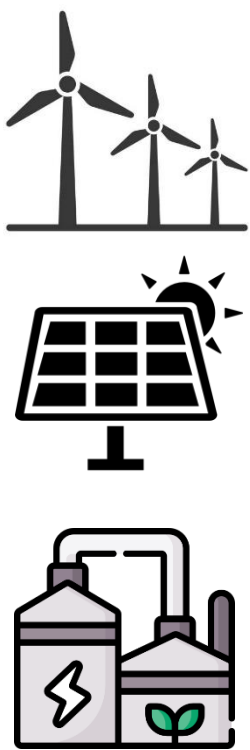




Projektarbeit

**Bestimmung einer Bewirtschaftungsstrategie aus der
Überschussvermarktung am Strommarkt mittels eines
Stülpmembranspeichers in der Stadt Haßfurt**



stadtwerk
haßfurt

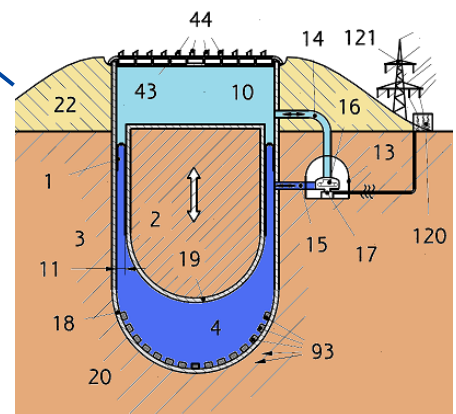


Abbildung 1: Stülpmembranspeicher

Quelle: www.poppware.de

Verfasser: Alexander Stubenrauch
E-Mail: alexander.stubenrauch@outlook.de
Fakultät: Maschinenbau und Versorgungstechnik
Studiengang: Maschinenbau – Schwerpunkt Energietechnik
Semesterprojekt: 6. Semester Energietechnik WS 22/23
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp
Externe Betreuer: Norbert Zösch, Florian Graser, Michael Eichhorn

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis.....	3
Abkürzungsverzeichnis.....	4
1. Einleitung	5
2. Energieversorgung und -verbrauch der Stadt Haßfurt.....	6
3. Versorgungssystemauslegung bei Berücksichtigung des Best-Mix	8
3.1 Ausbaureserven und Kostenvoranschlag	8
3.2 Best-Mix aus Wind und Sonne.....	10
3.3 Umwandlungsvermögen bei vorgegebenem Best-Mix.....	12
3.4 Speicherladeleistung bei vorgegebenem Mix und Umwandlungsvermögen.....	14
3.5 Residualleistung des Best-Mix.....	15
3.6 Ermittlung der Stromgestehungskosten für das Versorgungssystem.....	15
4. Speicherkapazität anhand des Best-Mix.....	18
5. Kosten des Speichers im Falle des Best-Mix in Zahlen	19
6. Überschussvermarktungsstrategie	20
6.1 Die Strombörse.....	20
6.2 Vermarktungsstrategie	21
6.3 Situation mit den tatsächlichen Strompreisen für die Jahre 2015 bis 2022.....	22
6.4 Situation mit aktuellen Strompreisen bezogen auf die Jahre 2015 bis 2022.....	23
7. Zusammenfassung und Ausblick in die Zukunft	24
Literaturverzeichnis	25

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stülpmembranspeicher.....	1
Abbildung 2: Residualleistungsverlauf der letzten sieben Jahre mit den aktuell ausgebauten Energieanlagen.....	6
Abbildung 3: Nutzungsgrad der aktuell ausgebauten Anlagen in Haßfurt, basierend auf Realdaten.....	10
Abbildung 4: Stromgestehungskosten über der erbrachten Energie durch Wind	11
Abbildung 5: Vergleich zwischen dem aktuellen Mix und dem Best-Mix.....	12
Abbildung 6: Stromgestehungskosten über dem möglichen Umwandlungsvermögen der Energieanlagen.....	13
Abbildung 7: Stromgestehungskosten über der Höhe der Speicherladeleistung in Prozent.....	14
Abbildung 8: Residualleistungsverlauf bei berechnetem Best-Mix.....	15
Abbildung 9: Darstellung der benötigten Speicherkapazität.....	18
Abbildung 10: Aufteilung der Kosten nach Anlagenart.....	19

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorgabewerte für Reserven, Biogasanteile und den Speicherwirkungsgrad.....	8
Tabelle 2: Spezifische Herstellkosten, Kapitalkosten und Betriebskostenfaktor des Versorgungssystems.....	9
Tabelle 3: Entstehung der Kosten des Versorgungssystems.....	16
Tabelle 4: Stromgestehungskosten für die jeweiligen Komponenten des Versorgungssystems.	17
Tabelle 5: Vermarktungsstrategie während einer Überschussphase.....	21

Abkürzungsverzeichnis

ASD	Abschreibungsdauer
BHKW	Blockheizkraftwerk
BKF	Betriebskostenfaktor
EEX	European Energy Exchange
EPEX	European Power Exchange
GWh	Gigawatt-Stunde
hL	Stundenladung des Speichers
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-Stunde
$P_{\text{Durchschnitt}}$	Durchschnittliche Leistung der Energieanlagen
P_{Nenn}	Installierte Nennleistung der Energieanlagen
PV	Photovoltaik
SGK	Stromgestehungskosten
SGKVS	Stromgestehungskosten gesamtes Versorgungssystem
SLL	Speicherladeleistung
sWHK	Spezifische Windenergieanlagenherstellkosten
sSHK	Spezifische Photovoltaikanlagenherstellkosten
sBHK	Spezifische Kosten für die Blockheizkraftwerke
sSLHK	Spezifische Kosten für die Speicherladeanlagen
sSEHK	Spezifische Kosten für die Speicherentladeanlagen
sSMHK	Spezifische Kosten für die Maximalleistungsanlagen
sSKHK	Spezifische Herstellkosten für die Speicherkapazität
TL	Tagesladung des Speichers

1. Einleitung

Der Energiebedarf der Menschheit wächst stetig (Der Standard, 2020). Dies liegt einerseits daran, dass sich die Menschheit mit inzwischen acht Milliarden Bewohnern auf der Erde immer weiter vermehrt (ARD-Alpha, 2022). Andererseits an ihrer Produktivität und dem daraus folgenden Energiekonsum (Der Standard, 2020). Um den steigenden Energieverbrauch der Menschen zu decken und gleichzeitig den Schutz unseres Planeten zu wahren, ist es erforderlich die Energie aus regenerativen Ressourcen zu beziehen. Derzeit werden noch etwa 85% des Weltprimärenergiebedarfs aus Kohle, Erdöl und Erdgas bezogen (Quaschnig, 2022, S. 18).

Der Fokus für die Zukunft liegt daher auf der regenerativen Seite, um mit Hilfe von Wind, Sonne, Wasser, Geothermie und Biomasse die nötigen Energien bereitzustellen. Um dies aber größtenteils zeit- und wetterunabhängig durchführen zu können, muss es eine Möglichkeit geben, die überschüssige Energie aus diesen Trägern über einen längeren Zeitraum zu speichern. Um dies zu realisieren ist ein Stülpmembranspeicher, welcher von Prof. Dr. Popp entwickelt wurde, eine attraktive Lösung als Speicherquelle für Strom und Wärme. Der Stülpmembranspeicher basiert auf dem Prinzip eines Pumpspeicherkraftwerks. Bei einem Stromüberschuss wird ein massereicher Kolben aus Gestein und Erde in einem Betonzylinder, welcher mit Wasser gefüllt ist, angehoben. Dies geschieht durch die Entstehung zweier Druckniveaus. Diese Druckniveaus werden durch Pumpen erzeugt, welche mit einem Elektromotor angetrieben werden. Mit Hilfe einer Stülpmembran werden die Druckniveaus voneinander getrennt (Abbildung 1). Sollte nun eine Defizitphase eintreten, kann der Massekolben abgelassen werden und eine Turbine antreiben. Dadurch wird die potenziell gespeicherte Energie wieder in elektrische Energie umgewandelt. Eine zusätzliche Funktion als Wärmespeicher ist bei diesem Konzept möglich (Popp, 2014).

Ein möglicher Standort, um solch ein Pilotprojekt durchzuführen, könnte die Stadt Haßfurt in Unterfranken sein. Haßfurt wäre im Stande 111% ihres Strombedarfs aus erneuerbaren Energien zu decken (Stadtwerke Haßfurt, 2021). Hier besteht allerdings eine hohe Abhängigkeit des Wetters. Um dem entgegenzuwirken, ist ein Speicher für die umgewandelte Energie nötig. Um dies auch wirtschaftlich möglich zu machen, kann mit einer geeigneten Strategie die überschüssige Energie zu Höchstpreisen an der Strombörse verkauft werden. In dieser Projektarbeit wird ein solches Versorgungssystem mit Energiespeicher für die Stadt Haßfurt ausgelegt und eine Bewirtschaftungsstrategie erstellt, mit der das Gesamtsystem finanziert werden kann. Hierbei handelt es sich um einen Teil des studentischen Gesamtprojekts einer regenerativen Versorgung der Stadt Haßfurt. Auf die anderen Teile wird im Literaturverzeichnis verwiesen.

2. Energieversorgung und -verbrauch der Stadt Haßfurt

Die Basis der Berechnung erfolgt durch die Realdaten der Stadtwerke Haßfurt. Diese wurden für den Zeitraum vom 01.10.2015 – 30.09.2022 zur Verfügung gestellt. Neben den Daten über die Energieeinspeisung von Windkraftanlagen, Photovoltaik und den Blockheizkraftwerken, beinhaltet das Datenpaket auch den Stromverbrauch der Stadt. Die Stadt verfügt über einen Windpark mit 13 Windenergieanlagen, welche eine Nennleistung von 30,6 MW aufweisen. Des Weiteren verfügt Haßfurt über mehrere Photovoltaikanlagen mit einer Gesamtleistung von 28,3 MW-peak und einigen Blockheizkraftwerken, welche mit einem Gas-Ottomotor Biogas verbrennen. Diese Anlagen besitzen eine Gesamtnennleistung von 4,85 MW. Der durchschnittliche Stromverbrauch der Stadt beläuft sich auf etwa 80,1 GWh pro Jahr, was einem Durchschnittsverbrauch von ca. 9,147 MW entspricht. Anschaulicher lässt sich die Stromversorgung der Stadt mit Hilfe einer Residualleistungskurve visualisieren. Diese wird in Abbildung 2 dargestellt. Die Residualleistung ist jene Leistung, die benötigt wird, um den Verbrauch der Stadt zu decken. Das bedeutet, wenn die umgewandelte Energie der Anlagen gleich dem Verbrauch der Stadt ist, beträgt die Residualleistung 0%.

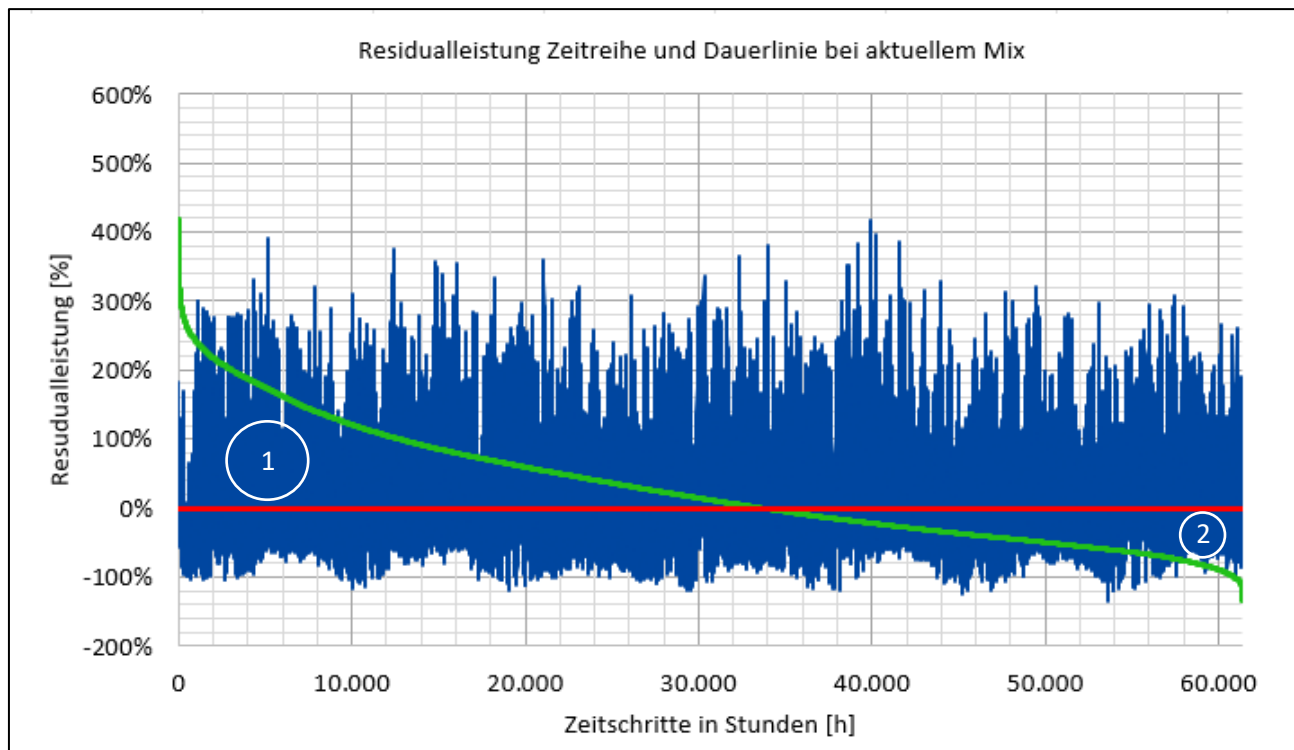


Abbildung 2: Residualleistungsverlauf der letzten sieben Jahre mit den aktuell ausgebauten Energieanlagen

Das Diagramm in Abbildung 2 zeigt die Residualleistung in Prozent über die kompletten sieben Jahre in Stundenschritten folgendermaßen auf: Die rote Linie zeigt die 0% der Residualleistung an. Dies ist erfüllt, wenn die umgewandelte Strommenge der Energieerzeugungsanlagen dem Verbrauch der Stadt entspricht. Die blaue Kurve entspricht dem, was die Energieanlagen umgewandelt haben, zeitlich angeordnet. Immer wenn die blaue Linie unter die 0% kommt, ist die Stadt gezwungen, den benötigten Strom von einem externen Energieversorgungsunternehmen zu beziehen. Dies ist der Fall, wenn die Anlagen nicht genügend Energie zur Verfügung stellen können. Diesen Zustand gilt es mit Hilfe des Speichers in Zukunft zu vermeiden. Die grüne Kurve entspricht der Residualleistung als Dauerlinie. In diesem Fall ist der Verlauf der Residualleistung nicht mehr zeitlich angeordnet, sondern nach der Größe sortiert. Durch die grüne und die rote Kurve werden zwei Flächen eingeschlossen, die in Abbildung 2 markiert sind. Fläche 1 spiegelt den Bereich wider, in dem eine positive Residualleistung geherrscht hat. Das bedeutet, dass in diesem Bereich die Anlagen mehr Strom produziert haben, als von der Stadt verbraucht wurde. Fläche 2 zeigt die Defizitphasen auf. In diesem Bereich konnten die Energieanlagen nicht genügend Strom liefern, um den Verbrauch der Stadt zu decken. Könnte man die überschüssige Energie aus Fläche 1 speichern, wird ersichtlich, dass genügend Energie zur Verfügung stünde, um die Defizite auszugleichen. Dadurch könnte der gesamte Bedarf der Stadt gedeckt werden. Aus Abbildung 2 wird ebenfalls deutlich, dass nach der Bedarfsdeckung, immer noch mehr Energie zur Verfügung stehen würde. Dies wird ersichtlich, da Fläche 1 deutlich größer ist als Fläche 2. Diese Energie kann am Strommarkt verkauft werden. Mittels eines Speichers ist es möglich die Energie dann zu verkaufen, wenn am Markt sehr hohe Energiepreise herrschen. Dies liegt daran, dass durch den Speicher eine zeit- und wetterunabhängige Energieverfügbarkeit möglich gemacht wird. Wie ein solches Versorgungssystem ausgelegt werden könnte, wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

3. Versorgungssystemauslegung bei Berücksichtigung des Best-Mix

Das gesamte Versorgungssystem mit Speicher wird über die Energiekosten der Bewohner von Haßfurt finanziert. Daher ist das Ziel, die Stromgestehungskosten so gering wie möglich zu halten. Die Stromgestehungskosten sind alle Kosten, die anfallen, um eine vorhandene Energieform in elektrische Energie umzuwandeln (Gonschor, 2022). Um das zu erreichen, eignet es sich, ein Best-Mix-Verfahren für die Stadt anzuwenden. Bei diesem Best-Mix wird die Wind- und Sonnenenergie im richtigen Verhältnis zur Energieumwandlung genutzt, um die Stromgestehungskosten so gering wie möglich zu halten. In den folgenden Abschnitten wird die Auslegung eines solchen Versorgungssystems mit der Berücksichtigung nötiger Reserven genauer beleuchtet.

3.1 Ausbaureserven und Kostenvoranschlag

Um eine sichere Stromversorgung der Stadt zu gewährleisten, sind folgende Vorgabewerte zu berücksichtigen:

Tabelle 1: Vorgabewerte für Reserven, Biogasanteile und den Speicherwirkungsgrad

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

In Tabelle 1 sind die nötigen Reserven zur Dimensionierung des Speichers aufgelistet. Die Bedarfsdeckungsreserve gibt vor, dass 10% mehr, als der tatsächliche Bedarf an Energie gedeckt werden könnte. Die Kapazitätsreserve ist für größere Defizitphasen von Bedeutung. Da auch im maximalen Entladefall durch enorm viele Defizitphasen der Speicher nicht vollständig entladen

werden sollte, wird hier ebenfalls eine Reserve von 10% vorgegeben. Eine Defizitphase wird durch schlechte Wetterbedingungen hervorgerufen. Die Entnahmeleistung der gespeicherten Energie ergibt sich auf Grundlage des Verbrauchs von Haßfurt zu 138,1% bezogen auf den Durchschnittsverbrauch. Da auch hier eine Reserve von 10% nötig ist, wird die maximale Entnahmeleistung auf 151,9% ausgelegt. In diesem Fall benötigen die Entnahmeanlagen eine Leistung von 13,9 MW. Das Umwandlungsvermögen der BHKWs liegt aktuell bei 28% und wird nicht weiter ausgebaut, aber dennoch weiter betrieben. Der Speicherwirkungsgrad ergibt sich aus den Wirkungsgradverlusten, welche durch Rohrreibung, Turbinen- und Generatorwirkungsgrad zur Stromerzeugung bzw. Motoren- und Pumpenwirkungsgrad zur Energiespeicherung entstehen. Von der elektrischen Energie, die anschließend in potenzielle Energie umgewandelt wird, können etwa 75% wieder als elektrische Energie abgerufen werden.

Nun werden aus diesen Vorgaben die niedrigsten Stromgestehungskosten ermittelt. Dafür rechnet das Exceltool iterativ den günstigsten Stromgestehungspreis anhand folgender Kostenannahmen aus:

Tabelle 2: Spezifische Herstellkosten, Kapitalkosten und Betriebskostenfaktor des Versorgungssystems

spezifische Herstellkosten	Größe	Ansatz	Einheit	ASD	Zins	BKF
Windenergieanlagen	sWHK	1.700	€/kW	20	5,0%	4,0%
Solarenergieanlagen	sSHK	800	€/kW	20	5,0%	1,5%
BHKW, Biomasseleistungsanlagen	sBHK	3.500	€/kW	20	5,0%	25,0%
Speicherladeanlagen	sSLHK	150	€/kW	30	5,0%	1,5%
Speicherentnahmeanlagen	sSEHK	150	€/kW	30	5,0%	1,5%
Maximalleistungsanlagen	sSMHK	250	€/kW	30	5,0%	1,5%
Speicherkapazität	sSKHK	40	€/kWh	30	5,0%	1,5%

Die in Tabelle 2 aufgelisteten Kostenansätze, wurden mit den Stadtwerken Haßfurt zusammen veranschlagt, um einen ersten Kostenvoranschlag für das Gesamtsystem zu bekommen. Um das Versorgungssystem richtig auslegen zu können und Ergebnisse für die Dimensionierung der Anlagen und den daraus resultierenden Stromgestehungskosten zu erhalten, wird der bestmögliche Mix aus Wind- und Sonnenenergie errechnet. Anschließend wird das Umwandlungsvermögen dieses Mixes ermittelt. Zum Schluss wird die benötigte Speicherladeleistung angesetzt, welche abhängig von der Dimensionierung der verbauten Maschinen ist. Die gesamte Berechnung geschieht auf Grundlage der Kostenansätze aus Tabelle 2.

3.2 Best-Mix aus Wind und Sonne

Zu Beginn wird berechnet welcher prozentuale Mix die niedrigsten Stromgestehungskosten ergibt, wenn man die Wind- und Sonnenenergie im richtigen Verhältnis zueinander nutzt. Dabei werden die spezifischen Herstellkosten, die Kapitalkosten und die spezifischen Betriebskosten des gesamten Versorgungssystems berücksichtigt. Diese können aus Tabelle 2 entnommen werden. Des Weiteren wird der Benutzungsgrad berücksichtigt, welcher in Abbildung 3 dargestellt ist.

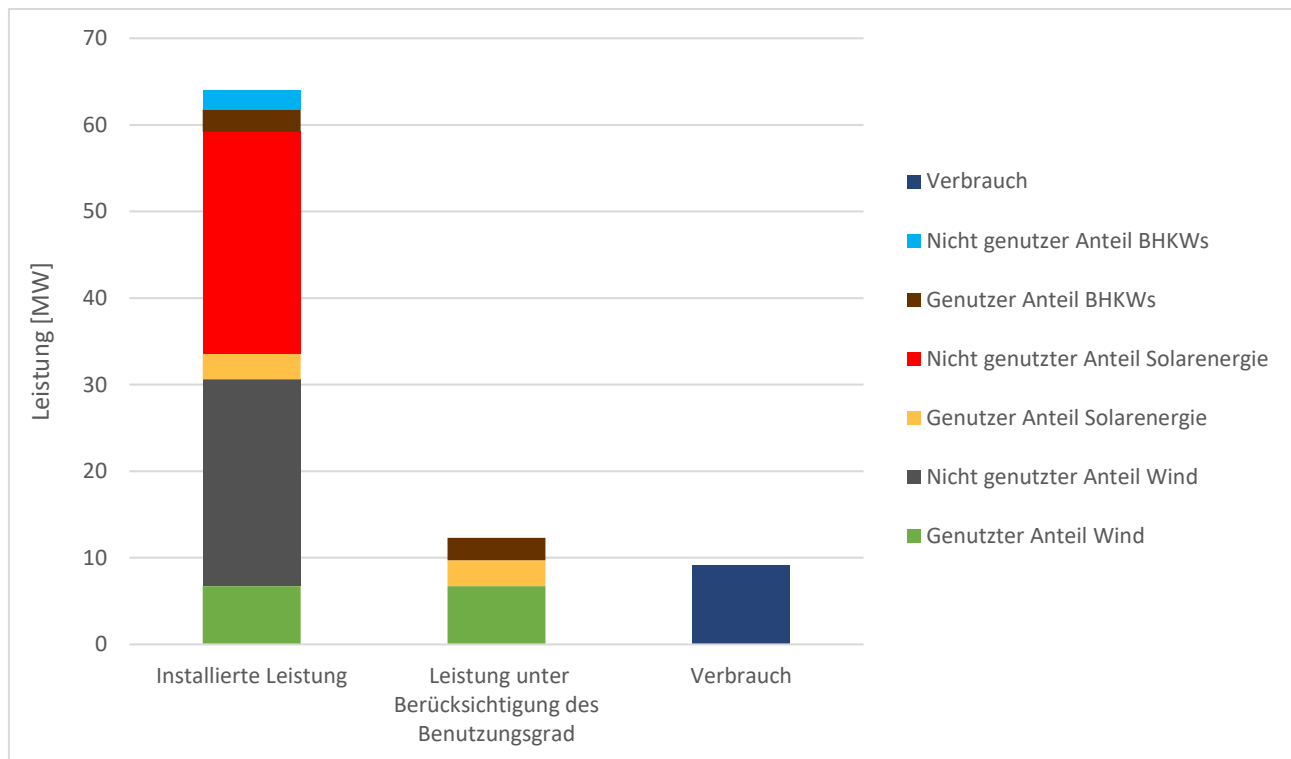


Abbildung 3: Nutzungsgrad der aktuell ausgebauten Anlagen in Haßfurt, basierend auf Realdaten

Abbildung 3 zeigt den Benutzungsgrad aller Anlagen, die die Stadtwerke Haßfurt mit Strom versorgen, bezogen auf die installierte Nennleistung. Der Benutzungsgrad ist definiert als Quotient aus der durchschnittlich umgewandelten Leistung geteilt durch die installierte Nennleistung der Anlagen (Popp, 2010, S. 15).

$$\text{Benutzungsgrad} = \frac{P_{\text{Durchschnitt}}}{P_{\text{Nenn}}}$$

Die durchschnittliche Leistung ist in Abbildung 3 über die genutzten Anteile definiert. Die Nennleistung der jeweiligen Anlage ist maximal mögliche Leistungsangabe des Herstellers.

Der Benutzungsgrad beträgt für die Windenergieanlagen 22,04%, für die PV-Anlagen 10,42% und für die BHKWs 53,34%. Diese Werte stammen ebenfalls aus der Berechnung mit den Realdaten, die von den Stadtwerken zur Verfügung gestellt wurden.

Für die Berechnung wird mit einem Verhältnis zur Energieumwandlung anteilig von 0% Windenergie und 100% Sonnenenergie begonnen. Anschließend wird ein immer fortschreitender Ausbau von Windenergieanlagen mit einberechnet. Ebenfalls berücksichtigt werden die Kosten für das Speichersystem, welches benötigt wird, um Dunkelflauten zu überbrücken. Eine Reduzierung der Stromgestehungskosten auf Grund der wetter- und zeitunabhängigen Vermarktung von überschüssigem Strom wird hier nicht berücksichtigt. Dies wird in Abschnitt 6 genauer erläutert. Auf Grundlage dieser Daten hat die iterative Berechnungsmethode ergeben, dass ein optimaler Mix aus 91% Windanteil und 9% PV-Anteil die niedrigsten Stromgestehungskosten ergeben. In Abbildung 4 ist die Berechnungskurve abgebildet.

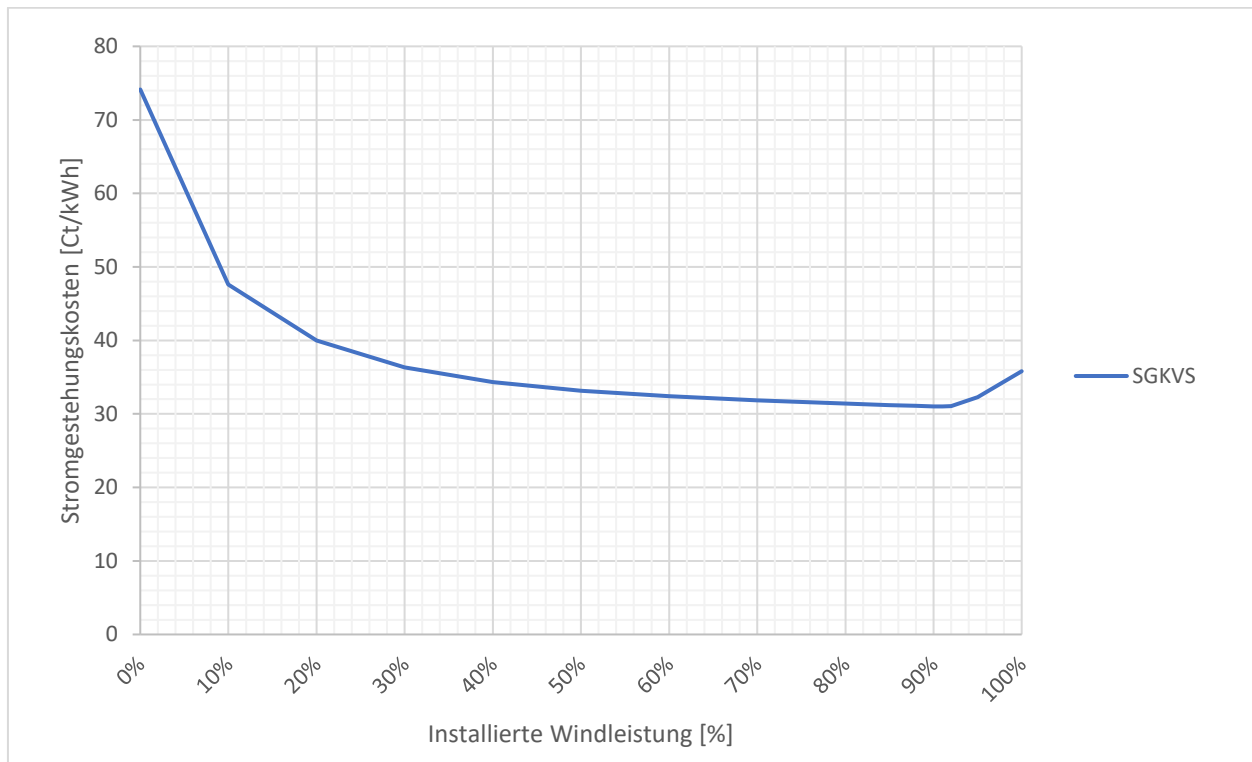


Abbildung 4: Stromgestehungskosten über der erbrachten Energie durch Wind

Der niedrigste Ausschlag der Stromgestehungskosten ergibt sich bei einem anteiligen Verhältnis von 91% Windenergie. Daher bleiben 9% für den Ausbau von PV-Anlagen übrig. Daraus ergibt sich eine Windnennleistung von 549% und eine PV-Nennleistung von 114%, bezogen auf den

Durchschnittsverbrauch von 9,147 MW der Stadt. Dies bedeutet das eine installierte Leistung bei den Windenergieanlagen von 50,22 MW benötigt wird. Bei den PV-Anlagen sind es 10,43 MW.

3.3 Umwandlungsvermögen bei vorgegebenem Best-Mix

Aus dem Vergleich zwischen dem Best-Mix und dem aktuellen Mix ergibt sich folgendes Diagramm, das in Abbildung 5 dargestellt ist.

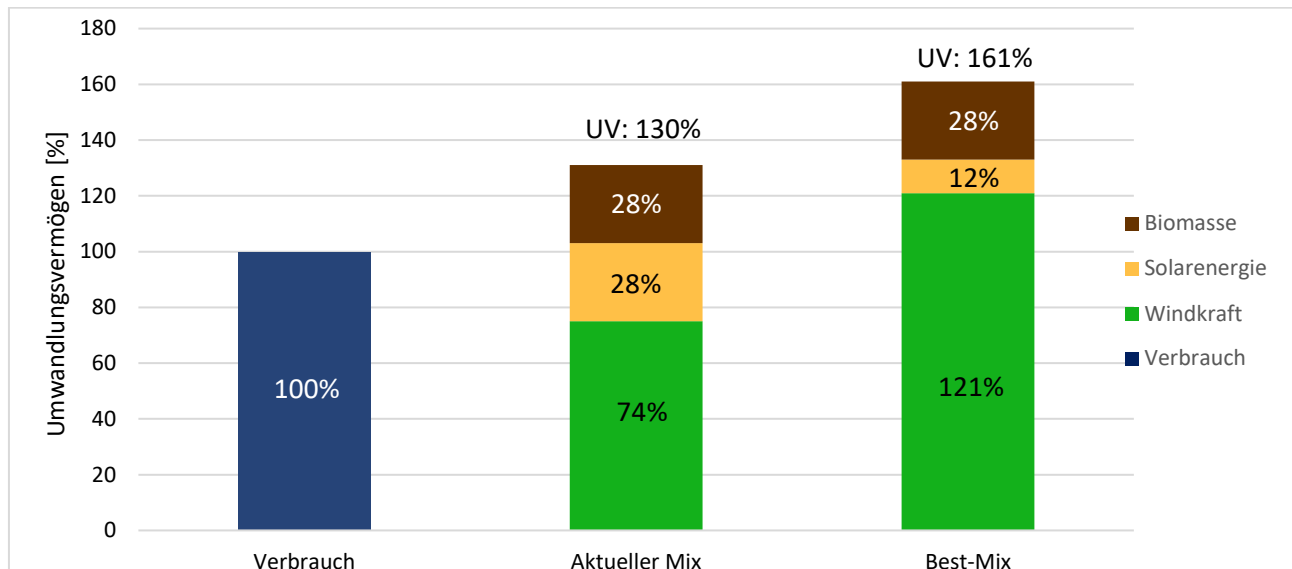


Abbildung 5: Vergleich zwischen dem aktuellen Mix und dem Best-Mix

Aus Abbildung 5 kann das prozentuale durchschnittliche Umwandlungsvermögen des aktuellen Mixes der letzten sieben Jahre entnommen werden. Der aktuelle Mix besteht aus den derzeit verbauten Anlagen in der Stadt Haßfurt. Diese Werte beruhen auf den realen Aufzeichnungsdaten der Stadt. Das aktuelle Umwandlungsvermögen von Haßfurt liegt im Durchschnitt bei 130%. Es ergibt sich zu 74% aus der Windenergie, zu 28% aus der Solarenergie und zu 28% aus den BHKWs. Berechnet werden diese Werte, indem man die durchschnittlich umgewandelte Energie der einzelnen Anlagegruppen auf den durchschnittlichen Stromverbrauch der Stadt bezieht. Dies bedeutet, dass bei einem Umwandlungsvermögen von 100% der Durchschnittsverbrauch von 9,147 MW von den Windenergieanlagen, BHKWs und den PV-Anlagen gedeckt werden kann. Dies wird durch den blauen Balken visualisiert. Berechnet man das Umwandlungsvermögen der einzelnen Anlagen und summiert dies auf, ist das Ergebnis die vorhandenen 130%.

Das bestmögliche Umwandlungsvermögen bei einem berechneten Best-Mix aus 91% Windenergie und 9% Solarenergie ergibt sich zu 161%. Dabei werden 121% durch die Windenergie, 12% durch die PV-Anlagen und 28% durch die BHKWs umgewandelt. Die Blockheizkraftwerke werden in diesem Szenario nicht weiter ausgebaut, die Bestehenden werden aber weiterhin verwendet.

Die Berechnung geschieht erneut iterativ, indem das Umwandlungsvermögen als Variable fungiert und alle Preise berücksichtigt werden. Deutlich wird dies in Abbildung 6, in der die Stromgestehungskosten für das Versorgungssystem über dem Umwandlungsvermögen der Energieanlagen aufgetragen werden.

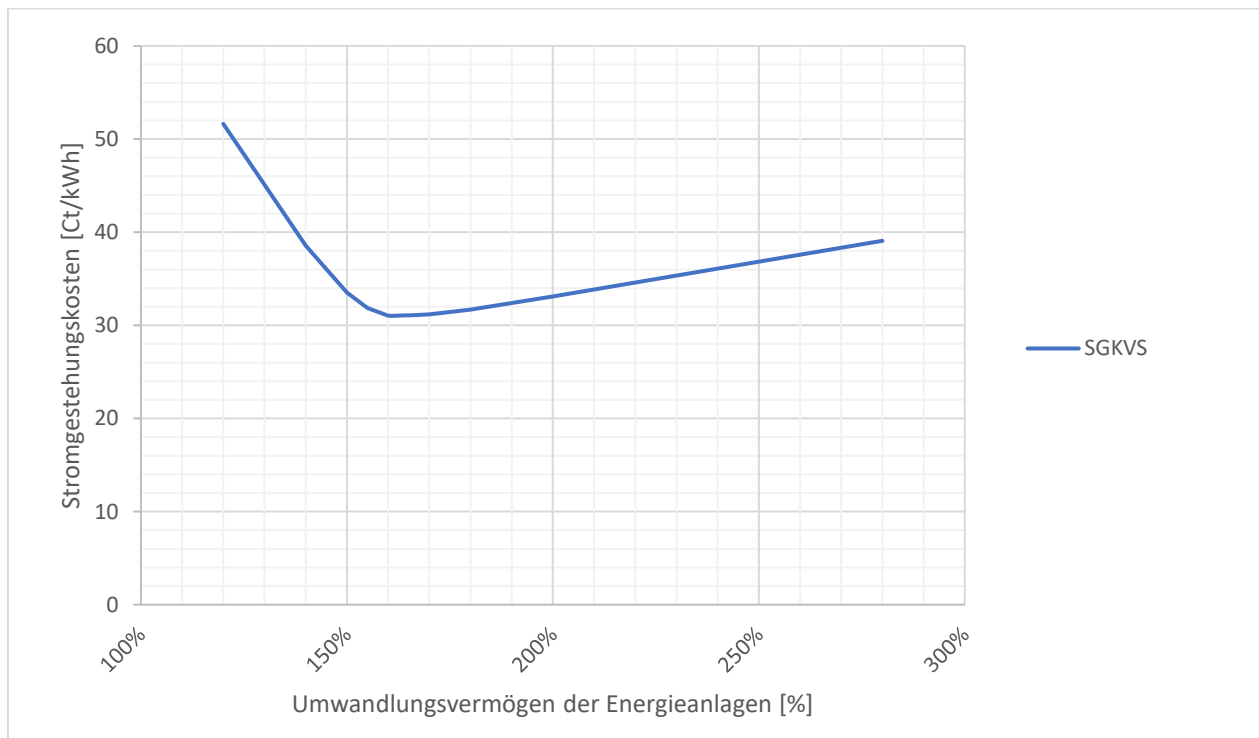


Abbildung 6: Stromgestehungskosten über dem möglichen Umwandlungsvermögen der Energieanlagen

Ein steigendes Umwandlungsvermögen ist mit dem Ausbau weiterer Anlagen verbunden. Deshalb ist es hierbei wichtig, dass benötigte Umwandlungsvermögen genau auszuloten, da hier der Gesamtpreis des Versorgungsystems rasant in die Höhe steigt. Das rührt daher, dass bei einem zu geringen Umwandlungsvermögen die Speicherkapazität enorm hoch werden müsste. Dies hätte massive Folgen für die Baupreise, da die Kapazität der größte Kostenfaktor des Speichers ist. Bei einem zu hohen Umwandlungsvermögen müssten allerdings viele neue Energieanlagen gebaut werden. Dadurch würden die Herstellkosten sowie die Betriebskosten in die Höhe getrieben werden. Beim errechneten Umwandlungsvermögen von 161%, bleiben die Stromgestehungskosten bei den zuvor berechneten 31,02 Ct/kWh.

3.4 Speicherladeleistung bei vorgegebenem Mix und Umwandlungsvermögen

Beim vorgegeben Best-Mix aus Windenergie und Sonnenenergie und der Berücksichtigung des Umwandlungsvermögens von 161% kann die optimale Speicherladeleistung ermittelt werden. In Abbildung 7 wird das Verfahren deutlich, indem die Stromgestehungskosten für das Versorgungssystem über der Speicherladeleistung aufgetragen werden. Die Stromgestehungskosten bleiben bei 31,02 Ct/kWh.

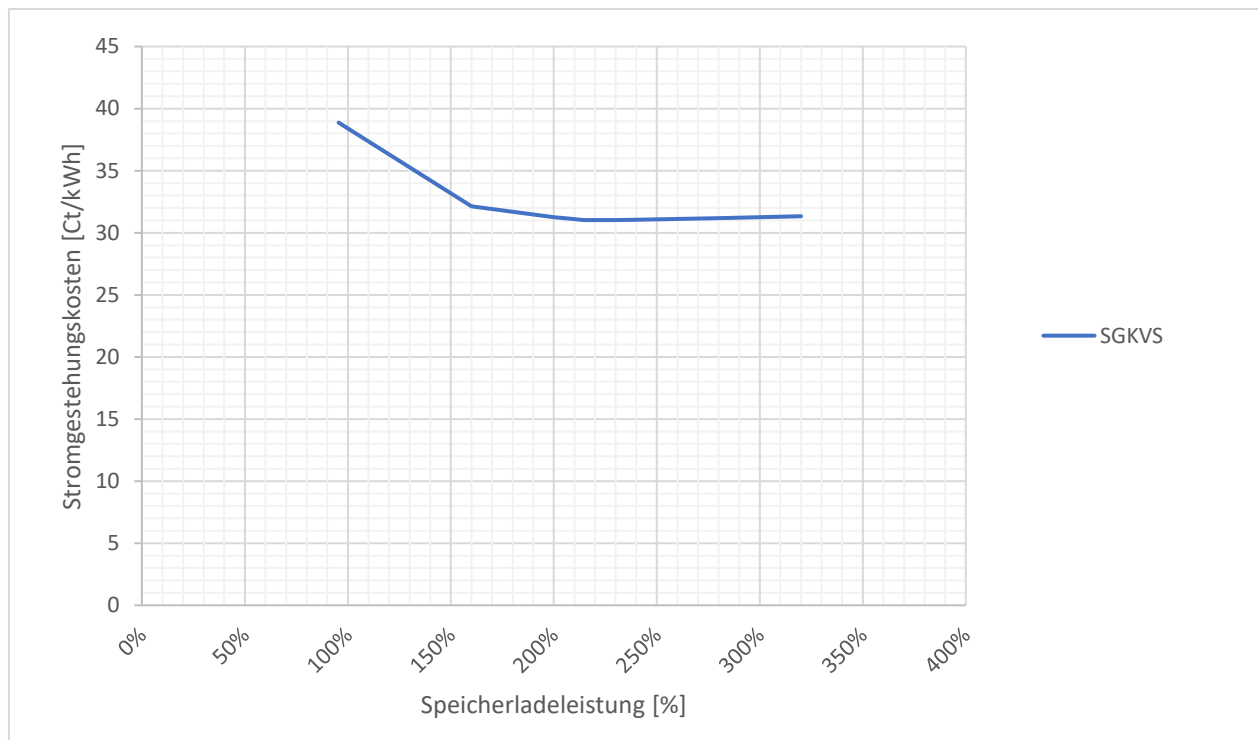


Abbildung 7: Stromgestehungskosten über der Höhe der Speicherladeleistung in Prozent

In diesem Fall wird eine Speicherladeleistung von 215% erreicht. Diese ist abhängig von der Dimensionierung der Motoren und Pumpen, die zur Ladung des Speichers benötigt werden. Die Speicherladeleistung bedeutet, dass der Speicher mit 215% des Durchschnittsverbrauchs von 9,147 MW der Stadt Haßfurt geladen werden kann. Dies entspricht etwa 19,67 MW.

$$\text{Speicherladeleistung [MW]} = \text{Durchschnittsverbrauch [MW]} * \text{SLL} = 9,147 \text{ MW} * 215\% = 19,67 \text{ MW}$$

Sollte die Umwandlung an Energie noch darüber hinaus gehen, kann der Überschuss an der Strombörse verkauft werden. Für den Export an Energie ist eine maximale Grenze von 40 MW

gesetzt, da der Transformator, der die Stadtwerke mit dem Bayernwerk verbindet, nicht mehr Leistung umsetzen kann (Aus Gespräch mit Herrn Graser, Mitarbeiter der Stadtwerke Haßfurt, 14.11.2022).

3.5 Residualleistung des Best-Mix

In Abbildung 8 ist die Residualleistungskurve für den ermittelten Best-Mix zu sehen. Die Linien sind gleich aufgetragen wie in Abbildung 2, welche die Residualleistungskurve der aktuell verbauten Anlagen wiedergibt. Es ist erkennbar, dass die Fläche der umgewandelten Energie nochmals deutlich größer geworden ist als beim aktuellen Mix. Das gibt die Möglichkeit, deutlich mehr Energie umzuwandeln, um diese mit Hilfe des Stülpmembranspeichers zu exportieren und damit zu wirtschaften. Die Fläche der Defizite dagegen ist annähernd gleichgeblieben.

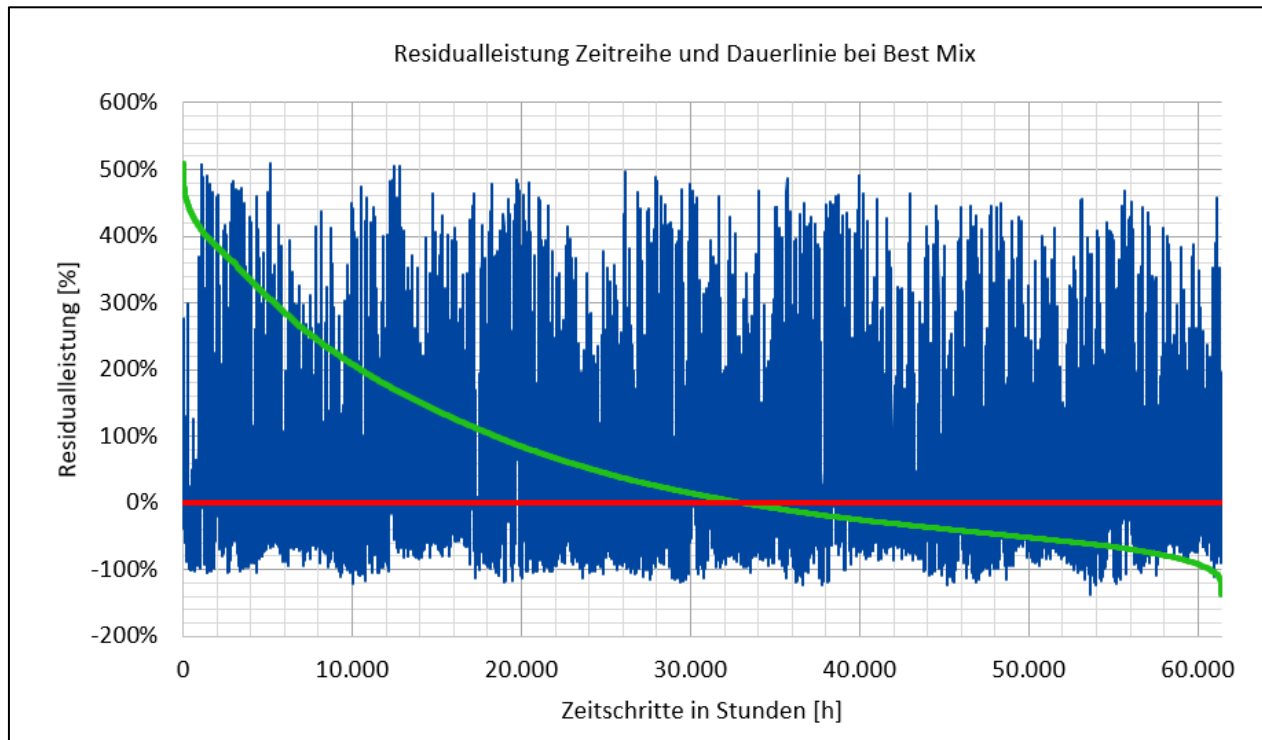


Abbildung 8: ResiduallLeistungsverlauf bei berechnetem Best-Mix

3.6 Ermittlung der Stromgestehungskosten für das Versorgungssystem

In Tabelle 3 wird detailliert aufgeführt, wie die Kosten für das gesamte Versorgungssystem im Falle des Best-Mix zustande kommen. Das Versorgungssystem besteht aus den Anlagen zur Energiegewinnung welche aus Windkraft-, Solarenergie- und Biogasanlagen bestehen. Des Weiteren werden Maschinen zur Speicherladung und -entladung benötigt und der

Stülpmembranspeicher an sich, der hier als Speicherkapazität definiert ist. Dabei werden für jede Anlage die Herstellkosten selbst und die daraus resultierenden Kapitalkosten sowie die Betriebskosten fällig. Die Kostenansätze wurden durch das Excel-Tool von Prof. Dr. Popp mit der iterativen Berechnungsmethode ermittelt.

Tabelle 3: Entstehung der Kosten des Versorgungssystems

spezifische Herstellkosten		Kostenansatz		
Wind	WHK	1.700	€/kW	85.372.775 €
Solar	SHK	800	€/kW	8.406.682 €
Biomasse und Sonstiges	GHK	3.500	€/kW	16.805.251 €
Speicherladung	SLLHK	150	€/kW	2.949.908 €
Speicherentnahme	SELHK	150	€/kW	2.084.279 €
Speichermaximalleistung	SLMHK	250	€/kW	4.916.513 €
Speicherkapazität	SKK	40	€/kWh	93.179.948 €
Versorgungssystem	VSK	6.590,00	€/kW	213.715.355 €
Kapitalkosten (Annuitäten)				
Wind	KKW	748,94	€/a	6.850.532 €
Solar	KKS	73,75	€/a	674.574 €
Biomasse und Sonstiges	KKG	147,43	€/a	1.348.497 €
Speicherladung	KKSL	20,98	€/a	191.896 €
Speicherentnahme	KKSE	14,82	€/a	135.585 €
Maximalleistungsbezogen	KKSM	34,97	€/a	319.826 €
Speicherkapazität	KKSK	662,68	€/a	6.061.489 €
Versorgungssystem	KKVS	1.703,55	€/a	15.582.400 €
spezifische Betriebskosten				
Wind	BKW	373,34	€/a	3.414.911 €
Solar	BKS	13,79	€/a	126.100 €
Biomasse und Sonstiges	BKG	459,31	€/a	4.201.313 €
Speicherladung	BKSL	4,84	€/a	44.249 €
Speicherentnahme	BKSE	3,42	€/a	31.264 €
Maximalleistungsbezogen	BKSM	8,06	€/a	73.748 €
Speicherkapazität	BKSK	152,80	€/a	1.397.699 €
Versorgungssystem	BKVS	1.015,56	€/a	9.289.284 €

Die Stromgestehungskosten ergeben sich aus den jährlichen anfallenden Kapitalkosten und Betriebskosten. Diese belaufen sich auf 31,02 Ct pro kWh und berechnen sich wie folgt:

$$\text{Jährliche Kosten} \left[\frac{\text{€}}{\text{a}} \right] = \text{Kapitalkosten} \left[\frac{\text{€}}{\text{a}} \right] + \text{Betriebskosten} \left[\frac{\text{€}}{\text{a}} \right]$$

$$\text{Jährliche Kosten} \left[\frac{\text{€}}{\text{a}} \right] = 15.582.400 \frac{\text{€}}{\text{a}} + 9.289.284 \frac{\text{€}}{\text{a}} = 24.871.684 \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

Die jährlichen Kosten zur Finanzierung des Projekts belaufen sich auf 24.871.684€. Wird dies über die Stromkosten bezahlt, ergeben sich die Stromgestehungskosten, indem man die jährlichen Kosten mit dem Durchschnittsverbrauch der Stadt pro Jahr verrechnet.

$$\text{Stromgestehungskosten} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] = \frac{\text{jährliche Kosten} [\text{€}]}{\text{Durchschnittsverbrauch pro Jahr} [\text{kWh}]}$$

$$\text{Stromgestehungskosten} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] = \frac{24.871.684 \frac{\text{€}}{\text{a}}}{9147 \text{ kW} * 8760 \frac{\text{h}}{\text{a}}} = 0,31 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 31,0 \frac{\text{Ct}}{\text{kWh}}$$

Aus Tabelle 4 wird ersichtlich, wie sich die einzelnen Kosten der Anlagen auf die Stromgestehungskosten auswirken. Die Summe dieser einzelnen Kosten ergeben die Stromgestehungskosten für das Versorgungssystem.

Tabelle 4: Stromgestehungskosten für die jeweiligen Komponenten des Versorgungssystems

	[Ct/kWh]	Stromgestehungskosten	
Wind	SGKW	12,80	Ct/kWh
Solar	SGKS	1,00	Ct/kWh
Biomasse und Sonstiges	SGKB	6,92	Ct/kWh
Speicherladung	SGKSL	0,29	Ct/kWh
Speicherentnahme	SGKSE	0,21	Ct/kWh
Maximalleistungsbezogen	SGKSM	0,49	Ct/kWh
Speicherkapazität	SGKSK	9,30	Ct/kWh
Versorgungssystem	SGKVS	31,02	Ct/kWh

4. Speicherkapazität anhand des Best-Mix

Die Speicherkapazität ist so auszulegen, dass die Stadt Haßfurt jedes Defizit in den letzten sieben Jahren überstehen hätte können. Grundlage für die Berechnung ist die Annahme, dass die Energieanlagen so ausgebaut sind, wie es der Best-Mix vorgibt. In Abbildung 9 ist zu sehen, wie die Speicherentleerung stattgefunden hätte, wenn die Stadt Haßfurt einen Speicher zur Verfügung gehabt hätte. Der gesamte Verlauf ist in Stundenschritten dargestellt und wurde mit den Daten der Stadtwerke berechnet.

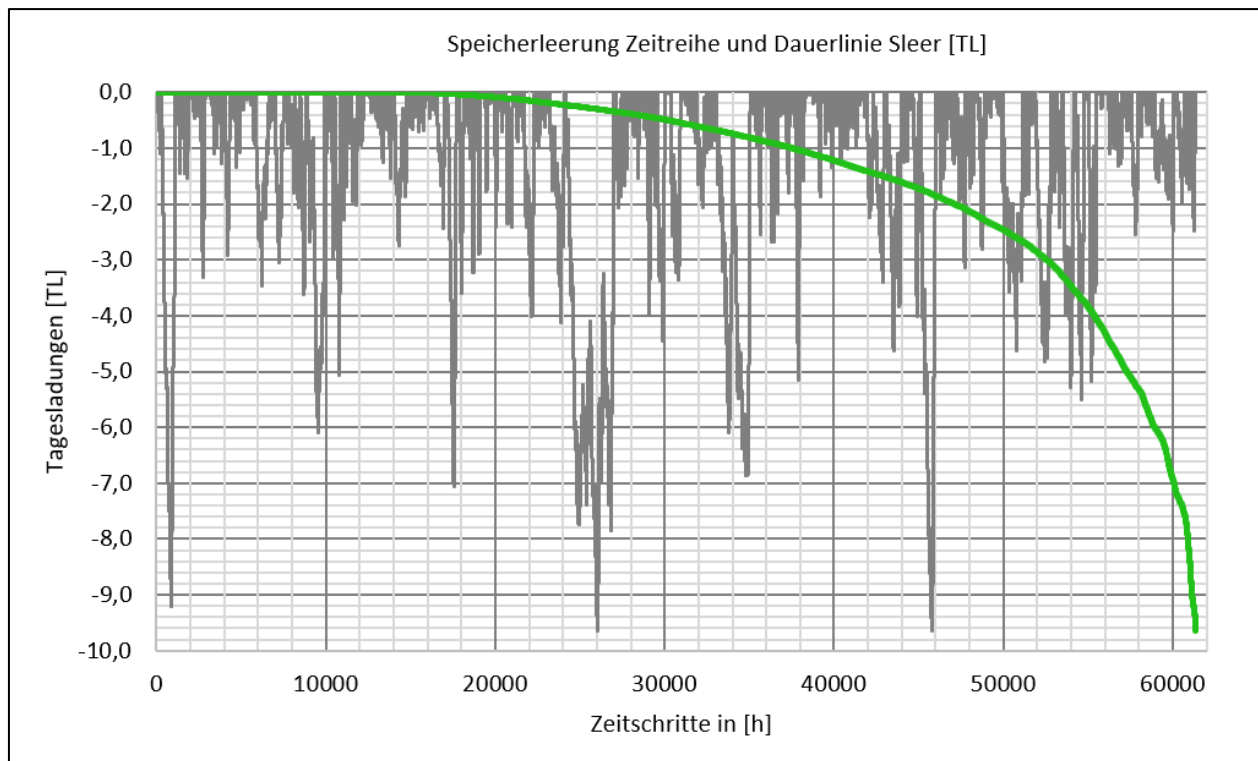


Abbildung 9: Darstellung der benötigten Speicherkapazität

Der grüne Kurvenverlauf zeigt die Dauerlinie der Speicherentladung des möglichen Speichers der Stadt auf. Diese ist wie die Dauerlinie der Residualleistung nach der Größe der Entladung geordnet. Es zeigt sich, dass die benötigte Speicherkapazität etwa 9,65 Tagesladungen entsprechen würde. Eine Tagesladung (TL) entspricht der Energiemenge, die die Stadt Haßfurt durchschnittlich an einem Tag verbrauchen würde.

$$TL [MWh] = \text{Durchschnittsverbrauch [MW]} * 24h = 9,147 \text{ MW} * 24h = 219,5 \text{ MWh}$$

Somit würde eine durchschnittliche Tagesladung (TL) der Energiemenge von etwa 219,5 MWh entsprechen. Um nun auf die benötigte Gesamtspeicherkapazität zu kommen, wird die

Energiemenge einer Tagesladung mit den benötigten Tagesladungen verrechnet. Dazu kommt die Kapazitätsreserve von 10%.

$$\text{Speicherkapazität} = \text{Tagesladung} * \text{größtes Defizit in Tagesladungen} * \text{Kapazitätsreserve}$$

$$\text{Speicherkapazität} = 9,65 \text{ TL} * 219,5 \frac{\text{MWh}}{\text{TL}} * 1,1 = 2330 \text{ MWh} = 2,33 \text{ GWh}$$

So ergibt sich eine Gesamtkapazität des Speichers von 2,33 GWh.

5. Kosten des Speichers im Falle des Best-Mix in Zahlen

Da dieses Projekt noch nie realisiert wurde können die Kosten für den Speicher nur grob abgeschätzt werden. Die Aufteilung der geschätzten Kosten für das gesamte Vorhaben wird in Abbildung 10 veranschaulicht.

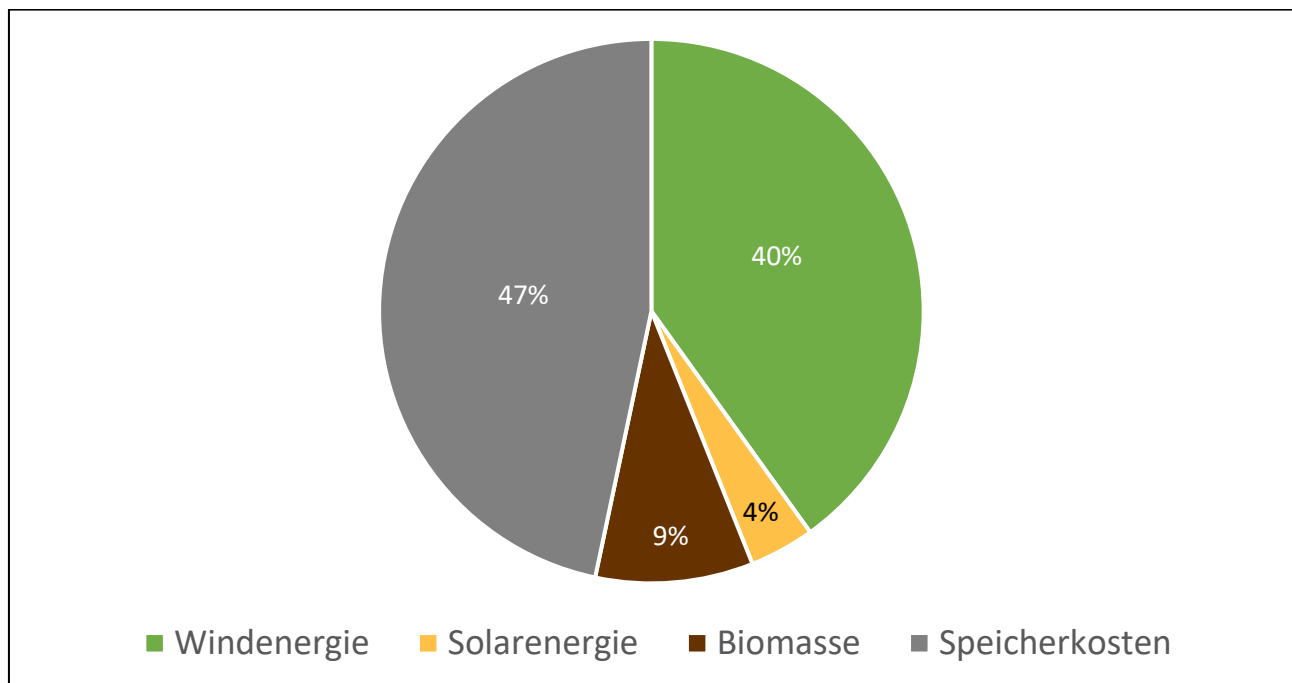


Abbildung 10: Aufteilung der Kosten nach Anlagenart

Aus Abbildung 10 wird deutlich, dass einen enormen Kostenanteil der Speicher einnimmt. Dieser wird mit ca. 115.000.000 € veranschlagt. Dies ist in erster Linie auf die hohe Speicherkapazität

zurückzuführen und den damit verbundenen Bauaufwand. Für die Speicherkapazität von 2,33 GWh ist der Speicher etwa 520 Meter tief und weist einen Durchmesser von etwa 120 Meter auf. Die tatsächlichen Kosten können von diesem Betrag allerdings erheblich abweichen, da erst in einer Machbarkeitsstudie vor Ort und in Verhandlungen mit Bauunternehmen ein wirklich realitätsgetreuer Preis entstehen kann. Dies hängt auch von den noch möglichen Technologien ab das Bauvorhaben durchzuführen, welche bis heute noch nicht Stand der Technik sind. Die Kosten für die Windanlagen, um den Best-Mix auszubauen, belaufen sich auf ca. 95.000.000 €. Das rührt daher, dass im Best-Mix 91% der Energie aus der Windkraft kommen. Für die Biomasse und die Solarenergie werden noch ca. 32.000.000 € fällig. Die Gesamtsumme des Projekts würde sich somit in erster Näherung auf etwa 240.000.000 € belaufen.

6. Überschussvermarktungsstrategie

Die Lösung, um diese Summe für den Stülpmembranspeicher attraktiv zu finanzieren und die Stromkosten für die Endverbraucher nochmals zu minimieren, liegt in der richtigen Vermarktungsstrategie. Sollten die installierten Anlagen mehr Strom umwandeln, als die Stadt verbraucht, kann die überschüssige Energie sinnvoll genutzt werden. Dabei kann die überschüssige Energie bei hohen Marktpreisen verkauft werden. Durch diese Erlöse können die Strompreiskosten für die Endverbraucher deutlich gesenkt werden. Neben der Möglichkeit die überschüssige Energie zu exportieren, ist die Alternative die Energie zu speichern. Durch die folgende Vermarktungsstrategie wird die richtige Herangehensweise festgelegt. In den nächsten Abschnitten werden die Strombörse und die Überschussvermarktungsstrategie aufgezeigt.

6.1 Die Strombörse

Die Strombörse ist die erste Anlaufstelle, wenn es sich um den Verkauf von elektrischer Energie handelt. Der Strompreis schwankt je nach Angebot und Nachfrage. Für Deutschland ist die bedeutendste Strombörse die EEX in Leipzig und die Pariser EPEX (eha, 2022). Einerseits gibt es den Terminmarkt, auf dem sich die Marktteilnehmer mit Energiemengen für mehrere Monate bis zu einem Jahr eindecken können. Auf der anderen Seite gibt es die Spotmärkte, auf denen kurzfristig lieferbarer Strom gehandelt wird. Hier wird unterschieden in den Day-Ahead Markt und dem

Intraday-Markt. (Virtuelles Kraftwerk, 2020). Die Spotmärkte sind für die Überschussvermarktungsstrategie von Bedeutung, da die Preise hier täglich schwanken.

Der Day-Ahead Markt ist so strukturiert, dass der Handel mit dem Strom am nächsten Tag stattfindet. Die Gebote für die Energie müssen in Deutschland und Österreich bis 12:00 Uhr mittags abgegeben werden. Der Marktpreis wird dann für den Folgetag in Stundenschritten von der EPEX ausgerechnet (Linnemann, 2021, S. 135 f.). Der Intraday-Markt findet rund um die Uhr statt. Hier können sehr kurzfristige Stromkapazitäten gehandelt werden. Für den Verkauf von erneuerbarer Energie ist allerdings der Day-Ahead Markt von größerer Bedeutung, da das Wettergeschehen einen Tag vor der Lieferung meist gut abgeschätzt werden kann (Linnemann, 2021, S.136).

6.2 Vermarktungsstrategie

Um einen Überblick zu bekommen, wie die Strategie für die Überschussvermarktung vollzogen werden könnte, ist in Tabelle 5 ein Übersichtsplan abgebildet.

Tabelle 5: Vermarktungsstrategie während einer Überschussphase

Überschussphase				
Tiefpreisphase		Hochpreisphase		
Existieren speicherbare Überschüsse?		Wird Menge zur Defizitüberbrückung benötigt?		
Ja	Nein	Ja	Nein	
Überschüsse nach Möglichkeit speichern	Export sinnvoll		Speicher laden, nach Möglichkeit Rest exportieren	
	Ja	Nein		Speicher leeren und zusätzlich exportieren
	Exportieren	Abregeln		

Bei einer Überschussphase, was einem positiven Wert der Residualleistung entspricht, ist in erster Linie darauf zu achten, wie die Strompreislage am Markt ist. Sollte während dieser Überschussphase eine Tiefpreisphase sein, ist darauf zu achten, ob es im Speicher noch Kapazitäten gibt. Ist dies der Fall, wird der Strom mittels der Motoren und Pumpen in potenzielle Energie umgewandelt, um ihn zu einem anderen Zeitpunkt wieder abzurufen. Ist der Speicher allerdings vollgeladen und es besteht keine Möglichkeit die speicherbaren Überschüsse zu sichern, ist die Abwägung eines Exports durchzuführen. Sollte der Strompreis einen geringen Erlös abgeben, ist ein

Verkauf dennoch sinnvoll. Es gibt jedoch auch den Fall, dass am Strommarkt negative Strompreise herrschen. Diese können am Day-Ahead und Intraday-Markt entstehen. Wenn man während einer negativen Strompreisphase Energie ins Netz einspeist, muss dafür bezahlt werden. Dies war beispielweise während der COVID-19 Pandemie im Jahr 2020 der Fall oder ist ein Phänomen, welches häufig während aneinanderhängender Feiertage auftritt (next-Kraftwerk, n. d.). In diesem Fall ist es sinnvoller, die Anlagen abzuregeln und keine weitere Energie umzuwandeln. Auf der anderen Seite gibt es die Hochpreisphase. Die Strompreise sind während dieser Phase besonders hoch. Dadurch ist der Erlös, der mit dem Verkauf der Energie einhergeht, ebenfalls hoch. Es ist wichtig während dieser Phase darauf zu achten, ob ein Defizit zu erwarten ist. Die Energieanlagen sind trotz Speicher abhängig von der Wetterlage. Sollte ein energetisch schlechtes Wetter vorliegen ist zu beachten, ob der benötigte Strom aus dem Speicher zur Defizitüberbrückung gebraucht wird. Sollte dies der Fall sein, ist ein Export der gespeicherten Energie nicht sinnvoll. Es könnte der Fall eintreten, dass die Energie dadurch möglicherweise nicht ausreicht, um das Defizit zu überbrücken. Die Stadtwerke haben dann keine andere Wahl, als die Energie teuer von einem externen Energieversorgungsunternehmen zu beziehen, was in jedem Fall vermieden werden soll. Daher ist es die richtige Strategie den Speicher zu laden. Sollte die Residualleistung allerdings die 215% der maximalen Speicherladeleistung überschreiten, können die Überschüsse darüber hinaus trotzdem vermarktet werden. Ist kein Defizit zu erwarten, kann die Energie, welche von den Anlagen in Strom umgewandelt wird, direkt verkauft werden. Zusätzlich kann der Speicher entladen werden, um noch mehr Strom ins Netz einzuspeisen und einen noch höheren Gewinn zu erzielen.

6.3 Situation mit den tatsächlichen Strompreisen für die Jahre 2015 bis 2022

Bei der Anwendung dieser Bewirtschaftungsstrategie hat das Berechnungsprogramm von Prof. Dr. Popp einen möglichen Jahreserlös aus dem Export des Stroms von ca. 7 Millionen Euro ausgerechnet. Zur Berechnung dieser Werte wurden die Realdaten der Stadt verwendet. Außerdem wurden die realen Strompreise am Strommarkt der letzten sieben Jahre herangezogen. Der durchschnittliche Strompreis am Markt in dieser Zeit betrug in etwa 66,80€ pro MWh (FfE,2023). Somit entsteht ein realitätsnahes Ergebnis, wenn die Stadt einen Speicher gehabt und die Vermarktungsstrategie angewendet hätte. Mit dem Erlös aus der Vermarktung des Stroms, hätte der Strompreis um etwa 8,70 Ct pro kWh für die Endverbraucher gesenkt werden können. Wenn dies von den Stromgestehungskosten abgezogen wird, kommen Restkosten von ca. 22,30 Ct pro kWh auf die Kunden zu.

6.4 Situation mit aktuellen Strompreisen bezogen auf die Jahre 2015 bis 2022

Aufgrund der Energiekrise, ausgelöst durch den Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine, sind die Energiepreise in jedem Sektor explosionsartig nach oben geschossen. Es betrifft jegliche fossile Energieträger (Will, 2022). Daher kann in einem Gedankenexperiment der durchschnittliche Strompreis um ein Vielfaches angehoben werden. In der folgenden Berechnung wurde ein durchschnittlicher Strompreis von 200€ pro MWh angenommen. 2022 lag dieser bei 235,4€ pro MWh (Ffe, 2023), daher ist diese Annahme eine gute Näherung. In diesem Fall hätte der Stülpmembranspeicher zwei erhebliche Vorteile. Erstens wäre die Versorgung der Stadt trotz steigender Energiepreise unabhängig von den Preisen fossiler Brennstoffe. Zweitens würde sich der Anstieg der Energiepreise äußerst positiv auf den Export der umgewandelten Energie aus den Anlagen auswirken. Um erste Anhaltspunkte über zukünftige mögliche Erlöse zu erhalten, wurde die oben beschriebene Strategie noch einmal auf die sieben letzten Jahre angewendet. In diesem Fall kommt ein möglicher Gewinn aus den Verkäufen des Stroms von ungefähr 13,2 Millionen Euro zustande. In diesem Szenario könnten die Strompreise um ca. 16,50 Ct pro kWh gesenkt werden. Somit entstehen Kosten von etwa 14,50 Ct pro kWh für die Endverbraucher.

7. Zusammenfassung und Ausblick in die Zukunft

Anhand der vorliegenden Projektarbeit wurde eine Möglichkeit vorgestellt, mittels eines ausreichend dimensionierten Speichers eine Kleinstadt zu versorgen. Zusätzlich wird eine attraktive Finanzierungsmöglichkeit anhand einer Strategie zur Überschussvermarktung bereitgestellt. Mit der richtigen Strategie kann der Strompreis für den Endverbraucher deutlich billiger angeboten werden als bei den meisten Stromanbietern, da keine Abhängigkeit mehr zu den Preisen der fossilen Brennstoffe besteht. Dort beträgt der durchschnittliche Strompreis seit dem Ukraine Konflikt in Deutschland etwa 33,50 Ct/kWh. (Statistisches Bundesamt, 2023). Diese Herangehensweise der Energieversorgung kommt daher nicht nur den Bürgern der Stadt zugute, sondern trägt auch einen erheblichen Beitrag zum Klimaschutz bei. Die Stadt kann sich zu 100% aus regenerativen Energien versorgen. Allerdings ist dabei zu erwähnen, dass ein solches Bauwerk noch nicht realisiert wurde. Die richtige Herangehensweise wäre daher, zunächst kleinere Projekte in die Realität umzusetzen. Wenn sich diese kleineren Speicher im Betrieb bewähren, kann die Speichergröße weiter ansteigen, um dann auch kleinere Städte wie beispielsweise Haßfurt zu versorgen. Dies ist ein wichtiger Schritt in der Energiewende. Dadurch können regenerative Ressourcen auf ein gleiches Level in den Punkten Verfügbarkeit und Sicherheit wie die fossilen Brennstoffe gebracht werden.

Literaturverzeichnis

- ARD-Alpha*. (15. November 2022). Abgerufen am 23. Februar 2023 von <https://www.ardalpha.de/wissen/umwelt/nachhaltigkeit/weltbevoelkerung-bevoelkerungswachstum-menschen-erde-welt-110.html>
- Der Standard*. (25. Oktober 2020). Abgerufen am 23. Februar 2023 von <https://www.derstandard.de/story/2000121037641/menschheit-verbrauchte-seit-1950-mehr-energie-als-in-den-12>
- Doll, J. (2023). *Auslegung einer regenerativen Stromversorgung inklusive eines Stülpmembranspeichers anhand der Stadt Haßfurt*. Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Nürnberg. Von urn:nbn:de:bvb:92-opus4-9811 abgerufen
- eha*. (11. November 2022). Abgerufen am 21. Februar 2023 von <https://www.eha.net/blog/details/stromhandel-deutschland.html>
- FfE*. (20. Januar 2023). Von [https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/deutsche-strompreise-an-der-boerse-epex-spot-im-jahr-2022/#:~:text=Das%20deutsche%20Strompreisniveau%20im%20Jahr,\)](https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/deutsche-strompreise-an-der-boerse-epex-spot-im-jahr-2022/#:~:text=Das%20deutsche%20Strompreisniveau%20im%20Jahr,))%20von%20235%20%E2%82%AC%2FMWh. abgerufen
- Gonschor, A. (28. Dezember 2022). *wegatech*. Abgerufen am 16. Februar 2023 von <https://www.wegatech.de/ratgeber/stromgestehungskosten/#:~:text=Wie%20setzen%20sich%20die%20Stromgestehungskosten,Stromertrag%20w%C3%A4hrend%20dieser%20Laufzeit%20dividiert>.
- Linnemann, M. (2021). *Energiewirtschaft für (Quer-)Einsteiger*. Wiesbaden: Springer Verlag.
- next-Kraftwerk*. (kein Datum). Abgerufen am 17. Februar 2023 von <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/negative-strompreise>
- Popp, M. (2010). *Speicherbedarf bei einer Stromversorgung mit erneuerbaren Energien*. Wunsiedel: Springer Verlag.
- Popp, M. (22. Februar 2014). *Stülpmembranspeicher*. Abgerufen am 29. November 2022 von <http://www.poppware.de/Stuelpmembranspeicher/index.htm>
- Quaschnig, V. (2022). *Regenerative Energiesysteme*. München: Carl Hanser Verlag München.
- Sönmez, H. (2023). *Aufbau eines regenerativen Wärmenetzes und Wärmenetzplanung für die Stadt Haßfurt und dessen Neubaugebiet*. Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Nürnberg. Von urn:nbn:de:bvb:92-opus4-9784 abgerufen
- Stadtwerke Haßfurt*. (2021). Abgerufen am 01. Dezember 2022 von <https://www.stwhas.de/>
- Statistisches Bundesamt. (15. Februar 2023). *Strompreise für Haushalte*. Abgerufen am 15. Februar 2023 von <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=61243-0001&language=de#abreadcrumb>

Steiner, T. (2023). *Herstellung des Stülpmembranspeichers und Auswertung der Solarkollektoren der Stadt Haßfurt*. Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, Nürnberg. Von urn:nbn:de:bvb:92-opus4-9803 abgerufen

Virtuelles Kraftwerk. (08. Juni 2020). Abgerufen am 21. Februar 2023 von <https://www.interconnector.de/energieblog/stromhandel-so-funktioniert-stromverkauf-an-der-boerse/#:~:text=Strom%20kann%20auf%20verschiedene%20Weise,Spotmarkt%20oder%20eine m%20Terminmarkt%20statt>.

Will, J. (18. April 2022). *Futura*. Abgerufen am 15. Februar 2023 von https://www.futura-sciences.com/de/wie-krieg-ukraine-versorgung-mit-energie-metallen-rohstoffen-auswirkt_9266/