

Projektarbeit Energietechnik

Technologieüberblick von Power-to-Gas-Systemen
und Versorgungsanalyse Max Bögl Sengenthal

Autor: Oliver Hemmeter
Matr.Nr.: 3241707
E-mail: hemmeterol77177@th-nuernberg.de

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp
matthias.popp@th-nuernberg.de

Datum: 30.06.2022
Ort: Nürnberg

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, alle benutzten Quellen und Hilfsmittel angegeben sowie wörtliche und sinngemäße Zitate gekennzeichnet habe.

Nürnberg, 30.06.2022

Oliver Hemmeter

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
1. Einleitung	8
2. Wirtschaftlichkeit von Power-to-Gas-Anlagen	9
2.1. Funktionsweise P2G2P-Konzept.....	9
2.2. Wasserstofferzeugung PEM-Elektrolyseur.....	10
2.3. Analyse PEM-Elektrolyseur.....	11
2.4. Speicherung und Transport des erzeugten Wasserstoffs	12
2.5. Nutzung des Wasserstoffs zur Rückverstromung	13
2.6. Power-to-Gas Wirkungsgradkette	15
2.7. Investitionskosten der Power-to-Gas-Anlage	17
2.8. Realisierte Power-to-Gas-Anlage.....	18
2.9. Entwicklungsmöglichkeiten Power-to-Gas	20
3. Versorgungsanalyse.....	21
3.1. Problemstellung Max Bögl.....	21
3.2. Biomasse-Dampfkraftwerk	22
3.3. Photovoltaik	22
3.4. Windkraft	23
3.5. Batterie	24
3.6. Verbrauch	24
3.7. Strommarktpreise	25
3.8. Bewirtschaftungsstrategie	26
3.9. Stromgestehungskosten.....	27
3.10. Optimums-Suche.....	28
3.10.1. Minimum Grob	29
3.10.2. Minimum Mittel	32
3.10.3. Minimum Fein	34
3.10.4. Minimum Sehr Fein	36

3.10.5. Sensitivitätsanalyse	38
4. Zusammenfassung	40
Literaturverzeichnis.....	41

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ursprüngliches Power-to-Gas-Konzept (Quelle: Zapf, 2017, S. 166)	10
Abbildung 2: PEM-Elektrolyse Anodenseite (links) und Kathodenseite (rechts) (Quelle: Zapf, 2017, S. 172)	11
Abbildung 3: Rechtliche Analyse zu Stromspeicher (Quelle: Zapf, 2017, S. 106)	14
Abbildung 4: Wirkungsgradketten (Quelle: Zapf, 2017, 210).....	16
Abbildung 5: Mögliche Kostenentwicklung von Power-to-Gas-Anlagen mit 200kW installierter Leistung (Quelle: Zapf, 2017, S. 213)	18
Abbildung 6: Daten zu Elektrolyseur Haßfurt (Quelle: DENA, o. J.).....	19
Abbildung 7: Silyzer 300 Elektrolyseur (Quelle: Siemens, 2018)	20
Abbildung 8: PV-Auslastung (Quelle: Patrick Scholz, S.12)	23
Abbildung 9: Windleistung (Quelle: Patrick Scholz, S.12)	24
Abbildung 10: Verbrauchsleistung (Quelle: Patrick Scholz, S.12).....	25
Abbildung 11: Strommarktpreis	26
Abbildung 12: Jahresbenutzungsgrenze	27
Abbildung 13: Minimum Grob	31
Abbildung 14: Minimum Grob Fortführung	32
Abbildung 15: Minimum Mittel.....	33
Abbildung 16: Minimum Mittel Fortführung.....	34
Abbildung 17: Minimum Fein	35
Abbildung 18: Minimum Fein Fortführung	36
Abbildung 19: Minimum Sehr Fein	37
Abbildung 20: Minimum Sehr Fein Fortführung.....	38
Abbildung 21: Sensitivitätsanalyse Abweichungen	39
Abbildung 22: Sensitivitätsanalyse Abweichungen Fortführung.....	39

Abbildung 23: Sensitivitätsanalyse in Diagrammform 39

Abkürzungsverzeichnis

A	Ampere
AEL	Akalischer Elektrolyseur
cm ²	Quadratcentimeter
EEG	Erneuerbare Energien
GWh	Gigawattstunde
h	Stunde
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
MEA	Membrane Electrode Assembly
MW	Megawatt
Nm ³	Normkubikmeter
P2G2P	Power-to-Gas-to-Power
PEM	Polyelektrolytmembran
PV	Photovoltaik
SPE	Solid Polymer Electrolyte

1. Einleitung

Damit die Herausforderung der Energiewende und das Lösen von rein konservativen Energieträgern hin zu regenerativen Energien angegangen werden kann, müssen innovative Methoden zur Energieversorgung entwickelt werden. Einer solchen Herausforderung stellt sich das Bauunternehmen Max Bögl. Bisher wird mit Hilfe einer Diversifizierung in der Energieerzeugung eine möglichst breit aufgestellte Energieversorgung ihres Industriestandortes „Sengenthal“ gewährleistet. So will sich das Unternehmen vom unvorhersehbaren Energiemarkt unabhängig machen und für Schwankungen im Energiebedarf optimal gerüstet sein. Neben der Selbstversorgung steht auch der umwelttechnische Aspekt im Vordergrund. Für eine emissionsarme Energieerzeugung müssen erneuerbare und nachhaltige Methoden zur Energiegewinnung entwickelt werden. Dadurch kann Umwelt und Klima geschont werden. Deshalb setzt Max Bögl zusätzlich auf die Verwendung von Photovoltaik-, Windkraft- und Biomassedampfanlagen. Zudem kommt auch die Speicherung von Elektrizität mit Hilfe von Batteriesystemen zum Einsatz.

Im Rahmen dieser Projektarbeit soll nun analysiert werden, ob sich eine Investition in weitere regenerative Energieerzeuger lohnt. In dieser Arbeit wird dafür das Konzept von Power-to-Gas und der Rückverstromung (P2G2P-Anlage) aufgegriffen. Funktionsweise und Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage müssen im Konsens mit der Erwartungshaltung an eine rentable Energienutzung zur Selbstversorgung des Industriestandortes „Sengenthal“ der Firma Max Bögl stehen.

2. Wirtschaftlichkeit von Power-to-Gas-Anlagen

Im folgenden Kapitel wird die Funktionsweise von Elektrolyseuren und Power-to-Gas-Systemen nach aktuellem Stand der Technik erklärt. Darüber hinaus wird hier auch auf die Wirtschaftlichkeit und Investitionskosten eingegangen.

2.1. Funktionsweise P2G2P-Konzept

In Elektrolyseuren werden Gase wie Methan oder Wasserstoff aus dem elektrochemischen Prozess der Elektrolyse gewonnen. Diese Methode bietet den Vorteil, große Mengen energiereicher Gase speichern zu können. Speicher können die Gase in verschiedenen Aggregatzuständen aufnehmen und so die Energie für einen späteren Bedarf verwahren. Bei Bedarf kann das erzeugte Gas dann direkt für einen Wärmeprozess und zur Stromerzeugung in Gaskraft- oder Blockheizkraftwerken genutzt werden. Eine weitere Möglichkeit bietet die Verteilung des synthetisch erzeugten Gases über das Gasnetz zu anderen Verbrauchern. (Zapf, 2017, S. 166) (Vgl. Abb. 1)

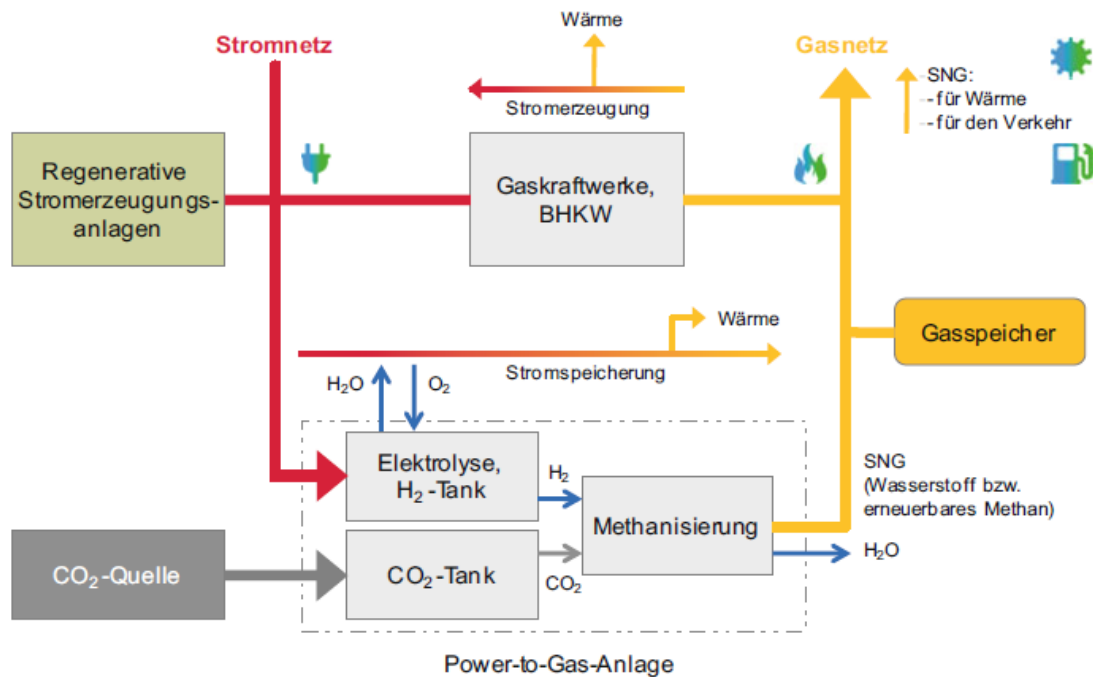


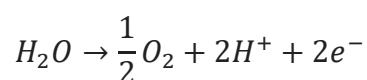
Abbildung 1: Ursprüngliches Power-to-Gas-Konzept
(Quelle: Zapf, 2017, S. 166)

2.2. Wasserstoffherzeugung PEM-Elektrolyseur

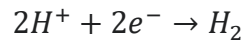
Elektrolyseure werden nach verschiedenen Funktionsweisen aufgeteilt. Bewährte Elektrolyseure zur Wasserstoffherzeugung sind alkalische Elektrolyseure (AEL), Hochtemperaturelektrolyseure und Membranelektrolyseure (PEM-Elektrolyseur). (Zapf, 2017, S. 171)

Im Nachfolgenden wird auf die PEM-Elektrolyse näher eingegangen. Denn in kleinen Leistungsbereichen von bis zu 150 kW pro Modul eignen sich PEM-Elektrolyseure gegenüber AEL deutlich besser. (NOW-GmbH, 2010, S.13)

In der PEM-Elektrolysezelle wird Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff-Ionen zerlegt. Wasser wird anodenseitig, also an positiv geladener Elektrode, zugeführt und bei angelegter Spannung in Wasserstoff-Ionen und in Sauerstoffmoleküle gespalten.



Dabei wird der Sauerstoff auf der Anodenseite abgeführt. Die Wasserstoffionen wandern durch eine feste Polymermembran (SPE), welche das Elektrolyt darstellt, zur Kathodenseite. Auf der Kathodenseite, der negativ geladenen Elektrode, bildet sich mit Hilfe von Energiezufuhr das zweiatomige Molekül Wasserstoff.



Anode, Kathode und Elektrolyt bilden zusammen die Membran-Elektroden-Einheit (MEA). Umschlossen wird die Anordnung von Bipolarplatten, welche den Transport von Wasser und Gasen über Kanäle regelt (Vgl. Abb. 2). (Zapf, 2017, S. 173)

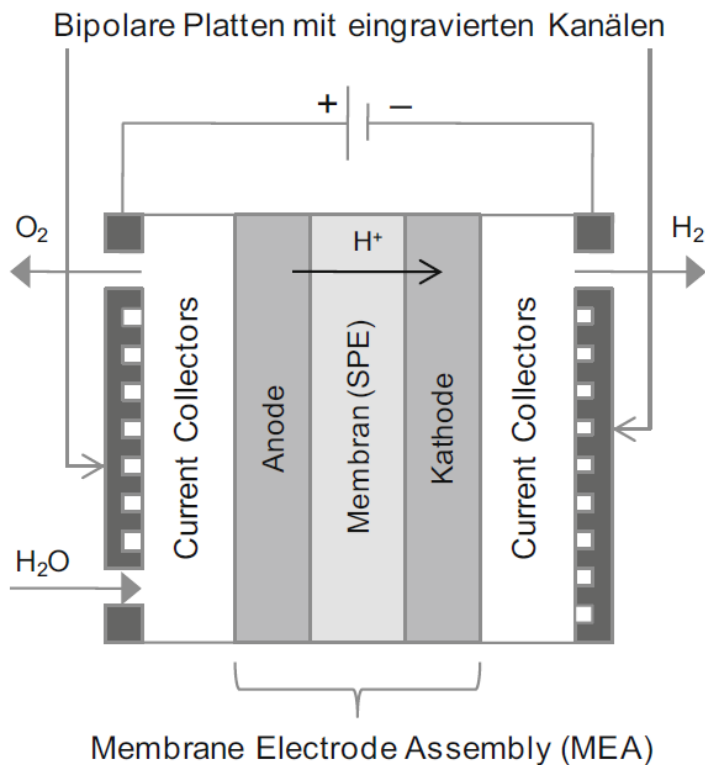


Abbildung 2: PEM-Elektrolyse Anodenseite (links) und Kathodenseite (rechts)
(Quelle: Zapf, 2017, S. 172)

2.3. Analyse PEM-Elektrolyseur

Der Vorteil von PEM-Elektrolyseuren spiegelt sich vor allem im schnellen dynamischen Verhalten wider. So bietet eine elektrische

Leistungsaufnahme ohne Verzögerung ein schnelles Ansprechverhalten. Auch die hohen Leistungsdichten mit bis zu 2 A/cm^2 sprechen für den Einsatz von PEM-Elektrolyseuren. Ihr Teillastbereich übertrifft den der häufig eingesetzten AEL-Elektrolyseure bei weitem und ermöglicht auch eine bereits realisierte Überlast mit bis zu 300 %. Sie bieten also eine erhöhte Betriebsflexibilität im Vergleich zu AEL-Elektrolyseuren. (Milanzi et al., 2018, S. 7)

Der Nachteil von PEM-Elektrolyseuren schlägt sich in den Investitionskosten nieder. Laut Literatur werden die spezifischen Investitionskosten für PEM-Elektrolyseure mit 2000 - 6000 €/kW veranschlagt. Im Vergleich dazu betragen die spezifischen Investitionskosten von AEL-Elektrolyseuren nur rund 800 - 1500 €/kW. PEM-Elektrolyseure können Leistungen von maximal 160 kW realisieren. Im Vergleich zu AEL-Elektrolyseuren, welche Leistungen mit bis zu 3,4 MW realisieren können, ist dies niedrig. (Zapf, 2017, S. 175)

2.4. Speicherung und Transport des erzeugten Wasserstoffs

Die Speicherung des gewonnenen Wasserstoffs kann auf verschiedene Arten gelöst werden. Zuerst wird differenziert, welchen Aggregatzustand der zu speichernde Wasserstoff besitzt. Es kann zum einen flüssiger Wasserstoff und zum anderen gasförmiger gespeichert werden. Daneben spielt auch die Art der Speicherung eine Rolle. Im Nachfolgenden wird auf gängige Methoden für Druck- und Flüssiggasspeicherung eingegangen.

Die Druckspeicherung wird durch Behälter mit Druckniveaus bis zu 900 bar realisiert. (Eichlseder & Klell, 2008, S. 85) Besondere Anforderungen werden hierbei an Verdichter und Behältermaterial gestellt. Diese müssen gewährleisten, dass der Wasserstoff besonders rein bleibt. Denn Verunreinigungen wirken sich negativ auf den Energiegehalt des Wasserstoffs aus und können Schäden in Rohrleitungen verursachen. (EMCEL, 2018) Gasförmiger Wasserstoff wird zumeist in Tanks mit

Drücken zwischen 50 und 80 bar gespeichert oder in unterirdischen Salzkavernen mit Drücken über 100 bar. (Zapf, 2017, S.174)

Flüssiggasspeicher haben den Vorteil, Wasserstoff mit höherer Energiedichte zu speichern. Nach Verflüssigen des Wasserstoffs wird eine um bis zu 50% höhere Energiedichte im Vergleich zum gasförmigen Wasserstoff erreicht. Nachteil der Flüssiggasspeicherung ist jedoch die Anforderung an den Verflüssigungsprozess und die Speicherung. Denn Wasserstoff verflüssigt sich erst ab einer Temperatur unter -240 °C . Aufgrund der niedrigen Temperatur müssen Flüssiggasspeicher eine besonders hohe Isolierfähigkeit besitzen. (Eichlseder & Klell, 2008, S. 85)

Die Verteilung des Wasserstoffs erfolgt vor und nach der Speicherung über Pipelines. Die verschiedenen Investitionskosten zum Transport von gasförmigem und flüssigem Wasserstoff verdeutlicht ein Beispiel aus einem Offshore Windpark. So steigern sich die Investitionskosten von flüssigem Wasserstoff im Vergleich zum gasförmigen um das 1,5-fache. Das liegt vor allem an den hohen Kosten zur Verflüssigung, wie die nachfolgende Darstellung aufzeigt. (Eichlseder & Klell, 2008, S. 135)

2.5. Nutzung des Wasserstoffs zur Rückverstromung

Neben der Speicherfähigkeit des erzeugten Wasserstoffs kann dieser in einer P2G2P-Anlage direkt genutzt werden. Über Pipelines wird der Wasserstoff zu Gas- oder Blockheizkraftwerken transportiert und dann über Verbrennung in Wärme umgewandelt. Gas- und Dampfturbinen können in den jeweiligen Gas- und Blockheizkraftwerke an Generatoren gekoppelt werden, über die Strom ins Netz gespeist wird. Dieser Schritt wird auch Rückverstromung genannt und der Wasserstoff dient hierbei als Stromspeicher. Ein Vorteil der Rückverstromung ist, dass unter bestimmten Umständen Abgaben wie Netzentgelte, EEG-Umlage und Stromsteuer entfallen können (Vgl. Abb. 3). (Zapf, 2017, S.105)

	PtG (Nutzung eines Gasnetzes)
Befreiung von der EEG Umlage für Strombezug	(+) aber nur bei Rückverstromung und Wiedereinspeisung, ggf. Eigenversorgungsprivileg
Verringerung der EEG-Umlage für Strombezug	(-) außer bei Eigenversorgungsprivileg
Befreiung Netzentgelte für Strombezug	(+) ^a 20 Jahre lang, für ab 2009 neu errichtete Anlagen + Inbetriebnahme zwischen 08/2011 und 07/2026
Verringerung Netzentgelte für Strombezug	(+) um maximal 80 %, wenn netzdienliches Nutzungsverhalten (atypische LV) ^c (+) um maximal 90 %, wenn mindestens 7000 h + 10 GWh pro Jahr (stromintensive LV) ^d
Befreiung Netzentgelte für Gaseinspeisung	(+)
Befreiung Netzentgelte für Gasausspeisung	(-) z. B. Rückverstromungs-BHKW
Befreiung Netzentgelte für Stromeinspeisung	(+) z. B. Rückverstromungs-BHKW
Befreiung/Verringerung KWK-Umlage für Strombezug	(+/-) strittig ^e
Befreiung/Verringerung Konzessionsabgaben für Strombezug	(+/-) strittig ^e
Befreiung Stromsteuer für Strombezug	(-) außer: reines EE-Netz/ ^f Eigenerzeugung/ ^g räumlicher Zusammenhang ^h etc.
Erläss Stromsteuer für Strombezug	(+)

^a Rechtlich nicht eindeutig geregelt ist die Behandlung von Speicherverlusten

^b § 118 Abs. 6 S. 4 EnWG

^c § 19 Abs. 2 S. 1 StromNEV

^d § 19 Abs. 2 S. 2 StromNEV

^e Umstritten, ob Bestandteil des Netzentgelts und Abhängigkeit von Netzentgeltbefreiung/-verringerung

^f § 9 Abs. 1 Nr. 1 StromStG

^g § 9 Abs. 1 Nr. 3a StromStG

^h § 9 Abs. 1 Nr. 3b StromStG

Abbildung 3: Rechtliche Analyse zu Stromspeicher (Quelle: Zapf, 2017, S. 106)

2.6. Power-to-Gas Wirkungskette

Der Gesamtwirkungsgrad einer Power-to-Gas-Anlage setzt sich aus den energieumwandelnden, energiespeichernden und energietransportierenden Komponenten zusammen. So verlieren 100 % erneuerbarer Strom über einen Transformator und Gleichrichter 5,9 % an Wirkungsgrad. Für die Elektrolyse stehen dann noch 94,1 % an Wirkungsgrad der ursprünglichen 100 % erneuerbaren Energie zur Verfügung. Im Elektrolyseur und den Nebenanlagen gehen 28,2 % Wirkungsgrad verloren. Wobei der Wirkungsgrad für den Elektrolyseur mit 70 % angenommen wird. Möchte man Teillastverhalten mitbetrachten, sollte der Wirkungsgrad für den Elektrolyseur mit 60 % angenommen werden. So kann eine durch den Teillastbetrieb entstehende Minderung in der Effizienz berücksichtigt werden. Über Verdichter, Speicher und Wasserstoff-Stichleitung geht nur knapp 1,0 % Wirkungsgrad verloren, sodass für den Transport noch 64,9 % an Wirkungsgrad der ursprünglichen eingesetzten elektrischen Energie zur Verfügung steht. Während des Transports gehen über Leckage und Permeation durch Speichermaterialien nochmal 0,8 % an Wirkungsgrad verloren. So bleiben von den ursprünglicher 100 % Energie noch 64,1 % Wirkungsgrad übrig (Vgl. Abb. 4). (Zapf, 2017, S.210)

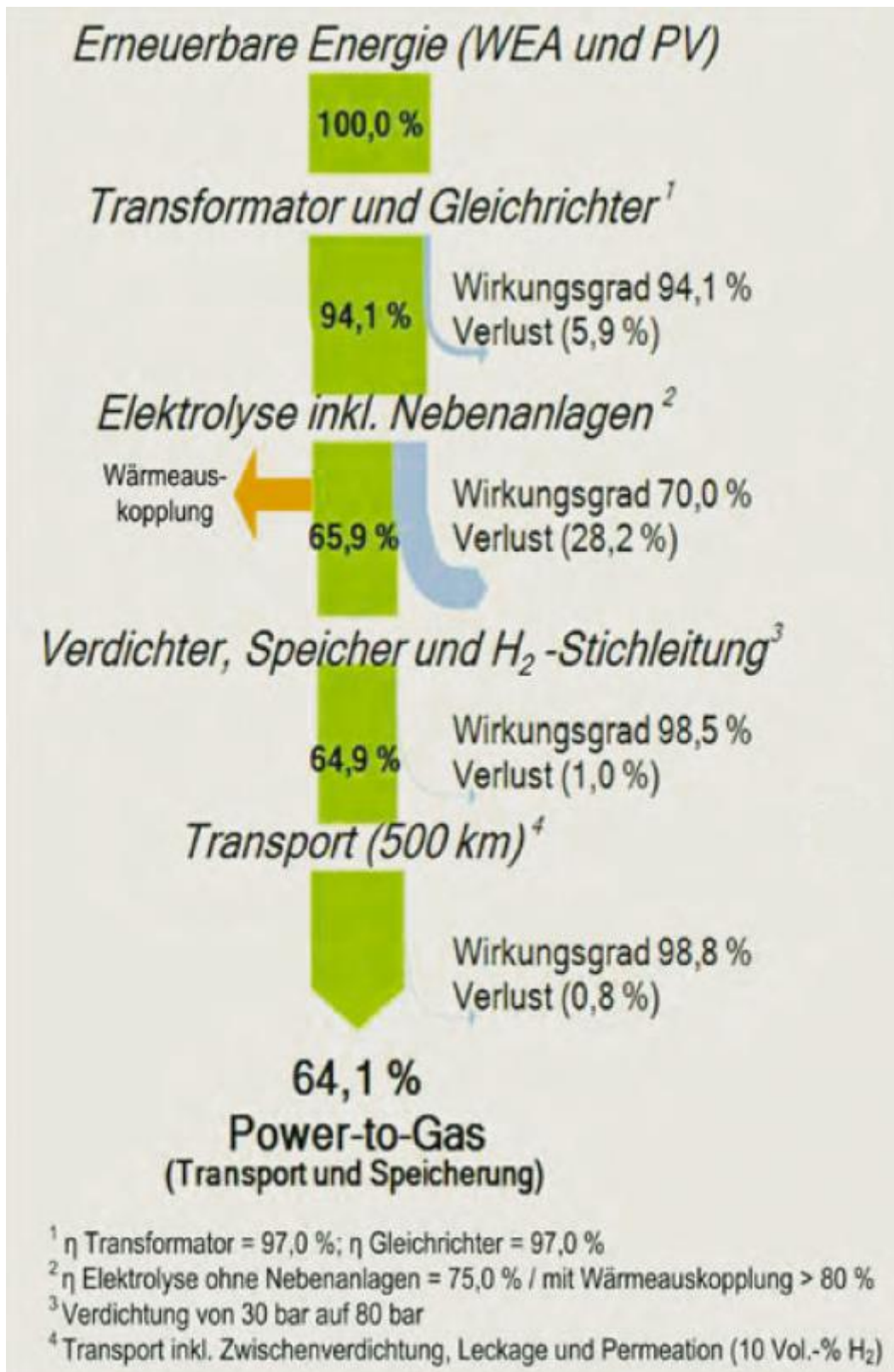


Abbildung 4: Wirkungsgradketten (Quelle: Zapf, 2017, 210)

2.7. Investitionskosten der Power-to-Gas-Anlage

Die Investitionskosten von Power-to-Gas-Anlagen werden in Kosten für Maschinen und Kosten für Verschaltungs- und Baumaßnahmen aufgeteilt.

Den Maschinenkosten werden der Elektrolyseur, die Anlagen zur Einspeisung und optionale Anlagenteile zur Verdichtung, Zwischenspeicherung und CO₂-Aufbereitung zugeordnet. Des Weiteren wird den Maschinenkosten noch die Peripherie des Elektrolyseurs zugeordnet. (Zapf, 2017, S.211) Dies können zum Beispiel Anlagen zur Versorgung mit Reaktionswasser oder zum Abtransport von Produktgasen sein. (Tjarks, 2017, S. 17)

Verbindungen und strukturelle Anlagenbestandteile wie Rohrleitungen, Transformator, Gleichrichter, Befestigungs- und Baumaterialien werden den Kosten für Verschaltungs- und Baumaßnahmen zugeschrieben. Die Richtwerte für Kosten betragen für ein 200 kW Power-to-Gas-Gesamtsystem etwa 4300 €/kW. Bei Systemen, welche PEM-Elektrolyseure verwenden, sagen Abschätzungen nur noch Kosten von etwa 2000-3000 €/kW voraus. Hierbei kann hauptsächlich eine Serienfertigung solcher Anlagen den Preis nach unten drücken. Bei höheren Anlagenleistungen nehmen auch die spezifischen Kosten ab, sodass sich bei PEM-Systemen mit 1 MW 2000 €/kW als spezifische Kosten ergeben. Werden bei PEM-Elektrolyseuren zukünftige Abschätzungen betrachtet, so können sich Kosten von 800-1350 €/kW für seriengefertigte PEM-Elektrolyseure ergeben. Nachfolgende Darstellung verdeutlicht die möglichen spezifischen Kostensenkungen über den Kostenentwicklungspfad für Power-to-Gas-Anlagen. Hierfür maßgeblich sind Technologieerrungenschaften wie Serienfertigung und eine Umstellung auf Druckelektrolyse (Vgl. Abb. 5). (Zapf, 2017, S.211)

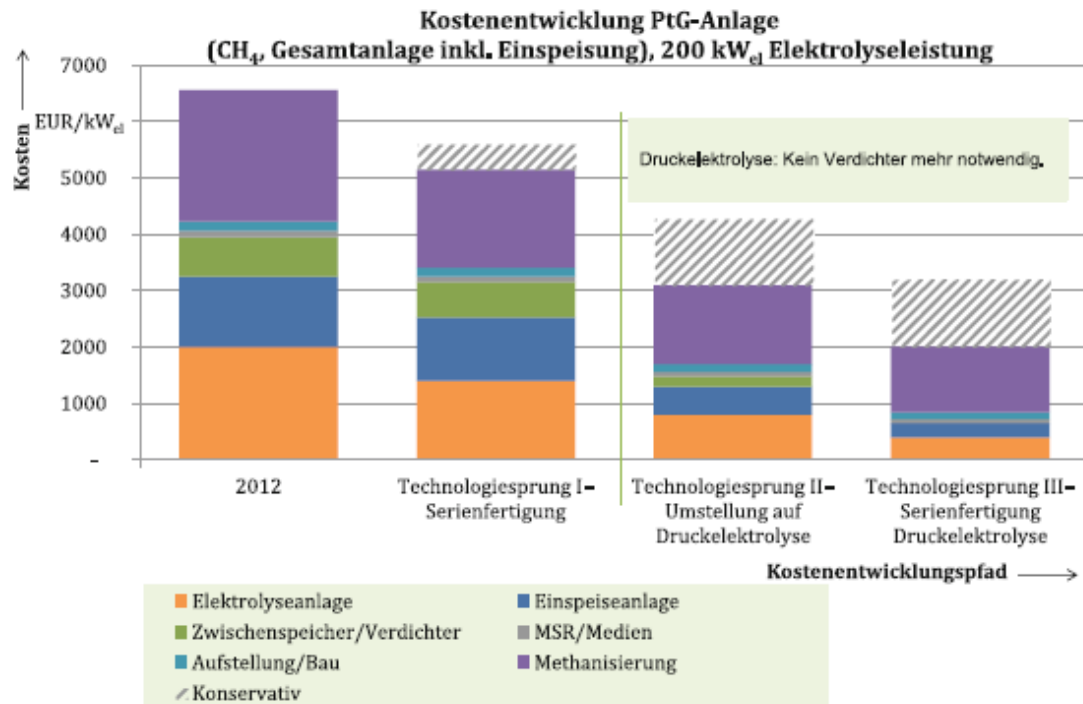


Abbildung 5: Mögliche Kostenentwicklung von Power-to-Gas-Anlagen mit 200kW installierter Leistung (Quelle: Zapf, 2017, S. 213)

2.8. Realisierte Power-to-Gas-Anlage

In Deutschland sorgen bereits über 35 Anlagen für Energieerzeugung über Power-to-Gas-Technologie. Viele der Anlagen haben noch Leistungen kleiner 1 MW. Jedoch finden sich mit dem Standort Haßfurt PEM-Elektrolyseure mit 1,25 MW elektrischer Nennleistung. Hier erzeugt der Anlagenbetreiber Windgas Haßfurt GmbH & Co. KG aktuell aus Windenergie Gas. So wird aus nachhaltiger erneuerbarer Energie Wasserstoff in Höhe von 225 Nm³/h produziert (Vgl. Abb. 6). (DENA, o. J.)

Projektname	Windgas Haßfurt
Standort	Haßfurt, Bayern
Verantwortlicher	Greenpeace Energy eG, Städtische Betriebe Haßfurt
Kategorie	Praxis
Nutzungspfad	Einspeisung ins Gasnetz
Betriebszustand	in Betrieb seit 20.10.2016
Kooperationspartner	keine
Eingangsleistung Strom	1.250 kW
H₂-Produktion	225 Nm ³ /h
CH₄-Produktion	0
CO₂-Quelle für Methanisierung	keine
Abwärmenutzung	keine
Anlagenkomponenten	PEM-Elektrolyseur
Zielstellung des Projekts	<ul style="list-style-type: none"> • Dezentrale Stromnetzstabilisierung durch Last- und Verbrauchsmanagement (Überschussstrom) • Frequenzstabilisierung im Stromnetz (Primärregelenergie) • Lokale Gasnetzeinspeisung • Absatzmarkt für Wasserstoff im Wärmebereich
Besonderheiten des Projekts	<ul style="list-style-type: none"> • Dezentralität: lokales Stromverteilnetz, lokales Gasverteilnetz • Strom-Versorgung nach Greenpeace Kriterien

Abbildung 6: Daten zu Elektrolyseur Haßfurt (Quelle: DENA, o. J.)

Weitere realisierte und geplante Projekte finden sich über die „interaktive Power-to-Gas-Karte Deutschland“ des Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW).

2.9. Entwicklungsmöglichkeiten Power-to-Gas

Die Technologieentwicklung von Power-to-Gas-Anlagen ist stark von Förderung und der damit einhergehenden Forschung abhängig. Daher plant die Bundesregierung ein Förderpaket mit insgesamt sieben Milliarden Euro für die Wasserstoffproduktion in Deutschland zu investieren (STEAG, o. J.). In den kommenden Jahren könnten sich, den Forschungsergebnissen des Fraunhofer Instituts nach, die spezifischen Stack-Kosten bei PEM Elektrolyseuren um knapp 42 % verringern (Edison, 2022). Größere Projekte befinden sich zudem bereits in Planung. So soll in Völklingen ein PEM-System mit mehr als 10 MW entstehen. Strom und Sonnenenergie sollen im industriellen Maßstab grünen Wasserstoff erzeugen. Dafür kommt ein modularer Elektrolyseur der Firma Siemens (Vgl. Abb. 7) mit 17,5 MW zum Einsatz.

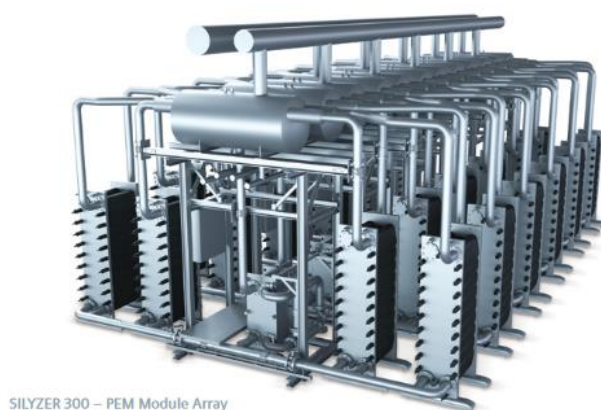


Abbildung 7: Silyzer 300 Elektrolyseur (Quelle: Siemens, 2018)

3. Versorgungsanalyse

Das Kapitel 3 dieser Arbeit betrachtet ein Projekt, welches von der Selbstversorgung eines regenerativen Werks des Unternehmens Max Bögl handelt. Hier soll die Wirtschaftlichkeit bei einem bestimmten Marktpreisszenario ermittelt werden. Diese Wirtschaftlichkeitsbetrachtung baut auf einem Berechnungstool aus dem Wintersemester 21/22 von Studierenden des 6. Semesters Energietechnik auf.

3.1. Problemstellung Max Bögl

Am Produktionsstandort in Sengenthal bei Neumarkt benötigt die Firma Max Bögl zur Fertigung hohe Mengen an Energie. Zur Deckung des jährlichen Eigenbedarfs sind in etwa 22 GWh nötig. (Scholz, 2021, S.2) Das Unternehmen will nachhaltig auf einen Ausbau der regenerativen Energieerzeugung für die Produktion setzen. Des Weiteren soll sich der Produktionsstandort nach dem Ausbau autark mit Energie versorgen und so von einem Strom-Fremdbezug lösen. Eine wichtige Prämisse für den Ausbau der regenerativen Energieerzeugung ist jedoch, dass die Eigenversorgungskosten unter denen des Fremdbezugs liegen müssen.

Bisher hat Max Bögl folgende Systeme zur regenerativen Energieerzeugung im Bestand:

- Biomasse-Dampfkraftwerk (0,34 MW)
- Photovoltaik (4,0 MW)
- Batteriespeicher (2,6 MW)
- Windkraft (9,6 MW)

Zudem soll der Einsatz einer P2G2P-Anlage als Speicher in Betrachtung gezogen werden.

Nun soll der optimale Stromgestehungspreis gefunden werden. Dabei muss der Bestand betrachtet werden. Wichtig ist hierbei zu überprüfen wie viel Energiebedarf die bisherigen Komponenten decken und inwieweit die Systeme ausgebaut werden können. Dazu wird auf die Energiespeicherung eingegangen und die Strompreise am Markt werden analysiert. Zuerst wird die Leistungsgröße der regenerativen Anlagen eingestellt und danach soll in einem Berechnungstool der günstigste Stromgestehungspreis für die Firma Max Bögl gefunden werden. Die Analyse beruht auf Daten die im Zeitraum zwischen dem 01.01.2018 und dem 31.12.2020 für Strommarktpreise und Verbrauch aufgenommen wurden. Diese Daten beziehen sich auf die Systeme zur Energieerzeugung und Energiespeicherung.

3.2. Biomasse-Dampfkraftwerk

Als Energieträger dienen dem Biomasse-Dampfkraftwerk Hackschnitzel, also zerkleinertes Holz. Da Hackschnitzel als erneuerbarer Brennstoff gilt kann, durch die Feuerung damit, Energie CO₂-neutral gewandelt werden. Zudem kann Wärme in Form von Wasser, Dampf und Luft ausgekoppelt werden. Ein Vorteil der Energieerzeugung mit Hilfe des Dampfkraftwerks ist, dass unabhängig von Wind und Sonne Energie erzeugt werden kann. So kann zum einen kontinuierlich Energie gewandelt und zum anderen die Kraftwerksleistung nach Bedarf geregelt werden.

3.3. Photovoltaik

Die Photovoltaiksysteme besitzen eine Leistung von 4,0 MW. Anhand der unteren Grafik ist jedoch erkennbar, dass die maximal mögliche Auslastung der PV-Anlagen nicht erreicht wird. Es wird erkennbar, dass die Erzeugungsleistung in den Sommermonaten höher ist und in den

Wintermonaten niedriger. Dies liegt logischerweise an der unterschiedlichen Strahlungsintensität der Sonne für den mitteleuropäischen Raum zwischen den Jahreszeiten. Auch schwankt die Strahlungsintensität zwischen Tag und Nacht. So wird erkennbar, dass die PV-Anlagen zwar ausgebaut werden können, jedoch nicht allein den Energiebedarf des Produktionsstandortes decken können, da ganzjährig produziert wird. (Vgl. Abb. 8)

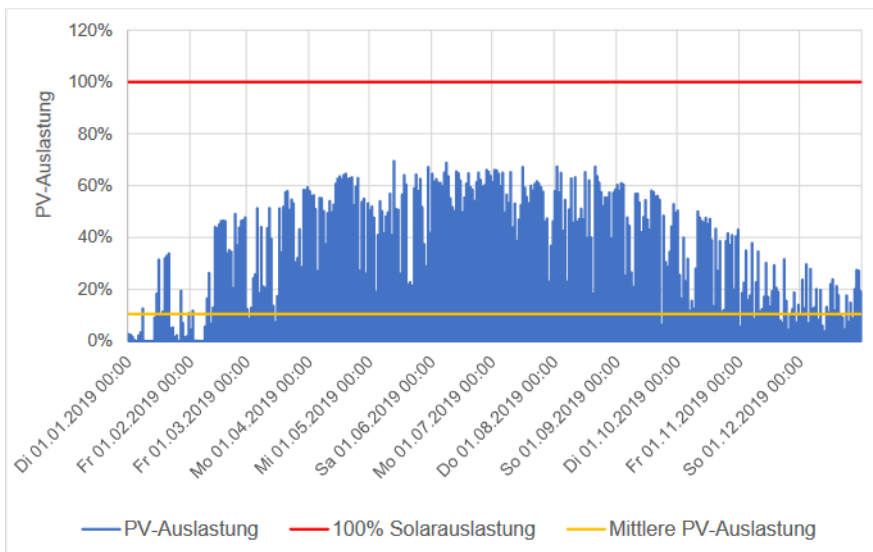


Abbildung 8: PV-Auslastung (Quelle: Patrick Scholz, S.12)

3.4. Windkraft

Die Anlagen zur Stromerzeugung durch Windenergie besitzen zusammen eine Nennleistung von 9,6 MW (Vgl. Abb. 9). Anhand der untenstehenden Grafik ist erkennbar, dass die Windkraftanlagen nicht durchgängig die maximale Nennleistung von 9,6 MW aufrechterhalten können. Auch hier ist die Energieerzeugung von äußeren Einflüssen abhängig, sodass aufgrund von Windflauten die Windkraftanlagen den Energiebedarf nicht kontinuierlich decken können. Hier ergeben sich jährliche Volllaststunden von 2387 h. Ein Ausbau der Windenergie ist momentan bei Max Bögl nicht geplant.

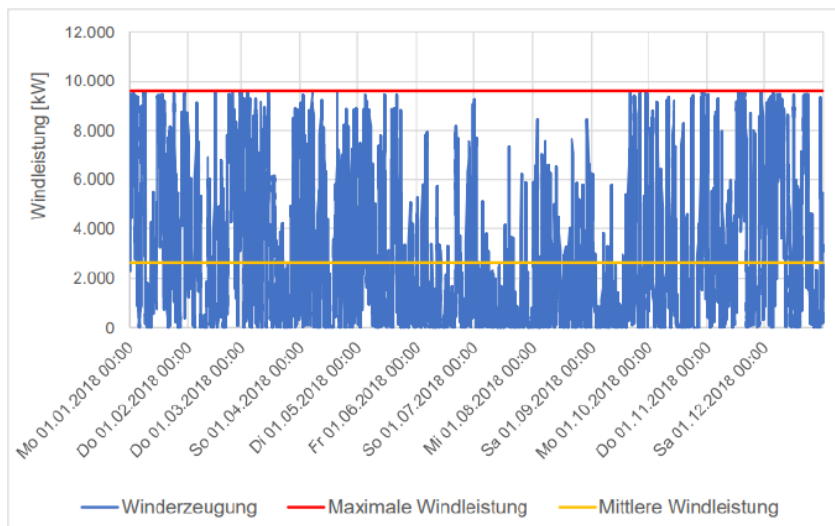


Abbildung 9: Windleistung (Quelle: Patrick Scholz, S.12)

3.5. Batterie

Zur Speicherung der erzeugten Energieüberschüsse wird mittels mehrerer Lithium-Ionen-Batterien elektrische Energie gespeichert. Im Bestand befinden sich 2,60 MWh an Speicherkapazität.

3.6. Verbrauch

Die Produktion verbraucht zwischen 0,4 und 6,0 MW. Es ist erkennbar, dass zeitweise weniger Leistung verbraucht wird. Die Schwankungen lassen sich durch weniger Verbrauch nachtsüber und am Wochenende erklären. Am Tag wird mehr produziert und somit auch mehr Leistung verbraucht. Zwischen dem Jahreswechsel gibt es nur zwischen 1,0 und 2,0 MW Verbrauchsleistung. Durchschnittlich zusammengefasst verbraucht die Produktion 2,54 MW und kommt auf 2711 Benutzungsstunden. (Vgl. Abb. 10)

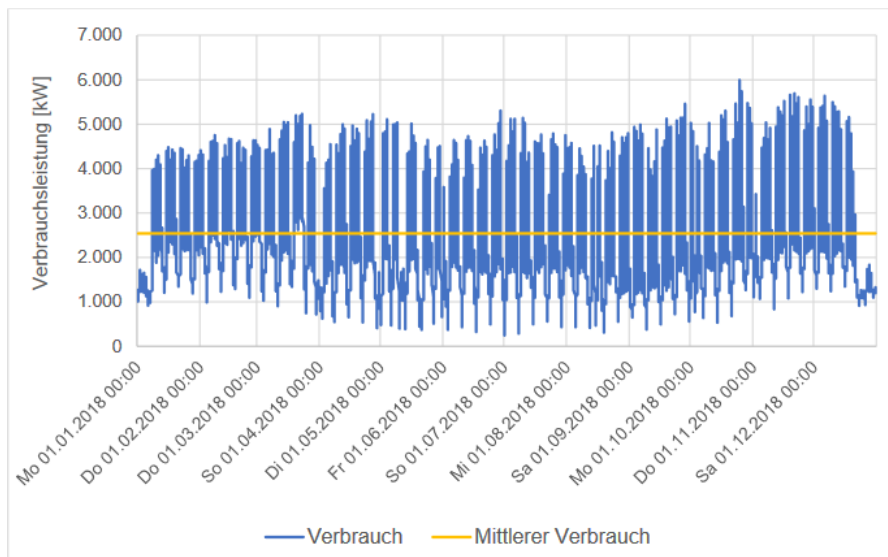


Abbildung 10: Verbrauchsleistung (Quelle: Patrick Scholz, S.12)

3.7. Strommarktpreise

Die Daten für die Strompreise am Markt wurden von der Strombörse EEX in Leipzig genommen. An der Strombörse werden Preise täglich für jede Stunde des Folgetags aus Angebot und Nachfrage ermittelt. Bei positiven Strommarktpreisen kann mit Erlösen ins öffentliche Netz eingespeist werden. Bei negativen kostet das Einspeisen von Strom Geld. Daher wird von Max Bögl bei negativen Strommarktpreisen kein Strom ins Netz eingespeist. Da die Daten der Strommarktpreise im Zeitraum zwischen dem 01.01.2018 und 31.12.2020 aufgezeichnet wurden und der Strompreis seit 2021 stark gestiegen ist, wurden die Datenwerte des Strommarktpreises mit zwei verschiedenen Multiplikatoren für negative und positive Strommarktpreise beaufschlagt. So kann das zu untersuchende Preisniveau abgebildet werden. Für ein Szenario von 90 €/MWh mittlerem Strommarktpreis wurde ein Multiplikator von 2,37811 für positive Strommarktpreise genommen und 0,4205 für negative. In Abbildung 12 wird der Unterschied zwischen dem mittleren Strommarktpreis von 90 €/MWh und dem ursprünglichen von 37,53 €/MWh erkenntlich. (Vgl. Abb. 11)

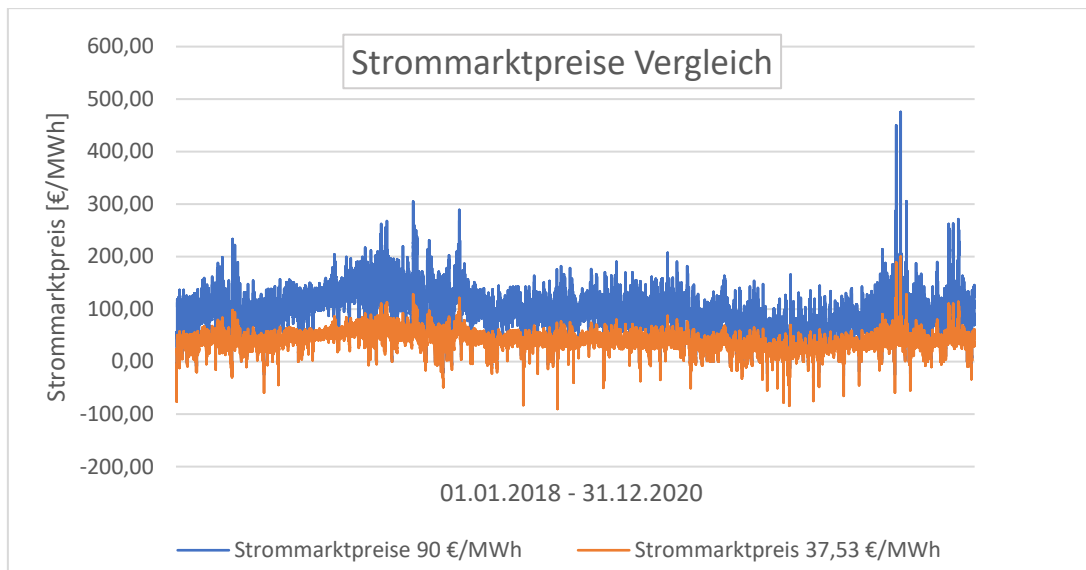


Abbildung 11: Strommarktpreis

3.8. Bewirtschaftungsstrategie

Am Produktionsstandort Sengenthal soll das Werk, über die auszubauenden regenerativen Energiesysteme, autark mit Strom versorgt werden. Dazu werden die vorhandenen Speicher im Bedarfsfall aufgeladen. Mögliche Überschüsse sollen ins Netz exportiert werden. Dabei ist die Exportleistung aufgrund des Netzanschlusses auf 19 MW begrenzt. Exportgewinne haben die Strommarkt-Zeitreihe zur Basis und die Bewirtschaftung wird für jede Stunde im Jahr geplant. In Phasen, in denen nicht genug Strom produziert wird, sollen die Speicher den Bedarf ausgleichen. Hierfür müssen die Speicher genug Speicherleistung besitzen, um den Bedarf decken zu können. Der Import von Strom stellt ein unzulässiges Szenario dar. Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, soll kein Strom zu negativen Preisen ins Netz eingespeist werden. Dies würde den Gewinn schmälern und das stellt ebenfalls ein unzulässiges Szenario dar. (Scholz, 2021, S.15)

3.9. Stromgestehungskosten

Die Stromgestehungskosten sind das Ergebnis der verbrauchsbezogenen Gesamtsystemkosten abzüglich der verbrauchsbezogenen Erlöse. Die Mehrkosten sind die Eigenversorgungskosten abzüglich der Stromgestehungskosten am Markt.

Die verbrauchsbezogenen Erlöse das Ergebnis aus Gesamterlös durch Gesamtstromverbrauch. Der gesamte Stromverbrauch vom 01.01.2018 bis 31.12.2020 beträgt 66,8 GWh. Der Erlös ergibt sich aus den Exportkosten abzüglich der Importkosten und Kraftwerksbetriebskosten. Die Summe aus den einzelnen Erlösen im oben genannten Zeitraum bildet den Gesamterlös.

Die verbrauchsbezogenen Gesamtsystemkosten sind das Ergebnis aus Gesamtsystemkosten durch Gesamtstromverbrauch. Die Gesamtsystemkosten werden aus den Leistungskosten und dem Eigenbedarf bestimmt. Hier werden nach den Jahresbenutzungsstunden die Nutzungsentgelte für Leistungs- und Arbeitspreise ermittelt. Die EEG-Umlage beträgt im gewählten Szenario 10 €/MWh. Die Grenze wird bei 2500 Jahresbenutzungsstunden gezogen und somit werden zwei verschiedene Beträge für die Netznutzungsentgelte fällig. (Vgl. Abb. 12)

Jahresbenutzungsgrenze	2.500		h	Vertriebs
	< Grenze	>= Grenze		
Netznutzungsentgelt LP	12.900	94.640	€/MWa	aufschlag
Netznutzungsentgelt AP	35,3	2,6	€/MWh	Marktwert
Umlage für EEG	10,00		€/MWh	bei
Sonstige Umalgen U	7,25		€/MWh	Vollbezug
Konzessionsabgabe K	1,1		€/MWh	20%
Stromsteuer SSt	20,5		€/MWh	bei
Summe Arbeit	74,1	41,4	€/MWh	Restbezug
Volllaststunden	3.710,7	für	0,0	100%
anzuwendender AP	41,4499983	Restbedarf	74,149998	
Maximalleistung	5,996		0,000	MW

Abbildung 12: Jahresbenutzungsgrenze

Die Eigenversorgungskosten bilden sich aus den Gesamtsystemkosten mit Umlagen und Steuern abzüglich des Bewirtschaftungserlöses im Zeitraum vom 01.01.2018 bis 31.12.2020. Dabei bilden sich die Gesamtsystemkosten aus den Umwandlungskosten von Solar- und Windenergie und den Flexibilitätskosten. Die Flexibilitätskosten umfassen die Jahreskosten der jeweiligen Speicher und des Kraftwerks durch die Jahresstunden. Die Jahreskosten setzen sich aus der Annuität und den Betriebskosten zusammen, wobei die Betriebskosten die Kosten des Gesamtinvests mal einem Betriebsfaktor sind.

3.10. Optimums-Suche

Mit Hilfe aller Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln kann nun die Optimums-Suche nach den niedrigsten Stromgestehungskosten gestartet werden. Hierfür werden in einem Excel-Tool PV-Anlagen, Dampfkraftwerksleistung, Batteriespeicher und die zusätzlichen Elektrolyse-Anlage als veränderliche Variablen betrachtet. Zuerst wird der Bestand analysiert. Danach soll nacheinander die Größe der veränderlichen Systemauslegungsparameter angepasst werden. Die Optimums-Suche lässt sich daher in vier verschiedene Stufen einteilen. Nach jeder Stufe soll anhand des ermittelten niedrigsten Preises ein feinerer Abstand zwischen der Ausbau-Leistungen eingestellt werden. So sollen im Ermittlungsverfahren vier verschiedene Optimums-Suchen von Grob nach Sehr Fein gestartet werden:

- Minimum Grob
- Minimum Mittel
- Minimum Fein
- Minimum Sehr Fein

In jeder Optimums-Suche werden die Variablen PV, Dampf, Batterie und Elektrolyse aufgestellt. Jede dieser Variablen erhält eine 5-stufige

Auflösung zum Einstellen der Leistungsgröße. Die Spalten beherbergen die PV- und Batterie-Leistungen. Die Zeilen Dampf- und Elektrolyse-Leistung. Insgesamt lassen sich so 625 Kombinationsmöglichkeiten in jeder Optimums-Suche generieren. In jeder der 625 Spalten lässt sich ein anderer Stromgestehungspreis ermitteln. Zudem besitzt jede Spalte entweder eine schwarze, rote oder grüne Schriftfarbe. Auch können Spalten zusätzlich rot oder gelb gefüllt sein. Dabei haben die unterschiedlichen Farbaufteilungen folgende Bedeutungen:

- Schwarze Schrift = gültiges Szenario aber teurer als Marktpreis
- Grüne Schrift = gültiges Szenario und günstiger als Marktpreis
- Rote Schrift = ungültiges Szenario da keine Selbstversorgung möglich
- Rote Füllung = nicht nachhaltige Speicherstrategie da der Wasserstoffspeicher leerläuft
- Gelbe Füllung = günstigster Stromgestehungspreis

Für die Optimums-Suche wird das Szenario mit 90 €/MWh mittlerem Strommarktpreis und 10 €/MWh EEG-Umlage gewählt. Für den Eigenbedarf ergibt sich im Tool ein ausgerechneter Marktpreis für eine vollständige Eigenbedarfsnutzung von 183,96 € als Beschaffungskosten.

3.10.1. Minimum Grob

Die erste Stufe sucht das Minimum der Stromgestehungskosten im groben Ansatz. Zuerst wurde der Bestand eingestellt und danach wurden, in großen Abständen, die regenerativen Anlagen eingestellt. Dabei wurden die Anlagen folgendermaßen ausgelegt:

- PV [MW]: 4,0; 10,0; 20,0; 30,0; 40,0

- Dampf [MW]: 0,34; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0
- Batterie [MWh]: 2,6; 10,0; 20,0; 30,0; 40,0
- Elektrolyse [MW]: 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0

Hier wird erkenntlich, dass sich die günstigsten Stromgestehungskosten mit 131,54 €/MWh bei einer PV-Leistung mit 40 MW, 20 MWh Batteriekapazität, 2 MW Dampfkraftwerks-Leistung und 1 MW Elektrolyse-Leistung befindet. (Vgl. Abb. 13 & 14)

Ergebnisarray	PV	4				10				20								
		H2	Bat	2,6	10	20	30	40	2,6	10	20	30	40					
0,34	0			376,00	342,89	319,25	307,67	300,40	307,06	267,68	247,43	237,84	232,59	260,87	219,97	198,38	190,84	188,33
	1			643,21	573,87	531,44	507,12	489,60	491,81	397,95	349,26	324,43	306,99	403,76	294,88	229,21	212,13	208,44
	2			596,27	535,47	498,15	478,17	463,23	425,66	340,27	296,49	277,36	265,31	318,94	222,98	201,04	201,92	204,77
	3			561,17	506,84	474,98	458,55	446,67	373,25	295,88	261,99	253,37	252,03	247,89	209,76	202,91	204,07	207,26
1	4			534,54	485,79	460,70	447,70	437,58	334,84	268,00	255,95	254,26	254,18	233,52	210,44	205,43	206,66	209,38
	0			326,04	294,99	274,64	263,04	257,26	265,79	229,25	211,84	204,64	200,44	225,37	189,36	172,33	166,52	167,13
	1			513,59	453,22	417,92	396,18	381,28	377,11	292,04	252,11	233,73	224,17	298,56	202,84	176,53	175,98	179,99
	2			458,21	407,96	378,51	361,08	350,48	301,35	230,44	220,50	217,79	218,31	214,11	182,16	176,42	177,45	181,83
2	3			417,83	374,98	352,68	340,15	333,67	250,63	227,83	219,21	217,51	217,94	203,54	181,57	177,82	179,97	184,41
	4			389,41	353,63	337,47	327,65	322,09	248,39	227,01	219,75	218,64	219,68	197,05	183,55	180,96	183,11	187,45
	0			273,45	249,64	237,03	231,35	229,74	225,30	197,15	187,67	184,82	184,96	191,72	165,20	156,12	155,45	157,71
	1			378,69	338,97	318,13	308,20	303,22	264,94	208,58	200,49	198,17	198,58	198,44	169,41	161,11	163,86	168,37
3	2			323,13	292,87	278,15	271,93	269,88	221,96	202,03	195,03	194,35	196,21	182,45	165,64	163,38	166,32	170,78
	3			279,32	261,63	258,81	258,35	260,01	216,94	198,60	193,73	194,07	196,50	179,56	167,88	166,36	169,40	174,05
	4			271,88	262,36	260,50	260,11	262,17	216,17	198,76	194,86	196,39	199,14	178,32	171,07	169,44	172,41	176,78
	0			249,52	229,70	223,59	221,84	224,18	209,08	187,25	182,39	182,67	185,63	180,47	160,83	155,98	156,85	161,36
4	1			325,47	299,22	288,90	285,64	285,23	226,56	208,56	202,30	201,62	204,00	198,50	176,80	165,95	168,52	173,67
	2			270,37	260,18	257,80	259,87	263,53	227,11	208,62	202,57	203,21	206,61	193,66	172,75	168,79	172,31	177,60
	3			274,84	264,98	262,49	264,33	267,86	227,21	209,26	204,80	206,22	209,19	190,42	173,73	172,37	176,05	181,28
	4			278,28	268,67	266,38	268,19	271,76	227,85	211,19	207,38	208,86	211,75	187,52	177,25	175,83	179,64	184,87
4	0			249,61	237,21	233,82	235,26	238,20	213,38	197,86	195,29	197,51	201,24	187,69	174,13	170,62	172,85	177,99
	1			323,07	302,75	296,06	295,10	296,49	245,53	227,25	221,08	220,40	222,74	217,00	194,93	184,00	186,66	191,78
	2			289,67	279,37	276,78	278,72	282,25	245,52	227,30	220,81	221,37	224,82	211,17	190,93	186,93	190,45	195,82
	3			294,22	284,07	281,48	283,34	286,75	245,16	227,32	223,02	224,51	227,48	208,01	191,93	190,53	194,19	199,52
4	4			296,96	287,52	285,23	286,95	290,45	245,32	229,36	225,68	227,06	230,01	205,13	195,48	194,08	197,92	203,11

Abbildung 13: Minimum Grob

	30					40				
	2,6	10	20	30	40	2,6	10	20	30	40
231,72	192,06	171,78	164,75	163,89	211,53	172,11	152,21	146,09	146,15	
356,21	243,78	186,58	176,75	180,04	323,58	208,71	161,18	158,77	161,82	
261,98	186,42	177,88	178,09	182,03	224,84	168,13	160,03	160,24	163,48	
209,94	185,51	179,41	180,20	184,50	188,38	167,88	161,74	162,52	166,71	
204,34	187,31	181,88	182,74	186,92	185,58	169,57	164,54	165,75	169,61	
199,16	164,57	149,09	144,90	146,38	181,06	147,22	131,95	128,74	130,84	
255,27	170,28	155,06	156,32	160,09	225,26	150,68	139,97	142,04	145,75	
187,24	160,56	156,92	158,97	162,80	167,28	145,74	142,09	144,24	147,82	
175,24	163,01	159,71	161,83	165,65	159,64	148,20	144,70	146,79	150,78	
176,40	165,29	162,55	164,55	168,66	161,46	150,76	147,80	149,68	153,60	
169,03	144,20	136,14	136,42	140,44	153,73	129,50	122,39	123,35	127,11	
173,81	147,09	144,44	147,24	152,54	157,74	132,92	131,54	134,22	139,08	
160,89	149,16	147,22	150,03	155,23	145,47	135,36	134,22	137,31	141,90	
159,45	151,63	150,07	153,23	158,49	146,26	138,12	137,46	139,87	145,08	
161,70	154,63	153,07	156,22	161,06	148,57	140,74	139,93	142,78	147,51	
160,63	142,89	138,41	140,45	145,71	147,42	130,61	126,39	128,58	134,11	
178,42	156,77	149,53	151,88	157,08	164,47	142,11	137,37	139,92	145,38	
172,38	154,46	152,64	155,06	160,80	157,42	141,56	140,37	143,62	149,06	
167,45	157,43	155,57	158,62	164,40	153,83	144,59	144,01	147,27	152,74	
167,42	160,96	159,16	162,35	167,97	154,75	148,18	147,51	150,86	156,32	
169,49	157,57	154,40	157,09	162,41	157,49	145,95	143,29	145,96	151,37	
197,06	175,01	167,10	169,52	174,63	183,29	160,67	155,41	158,17	163,13	
190,13	172,69	170,79	173,34	178,47	175,37	160,12	158,48	161,76	166,71	
185,12	175,70	173,80	176,92	182,06	171,89	163,17	162,08	165,40	170,32	
185,19	179,24	177,40	180,53	185,66	172,84	166,76	165,67	168,96	173,82	

Abbildung 14: Minimum Grob Fortführung

3.10.2. Minimum Mittel

Nun wurde zwar das erste Minimum gefunden, jedoch ist noch nicht klar, inwiefern sich höhere PV-Leistungen auf den Stromgestehungspreis auswirken. Daher wurde in der nächsten Stufe zur Optimums-Suche der Preis um die gefundenen Werte eingestellt. So ergaben sich folgende Auslegungswerte:

- PV [MW]: 24,0; 32,0; 40,0; 48,0; 56,0
- Dampf [MW]: 1,0; 1,8; 2,6; 3,4; 4,2
- Batterie [MWh]: 10; 15,0; 20,0; 25,0; 30,0
- Elektrolyse [MW]: 0,2; 0,6; 1,0; 1,4; 1,8

Das nächste Optimum findet sich bei einer PV-Leistung mit 56 MW, 20 MWh Batteriekapazität, 1,8 MW Dampfkraftwerks-Leistung und 0,6 MW

Elektrolyse-Leistung. Hierbei betragen die Stromgestehungskosten 125,63 €/MWh. (Vgl. Abb. 15 & 16)

Ergebnisarray	Dampf	H2	PV	Bat	24					32					40				
					10	15	20	25	30	10	15	20	25	30	10	15	20	25	30
1	0,2				268,67	235,77	214,49	201,28	194,51	242,31	209,77	188,70	176,78	172,01	222,89	189,95	168,79	158,58	154,21
	0,6				224,21	192,85	178,77	172,94	170,23	195,09	166,74	155,88	151,35	152,26	174,42	149,81	139,53	139,43	140,99
	1				187,67	172,55	166,80	166,84	167,87	164,81	153,08	151,52	151,72	153,16	150,68	141,04	139,97	140,45	142,04
1,8	1,4				177,17	168,47	167,16	167,10	168,16	157,83	153,28	152,37	152,60	154,03	144,96	141,80	140,79	141,40	142,50
	1,8				172,40	168,20	167,56	167,82	169,16	156,84	153,75	153,19	153,83	155,23	145,63	142,60	141,70	142,27	143,78
	0,2				211,17	185,57	170,26	164,80	163,86	188,38	163,58	149,72	146,51	145,69	171,56	147,87	137,39	133,97	132,89
1,8	0,6				169,53	159,58	154,70	155,02	156,54	153,03	142,75	141,33	142,16	143,65	140,60	131,83	131,11	132,05	133,46
	1				161,97	155,48	155,12	156,00	157,54	144,60	142,47	141,79	143,23	144,68	134,00	132,19	132,05	132,87	134,39
	1,4				158,66	156,24	155,96	156,92	158,51	144,94	142,91	142,71	143,64	145,63	134,34	132,64	132,50	133,80	135,32
2,6	1,8				159,31	157,06	156,83	157,75	159,72	145,77	143,74	143,54	144,82	146,82	135,47	133,70	133,69	135,11	137,02
	0,2				187,92	166,43	159,85	158,18	157,89	167,64	149,36	144,54	142,85	143,49	152,26	138,90	133,71	132,50	134,25
	0,6				164,01	156,63	154,60	155,51	157,15	149,29	141,63	142,19	143,34	144,38	138,64	132,76	132,78	133,82	135,12
3,4	1				162,34	155,12	155,67	156,71	158,35	147,03	142,70	142,90	144,06	145,66	136,05	133,31	133,54	134,52	136,37
	1,4				160,42	156,18	156,82	157,81	158,95	145,72	143,74	143,92	145,01	146,54	135,52	134,24	134,45	135,43	137,15
	1,8				159,35	157,05	157,78	158,86	160,47	146,47	144,56	145,25	146,41	147,59	136,29	135,20	135,38	136,91	138,10
4,2	0,2				185,94	171,03	167,13	166,06	166,73	167,48	157,03	152,70	151,50	152,15	154,27	147,47	142,67	141,65	143,76
	0,6				176,73	169,59	165,51	165,32	167,27	162,46	154,45	151,53	152,56	153,72	152,04	144,45	142,11	143,10	144,69
	1				174,96	167,32	165,38	166,80	168,94	159,72	153,45	152,47	154,00	155,26	149,01	144,30	143,65	144,56	146,14
Dampf	1,4				172,86	167,21	166,82	168,23	170,27	158,27	153,83	153,93	155,51	156,74	148,45	145,20	144,62	146,02	147,71
	1,8				171,83	168,14	168,30	169,72	171,90	158,17	155,30	155,40	156,90	158,36	147,82	146,62	146,04	147,63	149,19
	0,2				197,82	186,92	182,94	181,81	182,43	180,23	172,91	168,65	167,23	167,73	170,38	163,48	158,77	157,61	159,58
Ergebnisarray	0,6				192,56	185,13	181,00	180,89	182,91	178,25	170,11	167,17	168,26	169,41	167,82	160,32	157,97	159,15	160,66
	1				190,46	182,81	180,90	182,35	184,35	175,34	169,06	168,11	169,67	170,92	164,81	160,13	159,54	160,58	162,11
	1,4				188,35	182,72	182,34	183,72	185,80	173,85	169,43	169,55	171,17	172,39	164,20	161,03	160,53	161,94	163,59
Dampf	1,8				187,30	183,60	183,85	185,24	187,34	173,76	170,86	170,96	172,60	174,03	163,58	162,43	161,86	163,39	165,16

Abbildung 15: Minimum Mittel

48					56				
10	15	20	25	30	10	15	20	25	30
210,56	177,66	156,36	147,66	143,65	204,92	171,41	151,82	143,39	139,61
161,13	139,93	133,14	133,43	134,83	155,13	135,71	131,92	132,14	133,16
142,56	135,23	133,86	134,40	135,28	139,81	134,16	132,74	132,87	134,05
138,75	135,66	134,68	135,22	136,16	137,70	134,42	133,06	133,63	134,37
139,39	136,45	135,48	136,09	136,96	137,99	135,34	133,89	134,45	135,91
162,26	138,49	129,85	126,67	127,74	158,77	134,93	128,05	125,88	127,20
133,74	126,31	126,19	126,85	128,47	132,31	126,10	125,63	126,01	127,26
128,69	126,73	126,53	127,47	129,36	128,38	126,39	126,05	127,16	128,44
129,33	127,43	127,78	128,64	130,10	129,43	127,53	127,27	128,42	129,61
130,42	128,60	129,10	129,87	131,74	130,52	128,75	128,39	129,47	131,03
144,63	133,19	128,28	128,27	129,79	142,41	132,91	128,04	128,48	129,84
133,90	128,38	128,56	129,57	131,02	133,57	128,68	128,66	129,76	131,11
131,35	129,42	129,72	130,56	131,74	131,27	129,69	129,86	130,91	131,68
131,13	129,79	130,08	131,47	132,59	131,39	130,51	130,62	131,67	132,70
131,90	130,72	131,46	132,00	133,99	132,21	131,36	131,62	132,52	134,00
150,26	142,99	138,35	137,74	139,64	151,01	143,29	138,32	138,70	140,38
147,48	140,50	138,33	139,19	141,22	147,28	140,51	139,04	140,01	141,77
144,67	139,78	139,73	140,62	142,71	144,83	140,77	140,53	141,53	143,32
143,97	141,23	141,14	142,03	144,19	144,03	141,67	142,07	143,05	144,92
143,76	142,68	142,59	143,59	145,66	144,82	143,16	143,48	144,45	146,20
166,18	159,21	154,76	153,98	155,85	167,08	159,76	154,70	155,08	155,46
163,47	156,62	154,57	155,56	157,45	163,44	156,92	155,59	156,63	157,02
160,67	155,93	155,95	156,88	158,85	160,96	157,09	156,95	158,03	158,39
160,01	157,33	157,40	158,45	160,40	160,19	157,99	158,39	159,50	159,90
159,80	158,72	158,78	159,73	161,77	160,99	159,44	159,87	160,86	161,32

Abbildung 16: Minimum Mittel Fortführung

3.10.3. Minimum Fein

In einer feineren Stufe wurde nun mit folgenden Werten weitergesucht:

- PV [MW]: 48,0; 52,0; 56,0; 60,0; 64,0
- Dampf [MW]: 0,8; 1,2; 1,8; 2,2; 2,6
- Batterie [MWh]: 16,0; 18,0; 20,0; 22,0; 24,0
- Elektrolyse [MW]: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0

So konnte das nächste Optimum bei einer PV-Leistung von 52 MW, 20 MWh Batteriekapazität, 1,8 MW Dampfkraftwerks-Leistung und 0,4 MW Elektrolyse-Leistung gefunden werden. Die Stromgestehungskosten liegen hier bei 125,04 €/MWh. (Vgl. Abb. 17 & 18)

Ergebnisarray	PV	48						52						56					
		H2	Bat	16	18	20	22	24	16	18	20	22	24	16	18	20	22	24	
0,8		0,2			187,62	178,19	170,20	163,97	160,36	183,56	173,93	166,03	160,50	156,53	181,02	171,23	163,47	158,54	155,02
		0,4			163,82	156,01	149,36	144,60	141,27	159,90	151,92	145,60	141,05	137,85	157,44	149,23	143,10	139,41	136,78
		0,6			146,87	141,43	137,42	136,60	136,48	143,68	138,41	135,20	134,85	135,03	141,94	136,42	134,87	134,87	135,07
1,2		0,8			138,45	137,57	137,12	137,08	137,20	136,87	136,32	135,82	135,58	135,86	136,45	135,90	135,72	135,22	135,40
		1			138,20	137,82	137,62	137,59	137,78	137,28	136,48	136,20	136,29	136,34	137,03	136,62	135,99	135,98	135,96
		0,2			159,72	151,82	146,48	142,58	140,41	156,41	148,83	143,76	140,03	137,17	154,30	147,56	142,35	138,62	135,92
1,8		0,4			139,32	134,96	131,59	130,30	130,24	136,81	132,32	129,30	129,00	129,17	135,79	131,55	129,17	129,22	129,46
		0,6			134,58	130,55	130,42	130,51	130,72	130,05	129,62	129,05	129,10	129,36	130,31	129,88	129,17	129,28	129,48
		0,8			131,30	131,11	130,87	130,60	130,94	130,46	129,79	129,56	129,61	129,88	130,78	129,90	129,74	129,82	129,64
2,2		1			131,84	131,13	130,94	131,09	131,31	130,60	130,26	129,76	129,86	130,07	130,80	130,42	129,81	129,83	130,11
		0,2			134,86	132,07	129,85	128,19	127,01	133,43	130,76	128,59	126,95	125,75	133,15	130,24	128,05	126,88	125,69
		0,4			127,48	125,65	126,04	126,15	126,38	126,10	125,08	125,04	125,51	125,98	126,10	125,13	125,07	125,69	125,89
2,6		0,6			126,39	126,18	126,19	126,34	126,57	125,79	125,49	125,47	125,72	125,94	125,98	125,41	125,63	125,61	125,70
		0,8			126,27	126,09	126,49	126,66	126,92	125,64	125,54	125,55	126,13	126,23	125,95	125,50	126,04	126,15	126,39
		1			126,75	126,59	126,53	126,86	127,08	126,17	125,98	125,95	126,19	126,84	126,51	126,10	126,05	126,74	126,75
48		0,2			131,63	129,68	127,71	126,64	126,11	130,75	128,27	127,01	126,05	125,70	130,84	128,25	126,96	125,84	126,06
		0,4			126,06	125,86	126,16	126,15	126,29	125,42	125,50	125,34	125,62	125,69	125,81	125,91	125,63	125,80	126,47
		0,6			126,43	126,25	126,20	126,65	126,90	125,78	125,42	125,94	125,92	126,57	126,58	126,20	126,15	126,49	126,84
52		0,8			126,77	126,57	126,52	127,06	127,22	126,11	126,28	126,24	126,34	126,95	126,94	126,59	127,02	126,97	127,71
		1			127,13	126,97	127,36	127,56	128,09	126,90	126,67	126,65	127,23	127,31	127,28	127,54	127,27	127,52	128,01
		0,2			132,02	129,86	128,28	127,88	127,92	131,29	129,00	127,73	127,36	127,87	131,33	129,36	128,04	127,97	128,71
56		0,4			127,60	127,82	128,14	128,26	128,80	127,57	127,72	127,60	128,21	128,33	128,25	128,09	128,38	128,47	129,04
		0,6			128,37	128,11	128,56	128,65	129,13	127,86	128,00	128,37	128,54	129,02	128,61	128,74	128,66	129,20	129,14
		0,8			128,67	128,95	128,93	129,41	129,49	128,52	128,35	128,70	128,73	129,31	128,92	129,10	128,91	129,52	130,10
Dampf		1			129,44	129,31	129,72	129,67	130,17	128,95	129,15	129,12	129,71	129,68	129,71	129,52	129,86	129,76	130,37

Abbildung 17: Minimum Fein

60					64				
16	18	20	22	24	16	18	20	22	24
179,28	169,55	162,08	157,15	153,83	178,77	169,10	162,06	157,06	153,81
156,04	147,92	141,37	138,39	136,28	155,50	147,08	142,02	138,92	136,61
141,19	135,89	135,78	135,19	135,60	141,47	137,53	137,04	136,93	137,13
137,37	136,35	136,30	136,03	136,15	139,00	138,09	137,80	137,59	137,29
137,91	136,81	136,58	136,52	136,33	139,53	138,65	138,35	137,85	137,94
153,42	146,64	141,94	137,99	135,66	153,50	147,07	141,90	138,31	135,89
135,86	131,55	129,80	129,70	129,96	136,69	132,33	131,36	131,32	131,14
131,36	130,46	130,35	130,26	130,04	132,82	132,28	131,61	131,45	131,69
131,43	130,97	130,24	130,29	130,57	133,19	132,42	132,02	131,97	131,63
131,88	131,01	130,76	130,70	130,64	133,29	132,80	132,03	132,15	132,17
133,60	130,79	128,81	127,37	126,90	135,24	132,31	129,86	128,78	128,69
126,89	126,50	126,73	126,81	127,01	129,19	128,64	128,32	128,37	128,81
127,13	126,77	126,83	126,75	127,22	129,05	128,65	128,41	128,53	129,32
127,18	126,94	127,13	127,31	127,29	129,07	129,22	128,94	128,97	129,52
127,61	127,54	127,50	127,65	128,07	129,90	129,60	129,39	129,92	129,97
131,64	129,37	127,69	126,91	127,49	133,63	131,26	129,42	129,04	129,11
127,37	126,94	126,71	127,28	127,44	129,32	129,15	128,84	129,41	129,43
127,65	127,82	127,61	127,38	128,08	130,04	129,60	129,41	129,67	130,48
128,05	128,08	128,01	128,38	128,62	130,45	130,44	130,29	130,27	130,73
128,74	128,24	128,71	128,74	129,34	130,81	130,80	130,55	131,21	131,11
132,45	130,32	129,02	129,34	129,47	134,43	132,11	131,11	130,95	131,59
129,36	129,34	129,30	129,63	130,27	131,76	131,53	131,30	131,81	131,95
130,09	129,71	130,13	129,92	130,42	131,98	132,02	131,78	132,16	132,75
130,54	130,51	130,36	130,72	130,89	132,81	132,30	132,48	132,45	133,09
130,73	130,63	130,65	131,07	131,52	132,96	133,07	132,81	133,19	133,18

Abbildung 18: Minimum Fein Fortführung

3.10.4. Minimum Sehr Fein

Im letzten Schritt, der feinsten Suche nach den Stromgestehungskosten, wurde mit nachfolgenden Werten weitergerechnet:

- PV [MW]: 48,0; 50,0; 52,0; 54,0; 56,0
- Dampf [MW]: 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2
- Batterie [MWh]: 18,0; 19,0; 20,0; 21,0; 22,0
- Elektrolyse [MW]: 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50

Die finalen Stromgestehungskosten belaufen sich somit auf 124,98 €/MWh. Dieser Wert kann bei einer PV-Leistung von 54 MW, 21 MWh Batteriekapazität, 1,8 MW Dampfkraftwerks-Leistung und 0,45 MW Elektrolyse-Leistung gefunden werden. (Vgl. Abb. 19 & 20)

Ergebnisarray	PV	48					50					52					
		Bat	18	19	20	21	22	18	19	20	21	22	18	19	20	21	22
Dampf	H2	18	19	20	21	22	18	19	20	21	22	18	19	20	21	22	
	0,3																
	0,35																
	0,4																
1,4	0,45																
	0,5																
	0,3																
	0,35																
	0,4																
1,6	0,45																
	0,5																
	0,3																
	0,35																
	0,4																
1,8	0,45																
	0,5																
	0,3																
	0,35																
	0,4																
2	0,45																
	0,5																
	0,3																
	0,35																
	0,4																
2,2	0,45																
	0,5																
	0,3																
	0,35																
	0,4																

Abbildung 19: Minimum Sehr Fein

54					56				
18	19	20	21	22	18	19	20	21	22
131,94	130,68	129,00	127,92	127,09	131,68	130,27	128,73	127,93	127,18
129,43	128,10	126,92	126,98	126,91	129,19	127,72	127,23	126,93	127,01
127,54	126,88	127,05	126,89	127,21	127,60	127,30	126,97	127,25	127,18
127,38	127,09	126,92	127,02	126,90	127,66	127,12	127,23	127,05	126,96
127,22	127,24	127,20	126,85	127,16	127,76	127,27	127,10	127,24	127,13
127,66	126,63	126,14	125,55	125,78	127,67	126,64	126,11	125,86	125,73
126,45	125,77	125,66	125,77	125,52	126,53	125,74	126,02	125,89	125,95
125,88	125,62	125,80	125,98	125,83	125,86	125,89	125,64	125,99	125,77
125,69	125,72	126,07	125,74	126,06	126,05	125,68	125,97	126,03	125,96
125,88	125,91	125,78	125,97	125,82	125,80	125,88	126,08	126,07	126,11
126,55	125,68	125,47	125,18	125,41	126,48	125,44	125,16	125,38	125,29
125,07	125,50	125,16	125,22	125,08	125,47	125,17	125,40	125,21	125,55
125,32	125,12	125,21	125,45	125,37	125,13	125,33	125,07	125,40	125,69
125,06	125,27	125,35	124,98	125,52	125,45	125,14	125,35	125,37	125,57
125,21	125,60	125,26	125,31	125,35	125,57	125,43	125,48	125,31	125,67
125,78	125,04	125,27	125,48	125,48	125,77	125,42	125,23	125,38	125,69
125,09	125,18	125,50	125,19	125,49	125,58	125,56	125,41	125,66	125,50
125,26	125,32	125,09	125,48	125,47	125,72	125,38	125,53	125,41	125,65
125,39	125,20	125,33	125,24	125,49	125,46	125,59	125,37	125,61	125,39
125,20	125,33	125,08	125,46	125,74	125,70	125,45	125,50	125,46	125,73
125,41	125,65	125,24	125,55	125,34	125,44	125,52	125,63	125,55	125,76
125,56	125,37	125,50	125,31	125,48	125,71	125,75	125,49	125,82	125,53
125,36	125,45	125,29	125,58	125,22	125,91	125,44	125,63	125,59	125,80
125,54	125,34	125,46	125,66	125,57	125,63	125,75	125,88	125,66	125,90
125,25	125,44	125,60	125,47	125,68	125,85	125,84	126,05	125,94	126,11

Abbildung 20: Minimum Sehr Fein Fortführung

Durch Investition in den Ausbau von PV-Anlagen, Batterie, Dampfkraftwerk und Elektrolyseur lassen sich, gegenüber der Beschaffung am Strommarkt, um 32% niedrigere Stromgestehungskosten erreichen. Dies wird bei einem mittleren Großhandel-Strommarktpreisniveau von 90 €/MWh realisiert. Das tatsächliche Niveau für Deutschland lag 2021 bei 96,85 €/MWh (SMARD, 2022). Ohne Ausbau des Elektrolyseurs können zwar niedrigere Stromgestehungskosten erhalten werden, jedoch würde dann die Selbstversorgungsfähigkeit nicht mehr aufrechterhalten werden.

3.10.5. Sensitivitätsanalyse

Im letzten Schritt wurden die prozentualen Abweichungen der ermittelten Ausbauleistungen von 0 % bis ± 40 % in einer Sensitivitätsanalyse betrachtet. Daraus kann das Verhalten der Stromgestehungskosten bei Abweichungen von den ermittelten optimalen Ausbauleistungen, bei

Variation von jeweils einem Parameter, analysiert werden. Bei Abweichungen von $\pm 8\%$ der Ausbauleistung schwanken die Stromgestehungskosten nur um Werte von $\pm 1 \text{ €/MWh}$. Es zeigt sich sogar, dass sich bei einer Verringerung der Elektrolyseleistung um 10% oder einer Erhöhung der Dampfleistung um 4% ein noch niedriger Stromgestehungspreis einstellen kann. Ab einer Veränderung über $\pm 10\%$ steigen die Stromgestehungskosten, vor allem bei den PV-Anlagen, rapide an. (Vgl. Abb. 21 bis 23)

Sensitivitätsanalyse Parameterbereich											Minimum			
Suchpunkte	-40%	-30%	-20%	-15%	-10%	-8%	-6%	-4%	-3%	-2%	-1%	0%	1%	2%
PV [MW]	32,40	37,80	43,20	45,90	48,60	49,68	50,76	51,84	52,38	52,92	53,46	54,00	54,54	55,08
Dampf [MW]	1,08	1,26	1,44	1,53	1,62	1,66	1,69	1,73	1,75	1,76	1,78	1,80	1,82	1,84
Batterie [MWh]	12,60	14,70	16,80	17,85	18,90	19,32	19,74	20,16	20,37	20,58	20,79	21,00	21,21	21,42
Elektrolyse [MW]	0,270	0,315	0,360	0,383	0,405	0,414	0,423	0,432	0,437	0,441	0,446	0,450	0,455	0,459
zugehörige Stromgestehungskosten														
PV [MW]	140,46	133,64	128,48	126,78	125,84	125,24	125,24	125,39	125,36	125,05	125,21	124,98	125,14	125,15
Dampf [MW]	130,29	128,26	126,70	126,27	125,30	125,08	125,02	124,95	125,40	125,03	125,43	124,98	125,04	124,84
Batterie [MWh]	130,80	126,66	125,43	125,03	125,10	125,26	125,23	125,45	125,09	124,91	125,07	124,98	125,14	125,15
Elektrolyse [MW]	125,30	125,03	125,22	125,44	124,87	125,04	125,05	125,15	125,12	125,09	125,08	124,98	125,09	125,24

Abbildung 21: Sensitivitätsanalyse Abweichungen

	2%	3%	4%	6%	8%	10%	15%	20%	30%	40%
	55,08	55,62	56,16	57,24	58,32	59,40	62,10	64,80	70,20	75,60
	1,84	1,85	1,87	1,91	1,94	1,98	2,07	2,16	2,34	2,52
	21,42	21,63	21,84	22,26	22,68	23,10	24,15	25,20	27,30	29,40
	0,459	0,464	0,468	0,477	0,486	0,495	0,518	0,540	0,585	0,630
	125,15	125,56	125,55	125,55	125,82	126,30	127,34	128,87	132,24	136,93
	124,84	125,17	124,79	124,93	125,35	125,43	125,33	125,84	126,36	127,44
	125,15	125,32	125,31	125,64	125,21	125,47	125,59	125,56	126,45	126,79
	125,24	125,16	125,11	125,41	125,42	125,18	125,54	125,70	125,29	125,60

Abbildung 22: Sensitivitätsanalyse Abweichungen Fortführung

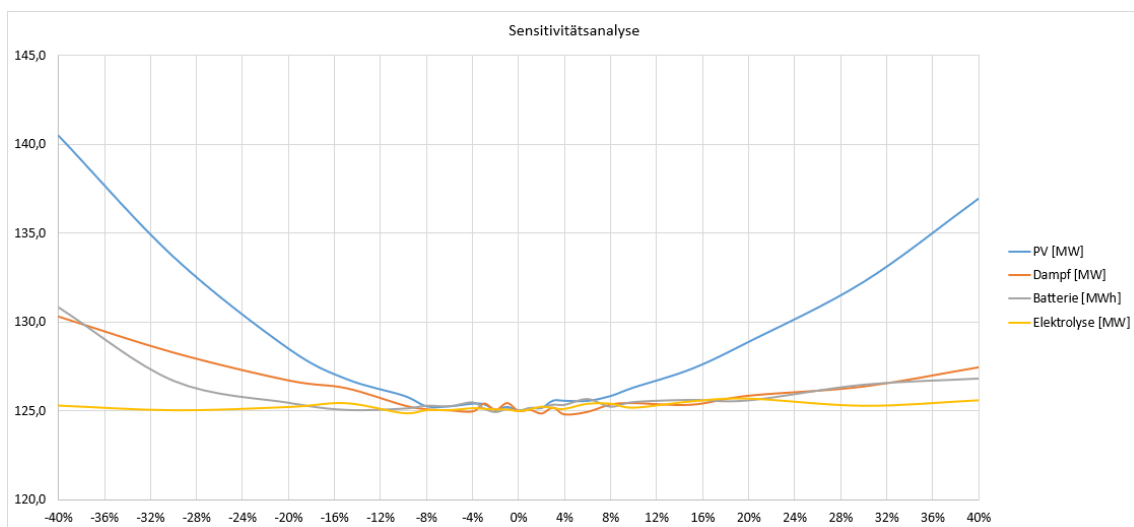


Abbildung 23: Sensitivitätsanalyse in Diagrammform

4. Zusammenfassung

Damit sich Max Bögl vom Strommarkt lösen kann, könnte das Unternehmen in regenerative Energieerzeugung investieren. In einem Szenario mit mittlerem Strommarktpreis von 90 €/MWh und 10 €/MWh EEG-Umlage wurde gezeigt, dass zur Erreichung des Stromgestehungskostenminimums ein großer Ausbau des Bestands notwendig ist. In der Versorgungsanalyse wurde die Auslegungsgröße der PV-Anlage, der Batteriespeicher, des Dampfkraftwerks und des Elektrolyseurs betrachtet. Daraus konnten Stromgestehungskosten in Höhe von 124,98 €/MWh ermittelt werden. Für das Gewährleisten der Selbstversorgung muss zum Bestand noch eine Power-to-Gas-Anlage und Speicher installiert werden. Zwar sind die Kosten momentan hierfür noch recht teuer, jedoch können in naher Zukunft PEM-Systeme für bis zu 2000-3000 €/kW realisiert werden. In Deutschland sind solche Power-to-Gas-Anlagen mit Größen um die 1 MW bereits für Forschungszwecke im Einsatz.

Literaturverzeichnis

Zapf, M. (2017). *Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem* (1. Aufl.). Mönchsberg: Springer Link.

NOW-GMBH. (2010). Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien. Abgerufen am 26. Februar 2022 von <https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/now-studie-wasserelektrolyse-2011.pdf>

Milanzi S., Spiller C., Grosse B., Hermann L., Kochems J., Müller-Kirchenbauer J. (2018). *Technischer Stand und Flexibilität des Power-to-Gas-Verfahrens* (Working Paper Energie und Ressourcen). Berlin, Deutschland: Technische Universität Berlin, Energie- und Ressourcenmanagement.

Eichlseder, H., Klell M. (2008). *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik* (1. Aufl.). Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

EMCEL. (2018). Wie wirkt sich Wasserstoffverunreinigung auf eine Brennstoffzelle aus. Abgerufen am 10. März 2022 von <https://emcel.com/de/wasserstoffverunreinigung-in-brennstoffzellen>

Tjarks, G. (2017). *PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung in Power-to-Gas Anlagen* (Dissertation). Jülich, Deutschland: RWTH Aachen University, Institut für Energie- und Klimaforschung.

DENA. (o. J.). Windgas Haßfurt. Abgerufen am 12. März 2022 von <https://www.powertogas.info/projektkarte/windgas-hassfurt/>

STEAG. (o. J.). STEAG will grüne Wasserstoff-Produktion vorantreiben. Abgerufen am 12. März 2022 von <https://www.steag.com/de/steag-news-ausgabe-5-2020/wasserstoff-fenne>

Edison. (2022). Wasserstoff-Elektrolyseure werden deutlich billiger. Abgerufen am 12. März 2022 von <https://edison.media/energie/wasserstoff-elektrolyseure-werden-deutlich-billiger/25224621/>

STEAG. (o. J.). HydroHub – mit Wasserstoff die Energiewende gestalten. Abgerufen am 12. März 2022 von <https://www.steag.com/de/steag-news-ausgabe-4-2019/hydrohub-fenne-mit-wasserstoff-die-energiewende-gestalten>

Patrick Scholz. (2021). Regenerative elektrische Selbstversorgung mit marktorientiertem Überschusseexport aus der Energiezelle Max Bögl am Standort Sengenthal. Abgerufen am 14. März 2022 von https://opus4.kobv.de/opus4-ohm/frontdoor/deliver/index/docId/783/file/PET-SS21-AB-Patrick_Scholz-P2G2P_und_Batterie.pdf

Siemens. (2018). Silyzer 300. Abgerufen am 14. März 2022 von [https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/public.1524040818.abae9c1e48d6d239c06d88e565a25040ed2078dc.ctree-18-047-db-silyzer-300-db-de-en-rz.pdf](https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/public/1524040818.abae9c1e48d6d239c06d88e565a25040ed2078dc.ctree-18-047-db-silyzer-300-db-de-en-rz.pdf)

SMARD. (2022). Abgerufen am 10. Juni 2022 von <https://www.smard.de/home/marktdaten?marketDataAttributes=%7B%22resolution%22:%22year%22,%22region%22:%22DE%22,%22from%22:1577833200000,%22to%22:1640991599999,%22moduleIds%22:%5B22000661,8004169%5D,%22selectedCategory%22:null,%22activeChart%22:true,%22style%22:%22color%22,%22categoriesModuleOrder%22:%7B%7D%7D>