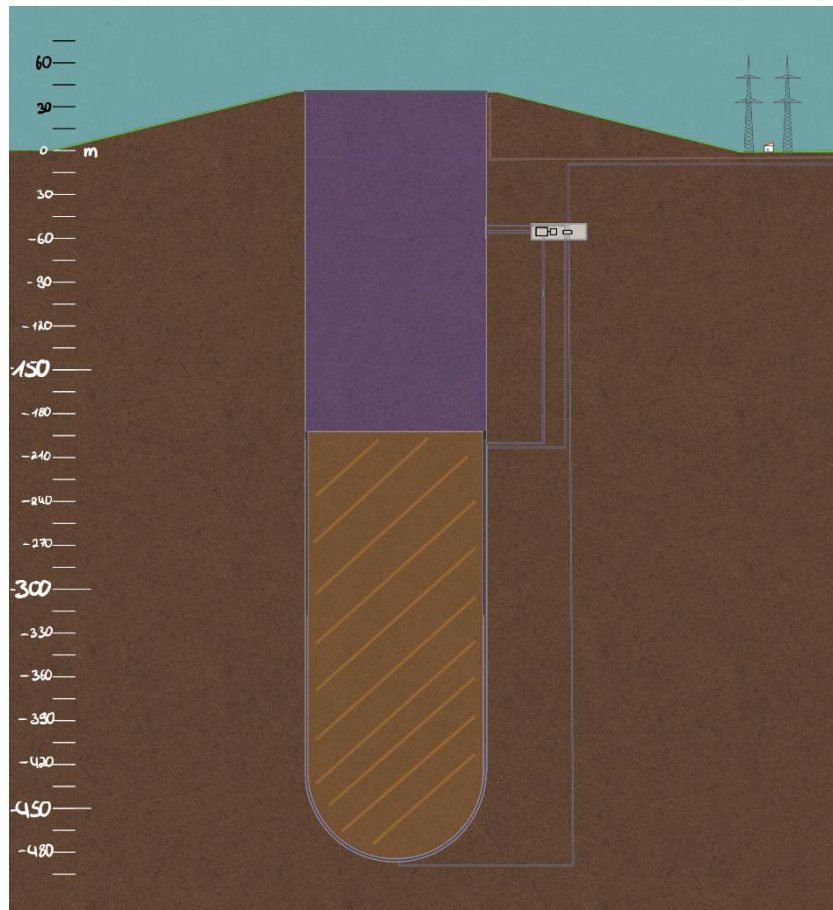


**TH Nürnberg Georg Simon Ohm**

Fakultät MBVS  
**Studiengang Maschinenbau**

# **Projektarbeit**



**Auslegung einer regenerativen Stromversorgung  
inklusive eines Stülpmembranspeichers anhand der  
Stadt Haßfurt**

**Autor:** Jonas Levi Doll

**Betreuung:** Prof. Dr. Matthias Popp

**Ort, Abgabetermin:** Nürnberg, 28.02.2023

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	3
Tabellenverzeichnis .....	4
Abkürzungsverzeichnis .....	5
1 Einführung .....	6
2 Stromversorgung Stadt Haßfurt .....	8
2.1 Aktueller Strommix Stadt Haßfurt .....	8
2.1.1 Residualleistung aktueller Strommix .....	9
2.1.2 Dauerlinie der Residuallinie des aktuellen Energiemix .....	9
2.1.3 Simulation eines Energiespeichers zum aktuellen Energiemix .....	10
2.2 Bestmix Stadt Haßfurt .....	11
2.2.1 Residualleistung Bestmix .....	13
2.2.2 Dauerlinie Residualleistung Bestmix .....	13
2.2.3 Simulierung eines Energiespeichers Bestmix .....	14
3 Speichertechnologien .....	16
3.1 Der Stülpmembranspeicher .....	17
3.2 Auslegung Stülpmembranspeicher für die Stadt Haßfurt .....	20
4 Fazit .....	22
Literaturverzeichnis .....	23

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Weltweites Energievorkommen im Vergleich zum weltweiten jährlichen Primärenergiebedarf .....	6
Abbildung 2: Leistungen im Netzgebiet Haßfurt .....	8
Abbildung 3: Residualleistung bei aktuellem Energiemix.....	9
Abbildung 4: Dauerlinie Residualleistung aktueller Energiemix .....	10
Abbildung 5: Residualleistung und Speicherleerung aktueller Energiemix .....	11
Abbildung 6: Vergleich Residualleistung Bestmix und aktueller Energiemix .....	13
Abbildung 7: Dauerlinien Residualleistung Bestmix und aktueller Energiemix .....	13
Abbildung 8: Vergleich Speicherleerung Bestmix und aktueller Mix.....	14
Abbildung 9: Vergleich Dauelinien Speicherleerung .....	15
Abbildung 10: Ragone-Diagramm Deutschland (Datenblasen Stand 2016) .....	17
Abbildung 11: Stülpmembranspeicher.....	18
Abbildung 12: Skizze Stülpmembranspeicher (Speicherkapazität 2,33 GWh) .....	21

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorgabewerte für Bestmixberechnung .....	12
Tabelle 2: Spezifische Herstellkosten .....	12
Tabelle 3: Berechnungsergebnisse Bestmix .....	12
Tabelle 4: Berechnungsergebnisse Dimensionierung Stülpmembranspeicher .....	20

## Abkürzungsverzeichnis

ASD	Abschreibungsdauer
BFK	Betriebskostenfaktor
BHKW	Blockheizkraftwerk
PV	Photovoltaik
SMS	Stülpmembranspeicher
TL	Tagesladungen

# 1 Einführung

Die Energieversorgung ist ein kritisches Element für die moderne Gesellschaft, da sie die Grundlage für die meisten industriellen und wirtschaftlichen Aktivitäten bildet. Der Einsatz von fossilen Brennstoffen zur Energieerzeugung hat jedoch zu ernsthaften Umweltproblemen wie Erderwärmung, Luftverschmutzung und Umweltverschmutzung geführt.<sup>1</sup> Regenerative Energiequellen wie Solarenergie, Windenergie, Wasserkraft, Biomasse und Geothermie haben sich daher als vielversprechende Alternativen etabliert, welche die Umweltbelastung reduzieren und langfristig Energieversorgungssicherheit gewährleisten. Allein die jährliche Energiemenge der Sonne von  $3,9 \cdot 10^{24}$  J könnte den Weltprimärenergiebedarf 5.000-mal decken und ist damit ein Vielfaches mehr als alle nuklearen und fossilen weltweiten Energiereserven (Abb. 1). Es müsste somit nur ein Fünftausendstel der jährlichen Sonnenenergie nutzbar gemacht werden und der gesamte Weltenergiebedarf wäre gedeckt.<sup>2</sup>

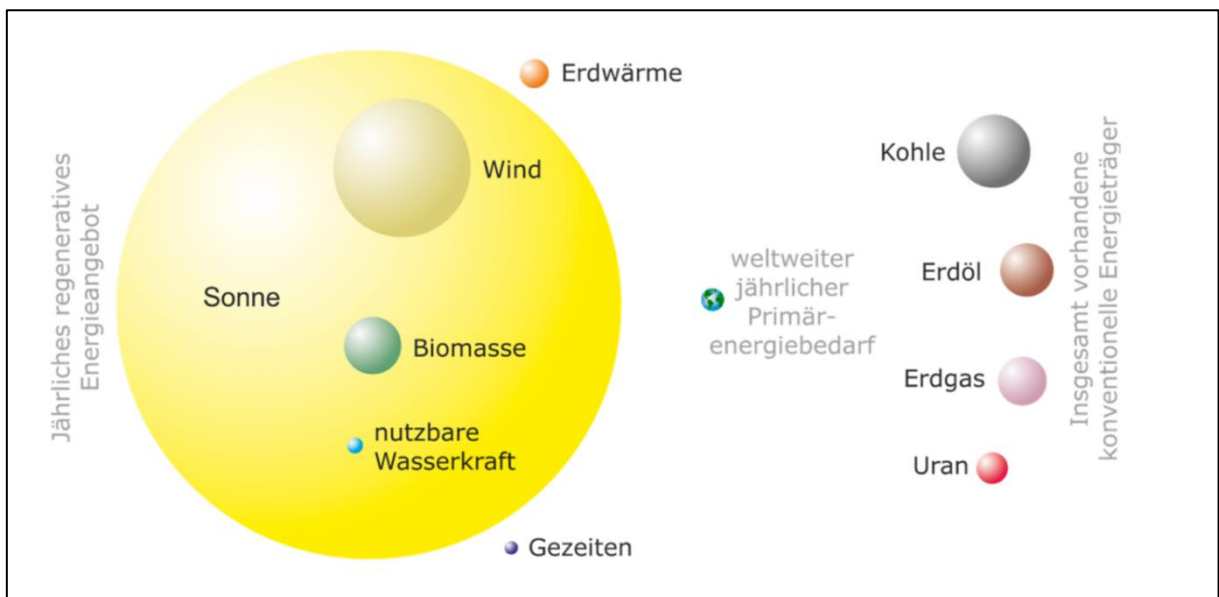


Abbildung 1: Weltweites Energievorkommen im Vergleich zum weltweiten jährlichen Primärenergiebedarf<sup>3</sup>

Im Jahr 2022 erreichte der Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch in Deutschland 48,3% und stieg damit um 5,6% zum Vorjahr.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> (vgl. Umweltbundesamt, 2022)

<sup>2</sup> (vgl. Quaschnig, 2022)

<sup>3</sup> (Quaschnig, 2022)

<sup>4</sup> (vgl. Bundesnetzagentur, 2023)

Obwohl die Vorteile der regenerativen Energieversorgung offensichtlich sind, gibt es ebenso Herausforderungen, welche zukünftig gemeistert werden müssen. Eine der größten Herausforderungen ist die Unvorhersehbarkeit der Energieerzeugung aus regenerativen Quellen wie Wind und Sonne, woraus Schwankungen und Instabilitäten im Stromnetz entstehen können. Um diese auszugleichen, werden Stromspeicher mit hoher Kapazität benötigt.

Als Veranschaulichung einer autarken und regenerativen Strom- und Wärmeversorgung dient ein studentisches Projekt der Technischen Hochschule Nürnberg, welches für die Stadt Haßfurt durchgeführt wurde. Dieses Konzept besteht aus jeweils zwei Strom- und Wärmeteilen.

Die vorliegende Arbeit handelt von einer Analyse der Realdaten, welche von der Stadtwerk Haßfurt GmbH zur Verfügung gestellt wurden. Außerdem wurden der Ausbaustand der elektrischen Energieversorgung sowie die Auslegung eines Stülpmembranspeichers für die Kleinstadt Haßfurt untersucht. Hierfür wurden Berechnungsprogramme von Prof. Dr. Matthias Popp zu Verfügung gestellt.

## 2 Stromversorgung Stadt Haßfurt

In dem folgenden Kapitel wird der aktuelle Strommix der Stadt Haßfurt anhand der Realdaten im Zeitraum vom 1. Oktober 2015 bis zum 30. September 2022 analysiert. Daraus folgt die Bestimmung der notwendigen Speicherkapazität, um die Stadt autark zu versorgen. Zusätzlich wird ein kostenoptimierter Strommix vorgestellt.

### 2.1 Aktueller Strommix Stadt Haßfurt

Die Messdaten der Stadt Haßfurt beinhalten das Umwandlungsvermögen des Windparks, der Photovoltaikanlagen (PV), die mit Biogas betriebenen Blockheizkraftwerke (BHKW) sowie den Verbrauch des Stadtgebiets. Die stündlichen Messdaten sind in Abbildung 2 veranschaulicht.

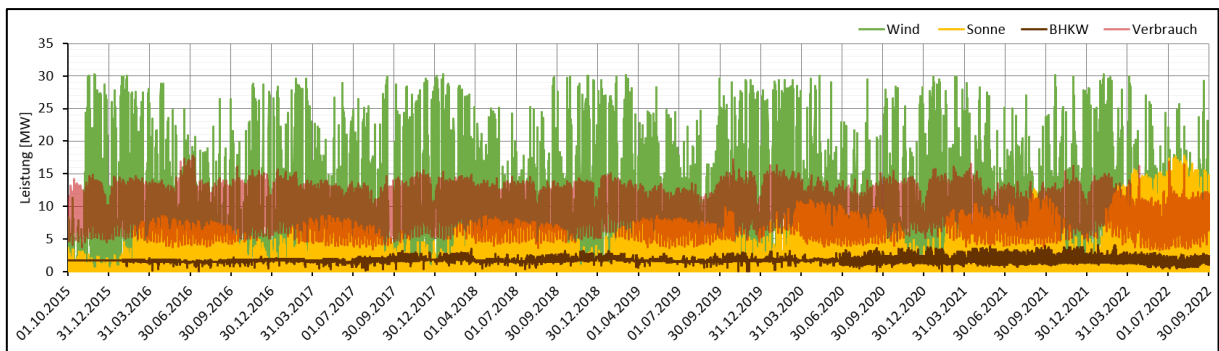


Abbildung 2: Leistungen im Netzgebiet Haßfurt

Der Windpark (Abb. 2 grüner Graph) besteht aus 13 Windenergieanlagen mit einem maximalen Umwandlungsvermögen von 30,6 MW und einem Benutzungsgrad von 22,04%. Pro Jahr werden im Durchschnitt 59,1 GWh umgewandelt, welches 75% des durchschnittlichen Jahresverbrauchs des Versorgungsgebiets von 80,3 GWh entspricht. Der durchschnittliche Tagesverbrauch beträgt 9,15 MW (Abb. 2 roter Graph). Die Photovoltaikanlagen (Abb. 2 gelber Graph) haben eine Peakleistung von 18 MW und wandeln pro Jahr 28,5 GWh um. Das sind 28% des Jahresverbrauchs. Des Weiteren besitzen die Photovoltaikanlagen einen Benutzungsgrad von 10,42%. Insgesamt 28,7 GWh, ebenso 28% des Jahresverbrauchs, werden von den BHKWs (Abb. 2 brauner Graph) umgewandelt. Die BHKWs haben eine Peakleistung von 4 MW und einen Benutzungsgrad von 53,34%. Das Versorgungsgebiet Haßfurt hat insgesamt ein Umwandlungsvermögen von 130%, bezogen auf seinen durchschnittlichen Jahresverbrauch von 80,3 GWh. Die Interpretation dieser Werte erfolgt im folgenden Abschnitt anhand der Residualleistung.

### 2.1.1 Residualleistung aktueller Strommix

Die Residualleistung beschreibt die Differenz zwischen dem aktuellen Umwandlungsvermögen und dem aktuellen Verbrauch und ist in Abbildung 3 dargestellt. Wenn der Verbrauch gleich dem Umwandlungsvermögen ist, hat die Residualleistung den Wert 0%.

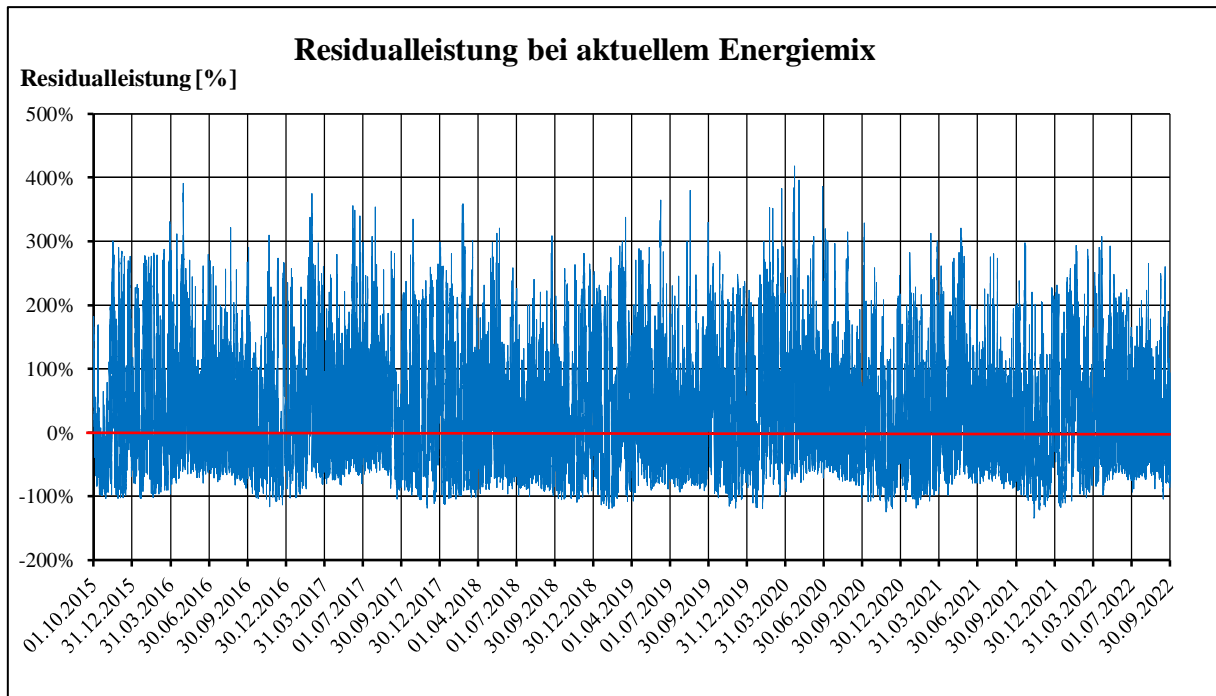


Abbildung 3: Residualleistung bei aktuellem Energiemix

Im positiven Bereich, oberhalb der roten Nulllinie, wird die überschüssige elektrische Energie in das Netz eingespeist. Wenn die Residualleistung negativ ist, wird Strom aus dem Netz bezogen.

### 2.1.2 Dauerlinie der Residuallinie des aktuellen Energiemix

Bei der Dauerlinie der Residualleistung wird die Residualleistung nach ihrer Größe sortiert und über die Zeit in Stundenschritten aufgetragen. Daraus entsteht das in Abbildung 4 dargestellte Schaubild. Die Fläche zwischen Abszisse und Dauerlinie entspricht der Energiemenge, die ins Netz eingespeist bzw. aus dem Netz bezogen wurde. Die eingespeiste Energiemenge ist somit um einiges größer als die aus dem Netz bezogen wurde. Mit einem ausreichend großen Energiespeicher, welcher bei positiver Residualleistung geladen und bei negativer entladen wird, könnte sich Haßfurt somit selbstversorgen.

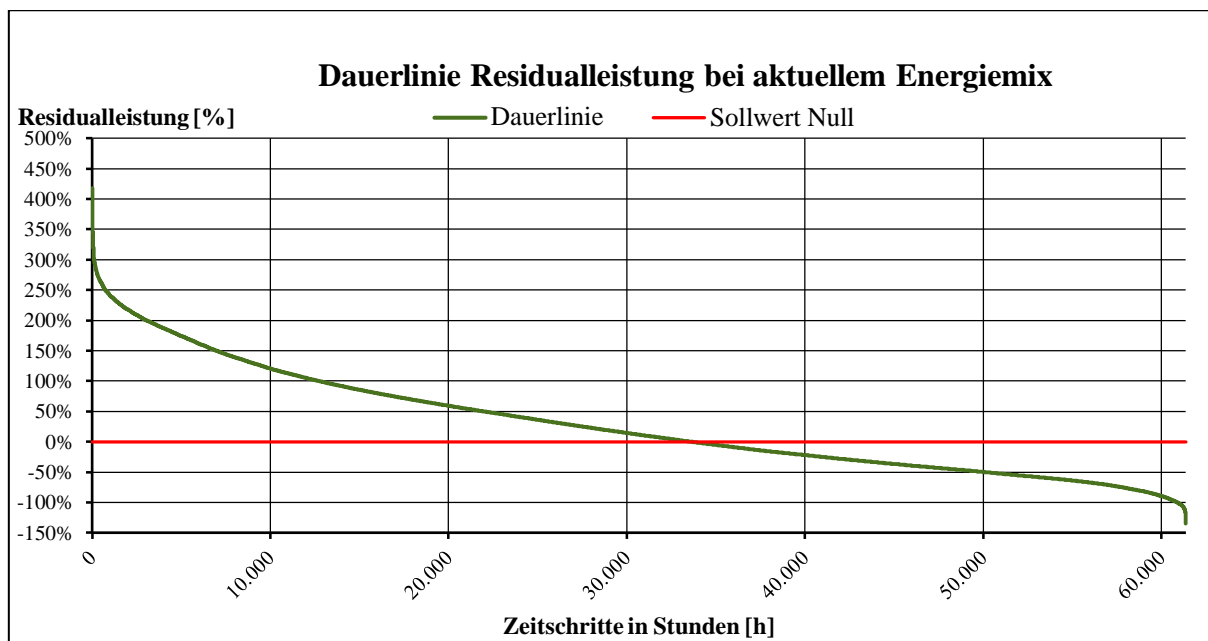


Abbildung 4: Dauerlinie Residualleistung aktueller Energiemix

### 2.1.3 Simulation eines Energiespeichers zum aktuellen Energiemix

Bei der Simulation des Energiespeichers wird die Energiemenge, welche bei negativer Residualleistung benötigt wird, um den Verbrauch zu decken, subtrahiert. Bei positiver Residualleistung wird die überschüssige Energiemenge addiert. Speicherleerung wird in Tagesladungen (TL) angegeben und kann den Maximalwert von 0 TL nicht überschreiten. Eine Tagesladung entspricht dem durchschnittlichen Tagesverbrauch von 219,5 MWh.

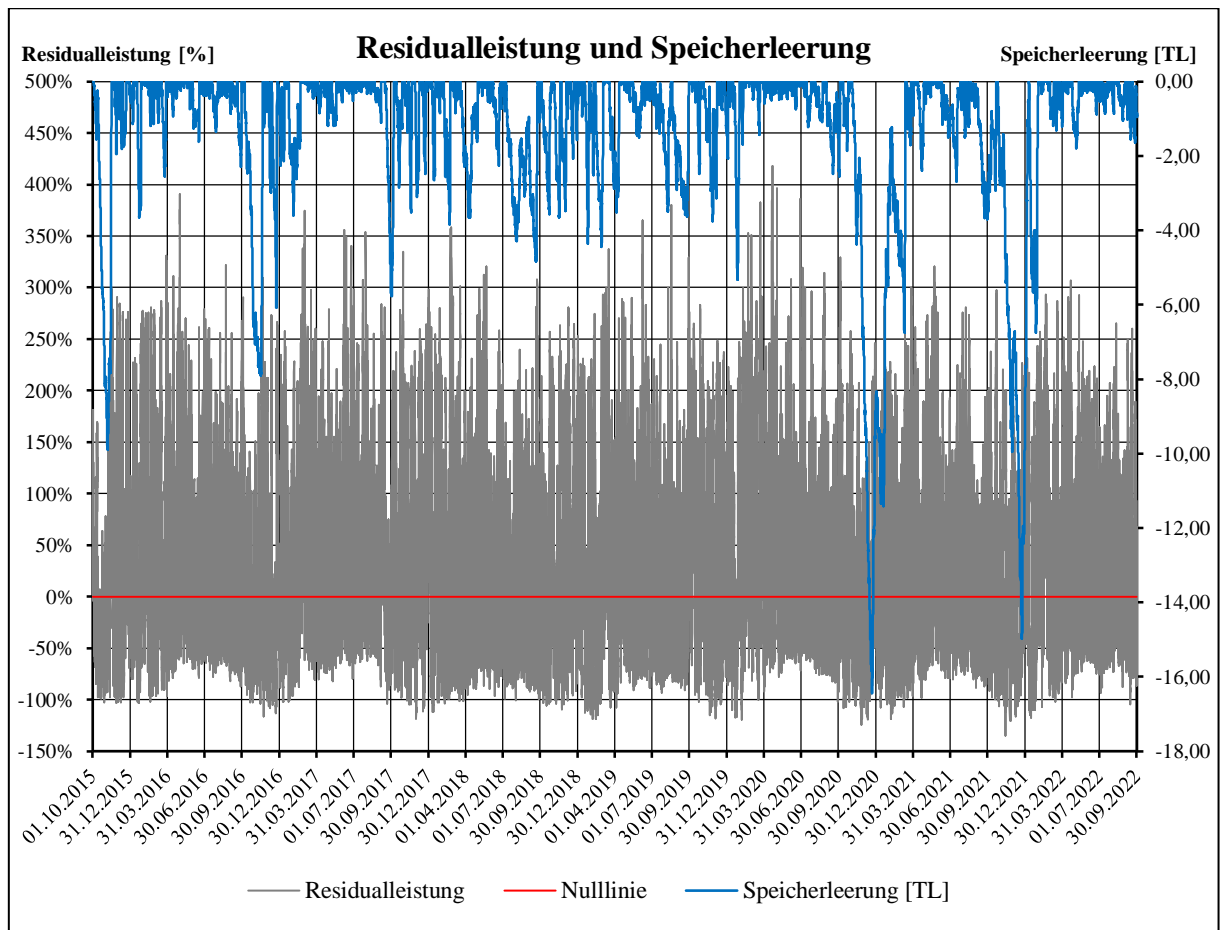


Abbildung 5: Residualleistung und Speicherleerung aktueller Energiemix (1 TL = 219,5 MWh)

In dem Diagramm der Speicherleerung (Abb. 5) ist auffällig, dass über einen Zeitraum von knapp 3 Jahren (01.01.2017 bis 01.12.2020) die Maximalespeicherleerung 5,5 TL nicht überschritten wird. Dies liegt daran, dass es in diesem Zeitraum keine großen Energieflauten gab. Als allerdings die Wetterbedingungen im Winter 2020/21 schlechter waren, wurde der Maximalwert der Leerung  $Q_{L,max}$  von 16,4 TL erreicht. Um mit diesem aktuellen Energiemix eine autarke Stromversorgung aufzubauen, würde eine Speicherkapazität  $Q_{SP}$  von 3960 MWh (=18,04 TL) benötigt. Diese Speicherberechnung beinhaltet eine Speicherreserve KR von 10% und wurde wie folgt berechnet.

$$Q_{SP} = Q_{L,max} * (1 + KR) [I]$$

$$Q_{SP} = 16,4 TL * 1,1 = 18,04 TL \hat{=} 3960 MWh$$

## 2.2 Bestmix Stadt Haßfurt

Der Bestmix ist der kostenoptimierte Ausbau von Windkraft-, PV-Anlagen und dem Energiespeicher, sodass die Gesamtkosten der Energieversorgung am günstigsten sind. Der Ausbau der BHKWs wird hierbei nicht weiter betrachtet, da deren weiterer Ausbau von den Stadtwerken

Haßfurt nicht vorgesehen ist. Somit bleibt der Anteil der BHKWs konstant bei 28,7 GWh/a. Die Anteile der Windkraft und PV-Anlagen sowie die Größe des Speichers werden mithilfe eines Programms von Dr. Popp berechnet. Dabei werden für die Berechnung die Realdaten der Wind- und PV-Einspeisung des Untersuchungszeitraums verwendet und hochskaliert. Die in Tabelle 1 und 2 aufgeführten Parameter werden der Berechnung ebenfalls zugrunde gelegt. Als Speichertechnologie wird ein Stülpmembranspeicher verwendet. Dieser wird im Abschnitt 3.1 genauer erläutert.

Tabelle 1: Vorgabewerte für Bestmixberechnung

Vorgabewerte	Größe	Wert
Bedarfsdeckungsreserve	BDR	10,0%
Kapazitätsreserve	KR	10,0%
Entnahmeleistungsreserve	ER	10,0%
Lauaufwasseranteil	LA	0,0%
Biomasse und Sonstiges Anteil	BA	28,0%
Speicherwirkungsgrad	EtaS	75,0%

Tabelle 2: Spezifische Herstellkosten

spezifische Herstellkosten	Ansatz	Einheit	ASD	Zins	BKF
Windenergieanlagen	1.700	€/kW	20	5,0%	4,0%
Solarenergieanlagen	800	€/kW	20	5,0%	1,5%
BHKW+Biomasseleistungsanlagen	3.500	€/kW	20	5,0%	25,0%
Speicherladeanlagen	150	€/kW	30	5,0%	1,5%
Speicherentnahmeanlagen	150	€/kW	30	5,0%	1,5%
Maximalleistungsanlagen	250	€/kW	30	5,0%	1,5%
Speicherkapazität	40	€/kWh	30	5,0%	1,5%

Das Ergebnis der Berechnung ist in Tabelle 3 notiert. Eine ausführliche Erläuterung der Berechnung des Bestmix ist in dem Projektbericht „Bestimmung einer Bewirtschaftungsstrategie aus der Überschussvermarktung am Strommarkt mittels eines Stülpmembranspeichers in der Stadt Haßfurt“<sup>5</sup> von Alexander Stubenrauch zu finden.

Tabelle 3: Berechnungsergebnisse Bestmix

	Wert
Windkraft	121%
PV-Anlagen	12%
Biomasse (BHKW)	28%
Laufwasseranteil	0,0%
gesamtes Umwandlungsvermögen	161%
Maximale Speicherleerung	9,65 TL
Vorzuhaltende Speicherkapazität inclusive 10% Reserve	10,61 TL (= 2329,5 MWh)

<sup>5</sup> (Stubenrauch, 2023)

### 2.2.1 Residualleistung Bestmix

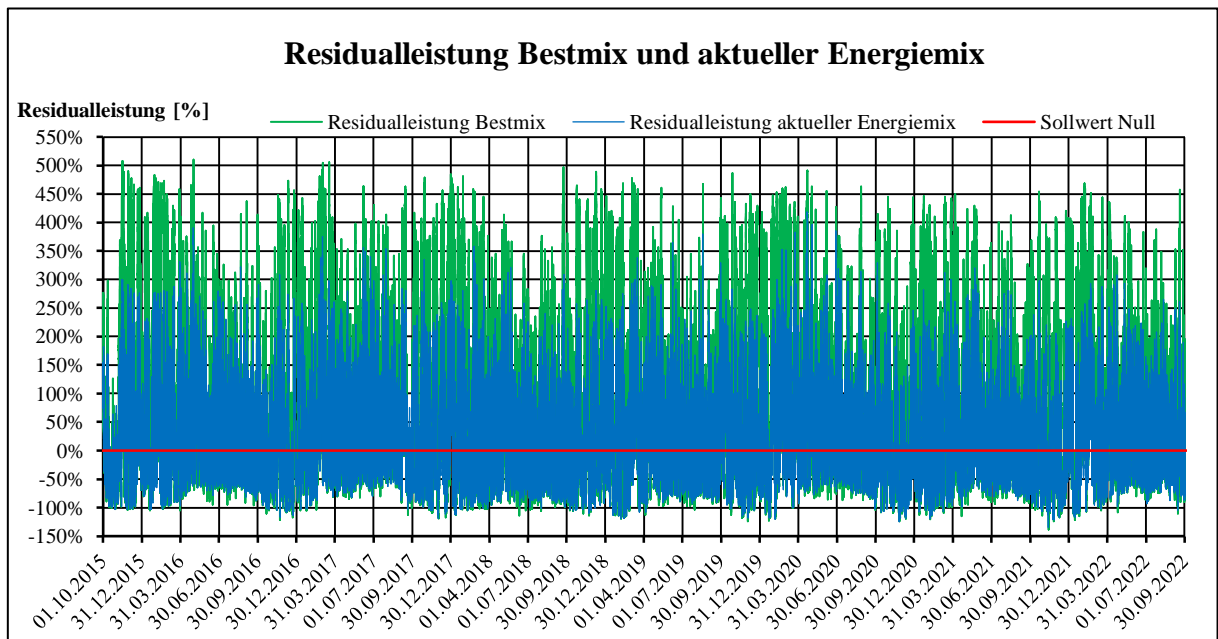


Abbildung 6: Vergleich Residualleistung Bestmix und aktueller Energiemix

In Abbildung 6 ist ein direkter Vergleich der Residualleistungen des Bestmix und des aktuellen Mix in einem Diagramm abgebildet. Daran ist erkennbar, dass die Leistungsüberschüsse des Bestmix auf 510% steigt und noch einmal deutlich größer sind als die des aktuellen Energiemix (418%). Einen signifikanten Anstieg verdeutlichen die Dauerlinien in Abbildung 7.

### 2.2.2 Dauerlinie Residualleistung Bestmix

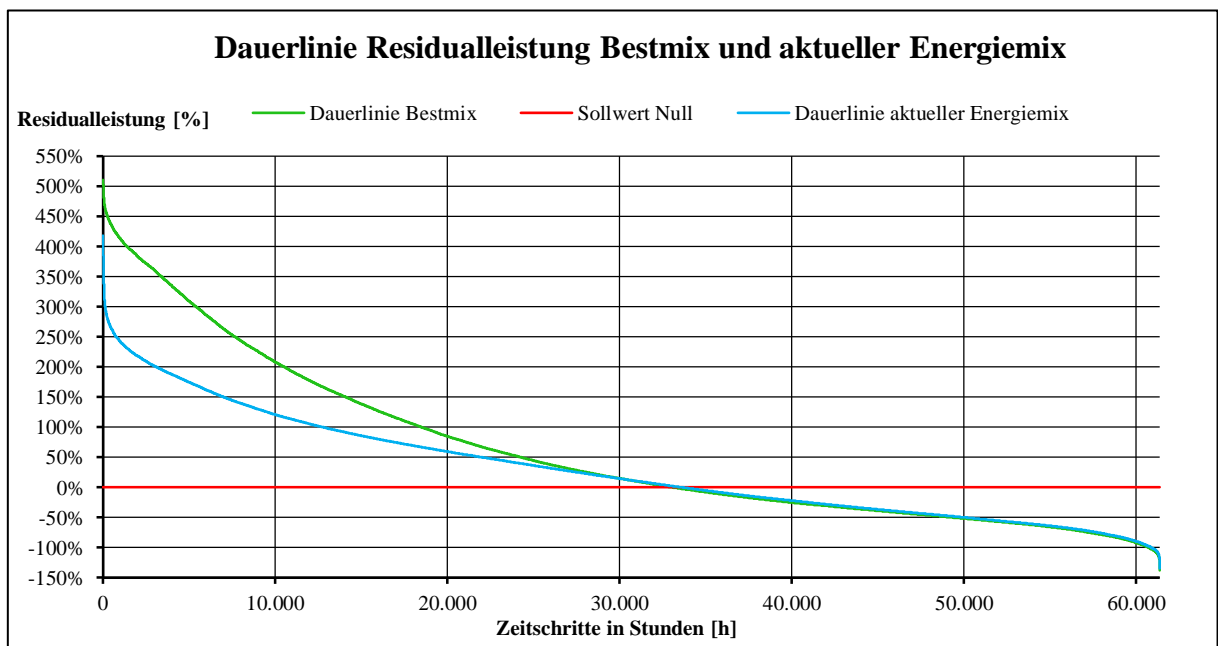


Abbildung 7: Dauerlinien Residualleistung Bestmix und aktueller Energiemix

Abbildung 7 veranschaulicht, dass die überschüssige umgewandelte Energiemenge des Bestmix deutlich größer ist als beim aktuellen Mix. Das Energiedefizit bleibt dagegen fast gleich groß. Sobald die Dunkelflaute jedoch vorbei ist, ist der Unterschied zwischen den Kurven eindeutig. Dies führt dazu, dass die Kapazität des Speichers kleiner dimensioniert werden kann. Das liegt daran, dass mehr Energie zur Verfügung steht, um den Stromspeicher schneller zu laden.

### 2.2.3 Simulierung eines Energiespeichers Bestmix

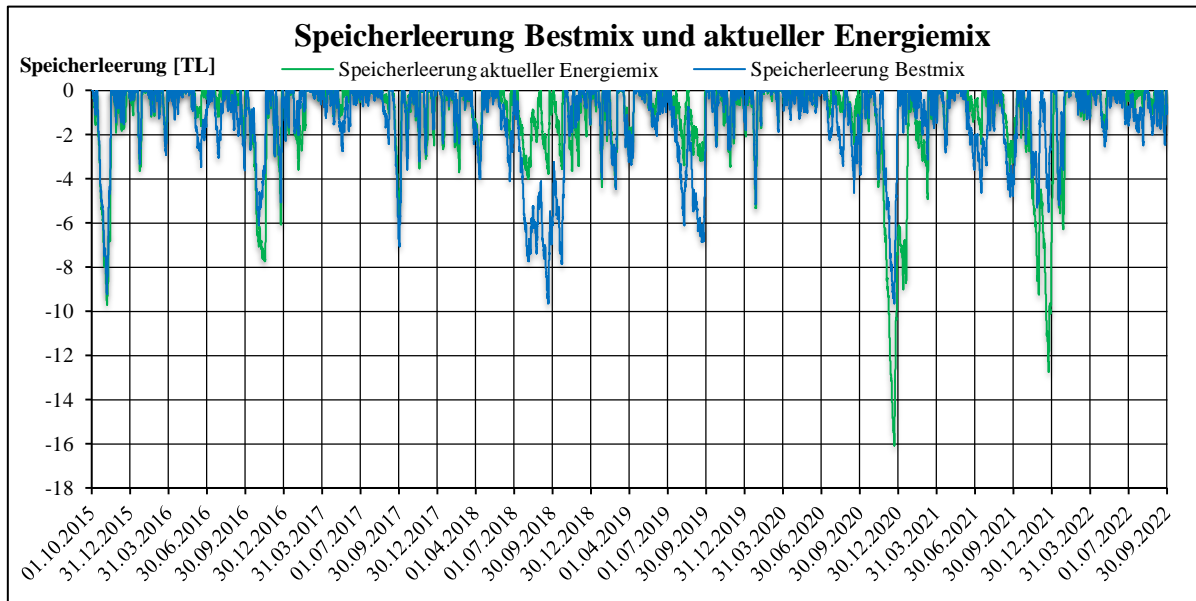


Abbildung 8: Vergleich Speicherleerung Bestmix und aktueller Mix

Im Vergleich der beiden Speicherleerungen (Abb. 8) ist auffällig, dass die maximale Leerung beim Bestmix häufiger auftritt. Ebenso in Zeiträumen in denen beim aktuellen Mix keine großen Ausschläge zu verzeichnen sind, beispielsweise im Zeitraum vom 01.07.2018 bis zum 01.12.2018. Der Vergleich der Dauerlinien der Speicherleerung (Abb. 9) bestätigt dies und zeigt, dass der Nutzungsgrad des Speichers beim Bestmix höher wird. Jedoch kann die maximale Speicherleerung von 16,4 TL auf 9,65 TL gesenkt werden, wodurch die erforderliche Speicherkapazität, inklusive 10% Speicherreserve, von 3960 MWh (= 18,04 TL) um 42,2% auf 2330 MWh (= 10,61 TL) verkleinert werden kann. Dies ist für die weitere Auslegung enorm wichtig, da hierdurch die Dimensionen des Speichers um einiges kleiner sind und dementsprechend auch die Kosten des Speichers sinken.

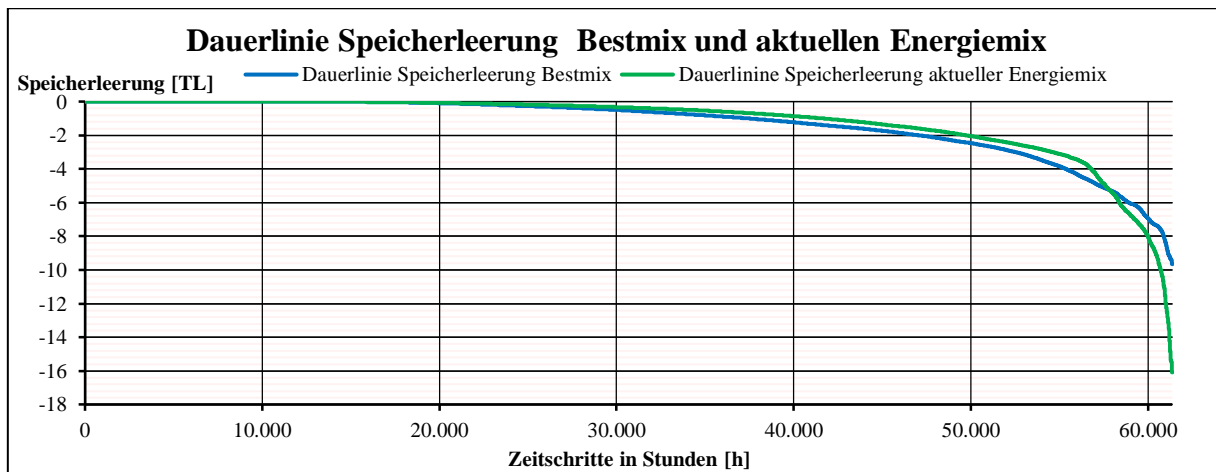


Abbildung 9: Vergleich Dauelinien Speicherleerung

### 3 Speichertechnologien

In einer Welt, welche sich zunehmend auf erneuerbare Energiequellen wie Solarenergie und Windkraft verlässt, spielen Speichertechnologien für Stromspeicher eine entscheidende Rolle, um die Stabilität und Zuverlässigkeit der Stromversorgung zu gewährleisten. Diese Technologien ermöglichen es, überschüssige Energie zu speichern und bei Bedarf abzurufen. Dies trägt dazu bei die Defizitphasen der Residualleistung auszugleichen und eine kontinuierliche Stromversorgung sicherzustellen. In den letzten Jahren haben sich viele verschiedene Arten von Speichertechnologien entwickelt, darunter Lithium-Ionen-Batterien, Redox-Flow-Batterien, Wärmespeicher und viele mehr. Jede Technologie hat ihre eigenen Vor- und Nachteile und wird in unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt. Eines haben die bisher bekannten Technologien jedoch alle gemeinsam: Sie können den Kapazitätsbedarf von der Stadt Haßfurt über mehrere Tage hinweg nicht decken. Mit dem Stülpmembranspeicher (SMS) ist es nun möglich sowohl die erforderliche Stromkapazität als auch eine saisonale Wärmespeicherkapazität bereit zu stellen (Abb.10). Die elektrische Energie wird als mechanische potenzielle Energie (Lageenergie) gespeichert. Die thermische Energie wird mittels sensibler Wärme gespeichert. Die genaue Funktionsweise des SMS wird im Folgenden erklärt und für den Energiebedarf der Stadt Haßfurt ausgelegt.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> (vgl. Häuslein, 2023)

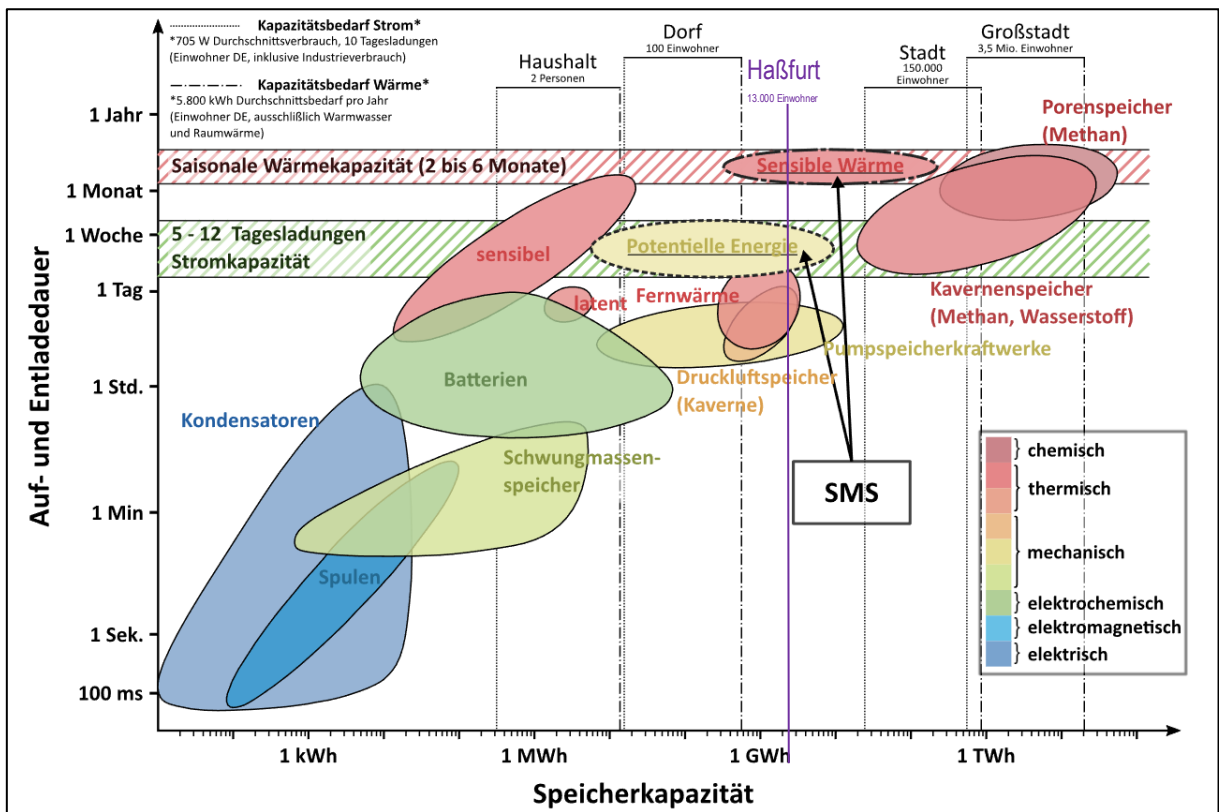


Abbildung 10: Ragone-Diagramm Deutschland (Datenblasen Stand 2016) <sup>7</sup>

### 3.1 Der Stülpmembranspeicher

Der Stülpmembranspeicher ist ein Lageenergiespeicher, in dem die Technik eines Pumpspeicherkraftwerks verbaut ist. Die potenzielle Energie wird jedoch nicht in dem Höhenunterschied des Wassers gespeichert, sondern in der potenziellen Energie des Bodenmassekolbens (1). Dieser bewegt sich vertikal in einem Zylinder. Bei positiver Residualleistung wird mit einer Pumpe aus dem oberen Druckniveau Wasser in das untere Druckniveau gepumpt. Dadurch erfolgen Umwandlung sowie Speicherung der überschüssigen elektrischen Energie in potenzielle Energie. Sobald elektrische Energie aus dem Speicher benötigt wird, baut sich die Druckdifferenz über die Turbine (3) ab und der Bodenmassekolben senkt sich. Mithilfe eines Generators wird die mechanische Energie in elektrische umgewandelt. Dabei ist der Differenzdruck zwischen oberen und unteren Druckniveau konstant, da dieser durch die Kolbenauflast zustande kommt. Deshalb ist bei einem Stülpmembranspeicher die Energiedichte höher als bei einem konventionellen Pumpspeicher. Das Dichtelement zwischen den beiden Druckzonen ist die Stülpmembran (2). Diese Membrandichtung ermöglicht einen leakagefreien, wartungsarmen Betrieb bei

<sup>7</sup> (ibd.)

wechselnden Wassertemperaturen über längere Zeiträume. Im Vergleich zu andern Deep Shaft Method Speichern ist das der wesentliche Unterschied.<sup>8</sup>

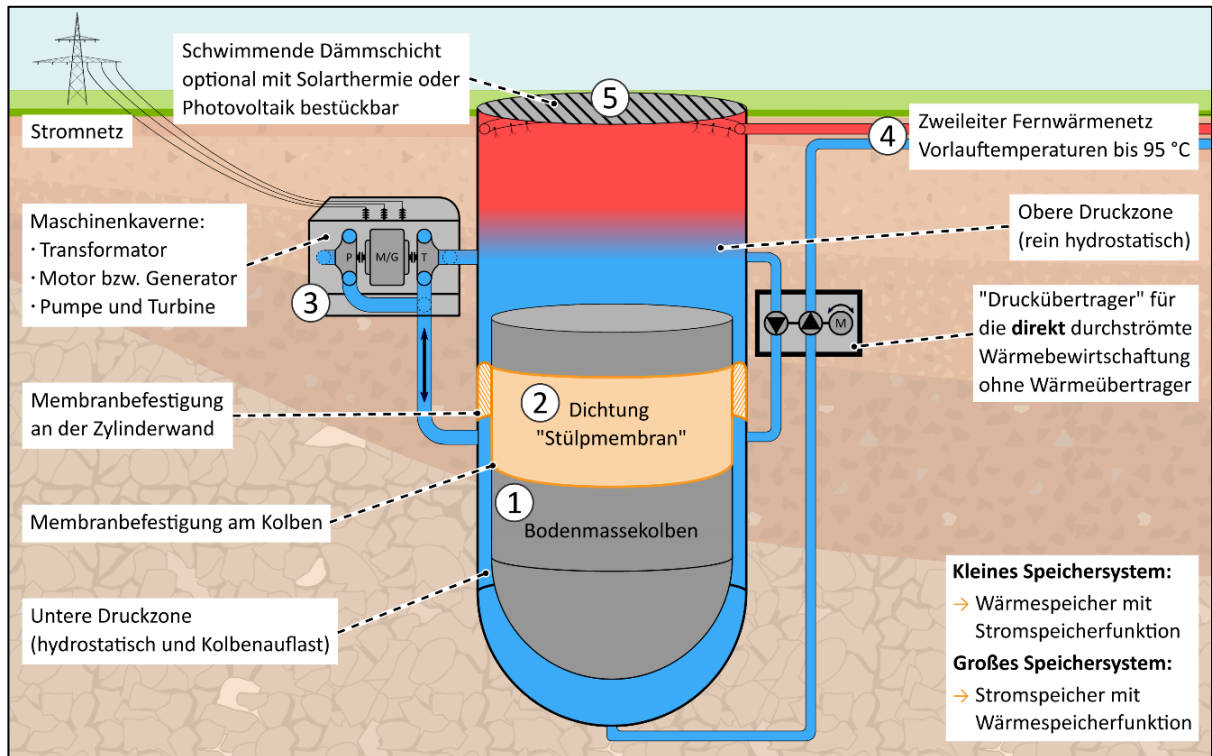


Abbildung 11: Stülpmembranspeicher<sup>9</sup>

Ein weiterer Vorteil ist, dass der Speicher nicht nur elektrische Energie in Form von potenzieller Energie speichern kann, sondern mit seinem Wasserinventar auch als saisonaler Wärmespeicher genutzt werden kann. Dies ist ohne nennenswerten baulichen Mehraufwand möglich. Hierfür wird ein Zweileiterfernwärmenetz vorausgesetzt (4). Dieses wird zusammen mit der Wärmeversorgung für die Stadt Haßfurt in den Projektberichten „Herstellung des Stülpmembranspeichers und Auswertung der Solarkollektoren der Stadt Haßfurt“<sup>10</sup> von Thomas Steiner und „Aufbau eines regenerativen Wärmenetzes und Wärmenetzplanung für die Stadt Haßfurt und dessen Neubaugebiet“<sup>11</sup> von Hünkar Sönmez weiter ausgeführt. Solarkollektoren, die in der ganzen Stadt verbaut sind, erwärmen in den Sommermonaten Wasser, welches den Speicher erwärmt. Dieses tritt am oberen Rand des Speichers ein. Der Kaltwasserrücklauf des Fernwärmenetzes wird am tiefsten Punkt des Speichers angebracht. Damit der Bodenmassekolben durch die Wasserentnahme im unteren Druckniveau sich nicht absenkt und potentielle Energie verliert, gibt es einen „Druckübertrager“. Dieser nutzt den Druck des Rücklaufes, um Wasser

<sup>8</sup> (ebd.)

<sup>9</sup> (ebd.)

<sup>10</sup> (Steiner, 2023)

<sup>11</sup> (Sönmez, 2023)

aus dem oberen Druckbereich in den unteren zu pumpen. Die entstehenden Reibungsverluste werden mit einem Motor ausgeglichen. Im Winterbetrieb funktioniert der Wärmespeicher umgekehrt. Das heiße Wasser fließt am oberen Rand des Speichers in das Fernwärmenetz und das kalte Wasser über den „Druckübertrager“ in den Speicher. Die Energie zur Druckerhöhung kommt aus dem Wasser, welches aus dem unteren Druckbereich über den „Druckübertrager“ in den oberen Druckbereich fließt. Somit ist es möglich mit dieser Speichertechnologie elektrische Energie und Wärme unabhängig voneinander zu speichern.<sup>12</sup>

Des Weiteren handelt es sich um ein weitgehend unterirdisches Bauwerk. Dies führt dazu, dass keine großen Landflächen geflutet werden müssen. Somit kann Flora und Fauna größtenteils erhalten bleiben. Durch ein Injektions- und Schlitzwandverfahren soll es möglich gemacht werden, auf unterschiedlichen Untergründen den Stülpmembranspeicher zu errichten. Dieses Bauverfahren wird in dem bereits erwähnten Projektbericht „Herstellung des Stülpmembranspeichers und Auswertung der Solarkollektoren der Stadt Haßfurt“<sup>13</sup> von Thomas Steiner ausgeführt.<sup>14</sup>

---

<sup>12</sup> (ebd.)

<sup>13</sup> (Steiner, 2023)

<sup>14</sup> (vgl. Häuslein, 2023)

### 3.2 Auslegung Stülpmembranspeicher für die Stadt Haßfurt

Der Stülpmembranspeicher speichert seine elektrische Energie in Form von potenzieller Energie. Für die potenzielle Energie gilt folgende Formel:

$$E_{pot} = m * g * h \text{ [II]}$$

Die potenzielle Energie des Bodenmassekolben  $E_{pot,Kolben}$  lässt sich mit Kolbenvolumen  $V_{Kolben}$ , Bodendichte  $\rho_B$ , Erdbeschleunigung  $g$  und Höhendifferenz zum Nullniveau  $h$  bestimmen.

$$E_{pot,Kolben} = V_{Kolben} * \rho_B * g * h \text{ [III]}$$

Allerdings ist der Bodemassekolben bei dieser Speichertechnologie dauerhaft unter Wasser. Somit muss die Auftriebskraft  $F_A$  mit beachtet werden. Diese ergibt sich aus dem verdrängten Volumen  $V_{Kolben}$ , der Wasserdichte  $\rho_W$  und Erdbeschleunigung  $g$ . Die Auftriebskraft  $F_A$  ist der Gewichtskraft entgegengesetzt.

$$F_A = V_{Kolben} * \rho_W * g \text{ [IV]}$$

Für die Speicherenergie  $E_{Speicher}$  ergibt sich:

$$E_{Speicher} = (\rho_B - \rho_W) * V_{Kolben} * g * h \text{ [V]}$$

Mit Gleichung V wird deutlich, dass die geometrischen Dimensionen in der vierten Potenz zur Speicherkapazität stehen. Basierend darauf wurden für den Kapazitätsbedarf der Stadt Haßfurt die Maße für den Stülpmembranspeicher berechnet. Diese sind in Tabelle 4 und Abbildung 12 veranschaulicht.

Tabelle 4: Berechnungsergebnisse Dimensionierung Stülpmembranspeicher

Speicherdimensionen	Aktueller Energiemix	Bestmix	Einheit
Stromspeicherkapazität	3,96	2,33	GWh
Kolbendurchmesser	141,5	114,4	m
zylindrische Kolbenhöhe	239,1	229,9	m
Gesamt Kolbenhöhe	309,9	287,1	m
Zylinderdurchmesser	145,5	118,8	m
Zylindrische Außenzylinderhöhe	478,3	459,7	m
Gesamte Speicherhöhe	550,9	519,1	m
Wasservolumern	4.255.699	2.742.156	m <sup>3</sup>
Aufschütthöhe	45,4	40,0	m
Böschungsgefälle	25	25	°

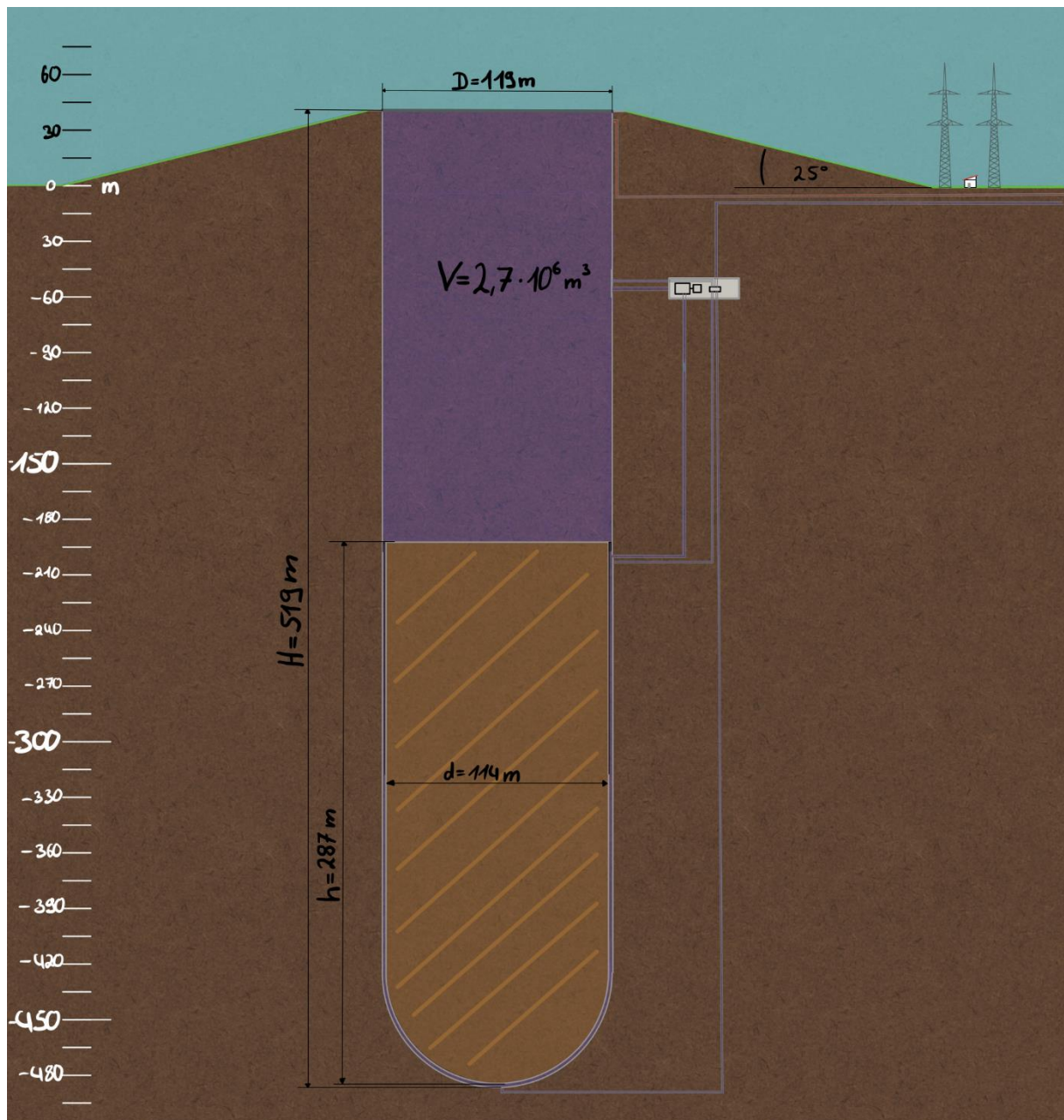


Abbildung 12: Skizze Stülpmembranspeicher (Speicherkapazität 2,33 GWh)

## 4 Fazit

Zusammenfassend ergibt sich, dass die Kombination von erneuerbaren Energien und Speichertechnologien eine vielversprechende Zukunftsperspektive bietet. Die Technologien verfügen über das Potential dazu beizutragen unsere Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu reduzieren und gleichzeitig eine nachhaltige und saubere Energieversorgung aufzubauen. Das Beispiel der Stadt Haßfurt verdeutlicht, dass es schon heute möglich ist, einen jährlichen Strombedarf von 80,3 GWh regenerativ zu decken. Jedoch bedarf es zusätzlich weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeit, um Speichertechnologien mit dementsprechend großer Kapazität zu realisieren. Bereits das optimale Verhältnis der unterschiedlichen Umwandlungsarten wie Wind, Sonne und Biomasse, führen dazu, dass der Speicher 42,2% weniger Kapazität benötigt, als die Speicherkapazität des aktuellen Energiemix von Haßfurt. Es ist unerlässlich, zusätzliche Investitionen in die Entwicklung und den Bau von Energiespeichern zu tätigen, um die regenerative Stromversorgung weiter voranzutreiben. Insbesondere der Stülpmembranspeicher bietet langfristiges Potenzial und sollte entsprechend gefördert werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass erneuerbare Energien und damit verbunden auch Speichertechnologien eine zentrale Rolle für eine nachhaltige Energieversorgung und den Klimaschutz spielen. Durch ihren Ausbau tragen sie maßgeblich zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen und zur Verminderung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen bei. Die Förderung erneuerbarer Energien ist daher von großer Bedeutung, um eine umweltfreundliche und zukunftsfähige Energieinfrastruktur aufzubauen und eine nachhaltige Entwicklung voranzutreiben.

# Literaturverzeichnis

- Bundesnetzagentur. (26. Februar 2023). *Bundesnetzagentur*. Von [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2023/20230104\\_smar.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2023/20230104_smar.html) abgerufen
- Häuslein, D. (27. Februar 2023). *TH Nürnberg*. Von <https://www.th-nuernberg.de/einrichtungen-gesamt/wissenschaftliche-und-forschungskooperationen/nuremberg-campus-of-technology/automatisierungstechnik/projekte/projektentwurf-geomem/> abgerufen
- Popp, M. (24. Februar 2023). *Matthias Popp Ingenieurbüro*. Von <http://www.poppware.de/> abgerufen
- Quaschnig, V. (2022). *Regenerative Energiesysteme*. München: Hanser.
- Sönmez, H. (2023). *Aufbau eines regenerativen Wärmenetzes und Wärmenetzplanung für die Stadt Haßfurt und dessen Neubaugebiet*. Von <urn:nbn:de:bvb:92-opus4-9784> abgerufen
- Steiner, T. (2023). *Herstellung des Stülpmembranspeichers und Auswertung der Solarkollektoren der Stadt Haßfurt*. Von <urn:nbn:de:bvb:92-opus4-9803> abgerufen
- Stubenrauch, A. (2023). *Bestimmung einer Bewirtschaftungsstrategie aus der Überschussvermarktung am Strommarkt mittels eines Stülpmembranspeichers in der Stadt Haßfurt*. Von <urn:nbn:de:bvb:92-opus4-9795> abgerufen
- Umweltbundesamt . (03. Juni 2022). Von Umwelt Bundesamt : <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen> abgerufen