



TECHNISCHE HOCHSCHULE NÜRNBERG
GEORG SIMON OHM

**Fakultät Maschinenbau
und Versorgungstechnik**



Projektarbeit Energietechnik

**Marktübersicht von Batteriespeichern und
Versorgungsanalyse Max Bögl Sengenthal**

Autor: Nicolas Keller

Matr.Nr.: 3281634

E-Mail: kellerni77165@th-nuernberg.de

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp

Ort, Abgabetermin: Nürnberg, 30.08.2022

Eidesstattliche Erklärung

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

Stein, 30.08.2022

Nicolas Keller

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Grundlagen der Batterietechnik – Lithium-Ionen-Batterie	1
2.1 Funktionsweise	2
2.2 Produktionsprozesse von Batteriezellen	4
2.3 Containerspeicher	6
2.4 Brandschutz für Batteriespeicher	9
3 Wirtschaftlichkeitsanalyse.....	11
3.1 Ausgangssituation und Zielsetzung.....	11
3.2 Energiesituation	12
3.3 Strommarktsituation	15
3.4 Bewirtschaftungsstrategie	17
3.5 Minimum der Stromgestehungskosten.....	17
3.6 Sensitivitätsanalyse.....	19
4 Fazit und Ausblick.....	21
5 Quellen	22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau einer Litium-Ionen-Batterie [1]	2
Abbildung 2: Darstellung von Dendriten [3]	3
Abbildung 3: Rundwickel rechts, prismatisches Wickeln links [4].....	5
Abbildung 4: Technische Daten Tesvolt TPS Flex [5]	6
Abbildung 5: Produktpalette TPS flex [5].....	7
Abbildung 6: Spezifikation EnBW Batteriespeicher Typ 1 [7]	8
Abbildung 7: Spezifikation EnBW Batteriespeicher Typ 2 [7]	8
Abbildung 8: Auslöser und Ablauf der Thermischen Zersetzung einer Lithium-Ionen- Batterie [4]	10
Abbildung 9: Verbrauchszeitreihe für 2018 [9].....	12
Abbildung 11: Zeitreihe der PV-Anlage aus 2018 [9].....	13
Abbildung 12: Zeitreihe der Windkraftanlage aus 2018 [9]	14
Abbildung 13: Strompreisverlauf zwischen Januar und März 2022 [12]	16
Abbildung 14: Strommarktpreise	16
Abbildung 15: Marktvorraussetzungen	18
Abbildung 16: Ergebnisarry	18
Abbildung 17: Ergebnis Sensitivitätsanalyse tabellarisch	20
Abbildung 18: Ergebnis Sensitivitätsanalyse graphisch	20

Abkürzungsverzeichnis

ASD Aspirating Smoke Detector

EEG Erneuerbare Energien Gesetz

PV Photovoltaik

SEI solid electrolyte interphase Feststoff-Elektrolyt-Grenzphase

1 Einleitung

Im Rahmen der Energiewende nimmt die Bedeutung der dezentralen Energieversorgung immer weiter zu. Für Energieversorger und Betriebe stellt dies eine neue Herausforderung dar, da bisher eine zentrale Energieversorgung Stand der Technik ist. In dieser Arbeit wird die Frage diskutiert, welche Investition für das Bauunternehmen Max Bögl wirtschaftlich ist, um eine dezentrale Versorgung des Unternehmens sicher zu stellen. Besonderes Augenmerk wird auf die Speicherung der elektrischen Energie mit Hilfe von Batterien gelegt. Dazu wird im ersten Teil der Arbeit erörtert, welche Speicher aktuell am Markt angeboten werden. Der zweite Teil der Arbeit beinhaltet eine Versorgungsanalyse. In dieser wird auf Basis des Energiebedarfs der letzten drei Jahren errechnet, welche Investition in Photovoltaik, Biomasse-Dampf, Wasserstoff- und Batteriespeicher am wirtschaftlichsten ist.

2 Grundlagen der Batterietechnik – Lithium-Ionen-Batterie

Aktuell ist das europäische Stromnetz so aufgebaut, dass nahezu jede umgewandelte Einheit elektrischer Energie unmittelbar zurückgewandelt werden muss. Abweichungen von Stromangebot und -nachfrage drücken sich in Schwankungen der Netzfrequenz aus. Aufgrund der ungleichmäßigen Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien aus z. B. Wind, Sonne oder vereinzelt auch Gezeiten, nimmt die Relevanz der Speicherung von elektrischer Energie in Zukunft zu. Eine Möglichkeit hierfür bildet die Batterie. Wobei der Begriff „Batterie“ die Gesamtheit mehrerer zusammengeschlossenen Zellen mit allen zugehörigen Kabelverbindungen und Bauteilen, wie z. B. Gehäuse meint. Im Volksmund wird zwischen Batterie und Akkumulatoren unterschieden, was in Fachkreisen dem Unterschied zwischen Primär- und Sekundärbatterie entspricht. Im weiteren Verlauf der Arbeit bezieht sich der Begriff Batterie immer auf die Sekundärbatterie. [1] Eine Batterie macht sich einen Ladungsunterschied zweier Pole zunutze. Zwischen den beiden Polen entsteht eine Spannung, die sich in Form von Elektronenfluss – also elektrischem Strom – entlädt,

sobald der Plus- mit dem Minuspol verbunden wird. Dabei arbeiten die Batterien mit einem hohen Wirkungsgrad, sind aber in der speicherbaren Energiemenge eingeschränkt. Je nach Bauart sind zwischen 35 und 210 Wh/kg Speicherkapazität möglich. [2] In diesem Kapitel wird die Funktionsweise, der Produktionsprozess sowie die aktuellen Beschaffungspreise einer Lithium-Ionen-Batterie erörtert. Abschließend wird auf den Brandschutz der Batterietechnik eingegangen.

2.1 Funktionsweise

In Abb. 1 wird der schematische Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie im Entladezustand dargestellt. Am Minuspol befindet sich eine Graphit-Elektrode, die auch Anode genannt wird. Hier lagern sich im Graphit die Lithium Ionen ein. Die SEI trennt die aus Feststoff bestehende Anode vom flüssigen Elektrolyt, durch das die Ionen in Richtung Pluspol wandern können. Der Separator trennt die negative von der positiven Seite. Eine kohlenstoffbasierte Deckschicht, auch Conduction Interface genannt, schützt die Anode vor Korrosion durch den Elektrolyt. Die Ionen werden am Pluspol reversibel in die Kathode (LiMO_2 -Elektrode) eingelagert. An der Anode findet eine Oxidation statt durch die Elektronen freigesetzt werden.

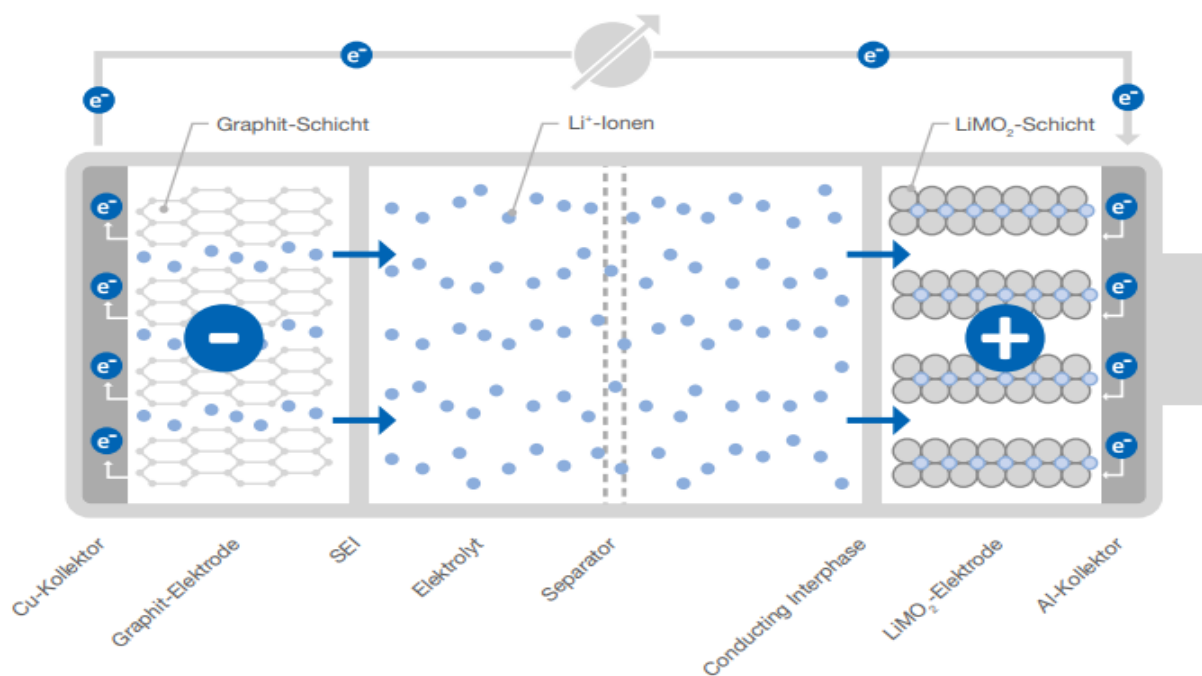


Abbildung 1: Aufbau einer Litium-Ionen-Batterie [1]

Wird nun die negative mit der positiven Seite verbunden, können die Elektronen fließen und es entsteht elektrischer Strom. Sind alle Ionen am Pluspol angelangt, ist die Batterie vollständig entladen. Um die Batterie wieder aufzuladen, muss nun Spannung angelegt werden. Dadurch kehrt sich der Prozess um und die Ionen wandern wieder zurück zum Minuspol. Dieser Prozess kann so lange wiederholt werden, bis die Bildung von sog. Dendriten so weit vorangeschritten ist, dass sie den Separator durchstoßen und die Batterie dadurch kurzgeschlossen wird. Dendriten entstehen, wenn sich das Lithium nicht wie üblich planar abscheidet, sondern nadelförmige Gebilde an der Anode bildet. Dieses kinetische Phänomen verursacht eine Reduzierung der Kapazität, da weniger Lithium für die elektrochemische Nutzung der Kapazität zur Verfügung steht. Abb. 2 zeigt Dendriten.

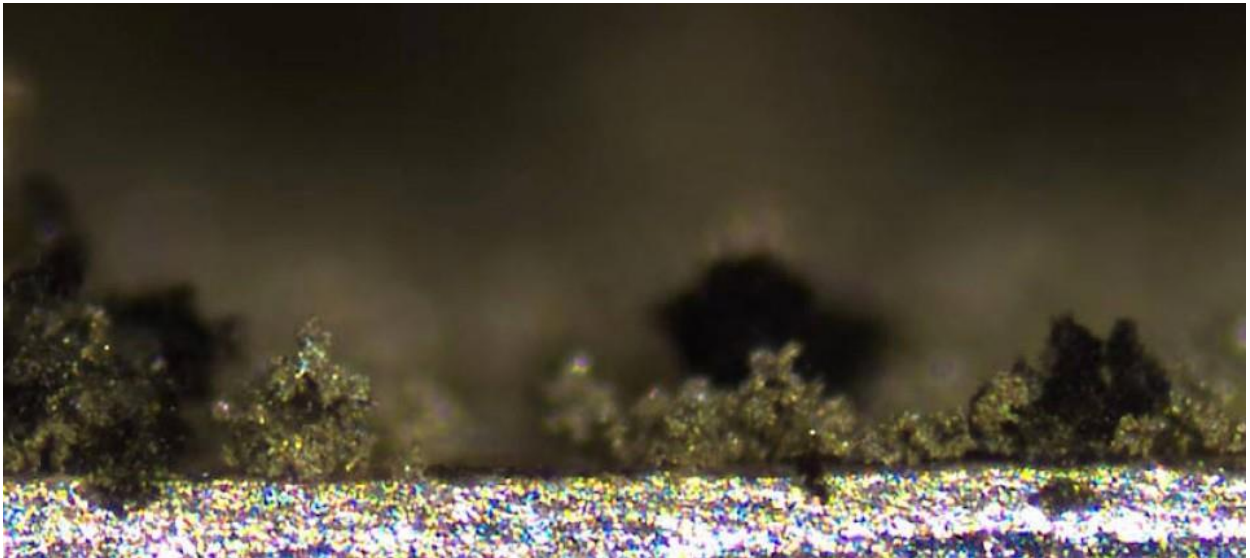


Abbildung 2: Darstellung von Dendriten [3]

Darüber hinaus existiert ein Alterungsprozess, der sich aus Dehnvorgängen der Aktivmaterialien während der Einlagerung von Lithium-Ionen ergibt. Hierbei kommt es zu einer Volumenänderung der Partikel. Diese mechanische Belastung führt dazu, dass die elektrischen Leitpfade in der Batterie aufgetrennt werden und somit keine Ableitung des Stromes mehr möglich ist. Diese Erscheinungen treten sowohl an der Anode als auch an der Kathode auf. Nach 500 bis 1000 Zyklen verliert die Batterie ca. 20% der ursprünglichen Kapazität. Einen großen Vorteil bietet der hohe Wirkungsgrad, der in den meisten Fällen über 95% liegt. [4]

2.2 Produktionsprozesse von Batteriezellen

Wie einige der Komponenten einer Batterie hergestellt werden, wird in diesem Kapitel erläutert.

Die Elektroden fertigt jeder Batteriehersteller selbst, da sie die Eigenschaften einer Batterie maßgeblich beeinflussen. Fast das gesamte Wissen und der Erfindungsgeist eines Batterieherstellers findet sich in den Elektroden wieder. So können durch die Elektroden Eigenschaften der Batterie wie Klemmenspannung, Kapazität, Impedanz oder die Alterung festgelegt werden. Aus diesem Grund sind keine Elektroden frei am Markt erhältlich. Bei der Herstellung der Elektroden werden die Aktivmaterialien mit Bindern und Leitadditiven vermennt. Anschließend werden sie auf metallische Ableitfolien aufgetragen. Aktivmaterialien haben den Nachteil, dass sie schlecht leitend sind. Deswegen werden die Leitadditive benötigt, um die Leitfähigkeit zu verbessern. Darüber hinaus ist es wichtig, dass die dreidimensionalen Strukturen der Elektrodenschicht homogen und zum Kollektor orientiert sind. Als Leitadditive kommen Graphite, Ruße oder sog. Vapor Grown Carbon Fibres zum Einsatz. Die Binder stabilisieren das Gemisch aus Aktivmaterialien und Leitadditiven. Dabei wird darauf geachtet eine möglichst homogene Verteilung zu erreichen, damit so wenig wie möglich von dem elektrochemisch inaktiven Material benötigt wird. Die organisch basierten Binder werden mit der Zeit von wasserbasierten Bindern abgelöst. Diese bringen in der Produktion einige Nachteile mit sich. In der Fertigung müssen somit Lösungsmittel zurückgewonnen oder die Abluft der Gießmaschinen nachverbrannt werden, da sonst Explosionsgefahr besteht. Diese Nachteile entfallen bei den wasserbasierten Bindern.

Die direkte mechanische Verbindung von Anode, Kathode und Separator erreicht man unter anderem durch Lamination. Um dabei die Komponenten verrutschsicher in Position zu halten und Fehlerquellen im weiteren Fertigungsprozess zu eliminieren, werden die Bauteile mit einem Polymer umspritzt. Die Vereinzelung der Elektroden erzielt man mit einem Stanzwerkzeug oder mit einem Laserschneidgerät. Dabei eignet sich die Stanztechnologie für die Massenfertigung und das Laserschneiden für Sonderanfertigungen. Nach der Montage der Zellkörper werden sie mit Klebeband fixiert.

Eine Alternative zum Laminieren bietet die Wickeltechnologie. Hierbei werden Elektrobänder und Separatoren umeinander abwechselnd gewickelt, so dass durch die Zugkräfte die Bänder beim Wickeln aneinandergespresst werden. Dabei fixiert man das fertige Produkt mit Klebeband. So können zylindrische oder prismatische Zellkörper gewickelt werden, wobei es zu beachten gilt, dass bei der prismatischen Form nach der Entfernung der Wickelkörpers die engen Wickelradien an Zugspannung verlieren. Das kann negative Folgen auf die Lebensdauer der Zelle haben. Abb. 3 zeigt skizzenartig das Rund- und prismatische Wickeln.

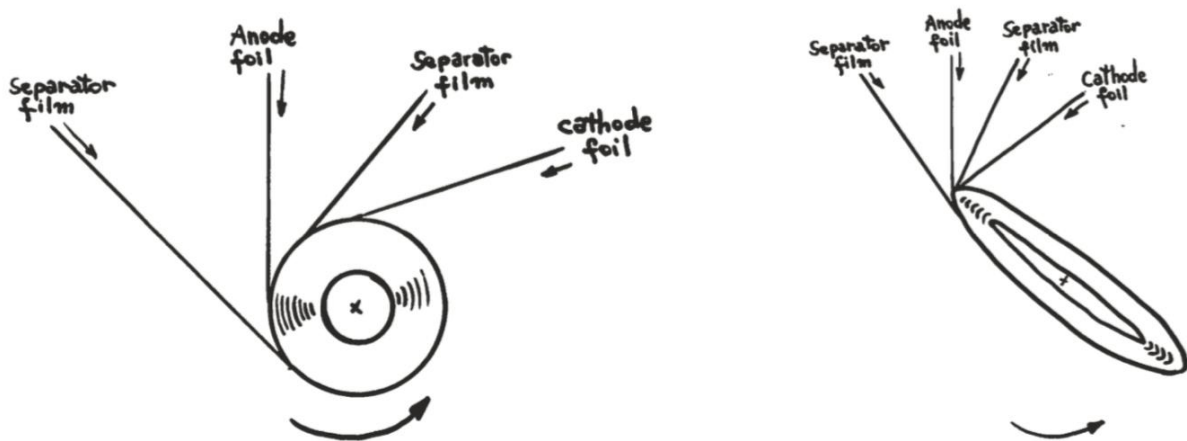


Abbildung 3: Rundwickel rechts, prismatisches Wickeln links [4]

Sind die Elektroden und Separatoren in Position gebracht, wird der Elektrolyt eingefüllt. Dabei ist es wichtig, dass die Zelle gleichmäßig mit Elektrolyt durchtränkt wird, damit die Batterie langlebig und sicher ist. Zwischen den Elektroden liegen – wie bereits erwähnt – die Separatoren in 200 bis 300 μm großen Spalten. Um nun den Elektrolyt in diese Spalte zu platzieren, wird die Zelle langsam und ggf. in mehreren Schritten befüllt. Außerdem werden die in den Poren der Materialien befindliche Gase entfernt. Die verwendeten Elektrolyte sind hochkonzentrierte Lösungen von Lithiumsalzen in polaren, organischen Lösungen. Allerdings sind diese hochkorrosiv. Hochwertige Elektrolyte sind an sehr guten Benetzungs- und Kriechigenschaften zu erkennen.

Lithium-Ionen- Batterien sind nach der Montage und Befüllung ungeladen. Die Formierung der Zellen kann bis zu zwei Tage in Anspruch nehmen und bildet zusammen mit der Befüllung den Engpass im Produktionsablauf. Sie stellt die erste Landung der Batterien dar. Während dieses Schrittes werden aber auch die SEI Deckschichten aufgebaut und eine Qualitätskontrolle durchgeführt. Führt man eine

100% Kontrolle durch, so benötigt man zwei vollständige Zyklen von Ladung und Entladung. Die bei diesem Prozess benötigte Energie kann in Form von Prozesswärme zurückgewonnen werden, um die Energieeffizienz des Gesamtprozesses zu verbessern. [4]

2.3 Containerspeicher

Für große Speicherkapazitäten sind Batteriespeicher in Containerform eine praktische Lösung. Durch die modulare Bauweise bieten sie Flexibilität und einfache Handhabung. Im Folgenden werden drei verschiedene Batteriespeicher auf Containerbasis vorgestellt.

Die Firma Tesvolt bietet einen Container mit den Leistungsdaten aus Abb. 4 an. Dabei wird mit einer Lebensdauer von 30 Jahren und 800 Vollzyklen geworben. Die Ladegeschwindigkeit beträgt 1C, was bedeutet, dass die Batterie innerhalb einer Stunde be- bzw. entladen werden kann. Die Kapazität bewegt sich zwischen 72 und 288kWh pro Modul. Die Leistung beträgt 60 bis 120 kW. Eine genaue Auflistung findet sich in Abb. 5.

Energie je TS-HV-70-Batteriesystem (15 Batteriemodule)		72 kWh
C-Rate		1C
Zelle		Lithium NMC prismatisch (Samsung SDI)
max. Lade-/Entladestrom		94 A
Zellen-Balancing		Active Battery Optimizer
erwartete Zyklen @ 100 % DoD 70 % EoL 23 °C +/-5 °C 1C/1C		6000
erwartete Zyklen @ 100 % DoD 70 % EoL 23 °C +/-5 °C 0,5C/0,5C		8000
Wirkungsgrad (Batterie)		bis zu 98 %
Eigenverbrauch (Standby)		5 W (ohne Batteriewechselrichter)
Betriebsspannung		714 bis 872 V DC
Betriebstemperatur		-10 bis 50 °C
Luftfeuchtigkeit		0 bis 85 % (nicht kondensierend)
Höhe des Aufstellorts		< 2000 m ü. N.N.
Abmessungen (H x B x L)	10-ft-Container	2900 x 2440 x 3000 mm
	20-ft-Container	2900 x 2440 x 6100 mm
Zertifikate/Normen	Zelle	IEC 62619, UL 1642, UN 38.3
	Produkt	CE, UN 38.3, IEC 62619, IEC 61000-6-1/2/3/4, BattG 2006/66/EG
Garantie		10 Jahre Kapazitätsgarantie, 5 Jahre Systemgarantie
Recycling		kostenlose Rücknahme der Batterien durch TESVOLT ab Deutschland
Schutzart		IP 35
Batteriebezeichnung nach DIN EN 62620:2015		IMP47/175/127/[14S]E/-20+60/90

Abbildung 4: Technische Daten Tesvolt TPS Flex [5]

Typ	Kapazität	Beladeleistung	Entladeleistung	Artikelnr.	Container	Batteriesysteme à 15 Module	Anzahl STPS	Gewicht
TPS flex 10 ft TS HV 70 / 60	72 kWh	60 kW	67 kW	101171	10 ft	1	1	2976 kg
TPS flex 10 ft TS HV 140 / 60	144 kWh	60 kW	75 kW	101172	10 ft	2	1	3537 kg
TPS flex 10 ft TS HV 140 / 120	144 kWh	120 kW	134 kW	101173	10 ft	2	2	3612 kg
TPS flex 20 ft TS HV 140 / 60	144 kWh	60 kW	75 kW	101175	20 ft	2	1	5137 kg
TPS flex 20 ft TS HV 210 / 180	216 kWh	180 kW	201 kW	101177	20 ft	3	3	5888 kg
TPS flex 20 ft TS HV 280 / 120	288 kWh	120 kW	150 kW	101176	20 ft	4	2	6374 kg

Weitere Varianten auf Anfrage erhältlich

Abbildung 5: Produktpalette TPS flex [5]

Ein weiterer Energiespeicher wird von der Firma Bredenoord angeboten. Die Battery Box verspricht bis zu 600 kWh speichern zu können. Sie hat ebenfalls eine Ladegeschwindigkeit der Klasse 1C. Außerdem wirbt der Hersteller mit einem patentierten System, das einen einfachen Transport ermöglicht. [6] Damit ergibt sich potenziell die Möglichkeit die Speicher am Standort aufzuladen und anschließend auf eine Baustelle zu bringen, um dort Dieselgeneratoren zu ersetzen. In den Monaten mit reichlich Wind- oder Sonnenausbeute kann so auch darüber nachgedacht werden, in Zukunft die Container im Pendelverkehr auf Baustellen zu bringen, um den Dieserverbrauch durch Generatoren zu senken. Dabei gilt es zu beachten, mit welchem Kraftstoff die LKWs betrieben werden und ob es überhaupt ein Szenario gibt, in dem sich eine Wirtschaftlichkeit einstellt. Die CO₂ Emissionen bei einem solchen Pendelbetrieb müssen dabei ebenfalls mit in Betracht gezogen werden. Umwelttechnisch ergibt sich nur ein Nutzen, wenn sich dadurch eine geringere Belastung für die Umwelt ergibt als bei einem Dieselgenerator vor Ort. Auf diese Thematik wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen. Datenblätter zur Battery Box sind auf Anfrage bei Bredenoord erhältlich.

EnBW bietet ebenfalls eine mobile Variante einer containerbasierten Lösung für einen Batteriespeicher an. Die Abb. 6 und 7 zeigen einige Eckdaten der verfügbaren Speicher, die auch zur Miete angeboten werden. Diese unterscheiden sich vor allem in ihrer Ladekapazität und der Leistung. Die höheren Werte bei Typ 2 bringen ein erhöhtes Gewicht und einen größeren Platzbedarf mit sich.

Spezifikationen Speicher (Typ 1)

- Li-Ionen Batterie
- 10 ft ISO Container (L 2.990 x B 2.440 x H 2.590 mm)
- 7 t Gesamtgewicht
- 300 kVA Leistung
- 422 kWh Kapazität
- 3-phasig 230/400 V AC PowerLock

Funktionen:¹

- ✓ Notstromversorgung +
- ✓ Inselnetzbetrieb / netzferner Eventeinsatz +
- ✓ Peak-shaving/Spitzenlastkappung ++
- ✓ kombinierbar mit lokaler Erzeugung ++
- ✓ Eigenverbrauchsoptimierung ++
- ✓ Marktteilnahme und Regelleistungserbringung ++

Abbildung 6: Spezifikation EnBW Batteriespeicher Typ 1 [7]

Spezifikationen Speicher (Typ 2)

- Li-Ionen Batterie
- 12 ft ISO HC Container (L 3.660 x B 2.440 x H 2.900 mm)
- 12 t Gesamtgewicht
- 180 kVA Leistung
- 750 kWh Kapazität
- 3-phasig 230/400 V AC PowerLock

Funktionen:¹

- ✓ Notstromversorgung ++
- ✓ Inselnetzbetrieb / netzferner Eventeinsatz ++
- ✓ Peak-shaving/Spitzenlastkappung +
- ✓ kombinierbar mit lokaler Erzeugung +
- ✓ Eigenverbrauchsoptimierung ++
- ✓ Marktteilnahme und Regelleistungserbringung +

Abbildung 7: Spezifikation EnBW Batteriespeicher Typ 2 [7]

2.4 Brandschutz für Batteriespeicher

Lithium-Ionen-Batterien haben, wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurde, viele Vorteile. Das Ziel der Firma Max Bögel, sich dezentral selbst mit Strom zu versorgen, bringt eine gewisse Abhängigkeit von Batteriespeichern mit sich. Deswegen ist es wichtig, die Gefahren zu kennen und ihnen vorzubeugen bzw. auf den Eintrittsfall vorbereitet zu sein.

Eine Gefahr bei Lithium-Ionen-Batterien ist die thermische Zersetzung einer Batterie. Neben der Brandgefahr geht hier auch eine Gefahr von toxischen Gasen aus, die freigesetzt werden. Gründe für einen solchen Vorgang können ein externer Fehlgebrauch oder ein interner Auslöser wie metallische Verunreinigungen, schadhafte Separatoren oder Lithiumabscheidungen an der Anode sein.

Die externen Fehlgebräuche können z. B. Überladung oder externe Wärmezufuhr sein. Dadurch werden die Elektroden instabil und sie reagieren mit dem Elektrolyt. Dadurch kommt es zur Gasbildung wie z. B. von Wasserstoff und Sauerstoff. Weiterhin entwickelt sich Wärme, was sich wiederum auf die Stabilität der Elektroden auswirkt. Dieser Kreislauf nennt sich „Thermal Runaway“. Wird ein kritischer Punkt überschritten, so wird die Wärmefreisetzung unkontrollierbar und die Separatoren beginnen zu schmelzen. Dadurch kommt es zum internen Kurzschluss, was zur Wärmeentwicklung beiträgt. Schlussendlich entzündet sich die Batterie. Weitere externe Brandursachen können ein externer Kurzschluss oder mechanische Einwirkungen sein, die zum internen Kurzschluss führen. In Abb. 8 ist das Schema der thermischen Zersetzung abgebildet.

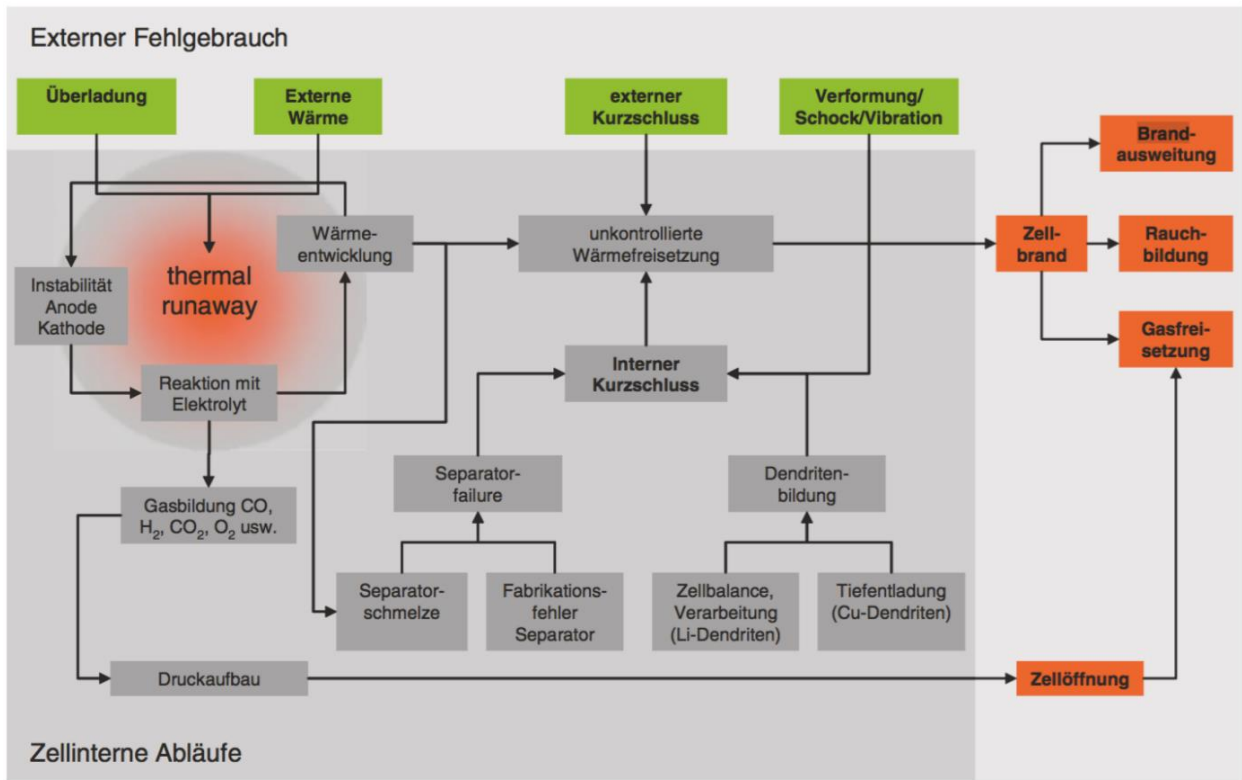


Abbildung 8: Auslöser und Ablauf der thermischen Zersetzung einer Lithium-Ionen-Batterie [4]

Um einen Thermal Runaway frühzeitig zu erkennen, ist das ausgasende Elektrolyt ein zuverlässiger Indikator. Dafür eignen sich Ansaugrauchgasmelder ASD. Durch die konstante Überwachung der Umgebungsluft in einer Messkammer lassen sich auch Spuren von Rauch- und Elektrolytgasen feststellen. Je nach Fortschritt des Thermal Runaways kann über die Steuerung eine Abschaltung des Systems veranlasst werden. Sollte dies nicht ausreichen, um den Brand zu stoppen, kann mit Inertgas ein Löschangriff veranlasst werden. Um Löschmittel-Zersetzungsprodukte zu vermeiden, kommt natürliches Gas wie z. B. CO₂ zum Einsatz. Das Gas dringt in die engen Spalte der Batterie ein und verdrängt den Sauerstoff, wodurch der Brand erstickt wird. [8]

3 Wirtschaftlichkeitsanalyse

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse für das Werk von Max Bögl in Sengenthal erläutert. Dazu wird zunächst auf die Ausgangssituation und die Zielsetzung eingegangen. Darauf folgt die Darlegung der Energie- und Strommarktsituation, an die sich die Beschreibung der Bewirtschaftungsstrategie anschließt. Auf den Ergebnisbericht folgt abschließend eine Sensitivitätsanalyse, bei der die Auswirkungen eines Ausbaus einzelner Komponenten untersucht werden.

3.1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Das Bauunternehmen Max Bögl betreibt in Sengenthal bei Neumarkt ein Werk zur Fertigung von Betonfertigteilen. Der jährliche Energiebedarf des Standortes beträgt ca. 26 GWh/a. Daraus resultiert ein durchschnittlicher Verbrauch von ungefähr 2,5 MW. In Leistungsspitzen werden bis zu 6 MW benötigt. [9]

Der Betrieb hat sich das Ziel gesetzt, die benötigte Energie im Sinne einer dezentralen Energieversorgung selbst bereitzustellen. Dadurch soll eine Unabhängigkeit von den schwankenden Strompreisen erreicht werden. Weiterhin sollen die Stromkosten so gesenkt werden, dass es langfristig günstiger ist, den Strom selbst zu produzieren. Ein weiteres Ziel ist die CO₂-Neutralität, die mit dem Einsatz von erneuerbarer Energieversorgung erreicht werden soll.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse untersucht, welche Investition in den Ausbau des Bestandes sinnvoll ist. Betrachtet werden dafür folgende Komponenten:

- Photovoltaik (4 MW Bestand)
- Biomasse-Dampfkraftwerk (0,34 MW Bestand)
- Batteriespeicher (2,6 MWh Bestand)
- Power-To-Gas-To-Power

Die 9,6 MW aus Windkraftanlagen stehen ebenfalls zur Verfügung, können aber aktuell aus politischen Gründen nicht ausgebaut werden. Aktuell gilt in Bayern die 10H Regelung, die besagt, dass eine Windkraftanlage mindestens das 10-fache ihrer Höhe

von bebautem Gebiet Abstand haben muss. Mit der geplanten Power-To-Gas-To-Power Anlage kann mit Hilfe von Brennstoffzellen und Druckbehältern der Strom in Form von Wasserstoff gespeichert werden.

3.2 Energiesituation

Der durchschnittliche Energiebedarf von Max Bögl liegt bei ca. 2,5 MW. Die Grundlast bei 0,5 bis 1,5 MW. In der Verbrauchszeitreihe von 2018 in Abb. 9 lässt sich der Unterschied zwischen Wochenende und Arbeitstagen erkennen. Darüber hinaus ist auch erkennbar, dass an den Feiertagen um Ostern und Pfingsten, sowie zwischen den Jahren der Verbrauch geringer ist als an normalen Arbeitstagen. Diesen alternierenden Strombedarf gilt es mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Mittel zu decken.

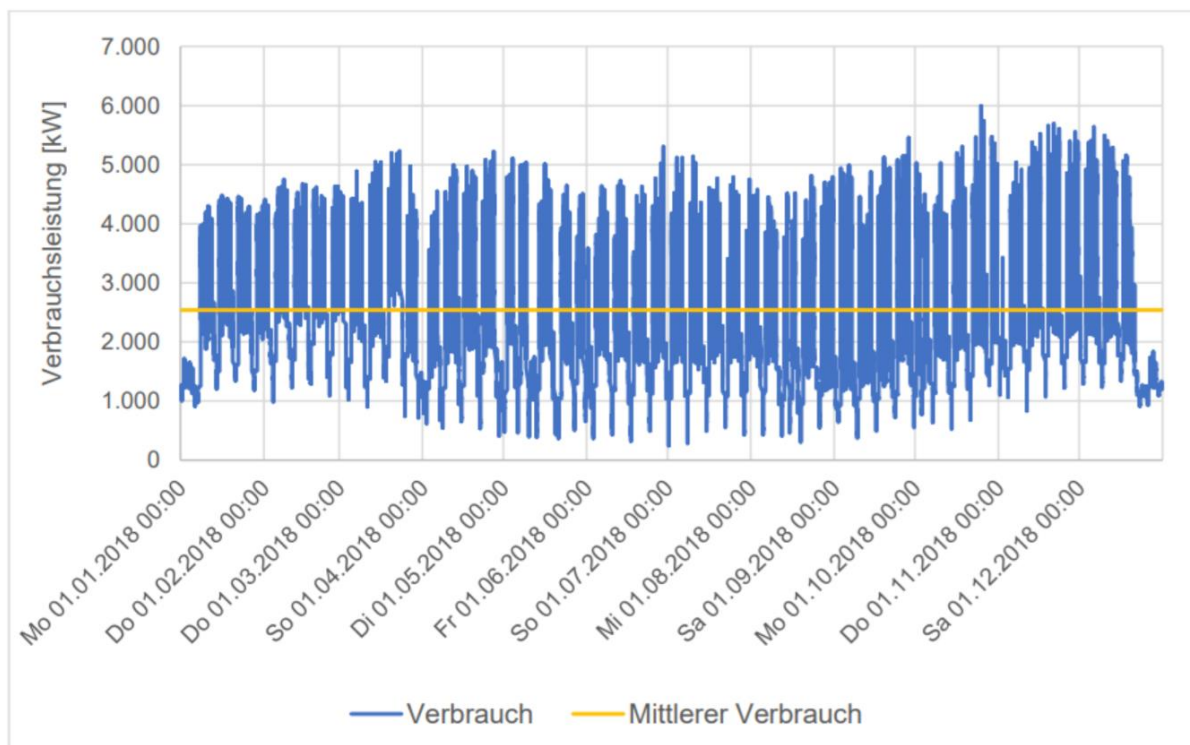


Abbildung 9: Verbrauchszeitreihe für 2018 [9]

Für die Stromgewinnung stehen aktuell Photovoltaik- und Windkraftanlagen, sowie ein Biomasse-Dampfkraftwerk zur Verfügung. Für die Versorgungsanalyse werden die Zeitreihen der Stromausbeute aus den Jahren 2018 bis 2020 herangezogen. Sie bilden die Grundlage für die Annahmen des zu erwartenden Stromertrages.

Die Peakleistung der PV-Anlage beträgt aktuell 4 MW. Diese Peakleistung ist der theoretisch maximale Wert der Leistungsabgabe. Dieser wird allerdings nie erreicht. Die Messung der theoretischen Peakleistung erfolgt im Labor bei konstanter Bestrahlung und Temperatur nach DIN EN 60904-3. In der Praxis erwärmt sich die Solarzelle und die Leistung sinkt. Auch die Bestrahlung in der Natur entspricht in den allermeisten Fällen nicht der im Labor. Hinzu kommen unter anderem Verluste durch Staubbelag oder Alterungsprozesse, die einen negativen Einfluss auf die Leistung haben [10]. Das Wetter und die Jahres- und Tageszeit haben ebenfalls erheblichen Einfluss auf den Ernteertrag der Photovoltaikanlagen. 2018 lag die mittlere PV-Auslastung bei 10,5%. Abb. 10 zeigt die Zeitreihe der Auslastung der PV-Anlage. Hier besteht die Möglichkeit eines weiteren Ausbaus, da noch ausreichend Freiflächen zur Verfügung stehen.

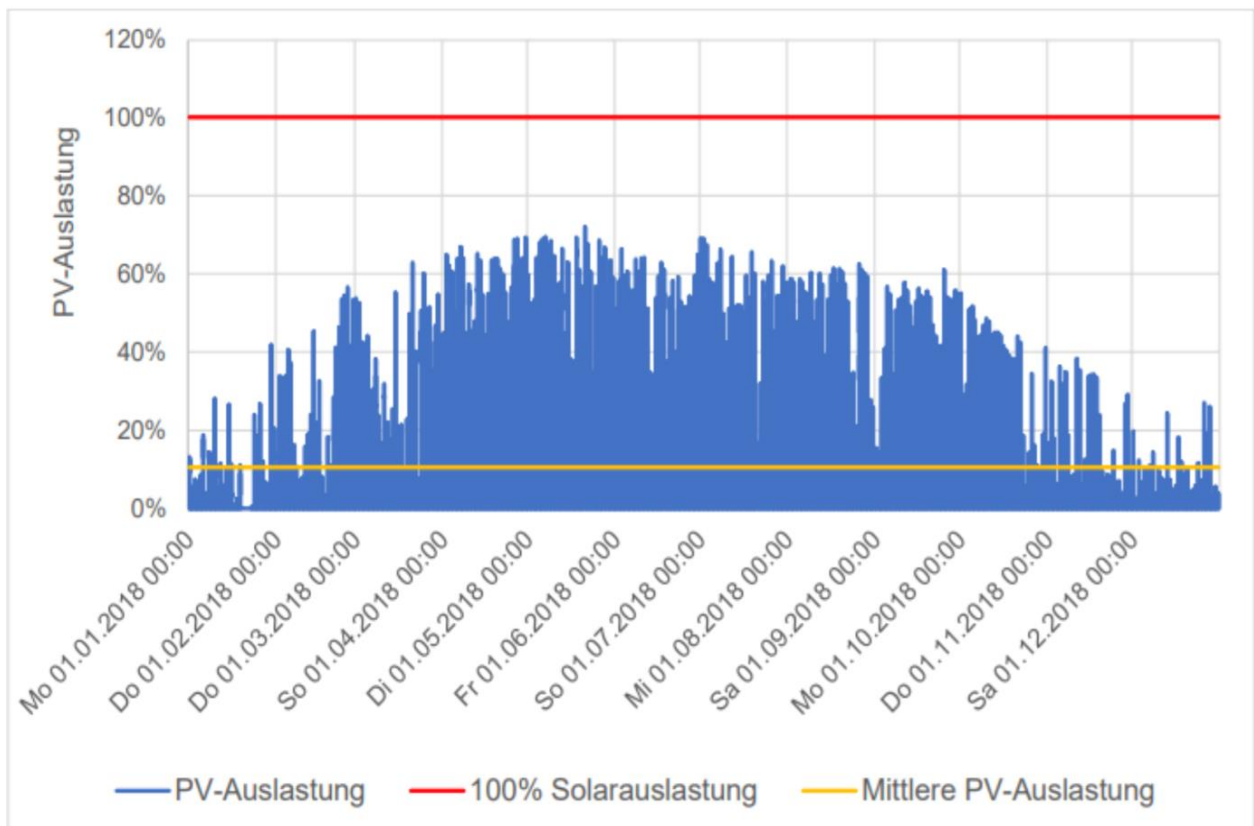


Abbildung 10: Zeitreihe der PV-Anlage aus 2018 [9]

Die Windkraftanlagen sind mit einer Nennleistung von 9,6 MW angegeben. Auf Grund der unbeständigen Windbedingungen lag die mittlere Leistung 2018 bei 2,6MW, wie Abb. 11 zeigt. Allerdings erzeugen die drei Anlagen über das Jahr verteilt 22,9 GWh, was den Energiebedarf des Standortes nahezu decken würde. Auf Grund langer Flauten müssten aber Energiespeicher in unwirtschaftlichem Maße beschafft werden, um die Energieversorgung zu sichern.

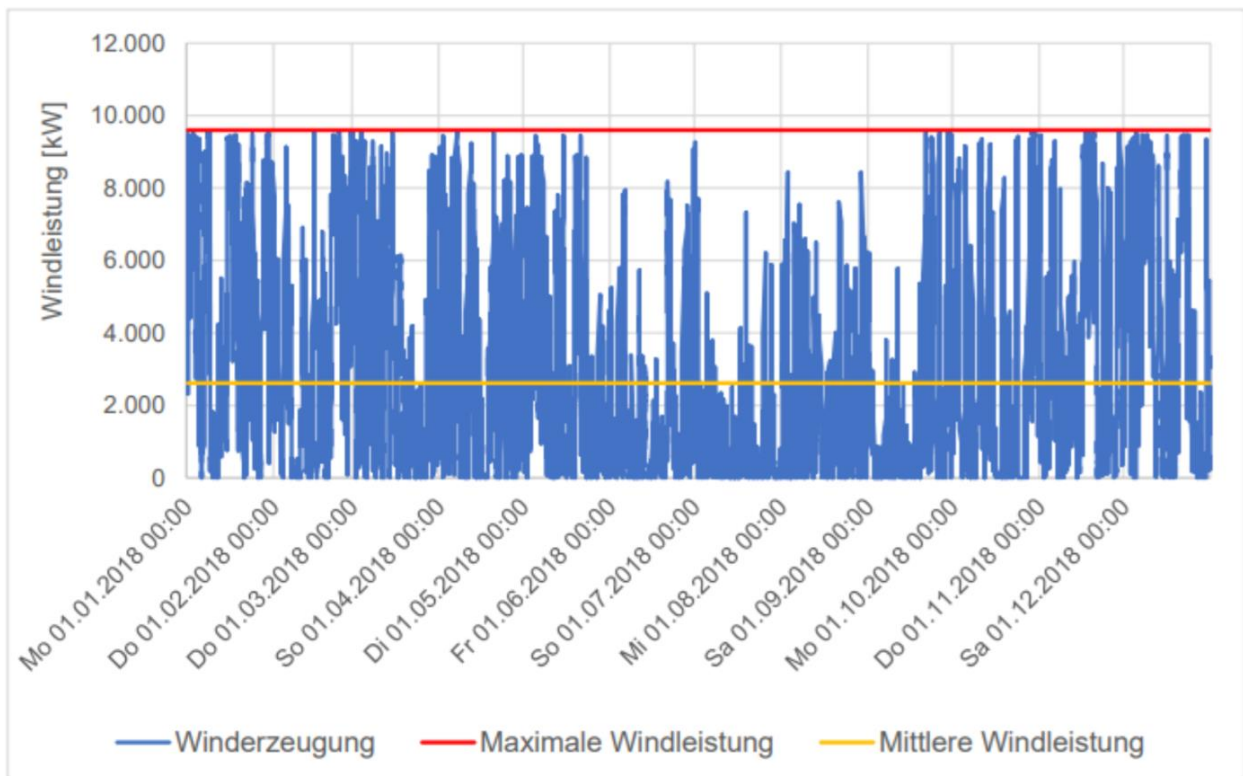


Abbildung 11: Zeitreihe der Windkraftanlage aus 2018 [9]

Das Biomasse-Dampfkraftwerk stellt den nötigen Prozessdampf für die Betonherstellung zur Verfügung. Die Anlage wird mit Hackschnitzeln befeuert. Das Kraftwerk kann flexibel auf einen schwankenden Energiebedarf reagieren und kann so wetterbedingte Dunkelphasen überbrücken. Aktuell hat die Anlage eine Leistung von 0,34 MW.

Im Unternehmen stehen bereits 2,6 MWh Speicherkapazität in Form von Lithium-Ionen-Batterien zur Verfügung. Mit diesem Speicher lassen sich bereits 25,5 GWh bei einem gesamten Jahresbedarf von 26 GWh aus den eigenen Quellen beziehen. [11] Das Defizit von 0,5 GWh muss aus dem öffentlichen Netz importiert werden.

Eine weitere Möglichkeit, die Energie zu speichern, ist eine Power-To-Gas-To-Power-Anlage. Hier wird der gewonnene Strom genutzt, um mit Hilfe einer Elektrolyseanlage Wasserstoff zu produzieren. Dieser wird in Hochdrucktanks gespeichert und kann bei Bedarf wieder zurückverstromt werden. Der Vorteil einer solche Anlage ist, dass sie nicht an die Verstromung gebunden ist. Aktuell laufen Untersuchungen, den gewonnenen Wasserstoff für die Fahrzeugflotte des Unternehmens zu nutzen.

3.3 Strommarktsituation

Der Strommarkt kommt an der Strommarktbörse zusammen. Hier werden täglich Angebot und Nachfrage für den folgenden Tag verglichen und so die entsprechenden Strompreise ermittelt. Anhand der ermittelten Strompreise können die Kraftwerksbetriebe ihre Produktion ausrichten. Dabei kommt es gelegentlich auch zu negativen Strompreisen. Das bedeutet, dass die Betreiber Geld zahlen müssen, wenn sie Strom in das Netz einspeisen. Einige Betreiber, wie z. B. Atomkraftwerke oder Betreiber bei denen Strom als Nebenprodukt von Prozessdampferzeugung entsteht, müssen dauerhaft Strom in das Netz einspeisen, wenn sie keine Speichermöglichkeiten haben. Das sorgt für ein Grundangebot an Strom auf dem Markt. Eingespeister Strom muss unmittelbar verbraucht werden. Das bedeutet, es muss Abnehmer geben. Deswegen sinkt der Preis so lange, bis sich für den Strom ein Käufer findet. In der Vergangenheit hat dies regelmäßig zu negativen Strompreisen geführt.

Umso niedriger der Strompreis ist, desto schwieriger ist es, eine dezentral versorgte Energiezelle wirtschaftlich zu betreiben. Je höher der Strompreis ist, desto mehr Kapital kann in die dafür notwendigen Anlagen investiert werden, da zum einen mehr gespart wird, wenn kein Strom aus dem öffentlichen Netz bezogen wird und zum anderen höhere Erlöse für den Überschuss erzielt werden, den die Energiezelle produziert. Außerdem müssen keine Anlagen abgeschaltet werden, um Kosten für eingespeisten Strom zu vermeiden.

In den letzten Monaten hat sich die Strommarktsituation stark verändert. Der sonst stabile Preis von 30 bis 50 €/MWh hat sich auf bis zu 300 €/MWh versechsfacht. Dies steht in direktem Zusammenhang mit dem Einmarsch Russlands in die Ukraine. Aber

auch ohne diese politische Krise befand sich der Strompreis bereits auf einem Niveau von 100 bis 200 €/MWh, wie in Abb. 12 zu erkennen ist.

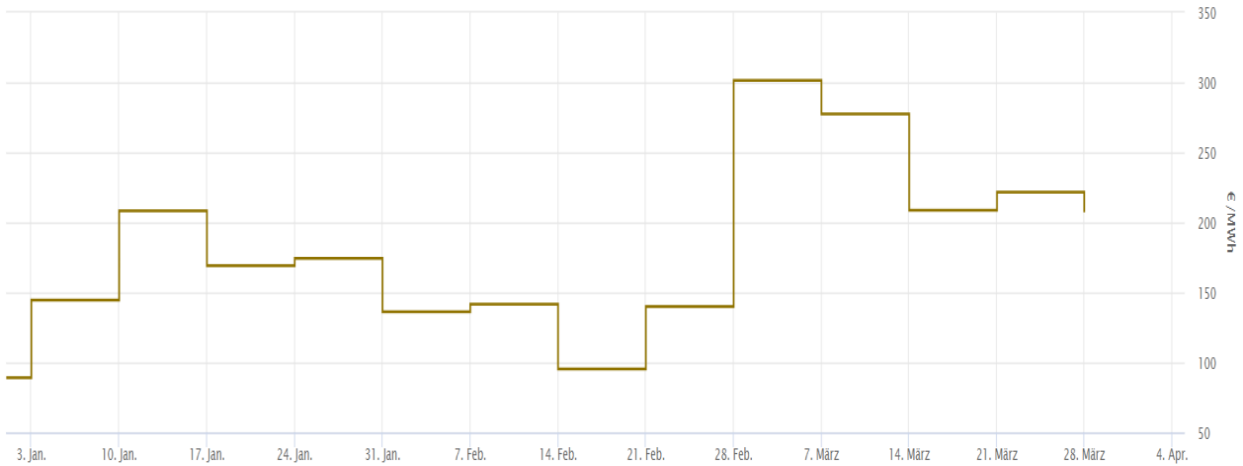


Abbildung 12: Strompreisverlauf zwischen Januar und März 2022 [12]

Die Grundlage für die Annahmen zur Strompreisentwicklung bilden die zur Verfügung stehenden Daten der Strombörse EPEX Spot in Paris. Abb. 13 zeigt die Strommarktpreise von 2018 bis 2020 aufbereitet als Dauerlinie. Um verschiedene Strompreisentwicklungen abzudecken, werden im Rahmen des Projektes mehrere Preisniveaus angenommen. In dieser Arbeit wird mit einem Durchschnittspreis von 80 €/MWh gerechnet.

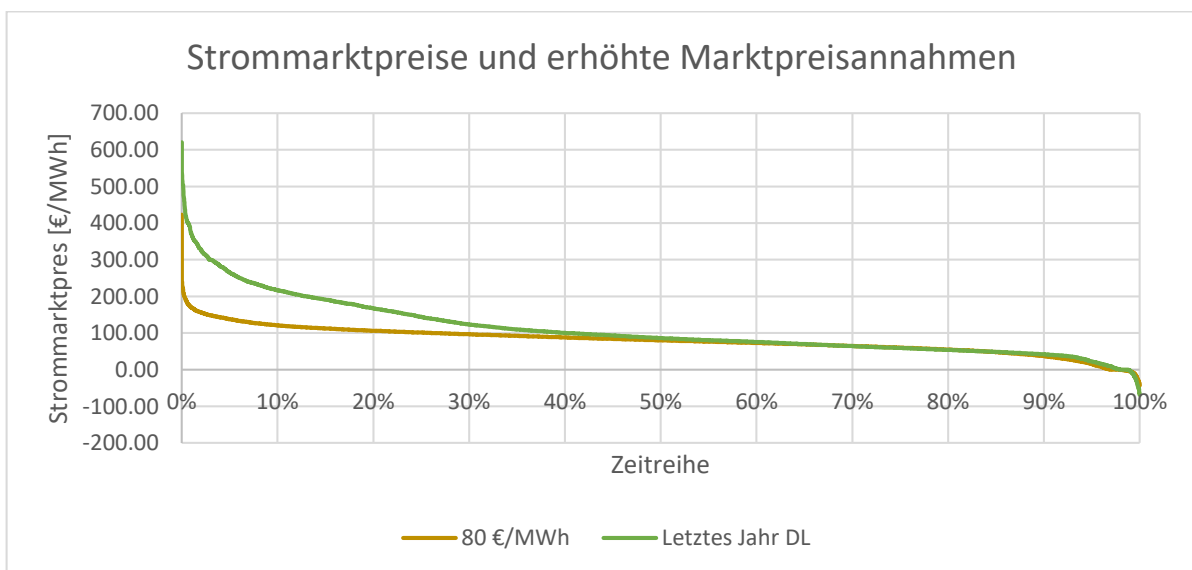


Abbildung 13: Strommarktpreise [12]

3.4 Bewirtschaftungsstrategie

Das primäre Ziel der Energiezelle Max Bögl ist die zuverlässige Selbstversorgung mit ausreichend Energie. Das sekundäre Ziel ist der gewinnbringende Export von Strom, um die Stromgestehungskosten so niedrig wie möglich zu halten. Es können maximal 19 MW exportiert werden. Der limitierende Faktor ist hier der Netzanschluss des Werks. In stündlichen Intervallen wird die Bewirtschaftung der Anlage geplant.

Dabei ist die Nutzung der Speicher entscheidend. Je nachdem ob im jeweiligen Zeitschritt ein Stromüberschuss oder ein Defizit vorliegt, wird der Speicher aufgeladen oder entladen. Sind zum Zeitpunkt einer Überschussphase alle Speicher gefüllt, kann der Strom zum aktuellen Marktpreis exportiert werden. Herrschen zum Exportzeitpunkt negative Strompreise, so müssen die Anlagen heruntergeregelt werden, um Kosten zu sparen. Kann nicht genug Strom produziert werden, müssen die Speicher in der Lage sein diese Defizitphase zu überbrücken. Dabei darf die benötigte Leistung nicht höher sein als die Entladeleistung der Speicher. Sollte sich im Laufe der Berechnung herausstellen, dass Strom importiert oder Last abgeworfen werden muss, wird das Szenario als ungültig erklärt.

3.5 Minimum der Stromgestehungskosten

Nach der Strategie im vorangegangenen Kapitel wird in einer Exceltabelle das Minimum der Stromgestehungskosten iterativ bestimmt. Dabei werden die PV- und Dampfleistung sowie die Kapazität von Batteriespeicher und Power-To-Gas-To-Power so lange variiert, bis das Optimum gefunden wurde. Dabei gibt es pro Variable vier Werte und die Bestandsleistung, die alle miteinander kombiniert werden, sodass 625 verschiedene Szenarien pro Durchgang betrachtet werden. Die anfangs groben Intervalle zwischen den Werten werden immer weiter verkleinert, bis sich keine weitere Verbesserung einstellt. Dabei wird auch berücksichtigt, ob sich ein gültiges oder ungültiges Szenario einstellt. Liegt der Stromgestehungspreis unter dem Marktpreis für den vollständigen Eigenbedarfsbezug, so wird die Schrift grün. Wird der Wert überschritten, wird die Schrift schwarz. Ist während der Berechnung abzusehen, dass der Wasserstoffspeicher nicht mehr komplett befüllt werden kann, muss davon

ausgegangen werden, dass der Speicher langfristig leerläuft. Gekennzeichnet wird ein solches Szenario mit roter Hintergrundfarbe. Am Ende der Berechnung wird das Minimum der Stromgestehungskosten gesucht, bei dem die Speicherstrategie nachhaltig ist. Dieses Feld wird gelb markiert. Das mittlere Strompreisniveau, die EEG Umlage und der Marktpreis für den vollständigen Eigenbedarfsbezug werden gemäß Abb. 14 festgelegt und führen zu den in Abb. 15 gezeigten Ergebnissen. Diese lauten wie folgt:

- Stromgestehungskosten: 151,55 €/MWh
- PV-Leistung: 50 MW
- Dampfkraftwerk: 1,7 MW
- Batteriespeicher: 20 MWh
- Elektrolyse: 0,45 MW

Mittlerer Strommarktpreis	80,00	€/MWh
angestzte EEG-Umlage	20,00	€/MWh
Marktpreis für vollständigen Eigenbedarfsbezug	180,99	€/MWh

Abbildung 14: Marktvoraussetzungen

Ergebnisarray	Dampf	H2	PV	Bat	40					48					50					52					54				
					20	18	19	20	21	20	18	19	20	21	20	18	19	20	21	20	18	19	20	21	20	18	19	20	21
3,6	0,1				171,87	172,92	172,49	171,87	171,22	169,60	171,32	170,25	169,60	169,47	170,00	171,34	170,69	170,00	169,87	170,61	171,44	171,29	170,61	170,01	170,89	172,18	171,56	170,89	170,77
	0,4				169,82	170,38	170,07	169,82	169,52	167,83	168,89	168,66	167,83	168,19	168,25	169,26	168,49	168,25	168,61	168,79	169,34	169,08	168,79	169,20	169,56	170,05	169,83	169,56	169,88
	0,45				169,49	170,08	169,73	169,49	169,78	168,00	168,57	168,27	168,00	168,39	168,43	168,93	168,70	168,43	168,81	169,01	169,48	169,21	169,01	169,34	169,78	169,72	169,51	169,78	170,23
	0,55				169,89	169,88	169,60	169,89	169,59	168,36	168,95	168,69	168,36	168,71	168,88	168,80	168,59	168,88	169,21	169,39	169,35	169,04	169,39	169,71	170,15	170,08	169,84	170,15	170,47
	0,6				170,02	170,07	169,75	170,02	169,79	168,63	168,60	168,86	168,63	168,96	168,98	168,93	168,68	168,98	169,35	169,50	168,91	169,26	169,50	169,86	170,27	169,70	170,07	170,27	170,74
1,5	0,1				182,08	188,47	185,40	182,08	179,69	174,35	180,59	177,42	174,35	172,27	173,81	179,99	176,66	173,81	171,45	173,01	179,01	175,83	173,01	170,87	172,63	178,38	175,52	172,63	170,49
	0,4				156,38	159,06	157,47	156,38	155,94	152,64	153,88	153,12	152,64	152,56	152,71	153,64	152,80	152,71	152,66	152,75	153,69	152,85	152,75	152,59	152,95	153,50	153,03	152,95	153,25
	0,45				155,92	157,22	156,37	155,92	155,82	152,82	152,82	152,63	152,82	152,73	152,51	152,86	152,67	152,51	152,80	152,92	152,88	152,68	152,92	152,77	153,11	153,17	153,33	153,11	153,04
	0,55				155,96	155,93	156,10	155,96	156,25	152,79	152,82	153,01	152,79	152,79	152,94	152,87	152,66	152,94	152,84	152,87	152,90	153,10	152,87	152,78	153,14	153,43	153,31	153,14	153,30
	0,6				156,14	156,15	155,93	156,14	156,07	153,03	152,97	152,75	153,03	152,84	152,77	153,05	152,81	152,77	152,98	152,69	152,95	152,75	152,69	152,97	153,30	153,27	153,47	153,30	153,19
1,7	0,1				175,29	180,55	177,83	175,29	173,20	168,43	174,02	171,40	168,43	166,58	167,99	173,28	170,39	167,99	165,77	167,50	172,83	169,92	167,50	165,28	167,40	172,51	169,39	167,40	165,51
	0,4				154,70	155,99	155,16	154,70	155,04	151,78	152,41	151,85	151,78	152,01	151,86	152,19	151,67	151,86	151,80	151,91	152,20	152,43	151,91	152,17	152,52	152,86	152,62	152,52	152,53
	0,45				154,96	155,20	154,67	154,96	154,84	151,98	151,90	152,03	151,98	152,21	151,55	151,90	151,77	151,55	151,86	152,02	152,45	152,23	152,02	151,99	152,28	152,70	152,82	152,28	152,63
	0,55				154,87	154,84	155,04	154,87	155,22	151,86	151,89	152,02	151,86	152,24	152,05	151,96	151,75	152,05	151,96	152,05	152,37	152,26	152,05	151,95	152,34	152,64	152,81	152,34	152,66
	0,6				155,08	154,99	154,90	155,08	155,02	152,09	152,07	151,78	152,09	151,98	151,83	151,72	151,87	151,83	152,11	152,18	152,12	152,09	152,18	152,19	152,51	152,88	152,59	152,51	152,88
1,9	0,1				170,92	175,81	172,87	170,92	168,66	164,88	169,86	167,17	164,88	163,16	164,36	168,80	166,42	164,36	163,02	163,84	168,32	165,83	163,84	162,45	164,08	168,21	165,78	164,08	162,74
	0,4				154,78	155,04	154,49	154,78	155,07	151,96	152,29	152,52	151,96	152,32	152,15	152,18	152,24	152,15	152,55	152,58	152,76	152,58	152,62	153,14	152,69	152,91	153,14	153,09	
	0,45				155,05	154,58	154,80	155,05	154,97	152,13	152,11	152,26	152,13	152,49	152,27	152,26	152,47	152,27	152,23	152,82	152,31	152,51	152,82	152,70	152,97	152,82	153,05	152,97	153,34
	0,55				154,97	154,89	154,70	154,97	154,92	152,11	152,39	152,26	152,11	152,52	152,36	152,19	152,46	152,36	152,33	152,87	152,70	152,42	152,87	152,81	153,00	152,87	153,22	153,00	153,37
	0,6				154,69	154,72	154,86	154,69	155,06	152,33	152,28	152,38	152,33	152,70	152,45	152,36	152,19	152,45	152,44	152,56	152,44	152,73	152,56	152,97	153,11	152,99	152,84	153,11	153,50
2,1	0,1				167,11	171,47	169,08	167,11	165,42	161,84	166,38	163,98	161,84	160,47	161,48	165,73	163,62	161,48	160,41	161,28	165,40	163,00	161,28	160,19	161,45	165,43	163,23	161,45	160,43
	0,4				154,53	154,41	154,65	154,53	154,86	152,04	152,42	152,26	152,04	152,38	152,75	152,24	152,48	152,75	152,67	152,76	152,77	152,57	152,76	153,17	153,39	152,84	153,10	153,39	153,30
	0,45				154,74	154,67	154,49	154,74	155,01	152,32	152,23	152,08	152,32	152,67	152,56	152,48	152,32	152,56	152,87	152,98	152,94	152,76	152,98	152,91	153,13	153,09	153,30	153,13	153,50
	0,55				154,77	154,64	154,92	154,77	155,12	152,75	152,22	152,52	152,75	152,59	152,63	152,44	152,78	152,63	152,99	153,05	152,91	152,72	153,05	152,98	153,23	153,11	153,35	153,23	153,49
	0,6				154,90	154,85	154,66	154,90	154,86	152,64	152,40	152,29	152,64	152,50	152,79	152,63	152,49	152,79	152,66	152,80	152,70	152,94	152,80	153,14	153,39	153,36	153,10	153,39	153,36

Abbildung 15: Ergebnisarray

3.6 Sensitivitätsanalyse

Bei der Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen eines weiteren Ausbaus oder Reduzierung der verschiedenen Anlagen untersucht. Dazu werden die Werte des Optimums hinsichtlich der Kostenentwicklung bei einer Variation untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 16 und 17 dargestellt.

Generell ist zu erkennen, dass bei einem Ausbau die Kosten weniger stark steigen als bei einer Reduzierung der Anlagen. Dabei ist der Ausbau der Power-To-Gas-To-Power-Anlage am unempfindlichsten. Die Dampftechnik und Batteriespeicher treiben die Kosten bei einem Ausbau um 40% nur ca. 2 €/MWh nach oben. Am empfindlichsten reagiert das System bei einer Veränderung der PV-Leistung. Hier steigt der Strompreis um 11 €/MWh bei einem Ausbau um 40%. Allerdings bleibt die Anlage in jedem Fall wirtschaftlich.

Sensitivitätsanalyse Parameterbereich											Minimum												
Suchpunkte	-40%	-30%	-20%	-15%	-10%	-8%	-6%	-4%	-3%	-2%	-1%	0%	1%	2%	3%	4%	6%	8%	10%	15%	20%	30%	40%
PV [MW]	30,00	35,00	40,00	42,50	45,00	46,00	47,00	48,00	48,50	49,00	49,50	50,00	50,50	51,00	51,50	52,00	53,00	54,00	55,00	57,50	60,00	65,00	70,00
Dampf [MW]	1,02	1,19	1,36	1,45	1,53	1,56	1,60	1,63	1,65	1,67	1,68	1,70	1,72	1,73	1,75	1,77	1,80	1,84	1,87	1,96	2,04	2,21	2,38
Batterie [MWh]	12,00	14,00	16,00	17,00	18,00	18,40	18,80	19,20	19,40	19,60	19,80	20,00	20,20	20,40	20,60	20,80	21,20	21,60	22,00	23,00	24,00	26,00	28,00
Elektrolyse [MW]	0,27	0,32	0,36	0,38	0,41	0,41	0,42	0,43	0,44	0,44	0,45	0,450	0,45	0,46	0,46	0,47	0,48	0,49	0,50	0,52	0,54	0,59	0,63
zugehörige Stromgestehungskosten																							
PV [MW]	165,67	159,12	154,96	153,53	153,05	152,56	152,03	151,98	151,94	151,95	151,97	151,55	151,84	151,82	151,83	152,02	152,39	152,28	153,05	153,74	155,50	158,03	162,06
Dampf [MW]	159,08	154,33	153,21	153,14	152,43	152,45	152,24	152,08	151,80	151,73	151,82	151,55	151,75	152,02	151,87	151,94	152,09	151,93	151,98	152,18	152,31	152,64	153,68
Batterie [MWh]	159,90	156,25	153,18	152,18	151,90	152,04	151,76	151,82	151,88	151,86	151,93	151,55	151,65	151,78	151,82	151,85	152,03	152,07	151,84	152,17	152,22	153,09	153,59
Elektrolyse [MW]	153,85	152,25	151,64	151,77	151,80	151,86	151,93	152,06	152,01	152,05	151,57	151,55	151,58	151,62	151,65	151,77	151,80	151,82	151,86	151,88	151,99	151,85	151,89

Abbildung 16: Ergebnis Sensitivitätsanalyse tabellarisch

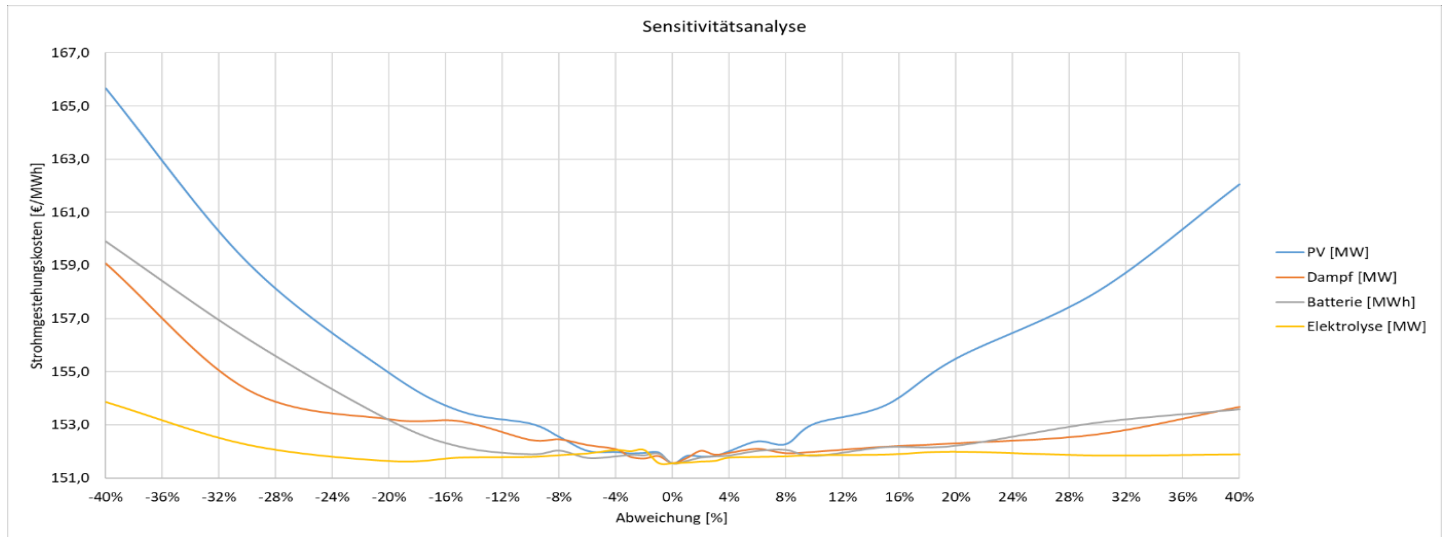


Abbildung 17: Ergebnis Sensitivitätsanalyse graphisch

4 Fazit und Ausblick

Die Arbeit kommt zu dem Ergebnis, dass eine dezentrale Energieversorgung des Standortes der Firma Max Bögl in Sengenthal wirtschaftlich sein kann. Voraussetzung dafür ist ein konstantes Strompreisniveau über 152 €/MWh. Mit steigenden Energieträgerkosten und der politischen Richtung, die von der aktuellen Regierung eingeschlagen wird, sind solche Energiepreise durchaus realistisch. Darüber hinaus ist aktuell zu sehen, dass in Krisenzeiten eine unabhängige Energieversorgung von großem Vorteil sein kann.

Bei der Batterietechnologie wird es eine zukünftige Aufgabe sein, die Produktion nachhaltiger und weniger umweltschädlich zu gestalten. Die Gewinnung von Lithium ist in einigen Teilen der Welt nur mit erheblichen Eingriffen in die Natur möglich. Es gibt Forschungsprojekte, die sich z. B. mit Natrium-Ionen- Batterien beschäftigen, die in der Produktion auf Grundwasser verzichten können. Deren geringere Energiedichte ist für ein Unternehmen wie Max Bögl mit ausreichend Platzangebot kein wirklicher Nachteil. [14]

5 Quellen

- [1] VDE Studie Kompendium Li-Ionen-Batterie, verfügbar [online]: <https://www.dke.de/resource/blob/933404/dd44d15918ce4d4aefc363a4ef1490e1/kompendium-li-io-batterien-2021-de-data.pdf> [Zugriff 21.03.2022]
- [2] P. Kurzweil und O.K.Dietlmeier, Elektrochemische Speicher, Berlin, Springer Vieweg, 2018
- [3] FAZ, Manfred Lindinger, Warum Lithium-Akkus brennen können, verfügbar [online]: <https://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-mehr/ein-computer-modell-erklaert-das-dendritenwachstum-in-lithium-akkus-17235382.html> [Zugriff: 28.03.2022]
- [4] Reiner Korthauer Hrsg., Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, Berlin, Springer Vieweg, 2013
- [5] Tesvolt, Lithiumspeicher TPS Flex, verfügbar [online]: <https://www.tesvolt.com/de/produkte/tps-flex.html> [Zugriff 31.03.2022]
- [6] Bredenoord, Battery Box, verfügbar [online]: <https://www.bredenoord.com/de/mieten/hybridenergie/battery-box/> [Zugriff 31.03.2022]
- [7] EnBW, Mobile Batteriespeicher der EnBW, verfügbar [online]: <https://www.enbw.com/unternehmen/konzern/energieerzeugung/speicherung/mobile-batteriespeicher/> [Zugriff 31.03.2022]
- [8] Git Sicherheit, Schutz für die Speicher, verfügbar [online]: <https://www.git-sicherheit.de/topstories/brandschutz/schutz-fuer-die-speicher-brandschutzkonzept-fuer-stationaere-lithium-ionen-ba> [Zugriff 31.03.2022]
- [9] Patrick Scholz, Regenerative elektrische Selbstversorgung mit marktorientiertem Überschusseexport aus der Energiezelle Max Bögl am Standort Sengenthal. verfügbar [online]: <https://opus4.kobv.de/opus4-ohm/frontdoor/index/index/docId/783>
- [10] Andreas Wagner, Photovoltaik Engineering, Berlin, Springer Vieweg, 2019
- [11] Max Bögl, verfügbar [online]: <https://max-boegl.de/news/energiezelle-max-boegl> [Zugriff 04.04.2022]

[12] Bundesnetzagentur, Markt-Großhandelspreise, verfügbar [online]:
<https://www.smard.de> [Zugriff 04.04.2022]