

Hochschule Merseburg



Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften

Studiengang Maschinenbau / Mechatronik / Physiktechnik

Bachelorarbeit

**Firmeninterne Stabilisierung des Elektroenergiebezuges am
Beispiel von ADDINOL Lube Oil GmbH**

Erstbetreuer Prof. Dr. Ing. Dietmar Bendix

Zweitbetreuer Dipl. -Kfr. Kerstin Dorn

Abgabetermin 14. Mai 2024

eingereicht von **Paramjeet Singh**

Abstract:

This thesis focuses on stabilizing the internal electricity supply of ADDINOL Lube Oil GmbH through the optimization of energy processes. Given the increasing political emphasis on reducing greenhouse gas emissions, as outlined in Germany's Climate Protection Act, the company aims to reduce its reliance on conventional energy sources. A key objective is to integrate photovoltaic (PV) systems with a total capacity of 800 kWh, which will supply more than 60% of the factory's electricity demand. To enhance self-sufficiency, energy storage systems are planned to utilize excess energy during low-demand periods and to manage load peaks effectively.

In addition to renewable energy generation, the implementation of an advanced load management system is critical. This system aims to reduce costs associated with peak electricity demand (capacity charges) and ensure grid stability year-round. The work includes an analysis of storage technologies, including compressed air energy storage (CAES) systems, which can further optimize energy use and reduce operational costs. This research explores both the technical and economic viability of these solutions to achieve greater energy efficiency and cost savings in production processes.

Schlagwörter

Compressed Air Energy Storage, CAES

Druckluftspeicher

Lastganganalyse

Lastmanagement

PV

Speichertechnologie

Viertelstundenwert

Wirtschaftlichkeit

Inhalt

<i>1</i>	<i>Motivation</i>	<i>1</i>
1.1	Politische Rahmenbedingungen.....	1
1.2	Istzustand Firma ADDINOL Lube Oil GmbH	2
1.3	Rahmenbedingungen Leune	5
1.4	Gewollte Zielzustand	7
<i>2</i>	<i>Stand des Marktes</i>	<i>8</i>
2.1	Aktuelle Entwicklungen im Speichertechnologie.....	8
2.2	Interne Speicher	13
2.3	Lastmanagement	18
<i>3</i>	<i>Analyse der Elektroenergiebedarf ADDINOL</i>	<i>20</i>
3.1	Lastganganalyse.....	20
3.2	Extremverbraucher	26
<i>4</i>	<i>Eigenerzeugung</i>	<i>28</i>
<i>5</i>	<i>Lastmanagementmöglichkeiten</i>	<i>32</i>
<i>6</i>	<i>Speicherung</i>	<i>35</i>
6.1	Druckluftspeichertechnologie.....	35
6.2	Modellbildung	37
6.3	Wirtschaftlichkeit des Speichers:	43
<i>7</i>	<i>Zusammenfassung</i>	<i>49</i>
<i>8</i>	<i>Literaturverzeichnis</i>	<i>50</i>
<i>9</i>	<i>Anhang</i>	<i>52</i>
<i>10</i>	<i>Eidesstattliche Erklärung</i>	<i>54</i>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ziel der Bundesregierung nach dem Klimaschutzgesetz.....	1
Abbildung 2: Energieverbrauch ADDINOL.....	3
Abbildung 3: Strombedarf ADDINOL.....	4
Abbildung 4: Einteilung der Energiespeichertechnologie	8
Abbildung 5: Energiespeichertechnologie nach Speicherkapazität und Ausspeicherdauer	9
Abbildung 6:Aufbau Drehmassenspeicher	10
Abbildung 7: Aufbau der Doppelschichtkondensatoren.....	12
Abbildung 8: Einteilung elektrochemische Speicher.....	12
Abbildung 9: Stoffliche Speicherung	13
Abbildung 10 : Reaktion des Ladens und Entladens einer Batterie und ihre Spannungsverläufe.....	14
Abbildung 11: Batterietechnologien nach Leistungs-und Energiedichte	14
Abbildung 12: Aufbau Bleibatterie.....	15
Abbildung 13:Schematische Aufbau und Funktionsweise einer Lithiumionen-Zelle....	17
Abbildung 14: TESVOLT Energy Manager.....	19
Abbildung 15: Stromverteilungsnetz ADDINOL.....	20
Abbildung 16: Lastganganalyse nach Bedarf und Hauptverteilungen	20
Abbildung 17: Lastganganalyse der Hauptverteilung NSHV01.....	21
Abbildung 18: Lastganganalyse NSHV01 in der Woche	21
Abbildung 19: Lastganganalyse NSHV02 am Wochenende.....	22
Abbildung 20:Lastganganalyse der Unterverteilung NE17 Q6.....	22
Abbildung 21::Lastganganalyse der Unterverteilung NE22 Q4.....	23
Abbildung 22: Lastganganalyse der Hauptverteilung NSHV02.....	23
Abbildung 23: Lastganganalyse der Unterverteilung NE08 Q7	24
Abbildung 24:Lastganganalyse der Unterverteilung NE02 Q5	24
Abbildung 25:Lastganganalyse der Unterverteilung NE03 Q7	25
Abbildung 26: Lastganganalyse der Unterverteilung NE09 Q4.....	25
Abbildung 27: Zusammensetzung der Unterverteilungen und NSHV 02	26
Abbildung 28: Lastspitzen Analyse der Extrem-Verbraucher der Hauptverteilung NSHV 02 im Dezember.....	26
Abbildung 29: Analyse der Leistungsspitze im Dezember	27
Abbildung 30: Monatliche PV-Erzeugungsleistung	28
Abbildung 31: Monatliche Elektroenergie Bedarf und Erzeugung	29
Abbildung 32: Analyse der Elektroenergie Bedarf und Erzeugung für den Monat April	29
Abbildung 33: Analyse der Hauptverteilung NSHV 01 Bedarf und Erzeugung.....	30
Abbildung 34: Verhalten der PV-Erzeugungsleistung	30
Abbildung 35:Analyse der Hauptverteilung NSHV 02 Bedarf und Erzeugung.....	31
Abbildung 36: Verhalten der PV-Erzeugungsleistung NSHV 02	32
Abbildung 37: Analyse der Lastspitzenverschiebung	33
Abbildung 38:Zusammenanschluss der Unterverteilungen der E-Zentrale.....	33
Abbildung 39: Schematische Darstellung eines diabaten (Links) und adiabaten (Rechts) Druckluftspeichersystems	35
Abbildung 40: Einteilung der Luftenergiespeicher nach Prozesstemperatur	36

Abbildung 41: Schematische Darstellung des modellierten Druckluftspeichersystems .	37
Abbildung 42: Druckverhalten der Behälter	39
Abbildung 43: Massenverlauf der Behälter	39
Abbildung 44: Temperaturverlauf der Wärmespeicher	40
Abbildung 45: Temperaturverlauf des Wärmespeicher1 nach den Zeitabschnitten	40
Abbildung 46: Gesamt thermische Wirkungsgrad	41
Abbildung 47: Gesamtwirkungsgrad	41
Abbildung 48: Mechanische Wirkungsgrad von Hydromaschinen	42
Abbildung 49: Dauer kennlinie	45

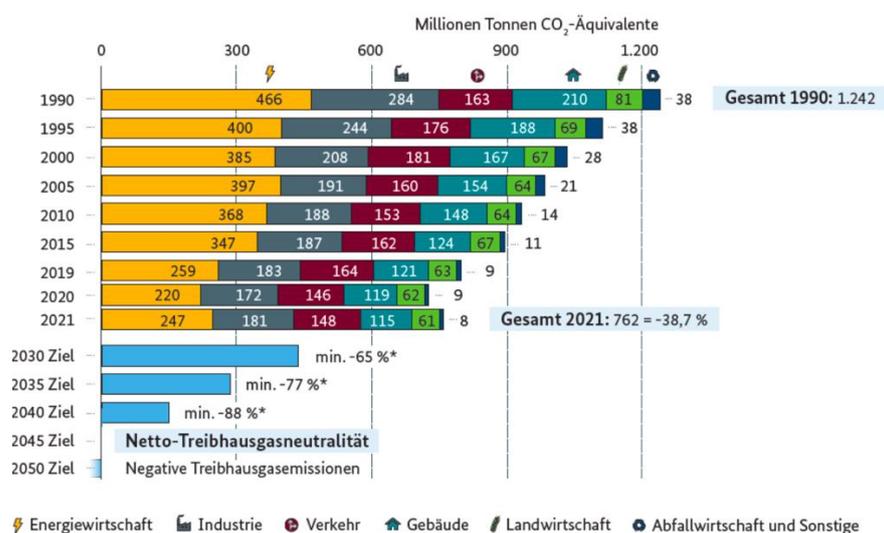
Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Leistungsdaten der Unterverteilung NE17 Q6	22
Tabelle 2: Leistungsdaten der Unterverteilung NE22 Q4	23
Tabelle 3: Leistungsdaten aller Unterverteilungen ADDINOLs	26
Tabelle 4: Komponente des Druckluftspeichersystems	37
Tabelle 5: Ermittlung der zu speichernde PV-Überschussenergie	43
Tabelle 6: Speicherkosten 300KWh	44
Tabelle 7: Speicherkosten 500KWh	44
Tabelle 8: Amortisationszeit für den Fall2	45
Tabelle 9: Nächtliche Verbrauchenergie	46
Tabelle 10: Berechnung für die Verbrauchenergiemenge über 220KW Leistungsspitze	46
Tabelle 11: Verbrauchsenergiemenge im Winter für die Lastspitzenkappung.....	46
Tabelle 12: Berechnung für die Ermittlung der Ausgaben	47
Tabelle 13: Berechnung für die Ermittlung der Einnahmen.....	47
Tabelle 14: Ermittlung der Amortisationszeit für Fall 3.....	48
Tabelle 15: Thermische Wirkungsgrad.....	49
Tabelle 16: Rückspeisung	49

1 Motivation

1.1 Politische Rahmenbedingungen

Die Bundesregierung Deutschland ist nach dem Klimaschutzgesetzes verpflichtet bis 2030 die Treibhausgasemissionen um 65 Prozent im Vergleich zum Jahr 1990 zu senken und bis zum 2045 Treibhausgasneutralität zu erreichen. Auch die Europäische Union hat das Jahr 2050 für das Erreichen der Klimaneutralität als Ziel gesetzt. (bmwk, Klimaschutzbericht 2022 der Bundesregierung nach § 10 Absatz 1 des Bundes - Klimaschutzgesetzes, 2022)



*Minderungsziele gegenüber 1990

Abbildung 1: Ziel der Bundesregierung nach dem Klimaschutzgesetz

Quelle: (bmwk, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2024)

Um die Ziele der Dekarbonisierung zu erreichen, soll bis zum 2030 der Anteil des Bruttostromverbrauchs auf 80 Prozent ansteigen. Eine wichtige und einer der günstigsten erneuerbaren Stromerzeugungsquelle ist Photovoltaik (PV). Bis Ende 2022 hat Deutschland insgesamt 150 GW Kapazität aus erneuerbaren Energiequellen erreicht. Davon waren rund 45% (67,4 GW) der gesamt installierten Leistung nun aus PV. (bmwk, Klimaschutzbericht 2022 der Bundesregierung nach § 10 Absatz 1 des Bundes - Klimaschutzgesetzes, 2022). Die installierte Leistung soll bis 2030 auf 215 GW steigern. (bmwk, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2024)

1.2 Istzustand Firma ADDINOL Lube Oil GmbH

Die ADDINOL Lube Oil GmbH ist eines der wenigen konzernunabhängigen, mittelständischen Unternehmen der deutschen Mineralölindustrie, das mit Vertriebspartnern in mehr als 90 Ländern auf allen Kontinenten vertreten ist. ADDINOL Hochleistungs-Schmierstoffe zeichnen sich durch ihre außergewöhnlich lange Lebensdauer aus. Sie bieten einen zuverlässigen Schutz vor Verschleiß und verlängern somit die Lebensdauer der geschmierten Komponenten erheblich. Darüber hinaus stellen sie äußerst effektive Instrumente dar, um den Energieverbrauch zu reduzieren und die Effizienz der Anlagen zu steigern. Auf diese Weise tragen sie dazu bei, die natürlichen Ressourcen zu schonen und gleichzeitig die Betriebskosten zu senken. ADDINOL Lube Oil GmbH bietet ein breites Sortiment von mehr als 650 verschiedenen Produkten an, darunter Schmieröle, Schmierfette, Pasten und Sprays, die für die Anwendungsbereiche Automotive und Industrie geeignet sind. Die Entwicklung konzentriert sich vor allem auf verschiedene Produktgruppen, darunter Leichtlaufmotorenöle für PKW und Nutzfahrzeuge, Gasmotorenöle, Industriegetriebeöle, Hochtemperatur-Kettenöle und Turbinenöle.

Produktion:

Die Produktion der Schmierstoffe liegt an der Chemiestandort Leune. Die Herstellung der Produkte findet in den Produktionshallen der Fabrik statt. Für die Produktion werden die Tanks mit Rohstoffen, Mischer (Rührer) für die Mischung verschiedenen Rohstoffen als hauptsächliche Anlagen verwendet. Da es um die Schmierstoffe geht, die die meisten flüssig sind, spielen die physikalischen Eigenschaften wie die Dichte und Zähigkeit für die optimale Herstellung der Produkte sehr wichtige Rolle. Dichte und Zähigkeit sind von der Temperatur abhängig. Um konkrete Temperaturen der Rohstoffe sowie Endprodukte zu halten, damit bestimmte Zähigkeit der Produkte gewährleistet wird, wird Wärme durch verschiedene Methoden zugeführt. Mitteldruck Dampf von 12 bar bis 15 bar und Heißwasser zwischen 70°C und 110°C werden als Energieträger verwendet. (INFRALEUNA, 2021)

Außerdem wird Wärme durch die elektrische Energie mit der elektrischen Begleitheizung für die Leitungen und mit elektrischen Heizstäbe für die Tanks, Tanks sowohl für die Rohstoffe als auch für die Fertigprodukte, und Wärmekammern für die Erwärmung der Fässer verwendet. Fertigprodukte werden in den Lagerhallen teilweise klimatisiert gelagert.

Zwischen April und Oktober 2019 wurden insgesamt 12 Tanks mit je 50 m³ Volumen und 8 Blending-Tanks mit je 100 m³ Volumen errichtet, um der weltweit steigenden Nachfrage nach ADDINOL-Produkten gerecht zu werden. Diese Erweiterung ermöglicht die Lagerung größerer Mengen an Rohstoffen wie Grundölen und Additiven. Zusätzlich wird die Mischung und Lagerung von volumenstarken Produkten mit einfachen bis

mittleren Rezepturen vereinfacht, was die Produktionsabläufe entlastet und die Mischtonnage pro Durchgang erhöht. (ADDINOL Lube Oil GmbH, 2023)

Durch den Bau der neuen Lagerhalle 4 im Jahr 2022 hat ADDINOL den verfügbaren Lagerplatz für Fertigprodukte verdoppelt. Dies ermöglicht eine erhöhte Vorfertigung, um Lieferengpässe zu vermeiden. Gleichzeitig hat das Unternehmen in erneuerbare Energien investiert, indem eine Photovoltaikanlage auf dem Dach der Lagerhalle installiert wurde. Diese Anlage wird voraussichtlich ein Drittel des Strombedarfs des Unternehmens abdecken. (ADDINOL Lube Oil GmbH, 2023)

Für die Herstellung der Schmierstoffe wird Elektroenergie und Wärme benötigt. Jährlich wird etwa 1.300 MWh Elektro Energie und 7.721 MWh Wärme in Form von Mitteldruck Dampf (6.679 MWh; 3.389 Tonnen) und Warmwasser (1.040 MWh) verbraucht. In der Abbildung 2 ist die Anteile der Gesamtenergie dargestellt.

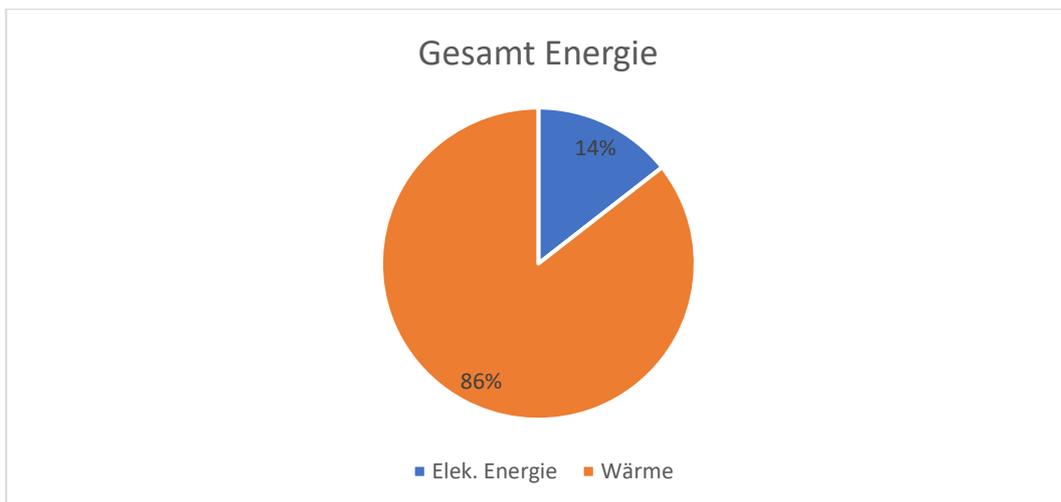


Abbildung 2: Energieverbrauch ADDINOL

In der Abbildung 3 ist der monatliche Elektroenergiebedarf dargestellt. Wie es zu sehen ist, dass der Bedarf der Elektroenergie im Winter Monaten höher als in den Sommer Monaten ist. Einerseits hängt der Bedarf der Elektroenergie von der zu produzierende Fertigproduktmenge als auch ein Teil von der Elektroenergie abhängigen Heizprozesse ab.

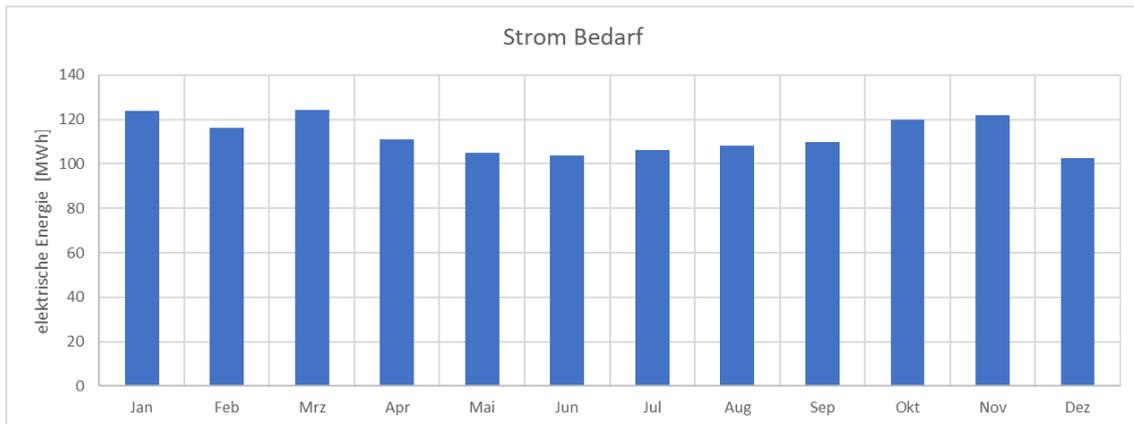


Abbildung 3: Strombedarf ADDINOL

Die Elektroenergie und Wärme wird von einem Energieversorgungsunternehmen gewährleistet. Die Elektroenergie wird durch Zwei Niederspannungsverteilungen und Sechs Unterverteilungen für verschiedenen Produktionshallen, Lagerhallen versorgt. Für die Verarbeitung, Lagerung und die Transportation der Rohstoffe bzw. Produkte wird mechanische Energie durch Maschinen benötigt. Die Elektroenergie wird hauptsächlich für diese Maschinen angewendet. Die Hauptverbraucher der Elektromaschinen sind Pumpen, Rührwerke, Druckluftherzeuger, Lüftungsanlage, Heizungs- und Kühlungsanlagen.

1.3 Rahmenbedingungen Leuna

Leuna befindet sich im dynamischen Industriegebiet Leipzig-Halle und liegt inmitten einer bereits voll entwickelten wirtschaftlichen Umgebung. Seit 1990 haben namhafte Unternehmen wie ARKEMA, BASF, DOMO, Eastman, Innospec, Linde und TOTAL sowie zahlreiche mittelständische Firmen mehr als 6,5 Milliarden Euro in den Leuna Chemical Komplex investiert. Aktuell sind weitere bedeutende Investitionen in Planung oder bereits in Umsetzung, was eine beispielhafte Dynamik innerhalb der Europäischen Union gewährleistet. Der Leuna-Chemiekomplex, mit seiner langen Tradition in herausragender chemischer Produktion, bietet ein breites Spektrum von Spezial- bis Massenchemikalien, das gleichermaßen für mittelständische und größere Chemieunternehmen attraktiv ist. Chemieorientierte Unternehmen und servicebezogene Anbieter finden hier ausgezeichnete Wachstumsmöglichkeiten, um ihre Position in dieser florierenden Umgebung zu stärken

Auf dem Leuna-Chemiekomplex spielen effiziente Transportmittel eine zentrale Rolle, da 70 Prozent der produzierten Güter per Bahn das Gelände verlassen. Seit 1989 wurde eine durchschnittliche Reduzierung der Umweltauswirkungen um 95 Prozent erzielt. Ein Netzwerk von 600 Kilometern Pipelines zwischen den Unternehmen vor Ort sorgt für kurze Transportzeiten. Leuna bietet ideale Voraussetzungen für Ihre Produktionsstätte. Durch Pipelines wird der Standort mit Erdöl versorgt. Das Erdgasnetz des Standorts ist über zwei Anbindungen an das Fernleitungsnetz der ONTRAS angeschlossen, was eine zuverlässige Energieversorgung gewährleistet. Die Kraftwerke der InfraLeuna GmbH liefern Dampf und elektrische Energie in verschiedenen Druck- und Spannungsebenen in die von InfraLeuna betriebenen Versorgungsnetze. (INFRALEUNE, 2024)

Die beeindruckende Fläche des Chemiekomplexes erstreckt sich über 1.300 Hektar, vergleichbar mit etwa 1.820 Fußballfeldern. Täglich sind 5.000 Fahrzeuge innerhalb des Komplexes unterwegs, der insgesamt 10.000 Mitarbeiter beschäftigt. Jährlich werden am Standort 280.000 Tankwagen manövriert – in einer Reihe würden sie von Leuna bis nach Novosibirsk (4.480 km) reichen. Die eindrucksvolle Produktionsleistung von 12.000.000 Tonnen pro Jahr geht einher mit einer Gesamtinvestitionssumme von 6.500.000.000 Euro seit 1990 in den Chemiekomplex. (INFRALEUNE, 2024)

Mit den vorteilhaften Rahmenbedingungen des Standorts Leuna konnte der Standort für die zukünftige Wirtschaft neue nachhaltige Investitionen anziehen.

Bio-Raffinerie:

Das Unternehmen UPM investiert seit 2022 über 1,1 Milliarde Euro für die Einrichtung Bio-Raffinerie (MDR SACHSEN-ANHALT, 2023). UPM gewinnt aus nachhaltig erwirtschaftetem Laubholz Biochemikalien zur Herstellung von recyclingfähigen Alltagsgegenständen und Materialien. Diese Biochemikalien finden Anwendung in verschiedenen Bereichen wie Textilien, Kunststoffen, Gummi, Kosmetika und Medikamenten. Dieser Ansatz trägt dazu bei, den Verbrauch fossiler Rohstoffe und die CO₂-Emissionen erheblich zu reduzieren. (UPM BIOCHEMICALS, 2023)

Nachhaltige Kraftstoffe:

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat den Chemiepark Leuna in Sachsen-Anhalt nach einer umfangreichen Analyse als Standort für die Technologie-Plattform PtL (TPP) ausgewählt. Die Forschungsanlage soll einen entscheidenden Beitrag leisten, um zeitnah strombasierte Kraftstoffe – auch Power-to-Liquid-Kraftstoffe (PtL) oder e-SAFs (Sustainable Aviation Fuels) genannt – in industriellem Maßstab herzustellen. Dazu wird das DLR dort mit Unternehmen und weiteren Forschungseinrichtungen die dafür notwendigen großtechnischen Technologien und Verfahren entwickeln und testen. (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2023). Mit eine Investitionsbereich von 400 Millionen Euro sollen im Bereich Bau, Forschung und Anlagenbetrieb sollen etwa 100 Arbeitsplätzen entstehen. (INFRALEUNE, 2024)

1.4 Gewollte Zielzustand

Das vorgängige Ziel des Unternehmens in näher Zukunft ist, in der Fabrik energetische Prozesse zu optimieren, um ökonomische als auch energetische Ressourcen einzusparen.

Der wichtigste Faktor bei Kosten für die Produktion ist der Energiepreis. Um die Abhängigkeit der elektrischen Energie bei sehr hoher Preise zu senken, wird ein großen Teil des Stroms mit Photovoltaik Anlagen erzeugt. Es soll eine Gesamtleistung von 800KWh installiert werden. Dies entspricht einer Deckung von über 60% des elektrischen Bedarfs des Unternehmens durch Photovoltaikanlagen. Es ist auch das Ziel die erzeugte Energie so weit wie möglich lokal zu verbrauchen.

Um die groß möglichste Autarkiegrad zu erreichen, ist ein Speicher für die Nutzung der überschussigen Energie in den Zeiten ohne Sonne geplant. Mit dem Speicher ist auch das zweite Ziel, ein Last Management zu schaffen, dass die Kosten wegen der Lastspitzen (Leistungspreise) senkt und ganzes Jahr die Netz-Stabilisierung gewährleistet.

2 Stand des Marktes

2.1 Aktuelle Entwicklungen im Speichertechnologie

Die Speicherung großer Strommengen ist eine entscheidende technische Herausforderung für die Integration von schwankenden erneuerbaren Energien. Obwohl kurzfristige Schwankungen durch die Vielzahl und Verteilung von Anlagen ausgeglichen werden können, werden elektrische Speicher benötigt, um Energie aufzunehmen und ins Netz einzuspeisen. (Dagmar Oertel, 2008)

Kurzzeitspeicher bieten schnell verfügbare Energie, aber nur für kurze Zeit, wie supraleitende Spulen oder Drehmassenspeicher. Langzeitspeicher wie Pumpspeicherkraftwerke können über Stunden bis Tage Energie speichern und abgeben, brauchen jedoch einige Minuten zur Bereitschaft. (Diekmann & Rosenthal ,2014)

Die Speichertechnologien können in folgenden Gruppen in der Abbildung 4 aufgeteilt werden:

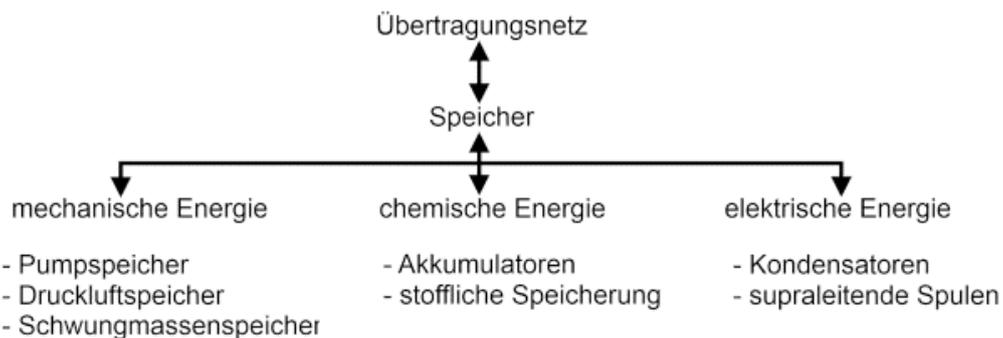


Abbildung 4: Einteilung der Energiespeichertechnologie

Quelle: (Diekmann & Rosenthal , 2014)

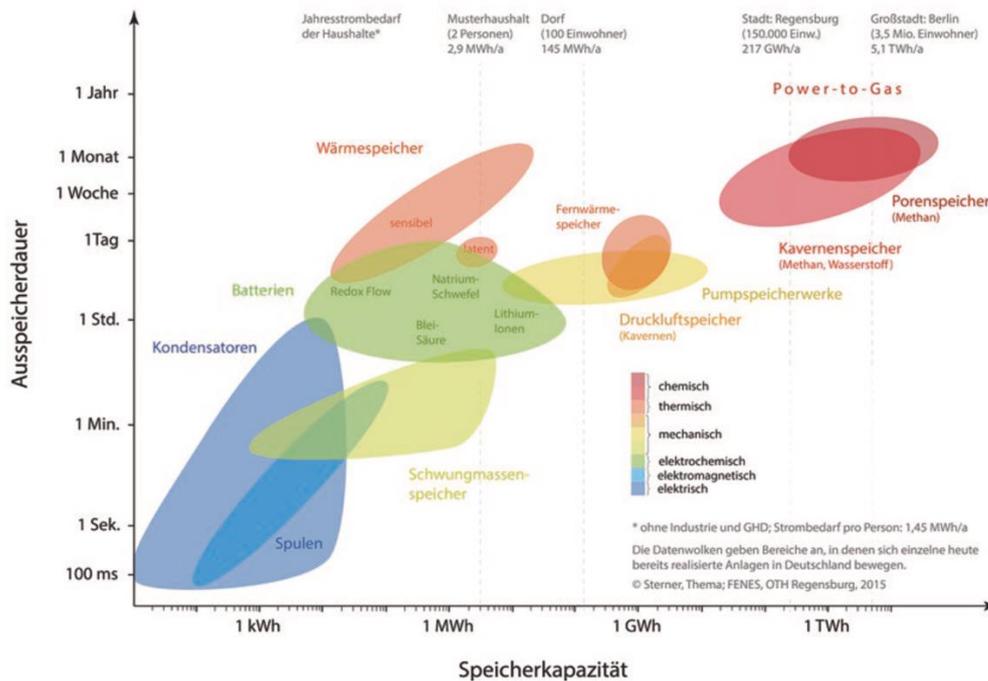


Abbildung 5: Energiespeichertechnologie nach Speicherkapazität und Ausspeicherdauer

Quelle: Sterner und Stadler 2017, S.654

In der Abbildung 5 sind alle Speichertechnologien mit Ihrer Speicherkapazitätsbereich und Ausspeicherdauer dargestellt. Je höher die Speichertechnologie in der vertikalen Achse, desto länger kann die Technologie der Energie speichern. Von der Horizontale Achse Speicherkapazität der Speichertechnologie ermittelt.

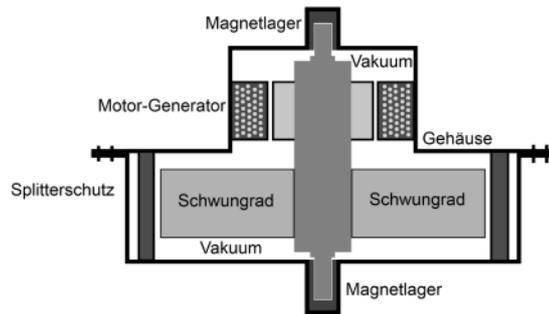
1. Mechanische Energie:

Die Mechanismen der Energiespeicherung in mechanischen Systemen lassen sich auf die klassische Newtonsche Mechanik zurückführen, die im 18. und 19. Jahrhundert entwickelt wurde. Diese Prinzipien ermöglichen die Speicherung von Energie in zwei Hauptformen:

- Kinetische Energie: Energie, die ein Objekt aufgrund seiner Bewegung besitzt.
- Potenzielle Energie: Energie, die ein Objekt aufgrund seiner Position oder Konfiguration besitzt.

Darüber hinaus kann Energie auch in Form von Druckenergie gespeichert werden, die mit der Komprimierung von Gasen oder Flüssigkeiten verbunden ist. (Sterner & Stadler, 2017)

- Drehmassenspeicher:



(Diekmann & Rosenthal , 2014)

Abbildung 6:Aufbau Drehmassenspeicher

Quelle: (Diekmann & Rosenthal , 2014)

Ein Drehmassenspeicher nutzt Rotationsenergie zur Speicherung von Energie. Während des Aufladens wird ein Elektromotor verwendet, um das Schwungrad in Rotation zu versetzen. Zur Entladung treibt das Schwungrad einen Generator an. Die gespeicherte Energie im Drehmassenspeicher, bezeichnet als Erot, hängt vom Trägheitsmoment Θ des Schwungrades ab und steigt quadratisch mit der Drehzahl U .

$$E_{rot} = \frac{1}{2} \Theta (2\pi U)^2$$

Änderungen in der zugeführten oder entnommenen Energie beeinflussen die Drehzahl des Schwungrades und damit die des Generators, der durch einen Frequenzrichter an die konstante Netzfrequenz angepasst wird. Die Selbstentladung des Speichers wird hauptsächlich durch Reibungsverluste im Schwungrad bestimmt, die aus Lagerreibung und Luftreibung resultieren. Um diese Selbstentladung zu minimieren, wird das Schwungrad oft in einer Vakuummilieu untergebracht und berührungsfrei mit supraleitenden Magnetlagern gelagert. (Dagmar Oertel, 2008)

Drehmassenspeicher sind besonders geeignet für die kurzfristige Energiespeicherung. Ihre Vorzüge umfassen schnelle Verfügbarkeit, lange Lebensdauer und hohe Zykluszahlen. Der Wirkungsgrad liegt typischerweise zwischen 90 und 95 %, doch der Speicher verliert etwa 20 % seiner Energie pro Stunde. In seiner fortschrittlichsten Ausführung kann ein einzelner Drehmassenspeicher eine Leistung von bis zu 3 MW bereitstellen. (Diekmann & Rosenthal, 2014)

- Pumpspeicher:

Pumpspeicherkraftwerke nutzen elektrische Energie, um Wasser aus niedrig gelegenen Becken oder Flüssen in höher gelegene Speicherseen zu pumpen, wodurch potenzielle Energie gespeichert wird. Beim Entladen treibt das abfließende Wasser eine Turbine an, die mit einem Generator verbunden ist. Die Effizienz moderner Pumpspeicherkraftwerke liegt in der Regel zwischen 75 und 85 %. Die Energiedichte des Speichers, ρ_E , hängt von der verfügbaren Fallhöhe, h , und der Gesamteffizienz des Speichers, η , ab.

$$\rho_E = \eta * g * h \left[\frac{Ws}{Kg} \right]$$

In Deutschland sind Pumpspeicherkraftwerke mit einer Leistung von rund 6,7 GW die führende Technologie zur Speicherung elektrischer Energie. Die durchschnittliche Energiedichte liegt zwischen 0,35 und 1,12 kWh/m³, mit einer Gesamtspeicherkapazität von bis zu 8.480 MWh. Diese Kraftwerke dienen nicht nur der Energiebereitstellung, sondern auch der Regelung von Wirk- und Blindleistung im Stromnetz durch die Nutzung der Motor-Generatoren der Pumpenturbinen. Jedoch ist das Ausbaupotenzial in Deutschland begrenzt aufgrund mangelnder geeigneter Standorte. (Diekmann & Rosenthal, 2014)

2. Elektrische Energie:

- Supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES):

Mit einer Spüle als der Hauptbestandteil des Speichers wird die elektrische Energie in elektromagnetisches Feld gespeichert. Die Spüle wird superleitend, indem die Spüle durch eine Kryoflüssigkeit für die Abkühlung unter die kritische Temperatur verwendet wird. Für den Ladevorgang wird der gleichgerichtete Wechselstrom vom Netz durch die Spüle bis das Erreichen eines zeitlichen konstanten magnetischen Feldes geleitet. Die Feldstärke muss unterhalb der kritischen Feldstärke des superleitenden Materials sein. Nach dem Erreichen dieses Zustandes wird die Spüle vom elektrischen Versorgungsnetz getrennt und ihre Enden werden kurzgeschlossen, dadurch kann der erzeugte Strom von dem Magnetfeld ohne Verluste im Stromkreis der Spüle fließen. Das Entladen wird durch die Verbindung der Anschlüsse mit einem Wechselrichter für die Umwandlung der Gleichstrom in Wechselstrom erreicht.

Das Entladezeitraum, welches von der Energieinhalt und der Systemauslegung abhängig ist, beträgt zwischen 1 bis 20 Sekunden. (Oertel, 2008)

Der Wirkungsgrad, das von der Dauer des „Standby-Betriebs“ abhängig ist, liegt im Bereich von 90 bis 95%, da die Möglichkeiten der Verluste nun in der Leistungselektronik auftreten. Wegen kurze Entladezeitraum und hohe Selbstentladerate von 10 bis 12% pro Tag werden die Superleitende magnetische Energiespeicher mit einer Speicherkapazität von bis zu 10MWs für das Ausgleichen der Netz-Schwankungen genutzt. (Oertel, 2008)

- Elektrochemische Doppelschichtkondensatoren

Das Konzept des Aufbaus eines elektrischen Feldes wird genutzt, um die elektrische Energie mit Kondensatoren zu speichern. Da der Aufbau elektrischen Feld keine Abkühlung oder beweglichen Komponenten als Notwendigkeit darstellt, besitzen die Kondensatoren mit über 98% den höchsten Gesamtwirkungsgrad aller elektrischen Speicher- Außerdem haben die Kondensatoren eine hohe Energiedichte und hohe Zyklenzahlen. (Oertel, 2008) (Mahnke & Mühlhoff, 2010)

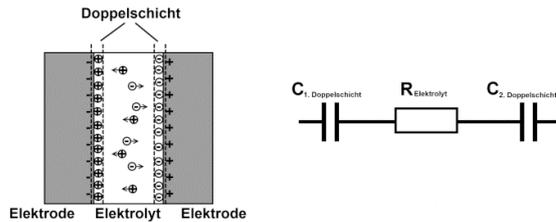


Abbildung 7: Aufbau der Doppelschichtkondensatoren

Quelle: (Diekmann & Rosenthal , 2014)

Die Elektroden der Doppelschichtkondensatoren werden in einen leitfähigen getaucht, dadurch fließt kein Strom durch den Elektrolyten, wenn eine Spannung unterhalb eines Schwellwerts vorhanden ist. Durch die Entstehung des elektrischen Feldes findet die Bewegung der Ionen zur jeweils entgegengesetzt geladenen Elektrode anstatt der Ausrichtung der Ladungsträger im Dielektrikum eines Plattenkondensators.

Leistungselektronik, um die Spannung während des Entladevorgangs konstant zu halten. Elektrochemische Doppelschichtkondensatoren werden anstelle von klassischen Kondensatoren verwendet, um große Energiemengen zu speichern. Sie bestehen aus Elektroden, die in einen leitfähigen Elektrolyten getaucht sind. Wenn eine Spannung unterhalb eines Schwellwerts angelegt wird, fließt kein Strom zwischen den Elektroden durch den Elektrolyten. Stattdessen bewegen sich positiv und negativ geladene Ionen aus dem Elektrolyten zur jeweils entgegengesetzt geladenen Elektrode. Es findet keine Ausrichtung, sondern eine Bewegung der Ladungsträger im elektrischen Feld statt. An der Grenzfläche zwischen Elektrolyten und Elektrode entsteht eine elektrochemische Doppelschicht. (Schaefer & Bergmann, 2005)

3. Elektrochemische Speicher

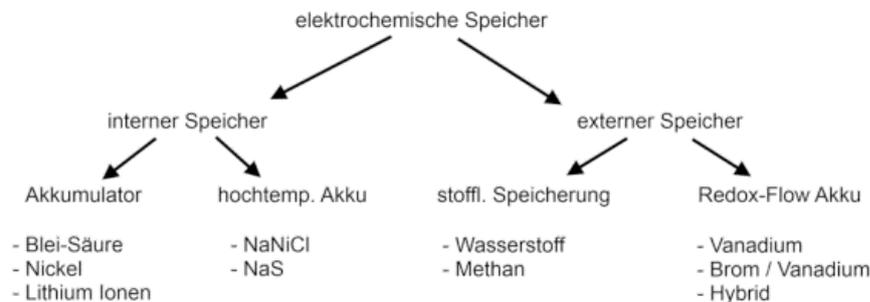


Abbildung 8: Einteilung elektrochemische Speicher

Quelle: (Diekmann & Rosenthal , 2014)

In der Abbildung 8 ist die Einteilung der elektrochemischen Speicher dargestellt.

- Externer Speicher

Stoffliche Speicherung:

Power to X ist die Bezeichnung der verschiedenen Varianten, wobei die Überschussige Elektroenergie in verschiedene andere Form der Energien umgewandelt wird.

Die Speicherung überschüssige elektrischer Energie durch die Produktion von Wasserstoff und/oder eine anschließende Methanisierung bezeichnet man als Power to Gas (PtG).

Die direkte Umwandlung der überschüssigen elektrischen Energie in thermische Energie mittels großer Heizstäbe oder Wärmepumpen wird als Power-to-Heat (PtH) bezeichnet. Power to Liquid [PtL] ist die Nennung der Umwandlung der elektrischen Energie in flüssige Kraftstoffe. (Schabbach & Wesselak, 2020)

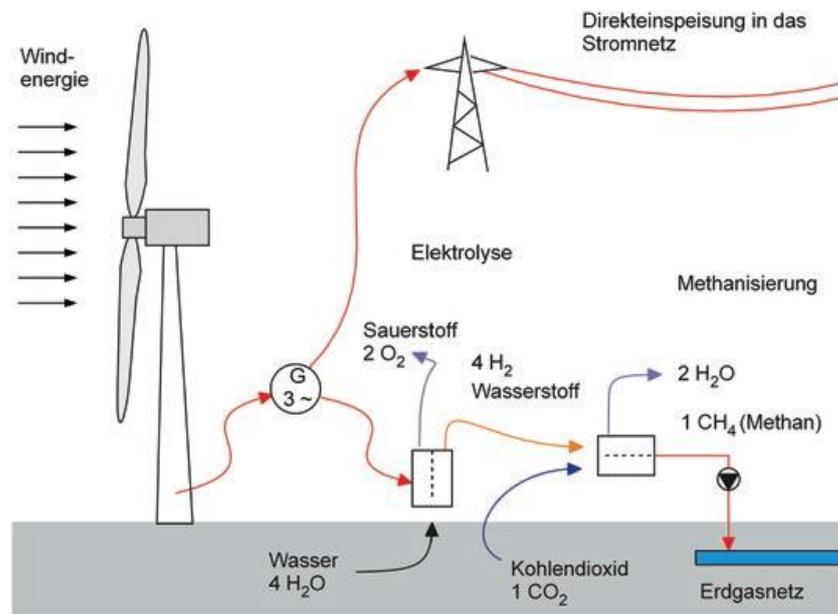


Abbildung 9: Stoffliche Speicherung

Quelle: (Schabbach & Wesselak, 2020)

In der Abbildung 9 ist das Schematisch für die Umwandlung der regenerativen elektrischen Energie bei geringeren Verbrauchernachfrage in dem Elektrolyseur durch die Zufuhr von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff als Endprodukte mit einem Wirkungsgrad dargestellt. In den zweiten Prozessschritt wird mit Hilfe der Sabatier Reaktion durch die Addition der Kohlenstoff wird Methan und Wasser entstanden. Die Nutzungsgrad der ersten und zweiten Schritte sind maximale bis zu 75% und 80% und für den Gesamtprozess der Methanherstellung von etwa 60% erreichbar.

Für die Wiederherstellung des regenerativen Stroms wird das Methan als Brennstoff in einem modernen GuD-Kraftwerk (Gas-und-Dampf Kombikraftwerk, maximale Wirkungsgrad 60%) verwendet. Damit kann am Ende eine theoretisch 35% der ursprünglich erzeugte Strom wiedergewonnen werden. (Schabbach & Wesselak, 2020)

2.2 Interne Speicher

Der elektrochemische Speicher wird auch als Batterie und als Akkumulator genannt. (Sterner & Stadler, 2017). Ein Akkumulator speichert die elektrische Energie in Form von chemischer Energie. Die eingespeicherte elektrischen Energie wird beim Entladen in elektrische Energie zurückgewandelt. Ein Akkumulator setzt sich aus Elektrolyten und zwei Elektroden zusammen. Diese Anordnung wird auch galvanische Zelle bezeichnet. Beim Prozess der Energieumwandlung, finden die chemischen Reaktionen gleichzeitig über einen Elektrolyten an beiden Elektroden statt. (Bretschneider 2009, zitiert nach Diekmann & Rosenthal 2014, S.163). Die Elektrode ist ein Leiter, der in

den Elektrolyten eintaucht. Der Elektrolyt ist eine Lösung, die Ionen enthält. (Sterner & Stadler, 2017)

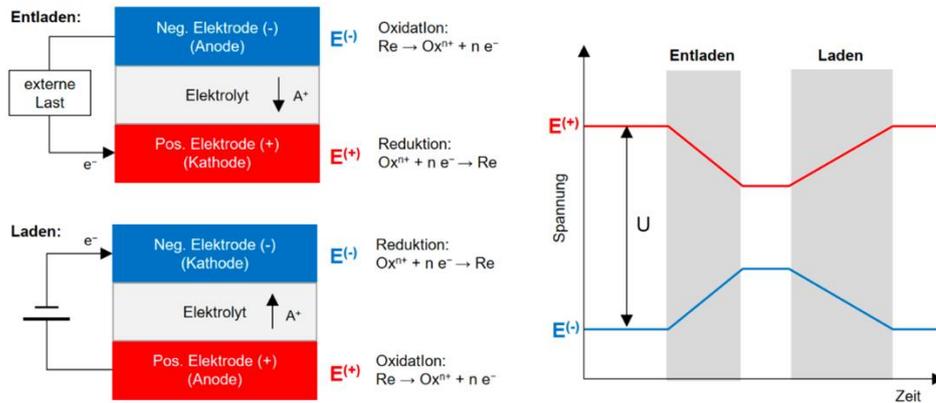


Abbildung 10 : Reaktion des Ladens und Entladens einer Batterie und ihre Spannungsverläufe

Quelle: (Oberholzer, 2021)

Die Abbildung 11 stellt die Batterietechnologien nach der Leistungs- und Energiedichte dar. Es ist zu erkennen, dass Li-Ion sowohl sehr hohe Leistung und hohe spezifische Energiedichte besitzen.

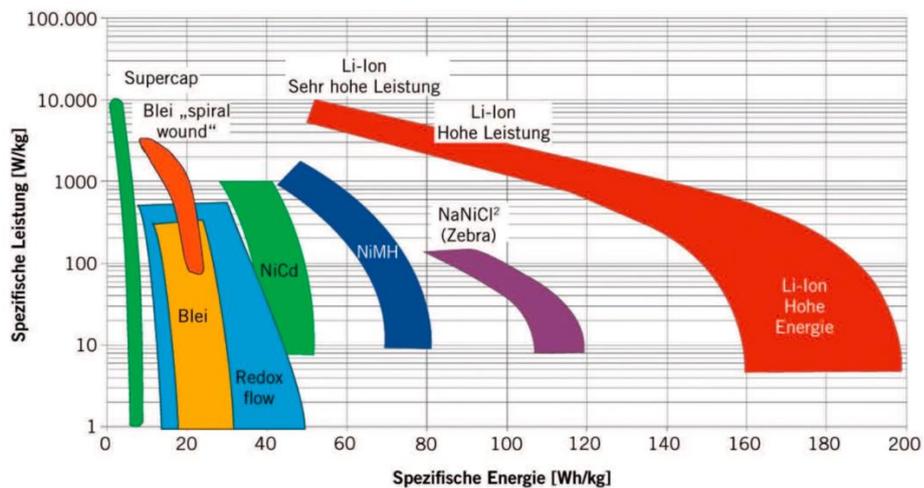


Abbildung 11: Batterietechnologien nach Leistungs- und Energiedichte

Quelle: (Oberholzer, 2021)

- Bleisäure

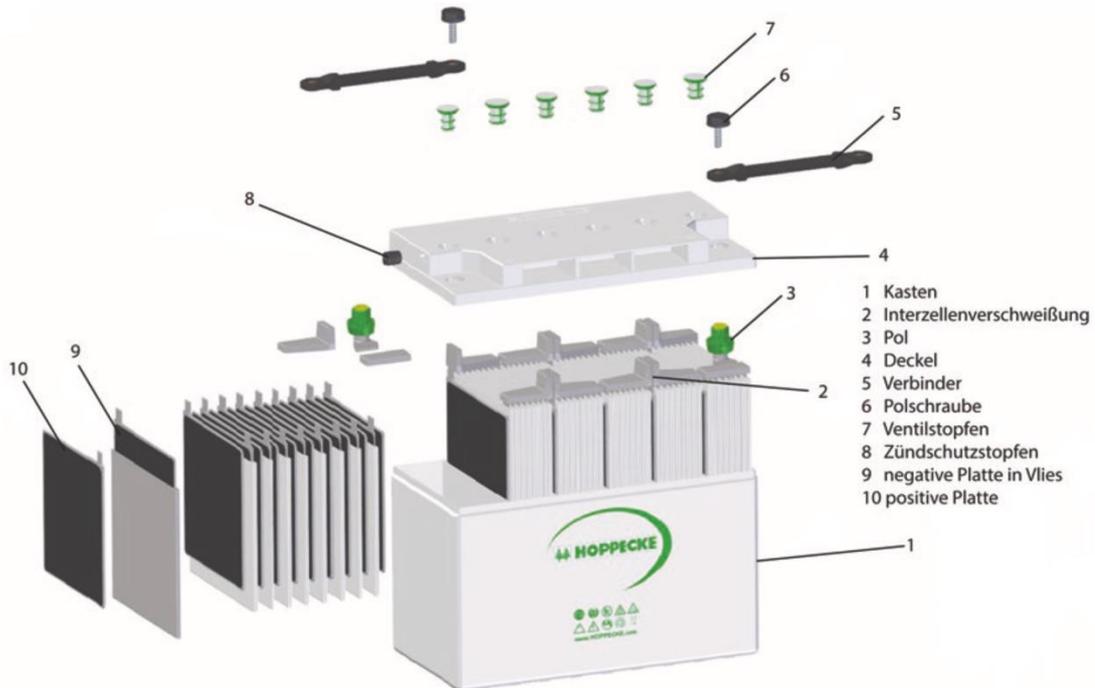


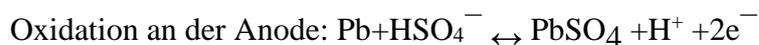
Abbildung 12: Aufbau Bleibatterie

Quelle: (Sterner & Stadler, 2017)

Eine Bleibatterie besteht aus mehreren in Reihe geschalteten elektrochemischen Zellen. Jede Zelle wiederum ist aus zwei Halbzellen zusammengesetzt, die durch einen Elektrolyten getrennt sind. Jede Halbzelle selbst besteht aus einer Elektrode und einem Elektrolyten.

Die positive Elektrode setzt sich aus Bleidioxid (PbO₂) und die negative Elektrode aus Blei (Pb) zusammen. Beide Elektroden sind in ein Gitter aus einer Bleilegierung eingegossen. Verdünnte Schwefelsäure (H₂SO₄) wird in der Bleibatterien als Elektrolyt eingesetzt. In der positiven Elektrode ist die aktive Masse, die Komponente der Elektrode, die an den chemischen Reaktionen teilnimmt, Bleidioxid und in der negativen Elektrode ist es Blei. Höhere mechanische Stabilität der Zelle und das Vermeiden von dem Kurzschließen wird von einem Separator zwischen den Elektroden gewährleistet. Durch das parallele Verschalten und durch Verlängern der Elektroden wird Höhe Speicherkapazität erreicht. (Sterner & Stadler, 2017)

Zellreaktion: Beim Entladen entsteht an der Bleidioxid- und Bleielektrode nicht leitfähiges Bleisulfat. Schwefelsäure, ein Elektrolyt, nimmt an der Zellreaktion teil. Die Bleianode setzt Elektronen frei, während die Bleidioxidkathode Elektronen aufnimmt.



Die Reaktionen treten während des Ladens in die entgegengesetzte Richtung auf: Anodisch entsteht poröses PbO₂, während kathodisch ein Bleischwamm entsteht. Der Akku „kocht“ oberhalb von 2,4V, indem wässrige Schwefelsäure elektrolysiert wird, wodurch gasförmiger Wasserstoff am Minuspol und Sauerstoff am Pluspol freigesetzt wird. Vor der Gasabscheidung zeigt Blei eine hohe Überspannung für die Abscheidung von Wasserstoff und Sauerstoff, was zur gewünschten Bildung von Bleisulfat führt, das sich in Schwefelsäure erfreulich schlecht löst und beim Entladen wieder in Blei und Bleidioxid zurückbildet. (Kurzweil & Dietlmeier, 2015)

Die reversible Zellspannung bei Standardbedingungen (25 °C, 10.325 Pa) von

$$\Delta E^0 = E_{Kathode}^0 - E_{Anode}^0 = [1,690 - (-(-0,358))] \text{ V} = 2,048 \text{ V}$$

ist die höchste aller herkömmlichen Batterien und wird nur von Lithiumbatterien übertroffen.

Bei geringen Strömen und langsamen Stromänderungen sind Bleiakkus besonders effektiv. Je niedriger die Entladerate ist, desto größer ist die verfügbare Kapazität (elektrische Ladung) und der Wirkungsgrad. Die Effizienz kann unter 80% fallen, wenn Dauerladung verwendet wird, um den vollgeladenen Zustand zu erhalten, indem die Selbstentladung ausgeglichen wird.

Die **Stromausbeute** (Ladungsnutzungsgrad, engl. *coulombic efficiency*) eines Bleiakkus ist etwa 85%:

$$\alpha = \frac{\text{verfügbare Ladung (Entladen)}}{\text{eingespeiste Ladung (Laden)}} < 1$$

Die **Energieausbeute** (*energy efficiency*) eines Bleiakkus ist etwa 70%:

$$\eta = \frac{\text{verfügbare elektrische Energie (Entladen)}}{\text{eingespeiste elektrische Energie (Laden)}} < \alpha < 1$$

(Kurzweil & Dietlmeier, 2015)

Die Anwendung der Bleibatterie findet in vielen Bereichen außer mobile Anwendungen statt. Es ist eine Speicherkapazität bis zu 10MWh und ein Leistungsbereich von wenigen KW bis zu MW möglich. (Oberholzer, 2021)

- Lithium Ionen

Mit einer Dichte von 0,534 g cm³ bei 20 °C ist Lithium das leichteste aller Metalle. Mit einem normalen Potential von E₀= -3,045V können Batterien mit hoher Energie und Leistung betrieben werden. Metallisches Lithium hat eine starke Reaktion mit Wasser und kann Brände verursachen. Interkalationselektroden, die Lithiumionen reversibel aufnehmen und abgeben können, werden in einem flüssigen oder polymeren Elektrolytsystem verwendet. (Kurzweil & Dietlmeier, 2015)

Die reversible Ein- und Auslagerung von Lithiumionen in Aktivmaterialien durch elektrochemische Redoxreaktionen ermöglicht es wiederaufladbaren Lithiumionen-

Zellen, Energie zu speichern. Interkalation ist der Prozess, bei dem Li-Ionen in das Wirtsgitter eingelagert werden. Daher werden die Aktivstoffe auch als Interkalationsverbindungen und die Elektroden als Interkalationselektroden bezeichnet. Mitunter wird auch der Begriff Einfügung verwendet. Sowohl die positive als auch die negative Elektrode können eingelagert werden. Li⁺ kann problemlos in bestimmte Strukturen eingelagert werden, da sein kleiner Radius etwa 0,068 nm hat. Bei der Ein- oder Auslagerung der Li-Ionen wird das Aktivmaterial entsprechend reduziert oder oxidiert. Wenn metallisches Lithium an einer negativen Elektrode verwendet wird, werden Li-Ionen an einer metallischen Elektrode abgeschieden und aufgelöst. (Sternier & Stadler, 2017)

Funktionsprinzip:

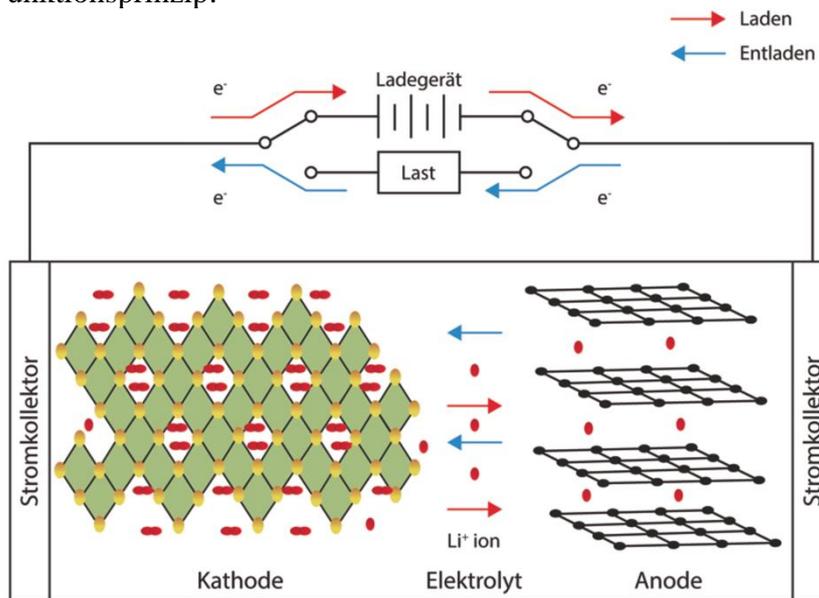


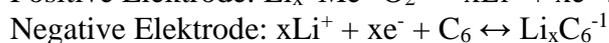
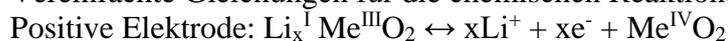
Abbildung 13: Schematische Aufbau und Funktionsweise einer Lithiumionen-Zelle

Quelle: (Sternier & Stadler, 2017)

Beim Laden des Akkus erfolgt an der positiven Elektrode eine Oxidation des Aktivmaterials, wodurch Elektronen freigesetzt und in den äußeren Stromkreis abgegeben werden. Gleichzeitig wandern Lithium-Ionen (Li⁺) aus der positiven Elektrode in den Elektrolyten und bewegen sich zur negativen Elektrode. An der negativen Elektrode werden die Li⁺-Ionen eingelagert, während gleichzeitig das Material der Elektrode, üblicherweise Graphit, reduziert wird.

Beim Entladen des Akkus laufen die Prozesse in umgekehrter Richtung ab. Lithium-Ionen (Li⁺) wandern von der negativen Elektrode zur positiven Elektrode und werden dort eingelagert. Die positive Elektrode wird reduziert, während die negative Elektrode oxidiert wird. Gleichzeitig fließen Elektronen vom äußeren Stromkreis zur negativen Elektrode.

Vereinfachte Gleichungen für die chemischen Reaktionen an den Elektroden:



x liegt zwischen 0 und 1. (Sternier & Stadler, 2017)

Lithium-Titanat-Akkumulatoren nutzen statt Graphit nanostrukturiertes Lithium-Titanat. Dies führt dazu, dass Lithium-Atome ohne Volumenänderung in das Material einge- und ausgelagert werden können. Dadurch wird eine wesentlich größere Anzahl von Ladezyklen möglich. Der Lithium-Titanat-Akkumulator kann trotz 15.000 Ladezyklen immer noch 85 % seiner ursprünglichen Kapazität aufweisen. Außerdem kann der Akkumulator innerhalb einer Minute auf mehr als 80 % seiner Gesamtkapazität aufgeladen werden, da er eine Leistungsdichte von bis zu 4.000 W/kg aufweist. (Diekmann & Rosenthal , 2014)

2.3 Lastmanagement

Die Liberalisierung des Strommarktes zwingt Unternehmen, einschließlich Energieerzeugern, Netzbetreibern und Energieverbrauchern, dazu, innovative Ansätze zur Steuerung der Energieflüsse zu entwickeln. Das Umweltbundesamt bezeichnet die Gesamtheit dieser Maßnahmen als Energiemanagement oder Lastmanagement. (Hessel, 2009)

Bei herkömmlichen Stromtarifen sind die Ausgaben für elektrische Energie hauptsächlich auf die Menge der verbrauchten Energie bezogen. Es entstehen jedoch nicht nur Kosten für die tatsächliche Lieferung von Energie, sondern auch für die Bereitstellung der elektrischen Leistung, unabhängig davon, ob sie tatsächlich häufig abgerufen wird oder nicht. Aus diesem Grund beinhalten Stromtarife für große Verbraucher (z. B. mit einem Jahresverbrauch von mehr als 100 000 kWh/Jahr) oft zusätzlich den Preis für die tatsächlich gelieferte elektrische Leistung (in Einheiten von kW Kilowatt). Die gemessenen Leistungen werden gewöhnlich durch eine registrierende Leistungsmessung ermittelt, in der Regel in einem Zeitraum von 15 Minuten. Der Leistungspreis wird dann als das Maximum der erbrachten Leistungen in Bezug auf das durchschnittlichste Niveau in einem solchen Zeitraum der Abrechnung betrachtet. (Paschotta, 2024)

Die Kunden von Energieerzeugern und Netzbetreibern streben vor allem nach niedrigen Energiekosten oder ihrer Reduzierung, einer zuverlässigen Energieversorgung sowie qualitativ hochwertigem Strom und stabilen Spannungen. Die Senkung der Energiekosten kann hauptsächlich durch zwei Ansätze erreicht werden:

1. **Reduktion des Leistungsbezugs:** Diese Methode ermöglicht Einsparungen beim zu zahlenden Leistungsentgelt. Ein Lastmanagementsystem ist erforderlich, um ein vertraglich festgelegtes Bezugslimit sicher einzuhalten. Dieses System kann Verbraucher bei drohenden Abweichungen vom Sollwert des Leistungsbezugs zu- oder abschalten. Eine vorausschauende Produktionsplanung ermöglicht ebenfalls die Reduktion des Leistungsbezugs, ohne dass Verbraucher zu- oder abgeschaltet werden müssen.
2. **Energieeinsparungen durch effiziente Technologie:** Die Nutzung effizienter Technik, organisatorische Veränderungen oder Verhaltensanpassungen des Bedienpersonals reduzieren hingegen den zu zahlenden Arbeitspreis. Der Einsatz von Motoren der höchsten Effizienzklasse (EFF1) beispielsweise ermöglicht

deutliche Energieeinsparungen, wenn weniger effiziente Motoren ersetzt werden. Bei Motoren im Teillastbereich ermöglichen Frequenzumrichter ebenfalls Energieeinsparungen.

Unter Lastmanagement handelt es um die Überwachung, Steuerung und Anpassung des Stromverbrauches in Stromnetz eines Systems. Das Ziel des Last-Managementsystems ist die Leistung von der Industrieverbraucher unter eine gewollte Zielzustand zu begrenzen, damit keine Lastspitzen über die begrenzte Leistung auftreten und Betriebskosten gesenkt werden. (Hessel, 2009)

Marktanalyse:

I. OPTENDA Energy Monitor Software:

Die Software bietet die Möglichkeit für die echtzeitige Erfassung und die Auswertung der Lastspitzen. Außerdem wird für den Fall der Überschreitung der oberen Grenze der Verbrauchleistung (statische Lastmanagement) eine Meldung angezeigt.

Wichtige Eigenschaften:

- Eigenschaften: Lastganganalysen, Verbrauchsdiagramm, Dauerkenlinie
- Energiemonitoring mit Kennzahlen
- Möglichkeit für die Aufgabenmanagement im Energiemanagement
- Regressionsanalyse für den Nachweis Effizienzmaßnahmen (Energieaudit). (OPTENDA, 2023)

II. TESVOLT Energiemanagementsystem:

Mit Hilfe TESVOLT Energiemanagementsystem können die Energieflüsse erfasst, gesteuert und überwacht werden. In der Abbildung 14 ist das Hauptteil TESVOLT Energy Manager des Energiemanagementsystems dargestellt. Es kann lokal im Zählerschrank installiert werden. Damit können alle angeschlossenen Erzeuger und Verbraucher erfasst. Im Vergleich zu Variante 1 (OPTENDA) bietet TESVOLT Energie Manger die Möglichkeit durch eine registrierende Lastgangmessung (RLM) präzise Überwachung und sofortige automatisierte Steuerung (dynamische Lastmanagement) bei Überschreitung der Verbrauchspitze. (TESVOLT AG, 2023)



Abbildung 14: TESVOLT Energy Manager

3 Analyse der Elektroenergiebedarf ADDINOL

3.1 Lastganganalyse

Die Stromversorgung von ADDINOL erfolgt durch zwei Niederspannungshauptverteilungen, nämlich NSHV 01 und NSHV 02. Zur flächendeckenden Stromversorgung in verschiedenen Gebäuden werden die Hauptverteilungen weiter in Unterverteilungen aufgliedert.

Die Hauptverteilungen und die zugehörigen Unterverteilungen sind in der Abbildung 15 veranschaulicht.

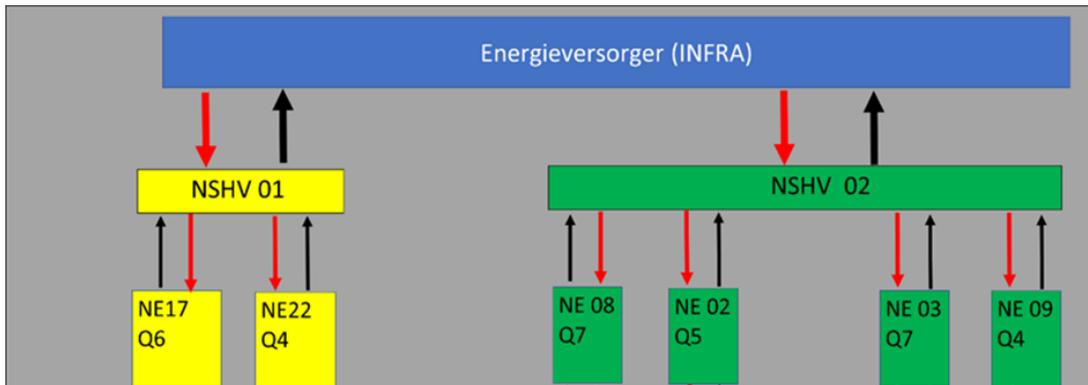


Abbildung 15: Stromverteilungsnetz ADDINOL

- NSHV 01 (Niederspannungshauptverteilung)

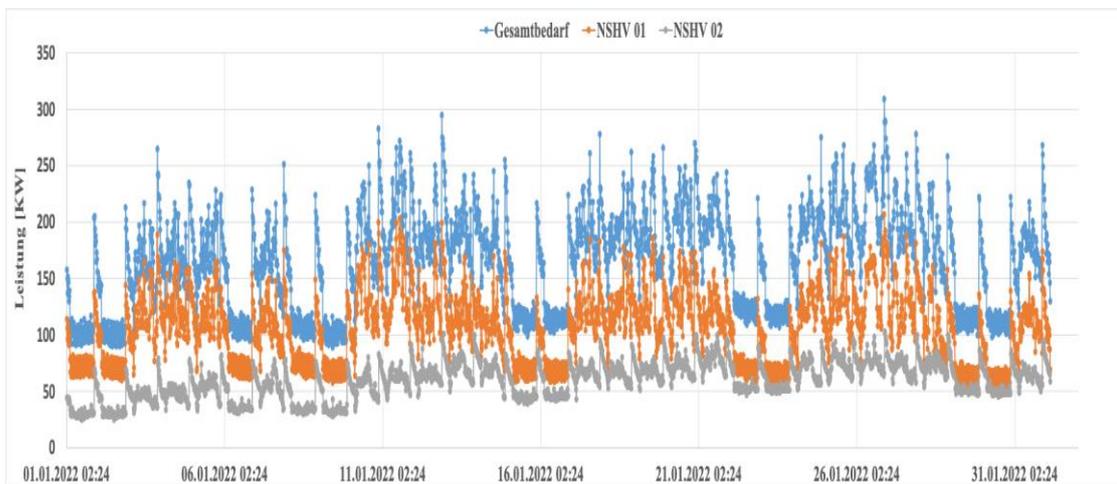


Abbildung 16: Lastganganalyse nach Bedarf und Hauptverteilungen

In der Abbildung 16 ist der Verlauf der Viertelstundenwert für den Monat Januar dargestellt.

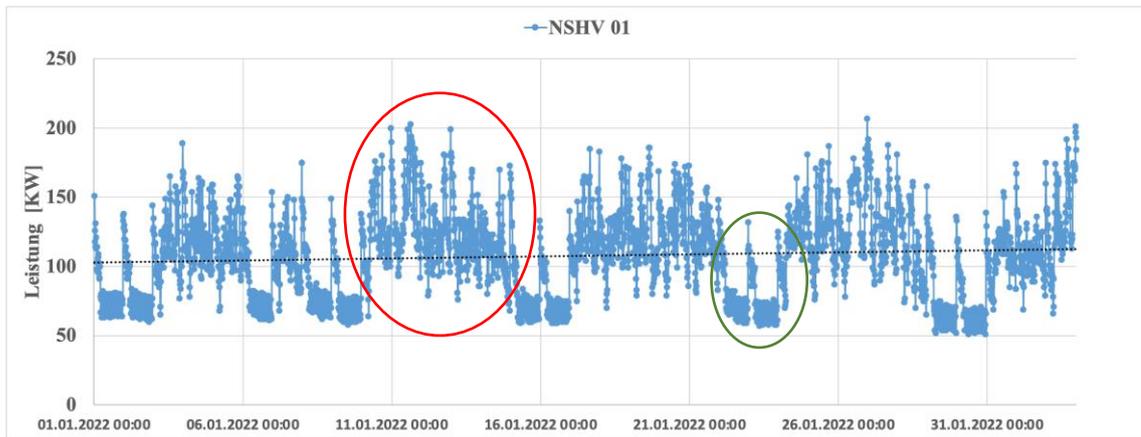


Abbildung 17: Lastganganalyse der Hauptverteilung NSHV01

NSHV01 enthält NE17 Q06 und NE22 Q4 als Zwei Unterverteilungen. In der Abbildung 17 ist der Verlauf des viertel Stunden Wertes für die Hauptverteilung NSHV 01 im Monat Januar 2022 zu sehen. Jeder Punkt stellt einen erfassten Messwert, der in viertel Stunden Takt der durchschnittlichen Leistung erfasst wurde. Deutlich erkennbar ist die schwarze gestrichelte Linie, die im Januar einen Mittelwert der Leistungsspitze von etwa 100 kW darstellt. Des Weiteren sind zwei sich wiederholende Verläufe in Rot und Grün markiert. Der rote Verlauf stellt die Leistungsspitzen an Arbeitstagen (Montag bis Freitag) dar. Der markierte Rote Bereich ist in Abbildung 18 vollständig dargestellt. An den Wochentagen wird in 2 Arbeitsschichten die Produkte hergestellt, daher ist der Mittelwert der Leistungsspitzen viel höher als Gesamtmittelwert im Januar. Ein sich wiederholender Verlauf im Grün ist aus der Abbildung 18 ersichtlich. Der abklingende Verlauf von 23:15 bis 05:00 Uhr repräsentiert die Leistungsspitzen der Begleitheizungen. Die höchste Spitze dieses Verlaufs wird um 23:15 erfasst, da die Begleitheizungen jede Nacht um 23:00 automatisch eingeschaltet werden.

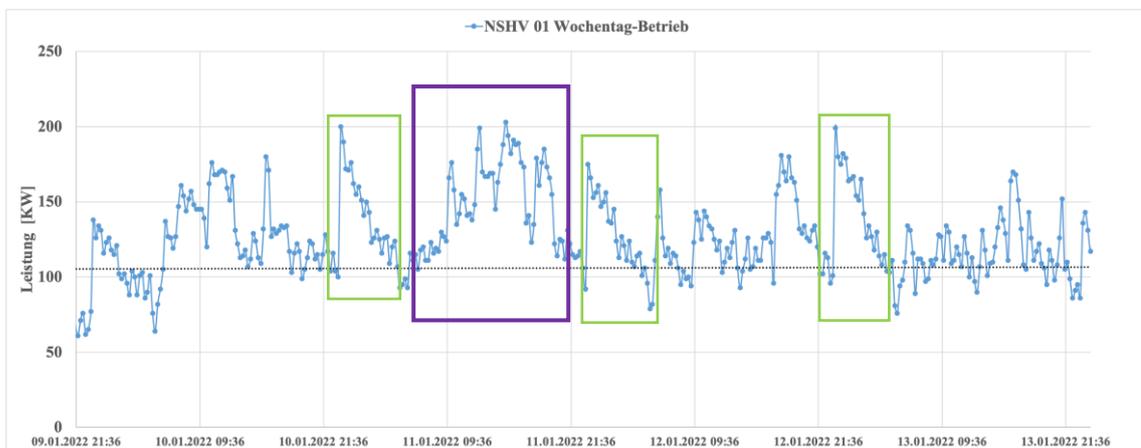


Abbildung 18: Lastganganalyse NSHV01 in der Woche

Im untenstehenden Diagramm ist der wiederholende Verlauf in Dunkelgrün von Abbildung 19 dargestellt. Hier ist wieder Tag (05:15-22:45) im Lila und Nacht (23:00 – 05:00) im Grün markiert. Es ist nochmals in der Nacht der abklingende Verlauf der Begleitheizungen zu sehen. Tagsüber ist kontante Verlauf zu erkennen, wobei der Mittelwert der Leistungsspitzen bei etwa 70 KW liegt. 70 KW setzen sich hauptsächlich

aus dem Verbrauch von Beheizung (Wärmeträgerölkreislauf) und Wärme-Kammern, die kontinuierlich 24h eingestellt sind, zusammen.

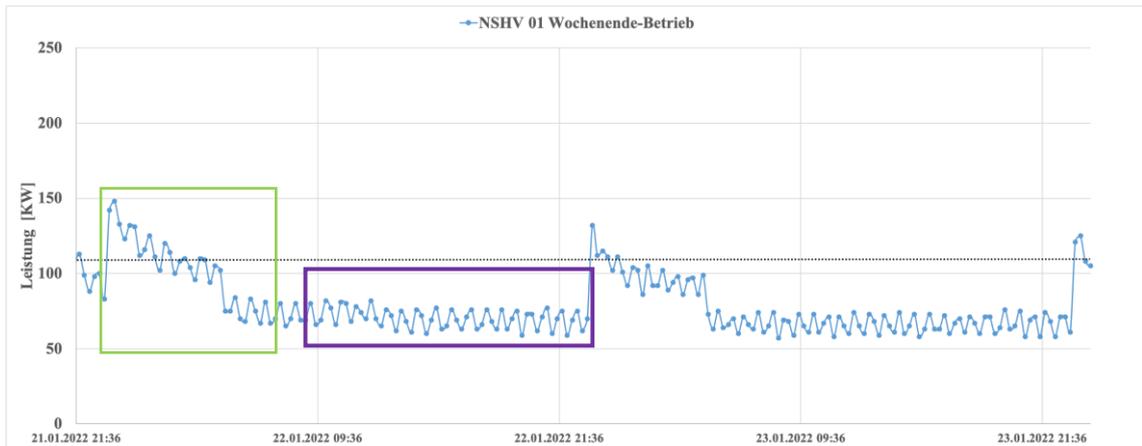


Abbildung 19: Lastganganalyse NSHV02 am Wochenende

NE17 Q6:

Ein großer Teil der Produktion ist auf die Unterverteilung NE17 Q6 installiert. Die wichtigsten elektrischen Leistungsdaten aus der Lastgängen 2022 der NE17 Q6 sind:

Minimale Leistung	33 KW
Mittlere Leistung	76 KW
Maximale Leistung	147 KW

Tabelle 1: Leistungsdaten der Unterverteilung NE17 Q6

In der Abbildung 20 ist der Anteil der NE17 Q6 (Orange) in NSHV01 (blau) zu sehen. Es ist zu erkennen, dass NE17 q6 der Hauptanteil der Verbrauch von NSHV 01 verursacht

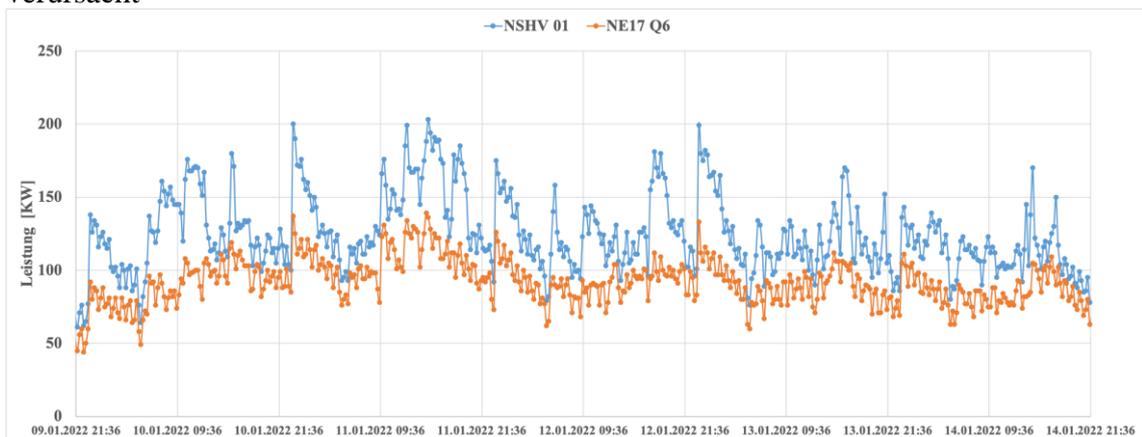


Abbildung 20: Lastganganalyse der Unterverteilung NE17 Q6

NE22 Q4:

Die andere Unterverteilung der NSHV 01 nämlich NE22 Q4 enthält auch ein Teil der Produktionsleistungsverbräuche. Die wichtigsten elektrischen Leistungsdaten aus der Lastgängen 2022 der NE22 Q4 sind:

Minimale Leistung	7 KW
Mittlere Leistung	28 KW
Maximale Leistung	88 KW

Tabelle 2: Leistungsdaten der Unterverteilung NE22 Q4

In der Abbildung 21 ist die Hauptverteilung NSHV 01 im Blau, die aus der Unterverteilungen NE17 Q6 im Orange und der Unterverteilung NE22 Q4 im Grau dargestellt. Es ist von der Abbildung 21 zu erkennen, dass der Anteil der NE22 Q4 in der NSHV01 ist, wesentlich niedriger als NE17 q6 ist.

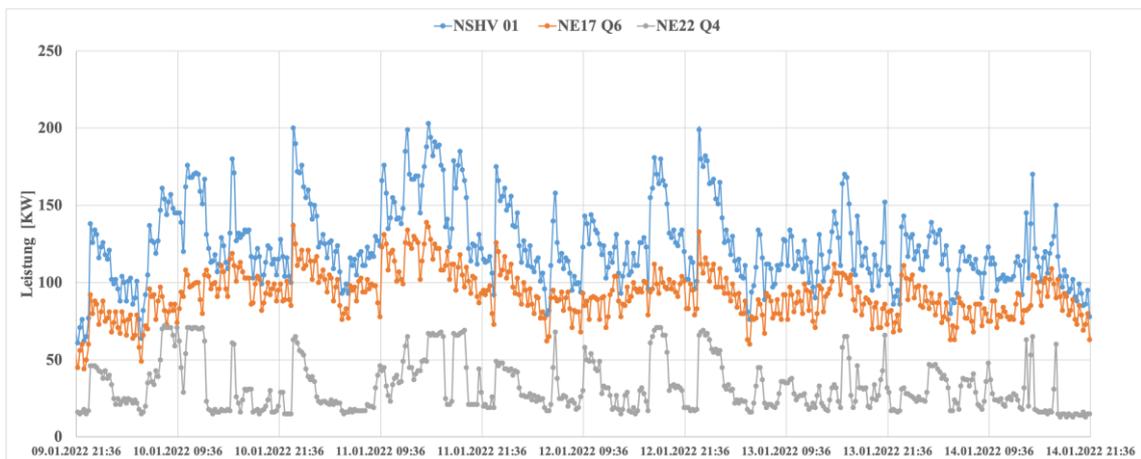


Abbildung 21::Lastganganalyse der Unterverteilung NE22 Q4

- NSHV 02 (Niederspannungshauptverteilung)

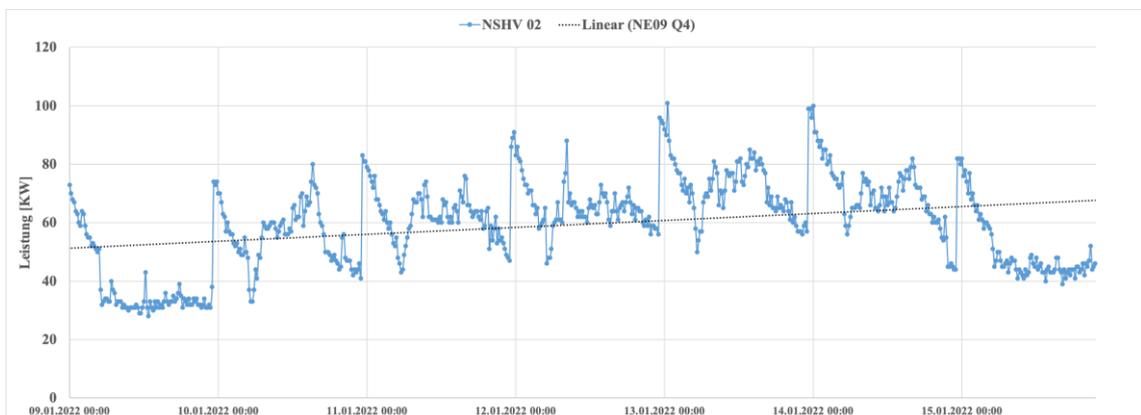


Abbildung 22: Lastganganalyse der Hauptverteilung NSHV02

Die Hauptverteilung NSHV 02 ist in 4 Verteiler nämlich NE08 Q7, NE02 Q5, NE03 Q7 und NE09 Q4 untergeteilt. Der Verbrauchsverlauf der NSHV 02 ist in der Abbildung 22

angezeigt. Es ist eine maximale Leistungsspitze von 100 KW und einen durchschnittlichen Verbrauchsleistung bei etwa 60 KW zu erkennen.

NE08 Q7

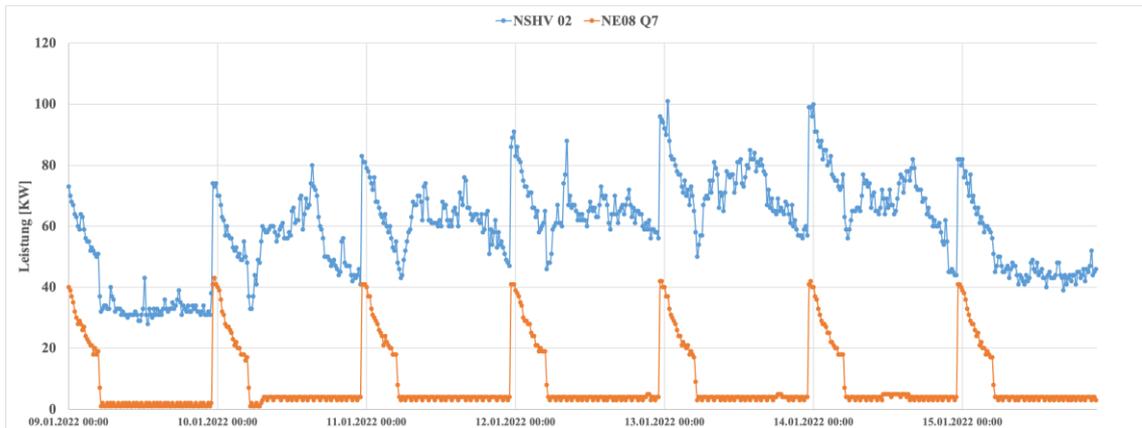


Abbildung 23: Lastganganalyse der Unterverteilung NE08 Q7

Die Abbildung 23 zeigt den Verbrauchsleistungsverlaufsanteil von UV NE08 Q7 (orange) in der NSHV 02 (blau). Ein sich wiederholendes Muster ist im dunklen Blau dargestellt. Der Verlauf des markierten Kreises zeigt um 23:15 eine Leistungsspitze von etwa 40 kW. Dies entspricht den Begleitheizungen, die für den Zeitraum zwischen 23:00 Uhr und 05:00 Uhr eingestellt sind. Abgesehen von den Begleitheizungen und dem Schiebe-Regal der Lagerhalle 1 gibt es keine großen Verbraucher auf der UV NE08 Q7. Die Photovoltaik-Anlage 2 mit 112 kWp ist ebenfalls mit der Unterverteilung NE08 Q7 verbunden.

NE02 Q5:

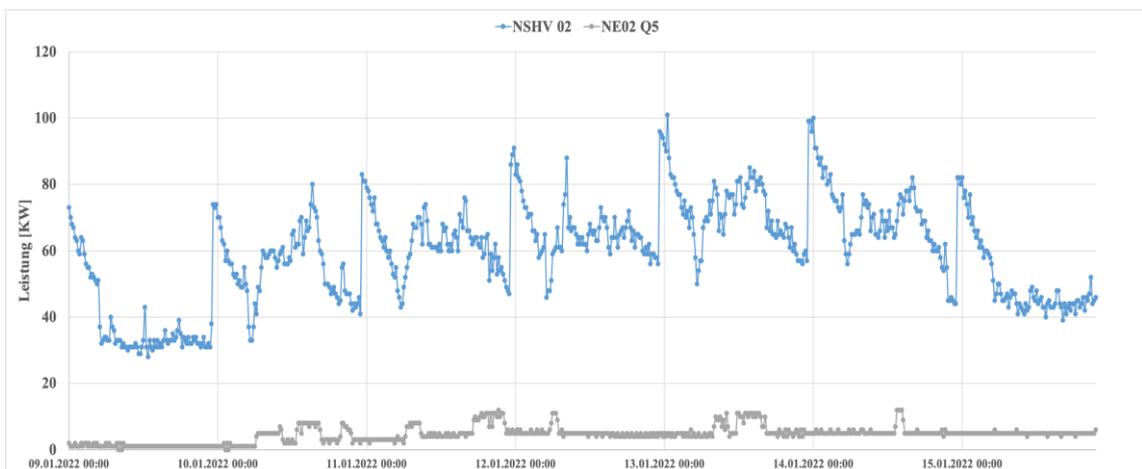


Abbildung 24: Lastganganalyse der Unterverteilung NE02 Q5

Im Abbildung 24 ist in der Farbe grau der Anteil der Verbrauchsleistungsspitzen der Unterverteilung NE02 Q5 zu sehen, welche eine maximale Leistungsspitzen von 10 KW anzeigt.

NE03 Q7:

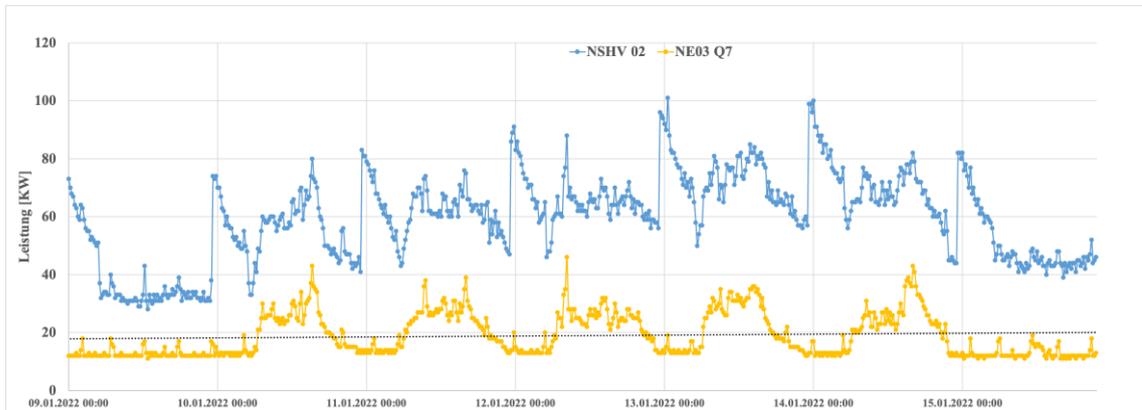


Abbildung 25: Lastganganalyse der Unterverteilung NE03 Q7

In der Abbildung 25 ist der Anteil der Leistungsspitzen der Unterverteilung NE03 q7 im gelb angezeigt. Man erkennt keine ordentlichen wiederholenden Muster. Auf die Unterverteilung liegen meisten Verbräuche des Labors. Für einige Verbraucher konnten die Verbrauchsleistungswerten nicht ermittelt werden aber die meisten davon liegen in niedrigen KW-Bereich. Es ist aus der Abbildung 25 eine Grundlast von etwa 17KW zu sehen. Es besteht sich hauptsächlich aus Verbraucher der Lüftungsanlage zusammen. An einem normalen Arbeitstag liegen die Lastspitzen meisten bei etwa 25KW.

NE09 Q4

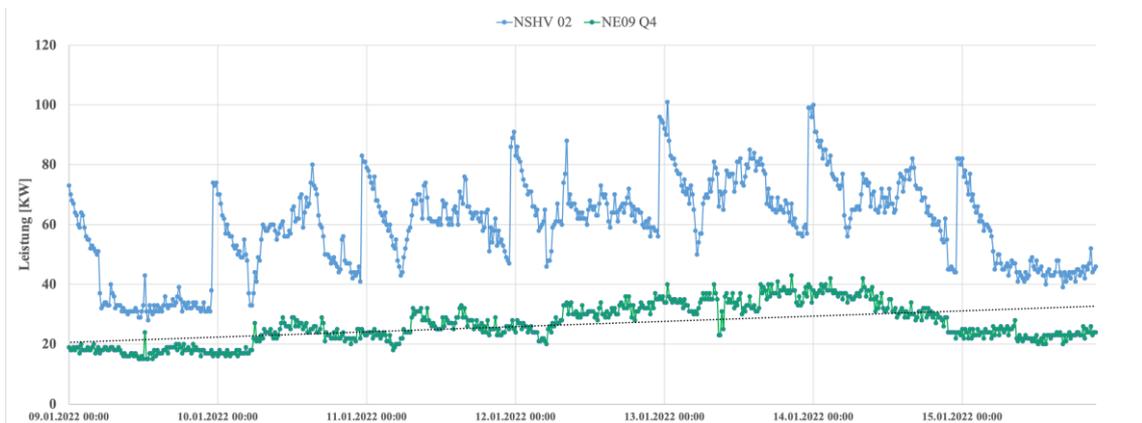


Abbildung 26: Lastganganalyse der Unterverteilung NE09 Q4

Die Abbildung 26 zeigt im dunklen grün den Lastspitzenverlauf der Unterverteilung NE09 Q4, wobei die mittlere Leistung bei etwa 25KW liegt. Es ist keine großen Schwankungen in den Lastspitzen zu beobachten. Es liegt daran, dass die hauptsächlichen Verbraucher die Verbraucher der Verwaltungsgebäude, der Wärmekammer 3 (15KW in Lagerhalle 1) und die Steuereinheiten sind. Da der Wärmekammer meistens für 24h eingestellt sind, ist eine Grundlast bei 20 KW zu sehen.

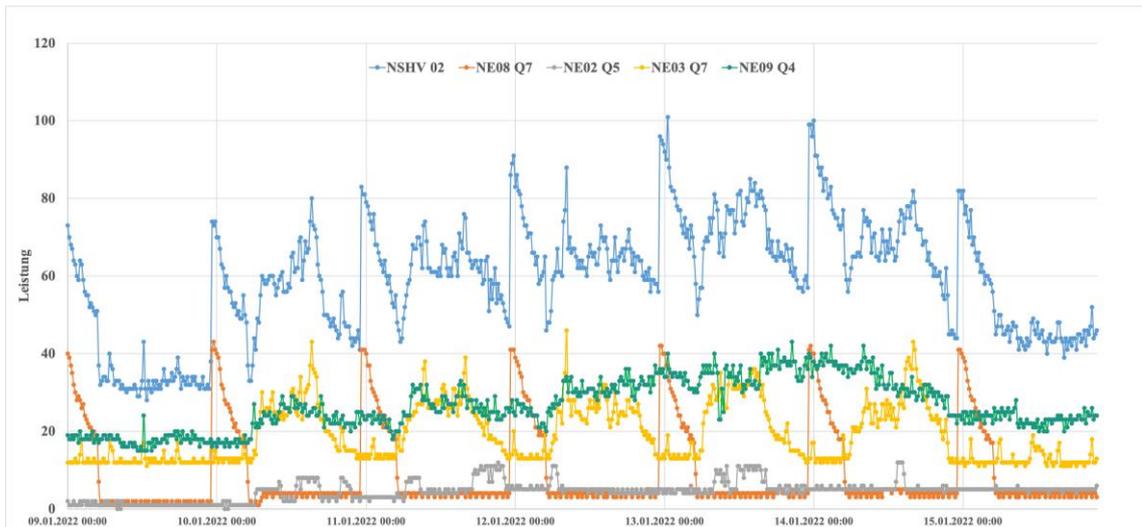


Abbildung 27: Zusammensetzung der Unterverteilungen und NSHV 02

Die Lastspitzen der 4 Unterverteilungen nämlich NE08 Q7, NE02 Q5, NE03 Q7, NE09 Q4 und deren Zusammensetzung als Lastspitzen der Hauptverteilung NSHV 02 ist In der Abbildung 27 zu sehen. In der sind die Minimale-, Mittlere- und Maximale-leistungsspitzen alle Unterverteilungen zusammengefasst.

2022	4801			4922				
	NE17q6	NE22q4	Gesamt	NE02q5	NE08q7	NE03q7	NE09q4	Gesamt
Min.	33	7	40	0	0	9	1	10
Mittel	76	28	104	2	6	23	14	44
Max.	147	88	235	36,28	43	58	45	182

Tabelle 3: Leistungsdaten aller Unterverteilungen ADDINOLs

3.2 Extremverbraucher

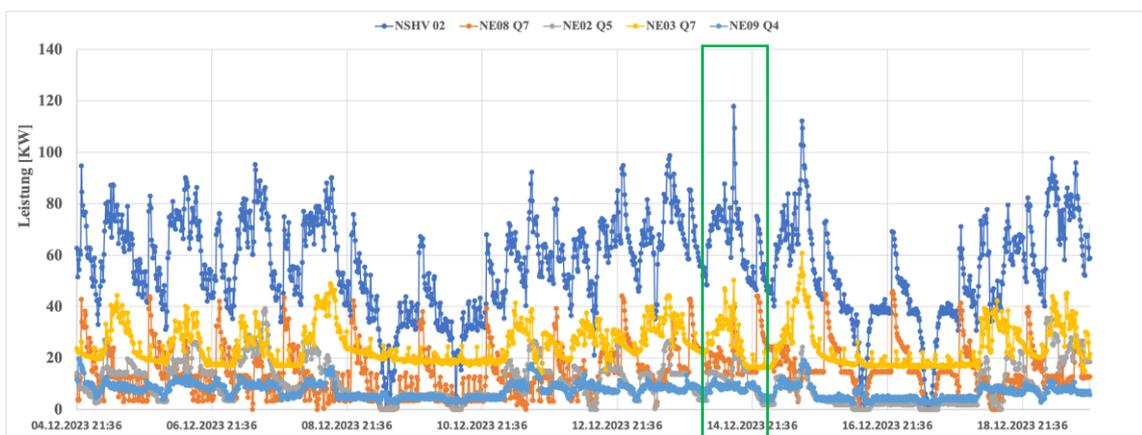


Abbildung 28: Lastspitzen Analyse der Extrem-Verbraucher der Hauptverteilung NSHV 02 im Dezember

In der Abbildung 28 ist der Verlauf für die Lastspitzen für das Jahr 2023 im Monat Dezember für die Hauptverteilung NSHV 02 dargestellt. Der dunkelblaue Verlauf zeigt den Gesamtbedarf für die Hauptverteilung NSHV 02 und stellt sich zusammen von der Vier Unterverteilungen, die mit verschiedenen anderen Farben dargestellt sind.

Es sind zwei maximale Leistungsspitzen deutlich zu erkennen. Die höchste Spitze, markiert in Grün, hat einen Betrag von 118 KW.

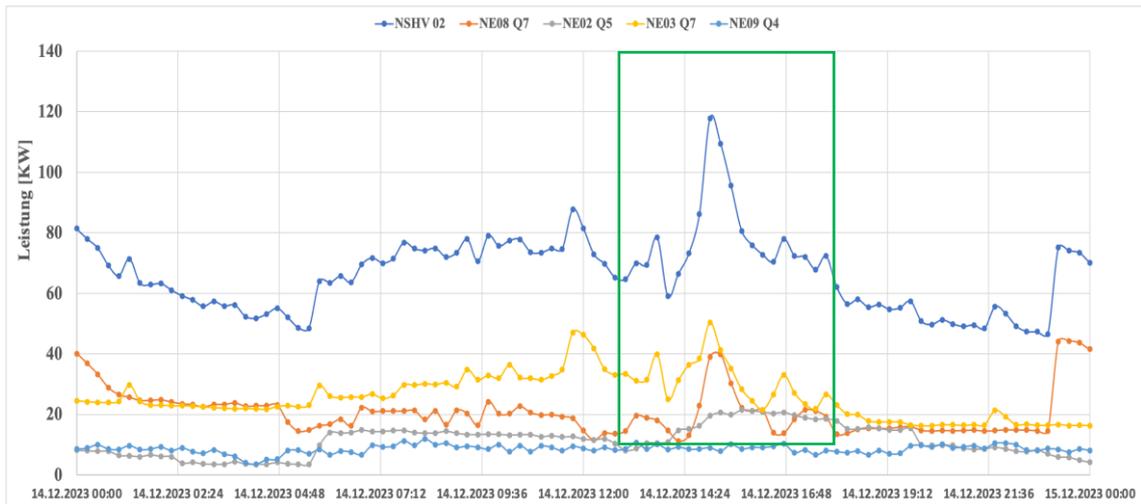


Abbildung 29: Analyse der Leistungsspitze im Dezember

Der Bereich der maximalen Leistungsspitze ist in der Abbildung 29 zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die der kurze Anstieg in der Leistung am 14.12.2023 um 15:00 Uhr wegen des höheren momentanen Bedarfs in der zwei Unterverteilungen (NE03 q7 und NE08 q7) zurückzuführen ist. Die Unterverteilung NE03 q7 (in der Abbildung 29 Gelb dargestellt) enthält alle Verbraucher der Abteilung Labors.

Da in der Abteilung Labors verschiedene Testgeräte wie Viskosimeter, Spektrometer, Kühlanlagen und die Versuchsstände für mechanische Eigenschaften von Bauteilen wie Getrieben mit Schmierstoffen vorhanden sind, ist eine regelmäßige Verlauf über die Grundlast nicht zu prognostizieren. Die Grundlast (etwa 20KW) enthält hauptsächlich die Verbraucher der Lüftungsanlage. Die momentane Höhe Bedarf in der Unterverteilung konnte wegen des gleichzeitigen Anschaltens verschiedene Geräte sein.

Die Unterverteilung NE 08q7 (in der Abbildung 29 in Orange dargestellt) enthält die Begleitheizung für die Rohren, elektrische Heizung für bestimmte Tanks und die Druckluftstation. Da die Begleitheizung in der Nacht angeschaltet werden und die elektrische Heizung für die Tanks selten in dem Einsatz kommt, ist der kurzzeitige Peak von der Druckluftanlage verursacht worden. Die Druckluftanlage besitzt zwei Kompressoren, eine für die Bedeckung der Grundlast und eine zusätzliche für den Hochlastbetrieb. Die Grundlast beträgt etwa 20KW und bei Betrieb des zusätzlichen Kompressors ist bei 40KW. Der Übergang von grundlastbetrieb zu Hochlastbetrieb ist in der Abbildung 29 für den Verlauf für die Unterverteilung NE08 q7 zwischen den Zeitraum 14:45 bis 15:45 zu sehen.

4 Eigenerzeugung

Der jährliche Elektroenergiebedarf der Firma liegt bei etwa 1300 MWh. Die Elektroenergie wird von der Energieversorger gekauft. Da die Elektroenergie hauptsächlich von dem konventionellen Quellen gewonnen wird, sind die Strompreise von der Rohstoffkosten abhängig. Mit steigendem Energiebedarf und knappen konventionelle Rohstoffen sind die Rohstoffpreise immer mit Volatilität betroffen. Um interne Kostenreduzierung wegen der Elektroenergienutzung wird in der Firma die Elektroenergie mit Fotovoltaik Anlagen produziert. Es ist insgesamt über 800MWh Jahresproduktion Kapazität installiert. Damit ist etwa 60% der Bedarf der Elektroenergie durch die PV-Anlagen erzeugt.

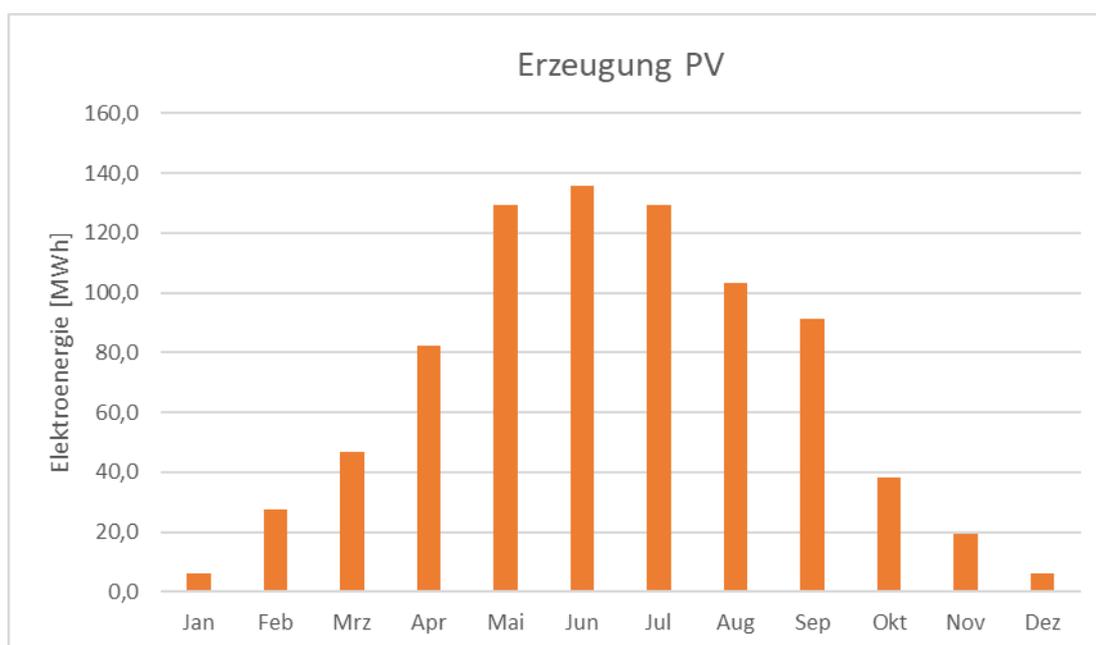


Abbildung 30: Monatliche PV-Erzeugungsleistung

In der Abbildung 30 ist der monatlichen erzeugten Energie von der installierten PV-Anlagen zu sehen. Der Grafik ist zu entnehmen, dass die erzeugt Energie in Sommer Monaten im Vergleich zu Winter Monaten eine große Schwankung anzeigt. Im Sommer erreichen die Anlagen eine Gesamterzeugung der Energie von 130KWh und im Winter bei weniger als 20KWh. Die monatliche Elektroenergieerzeugung hängt von dem Wetter jeweiligen Monats ab. Die jährlichen Unterschiede können bis zu 10% der Werte des Vorjahres betragen.

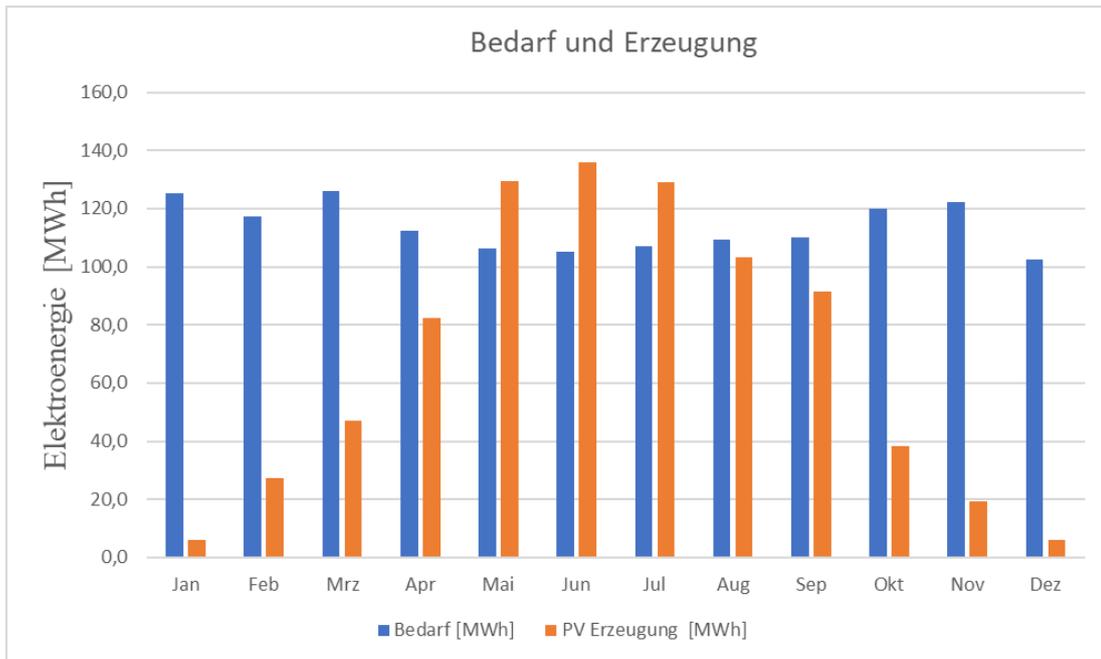


Abbildung 31: Monatliche Elektroenergie Bedarf und Erzeugung

Die Abbildung 31 stellt den monatlichen Elektroenergiebedarf und die monatliche Elektroenergieerzeugung dar. Man kann feststellen, dass ein Überschusselektroenergie im Monaten Mai, Juni und Juli und eine sehr hohe Autarkiegrad in den Monaten April, August und September zu sehen ist. Am wenigstens wird die Elektroenergie in den Monaten Januar und Dezember erzeugt.

Der elektroenergiebedarf hängt von der Menge zu herstellenden Produkten ab. Der Betrag der jährliche Bedarf liegt zwischen 1200 MWh und 1400 MWh.

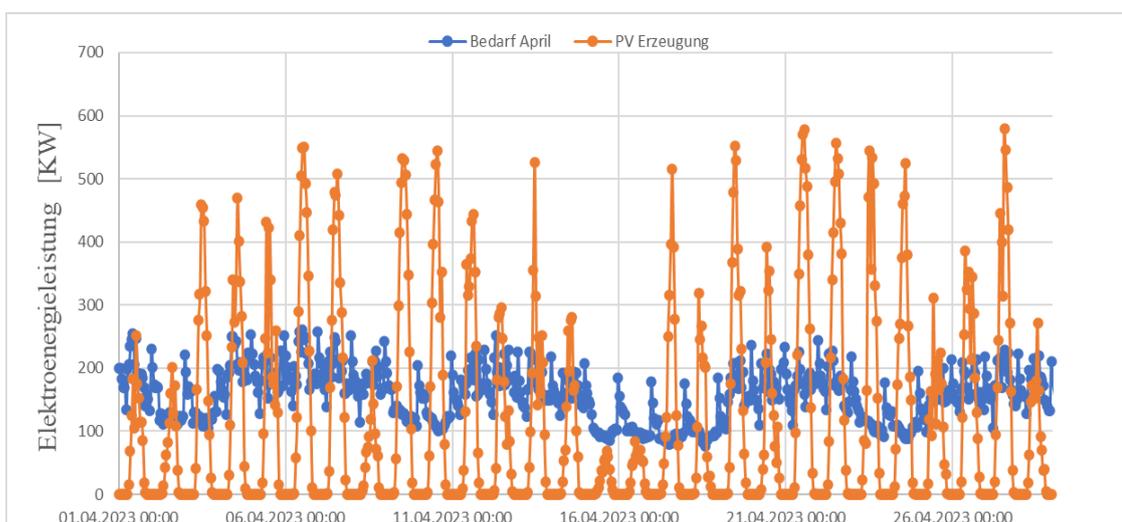


Abbildung 32: Analyse der Elektroenergie Bedarf und Erzeugung für den Monat April

Die Abbildung 32 zeigt den Verlauf des Elektroenergiebedarfes und die erzeugte Energie für den Monat April. Es ist festzustellen, dass am meisten Tagen eine Überschussenergie, erzeugt von der PV-Anlagen, vorhanden ist. Die erzeugte PV-Leistung, dargestellt im Orange, stellt sich mit Vier Anlagen zusammen. Zwei Anlagen sind unter die Hauptverteilung NSHV 01 und den Rest zwei unter NSHV 02 angeschlossen.

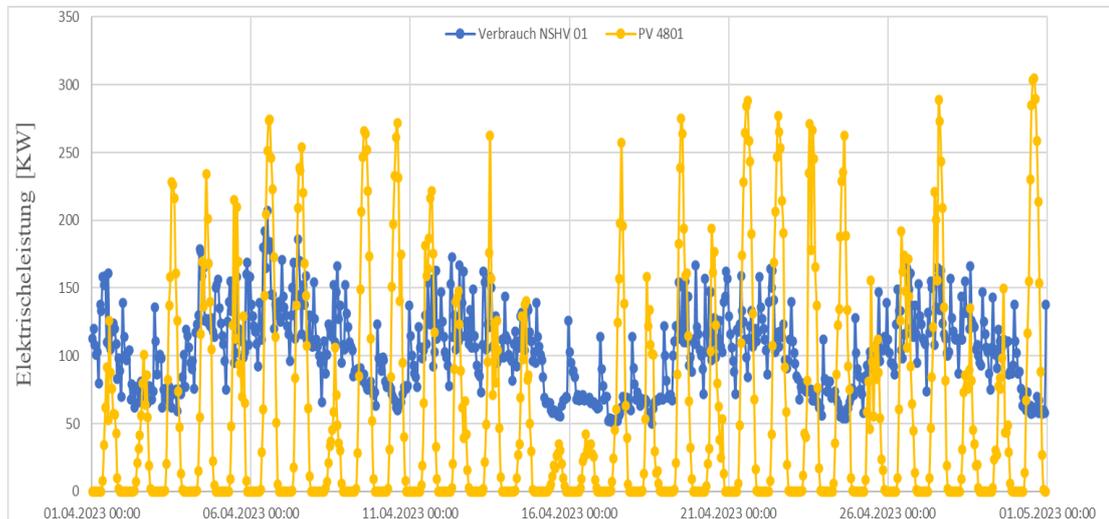


Abbildung 33: Analyse der Hauptverteilung NSHV 01 Bedarf und Erzeugung

In der Abbildung 33 ist der Verbrauchsleistung der Hauptverteilung NSHV01 und die Erzeugungsleistung der Anlagen 1 und 4 für den Monat April zu sehen. Es ist eine höchste Verbrauchsleistung von 200KW und die maximale Erzeugungsleistung von 300KW.

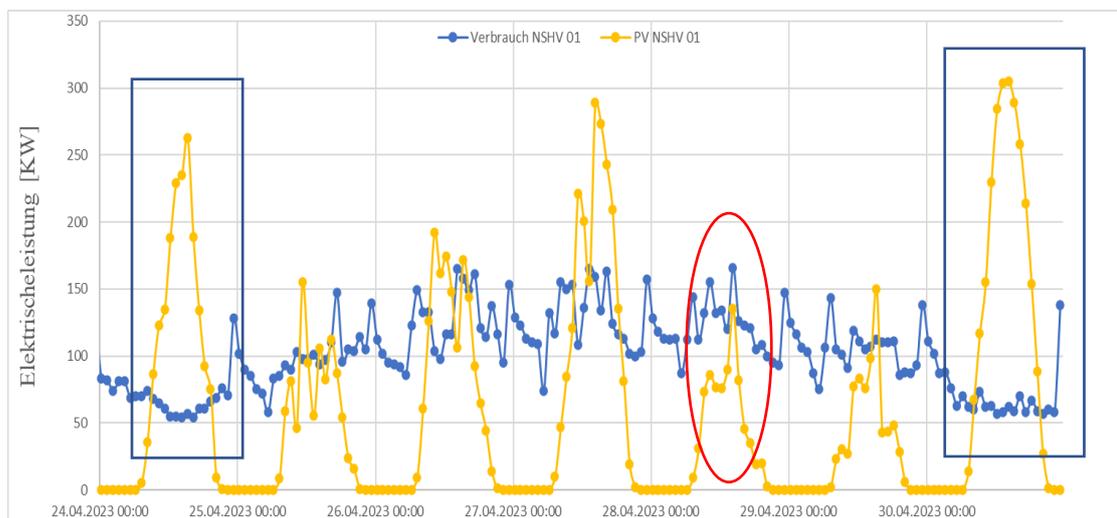


Abbildung 34: Verhalten der PV-Erzeugungsleistung

In der Abbildung 34 ist der Verlauf vom Diagramm auf eine Woche dargestellt. Jeder Punkt stellt der mittleren Leistung der Stunde dar. Der Verbrauchsleistung der Woche liegt in dem Bereich von 50 KW bis etwa 150 KW. Die Erzeugungsleistung hängt vom Wetter und der zeitliche Verlauf der Sonne ab, deswegen ist jeden Tag der Form der

Erzeugungsleistung unterschiedlich. In der Abbildung 34 sind Verläufe der drei Tagen markiert.

Am 24.04 ist der Verbrauchsleistung Tagsüber unter 80KW, es konnte daran liegen, dass an dem Tag keinen Produkten (Wochenende-Betrieb) hergestellt wurden. Die Erzeugungsleistung tagsüber lag viel höher. Die Fläche der Differenz zwischen die gelbe Kurve und die Verbraucherleistungskurve (Blau) ist die Überschussenergie für den Tag. Im Rot ist tagsüber die Verbrauchsleistung höher als die Erzeugungsleistung. Die maximale Erzeugungsleistung ist unter 150KW zu sehen. Da die maximale Erzeugungsleistung für den Tag nun Hälfte der möglichen maximalen Leistung für den Monat, es handelt es sich um die Erzeugung wegen der Diffusionsstrahlung der Sonne. Die Erzeugungsleistungskurve der Bereich 3 zeigt die optimale Erzeugungsleistung der Fotovoltaik Anlagen für den Monat April. Es ist an dem Tag viel Überschussenergie erzeugt, da keine Herstellung der Produkten wegen der Wochenenden Betrieb.

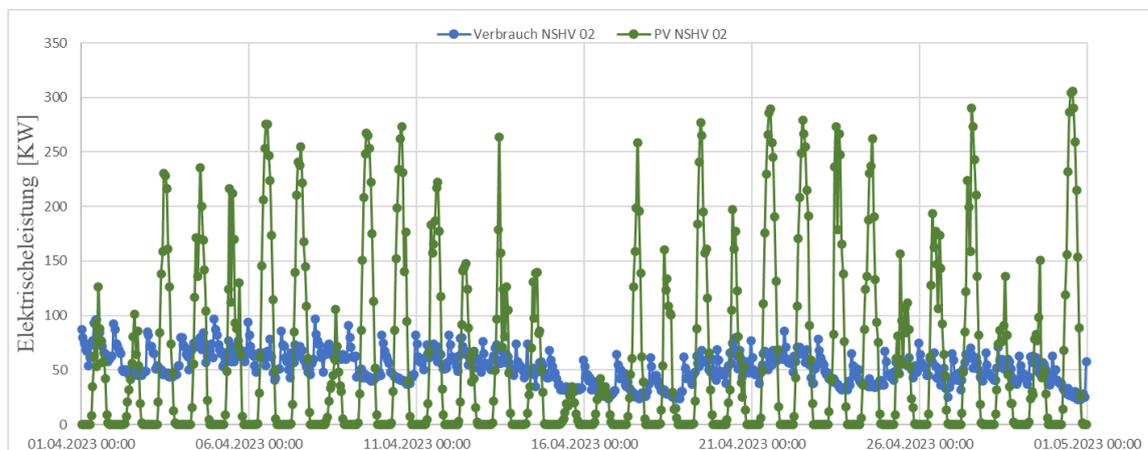


Abbildung 35: Analyse der Hauptverteilung NSHV 02 Bedarf und Erzeugung

In der Abbildung 35 ist der Erzeugungsleistung der PV-Anlagen 2 und 3 und die Verbrauchsleistung der Hauptverteilung NSHV02 zu sehen. Die maximale Leistung der NSHV 02 liegt bei 100KW. Es ist zu sehen, dass die Verbrauchsleistung zwischen 50KW und 100KW liegt. Die höchste Erzeugungsleistungsspitze ist 300 KW. Da die mittlere Verbrauchsleistung der Hauptverteilung NSHV02 viel geringer ist als die Hauptverteilung NSHV 01, ist der Anteil der Überschussenergie bei der Hauptverteilung NSHV 02 viel höher. Die Fläche der Differenz zwischen die grüne Kurve und die Blaue Kurve für den Zeitraum ergibt die Überschussenergiemenge.

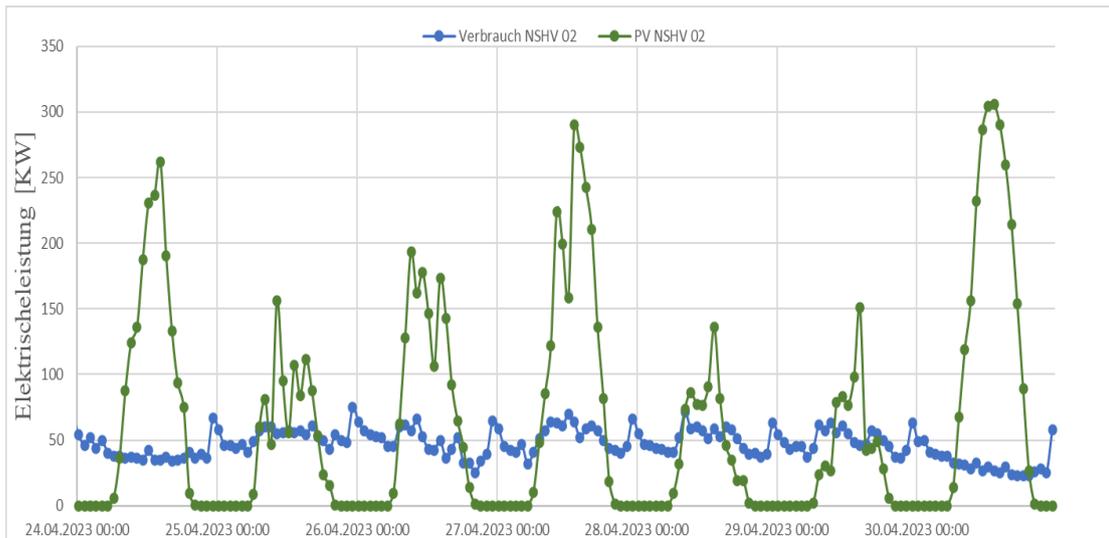


Abbildung 36: Verhalten der PV-Erzeugungsleistung NSHV 02

In der Abbildung 36 ist der Verläufe der Bedarf und der Erzeugung der Hauptverteilung NSHV 02 für den Zeitraum eine Woche gezeigt. Da in der Hauptverteilung NSHV 02, es zu erkennen ist, dass der Bedarf der Elektroenergie in der Hauptverteilung NSHV 02 etwa konstant bei 50KW liegt, dadurch ist die Überschussenergie in der Hauptverteilung NSHV 02 viel höher als die Hauptverteilung NSHV 01.

5 Lastmanagementmöglichkeiten

- Leistungsspitzenverschiebung:

Bei jetziger Situation wird tagsüber die Überschussenergie erzeugt von der PV-Anlagen immer ins Netz der Energiebetreiber gespeist. In der Zukunft wird tagsüber die Überschussenergie in dem Druckluftspeicher gespeichert und für den nächtlichen Bedarf der Firma von der Druckluftspeicher mit einem maximalen Roundtrip Efficiency von 72% verwendet. Außerdem sollte der Druckluftspeicher für die Leistungsspitzenkappung jede Zeit bei der Überschreitung der Grenzwerte gesetzt werden.

In den Zeiten, wann keine Produktion vorhanden ist und die PV-Anlagen eine Überschussenergie erzeugen, könnte man mit Hilfe ein Lastmanagement Software die Begleitheizungen, die täglich in der Nacht automatisch angeschaltet werden, alle Unterverteilungen tagsüber unter eine vorausgesetzte maximale obere Leistungsspitze umgeschaltet werden. Das Resultat ist, dass die Begleitheizungen bräuchten, erzeugen sehr geringere Leistungsspitzen in der Nacht für die Vorerwärmung für die Frühschicht Produktionsbetrieb.

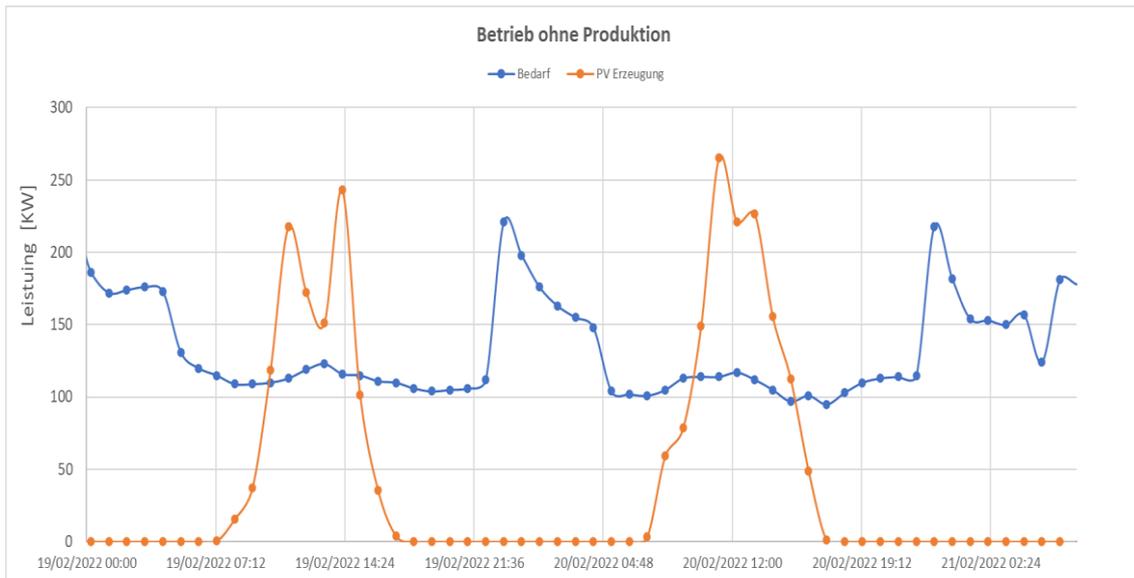


Abbildung 37: Analyse der Lastspitzenverschiebung

Es sind zwei Arten der Betriebe der Begleitheizungen in der Firma vorhanden.

1. Die Begleitheizungsrohre werden für Dauerbetrieb eingestellt, da sie während der Produktion kontinuierlich gebraucht werden und müssen deshalb bestimmte Temperaturen immer halten.
2. Rest der Begleitheizungen werden nur bei Schichtbeginn gebraucht und werden in der Nacht um 23:00 Uhr für die Vorerwärmung eingestellt.

Einige Begleitheizungsrohre werden kontinuierlich betrieben, da sie während der Produktion ununterbrochen benötigt werden und daher bestimmte Temperaturen konstant halten müssen. Die übrigen Begleitheizungen werden lediglich zu Schichtbeginn benötigt und werden daher um 23:00 Uhr nachts zur Vorerwärmung eingestellt.

- Lastspitzenkappung:

Da die Unterverteilungen NE03 Q7 und NE09 Q4 nicht auf die E-Zentrale liegen, ist die Verbindungen deren Schaltschränke mit zentralen Druckluftspeicher sehr aufwendig und mit hohen Kosten enthalten.

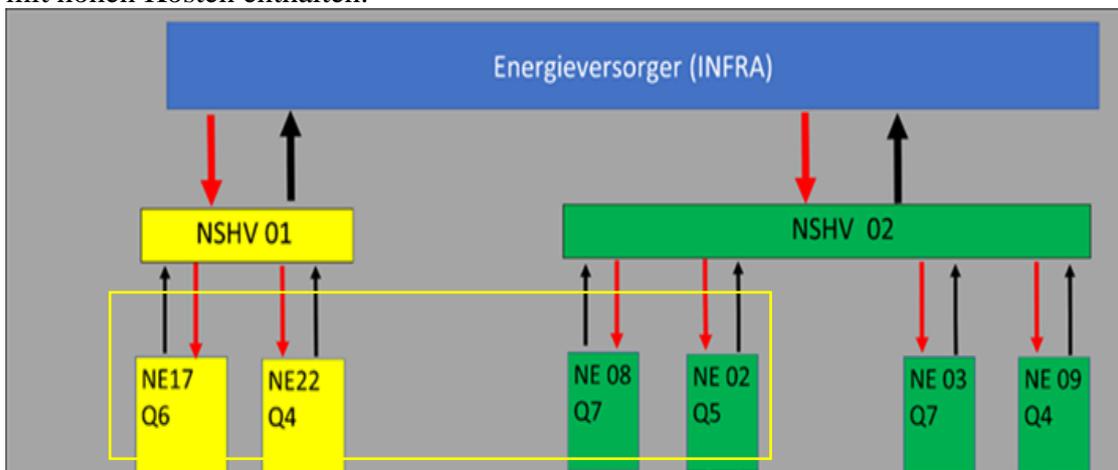


Abbildung 38: Zusammenanschluss der Unterverteilungen der E-Zentrale

Um die Lastspitzenkappung der Unterverteilungen NE03 Q7 und NE09 Q4 vornehmen zu können, müssen eine neue Alternative mit geringer Investition gesetzt werden.

Alternative Möglichkeit liegt, indem man die echtzeitige Erfassung der Leistungen der Unterverteilungen NE03 Q7 und NE09 Q4 erfasst und eine Begrenzungsleistungslimit einsetzt. Bei Erreichen dieses Limit konnte man die Lastspitzen in der Unterverteilungen NE08 Q7 und NE02 Q5 verringern, indem man den Druckluftspeicher entlädt.

Der E-Zentrale enthält die Unterverteilungen NE17Q6; NE22 Q4; NE08 Q7 und NE02 Q5. [NE17Q6 ist schon mit einem internen Speicher für die Lastspitzenkappung vorhanden und die Unterverteilung NE22 Q4 enthält alle Produktionsrelevanten Verbraucher.] Da NE08 Q7 und NE02 Q5 (siehe Tabelle 3: Leistungsdaten aller Unterverteilungen ADDINOLs sehr geringe Mittelwert für die Verbraucherleistungen besitzen, konnte man mit geringem Aufwand einige große Verbraucher von NE17 Q6 auf die Unterverteilungen NE08 Q7 und NE02 Q5 legen, damit konnte bei Erreichen des oberen Leistungslimits der Unterverteilungen (NE03 Q7 und NE09 Q4) eine höhere Lastspitzenkappung der Hauptverteilung NSHV 02 durch das Einsetzen des Druckluftspeichers erreicht werden. Von den neuen verschobenen Lasten werden abschaltbare Lasten identifiziert und bei sehr hohem Bedarf auf die Unterverteilungen (NE03 Q7 und NE09 Q4) und bei sehr geringem Niveau von dem Druckluftspeicher, könnten zum Zweck der Lastspitzenkappung die identifizierten Lasten ausgeschaltet werden.

6 Speicherung

6.1 Druckluftspeichertechnologie

Die Druckluftspeicherkraftwerk (Compressed Air Energy Storage, CAES) speichert die elektrische Energie in mechanische Energie. Die elektrische Energie wird von den Kompressoren für die Verdichtung der Luft auf die hohen Drucke benutzt und unter hohem Druck in einen druckbeständigen Speicher gespeichert. Bei dem Bedarf der elektrischen Energie treibt die komprimierte Luft einen Turbinen-Generator an. (Wolf, Span, & Weidner, 2011)

Bei der Kompressionsvorgang erreicht die Luft einen Druck bis zu 150 bar und eine Temperatur bis zu 650 °C. Beim Entladen des Speichers expandiert die Luft und kühlt sich ab. Wenn das Prozess der Kompression und Expansion adiabatisch ist, findet kein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt. Die Luft hat die gleiche Temperatur bei gleichem Druck nach der Einspeicherung wie vorher. (Wolf, Span, & Weidner, 2011)

Mit der Zeit kann die heiße Luft nach der Einspeicherung wegen möglichen Wärmeverlusten abkühlen, damit kann die Luft je nach verlorene Wärmemenge nach der Expansion eine tiefere Temperatur als vor der Kompression erreichen. Die tieferen Temperaturen gefährden die Eisbildung in der Turbine, was das Lebensdauer der Turbine verringern könnte. Um diesem Zustand zu vermeiden, werden die diabate Kraftwerke mit Gas als Brennstoff für die Vorwärmung vor dem Entspannungsvorgang eingesetzt. (Wolf, Span, & Weidner, 2011)

Wegen der Wärmeverluste und einen zusätzlichen Energieträger erreichen die diabate Kraftwerke maximale Anlagenwirkungsgrad von etwa 50%. (Diekmann & Rosenthal , 2014)

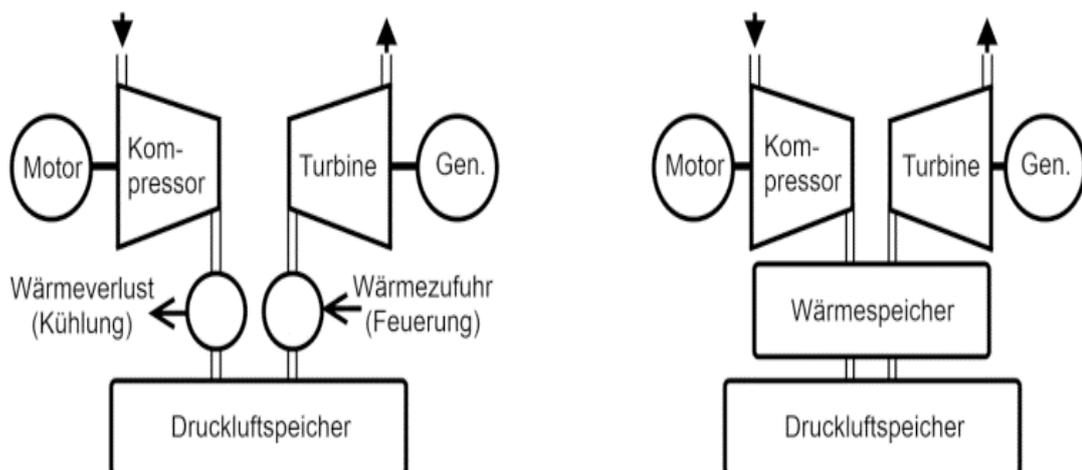


Abbildung 39: Schematische Darstellung eines diabaten (Links) und adiabaten (Rechts) Druckluftspeichersystems

Quelle: (Diekmann & Rosenthal , 2014)

Klassifizierung:

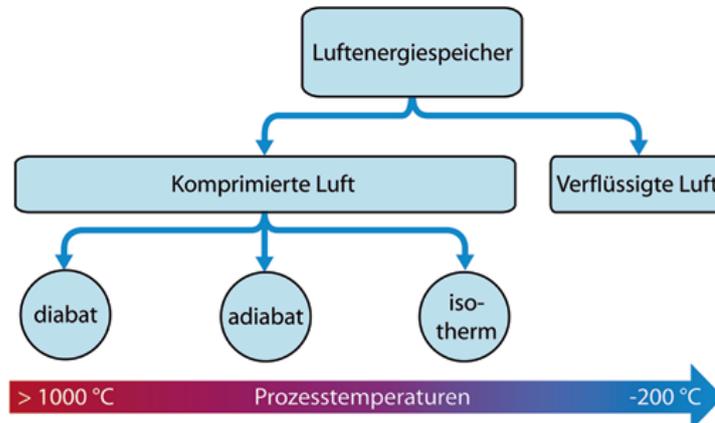


Abbildung 40: Einteilung der Luftenergiespeicher nach Prozesstemperatur

Quelle: (Sterner & Stadler, 2017)

- Prozesse mit externer Zufeuerung: diabat
der Zykluswirkungsgrad des Druckluftspeicherkraftwerks in Huntorf mit 42 % und der der McIntosh Anlage mit 54 % angegeben. (Diekmann & Rosenthal , 2014)
- Prozesse ohne externe Zufeuerung: adiabat, isotherm
Diese Art von CAES lässt sich nun bezüglich ihres Zykluswirkungsgrades direkt mit anderen reinen Speichertechnologien wie Batterien und Pumpspeichern vergleichen. Typische Werte für den Zykluswirkungsgrad adiabater CAES bewegen sich zwischen 55 und 75 %. (Diekmann & Rosenthal , 2014)

Druckluftspeichersystem

Die Vermeidung auf die externen Energieträger für die Vorwärmung der eingespeicherten Luft vor dem Entspannungs Vorgang ist den wichtigsten Schritt für die Wandlung der diabate Druckluftspeicherkraftwerke zu einem Speichersystem (siehe Abbildung 39 links). Die Durchführung der Schritt erfolgt, indem die entstandene Wärme während des Kompression-Vorgangs gespeichert wird und später vor dem Expansionsprozess zurückgeführt wird (siehe Abbildung 39 rechts). Technologien wie adiabates und isothermes CAES sowie LAES (Liquid Air Energy Storage) ermöglichen dies. Sie sind emissionsfrei im Gegensatz zu diabaten CAES, werden jedoch noch nicht großflächig eingesetzt und befinden sich in der Forschung und Entwicklung oder in ersten Demonstrationsprojekten. (Sterner & Stadler, 2017)

Adiabate Druckluftspeicher:

Der Prozess der Ungekühlten Druckluftspeichern (engl.: Uncooled Compressed Air Energy Storage) ist das einfachste Variante der Adiabaten Druckluftspeicher, wobei die Luft in Abhängigkeit vom Speicherdruck sehr hohe Temperaturen erreicht und in diesem Zustand gespeichert wird, damit entfällt der Schritt für die Vorwärmung der komprimierten Luft vor der Expansion. Herausforderung bei diesem Konzept sind die hohen Temperaturen der Verdichtungsstufen und die Standhaltung der vorhandenen

Temperaturen der Druckluftspeicher. Wegen dieser Herausforderungen ist U-CAES derzeit noch in der Forschungsphase und werden Mehrheit der adiabaten Druckluftspeicher-Konzepte basieren auf einer Trennung von der Druckluft und Wärmespeicherung. Dabei wird die Komprimierte Luft während verschiedenen Verdichtungsstufen abgekühlt und in einem Wärmespeicher gespeichert. (Sterner & Stadler, 2017)

6.2 Modellbildung

Modellbildung für einen adiabaten Druckluft Speicher:

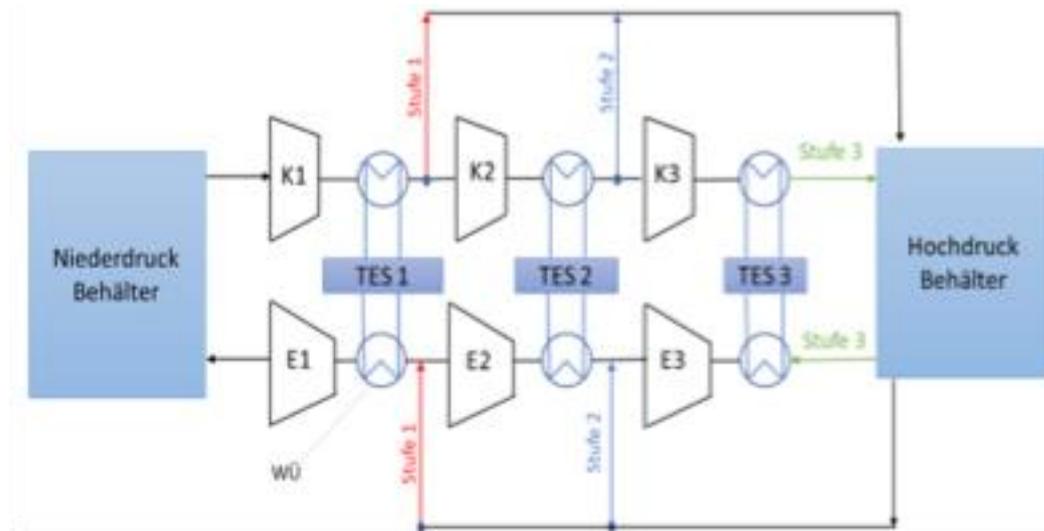


Abbildung 41: Schematische Darstellung des modellierten Druckluftspeichersystems

	Komponente	Bezeichnung	Wertebereich
1	Niederdruck Behälter	---	80 - 2 bar
2	Kompressor 1	K1	273-423 [K]
3	Kompressor 2	K2	273-423 [K]
4	Kompressor 3	K3	273-423 [K]
5	Wärmeübertrager	WÜ	-- [K]
6	Wärmespeicher 1	TES 1	max. 423 [K]
7	Wärmespeicher 2	TES 2	max. 423 [K]
8	Wärmespeicher 2	TES 3	max. 423 [K]
9	Hochdruck Behälter	---	100-200 [bar]
10	Expansionsturbine	E1	-- [K]
11	Expansionsturbine	E2	-- [K]
12	Expansionsturbine	E3	-- [K]

Tabelle 4: Komponente des Druckluftspeichersystems

In der Abbildung 41 ist das Model für das Druckspeichersystem dargestellt. Das System besteht aus verschiedenen Komponenten, die in der Tabelle 4 ergänzt sind. Der Niederdruck und der Hochdruckbehälter besitzen ein Anfangsdruck von 80 bar bzw.

100bar. Mit der Zeit wird die Masse des Gases von der Niederdruckbehälter in der Hochdruckbehälter komprimiert. Für die Kompression ist die Überschuss-Energie von der PV-Anlagen verwendet. Vor das Gas in der Hochdruckbehälter gespeichert wird, wird das Gas mit dem Wärmeüberträger abgekühlt. Die abgegebene Wärme wird in dem Wärmespeicher TES (eng. Thermal Energy Storage) gespeichert.

In dem Model findet die Kompression und die Expansion je nach dem Austrittstemperatur des Kompressors in maximal in drei Stufen statt. Wenn der Austrittstemperatur des Kompressors mehr als 423K (150°C) ist, wird die nächste Stufe eingeschaltet. Der Weg des Gases je nach der Anzahl der Stufen ist in Rot, Blau und Grün gefeilten Linien in der Abbildung dargestellt.

Es ist für die Modelbildung angenommen, dass die Temperatur in der Niederdruckbehälters mit der Zeit konstant bleibt. Mithilfe des Modells wird der maximale thermische Wirkungsgrad je Zeitabschnitt des Gases untersucht, indem der Expansionsvorgang sofort nach dem Erreichen des Gases in dem Hochdruckbehälter stattfindet.

Thermodynamische Model:

Es ist angenommen, dass das Gas (Arbeitsmedium = Stickstoff) trotz hoher Drucke und Temperaturen als ideales Gas betrachtet wird.

Grundgleichung des idealen Gases: $PV = mR_{spez}T$ (1)

Kompression: Die Kompression findet adiabat statt. Die Kompression-Arbeit wird von dem ersten Hauptsatz hergeleitet:

$$W_{t\ 1-2} = m_{gas}R_{spez} T_1 \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (2)$$

Temperatur nach der Kompression:

Adiabat System: $= PV^\gamma = \text{Konstant}$ (3)

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

Nach der Kompression wird das Gas isobar abgekühlt:

$$dH = \partial Q + \partial W_t \quad (4)$$

$$dH = \partial Q$$

$$dH = \partial Q = m_{gas} * C_p * dT$$

Wärmeleistung nach der Kompression:

$$d\dot{H} = \partial \dot{Q} = \dot{m}_{gas} * C_p * dT$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{gas} * C_p * (T_2 - T_1)$$

Die Gleichungen (1), (2), (3), (4) sind in (Doering, Schedwill, & Dehli, 2012) erhalten.

Wärmeübertragung:

Die abgegebene Wärmeleistung vom Gas wird zu einem thermischen Speicher übertragen.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{gas} * C_{p-gas} * (T_2 - T_{xi}) = \alpha * A * (T_2 - T_{s-vor}) = \frac{m_{speicher}}{\tau} C_{p-sp} (T_{s-nach} - T_{s-vor})$$

Für die Ermittlung der örtlichen Temperaturen des Wärmespeichers wird der Wärmespeicher in X_i Teilen aufgeteilt und werden die Örtlichen Temperaturen des Gases und Speichers mit der gegebenen Gleichung ermittelt.

T_{s-vor} oder $T_{S,i-1}$ = Speichertemperatur in dem vorherigen Zeitabschnitt

T_{s-nach} oder $T_{S,i}$ = Speichertemperatur in dem laufenden Zeitabschnitt

$T_{x,i-1}$ = Gastemperatur im vorherigen Flächenabschnitt

T_{xi} = Gastemperatur im Flächenabschnitt X_i

$$T_{xi} = T_{x,i-1} - \frac{\alpha * A * (T_{x,i-1} - T_{S,i-1})}{\dot{m}_{gas} * C_{p,gas}}$$

$$T_{S,i} = \frac{\alpha * A * (T_{x,i-1} - T_{S,i-1}) * \tau}{m_s * C_{p,s}} + T_{x,i-1}$$

Ergebnisse:

- Druckbehälter

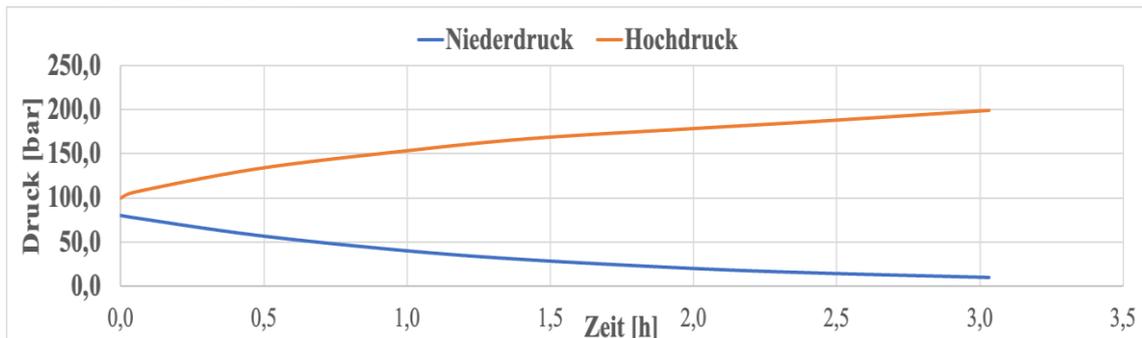


Abbildung 42: Druckverhalten der Behälter

In der Abbildung 42 ist der Ablauf der Drücke in Hochdruckbehälter und Niederdruckbehälter mit der Zeit zu sehen. Das System speichert die Elektroenergie, bis das höchste Druck von 200bar in Hochdruckbehälter oder das geringste Druck von 2bar in dem Niederdruck erreicht wird.

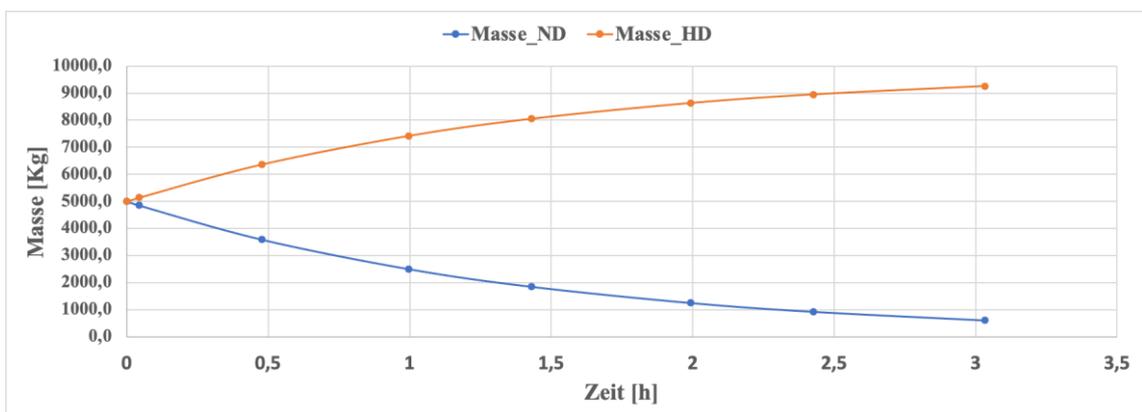


Abbildung 43: Massenverlauf der Behälter

Die Abbildung 43 zeigt der Verlauf der Massegehalt des Gases in Hochdruckbehälter und Niederdruckbehälter in der Abhängigkeit von der Zeit an.

- Wärmespeicher

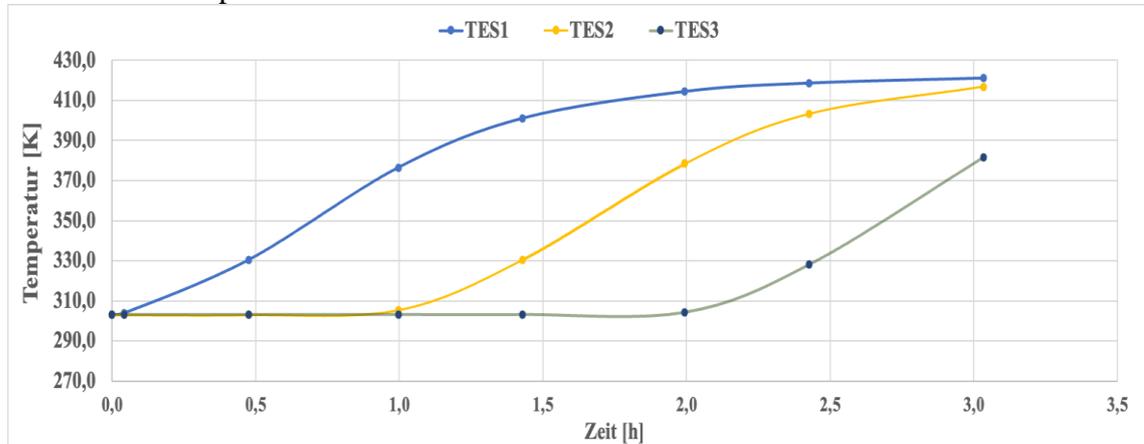


Abbildung 44: Temperaturverlauf der Wärmespeicher

In der Abbildung 44 ist der durchschnittlichen Temperatur der wärmeren Seite der Gefällespeicher dargestellt. Die blaue Linie zeigt den Verlauf der Temperatur der ersten Wärmespeicher. Nach fast eine Stunde ist der zweiten Stufe eingeschaltet. Die gelbe Linie stellt den Temperaturverlauf der zweiten Wärmespeicher an und die grüne Linie der Temperaturverlauf der dritten Wärmespeicher an.

Alle Wärmespeicher besitzen 303K (30°C) als Anfangstemperatur. Zum Beginn wird der erste Wärmespeicher mit erster Stufe der Kompressor beladen. Nach fast eine Stunde bzw. zwei Stunden wird der zweite Kompressor und der dritte Kompressor eingeschaltet, damit beginnen jeweils die Wärmespeicher 2 und 3 zu beladen.

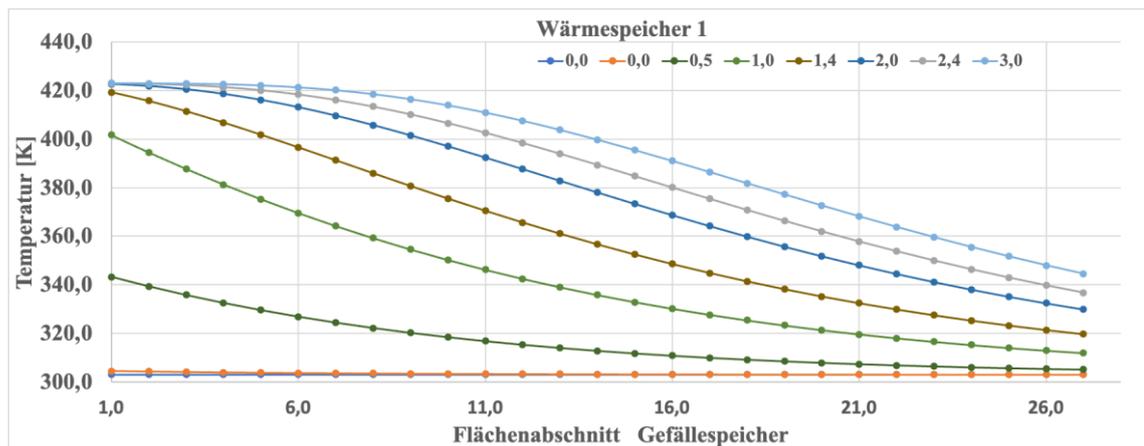


Abbildung 45: Temperaturverlauf des Wärmespeicher1 nach den Zeitabschnitten

In der Abbildung 45 ist der Beladezustand und der Temperaturverlauf der ersten Gefällespeicher/Schichtenspeicher in Zusammenhang von der Zeit dargestellt. Die horizontale Achse beschreibt der Position der Wärmespeicher. Für numerische Ermittlung der Temperaturverlauf der Gefällespeicher, wird der Speicher in 27

Abschnitten von links nach rechts zerlegt. Das warme Gas während des Kompressionsvorgang bewegt sich von links nach rechts.

Jede farbige Linie Abbildung 45 stellt der Temperaturverlauf des Speichers für die bestimmte Zeit. Der Anfangstemperatur der Wärmespeicher beträgt 303K (dunkle Blaue Linie 0,0). Nach drei Stunden (hellblaue Linie 3,0) beträgt ein Endtemperatur der linken Seite des Gefällespeichers bis zum 423k (150°C) und rechten Seite bis zum 347K (75°C). Die Temperaturverläufe der zweiten und dritten Wärmespeicher sind in Anhang gegeben.

- Thermischer Wirkungsgrad

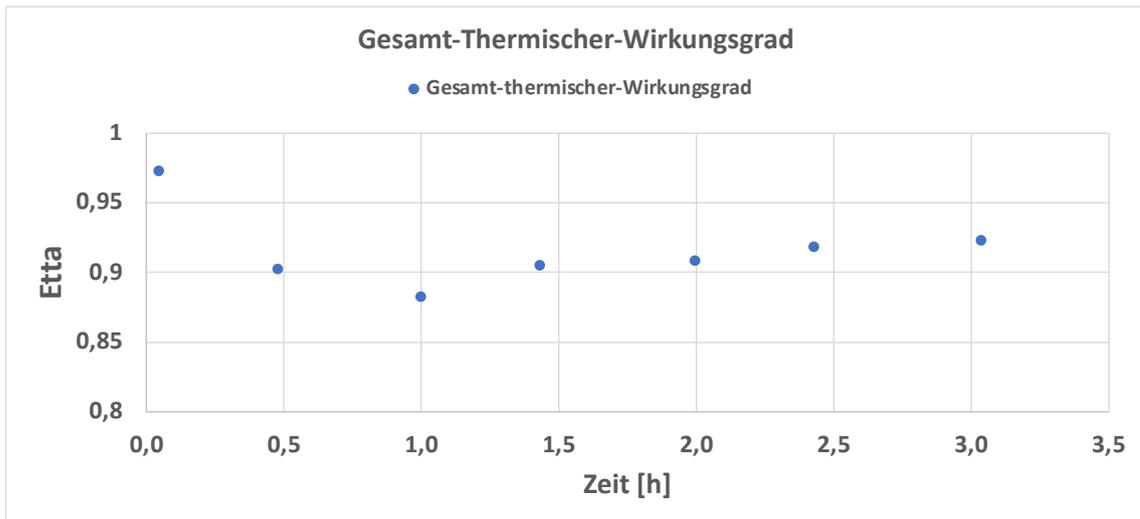


Abbildung 46: Gesamt thermische Wirkungsgrad

In der Abbildung 46 sind die Ergebnisse den gesamten thermischen Wirkungsgrad des Systems ermittelt. Bei verschiedenen Zeitabschnitten ergibt verschiedene gesamt thermische Wirkungsgrad, da der Gesamtwirkungsgrad von der Anzahl der Stufen und Temperatur abhängt.

- Gesamtwirkungsgrad

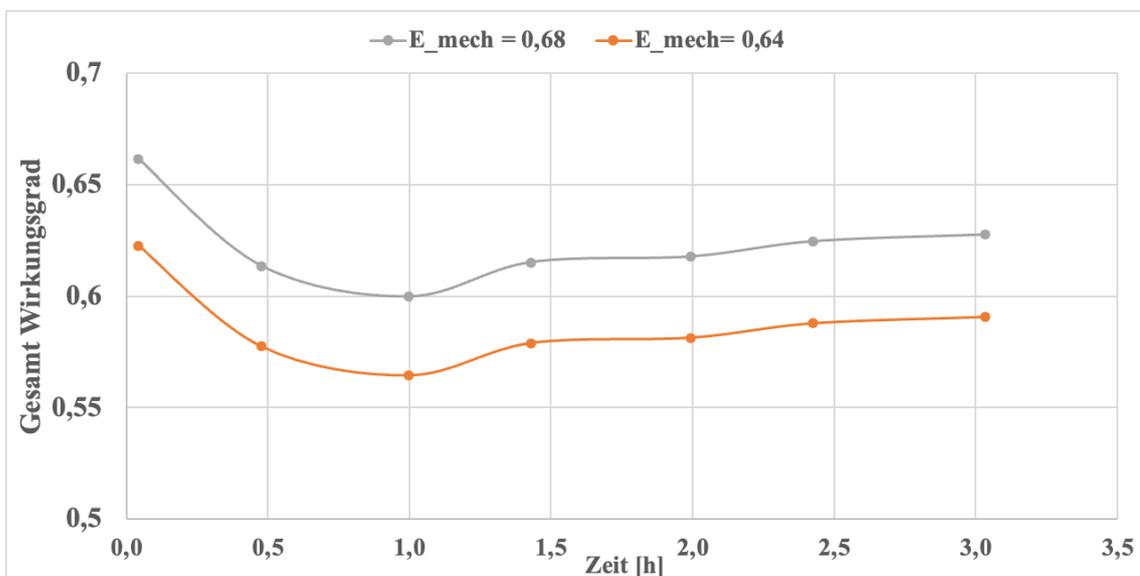


Abbildung 47: Gesamtwirkungsgrad

In der Abbildung 47 ist den zeitlichen Verlauf der Gesamtwirkungsgrad dargestellt.

$$\text{Gesamtwirkungsgrad} = \eta_{therm.} * \eta_{Komp.} * \eta_{Exp.}$$

Thermische Wirkungsgrad $\eta_{therm.}$ ist in der Abbildung ermittelt.

Gesamtwirkungsgrad des Kompressionsvorganges ($\eta_{Komp.}$) und des Expansionsvorganges ($\eta_{Exp.}$).

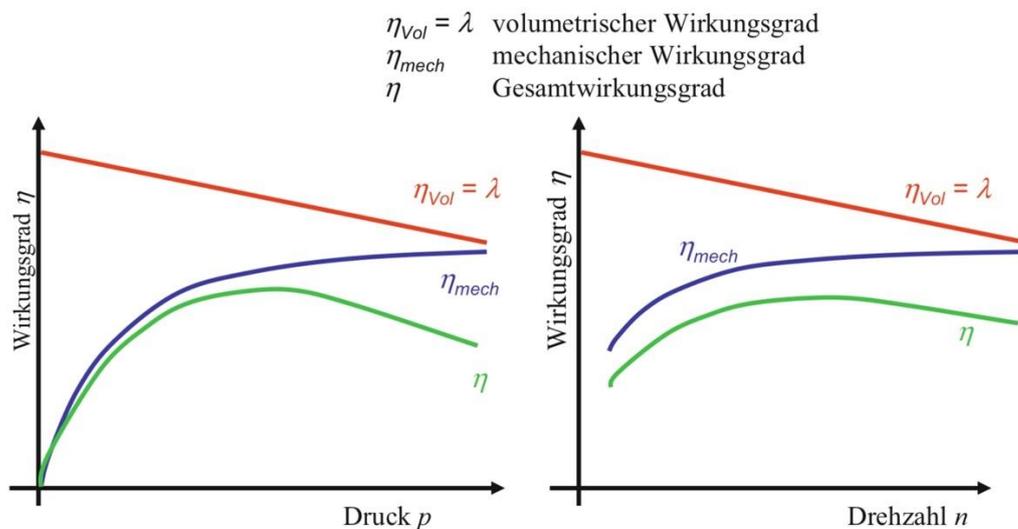


Abbildung 48: Mechanische Wirkungsgrad von Hydromaschinen

Quelle: (Watter, 2015)

Die vorliegende Abbildung 48 veranschaulicht, dass der Gesamtwirkungsgrad hydraulischer Maschinen von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängig ist, darunter der Betriebsdruck, die Drehzahl, der volumetrische Wirkungsgrad und das mechanische Wirkungsgrad. Diese Faktoren sind entscheidend für die Leistungsfähigkeit und Effizienz der hydraulischen Maschinen und stehen in Wechselwirkungen zueinander. (Watter, 2015)

Der Mechanische Wirkungsgrad der Hydraulische Maschinen ohne Betrachtung der elektrischen Einheit ist maximal zwischen 80% und 90%. (Hydraulic Efficiency, 2018)

6.3 Wirtschaftlichkeit des Speichers:

- Wirtschaftlichkeit Fall 1

Mit dem Lastganganalyse des ganzen Jahres ist zu speichernder monatlicher Überschussenergie und die speicherbare Energie für ADDINOL je nach der Kapazität ermittelt.

	Speicherkapazität						
				300KWh	500KWh		
	Gesamt-Bedarf [MWh]	PV Total [MWh]	Verbrauch in der Nacht [MWh]	Speicher Kapaz. Nacht [MWh]	PV-Überschuss [MWh]	Speicher Kapaz. Nacht [MWh]	PV-Überschuss [MWh]
Jan	125,4	6,2	37,2	9,3	0,6	15,5	0,6
Feb	117,2	27,4	33,6	8,4	2,9	14	2,9
Mär	125,8	46,9	37,2	9,3	8,2	15,5	8,2
Apr	112,3	82,3	36,0	9,0	9,0	15	15,0
Mai	106,4	129,5	37,2	9,3	9,3	15,5	15,5
Jun	105,0	135,9	36,0	9,0	9,0	15	15,0
Jul	107,1	129,2	37,2	9,3	9,3	15,5	15,5
Aug	109,1	101,4	37,2	9,3	9,3	15,5	15,5
Sep	110,0	91,4	36,0	9,0	9,0	15	15,0
Okt	120,0	30,0	37,2	9,3	3,9	15,5	3,9
Nov	122,0	19,2	36,0	9,0	1,1	15	1,1
Dez	102,7	6,1	37,2	9,3	0,2	15,5	0,2
Summe	1363,0				71,8		108,4

Tabelle 5: Ermittlung der zu speichernde PV-Überschussenergie

Für die Kostenermittlung des Speichers wird der Formel ermittelt:

$$K_{\text{Speicher}} = \frac{\text{Investition Gesamt}}{\text{Lieferte netto Energie für das gesamte Nutzungsdauer}}$$

In der Tabelle 5 ist die Berechnung der Speicherkosten für die Speicherung überschüssige PV-Energie ermittelt. Tabelle 6 zeigt die Speicherkosten für den eine Speicherkapazität von 300KWh und die Tabelle 7 für einen Speicherkapazität von 500 KWh. Die Speichermenge der überschüssige PV-Energie für beiden Speicherkapazitätsfällen ist in der Tabelle (71,8MWh und 108,4MWh) ermittelt, die für die Berechnung der Speicherkosten notwendig ist.

Die Speicherkosten wurden mit und ohne Betrachtung der Betriebs- und Wartungskosten (O&M: Operations and Maintenance)

Kapazität	300 KWh		
Investition	350000 €		
O&M	0,01	1%	
Nutzungsdauer	25 Jahren		
Speichermenge	71,77 MWh		
	Speicherkosten	==	Gesamt Investitionskosten = 437500 €
			Gesamt netto Energie Nutzungsdauer = 1794,1 MWh
	Speicherkosten	==	243,8 €/MWh
			0,24 €/KWh
Ohne O&M	Speicherkosten	==	0,20 €/KWh

Tabelle 6: Speicherkosten 300KWh

Bei der Erweiterung auf 500KWh Speicherkapazität ist bei gleichbleibendem Antriebseinheit nun die Kosten der Speichereinheit betrachtet.

Kapazität	500 KWh		
Investition	450000 €		
O&M	0,01	1%	
Nutzungsdauer	25 Jahren		
Speichermenge	108,37 MWh		
	Speicherkosten	==	Gesamt-Investition= 562500 €
			Gesamtenergie in Nutzungsdauer 2709,1 MWh
Mit O&M	Speicherkosten	==	207,631 €/MWh
			0,21 €/KWh
ohne O&M	Speicherkosten	==	0,17 €/KWh

Tabelle 7: Speicherkosten 500KWh

- Wirtschaftlichkeitsfall 2

Die weitere Nutzung des Speichers ist für die Lastspitzenkappung. Dafür ist die potenzielle Begrenzungsniveau mit Hilfe der Lastgangs-Analyse ermittelt. In der Abbildung 49 ist das Verlauf der Dauerkennlinie zu sehen. Das Diagramm beschreibt die Häufigkeit des Leistungsniveaus für bestimmten Zeitraum. Je steiler der Kurve am Anfang des Zeitraumes ist, desto größer ist der Leistungswert, der begrenzt werden kann. Für den Fall im Diagramm ist die Begrenzungsleistung, als 220 KW ermittelt.

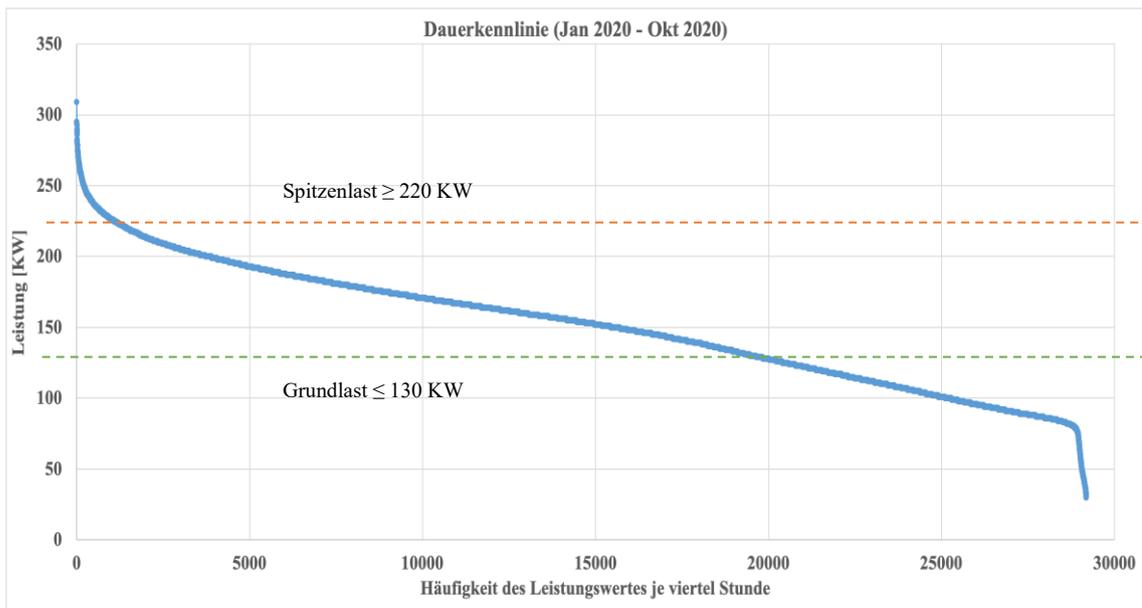


Abbildung 49: Dauerkennlinie

Da das Nutzen des Speichers in diesem Fall von der Leistung, die mit dem Speicher begrenzt werden kann, abhängt, wird die Wirtschaftlichkeit des Speichers in Form von Amortisationszeit untersucht.

Lastspitzenkappung	
Leistungspreis [€/KW]	26 €/KW
Betrag der Spitzvermeidung	90 KW
Ersparnis je Monat	2340 €
Ersparnis Jahr	28080 €
Investiton + O&M	437500 €
Amortisationszeit	15,6 Jahren

Tabelle 8: Amortisationszeit für den Fall2

Die Amortisationszeit bei Nutzen des Speichers für die Lastspitzenkappung ohne technische Betrachtung des Speichers beträgt 15,6 Jahren.

- Wirtschaftlichkeitsfall 3

Nutzen des Speichers für die Speicherung überschüssige PV-Energie und Lastspitzenkappung durch das Beladen des Speichers vom elektrischen Netz im Winter Monaten in der Nacht.

Verbrauch in der Nacht [23:00-05:00]	1200	KWh
---	------	-----

Tabelle 9: Nächtliche Verbrauchenergie

	Summe [KWh/4]	Anzahl der Viertel-Stundenwerte	E_ges [MWh]	E_220 [MWh]	Verbrauch über 220 KW [MWh]
Jan	76674	320	19,2	17,6	1,6
Feb	71077	299	17,8	16,4	1,3
Mrz	65954	279	16,5	15,3	1,1
Apr	38159	162	9,5	8,9	0,6
Mai	9261	40	2,3	2,2	0,1
Jun	10150	44	2,5	2,4	0,1
Jul	11557	50	2,9	2,8	0,1
Aug	14880	65	3,7	3,6	0,1
Sep	19823	86	5,0	4,7	0,2
Okt	58715	238	14,7	13,1	1,6
Nov	79082	322	19,8	17,7	2,1
Dez	11405	49	2,9	2,7	0,2
					9,2

Tabelle 10: Berechnung für die Verbrauchenergiemenge über 220KW Leistungsspitze

Die vorliegende Tabelle 10 stellt die monatlichen Energiemengen dar, die für die Kappung von den Lastspitzen benötigt wird. Mithilfe dieser Tabelle ist es möglich, das erforderliche Speichervolumen zur Bewältigung von Lastspitzen während der Wintermonate zu dimensionieren. Durch die Berechnung und Analyse der in der Tabelle 10 aufgeführten Werte können fundierte Entscheidungen bezüglich der Speichergröße getroffen werden, um eine effektive Lastspitzenkappung und eine optimale Betriebsführung des Energiesystems zu gewährleisten.

Gesamtverbrauch für die Lastspitzenkappung im Winter	7,8 [MWh]
--	-----------

Tabelle 11: Verbrauchenergiemenge im Winter für die Lastspitzenkappung

Mit dem Gesamtverbrauch im Winter und mit dem ermittelten Speicherwirkungsgrad kann ein konkretes wirtschaftliches Nutzen des Speichers in Form von der Amortisationszeit ermittelt werden.

Einkauf-Strom-Lastspitzen		
Menge Strom für Nacht im Winter [KWh]	7841,75	KWh
Speicher Wirkungsgrad	0,6	
Strompreise	0,2	€/KWh
Ausgaben	2613,9	€

Tabelle 12: Berechnung für die Ermittlung der Ausgaben

Von der Tabelle 12 ist jährlich entstandene Ausgaben für die Beladung des Speichers in den Winter Monaten ermittelt.

In der Tabelle 13 ist durch das Nutzen des Speichers die jährlichen Einnahmen ermittelt. Der Speicherenergiemenge ist die von der Tabelle 5 ermittelte PV überschussige Energie.

$$\text{Ersparnis} = (\text{Strompreise} - \text{Rückspeisungsvergütung}) * \text{Energiemenge}$$

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{Investition}}{\text{Einnahmen}}$$

	Speicherkapazität	
	300 KWh	500KWh
Speicherenergiemenge	71765,5 KWh	108365,5 KWh
Rückspeisungsvergütung	0,07 €/KWh	0,07 €/KWh
Strompreise	0,20 €/KWh	0,20 €/KWh
Einnahmen	9330 €	14088 €

Tabelle 13: Berechnung für die Ermittlung der Einnahmen

	Speicherkapazität	
	300 KWh	500KWh
Gesamt Investition	437500 €	547500 €
Gesamt Ersparnis Ein Jahr	34795,59547 €/KWh	39553,6 €/KWh
Amortisationszeit	12,6 Jahren	13,8 Jahren

ohne O&M		
	300 KWh	500KWh
Gesamt Investition	350000 €	438000 €
Amortisationszeit	10 Jahren	11,1 Jahren

Tabelle 14: Ermittlung der Amortisationszeit für Fall 3

In der Tabelle 14 ist die Amortisationszeit mit und ohne Betrachtung des Betriebs- und Wartungskosten berechnet.

7 Zusammenfassung

Zum Schluss ist von der Arbeit zu nehmen, dass das Druckluftspeichersystem einen Gesamtwirkungsgrad besitzt, der wegen verschiedenen Faktoren wie Druck, Drehzahl, Temperatur zeitlich ändert.

Ein durchschnittlicher thermischer Wirkungsgrad des Systems von 92% (siehe Tabelle 15) ist erreichbar aber hängt selbst von den Faktoren wie Umgebungstemperatur, Start Temperatur des Speichers ab. Ein maximaler thermischer Wirkungsgrad ist nun für den bestimmten Temperaturbereich erreichbar, da der Wärmetauscher mit Ihrer Fläche für den konkreten Temperaturbereich ausgelegt werden muss.

Zeitabschnitt	0,0	0,5	1,0	1,4	2,0	2,4	3,0	Durchschnitt
Thermische WG	0,97	0,90	0,88	0,90	0,91	0,92	0,92	0,92
Stufe	1,0	1,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0	

Tabelle 15: Thermische Wirkungsgrad

Damit der Speicher mit optimaler Wirtschaftlichkeit erreicht, muss der Speicher für den Wirtschaftlichkeitsfall 3 entschieden werden, weil der Leistungspreis mit dem steigenden CO₂-Preis in der Zukunft steigen sollte. Je höher der Leistungspreis ist, desto größer wird das Ersparnis.

	Speicherkapazität	
	300KWh	500KWh
Speicherung [MWh]	71,8	108,4
Rückspeisung [MWh]	293,52	242,3
Rückspeisung %	36,4%	30,1%

Tabelle 16: Rückspeisung

Aus Tabelle 16 wurden die Rückspeisungsmenge und der Rückspeisungsprozentsatz ermittelt. Die angegebenen Werte zeigen ein erhebliches Potenzial zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit des Photovoltaiksystems. Eine mögliche zukünftige Strategie besteht darin, die erzeugten Mengen direkt zu vermarkten (Energy Sharing), da die Rückspeisevergütung deutlich niedriger ist als die aktuellen Strompreise.

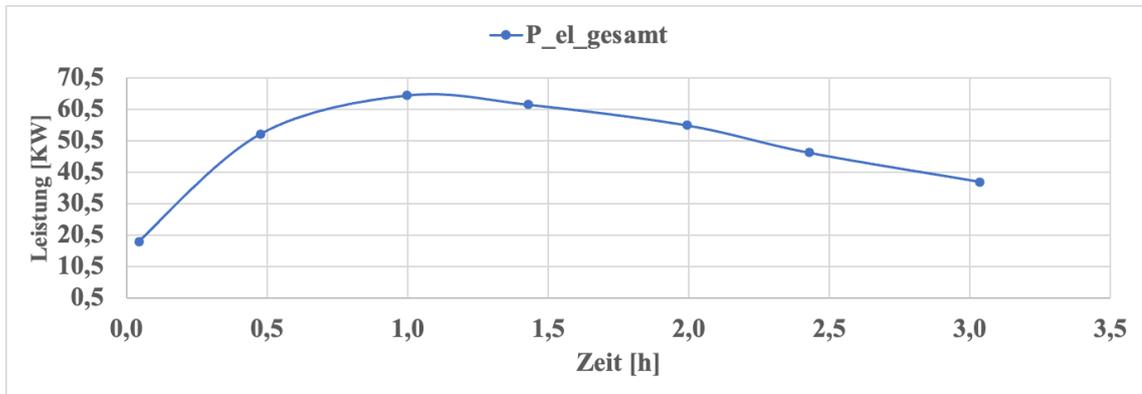
8 Literaturverzeichnis

- Schabbach, T., & Wesselak, V. (2020). *Energie Den Erneuerbaren gehört die Zukunft*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Diekmann, B., & Rosenthal, E. (2014). *Energie Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung*. Springer Spektrum.
- Oertel, D. (2008). *Sachstandsbericht zum monitoring nachhaltige energieverorgung, energiespeicher, stand und perspektiven*. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB).
- Mahnke, E., & Mühlhoff, J. (2010). *Renews spezial strom speichern*. Agentur für Erneuerbare Energien e. V.
- Schaefer, C., & Bergmann, L. (2005). *Lehrbuch der Experimentalphysik: Gase, Nanosysteme, Flüssigkeiten*. De Gruyter.
- Sterner, M., & Stadler, I. (2017). *Energiespeicher Bedarf • Technologien • Integration*. Springer Vieweg.
- Oberholzer, S. (2021). *Energiespeichertechnologien Kurzübersicht 2021*. Bundesamt für Energie.
- Kurzweil, P., & Dietlmeier, O. K. (2015). *Elektrochemische Speicher : Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Grundlagen*. Springer Vieweg.
- Wolf, D., Span, R., & Weidner, E. (2011). *Mit Druckluft Wind zwischenspeichern. RUBIN, Wissenschaftsmagazin der Ruhr-Universität Bochum*.
- Doering, E., Schedwill, H., & Dehli, M. (2012). *Grundlagen der Technischen Thermodynamik - Lehrbuch für Studierende der Ingenieurwissenschaften*. Springer Vieweg.
- bmw. (2022). *Klimaschutzbericht 2022 der Bundesregierung nach § 10 Absatz 1 des Bundes-Klimaschutzgesetzes*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.
- bmw. (2024, 04 02). *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz*. From Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: <https://www.bmw-energiende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2023/05/Meldung/direkt-erfasst.html#:~:text=Bis%202030%20will%20die%20Bundesregierung,2%2C7%20GW%20neu%20installiert>.
- INFRALEUNA. (04 2021). Abgerufen am 03 2024 von https://www.infraleuna.de/fileadmin/infraleuna/downloads/Energie_d.pdf
- ADDINOL Lube Oil GmbH. (2023). Retrieved 03, 2024 from <https://addinol.de/unternehmen/historie/>
- INFRALEUNE. (2024). Retrieved 03, 2024 from <https://www.infraleuna.de/standort-leuna/daten-und-fakten>
- MDR SACHSEN-ANHALT. (2023, 08 17). Retrieved 04, 2024 from <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen-anhalt/halle/saalekreis/leuna-bioraffinerie-holz-start-100.html>
- UPM BIOCHEMICALS. (2023). Retrieved 04, 2024 from <https://www.upmbiochemicals.com/de/uber-upm-biochemicals/bioraffinerie-leuna/>
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. (2023, 05 25). Retrieved 04, 2024 from <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2023/02/strombasierte-kraftstoffe-dlr-waehlt-leuna-als-standort-fuer-technologie-plattform-ptl-aus>

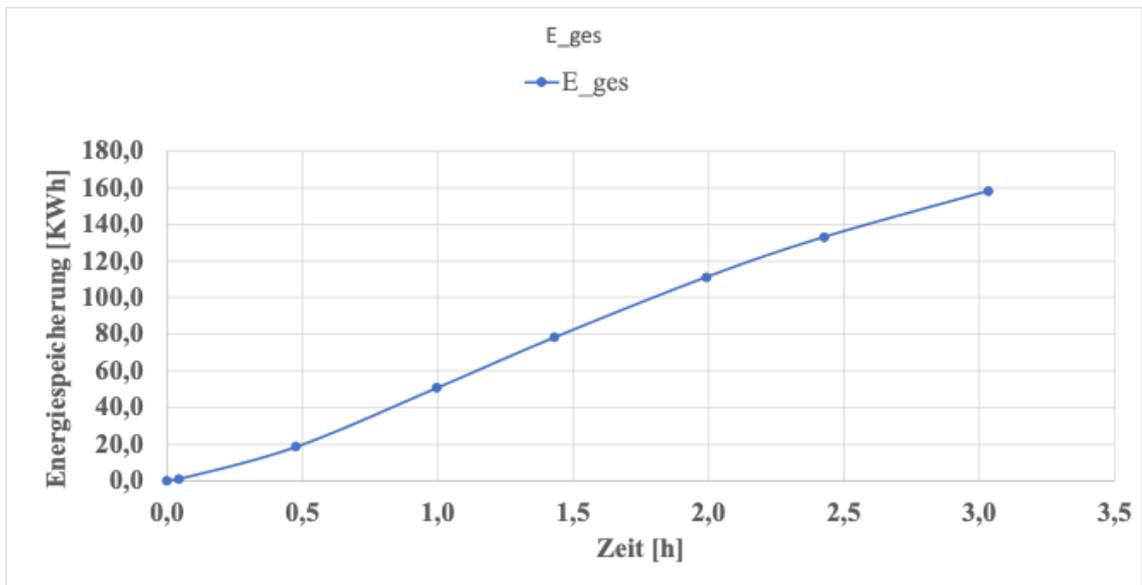
- INFRALEUNE*. (2024, 01 19). Retrieved 04, 2024 from <https://www.infraleuna.de/news/news-detail/zukunftsprojekt-in-leuna-wieder-aufgenommen-haushaltsausschuss-korrigiert-foerdermittelstreichung-fuer-forschungsanlage-fuer-nachhaltige-kraftstoffe-des-dlr>
- Hessel, V. (2009). *Energiemanagement: Maßnahmen zur Verbrauchs- und Kostenreduzierung, Förderprogramme, Vorschriften*. Wiley-VCH.
- Paschotta, R. (2024, 02 12). *RP-Energie-Lexikon*. Retrieved 04, 2024 from <https://www.energie-lexikon.info/leistungspreis.html>
- OPTENDA*. (2023). Retrieved 04, 2024 from <https://www.optenda.de/energiemonitoring/software-energy-monitor/>
- TESVOLT AG*. (2023). Retrieved 03, 2024 from <https://www.tesvolt.com/de/produkte/energiemanagement-system-1.html>
- Hydraulic Efficiency*. (2018). Retrieved 04, 2024 from <https://www.mobil.com/lubricants/-/media/project/wep/shared/mobil-row-lubesus1-us/lubricant-expertise/resources/hydraulic-fluid-efficiency/tech-topic-hydraulic-efficiency-3.pdf>
- Watter, H. (2015). *Hydraulik und Pneumatik Grundlagen und Übungen - Anwendungen und Simulation*. Springer Vieweg.

9 Anhang

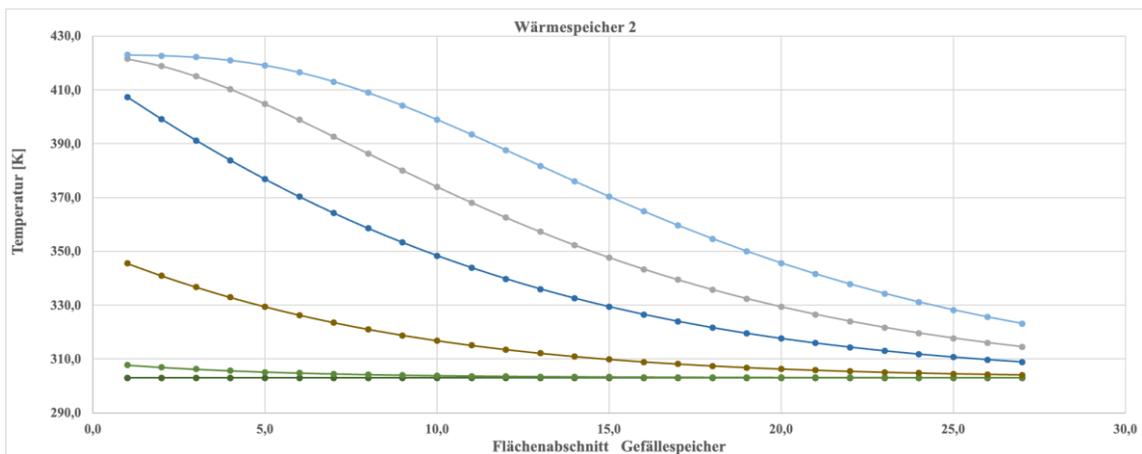
Druckluftspeichersystem



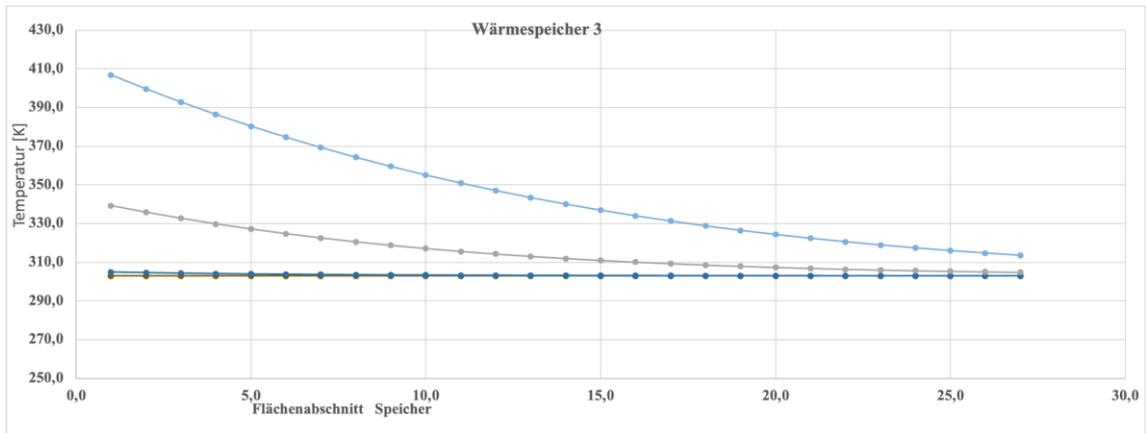
- Leistungsverlauf des Systems



- Energiebeladezustand des Systems



- Temperaturverlauf der Wärmespeicher 2



- Temperaturverlauf der Wärmespeicher 3

Wichtige Daten für die Modellierung des Druckluftspeichersystems

Daten der Modellierung														
Gas	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>R</td><td>287 J/kgK</td></tr> <tr><td>Cp</td><td>1008 J/kgK</td></tr> <tr><td>Kappa</td><td>K</td><td>1,4</td></tr> <tr><td></td><td>k-1/k</td><td>0,28571429</td></tr> <tr><td></td><td>K/(k-1)</td><td>3,5</td></tr> </table>	R	287 J/kgK	Cp	1008 J/kgK	Kappa	K	1,4		k-1/k	0,28571429		K/(k-1)	3,5
R	287 J/kgK													
Cp	1008 J/kgK													
Kappa	K	1,4												
	k-1/k	0,28571429												
	K/(k-1)	3,5												
Niederdruck	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Pmax</td><td>8000000 pa</td></tr> <tr><td>Pmin</td><td>200000 pa</td></tr> <tr><td>Masse</td><td>5000 kg</td></tr> <tr><td>t</td><td>293 k</td></tr> <tr><td>Vol</td><td>0,0 m³</td></tr> </table>	Pmax	8000000 pa	Pmin	200000 pa	Masse	5000 kg	t	293 k	Vol	0,0 m ³			
Pmax	8000000 pa													
Pmin	200000 pa													
Masse	5000 kg													
t	293 k													
Vol	0,0 m ³													
Hochdruck	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Pmax</td><td>20000000</td></tr> <tr><td>Pmin</td><td>10000000</td></tr> <tr><td>Masse</td><td>4994,5892 Kg</td></tr> <tr><td>Vol</td><td>42 m³</td></tr> <tr><td>T_start</td><td>293,0</td></tr> </table>	Pmax	20000000	Pmin	10000000	Masse	4994,5892 Kg	Vol	42 m ³	T_start	293,0			
Pmax	20000000													
Pmin	10000000													
Masse	4994,5892 Kg													
Vol	42 m ³													
T_start	293,0													
Kompressor	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Vol</td><td>0,005 m³/s</td></tr> <tr><td>n</td><td>120 1/min</td></tr> <tr><td>V_strom</td><td>0,01000 m³/s</td></tr> </table>	Vol	0,005 m ³ /s	n	120 1/min	V_strom	0,01000 m ³ /s							
Vol	0,005 m ³ /s													
n	120 1/min													
V_strom	0,01000 m ³ /s													
WU	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>alpha</td><td>220 W/m²K</td></tr> <tr><td>Zeit_Tao</td><td>156 s</td></tr> </table>	alpha	220 W/m ² K	Zeit_Tao	156 s									
alpha	220 W/m ² K													
Zeit_Tao	156 s													
Wspeicher1	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>masse</td><td>90 kg</td></tr> <tr><td>cp_sp</td><td>1500 j/kgk</td></tr> <tr><td>Teil Fläche1</td><td>0,63333333 m²</td></tr> </table>	masse	90 kg	cp_sp	1500 j/kgk	Teil Fläche1	0,63333333 m ²							
masse	90 kg													
cp_sp	1500 j/kgk													
Teil Fläche1	0,63333333 m ²													
Wspeicher 2	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>masse</td><td>50 kg</td></tr> <tr><td>cp_sp</td><td>1500 j/kgk</td></tr> <tr><td>Teil Fläche2</td><td>0,46296296 m²</td></tr> </table>	masse	50 kg	cp_sp	1500 j/kgk	Teil Fläche2	0,46296296 m ²							
masse	50 kg													
cp_sp	1500 j/kgk													
Teil Fläche2	0,46296296 m ²													
Wspeicher 3	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>masse</td><td>20 kg</td></tr> <tr><td>cp_sp</td><td>1500 j/kgk</td></tr> <tr><td>Teil Fläche3</td><td>0,18148148 m²</td></tr> </table>	masse	20 kg	cp_sp	1500 j/kgk	Teil Fläche3	0,18148148 m ²							
masse	20 kg													
cp_sp	1500 j/kgk													
Teil Fläche3	0,18148148 m ²													

10 Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle wörtlichen und sinngemäßen Entlehnungen deutlich als solche gekennzeichnet habe.

Merseburg, 14. Mai 2024