>63</sup>

---

<sup>61</sup> vgl.Statistisches Bundesamt 2021

<sup>62</sup> vgl.Statistisches Bundesamt 2022b

<sup>63</sup> vgl.Hakenes 2022

## 7 Energiepreise

Ein Beweggrund für Autarkie, neben dem Wunsch nach umweltfreundlicher Energieerzeugung, sind monetäre Anreize, die den Eigentümer eines Eigenheims dazu bewegen. Kapitel 3 hat bereits einen Überblick darüber gegeben, wie und mit welcher Energie Wohngebäude in Deutschland versorgt werden. Nun soll in diesem Abschnitt ein Blick auf die Energiepreise geworfen werden. Die Frage ist, wie sich diese in den vergangenen Jahren entwickelt haben, wie hoch die Preise gegenwärtig sind und eine Prognose zu treffen, wie sie sich in den kommenden Jahren entwickeln könnten.

### 7.1 Erdgas

Erdgasheizungen wurden seit etwa 1980 bei den meisten Neubauten eingebaut, die in Deutschland den vorherrschenden Kohleeinsatz ablösten. Die sehr energieeffizienten Brennwertkessel in Verbindung mit dem mit vielen Vorteilen verbundenen Energieträger bewegen sogar heute noch Kunden dazu, auf eine Gasheizung zu setzen. Denn Erdgas hat vor allem gegenüber seinen zuvor verwendeten Energieträgern große Handlingvorteile wie Sauberkeit und die geringen CO<sub>2</sub>-Emissionen oder auch die unkomplizierte Versorgung über Rohrleitungen an die jeweiligen Verbraucher. Hinzu kommt, dass Erdgas, aber auch die anderen Primärenergieträger, über eine sehr hohe Energiedichte und eine einfache Lagerfähigkeit verfügen.<sup>64</sup>

Jedoch wurde in Deutschland die Notwendigkeit, sich von fossilen Energieträgern unabhängiger zu machen, seit dem Krieg in der Ukraine erneut deutlicher. Denn rund 95 % des Erdgasaufkommens in Deutschland stammt aus Importen, und einer der wichtigsten Lieferanten war bis Februar 2022 Russland.<sup>65</sup>

Abbildung 9 zeigt die Erdgaspreisentwicklung der letzten Jahre, dabei sind deutliche Preissteigerungen in den letzten Jahren erkennbar, wobei aktuell der Preis wieder stark gesunken ist. Auf Basis verschiedener Vergleichsportale zahlen Neukunden aktuell rund 9 Cent pro kWh Erdgas bei einem jährlichen Verbrauch von 20.000 kWh, bei dem angenommenen Beispiel sind das in Summe 1.800 €.<sup>66</sup>

---

<sup>64</sup> vgl. Ströbele 2022, S. 44-48

<sup>65</sup> vgl. Statistisches Bundesamt 2023b

<sup>66</sup> vgl. Storck 2023a



Abbildung 9: Erdgaspreisentwicklung in Euro pro MMBTU

Quelle: <https://www.finanzen.net/rohstoffe/erdgas-preis-natural-gas/chart/euro>

## 7.2 Strom

Bei der Stromversorgung hat man als Verbraucher die Wahl zwischen konventionellen Stromtarifen und Tarifen von Ökostromanbietern, erstere produzieren ihren Strom größtenteils mit konventionellen Energieträgern. Ökostromanbieter produzieren ihren sogenannten grünen Strom aus der Kraft von nachhaltigen Energieträgern. Preisliche Unterschiede gibt es bei diesen zwei Arten von Stromtarifen jedoch kaum, es gibt dennoch immer wieder kleine Preisunterschiede zwischen den Anbietern. Grundsätzlich entwickelt sich der Strompreis in Deutschland jedoch in einem kleinen Bereich einheitlich. Auch hier ist ein deutlicher Anstieg des Preises durch Folgen des Ukrainekriegs erkennbar. Von diesen schwankenden Preisen versuchen sich immer mehr Verbraucher unabhängiger zu machen. Aktuell zahlen Neukunden einen Preis von rund 29 Cent pro kWh, bei den angenommenen 3.000 kWh pro Jahr wären das 870 € Stromkosten.<sup>67</sup>

<sup>67</sup> vgl. Störck 2023b



Abbildung 10: Strompreisentwicklung in Euro pro MWh

Quelle: <https://www.finanzen.net/rohstoffe/eex-strompreis/chart>

## 7.3 Heizöl

Heizöl ist ebenso wie elektrischer Strom ein Sekundärenergieträger, es ist im Vergleich zu Erdgas also nicht in der Natur vorzufinden. Heizöl wird aus Rohöl in Raffinerien hergestellt, wobei drei verschiedene Heizöle angeboten werden: Standardheizöl, schwefelarmes Heizöl und Bioheizöl. Standardheizöl hat einen hohen Schwefelgehalt und wird heutzutage nicht mehr eingesetzt, es wurde durch das schwefelarme ersetzt, das dadurch nahezu rückstandsfrei verbrennt, geringere Emissionen aufweist und auch die Lebensdauer der Heizungen erhöht. Bioheizöl ist ebenfalls schwefelarmes Heizöl, dem zusätzlich flüssiger Brennstoff aus nachhaltigen Rohstoffen beigemischt wird. Der Preis dieser Produkte korreliert stark mit dem des Ausgangsproduktes Rohöl.<sup>68</sup>

<sup>68</sup> vgl. Bränzel 2019, S. 204 f.



Abbildung 11: Heizölpreisentwicklung in Euro pro Gallone

Quelle: <https://www.finanzen.net/rohstoffe/heizoelpreis/chart/euro>

## 8 Berechnung der Anschaffungs- und Betriebskosten

Die folgenden Rechnungen basieren auf groben Richtwerten beziehungsweise Durchschnittspreisen, da bei jedem Projekt viele Einflussfaktoren existieren, die die Wahl der Systeme und den Aufwand der Installation beeinflussen, wodurch für jeden Auftrag ein individuelles Angebot erfolgt. Zudem bestehen Qualitäts- und somit Kostenunterschiede zwischen den Produkten, ebenso finden oftmals Systeme mit einer höheren Leistung Verwendung, falls der Kunde plant, seinen Verbrauch später zu erhöhen (z. B. Lademöglichkeit für das Elektroauto).

In der folgenden Beispielrechnung werden die Kosten für eine Photovoltaikanlage und eine Wärmepumpe berechnet, da diese beiden Systeme aktuell das beste Preis-Leistungsverhältnis bieten.

### 8.1 Anschaffungs- und Betriebskosten Wärmepumpe

Aufgrund der geringsten Kosten, vor allem wegen des geringen Installationsaufwands, wird in diesem Fallbeispiel eine Luft-Wasser-Wärmepumpe herangezogen, da diese Bauart aufgrund dessen auch am häufigsten verbaut wird.

Die folgenden Kosten ergeben sich aus Zahlen der Verbraucherzentrale Bundesverband, jedoch können dennoch Preisschwankungen beispielweise durch Nachfrage, Qualität und Produktionsland entstehen.<sup>69</sup>

- Luft-Wasser-Wärmepumpe: 31.000 €
- Installation: 3.000 €

Zu den Betriebskosten zählen Aufwendungen für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten sowie Energiekosten, die durch den Verdichter der Wärmepumpe verursacht werden.

Im vorliegenden Beispiel wird eine Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3 verbaut. Die Jahreszahl ist die wichtigste Kenngröße zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit und Effizienz einer Wärmepumpe, sie beschreibt das Verhältnis von erzeugter Wärme und zugeführtem Strom über ein Jahr. Mit der Jahreszahl werden somit alle unterschiedlichen Betriebszustände in realer Nutzung innerhalb eines Jahres abgebildet. Die wesentliche Einflussgröße ist die Temperaturdifferenz zwischen der

---

<sup>69</sup> vgl. Pesch 2023

Wärmequelle und die des Vorlaufs der Wärmenutzungsanlage. Je größer die Temperaturdifferenz, desto geringer ist die Leistungszahl der entsprechenden Anlage.<sup>70</sup> Mit Hilfe der Jahresarbeitszahl und des Gesamtwärmebedarfs lässt sich dann der Strombedarf für ein Gerät bestimmen:

$$\text{Strombedarf} = \frac{\text{Gesamtwärmebedarf in kWh}}{\text{JAZ}} \rightarrow \frac{20.000 \text{ kWh}}{3} = 6.667 \text{ kWh}$$

Falls der benötigte Strom vom Stromanbieter bezogen wird, würden bei einem Strompreis von 40 Cent/kWh pro Jahr 2667 € Stromkosten für den Betrieb der Wärmepumpe entstehen. Ziel in diesem Beispiel ist es jedoch, den Strombedarf der Wärmepumpe durch erzeugten Strom einer Photovoltaikanlage zu decken. Bei den Instandhaltungs- und Wartungskosten sind jährlich etwa 50 € bis 200 € zu veranschlagen.

## 8.2 Anschaffungskosten Photovoltaikanlage

Die hier beispielhaft betrachteten Photovoltaikzellen wurden von einem regionalen Anbieter aus dem Großraum München verbaut, die Preise stammen somit aus Erfahrungswerten.

Ein Modul erzeugt dabei eine Spitzenleistung von 410 Watt. Um die 3.000 kWh plus den Verbrauch der Wärmepumpe (6.667 kWh) zu decken, sind somit 25 Module notwendig. Zu der Installation der Photovoltaikmodule kommt dann noch ein entsprechender Wechselrichter und Speicher (Kapazität: 4,8 kWh) hinzu.

- Photovoltaikmodule: 3.750 € (Einzelpreis: 150 €)
- Wechselrichter: 2.000 €
- Stromspeicher: 2.000 €
- Planung, Montage und Kleinmaterial: 15.000 €

### Förderung

Nach Zahlung des Gesamtbetrags ist es möglich, eine Förderung in Anspruch zu nehmen. Im Raum München werden klimaneutrale Bauvorhaben durch das Münchner Förderprogramm Klimaneutrale Gebäude (FKG) gefördert. Diese bietet eine

---

<sup>70</sup> vgl. Glaesmann 2022

Grundförderung, die addiert wird mit einem Faktor, der abhängig ist vom Zeitpunkt, zu dem die Inbetriebnahme erfolgt und der wiederum mit der Anlagenleistung multipliziert wird. Zusätzlich existieren noch andere Faktoren für die Förderung, wie beispielsweise das Erreichen einer bestimmten Anlagenleistung oder für ein Gründach. Mit den angenommenen Werten würde sich folgende Fördersumme für die Photovoltaikanlage ergeben:<sup>71</sup>

$$\text{Fördersumme: } 10,25 \text{ kWp} \times 282 \frac{\text{€}}{\text{kWp}} + 1.500\text{€} = 4.390,5 \text{ €}$$

Auch Wärmepumpen sind förderfähig, wenn sie mindestens eine Jahresarbeitszahl von 2,7 aufweisen. In diesem Fall können 25 bis 40 % der Kosten für die Wärmepumpe gefördert werden. Es kommt darauf an was für ein Typ Heizung ersetzt wird. Beim Austausch ineffizienter Heizungen (funktionstüchtige Öl-, Kohle-, Nachtspeicher-, Gasetagen- oder mindestens 20 Jahre alte Gaszentralheizung) beträgt die Förderung 35 %, beim Einbau bestimmter Wärmepumpen (Wärmequelle Erdreich, Grundwasser, Abwasser sowie Wärmepumpen, die natürliche Kältemittel nutzen) weitere 5 %. Beim Austausch sonstiger Heizungen werden 25 % gefördert, ebenfalls zuzüglich 5 % beim Einbau bestimmter Anlagen. Aufgrund fehlender Detailinformationen zur Fördersumme wird in diesem Beispiel mit dem Minimum von 25 % gerechnet,<sup>72</sup> die Fördersumme beträgt bei 31.000 € dann 7.750 €.

Abzüglich der Förderung ergibt sich somit eine Gesamtsumme für Photovoltaikanlage und Wärmepumpe von 44.609,50 €.

---

<sup>71</sup> vgl. Landeshauptstadt München Referat für Klima- und Umweltschutz 2022

<sup>72</sup> vgl. Bundesverband Wärmepumpe e.V. 2023



## 9 Klimateinflüsse

Der voranschreitende Klimawandel beeinflusst auch die energetische Versorgung von Gebäuden, wobei bei zunehmender Autarkie die Verantwortung dafür immer mehr dem Eigentümer obliegt.

Die Klimaveränderungen, die seit Mitte des 20. Jahrhunderts zu beobachten sind, können auf natürliche, aber vor allem auf menschliche Einflüsse zurückgeführt werden. Auf alle Fälle beeinflusst der Klimawandel die Verfügbarkeit und die Erzeugung erneuerbarer Energiequellen. Grund dafür ist die deutliche Erwärmung der oberflächennahen Luftschichten der Kontinente und Ozeane. Auswirkungen sind dabei unter anderem die Zunahme von Temperaturextremen, der Anstieg der Meeresspiegel und die vermehrte Häufigkeit von extremen Niederschlägen.<sup>73</sup>

Aufgrund der immer weiter ansteigenden Temperaturen, insbesondere in den Sommermonaten, kann damit gerechnet werden, dass der Energieaufwand zum Heizen von Wohnräumen in den kommenden Jahren immer geringer wird.

**Jährliche mittlere Tagesmitteltemperatur in Deutschland 1881 bis 2022**

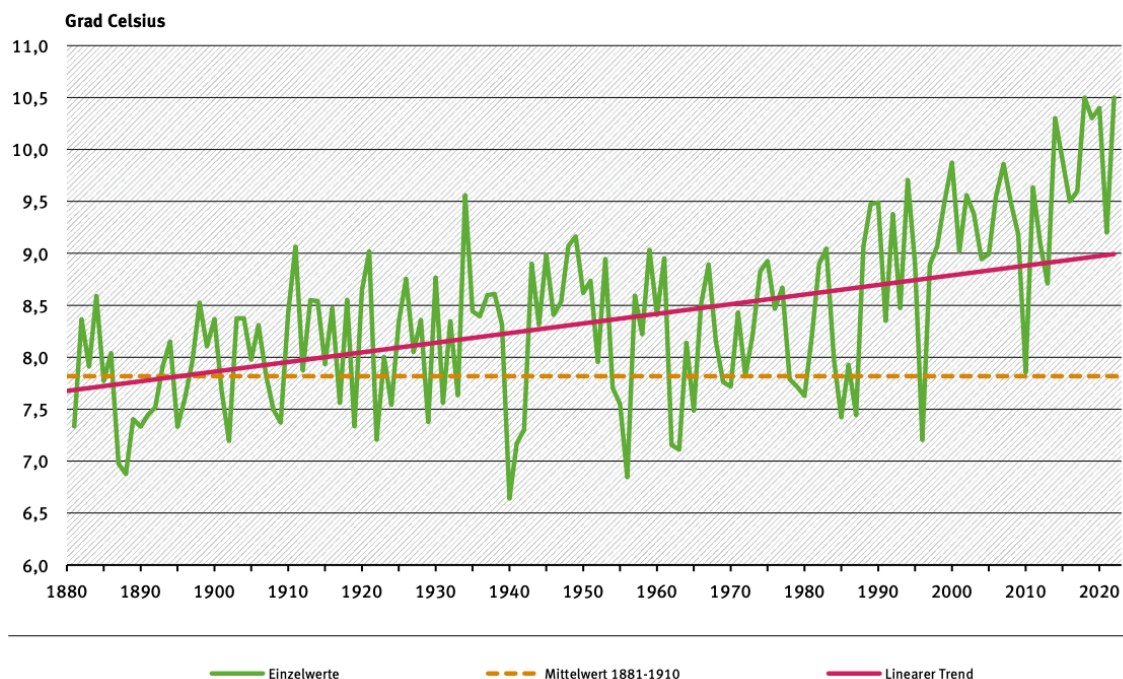


Abbildung 12: Jährliche mittlere Tagesmitteltemperatur in Deutschland

Quelle: Umweltbundesamt 2023

<sup>73</sup> vgl. Deutscher Wetterdienst 2023

Analog zur Temperatur stieg in Deutschland auch der Energiegehalt der eintreffenden Sonneneinstrahlung, die sogenannte Globalstrahlung.

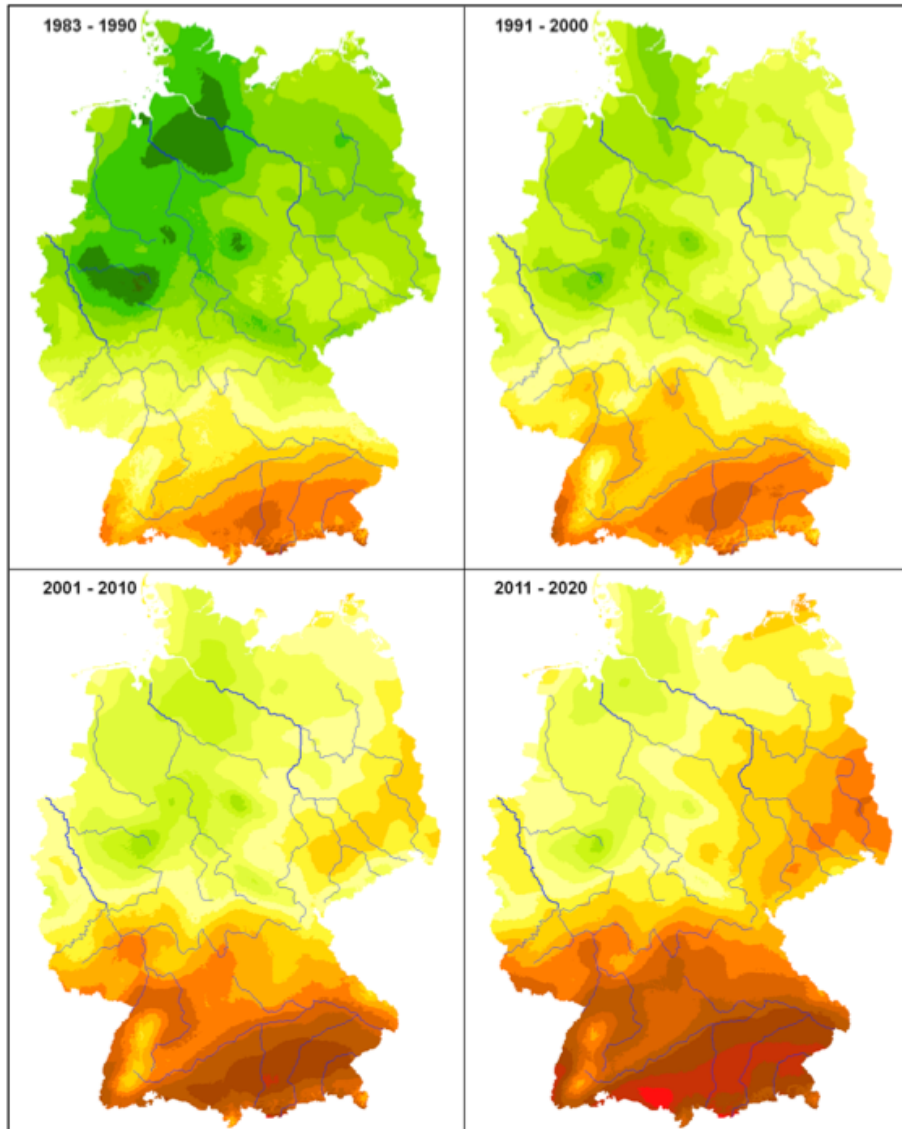


Abbildung 13: Eintreffende Globalstrahlung in Deutschland von 1983-2020

Quelle: Püschel 2023

Abbildung 13 zeigt die Karte Deutschlands, wobei grüne Gebiete den geringsten Energiegehalt besitzen, über gelbfarbige bis hin zu den rot markierten Flächen. Dabei ist seit dem Jahr 1983 ein deutlicher Trend zu mehr gelblichen und roten Gebieten zu erkennen. Daraus lässt sich folgern, dass mit Sonneneinstrahlung immer mehr Energie beispielsweise durch Photovoltaikanlagen gewonnen werden kann.

## 10 Fazit und Ausblick

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin zu untersuchen, ob Autarkie in einem Eigenheim realisierbar ist und im Zusammenhang damit eine Kostenrechnung anhand eines definierten Gebäudes zu erstellen. Dazu musste der Begriff der Autarkie zu Beginn definiert und eingegrenzt werden, da dieser sehr weitfassend ist. Danach wurden mögliche Technologien zu aktuell technischem Stand zur Umsetzung eines solchen Vorhabens aufgearbeitet, inklusive der Möglichkeiten zur Zwischenspeicherung von Energie. Zuletzt wurde eine Kostenrechnung durchgeführt, die einen groben Rahmen dafür geben soll, wie groß eine solche Investition momentan ausfällt.

Letztendlich ist es bei gegebenen Bedingungen nicht möglich, ein autarkes Eigenheim in urbaner Umgebung zu realisieren. Autarkie zu 100 % ist unter normalen Lebensbedingungen in Deutschland nicht möglich, da Vorschriften bestehen, die dies per Definition nicht zulassen. Deshalb konzentrierte sich diese Arbeit auf Autarkie bezogen auf die energetische Versorgung eines Eigenheims. Auch in diesem Fall ist eine komplette Umsetzung nicht einfach, da unter anderem für den Großteil der Eigentümer eines Eigenheims die monetäre Belastung eines solchen Vorhabens nicht unerheblich ist. So existieren also zum einen aus wirtschaftlichen Gründen Einschränkungen für Autarkiebestrebungen, und auch aus Gründen der Versorgungssicherheit wird davon abgeraten, komplett auf externe energetische Versorgung zu verzichten. Deshalb stellt sich für die meisten Eigentümer eines Eigenheims die Frage nach einer Abwägung zwischen der energetisch autarken Versorgung und deren wirtschaftlichen und sicheren Umsetzung. Denn nur unter diesen Aspekten ist eine für die Umwelt nachhaltige Entscheidung zu treffen. Diese Abwägung betrifft die Teilautarkie, also zu welchen Kosten und persönlichen Einschränkungen oder Gefahren die Erzeugung nachhaltiger Energie möglich ist. Daneben ist externer Energiebezug durchaus nachhaltig möglich, auch wenn dies zu einer teilweisen Abhängigkeit führt und somit nicht als autark gilt.

Um die genannte Teilautarkie umzusetzen hat sich der Markt aktuell stark auf Photovoltaikanlagen und Wärmepumpen konzentriert. Diese beiden Systeme liefern dem Eigentümer eines Eigenheims elektrische Energie, Heizwärme und Warmwasser, womit sich in Verbindung mit einem Stromspeicher Teilautarkie zu einem vertretbaren Preis realisieren lässt. Mit anderen in Kapitel 4 genannten Systemen ist dies zwar auch möglich, jedoch sind sie entweder nicht so effizient oder die Kosten sind um einiges höher,

Photovoltaik und Wärmepumpen haben also zu aktuell technischem Stand das beste Verhältnis von Preis und Leistung.

Es ist davon auszugehen, dass die beiden genannten Systeme zukünftig noch effizienter und günstiger werden. Ein Grund dafür ist, dass sie aufgrund steigender Nachfrage in Zukunft in größeren Stückzahlen gefertigt werden. Außerdem werden Materialien und Technologien erforscht, die noch bessere Systeme auf den Markt bringen werden. Bei den anderen genannten Systemarten gilt es abzuwarten, was sich dort in der Forschung bewegt und ob andere Technologien in Zukunft mehr zum Einsatz kommen werden. Zudem finden sich im Bereich nachhaltiger Energien viele aktuelle Forschungsschwerpunkte, die zu neuen Technologien führen werden.

# 11 Literaturverzeichnis

- Árpád Funke, Simon/Wietschel, Martin. (2012): Bewertung des Aufbaus einer Ladeinfrastruktur für eine Redox-Flow-Batterie-basierte Elektromobilität. Fraunhofer ISI.
- Bauer, Mathias (2018): Handbuch Oberflächennahe Geothermie. Berlin: Springer Spektrum.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt. (2010): Oberflächennahe Geothermie.
- Bränzel, Juliane u.a. (2019): Energiemanagement. Praxisbuch für Fachkräfte, Berater und Manager. Stuttgart: Springer Vieweg.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (2022): Klimaschutz in Zahlen. Aktuelle Emissionstrends und Klimaschutzmaßnahmen in Deutschland – Ausgabe 2022. Berlin.
- Bundesverband Wärmepumpe e.V. (2023): BEG Förderprogramm. URL: <https://www.waermepumpe.de/waermepumpe/foerderung/beg-foerderung-fuer-waermepumpen/> (01.08.2023).
- Dachroth, Wolfgang. (2017): Handbuch der Baugeologie und Geotechnik. Berlin: Springer Spektrum.
- Deutscher Wetterdienst (2023): Klimawandel – ein Überblick. URL: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimawandel\\_node.html;jsessionid=2ABBC9E2E735723BC29025A12F815598.live11044](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimawandel_node.html;jsessionid=2ABBC9E2E735723BC29025A12F815598.live11044) (13.07.2023).
- Deuschle, Jürgen u.a. (2015): Energie-Autarkie und Energie-Autonomie in Theorie und Praxis. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft.
- Frey, Hartmut. (2019): Energieautarke Gebäude. Auf dem Weg zu Smart Energy Systems. Esslingen: Springer Vieweg.
- Glaesmann, Nicolas. (2022): Wärmepumpenheizungen. Planungshilfe und Ratgeber für Neubauten und Bestandsgebäude. Norderstedt: Springer Vieweg.
- Goeke, Johannes. (2021): Thermische Energiespeicher in der Gebäudetechnik. Sensible Speicher, Latente Speicher, Systemintegration. Köln: Springer Vieweg.
- Hakenes, Jens (2014): Was sind Brennstoffzellen – und wie funktionieren sie? URL: <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/brennstoffzellenheizung/was-sind-brennstoffzellen/> (01.05.2023).
- Hakenes, Jens (2022): Gasheizung: Alles, was Sie zu Nutzung und Austausch wissen müssen. URL: <https://www.heizspiegel.de/heizkosten-verstehen/gasheizung/> (21.07.2023).
- Kaltschmitt, Martin u.a. (2014): Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Hamburg u.a.: Springer Vieweg.
- Konstantin, Panos/Konstantin, Margarete. (2022): Praxisbuch der Fernwärme- und Fernkälteversorgung. Systeme, Netzaufbauvarianten, Kraft-Wärme- und Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, Kostenstrukturen und Preisbildung. Burgstetten: Springer Vieweg.
- Kurzweil, Peter. (2016): Brennstoffzellentechnik. Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Gaserzeugung. Amberg: Springer Vieweg.
- Landeshauptstadt München. (2018): Satzung über die Benutzung der Entwässerungseinrichtung der Landeshauptstadt München (Entwässerungssatzung – EWS).
- Landeshauptstadt München Referat für Klima- und Umweltschutz. (2022): Münchner Förderprogramm Klimaneutrale Gebäude. Richtlinienheft gültig ab 20.07.2022.
- Neugebauer, Reimund. (2022): Wasserstofftechnologien. München: Springer Vieweg.

- Pesch, Dennis. (2023): So teuer sind Heizungen in Deutschland mittlerweile. Handelsblatt.
- Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2022): Generationenvertrag für das Klima. URL: <https://www.bundesregierung.de/bregde/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (27.07.2023).
- Püschel, Annett u.a. (2023): Entwicklung der Globalstrahlung 1983 - 2020 in Deutschland. Deutscher Wetterdienst.
- Quaschnig, Volker. (2019): Regenerative Energiesysteme. Technologie, Berechnung, Klimaschutz. Berlin: Hanser.
- Schabbach, Thomas/Leibbrandt, Pascal. (2021): Solarthermie. Wie Sonne zu Wärme wird. Nordhausen: Springer.
- Schmidt, Manfred. (2013): Auf dem Weg zum Nullemissionsgebäude. Grundlagen, Lösungsansätze, Beispiele. Dresden: Springer Vieweg.
- Starbatty, Joachim (2008): Klassiker des ökonomischen Denkens. München: Beck.
- Statistisches Bundesamt. (2021): Von Januar bis November 2020 genehmigte Wohnungen: 59 % in Mehrfamilienhäusern.
- Statistisches Bundesamt. (2022a): Gebäude und Wohnungen. Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden Lange Reihen ab 1969 - 2021.
- Statistisches Bundesamt (2022b): Stromverbrauch der privaten Haushalte nach Haushaltsgrößenklassen. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Tabellen/stromverbrauch-haushalte.html> (17.06.2023).
- Statistisches Bundesamt (2023a): Energieart der Beheizung. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Tabellen/tabelle-wo-energieart.html> (24.05.2023).
- Statistisches Bundesamt. (2023b): Preise. Daten zur Energiepreisentwicklung.
- Statistisches Bundesamt (2023c): Stromerzeugung im 1. Quartal 2023: Knapp ein Drittel des eingespeisten Stroms stammt aus Windkraft. URL: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/06/PD23\\_220\\_43312.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/06/PD23_220_43312.html) (13.06.2023).
- Stober, Ingrid/Bucher, Kurt (2020): Geothermie. Berlin: Springer Spektrum.
- Storck, Thorsten (2023a): Aktuelle Gaspreise für Neukunden. URL: <https://www.verivox.de/gas/gaspreise/#:~:text=Die%20Gaspreise%20für%20Neukunden%20liegen,Stand%3A%2010.08.2023.> (11.08.2023).
- Storck, Thorsten (2023b): Aktuelle Strompreise für Neukunden. URL: <https://www.verivox.de/strom/strompreise/> (11.08.2023).
- Ströbele, Wolfgang. (2022): Energiewende einfach erklärt. Von guten Absichten und unbequemen Fakten. Münster: Springer Gabler.
- Umweltbundesamt. (2019): Wohnen und Sanieren. Empirische Wohngebäudedaten seit 2002.
- Umweltbundesamt (2023): Trends der Lufttemperatur. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur#steigende-durchschnittstemperaturen-weltweit> (18.06.2023).
- von Böckh, Peter/Stripf, Matthias. (2018): Thermische Energiesysteme. Berechnung klassischer und regenerativer Komponenten und Anlagen. Karlsruhe: Springer Vieweg
- Wahrig, Gerhard (2007): Wörterbuch der deutschen Sprache. München: Dt. Taschenbuch-Verlag.

- Watter, Holger. (2022): Regenerative Energiesysteme. Grundlagen, Systemtechnik und Analysen ausgeführter Beispiele nachhaltiger Energiesysteme. Tarp: Springer Vieweg.
- Wesselak, Viktor u.a. (2013): Regenerative Energietechnik. Nordhausen: Springer Vieweg.
- Wesselak, Viktor/Voswinckel, Sebastian. (2016): Photovoltaik. Wie Sonne zu Strom wird. Nordhausen: Springer.
- Wietschel, Martin u.a. (2015): Energietechnologien der Zukunft. Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Karlsruhe u.a.: Springer Vieweg.
- Wosnitza, Franz/Hilgers, Hans Gerd. (2012): Energieeffizienz und Energiemanagement. Ein Überblick heutiger Möglichkeiten und Notwendigkeiten. Aachen: Springer Spektrum.