

**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

---

Fakultät Maschinenwesen   Institut für Energietechnik   Professur für Energiespeichersysteme

---

# Studienarbeit

Simulationsbasierte Untersuchung unterschiedlicher  
Auslegungsvarianten einer hybriden Lithium-Ionen-  
Batteriespeicherlösung

Bearbeiter: Vivian Favresse  
Matrikelnummer: 4614157  
Bearbeitungszeitraum: 09.02.2021 bis 09.08.2021  
Betreuer: Dipl. Ing. Ronny Gelleschus  
Prüfer: Prof. Dr. Ing. Thilo Bocklisch  
Ort, Datum der Abgabe: Dresden, 09.08.2021



# Aufgabenstellung zur Studienarbeit

im Studiengang  
Regenerative Energiesysteme

zum Thema

## **Simulationsbasierte Untersuchung unterschiedlicher Auslegungsvarianten einer hybriden Lithium-Ionen- Batteriespeicherlösung**

für

Herrn Vivian Favresse

Matrikel-Nr.: 4614157

Betreuer: Dipl.-Ing. Ronny Gelleschus

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Thilo Bocklisch

Bearbeitungszeitraum: 09.02.2021 – 09.08.2021

---

Prof. Dr.-Ing. Thilo Bocklisch  
(Betreuender Hochschullehrer)

Aufgabenstellung erhalten:

09.02.2021,

---

Datum, Unterschrift  
(Student)

## Aufgabenstellung

Energiespeicher spielen für die Transformation des Energieversorgungssystems hin zu einem nachhaltigen, auf regenerativen Energien basierendem System eine wichtige Rolle. Sie leisten einen wesentlichen Beitrag zur zeitlichen Entkopplung und der Anpassung zwischen dem schwankenden regenerativen Energieangebot und -bedarf. Zur Steigerung der Leistungsfähigkeit, Effizienz und Lebensdauer sowie zur Reduzierung der Gesamtsystem- und Betriebskosten finden neben klassischen Einzelspeicherlösungen zunehmend hybride Energiespeicher mit ergänzenden Betriebseigenschaften Anwendung.

Im Rahmen dieser Studienarbeit sollen verschiedene Auslegungsvarianten sowie Systemkonzepte von einzelnen und hybriden Energiespeichersystemen für die Referenzanwendungen *PV- oder Windpark* mit Capacity Firming, Arbitrage und Peak Shaving, *Industriebetrieb* mit Eigenverbrauchsoptimierung, Leistungspreisminimierung und Kapazitätsvorhaltung für eine unterbrechungsfreie Stromversorgung sowie *mobile Ladestation für Elektromobilität* untersucht werden. Dies soll zunächst anhand einer Literaturrecherche zu bereits umgesetzten kommerziellen Projekten und Forschungsprojekten in ähnlichen Anwendungen geschehen. Darauf aufbauend sollen für eine der Referenzanwendungen mithilfe eines zur Verfügung gestellten Simulationswerkzeugs eigene Untersuchungen zur optimalen Auslegung einer modularen Lithium-Ionen-Batteriespeicherlösung durchgeführt werden.

Folgende Aufgaben sollen bearbeitet werden:

- Literaturrecherche zum Stand der Forschung und Technik
  - Auslegungsvarianten sowie System- und Betriebsführungskonzepte von Energiespeichersystemen in den genannten Referenzanwendungen
  - Nationale und internationale Forschungsprojekte für hybride Batteriespeicherlösungen mit Schwerpunkt auf Multi-Use-Betrieb und Second-Life-Einsatz
- Vorbetrachtungen zur simulationsbasierten Untersuchung
  - Analyse der vorgegebenen vertieft zu untersuchenden Referenzanwendung
  - Dokumentation des übergebenen Betriebsführungsverfahrens
  - Auswahl und Definition geeigneter Bewertungsmetriken für die Referenzanwendung
  - Zeitreihenanalyse und Auswahl repräsentativer Erzeugungs- und Verbrauchszeitreihen für die weiteren Untersuchungen
  - Erstellung einer zeiteffizienten Versuchsplanung und Abschätzung der Simulationsdauer
- Simulationsbasierte Untersuchungen des Einzel- und des Hybridspeichersystems
  - Simulation, grafische Darstellung, Auswertung und Diskussion der Einflüsse von Modulgrößen und -anzahl sowie Alterungszustand für Einzelspeichersysteme in der vorgegebenen Referenzanwendung
  - Simulation, grafische Darstellung, Auswertung und Diskussion der Einflüsse von Modulgrößen und -anzahl sowie Kopplungsstrukturen für Hybridspeichersysteme aus High Power- und High Energy- bzw. neuer und gealterter Batterie in der vorgegebenen Referenzanwendung
- Dokumentation aller Ergebnisse, Zusammenfassung und Ausblick

---

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, Vivian Favresse, die vorliegende Arbeit selbständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der von mir angegebenen Quellen angefertigt zu haben. Alle aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde noch keiner Prüfungsbehörde in gleicher oder ähnlicher Form vorgelegt.

Dresden, 09.08.2021

.....

---

## Kurzfassung

Im Rahmen der Energiewende sind elektrische Energiespeicher für die Einbindung regenerativer Energiequellen in das Energieversorgungssystem unerlässlich. Hybridsysteme bestehend aus regenerativen Erzeugungsanlagen wie Photovoltaikanlagen und Windenergieanlagen ergänzt um elektrische Energiespeicher ermöglichen die Erbringung von Systemdienstleistungen zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit und Qualität der Energieversorgung. Somit sind sie in der Lage systemkritische Aufgaben konventioneller Erzeugungsanlagen zu übernehmen. Weiterhin können solche Systeme im Bereich von Mehrfamilienhäusern oder Betrieben verwendet werden, um die Netzbezugskosten deutlich zu reduzieren. Für solch einen Betrieb werden im Folgenden unterschiedliche Auslegungen eines PV-Hybridbatteriespeichersystem untersucht. Die bestehende PV-Anlage soll um ein hybrides Batteriespeichersystem bestehend aus einer Hochenergie- und einer Hochleistungsbatterie erweitert werden. Hierfür können die maximalen Energieinhalte sowie die maximal übertragbaren Leistungen der Batterien variiert werden, um Tendenzen der Veränderung des Systemverhaltens bei Variation bestimmter Parameter herausfinden. Hierfür wird das Systemverhalten der verschiedenen Auslegungsvarianten über ein Jahr anhand eines bereitgestellten Betriebsführungsverfahrens simuliert. Die Auslegungsvarianten werden in vier verschiedene Gruppen eingeteilt. Untersucht werden die Variation des maximalen Energieinhalts und der maximal übertragbaren Leistung jeweils für die Hochenergie- und Hochleistungsbatterie, die Variation der maximalen Energieinhalte beider Batterien sowie die Variation der maximal übertragbaren Leistung beider Batterien. Danach erfolgt eine Auswertung der Systemergebnisse der einzelnen untersuchten Variationen anhand von vorher definierten Bewertungskriterien, um anschließend Trends des Systemverhaltens zu analysieren und Auslegungsempfehlungen darzulegen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Glossar</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielstellung .....	2
1.3 Kapitelübersicht.....	2
<b>2 Literaturrecherche</b>	<b>3</b>
2.1 Systemaufbau von Einzel- und hybriden Energiespeichersystemen.....	3
2.1.1 Systemaufbau eines Batterieenergiespeichersystems.....	3
2.1.2 Aufbau hybrider Energiespeichersysteme.....	4
2.1.3 Kopplungsvarianten hybrider Energiespeichersysteme .....	6
2.2 Aufgaben, Anwendungsfelder und Betriebsweisen von Energiespeichersystemen	7
2.2.1 Betriebsweisen von Batterieenergiespeichersystemen .....	7
2.2.2 BESS in verschiedenen Anwendungsfeldern.....	11
2.2.3 Anwendungsbeispiele hybrider Energiespeichersysteme .....	14
<b>3 Vorbetrachtungen zur Untersuchung</b>	<b>22</b>
3.1 Dokumentation des Betriebsführungsverfahrens .....	22
3.2 Zeitreihenanalyse.....	27
3.3 Auswahl repräsentativer Tage .....	42
<b>4 Untersuchung des Systemverhaltens</b>	<b>44</b>
4.1 Definition der Bewertungskriterien.....	44
4.2 Auslegungsoptionen .....	47
4.3 Orientierungssimulation.....	48
4.4 Versuchsplanung .....	49
4.5 Auswertung der Simulationsergebnisse .....	49
<b>5 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>100</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>102</b>

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>106</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>108</b>
<b>Anhang</b>	<b>109</b>
A.1  Versuchsplan.....	109

# Glossar

## Abkürzungen

PV	Photovoltaik
SoC	State of Charge
SoH	State of Health
BESS	Batterieenergiespeichersystem
HESS	Hybrides Energiespeichersystem
HE	Hochenergiebatteriespeicher
HP	Hochleistungsbatteriespeicher
DC	Gleichstrom/-spannung
AC	Wechselstrom/-spannung
EMS	Energiemanagementsystem
ESH	Elektrospeicherheizung
HHS	Haushaltsspeicher
DA	Day-Ahead
ID	Intraday
MILP	Mixed integer linear programming
OPF	Optimal Power Flow
ca.	circa

## Formelzeichen

$I$	A	Stromstärke
$j$	V	Spannung
$P$	W	Leistung
$C$	Ah	Kapazität
$E$	Wh	Energie

## Indizes

$HE$	HE-Batterie
------	-------------



<i>HP</i>	HP-Batterie
<i>DCDC</i>	DC/DC-Wandler
<i>ACDC</i>	AC/DC-Wandler
<i>PV</i>	Photovoltaik
<i>Nenn</i>	Nenn (-leistung, -energie...)
<i>L</i>	Last
<i>N</i>	Netz
<i>N,E</i>	Netzeinspeisung
<i>N,B</i>	Netzbezug
<i>E</i>	Einspeisung
<i>SB</i>	Strombezug
<i>N,E,max</i>	Maximale Netzeinspeisung
<i>N,B,max</i>	Maximaler Netzbezug
<i>V</i>	Verlust
<i>EV</i>	Eigenverbrauch
<i>SV</i>	Selbstversorgung
<i>ARV</i>	Abregelverluste
<i>ARQ</i>	Abregelquote
<i>Invest</i>	Investition
<i>Strang</i>	Strang
<i>i</i>	Zeitschritt
<i>AC</i>	Batterie
<i>AC,ein</i>	in Batterie eingespeichert
<i>AC,aus</i>	aus Batterie ausgespeichert
<i>Ü</i>	Übertragung
<i>ist</i>	Ist-Wert
<i>soll</i>	Soll-Wert
<i>Defizit</i>	Defizit

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Für eine erfolgreiche Transformation hin zu einem nachhaltigen Energieversorgungssystem sind verschiedene Maßnahmen nötig. Dazu zählen die Reduzierung des Energieverbrauchs, die Effizienzsteigerung aller Energiewandlungsprozesse, die Steigerung der Lebensdauer und Recyclingquote aller eingesetzter Betriebsmittel sowie der Ausbau von Erzeugungsanlagen auf Basis regenerativer Energien. [1] Allerdings erfolgt die Sicherstellung der Zuverlässigkeit und Qualität der Energieversorgung heutzutage beinahe ausschließlich durch konventionelle Erzeugungsanlagen. Somit ist es für eine vollständige Integration regenerativer Energien in das Energieversorgungsnetz unumgänglich, dass Systemdienstleistungen zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit und Qualität der Energieversorgung durch regenerative Erzeugungsanlagen bereitgestellt werden. Aufgrund der volatilen Natur regenerativer Energien können diese allein kaum bis keine dieser Dienstleistungen bereitstellen. Durch den Einsatz von Energiespeichern können regenerative Erzeugungsanlagen ähnlich vielfältige Aufgaben wie konventionelle Erzeugungsanlagen erfüllen, sodass die Einschränkungen regenerativer Erzeugungsanlagen ausgeglichen werden können. [2] Somit sind solche regenerativen Energiesysteme eine sehr wichtige Technologie, um konventionelle Erzeugungsanlagen zu ersetzen, sodass eine vollständige Energiewende möglich ist. Allerdings müssen Elektrische Energiespeicher nicht nur in großen Anlagen verwendet werden, um energetische und wirtschaftliche Vorteile zu bieten. Besonders für Mehrfamilienhäuser und Betriebe bieten sich PV-Batteriespeichersysteme an, da durch ihren Einsatz der Leistungs- sowie Energiebezug erheblich sinkt, wodurch die Netzbezugs- und Leistungskosten sinken. [3] Ebenfalls sinkt der CO<sub>2</sub>-Ausstoß des Betreibers, da die benötigte Energie deutlich CO<sub>2</sub>-ärmer gewonnen wird. Somit kann auch im Mittel- und Niederspannungsbereich die Energiewende vorangetrieben werden. Neben Einzelspeichersystemen besteht weiterhin die Möglichkeit der Kopplung mehrerer Energiespeichertechnologien, um eine Verbesserung des Systemverhaltens und der Systemergebnisse zu erzielen. Hybride Energiespeichersysteme und ihre Vorteile gegenüber Einzelspeichersystemen werden in dieser Arbeit ausführlich vorgestellt.

## 1.2 Zielstellung

Die Photovoltaikanlage eines Präzisionsfertigungsbetriebes in Chemnitz soll um ein Batteriespeichersystem ergänzt werden. Die Ziele des Speichereinsatzes sind die Eigenverbrauchsoptimierung, die Vermeidung von Abregelung, das Last-Peak-Shaving und die Minimierung der Umwandlungsverluste. Basierend auf der Simulation verschiedener Auslegungsvarianten des hybriden PV-Batteriespeichersystems sollen anhand der Simulationsergebnisse die Einflüsse der Variation der Auslegungsparameter auf das Systemverhalten analysiert und erläutert werden. Abschließend sollen Richtwerte und Tendenzen zur Auslegung des hybriden Energiespeichersystems dargelegt werden und diskutiert werden, inwieweit die Ziele des Speichereinsatzes erreicht werden können.

## 1.3 Kapitelübersicht

Beginnend mit der Literaturrecherche soll eine allgemeine Grundlage für die in dieser Arbeit betrachteten Themen gegeben werden. Als wird der Aufbau von Einzel- und hybriden Energiespeichersystemen betrachtet. Hierbei wird zunächst der Aufbau eines Batterieenergiespeichersystems erklärt. Anschließend wird der Aufbau und die verschiedenen Kopplungsvarianten hybrider Energiespeichersysteme behandelt, um ein Verständnis, für das im späteren Verlauf betrachtete, hybride Batterieenergiespeichersystem zu schaffen. Im nächsten Abschnitt werden die Aufgaben, Anwendungsfelder und Betriebsweisen von Energiespeichersystemen vorgestellt. Hier wird mit den möglichen Betriebsweisen von Batterieenergiespeichersysteme begonnen, welche einen wirtschaftlichen Betrieb des Systems ermöglichen sollen. Anschließend werden reale Umsetzungen von Batterieenergiespeichersystemen sowie anwendungsnahe Forschungsprojekte von hybriden Energiespeichersystemen vorgestellt. Nach der Literaturrecherche werden Vorbetrachtungen zur Untersuchung getätigt. Hierbei wird zunächst das übergebene Betriebsführungsverfahren analysiert, um das spätere Systemverhalten nachvollziehen zu können. Anschließend werden die verwendeten Zeitreihen des Energiebedarfs des untersuchten Betriebs sowie der Energieerzeugung aus der PV-Anlage analysiert, um anhand einer Auswahl repräsentativer Tage den Simulationsaufwand zu reduzieren. Nach den getätigten Vorbetrachtungen erfolgt die Untersuchung des Systemverhaltens. Hierfür werden Bewertungskriterien definiert, Auslegungsoptionen beschrieben und anhand dessen ein Versuchsplan erstellt. Anschließend werden die Simulationsergebnisse ausgewertet und anhand dessen eine Auslegungsempfehlung gegeben.

## 2 Literaturrecherche

### 2.1 Systemaufbau von Einzel- und hybriden Energiespeichersystemen

#### 2.1.1 Systemaufbau eines Batterieenergiespeichersystems

In [4] wird der Aufbau eines Batterieenergiespeichersystems (BESS) und die Funktion der einzelnen Systemkomponenten erklärt. Abbildung 1 zeigt den strukturellen Aufbau des Systems und die Verknüpfung der Systemkomponenten.

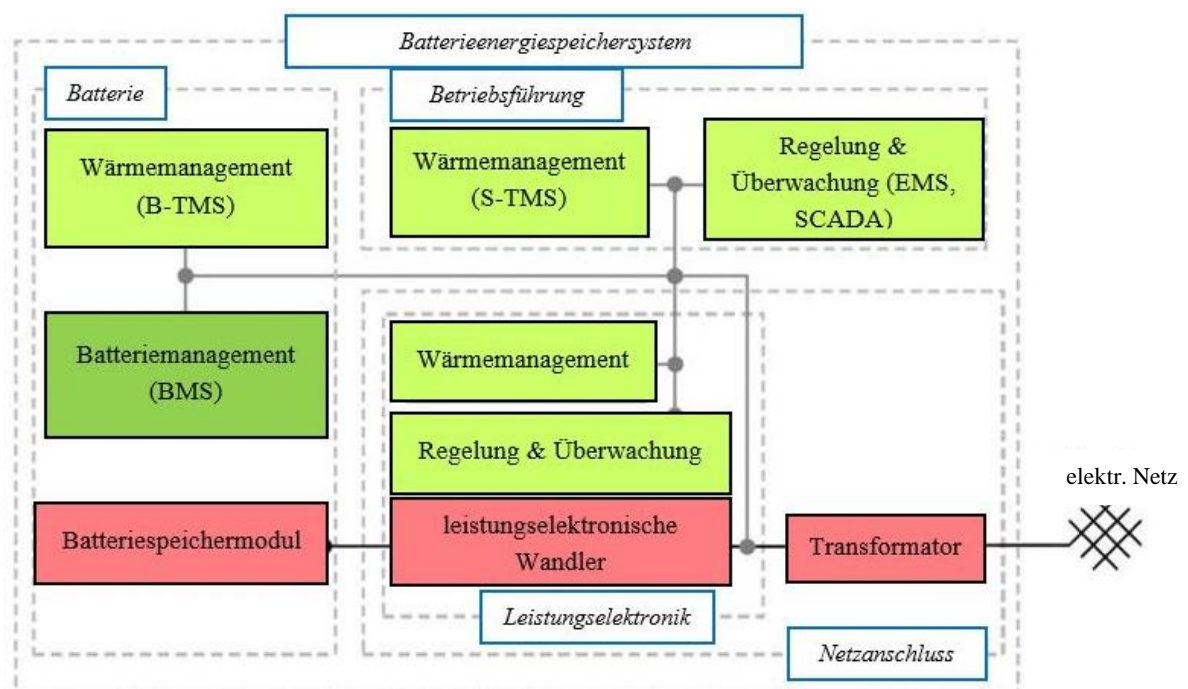


Abbildung 1: Aufbau und Funktion der Komponenten in einem BESS nach [4]

Die Systemkomponenten werden in Batteriekomponenten, Systembetriebskomponenten und Netzanchlusskomponenten unterteilt.

Zu den Batteriekomponenten gehört das Batteriespeichermodul. Dieses besteht aus den Batteriezellen, welche zu Modulen zusammengesetzt und verschaltet werden. Mehrere verschaltete Module werden als Battery Pack bezeichnet. Durch gezielte Verschaltung der Batteriepacks können Leistung und Kapazität skaliert werden. Verschaltete Batterie-Packs werden Batteriespeichermodule (in der Industrie auch Container genannt) genannt. Diese werden meist modular ausgeführt, um eine flexible Skalierung für individuelle

Projektgrößen zu ermöglichen. Das Batteriemanagementsystem (BMS) überwacht und steuert Spannung, Temperatur und Strom, um eine gleichmäßige Belastung der Batteriezellen für einen sicheren Betrieb der Batterie zu gewährleisten. Des Weiteren kontrolliert es den Ladezustand (SoC) der verschalteten Zellen und sendet ihn an das Energiemanagementsystem (EMS). Das Wärmemanagement der Batterie (B-TMS) regelt Temperatur und Temperaturgradienten der Batterie-Packs. Dies ist besonders wichtig, da Wirkungsgrad und Lebensdauer von Batterien stark von der Temperatur abhängen.

Systembetriebskomponenten (Betriebsführung) gewährleisten den zuverlässigen Betrieb des Systems. Zur Regelung & Überwachung zählen das Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), welches für die übergeordnete Systemkontrolle und Datenerfassung verantwortlich ist, sowie das EMS, welches für die Überwachung und Steuerung des Leistungsflusses im System zuständig ist, um die Anwendung verschiedener Betriebsstrategien zu ermöglichen. Das Wärmemanagement des Betriebssystems (S-TMS) kontrolliert die Heiz-, Kühl- und Lüftungsaggregate.

Die Netzanschlusskomponenten sind unterteilt in den Transformator, welcher die Integration in höhere Netzebenen ermöglicht und die Leistungselektronik. Diese ist unterteilt in die leistungselektronischen Wandler, welche die Anbindung an das elektrische Netz ermöglichen und den Leistungsfluss zwischen Batterie und Netz regeln, die Steuerung und Überwachung, für die Spannungserfassung und das Wärmemanagement, für die Temperaturregelung der Leistungselektronikkomponenten.

### **2.1.2 Aufbau hybrider Energiespeichersysteme**

Neben Batterien gibt es viele weitere Energiespeichertechnologien. Diese wurden von Prof. Dr.-Ing. T. Bocklisch in Tabelle 1 hinsichtlich verschiedener, für Energiespeichertechnologien typischer Kennwerte verglichen.

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Energiespeichertechnologien nach [1]

	DSK	SMES	SRS	PHES	CAES	Li-I-Batterie	H2-Speicherpfad
Speicherdauer	Sekunden bis Minuten			Stunden bis Wochen			Wochen bis Monate
Typ. Kapazität	Wh bis kWh			MWh bis GWh		kWh bis GWh	MWh bis TWh
Leistungsdichte	++	+	+	--	--	+	0
Energiedichte	-	-	0	--	-	+	++
Zykluswirkungsgrad	+	++	++	+	0	+	--
Selbstentladung	-	-	--	++	0	+	++
Zykluslebensdauer	+	++	+	0	-	--	--
Kalendarische Lebensdauer	0	+	0	++	+	-	-

Es ist ersichtlich, dass die Energiespeichertechnologien zum Teil starke Unterschiede in ihren Kennwerten aufweisen. Dennoch ist eine Tendenz zu erkennen, welche eine Einteilung in zwei Gruppen, die Kurz- oder Langzeitspeicher, ermöglicht. Kurzzeitspeicher charakterisieren sich durch hohe Leistungsdichten, hohe Zykluswirkungsgrade und eine hohe Zykluslebensdauer. Dementsprechend eignen sie sich, um für kurze Zeit sehr hohe Leistungen bereitzustellen oder aufzunehmen, weshalb sie auch als Hochleistungsspeicher bezeichnet werden. Doppelschichtkondensatoren (DSK), supraleitende magnetische Energiespeicher (SMES) und Schwungradspeicher (SRS) sind Beispiele hierfür. Langzeitspeicher besitzen meist hohe Energiedichten oder hohe speicherbare Energiemengen, eine hohe kalendarische Lebensdauer und eine niedrige Selbstentladung. Dementsprechend eignen sie sich, um große Energiemengen über lange Zeiträume zu speichern, weshalb sie auch Hochenergiespeicher genannt werden. Beispiele hierfür sind Pumpspeicherkraftwerke (PHES) und ein Wasserstoffspeicherpfad. [1]

Oftmals ist es allerdings wünschenswert sowohl über kurze als auch lange Zeiträume große wie auch kleine Energiemengen speichern zu können. Besonders mit Hinblick auf die Integration regenerativer Erzeugungsanlagen wäre dies wünschenswert, da sowohl tägliche wie auch saisonale Schwankungen der Energieerzeugung ausgeglichen werden könnten.

Dies ist durch die Kopplung mehrerer Energiespeichertechnologien mit sich ergänzenden Betriebseigenschaften, sogenannten hybride Energiespeichersystemen (HESS), möglich. In solchen Systemen lassen sich Leistung und Energie besser auf individuelle Problemstellungen auslegen und der Systemwirkungsgrad steigt. Des Weiteren erfolgt eine Erhöhung der Lebensdauer der Speicher aufgrund geringerer dynamischer Beanspruchung und der allgemeine Speichernutzen erhöht sich. Ebenfalls können über eine Betriebsführung verschiedene Betriebsführungsziele zur Kostenoptimierung implementiert werden. Somit verringern sich die Investitionskosten im Verhältnis zu Speicherlebensdauer und

Speichernutzen, sodass sich die Wirtschaftlichkeit dieser Energiespeichersysteme verbessert. [5]

Nach [5] ist ein HESS typischerweise eine Kopplung aus einem Speicher für hohen Leistungsbedarf mit hoher Leistungsdichte, hohem Zyklenwirkungsgrad, hoher Reaktionsgeschwindigkeit und hoher Zyklenlebensdauer, und einem Speicher für hohen Energiebedarf mit hoher Energiedichte, geringer Selbstentladung und hoher kalendarischer Lebensdauer. Solche hybriden Energiespeichersysteme müssen allerdings nicht aus zwei verschiedenen Energiespeichertechnologien bestehen. Batterien sind eine flexibelsten Energiespeichertechnologien, da sie aufgrund der verschiedenen möglichen Zellchemien hohe Leistungen bereitstellen können und trotzdem durch ihre flexible Skalierbarkeit Energiemengen von einigen Kilowattstunden bis zu mehreren Gigawattstunden bevorraten können. Des Weiteren können HESS auch zur Sektorenkopplung genutzt werden. Ein gutes Beispiel hierfür wäre ein Wohngebäude mit einem PV-Batteriespeichersystem ergänzt um eine Wärmepumpe und einen Wärmespeicher. Durch solch ein hybrides Energiespeichersystem können Eigenverbrauchs- und Selbstversorgungsgrad stark erhöht werden, wodurch die Netzbezugskosten sinken. [4]

### **2.1.3 Kopplungsvarianten hybrider Energiespeichersysteme**

Aufgrund der erhöhten Speicheranzahl gibt es vielfältigere Kopplungsstrukturen als bei Einzelspeichersystemen. Folgend werden die möglichen gleichspannungsbasierten Kopplungsvarianten für hybride Energiespeichersysteme nach [5] mit Ergänzungen aus [1] erklärt.

Die erste Variante ist die direkte DC-Kopplung über einen DC-Bus. Da keine weiteren Systemkomponenten notwendig sind, ist diese Kopplung sehr simpel und kostengünstig. Allerdings sind nur sehr geringe Spannungsschwankungen möglich, da die Spannungsniveaus beider Speicher einander entsprechen müssen. [1] Somit sind Leistungsflussregelung und Energiemanagement nicht möglich und die Speicher werden ineffektiv betrieben.

Eine zweite Variante ist die Kopplung über einen bidirektionalen DC/DC-Wandler, welcher lediglich mit einem der beiden Speicher verbunden werden kann. Im stromgeregelten Fall ist ein Schutz des Hochenergiespeichers vor Spitzenleistung und schnellen Lastschwankungen möglich. Allerdings ist hierbei die DC-Busspannung schwankend, da sie der Ladegrad-abhängigen Spannung des Hochleistungsspeichers entspricht. [1]

Weiterhin ist eine Kopplung über zwei DC/DC-Wandler möglich. Diese Kopplung ist als Parallelschaltung in Abbildung 2 zu sehen

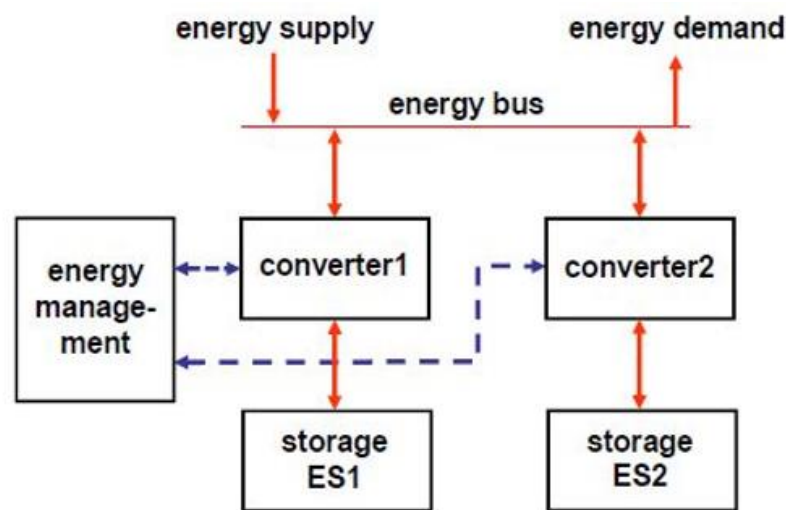


Abbildung 2: Grundstruktur eines HESS aus [5]

Der weitere Wandler ermöglicht den Betrieb des Hochleistungsspeicher in einem größeren Spannungsspektrum, wodurch dessen verfügbare Kapazität besser ausgenutzt wird.

Des Weiteren ist eine Reihenschaltung möglich, allerdings ist diese meist kostenintensiver und schwieriger zu regeln, da die komplette Leistung des Systems über einen Wandler übertragen werden muss. [1] Nachteile beider Varianten sind eine höhere Systemkomplexität und höhere Kosten.

## 2.2 Aufgaben, Anwendungsfelder und Betriebsweisen von Energiespeichersystemen

Batterien und Pumpspeicherkraftwerke sind die weit verbreitetsten Energiespeichertechnologien in Deutschland. Allerdings ist das Ausbaupotential von PHES in Deutschland nahezu ausgeschöpft, sodass keine Neubauten zu erwarten sind. Aufgrund dessen und da Batterien derzeit einen starken Zuwachs erleben erfolgt im Weiteren eine vorrangige Betrachtung von Batterien. [6]

### 2.2.1 Betriebsweisen von Batterieenergiespeichersystemen

Die Mehrheit der installierten stationären Batteriespeichersysteme werden als Einzelanwendungen für die Eigenverbrauchsoptimierung oder die Bereitstellung von Systemdienstleistungen verwendet. [7] Allerdings führt dieser Single-Use-Betrieb zu sehr



hohen Investitionskosten im Vergleich zum Speichernutzen, weshalb kein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. [8] Allerdings zeigen die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen, dass BESS durch Multi-Use-Betrieb zusätzliche Gewinne erwirtschaften können, was sie gegenüber Einzelanwendungen wirtschaftlich vorteilhaft macht. [7]

Multi-Use bezeichnet die Kombination mehrerer Anwendungen oder Dienstleistungen in einer Technologie, um Synergien zu heben und die Wirtschaftlichkeit zu verbessern. [6]

In [9] werden 2 Betriebsweisen für Multi-Use-BESS beschrieben. Eine Betriebsart stellt das „Zusammenführen von Zielen“ dar. Hierbei wird die Ausgangsleistung des BESS lediglich in Absolutwert und Timing angepasst, wobei es nicht möglich, dass Leistung oder Kapazität der Batterie speziell einem Ziel zugewiesen werden.

Dies wird im Folgenden anhand von Abbildung 3 erklärt.

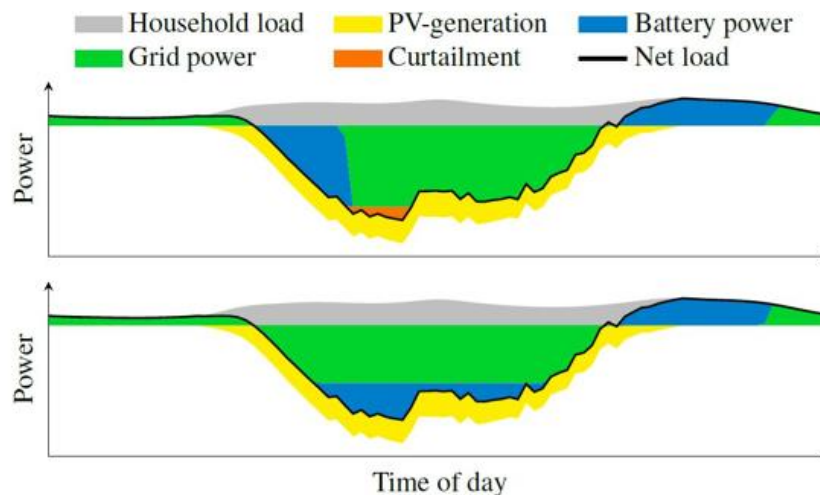


Abbildung 3: Multi-Use-Betriebskonzept „Zusammenführen von Zielen“ aus [9]

Das obere Diagramm zeigt, wie der Batteriespeicher nur als Einzelanwendung für die Eigenverbrauchsoptimierung verwendet wird. Im Gegensatz dazu kann, wie im unteren Diagramm zu sehen, die Ladephase in die Mitte des Tages verschoben werden, sodass neben der Eigenverbrauchsoptimierung zusätzlich noch die Einspeisespitze reduziert und die Abregelung erzeugter Energie vermieden wird. Hierfür müssen ggf. Batterieleistung und -kapazität angepasst werden, damit eine Abregelung vollständig vermieden werden kann oder die Einspeisespitze einen definierten Leistungswert nicht überschreitet.

Die andere Betriebsart ist das „Stapeln von Anwendungen“. Hierbei werden Kapazität, Leistung sowie der Ladezustand in einzelne virtuelle Segmente zerlegt, welche jeder Anwendung spezifisch zugeteilt werden können. Somit kann die Aufteilung des BESS dem Bedarf der verschiedenen Anwendungen angepasst werden. Die Batterieleistung ergibt sich hierbei aus der Summe der Leistungsbedarfe der einzelnen Anwendungen.

In Abbildung 4 wird die Aufteilung der Kapazität eines BESS auf zwei Anwendungen A und B, sowie die zeitliche Anpassung dessen dargestellt.

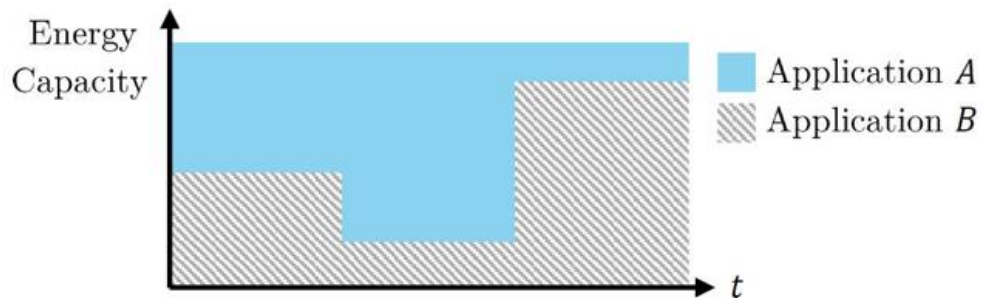


Abbildung 4: Multi-Use-Betriebskonzept „Stapeln von Anwendungen“ aus [9]

Die Auslegung dieser Betriebsart kann statisch, mit festgelegter Aufteilung der Batteriesegmente, oder dynamisch, mit wechselnder Aufteilung der Batteriesegmente für wechselnde Anwendungen, erfolgen.

In Tabelle 2 wurden mögliche Multi-Use-Kombinationen von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena) bezüglich ihrer Umsetzbarkeit bewertet.

Tabelle 2: Multi-Use-Kombinationsmöglichkeiten unterschiedlicher Anwendungsfelder nach [6]

	Spotmarkt-Trading	Regelleistungserbringung	Bilanzkreismanagement	Vermarktung von Wärme/Kraftstoff	Spannungshaltung	Engpassmanagement / Redispatch	Schwarzstartfähigkeit	Eigenverbrauchsoptimierung	Notstromversorgung	Elektromobilität
Spotmarkt-Trading										
Regelleistungserbringung	M									
Bilanzkreismanagement	M	M								
Vermarktung von Wärme/Kraftstoff	M	M	M							
Spannungshaltung	M	×	M	M						
Engpassmanagement / Redispatch	M	M	M	M	M					
Schwarzstartfähigkeit	✓	✓	M	M	✓	✓				
Eigenverbrauchsoptimierung	M	✓	M	M	×	M	M			
Notstromversorgung	M	M	M	M	M	M	M	M		
Elektromobilität	M	M	M	×	M	M	×	M	M	
✓ wird heute praktisch angewendet      M theoretisch möglich      × eher unwahrscheinlich										

Es ist ersichtlich, dass es sehr viele Möglichkeiten gibt, einen Speicher mit mehreren Aufgaben zu versehen. Im Folgenden erfolgt eine Einordnung der in der Aufgabenstellung genannten Referenzanwendungen *PV- oder Windpark* mit Capacity Firming, Arbitrage und Peak Shaving, *Industriebetrieb* mit Eigenverbrauchsoptimierung, Leistungspreisminimierung und Kapazitätsvorhaltung für eine unterbrechungsfreie Stromversorgung sowie *mobile Ladestation für Elektromobilität*. Capacity firming beschreibt die Nutzung eines

Energiespeichers, zur Glättung der fluktuierenden Energiebereitstellung von Kraftwerken auf Basis erneuerbarer Energien. Hierfür bevorratet der Energiespeicher überschüssige Energie und gibt diese in Spitzenlastzeiten an das elektrische Netz ab. [10] Arbitrage beschreibt die Nutzung eines Energiespeichers, zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Kraftwerken auf Basis erneuerbarer Energien. Der elektrische Energiespeicher wird zu Schwachlastzeiten mit erzeugter Energie geladen, um niedrige Energiepreise zu vermeiden und wird zu Spitzenlastzeiten entladen, um möglichst hohe Erträge zu erwirtschaften. [11] Wie in Tabelle 1 zu sehen ist es theoretisch möglich, dass ein mit Energiespeichern erweiterter PV- oder Windpark am Spotmarkt-Trading mittels Arbitrage teilnimmt und mittels Capacity firming das Bilanzkreismanagement unterstützt. Des Weiteren ist ein Engpassmanagement, mittels Peak-Shaving (Leistungsspitzenreduzierung) möglich. Ein mit Energiespeichern erweiterter Industriebetrieb könnte seinen Eigenverbrauch optimieren, eine Leistungspreisminimierung mittels Peak-Shaving erzielen und Kapazität zur Notstromversorgung vorhalten. Für die Elektromobilität sind bis auf die Vermarktung von Wärme/Kraftstoff, da es sich nur um den Stromsektor handelt, und die Schwarzstartfähigkeit, aufgrund der geringen speicherbaren Energiemenge, alle Anwendungskombinationen theoretisch möglich

### **2.2.2 BESS in verschiedenen Anwendungsfeldern**

Im Folgenden werden praktische Umsetzungen von Multi-Use-BESS beschrieben.

Ein Beispiel für die „Verschmelzung von Zielen“ stellt das SolarCity Tesla Solar Project dar. Die PV-Anlage mit 13 MW Leistung wurde um einen Lithium-Ionen-BESS mit 13 MW Leistung und 52 MWh Kapazität erweitert. [12] Das BESS besteht aus mehreren Powerpack-Modulen von Tesla, welche durch ihr modulares Design flexibel skalierbar sind. [13] Durch die Installation des BESS steigt der Anteil regenerativer Energien an der Energieversorgung, die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern wird reduziert und die Kosten für die Energiebereitstellung sinken. [12]

Ein Beispiel für das „Stapeln von Anwendungen“ stellt das in Australien installierte Hornsdale Power Reserve dar. Es besteht aus der Hornsdale Wind Farm mit 315 MW Leistung und einem Lithium-Ionen-Batteriespeicher mit 100 MW Leistung und 129 MWh Kapazität. [14] Das BESS besteht aus mehreren Megapack-Modulen von Tesla, welche durch ihr modulares Design flexibel skalierbar sind. [15] 70 MW Leistung und 10 MWh Kapazität stehen vertraglich der südaustralischen Regierung für die Frequenzregelung zu. Die restlichen 30 MW Leistung und 119 MWh Kapazität stehen dem Betreiber Neoen für Arbitrage, Capacity firming und den Handel im Frequenzregelungsmarkt zur Verfügung. [16]

Bei der Recherche wurden wenig Informationen zu BESS in industrieller Anwendung gefunden, allerdings werden in Tabelle 3 einige Batteriespeicher verschiedener Hersteller verglichenen, anhand deren Produktportfolios ersichtlich, dass ein Großteil dieser auch im industriellen Betrieb eingesetzt werden kann.

Tabelle 3: Lithium-Ionen-Batteriespeichersysteme verschiedener Hersteller

	Powerpack / Megapack [13] [15] [17]	Gridstack [18]	Sunstack [19]	Edgestack [20]	Y.Cube 30 / 60 [21] [22]	MTU Energypack QS [23] [25]	MTU Energypack QM /QL [23] [25]	StoraXe-Container- System [26] [27]
Hersteller	Tesla	Fluence	Fluence	Fluence	Aggreko	MTU	MTU	ads-tec
Leistung in kW	130 / 1500	2000	2000	500	1000 / 1050	400	800 / 2000	50 bis 1800
Kapazität in kWh	232 / 3000	-	-	-	610 / 1187	550	1000 / 2600	50 bis 2400
Wirkungsgrad	88 - 89,5 %	-	-	-	-	88 %	90 %	-
Anwendungsfelder:								
Integration erneuerbarer Energien (Capacity firming, Arbitrage)	x	x	x		x	x	x	
Notstromversorgung	x					x	x	x
Lastverlagerung zur Strompreisminimierung	x			x		x	x	
Eigenverbrauchsoptimierung						x	x	x
Lastspitzenreduzierung zur Leistungspreisminimierung	x			x				x
Bereitstellung von Systemdienstleistungen:			x					
Frequenzregelung	x	x				x	x	
Unterstützung des Verteilungs- & Übertragungsnetz (Vermeidung des konv. Netzausbau)	x	x				x	x	
Kapazitätsreserve	x							
Engpassmanagement						x	x	
Schwarzstart- Fähigkeit						x	x	x

Bei den für die verschiedenen BESS herausgefunden Anwendungsfeldern handelt es sich lediglich um die direkt namentlich erwähnten Anwendungsmöglichkeiten. Da diese Batteriespeicher alle auf der Lithium-Ionen-Batteriespeichertechnologie beruhen und sich somit lediglich in Leistung, Kapazität und Systemaufbau unterscheiden ist davon auszugehen, dass nahezu jeder dieser Speicher alle genannten Anwendungsfelder bedienen kann.

Beispiele für industriell genutzte BESS haben die Firma Advanced Microgrid Solutions sowie die Firma Target. Advanced Microgrid Solutions besitzt einen auf Powerpack-Modulen basierenden Batteriespeicher mit 250 kW Leistung und 1,5 MWh Kapazität. Er dient der Lastspitzenreduzierung (Peak-Shaving) für die Bürogebäude sowie als Kapazitätsreserve. Target, besitzt ebenfalls einen auf Powerpack-Modulen basierenden Batteriespeicher mit 800 kW Leistung und 1,6 MWh Kapazität. Eine Leistungs- und Strompreisminimierung wird mittels Lastspitzenreduzierung und Lastverlagerung erreicht. [13]

Für Elektrofahrzeuge gibt es viele verschiedene portable Ladestationen, um ein dezentrales Laden des eigenen E-Pkw zu ermöglichen. Die Recherche nach mobilen Ladestation ergab nur eine erwerbbar Umsetzung von ads-tec. Der StoraXe Mobile High Power Charger ist ein mobiles Schnellladesystem ausgeführt als LKW-Auflieger. Er hat eine Kapazität von 1,9 MWh und es können bis zu 10 Fahrzeuge mit jeweils 320 kW geladen werden, wodurch Elektrofahrzeuge sechsmal schneller als mit herkömmlichen Ladesäulen geladen werden können. Als Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich die Schaffung einer temporären Ladeinfrastruktur an hochfrequentierten Reiserouten, für Fahrvents von Elektrofahrzeugen oder als Lademöglichkeit bei Festivals. [28]

### **2.2.3 Anwendungsbeispiele hybrider Energiespeichersysteme**

Mit jedem weiteren Energiespeicher steigt die Anzahl zu steuernder Betriebsparameter, sodass eine geregelte Betriebsführung erforderlich ist.

#### Smart Region Pellworm

Systemaufbau:

In [29] wird das Energiesystem der Smart Region Pellworm beschrieben. Die Komponenten des Energiesystems sind ein Windpark mit 4,8 MW Leistung, ein Hybridkraftwerk bestehend aus einer 700 kWp PV-Anlage und einer 300 kW Windkraftanlage sowie eine

Biogasanlage. Des Weiteren zählen zu dem Energiesystem mehrere kleinere private PV-Anlagen sowie Elektrospeicherheizungen und Wärmepumpen.

Das hybride Energiespeichersystem besteht aus zwei zentralen Speichersystemen, einer Lithium-Ionen- und einer Redox-Flow-Batterie in der Nähe des Hybridkraftwerkes sowie aus mehreren dezentralen Speichersystemen. Als dezentrale Speicher stehen acht private Elektrospeicherheizungen (ESH), für negative Speicherleistungen, sowie 11 Lithium-Ionen-Haushaltsspeicher (HHS) für die Betriebsführung zur Verfügung.

In Tabelle 4 sind die einzelnen Komponenten des HESS aufgelistet.

Tabelle 4: Komponenten des hybriden Speichersystems nach [29]

Komponente	Leistung in kW	Kapazität in kWh
Lithium-Ionen-Batterie	550 (Laden) 1000 (Entladen)	550
Redox-Flow-Batterie	200	1600
Elektrospeicherheizungen (ESH)	145 (Laden)	580 (Laden)
Dezentrale Haushaltsspeicher (HHS)	80	80

Ziel des HESS soll es sein, durch einen geregelten Multi-Use-Ansatz mit Direktvermarktung erzeugter Energie, Bereitstellung von Systemdienstleistungen und lokaler Energieversorgung eine stabile, kosteneffiziente und marktorientierte Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien zu ermöglichen.

#### Betriebsführung:

Die in [29] beschriebene Betriebsführung wird vom Energiemanagementsystem ausgeführt. Es erstellt Prognosen des Kundenbedarfs, speziell der Leistungszeitreihen und des Wärmebedarfs der ESH und führt die einzelnen Stufen der Optimierung aus, weshalb alle Messwerte des Prozesses in das EMS übertragen werden müssen.

Die Betriebsführung folgt einem hierarchischem Optimierungsansatz mit mehreren Optimierungsebenen sowie unterschiedlichen Zeithorizonten und zeitlichen Auflösungen. Aufgrund der Zykluszeiten stationärer Energiespeicher sowie der Zeitkonstanten und Periodendauern der fluktuierenden Energieerzeugung und der Kundenlasten ist ein Planungshorizont von 24 bis 36 Stunden erforderlich. Da die Prognose der fluktuierenden Energieerzeugung großen Unsicherheiten unterliegt, ist eine fortlaufende Einbeziehung von aktuellen Zustandswerten und Prognosen im Intraday-Bereich nötig, um die Speicherfahrpläne stufenweise anzupassen.

Die Struktur der Betriebsführung, wie in Abbildung 5 zu sehen, ist in die Stufen "Speicherplanung" und "Speicherdispatch" unterteilt.



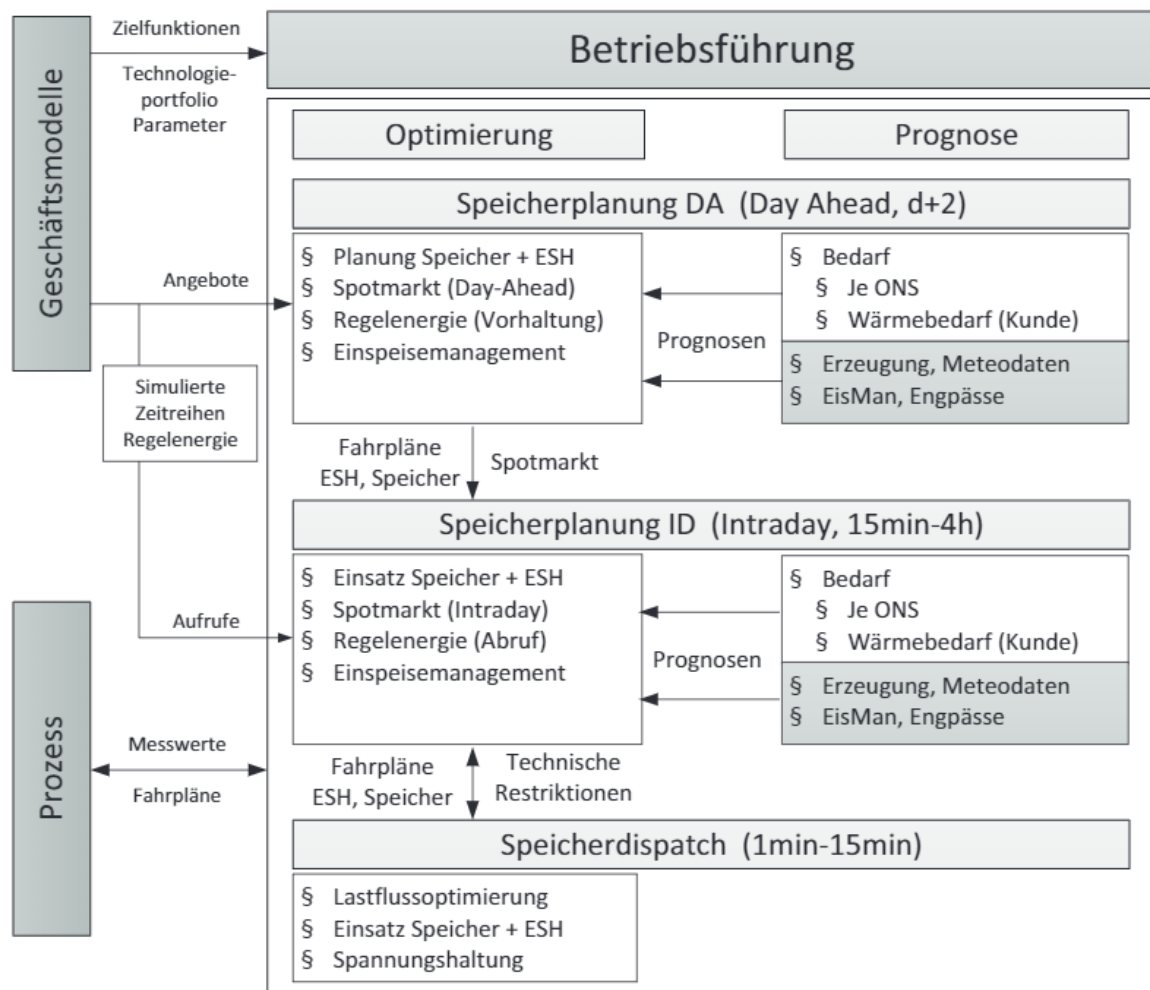


Abbildung 5: Struktur der Betriebsführung aus [29]

Die Speicherplanung erstellt die Speicherfahrpläne für die Zeiträume Day-Ahead (DA) und Intraday (ID).

Die "Speicherplanung DA" erstellt eine Einsatzplanung der zentralen sowie dezentralen Energiespeicher mit einer 15-minütigen Auflösung für einen Planungshorizont von einem (DA) bis maximal zwei Tagen ( $d + 2$ ). Hierfür liegt ein virtuelles Optimierungsmodell zu Grunde, welches alle relevanten Komponenten des Energiesystems in einer Wirkleistungsbilanz verknüpft. Der modulare Aufbau des Optimierungsmodells erlaubt die Ausführung verschiedener Betriebsführungsstrategien, da die einzelnen Komponenten individuell parametrisiert werden können und die Zielfunktion somit flexibel angepasst werden kann. Eine geschlossene Optimierung über den gesamten Optimierungszeitraum erfolgt gemischt ganzzahligen Optimierungsansatzes (MILP, vom englischen „mixed

integer linear programming“) auf Basis der Prognosen der Kundenlasten, des Wärmebedarfs der Kunden mit Elektrospeicherheizungen sowie der Erzeugung aus Wind- und PV-Anlagen. Die “Speicherplanung ID” dient der Anpassung der Einsatzplanung sowie der Erstellung der Kurzfristfahrpläne für die nächsten ein bis drei Stunden anhand von Kurzfristprognosen des Kundenbedarfs und der Energieerzeugung. Des Weiteren werden Aufrufe der Regelenergie sowie das kurzfristige Engpassmanagement in den 15-minütigen Fahrplänen berücksichtigt. Die Verknüpfung der beiden Ebenen der Speicherplanung erfolgt durch die Vorgabe der SoC der Speicher. Der SoC dient hierbei als Parameter für den Zustand der Speicher. Die DA-Vorgabe des SoC wird in der ID-Optimierung zum Ende des Planungshorizontes als Zielbereich des Speicherfüllstandes genutzt.

Die letzte Stufe der Betriebsführung ist der “Speicherdispatch”. Dessen Aufgabe ist die Vermeidung netzkritischer Zustände beim Betrieb des HESS. Hierfür ist ein Netzmodell hinterlegt, welches die technischen Charakteristiken des Energiesystems detailliert abbildet. Hierbei gilt der SoC als zeitliche Zustandsgröße des Energiespeichers. Das verwendete Optimierungsverfahren Optimal Power Flow (OPF) hat als Zielvorgabe die Minimierung der Netzverluste unter Berücksichtigung der Kosten für Energiespeicher, Energieerzeuger und anderer Netzbestandteile. Die Fahrplanwerte werden in einem Zeithorizont von 15 Minuten in minütlicher Auflösung erstellt. Das OPF bestraft eine Abweichung vom ursprünglichen aus der Speicherplanung stammenden Sollwert, sodass der Sollwert der Speicherleistung der in der “Speicherplanung” vorgegebenen Trajektorie folgt. Lediglich bei einer Verletzung der Netzrestriktionen wird er vom OPF angepasst. Es ist keine Optimierung über mehrere Zeitschritte möglich, somit muss der Ladegrad des Speichers für jeden Tastschritt vom OPF neu berechnet werden und dem nächsten Berechnungsschritt als Eingangsparameter übergeben werden.

## M5BAT

### Systemaufbau:

In [30] und [31] wird der Systemaufbau des M5BAT-Projekts beschrieben. Es handelt sich um ein hybrides Batteriespeichersystem bestehend aus fünf verschiedenen Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Batteriespeichertechnologien, welche in Tabelle 2 aufgelistet sind. Das HESS besitzt eine Gesamt-Nennleistung von 5,6 MW und eine Gesamtkapazität von 5,5 MWh.

Tabelle 5: Komponenten des hybriden Speichersystems nach [31]

Batterietyp	Leistung in MW	Kapazität in MWh
Blei-Säure	1,21	1,36
VRL Blei-Gel	1,00	1,00
Lithium-Manganoxid	2,35	2,35
Lithium-Eisenphosphat	0,60	0,66
Lithium-Titanat	0,46	0,16

Wie in Abbildung 6 zu sehen, besitzen alle 10 Batteriestrings einen Wechselrichter und es sind jeweils zwei Strings über einen Transformator an das Mittelspannungsnetz angebunden.

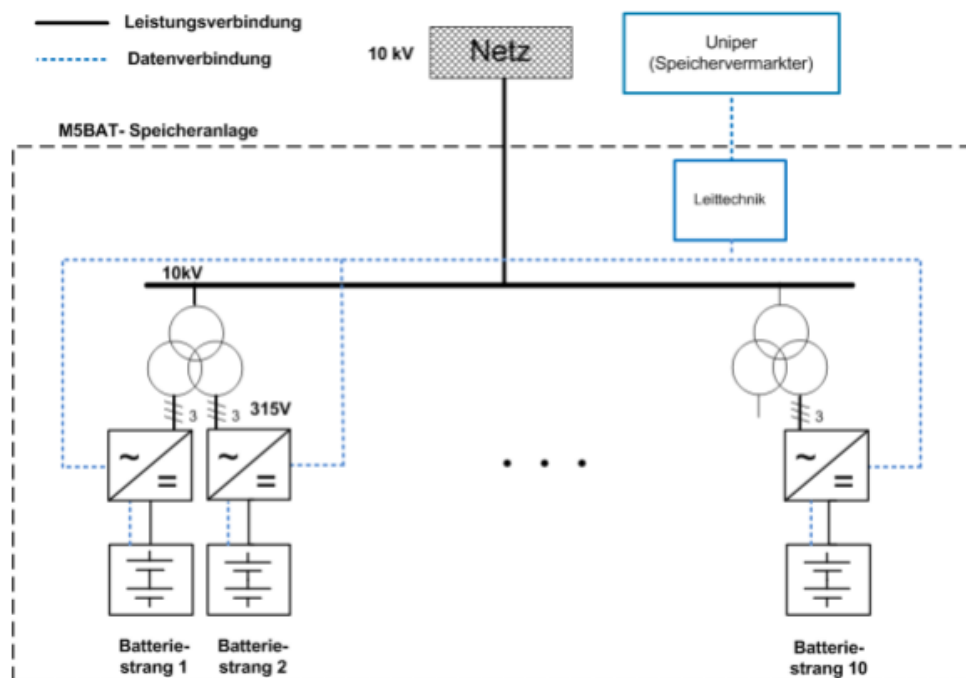


Abbildung 6: Schematischer Aufbau des M5BAT aus [31]

Betriebsführung:

In Abbildung 7 ist das Optimierungsmodell des M5BAT zu sehen, nach welchem die Betriebsführung Entscheidungen trifft.



Abbildung 7: Optimierungsmodell des M5BAT nach [32]

In [32] wird das Optimierungsmodell erklärt. Wöchentlich wird die Höhe der zu erbringenden Primärregelleistung per Auktion vergeben. Diese muss für die folgende Woche jederzeit für einen 30-Minuten-Zeitraum abrufbar sein. Innerhalb dieser Woche erfolgt die Optimierung der Transaktionen am Spotmarkt. Einen Tag im Voraus erfolgt die Auktion am Day-Ahead-Markt. Im Intra-Day-Markt erfolgt eine kontinuierliche Optimierung der Fahrpläne mit dem Ziel der Maximierung der Gewinne aus Spot- und Regelleistungsmärkten, wobei die Aktivierung der Primärregelleistung nur im ersten Optimierungsschritt betrachtet wird.

Da die Anwendung des Betriebsführungskonzeptes nicht im realen System, sondern nur in einer Simulation stattfand, erfolgt keine detaillierte Beschreibung. Eine Beschreibung der weiteren Möglichkeiten zur Gewinnerwirtschaftung am Regelleistungsmarkt (Totband, Optionale Übererfüllung, Zeitplan-Anpassung) ist in [32] zu finden.

### Hybridspeicher im Projekt „PHI Factory“

Systemaufbau:

Nach [33] ist das Ziel des Projekts „PHI-Factory“ die Erhöhung der Energieeffizienz netzgekoppelter Kraftwerke. Durch Einbindung und Steuerung von Erzeugungs- und Speicheranlagen soll die Flexibilität des Kraftwerks und des Stromnetzes erhöht werden. Speichersysteme können hierfür die übermäßige oder zu niedrige Energieerzeugung kompensieren, Kosten einsparen, zeitweise einen autarken Betrieb ermöglichen und zusätzlich Systemdienstleistungen bereitstellen.

In Abbildung 8 ist der Aufbau des HESS zu sehen.

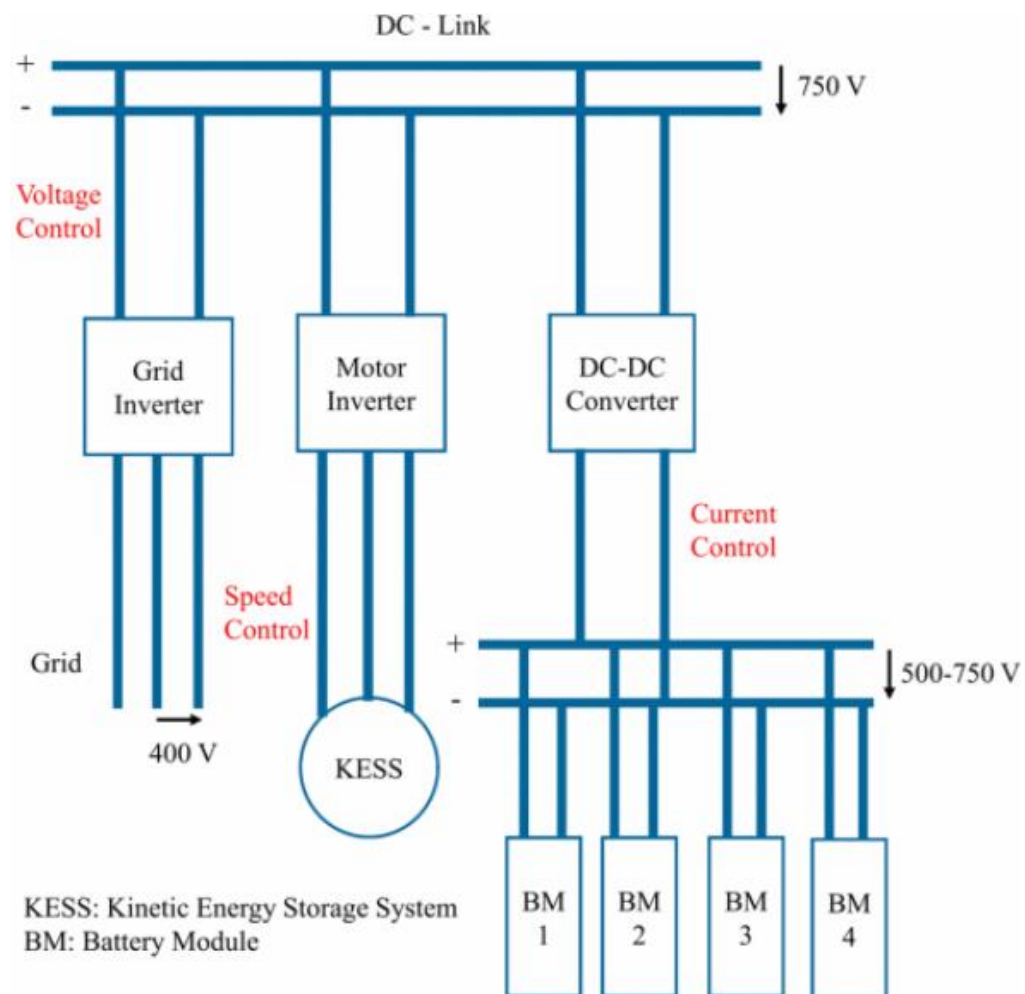


Abbildung 8: Aufbau und Regelungskonzept des hybriden Energiespeichers [33]

Es handelt sich um einen Schwungradspeicher mit Motor-Wechselrichter und einen Lithium-Ionen-Batteriespeicher mit DC-DC-Wandler, welche über einen DC-Bus gekoppelt sind. Die Leistungs- und Kapazitätsverteilung der einzelnen Komponenten ist in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Komponenten des hybriden Speichersystems nach [33]

Speichertechnologie	Leistung in kW	Kapazität in kWh
Schwungradspeicher	120	1,4
Lithium-Ionen-Batterie	308	122,4

Das HESS besitzt eine Gesamt-Nennleistung von 428 kW und eine Gesamtkapazität von 123,8 kWh.

**Betriebsführung:**

In [32] wird ein Betriebsführungskonzept zur Bereitstellung von Primärregelleistung mit dem Ziel der minimalen Beanspruchung der Batterie beschrieben, um dessen State of Health (SoH) bzw. kalendarische Lebensdauern zu verbessern. Unter Beachtung des SoC wird die vom HESS bereitzustellende Leistung, sofern diese zwischen minimaler und maximaler Nennleistung des Schwungradspeichers liegt, allein vom Schwungradspeicher bereitgestellt. Da die Anwendung des Betriebsführungskonzeptes nicht im realen System, sondern nur in einer Simulation stattfand, erfolgt keine detaillierte Beschreibung.

## 3 Vorbetrachtungen zur Untersuchung

### 3.1 Dokumentation des Betriebsführungsverfahrens

Für die simulationsbasierte Untersuchung eines BESS wurde ein in Matlab vorgefertigtes Betriebsführungsverfahren durch die Professur für Energiespeichersysteme des Instituts für Energietechnik an der Technischen Universität Dresden bereitgestellt.

Unter Verwendung dieser Betriebsführung sollen verschiedenen Auslegungsparameter eines hybriden Batteriespeichersystems variiert werden, um deren Einfluss auf das Systemverhalten und die Systemergebnisse zu untersuchen. Das untersuchte Batteriespeichersystem soll die Photovoltaikanlage eines Präzisionsfertigungsbetriebes in Chemnitz ergänzen. Die Ziele des Speichereinsatzes sind die Eigenverbrauchsoptimierung, die Vermeidung von Abregelung, das Last-Peak-Shaving, die Minimierung der Umwandlungsverluste und die Vorhaltung von Kapazität für eine unterbrechungsfreie Stromversorgung.

Der Simulation liegt ein Systemmodell eines BESS zu Grunde. Die Komponenten sind ein ersatzschaltbildbasiertes Batteriemodell mit einer Hochleistungs- (HP) und einer Hochenergiebatterie (HE), ein AC/DC-Wandler- sowie ein DC/DC-Wandler-Modell und der Zwischenkreis, welcher der Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten dient.

Als Betriebsführung wurde die dynamische Programmierung gewählt. Grundsätzlich gibt es drei Schritte: Zunächst die Offline-Berechnung mit der Erstellung der Übergangsmatrix, danach die Online-Berechnung der Sollwerte für das System mit Einbeziehung von Prognosewerten des PV- und Last-Profiles und die Zielfunktion, welche die Entscheidungsgrundlage der Betriebsführung ist und worüber individuell Betriebsführungsziele implementiert und untereinander gewichtet werden können.

#### Erstellung der Übergangsmatrizen

In Abbildung 9 ist der Ablauf der Erstellung der Übergangsmatrizen zu sehen.

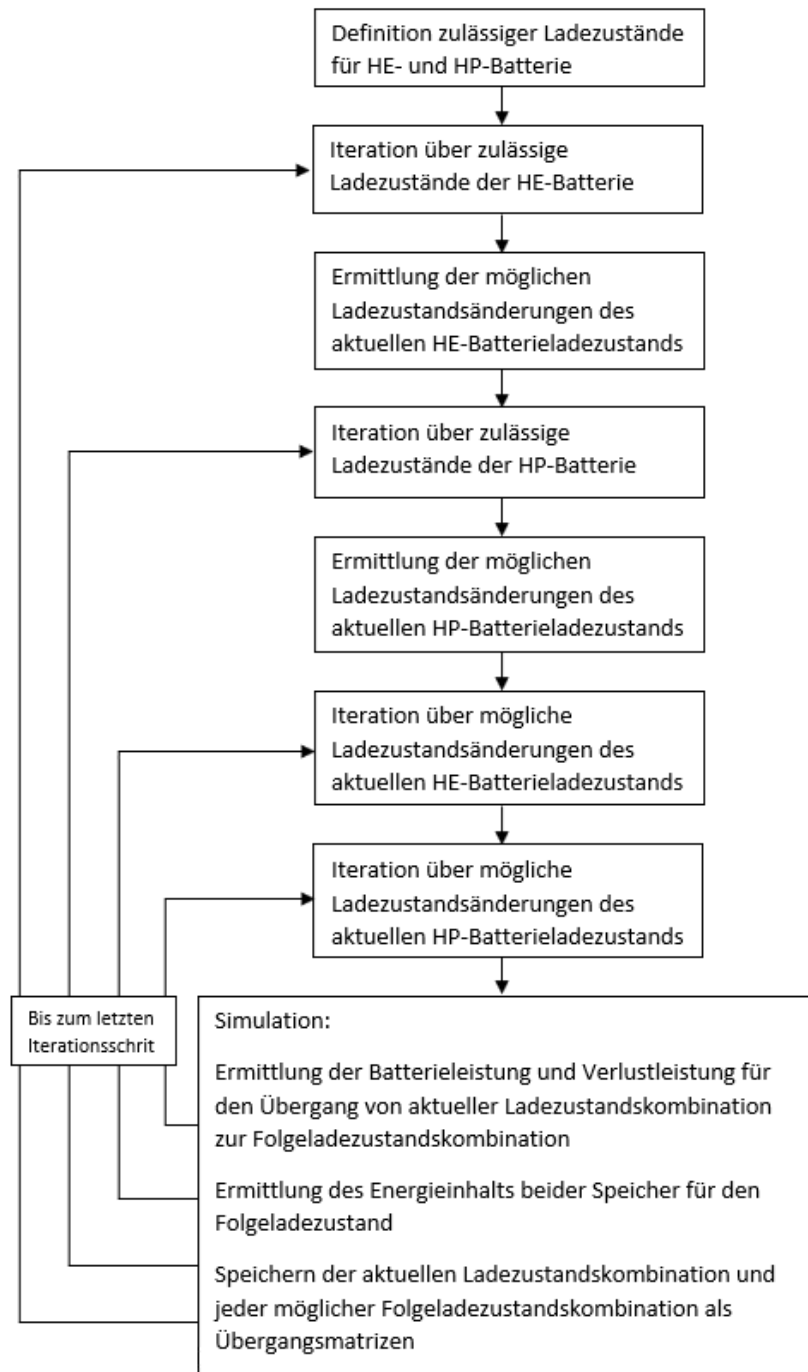


Abbildung 9: Erstellung der Übergangsmatrizen

Die in Abbildung 9 zu sehende Iterationsschleifen werden von innen nach außen durchlaufen, sodass für jede mögliche Kombination von Ausgangsladezuständen und Folgeladezuständen die Batterieleistung (entsprechend der Folgeladezustände als Lade-



/Entladeleistung), die Verlustleistung und der Energieinhalt ermittelt werden. Des Weiteren werden die Übergangsmatrizen für Hochleistungs- und Hochenergiebatterie erstellt.

### Ermittlung des Fahrplans

Ziel der Dynamischen Programmierung ist die Ermittlung des kostengünstigsten Fahrplans (entsprechend der Zielfunktion) für die Ladezustände der Batterien im betrachteten Zeitraum.

Abbildung 10 zeigt, wie anhand der Übergangskosten die optimalen Zustandsübergänge ermittelt werden.

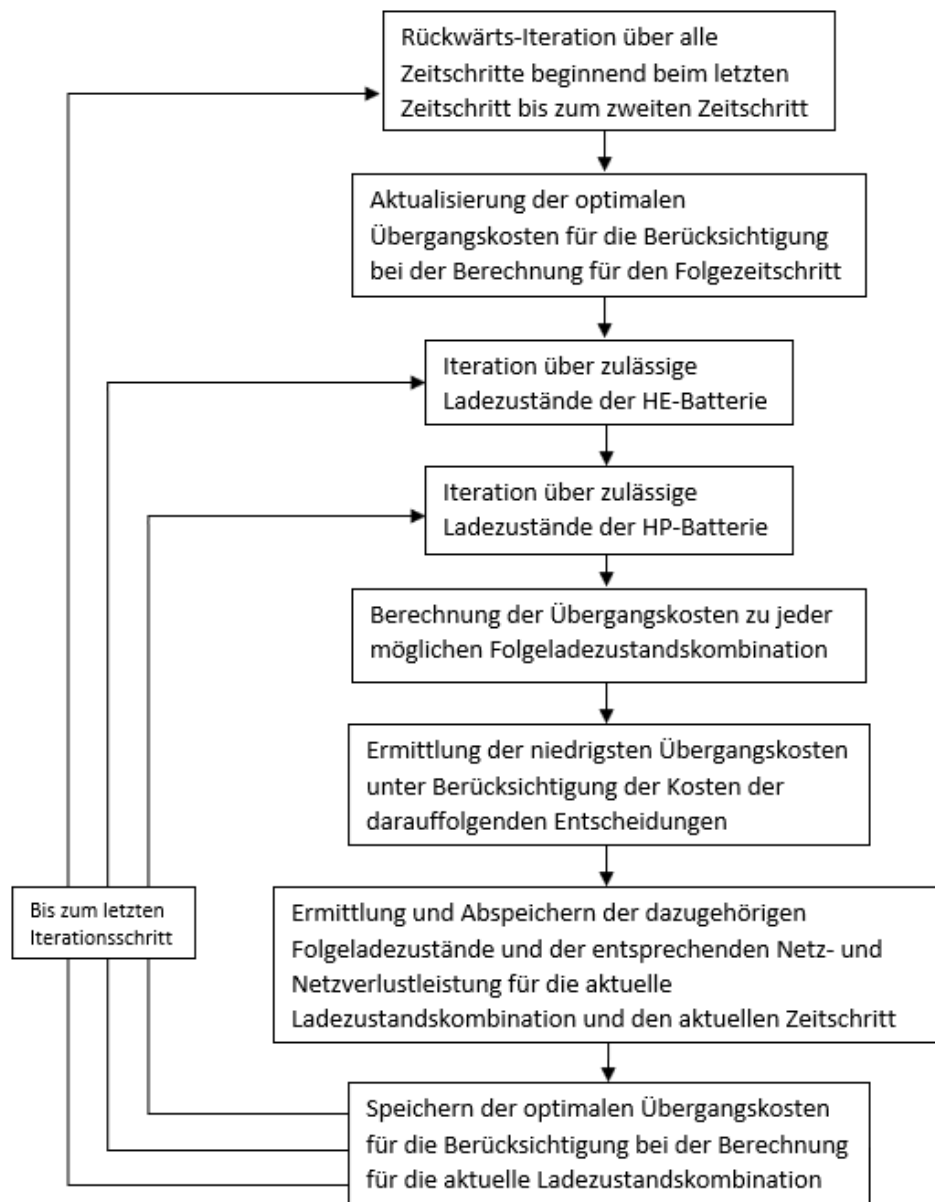


Abbildung 10: Fahrplanerstellung nach

Anschließend werden für den Ausgangsladezustand des ersten Zeitschritts die optimalen Übergangskosten unter Berücksichtigung der Kosten der darauffolgenden Entscheidungen berechnet und entsprechend die Folgeladezustände sowie Netz- und Netzverlustleistung bestimmt. Die Ausgangsladezustände können zu Beginn individuell festgelegt werden, sodass eine flexible Vorgabe möglich ist und jede Startsituation simuliert werden kann.

Abbildung 11 beschreibt die im letzten Schritt stattfindende Rekonstruktion der Trajektorie.

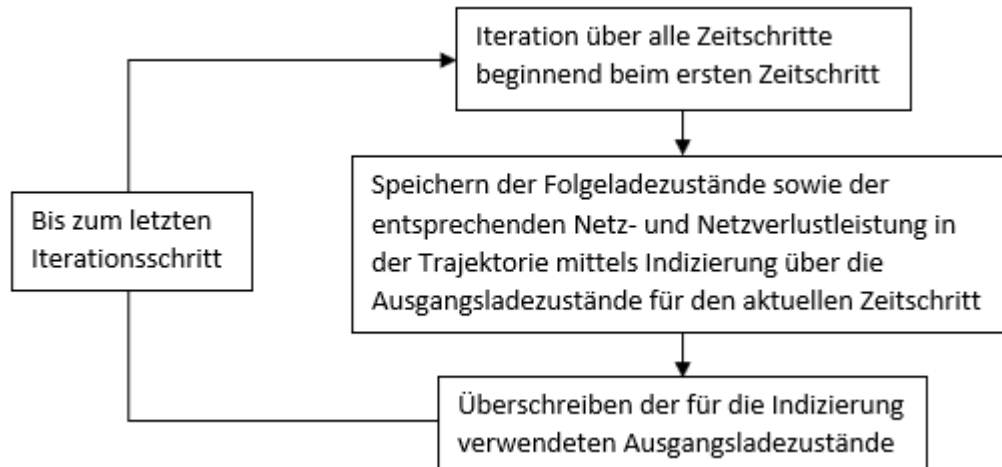


Abbildung 11: Rekonstruktion der Trajektorie nach

Durch Vorgabe der Ausgangsladezustände können je Zeitschritt die optimalen Folgeladezustände gespeichert werden und mittels kontinuierlichen Überschreibens der Ausgangswerte die Indizierung für den nächsten Zeitschritt vorbereitet werden.

### Zielfunktion

Die Zielfunktion dient der für die Fahrplanerstellung erforderlichen Berechnung der Übergangskosten  $C_{\dot{U}}$ . Hierfür sind die Berechnungsparameter frei wählbar und untereinander gewichtbar, sodass hier die Implementierung von Betriebsführungszielen möglich ist. Als Parameter wurden die Strombezugskosten  $C_{SB}$  und die Einspeisevergütung  $C_{EV}$  zur Implementierung der Eigenverbrauchsoptimierung sowie die Leistungsminimierung  $A$  (Alpha) zur Implementierung der Vermeidung der Abregelung der PV-Anlage und des Last-Peak-Shavings gewählt. Weitere Parameter sind die Verlustminimierung  $B$  (Beta) zur Implementierung der Minimierung der Umwandlungsverluste und die Minimierung des Energiedefizits  $\Gamma$  (Gamma) zur Implementierung der Vorhaltung von Kapazität für die unterbrechungsfreie Stromversorgung. Für die Berechnung wird die Netzleistung  $P_N$ , die Verlustleistung  $P_V$ , der Faktor für die Strombezugskosten  $k_{SB}$  und der Faktor für die Einspeisevergütung  $k_E$ . Weiterhin werden die tatsächliche Energie  $E_{ist}$  und die geforderte Energie  $E_{soll}$  für das Energiedefizit  $E_{Defizit}$  benötigt.

$$E_{Defizit} = E_{soll} - E_{ist} \quad (1.1)$$

$$C_{\dot{U}} = C_{SB} + C_{EV} + A + B + \Gamma \quad (1.2)$$

$$C_{\dot{U}} = k_{SB} \cdot P_N(P_N > 0) + k_{EV} \cdot P_N(P_N < 0) + \alpha \cdot P_N^2 + \beta \cdot P_V + \gamma \cdot E_{Defizit} \quad (1.3)$$

Die Parameter  $A$ ,  $B$  und  $\Gamma$  werden entsprechend den Betriebsführungszielen gewichtet. Die Leistungsminimierung soll bei 50 kW Last so viel Wert sein wie der Strombezug bei selber Last. Die Verlustminimierung soll bei fünf kW 10-mal so viel Wert sein wie die Leistungsminimierung bei 50 kW und das Energiedefizit soll bei 12,5 kWh Defizit ebenfalls 10-mal so viel Wert sein wie die Leistungsminimierung bei 50 kW Last.

### 3.2 Zeitreihenanalyse

Für qualitativ hochwertige Ergebnisse ist für die Betrachtung eines Jahres eine Jahressimulation erforderlich. Allerdings ist das Ziel dieser Arbeit möglichst viele verschiedene Auslegungen eines Batteriespeichersystems zu untersuchen. Dementsprechend würde eine Jahressimulation für jede Auslegung einen enormen Rechenaufwand bedeuten. Daher ist es das Ziel durch Reduktion der Jahressimulationen auf einige typische Wochen den Rechenaufwand deutlich zu reduzieren. Hierfür ist im ersten Schritt eine Analyse der gegebenen Zeitreihen erforderlich, um anschließend repräsentative Tage und Wochen zu ermitteln.

#### Zeitreihe der Lastleistung

In Abbildung 12 ist der tägliche Energiebedarf des Betriebs für das Jahr 2017 zu sehen.

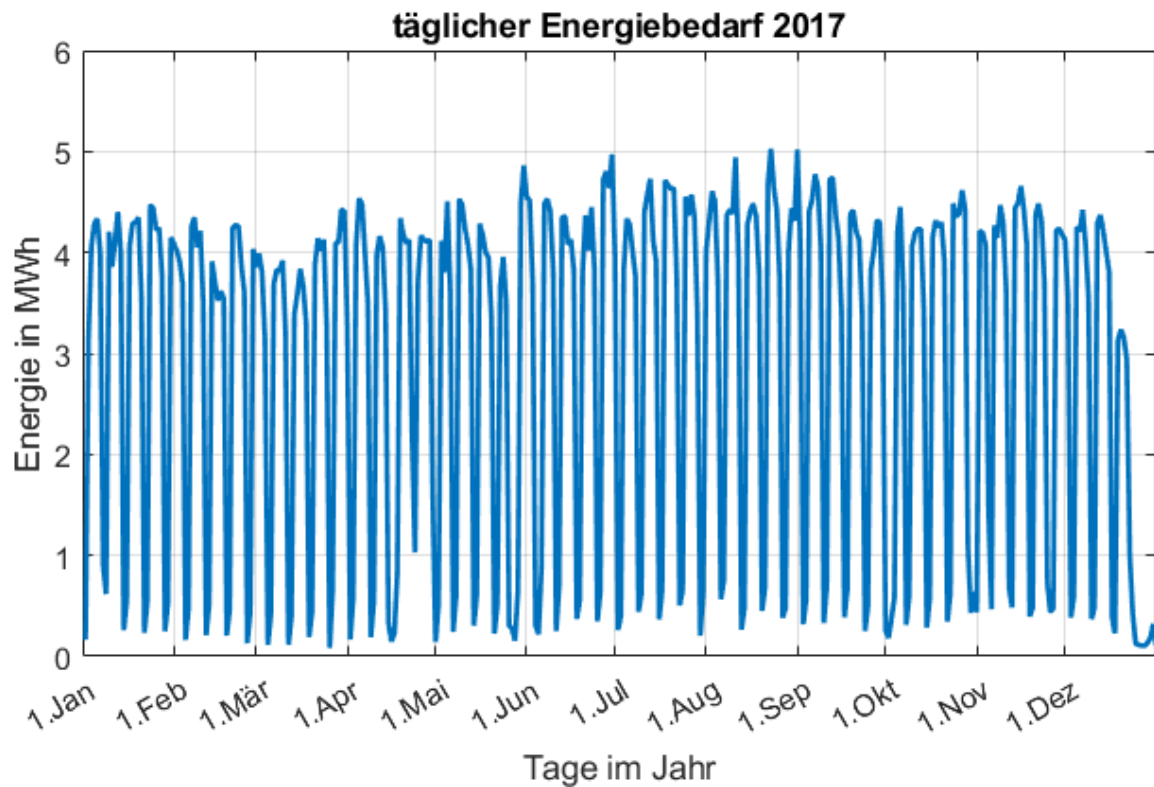


Abbildung 12: täglicher Energiebedarf des Betriebes 2017

Der Maximalwert des Energiebedarfs beträgt ca. fünf MWh und der Minimalwert ca. 200 kWh. Die Bedarfsspitzen schwanken weitestgehend zwischen 3,6 MWh und fünf MWh. Die Bedarfssenken schwanken größtenteils zwischen einer 500 kWh und 200 kWh. Hiervon weichen lediglich die letzten beiden Wochen des Jahres signifikant ab. Dies erklärt sich anhand des im Dezember stattfindenden Betriebsurlaubs. Des Weiteren ist eine deutliche wiederkehrende Schwankung des Energiebedarfs erkennbar. Da der Wechsel zwischen Maxima und Minima zwischen vier und fünf Mal pro Monat auftritt, handelt es sich hierbei voraussichtlich um eine wöchentliche Schwankung.

Diese wöchentliche Schwankung ist in Abbildung 13 dargestellt.

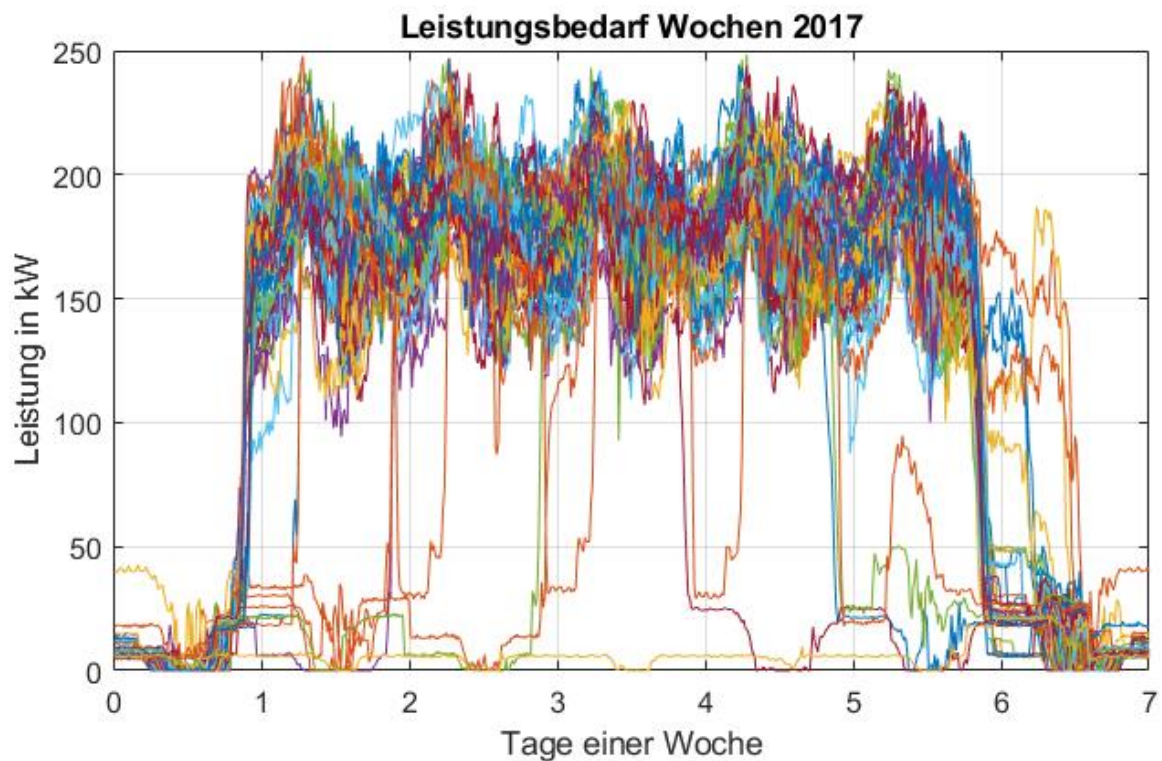


Abbildung 13: Leistungsbedarf des Betriebes 2017 in Wochenansicht

Da es sich um einen Betrieb handelt lässt sich aus den geringen Leistungsbedarfen der Tage eins und sieben schließen, dass es sich hierbei um Sonntag und Samstag handelt. Des Weiteren ist ersichtlich, dass es zwischen Montag und Freitag zu keiner signifikanten Abnahme des Leistungsbedarfs kommt. Dies erklärt sich anhand des Tag- und Nachtschicht Arbeitsschemas des Betriebs. Über das Jahr verteilt gibt es starke Unterschiede des täglichen Leistungsbedarfs. Dies ist besonders an den Arbeitstagen zu sehen, da der Leistungsbedarf hier zwischen 125 kW und 250 kW schwankt. Des Weiteren scheint es an Arbeitstagen stets eine Leistungsspitze zu geben, was mit einem möglichen Einschaltvorgang von zusätzlichen Maschinen im Tagbetrieb zusammenhängen könnte. An den arbeitsfreien Tagen fällt die Schwankung deutlich geringer aus, da die Absolutwerte der Leistung deutlich niedriger sind. Die an den Arbeitstagen auftretenden sehr geringen Leistungsbedarfe werden im Folgenden erläutert.

In Abbildung 14 werden der Median und die Perzentile untersucht.

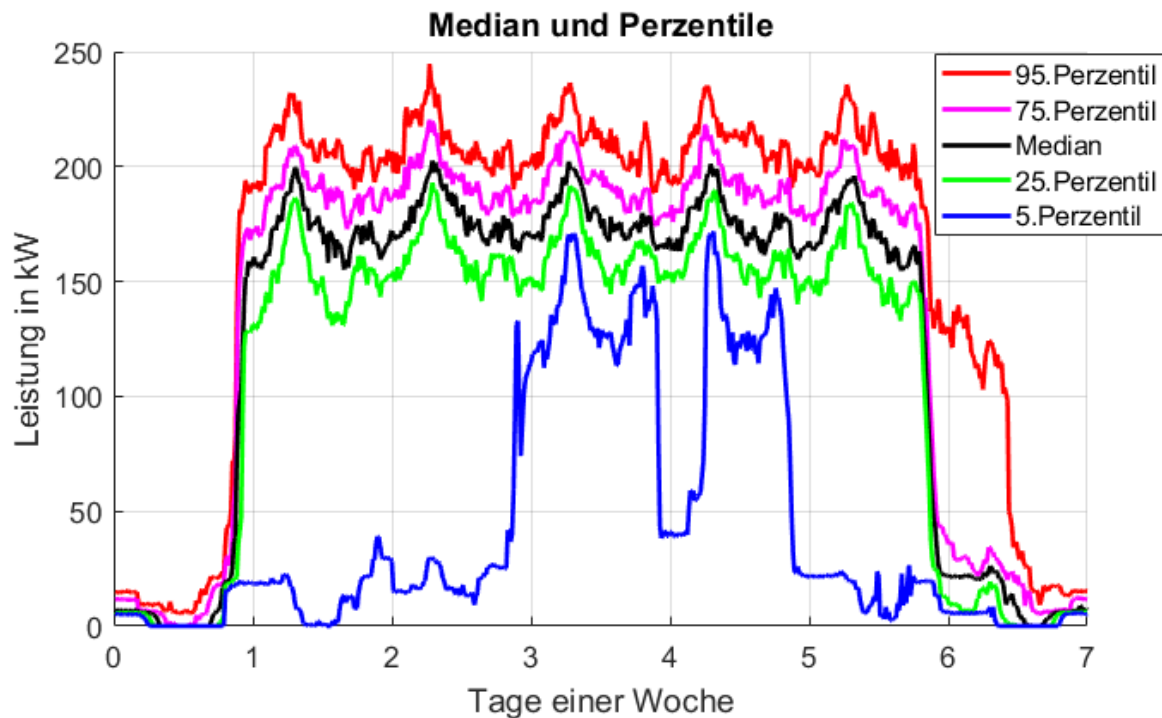


Abbildung 14: Median und Perzentile des Leistungsbedarf des Betriebes 2017

Der Median ist der Wert in der Mitte einer der Größe nach geordneten Datenreihe und ist somit im Gegensatz zum Mittelwert unempfindlich gegenüber Extremwerten. [34] Das Perzentil ist der Prozentsatz der Werte einer Datenreihe, der kleiner gleich einem bestimmten Wert ist. [35] Dies bedeutet, dass beim 5. Perzentil die fünf Prozent der kleinsten Werte der Datenreihe abgebildet werden. Umgekehrt sind also 95 Prozent der Werte der Datenreihe größer. Somit ist anhand von Abbildung 3 ersichtlich, dass die niedrigen Leistungswerte aus Abbildung 2 nur eine geringe Häufigkeit aufweisen und daher Extrema sind. 2017 gab es in Sachsen 10 Feiertage, welche überwiegend an Montagen und Dienstagen (Tage zwei und drei [1 bis 3 in Abb. 3]) waren. [36] Dies erklärt, warum die Tage zwei und drei (Montag und Dienstag) sowie Tag sechs (Freitag) im 5. Perzentil einen deutlich niedrigeren Leistungsbedarf als die Tage vier und fünf (Mittwoch und Donnerstag) aufweisen. In Kombination mit Feiertagen werden die Tage am Anfang und Ende der Woche häufig auch als Brückentage genutzt, um bspw. bei einem Feiertag am Dienstag durch Urlaub am Montag vier freie Tage zu erhalten. Der niedrige Leistungsbedarf des 5. Perzentils an Freitagen erklärt sich wahrscheinlich damit, dass auch Freitage gern als Brückentag für ein „verlängertes Wochenende“ genutzt werden, anstehende Reinigungen oder Wartungen häufig auf Freitage gelegt werden und bei einer geringeren Auftragslage am ehesten an Freitagen der Arbeitstag früher beendet wird. Des Weiteren ist ersichtlich, dass es sich bei den höheren Werten zwischen Tag sechs und sieben ebenfalls nur um Extrema handelt, da

diese bis einschließlich zum 75. Perzentil nicht auftreten und somit maximal 25 Prozent aller Werte im Bereich dieser Extrema liegen können.

In Abbildung 15 ist der Median und die Perzentile des Tagesverlauf des Leistungsbedarfs der Tage Montag, Dienstag, Mittwoch und Donnerstag zu sehen. Freitage werden separat betrachtet, da ihr Tagesverlauf des Leistungsbedarfs signifikant von den restlichen Werktagen abweicht.

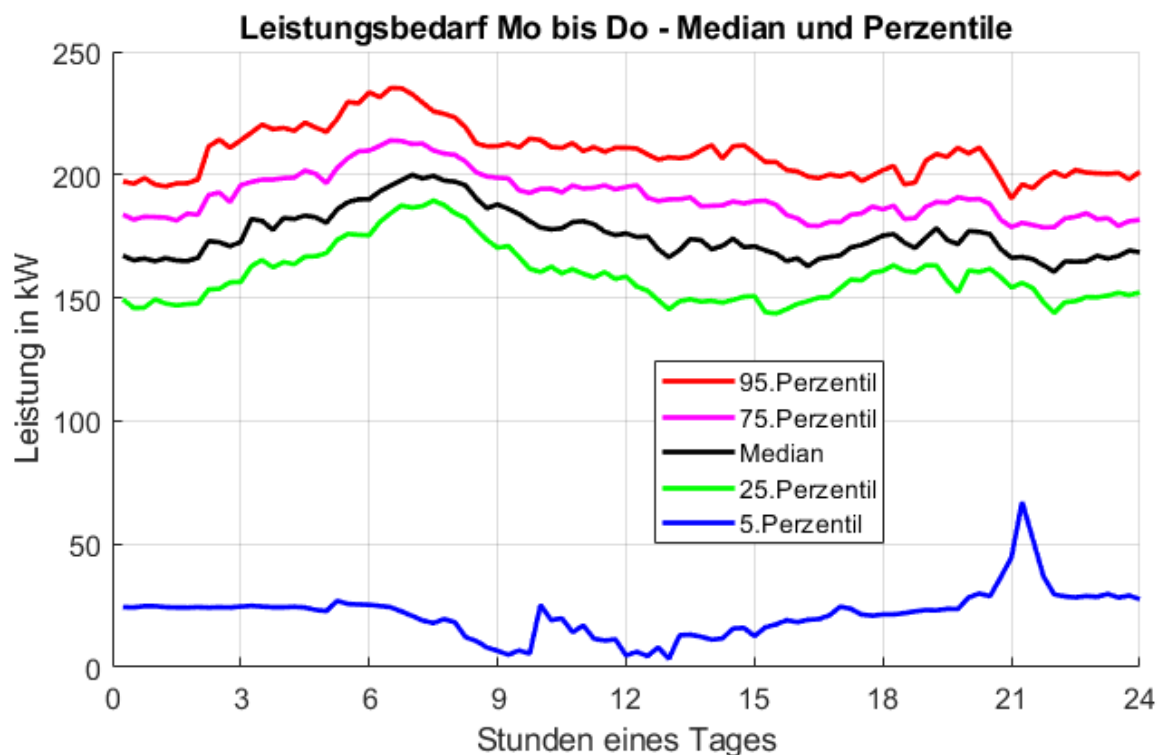


Abbildung 15: Median und Perzentile des Leistungsbedarfs für Montag bis Donnerstag

Die vier genannten Tage wurden zu einem Tag zusammengefasst, da sich die Graphen, wie in Abbildung 3 zu sehen, für diese Tage sehr ähneln. Der Freitag wurde nicht mit betrachtet, da es, wie in Abbildung 3 zu sehen, in den Abendstunden eine deutliche Abweichung des Lastverlaufs im Vergleich zu den vorigen Tagen gibt. Lediglich das 5. Perzentil weist eine nennenswerte Abweichung aufgrund der bereits besprochenen Verteilung der Feiertage über das Jahr und wird daher nicht betrachtet. Der Median des Tagesleistungsbedarfs schwankt zwischen 170 und 200 kW und es ist deutlich zu erkennen, dass die bereits angesprochene tägliche Leistungsspitze gegen sieben Uhr auftritt.

In Abbildung 16 ist der Median und die Perzentile des Leistungsbedarfs an Freitagen zu sehen.



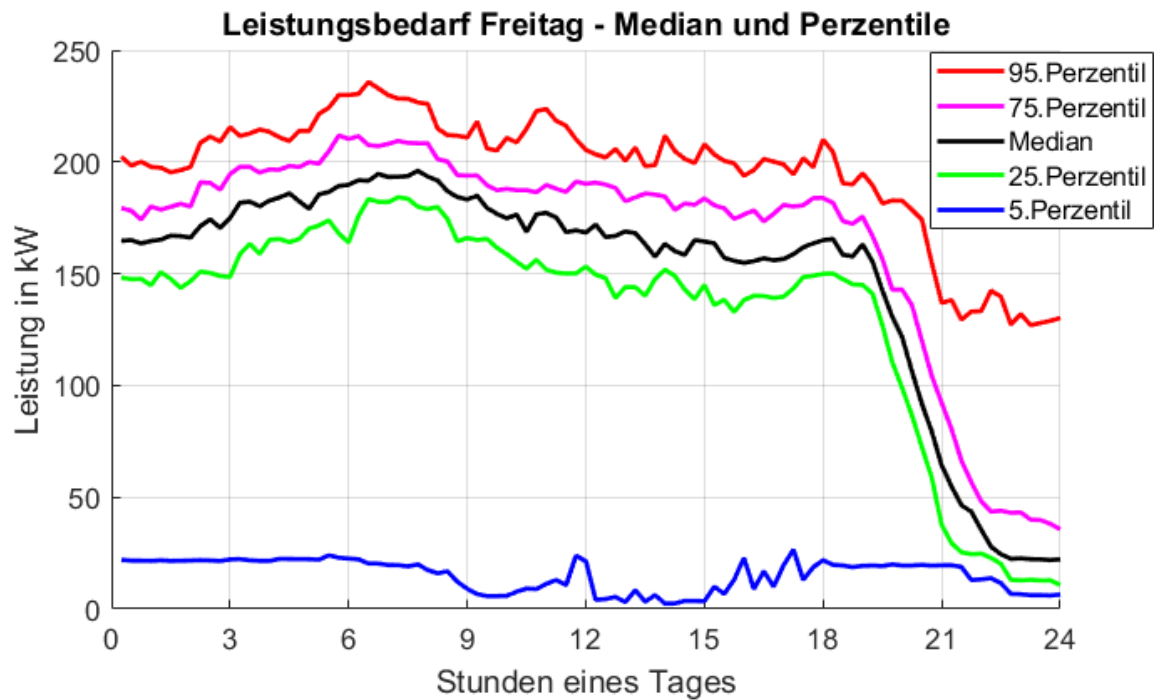


Abbildung 16: Median und Perzentile der Leistungsbedarfs an Freitagen

Der Median schwankt ähnlich zu den vorigen Tagen zwischen 160 und 195 kW. Anhand des negativen Anstiegs zwischen 19 und 22 Uhr ist zu sehen, dass es im Regelfall keine Nachtschicht von Freitag auf Samstag gibt. Ab ungefähr 23 Uhr stellt sich ein Leistungsbedarf von 25 kW ein. Des Weiteren ist anhand des 95. Perzentils ersichtlich, dass anscheinend an Freitagen eine zusätzliche Nachtschicht bei erhöhter Auftragslage oder Verzug im Herstellungsprozess durchgeführt wird.

Abbildung 17 zeigt den Median und die Perzentile des Leistungsbedarfs an Samstagen.

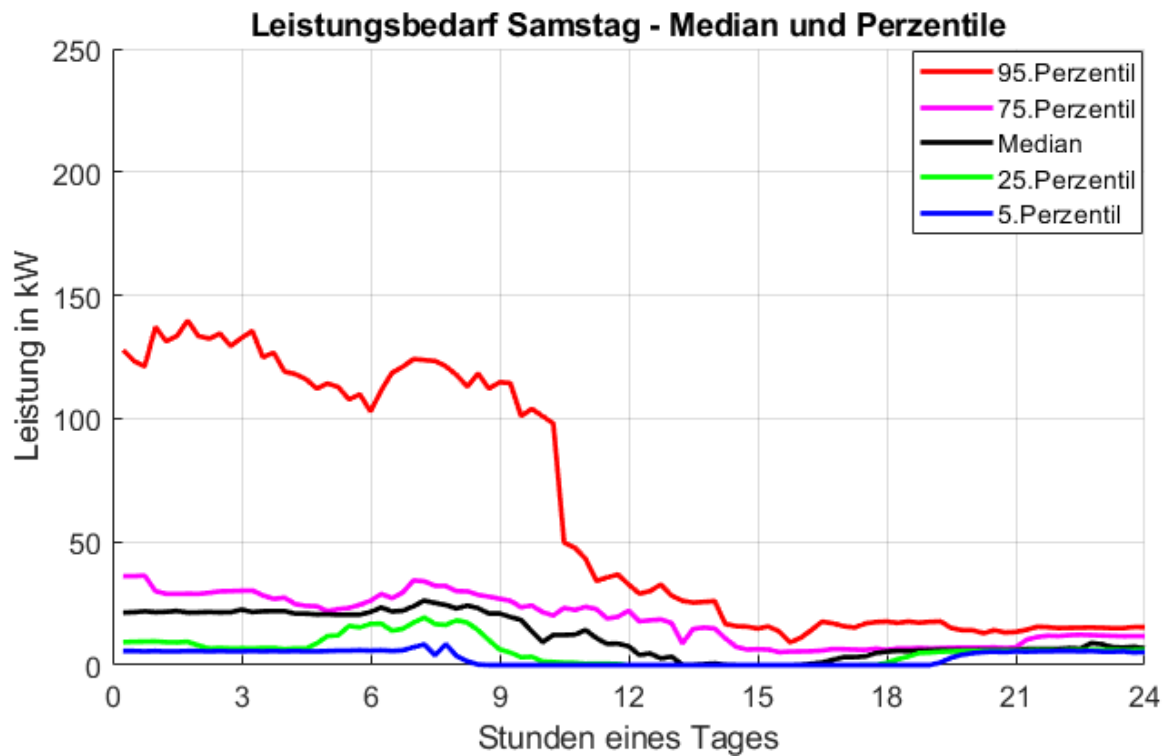


Abbildung 17: Median und Perzentile des Leistungsbedarfs an Samstagen

Anhand des 95. Perzentils ist weiterhin die mögliche Nachtschicht von Freitag auf Samstag zu sehen. Der Median befindet sich zunächst weiterhin bei 25 kW, bevor er zwischen 13 und 16 Uhr auf null fällt und ab 18 Uhr bei ca. 10 kW verbleibt. Dieser niedrige Leistungsbedarf dient wahrscheinlich der Versorgung einer Heizungsanlage, welche tagsüber über die PV-Anlage versorgt wird.

Abbildung 18 zeigt den Median und die Perzentile des Leistungsbedarfs an Sonntagen.

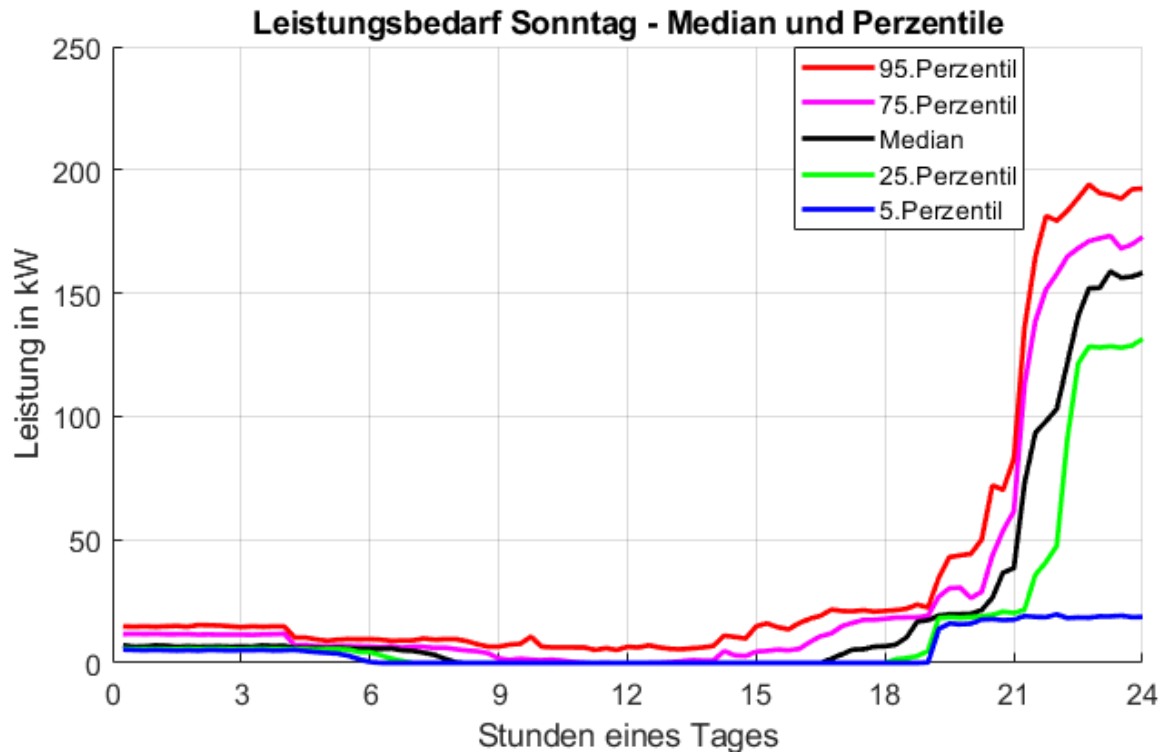


Abbildung 18: Median und Perzentile des Leistungsbedarfs an Sonntagen

Der Median des Leistungsbedarf entspricht zunächst dem abendlichen Verlauf am Samstag, bevor er zwischen acht und 17 Uhr erneut null beträgt. Ab ca. 17 Uhr steigt der Leistungsbedarf kontinuierlich an, bevor es einen sehr starken Anstieg zwischen 21 und 22 Uhr gibt, da hier die Nachtschicht von Sonntag auf Montag beginnt.

Im Folgenden wird untersucht, ob und inwieweit sich der Energiebedarf über die Jahre verändert hat, um Tendenzen für zukünftige Jahre ableiten zu können.

In Abbildung 19 sind die wöchentlichen Energiebedarfe der Jahre 2014, 2016, 2017 und 2018 vergleichend dargestellt.

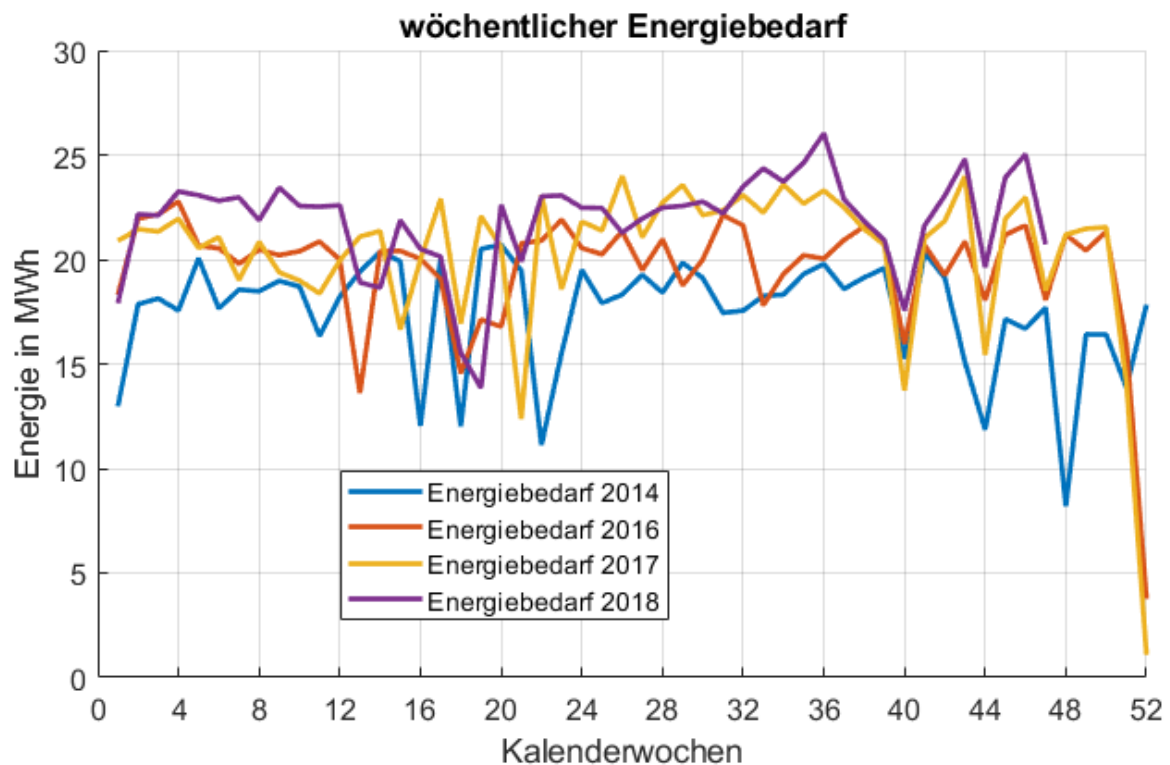


Abbildung 19: Vergleich des wöchentlichen Energiebedarfs des Betriebes 2014, 2016, 2017 und 2018

Zunächst ist anzumerken, dass der Graph von 2018 lediglich 11 Monate enthält, da für Dezember keine Messwerte vorliegen. Mittels des Vergleichs der Kalenderwochen der verschiedenen Jahre ist zu sehen, dass sich die Verläufe des Energiebedarfs der einzelnen Jahre stark ähneln. Beispielsweise ist der Verlauf im Bereich der Wochen Null bis 12 und 24 bis 38 recht eben, wohingegen es in den Wochen 13 bis 23 und 40 bis 52 sehr starke Schwankungen gibt. Besonders deutlich wird der ähnliche Verlauf in Kalenderwoche 40, da es hier in allen Jahren zu einer deutlichen Reduktion des Energiebedarfs im Vergleich zur Vor- und Folgewoche kommt. Des Weiteren ist der seit 2016 erfolgende Betriebsurlaub in Woche 52 gut erkennbar. Ebenfalls kann man erahnen, dass der Energiebedarf von Jahr zu Jahr gestiegen ist.

In Abbildung 20 ist der Energiebedarf der Wochen der genannten Jahre in chronologischer Reihenfolge zu sehen.

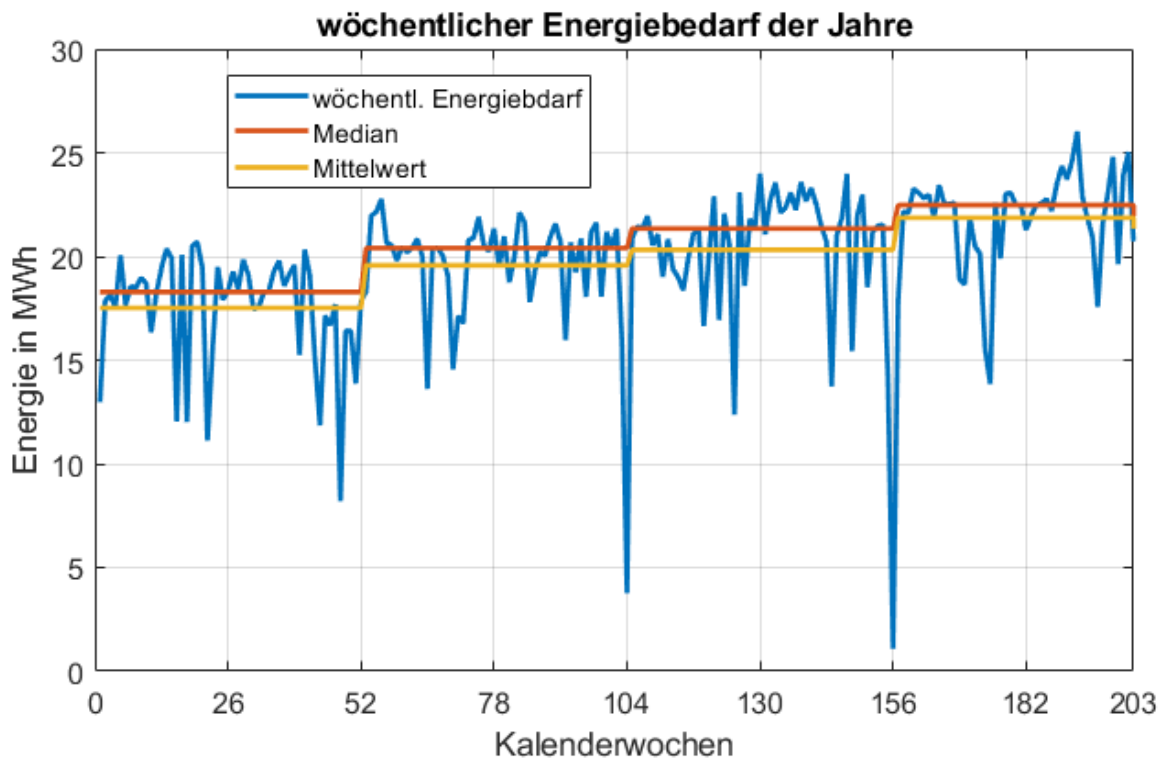


Abbildung 20: wöchentlicher Energiebedarf des Betriebes der Jahre 2014, 2016, 2017 und 2018

Neben dem Energiebedarf der Wochen ist ebenfalls der Median des Energiebedarfs der Wochen des jeweiligen Jahres zu sehen. Anhand diesem und den zum Jahreswechsel (Wochen 52, 104, und 156) auftretenden Sprüngen des Medians kann geschlussfolgert werden, dass der durchschnittliche wöchentliche Energiebedarf des Unternehmens pro Jahr um ein bis zwei Megawattstunden zunimmt. Der größere Sprung in Woche 52 ist auf den Jahreswechsel von 2014 auf 2016 zurückzuführen, da für 2015 keine Lastzeitreihe vorliegt. Dieser Sprung entspricht ungefähr dem doppelten der jährlichen Energiebedarfserhöhung und bestätigt somit die obige Aussage. Die Steigerung des Energiebedarfs ist wahrscheinlich mit einer kontinuierlichen Verbesserung der Auftragslage und damit einhergehender Beschaffung von zusätzlichen Produktionsmaschinen zu erklären.

Somit können, wie in den zwei vorangegangenen Abbildungen zu sehen, unter Berücksichtigung des steigenden Energiebedarfs von Jahr zu Jahr, Lastzeitreihen vergangener Jahre gut zur Abbildung des Energiebedarfs kommender Jahre verwendet werden.

## Zeitreihe der Photovoltaik-Leistung

Für die Analyse der PV-Zeitreihe wurden zunächst die meteorologischen Jahreszeiten ermittelt. Diese sind der Frühling vom 01.03 bis 31.05, der Sommer vom 01.06 bis 31.08, der Herbst vom 01.09 bis 30.11 und der Winter vom 01.12 bis 28.02. [37]

In Abbildung 21 ist der tägliche PV-Ertrag einer PV-Anlage im Jahr 2017 zu sehen.

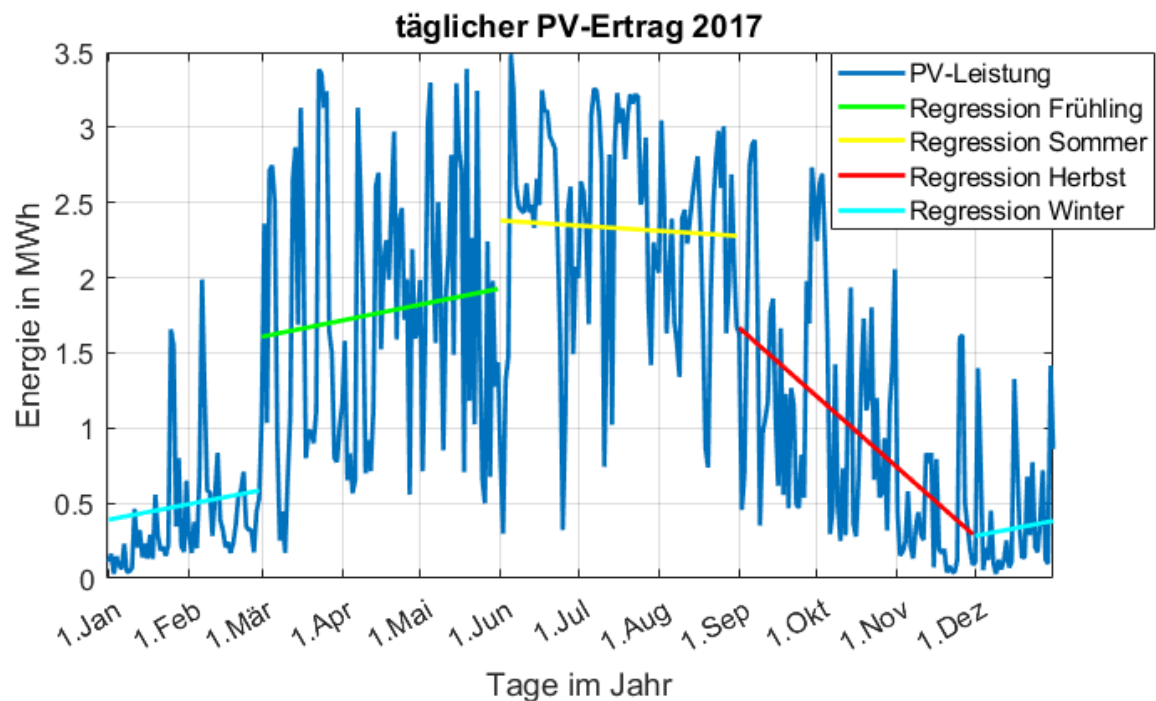


Abbildung 21: täglicher PV-Ertrag 2017

Anhand der obigen Abbildung sind die täglichen sowie saisonalen Schwankungen des PV-Ertrags deutlich erkennbar. Im Sommer wird ein maximaler täglicher PV-Ertrag von 3,5 MWh erreicht wohingegen im Winter nur maximal zwei MWh erreicht werden. Allerdings ist die Abweichung zwischen den minimalen Erträgen mit 0,3 MWh im Sommer und nahezu null MWh im Winter deutlich niedriger. Somit ist ersichtlich, dass die Schwankungen mit steigenden Absolutwerten ebenso steigen. Des Weiteren ist eine Saisonalität den meteorologischen Jahreszeiten entsprechend erkennbar. Zur Verdeutlichung dessen wurde für jede Jahreszeit eine lineare Regressionsgerade erstellt. Im Sommer (Gelb; Juni, Juli, August) schwanken die täglichen PV-Erträge um einen annähernd konstanten Mittelwert, wohingegen im Herbst (Rot; September, Oktober, November) eine stark sinkende Tendenz erkennbar ist. Im Winter (Cyan; Dezember, Januar, Februar) würde man einen zum Sommer gespiegelten Verlauf erwarten. Dies wird auch annähernd erfüllt, nur dass die steigende Tendenz stärker als im Sommer ist. Im

Frühling (Grün; März, April, Mai) würde man ebenso einen ähnlichen, allerdings an der Vertikalen gespiegelten, Verlauf wie im Herbst erwarten. Die Abweichung hiervon lässt sich damit erklären, dass es in diesem Jahr zum Jahreszeitenwechsel von Winter auf Frühling zufällig auch einen sehr starken Sprung des durchschnittlichen PV-Ertrags gab. Dieser ist für den Rest des Frühlings recht konstant geblieben, sodass der Anstieg sehr flach ist. Ungeachtet dessen entsprechend diese beiden Verläufe in etwa den Erwartungen. Neben den saisonalen Schwankungen gibt es auch starke Schwankungen des PV-Ertrags innerhalb weniger Tage. Ein Beispiel hierfür ist der Sprung vom ersten Juni zu den folgenden Tagen, wo der tägliche PV-Ertrag von lediglich 0,3 MWh auf 3,5 MWh springt. Allerdings gibt es diese starken Schwankungen nicht nur im Sommer. Kurz nach dem ersten Februar steigt der PV-Ertrag bspw. von 0,2 MWh auf zwei MWh. Somit ist zu sehen, dass die Energiebereitstellung durch Photovoltaik-Anlagen großen saisonalen und täglichen Schwankungen unterliegt.

In Abbildung 22 ist der Median und die Perzentile der täglichen PV-Leistung im Frühling dargestellt.

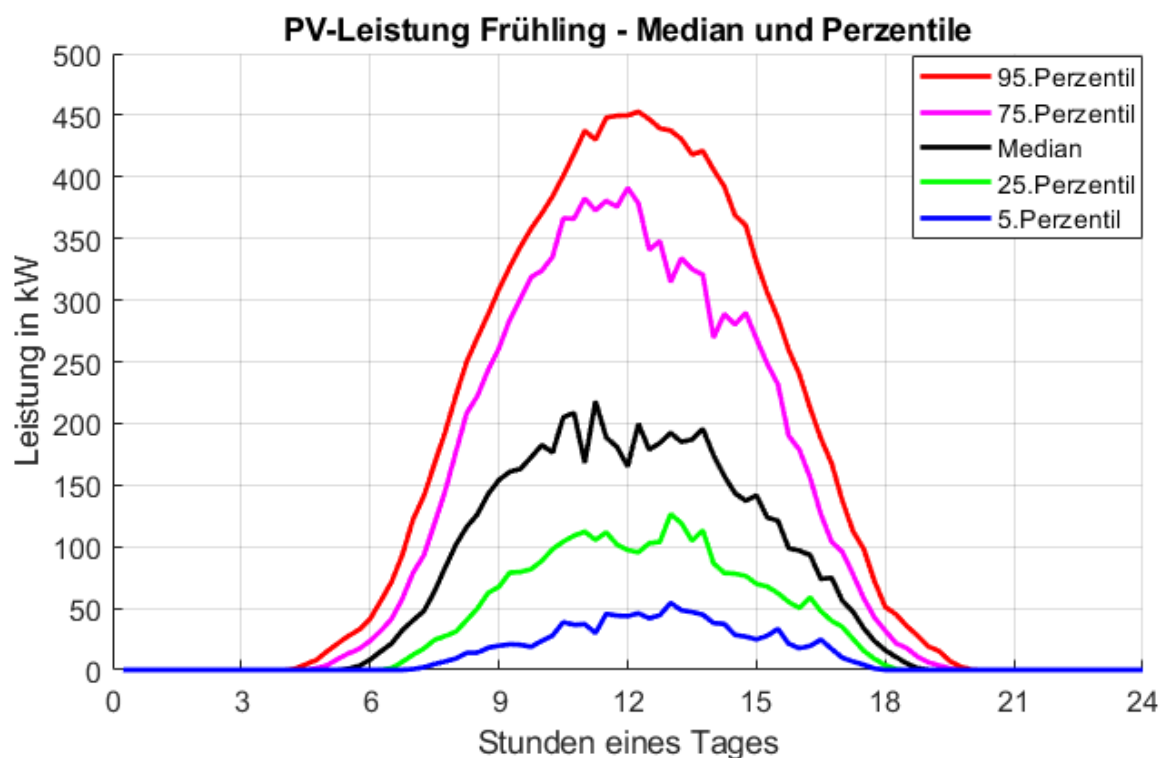


Abbildung 22: Median und Perzentile der PV-Leistung im Frühling

Die durch die Perzentile zu sehenden Abweichungen vom Median sind im positiven sowie negativen Bereich sehr ähnlich. Die Angabe von Leistungswerten erfolgt allgemein für den

Zeitraum von 9 bis 15 Uhr. Der Median liegt zwischen 140 und 220 kW. Das 5. Perzentil liegt bei ca. 25 bis 50 kW und das 95. Perzentil bei 300 bis 450 kW. Ebenso weisen das 25. Perzentil, bei 65 bis 125 kW, und das 75. Perzentil, bei 250 bis 390 kW, große Abweichungen vom Median auf, sodass mindestens 50 Prozent der Messwerte eine große Abweichung zum Median aufweisen. Durch diese Symmetrie der Perzentile zeigt sich, dass die PV-Leistung im Frühling sehr starken täglichen Schwankungen unterliegt. Abbildung 23 zeigt den Median und die Perzentile der täglichen PV-Leistung im Sommer.

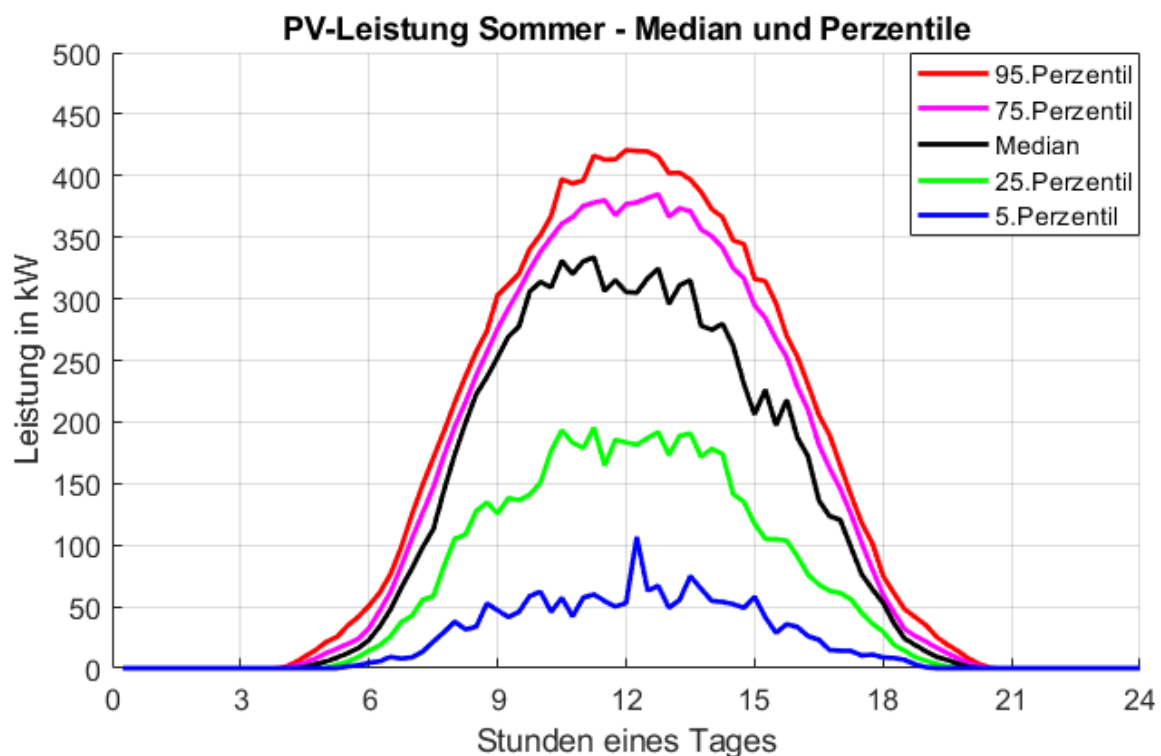


Abbildung 23: Median und Perzentile der PV-Leistung im Sommer

Im Gegensatz zum Frühling weist die PV-Leistung im Sommer einen deutlichen Unterschied zwischen positiven und negativen Abweichungen auf. Der Median liegt bei ca. 210 bis 330 kW und ist somit höher als im Frühling. Das 95. Perzentil befindet sich bei ca. 300 bis 425 kW und das 75. Perzentil liegt bei ungefähr 275 bis 375 kW. Das 25. Perzentil befindet sich bei ungefähr 120 bis 195 kW und das 5. Perzentil bei ca. 40 bis 110 kW. Die negativen Abweichungen sind deutlich größer als die positiven Abweichungen, sodass eine deutliche Asymmetrie vorliegt. Des Weiteren ist ersichtlich, dass die oberen 50 Prozent aller Messwerte nah beieinander liegen, sodass diese weniger stark als Abweichungen wahrgenommen werden. Somit sind die täglichen Schwankungen niedriger als im Frühling.



Abbildung 24 zeigt den Median und die Perzentile der täglichen PV-Leistung im Herbst.

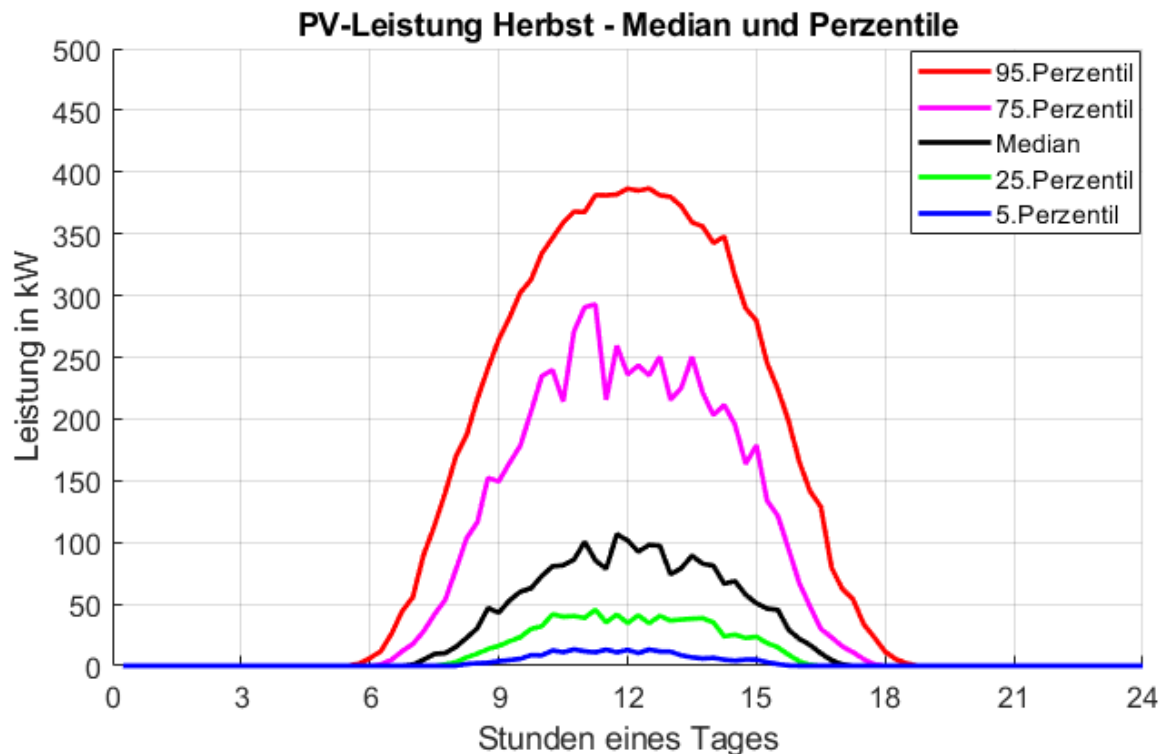


Abbildung 24: Median und Perzentile der PV-Leistung im Herbst

Bereits auf den ersten Blick ist erkennbar, dass die positiven Abweichungen deutlich größer als die negativen Abweichungen sind. Der Median liegt bei ca. 45 bis 105 kW und ist somit deutlich niedriger als im Sommer. Das 5. Perzentil befindet sich unterhalb von 20 kW und das 25. Perzentil liegt bei ungefähr 20 bis 45 kW. Das 75. Perzentil befindet sich bei ca. 150 bis 290 kW und das 95. Perzentil bei ungefähr 260 bis 380 kW. Somit sind die positiven Abweichungen deutlich größer als die negativen Abweichungen, sodass eine deutliche Asymmetrie vorliegt. Des Weiteren ist ersichtlich, dass sich die unteren 50 Prozent aller Messwerte nah beieinander befinden, sodass diese weniger stark als Abweichungen wahrgenommen werden. Somit sind die täglichen Schwankungen ähnlich, allerdings umgekehrt zum Sommer.

In Abbildung 25 ist der Median und die Perzentile der täglichen PV-Leistung im Winter dargestellt.

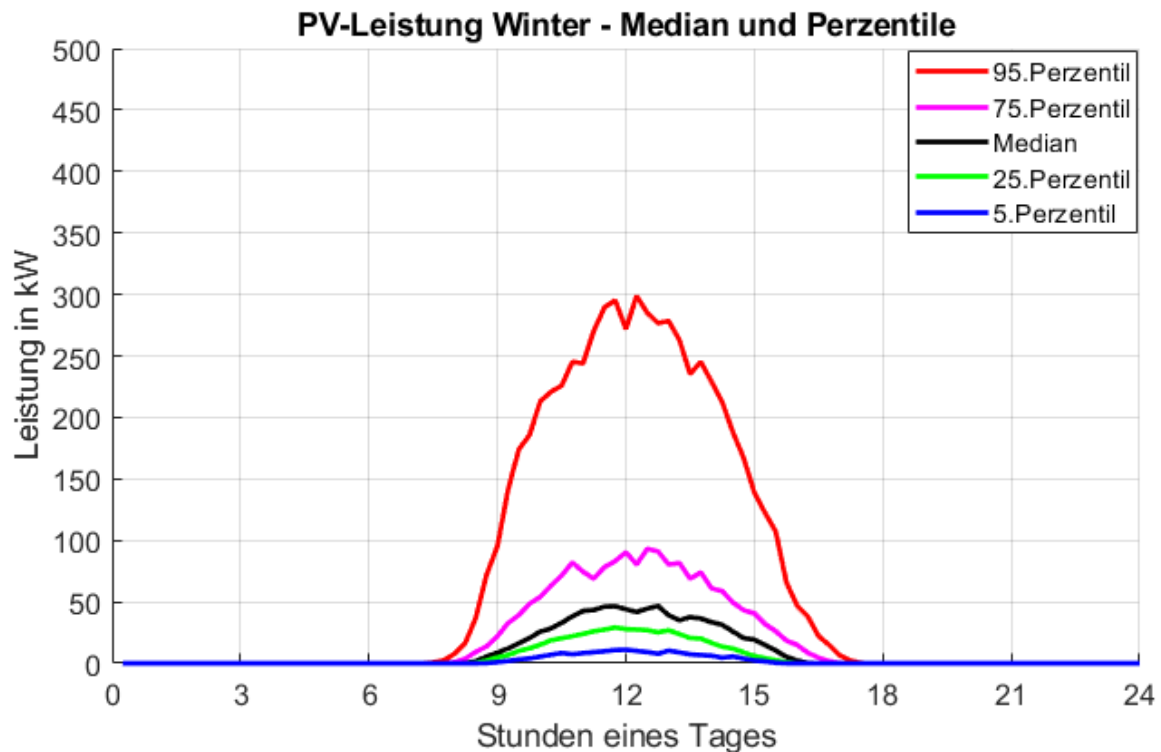


Abbildung 25: Median und Perzentile der PV-Leistung im Winter

Es ist ein ähnliches Schema wie im Herbst zu erkennen, allerdings sind die Absolutwerte der PV-Leistung niedriger und der Unterschied zwischen positiven und negativen Abweichungen größer. Der Median befindet sich bei ca. 10 bis 50 kW, das 25. Perzentil unterhalb von 30 kW und das 5. Perzentil liegt unterhalb von 15 kW. Im Gegensatz dazu liegen das 75. Perzentil, mit ungefähr 25 bis 90 kW, und das 95. Perzentil, mit ca. 100 bis 300 kW deutlich höher. Somit sind die positiven Abweichungen deutlich größer als die negativen Abweichungen, sodass eine deutliche Asymmetrie vorliegt. Des Weiteren ist ersichtlich, dass die unteren 50 bis 75 Prozent aller Messwerte nah beieinander liegen, sodass diese weniger stark als Abweichungen wahrgenommen werden. Somit sind die täglichen Schwankungen ähnlich zum Herbst, besitzen allerdings eine extremere Ausprägung.

Aufgrund der Saisonalität der PV-Leistung ist es erforderlich, jede Jahreszeit gesondert zu betrachten, sodass je eine Woche für jede Jahreszeit benötigt wird. Allerdings gibt es je Jahreszeit nur ungefähr 13 Wochen, sodass die Auswahl einer dieser Wochen keine hohe Güte aufweisen würde. Aufgrund dessen erfolgt eine Konstruktion einer repräsentativen Woche für jede Jahreszeit. Hierfür werden aus den über 90 Tagen je Jahreszeit einige repräsentative Tage ausgewählt, aus denen die Wochen konstruiert werden. Somit können die saisonalen und täglichen Schwankungen gut in die Betrachtung miteinbezogen werden

und es wird eine ausreichend hohe Güte, aufgrund der erhöhten Auswahlmöglichkeiten erreicht. Des Weiteren werden die realen Verhältnisse widergespiegelt, in dem für jede Jahreszeit weiterhin eine reale Extremwoche ausgewählt wird

### 3.3 Auswahl repräsentativer Tage

Da Simulationen über die Dauer eines Jahres einen sehr hohen Rechen- sowie Zeitaufwand darstellen, wird im Folgenden versucht basierend auf der Zeitreihenanalyse repräsentative Wochen für die Last- und PV-Leistung zu ermitteln bzw. konstruieren. Diese sollen die Zeitreihen für den betrachteten Zeitraum möglichst gut repräsentieren, um trotz eines deutlich geringeren Zeitaufwandes qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erhalten

Für die Last soll eine Woche ermittelt werden, in der der Energiebedarf möglichst wenig vom Median des Energiebedarfs aller Woche abweicht und trotz dessen die realen Schwankungseigenschaften widergespiegelt werden. Hierfür werden zwei Kriterien definiert. Einerseits das Energiekriterium, bei dem der Energiebedarf der gesamten Woche möglichst nah am Median über die Energiebedarfe aller Wochen sein soll und andererseits das Leistungskriterium, bei dem die Summe der betragsmäßigen Schwankungen zwischen den Zeitschritten einer Woche möglichst nah am Median der Schwankungen über alle Wochen sein soll. Für die Abbildung der PV-Leistung soll eine repräsentative Woche aus sieben verschiedenen Tagen für jede Jahreszeit konstruiert werden. Der tägliche Energieertrag soll möglichst gering vom Median des täglichen Energieertrags der Jahreszeiten abweichen und es sollen die realen Schwankungseigenschaften der entsprechenden Jahreszeit widergespiegelt werden.

Hierfür wurden dieselben Kriterien wie für die Last angewandt, allerdings erfolgte keine wöchentliche, sondern eine tägliche Betrachtung für jede Jahreszeit.

Die Auswahl der besten Wochen und Tage erfolgt über die minimale Abweichung beider Bewertungskriterien von ihren jeweiligen Medianen, wobei beide Kriterien normiert wurden. Dementsprechend bedeutet ein Wert von eins jeweils eine exakte Übereinstimmung mit dem Median. Für die Last wird anhand dessen eine repräsentative Woche gefunden und für die PV-Leistung werden die Tage einer Jahreszeit entsprechend ihrer Güte, welche der Abweichung beider Bewertungskriterien von ihren jeweiligen Medianen entspricht, geordnet. Mit den besten 20 Tagen können je Jahreszeit jeweils 14 Wochen konstruiert. Als Einschränkungen gelten hierbei, dass die Tage innerhalb einer Woche entsprechend ihrer Nummer in der jeweiligen Jahreszeit (Tag X von 92 im Frühling) monoton steigend sein müssen und das bei der Konstruktion einer Woche keine zwischen zwei Tagen befindlichen Tage, welche zu den ausgewählten 20 Tagen gehören, ausgelassen werden dürfen.

Die Selektion der besten konstruierten Wochen erfolgt in mehreren Schritten anhand verschiedener Kriterien. Die erste Selektion erfolgt über das Verhältnis von Tagen mit über- und unterdurchschnittlichem PV-Ertrag, welches drei zu vier oder vier zu drei betragen muss, damit der Energieertrag der Woche annähernd dem Median der Jahreszeit entspricht. Im zweiten Teil der Selektion werden die Leistungsverläufe der Wochen anhand von zwei Kriterien untersucht, welche stets den Leistungsverlauf zu Sonnenstunden betrachten. Das erste Kriterium betrachtet, wie stark der tägliche Leistungsverlauf vom Median der Jahreszeit abweicht, um möglichst nah am Median des Energieertrags der Jahreszeit zu sein. Das zweite Kriterium betrachtet, wie stark die Schwankungen der durchschnittlichen Leistung zwischen den Tagen ist. Somit können Wochen mit häufigen und starken Schwankungen des täglichen Energieertrags herausgefiltert werden. Kann nach einer Bewertung der Wochen anhand dieser Kriterien keine Entscheidung für eine finale Woche getroffen werden, dann werden mit dem dritten Kriterium die Leistungsschwankungen innerhalb eines Tages betrachtet. Falls nach der Betrachtung dieser drei Kriterien keine Entscheidung getroffen werden kann, dann erfolgt ein visueller Vergleich der bis dahin ausgewählten Wochen. Hierfür werden unter Berücksichtigung der drei genannten Kriterien die Tage der Wochen verglichen und anschließend eine finale Woche ausgewählt.

Neben den konstruierten Wochen werden weiterhin Extremwochen aus den realen Wochen der PV-Zeitreihe ausgewählt. Diese werden über die maximale Abweichung vom Leistungs- und Energiekriterium bestimmt. Anschließend werden die ermittelten Extremwochen verglichen und es werden die Wochen ausgewählt, welche das System stark abweichend von den repräsentativen Wochen belasten. Dabei wurden Wochen mit sehr starken Leistungsschwankungen innerhalb und zwischen den Tagen sowie Wochen mit stark über- und unterdurchschnittlichen Energieertrag gewählt.

Anhand der ermittelten Wochen und einer durchgeführten Jahressimulation wurde versucht, die im Späteren beschriebenen Bewertungskriterien zu gewichten. Hierfür sollten die anhand der gewählten Wochen berechneten Bewertungskriterien mit einem Faktor versehen werden, damit die Summe aus diesen näherungsweise dem Ergebnis aus der Jahressimulation entspricht. Leider führte dieser Ansatz in der zur Verfügung stehenden Zeit zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen, sodass vollständige Jahressimulationen durchgeführt werden müssen.

## 4 Untersuchung des Systemverhaltens

### 4.1 Definition der Bewertungskriterien

Für die Untersuchung und den Vergleich der Simulationsergebnisse sind Bewertungskriterien erforderlich. Diese wurden von Dr.-Ing. Michael Böttiger von der Professur für Energiespeichersysteme des Instituts für Energietechnik an der Technischen Universität Dresden festgelegt und werden im Folgenden erläutert. Die Bewertungskriterien werden anhand der vorliegenden Zeitreihen der Last und PV sowie der vom System übergebenen Parameter berechnet. Diese Parameter sind die Lastleistung  $P_L$ , die PV-Leistung  $P_{PV}$ , die Netzleistung  $P_N$ , die Verlustleistung  $P_V$  und die Batterieladezustände  $SOC_{HE}$  und  $SOC_{HP}$ .

Die Eigenverbrauchsoptimierung ist das Hauptziel des Betriebs, weshalb der Eigenverbrauchsgrad  $k_{EV}$  betrachtet wird. Der Eigenverbrauchsgrad gibt an, welcher Anteil der PV-Energie selbst verbraucht wird. [38] Er ergibt sich aus der PV-Energie  $E_{PV}$ , den energetischen Abregelverlusten  $E_{ARV}$  und der eingespeisten Energie  $E_{N,E}$ .

$$E_{PV} = \int P_{PV} dt \quad (1.4)$$

$$P_{N,E} = abs(P_N(P_N < 0)) \quad (1.5)$$

$$E_{ARV} = \int P_{N,E}(P_{N,E} > 0.5 \cdot P_{PV}) dt \quad (1.6)$$

$$E_{N,E} = \int P_{N,E}(P_{N,E} < 0.5 \cdot P_{PV}) dt \quad (1.7)$$

$$k_{EV} = \frac{E_{PV} - E_{ARV} - E_{N,E}}{E_{PV}} \cdot 100 \% \quad (1.8)$$

Weiterhin wird der Selbstversorgungsgrad  $k_{SV}$  betrachtet, da dieser ein Indikator für geringere Strombezugskosten ist. Er gibt an, welcher Anteil des Energiebedarfs durch die PV-Energie gedeckt wird. [38] Er ergibt sich aus der Lastenergie  $E_L$  und der aus dem Netz bezogenen Energie  $E_{N,B}$ .

$$E_L = \int P_L dt \quad (1.9)$$

$$P_{N,B} = P_N(P_N > 0) \quad (1.10)$$

$$E_{N,B} = \int P_{N,B} dt \quad (1.11)$$

$$k_{SV} = \frac{E_L - E_{N,B}}{E_L} \cdot 100 \% \quad (1.12)$$

Die Vermeidung der Abregelung der PV-Anlage ist eines der Ziele des Speichereinsatzes, weshalb die Abregelquote  $k_{ARQ}$  und die maximale Einspeiseleistung  $P_{N,E,max}$  betrachtet werden. Die Abregelquote gibt an, wie groß der Anteil, der der PV-Energie ist, welcher aufgrund von Netzrestriktionen abgeregelt werden muss. Sie ergibt sich aus der PV-Energie  $E_{PV}$  und den energetischen Abregelverlusten  $E_{ARV}$ .

$$k_{ARQ} = \frac{E_{ARV}}{E_{PV}} \cdot 100 \% \quad (1.13)$$

$$P_{N,E,max} = \max \left( P_{N,E} (P_{N,E} < 0.5 \cdot \max (P_{PV})) \right) \quad (1.14)$$

Das Last-Peak-Shaving ist ebenfalls eines der Ziele des Speichereinsatzes, weshalb die maximale Netzbezugsleistung  $P_{N,B,max}$  betrachtet wird.

$$P_{N,B,max} = \max(P_{N,B}) \quad (1.15)$$

Ebenso ist die Minimierung von Umwandlungsverlusten ein Ziel für die Nutzung der Batterien, sodass die Summe der Umwandlungsverluste  $E_V$  betrachtet wird.

$$E_V = \int P_V dt \quad (1.16)$$

Da es sich um einen Betrieb handeln müssen auch wirtschaftliche Kriterien mit einbezogen werden. Hierfür werden die Investitionskosten, die Strombezugskosten und die Einspeisevergütung betrachtet, um positive Änderungen des Systemverhaltens in Relation zu den Kosten für den Betrieb zu setzen. Für die Berechnung der Strombezugskosten  $K_{N,B}$  und der Einspeisevergütung  $K_{N,E}$  werden der Faktor für die Strombezugskosten  $k_{SB}$ , der

Faktor für die Einspeisevergütung  $k_E$  sowie die in das Netz eingespeiste Energie  $E_{N,E}$  und die aus dem Netz bezogene Energie  $E_{N,B}$  benötigt.

$$K_{N,B} = E_{N,B} \cdot k_{SB} \quad (1.17)$$

$$K_{N,E} = E_{N,E} \cdot k_E \quad (1.18)$$

Die Investitionskosten  $K_{Invest}$  setzen sich aus den Batteriekosten  $K_{HE}$  und  $K_{HP}$  sowie den Kosten für die DC/DC-Wandler  $K_{DCDC,HE/HP}$  und die AC/DC-Wandler  $K_{ACDC}$  zusammen. Für die Berechnung dieser Parameter werden der Energieinhalt der HE-Batterie  $E_{HE}$ , der Energieinhalt HP-Batterie  $E_{HP}$ , der Energieinhalt pro Batteriestrang der HE-Batterie  $E_{HE,Strang}$ , der Energieinhalt pro Batteriestrang der HP-Batterie  $E_{HP,Strang}$ , die Kosten pro Batteriestrang der HE-Batterie  $K_{HE,Strang}$ , die Kosten pro Batteriestrang der HP-Batterie  $K_{HP,Strang}$ , die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie  $P_{DCDC,HE}$ , die DC/DC-Leistung an der HP-Batterie  $P_{DCDC,HP}$ , die Kosten für DC/DC-Wandler  $K_{DCDC}$  und die Kosten für AC/DC-Wandler  $K_{ACDC}$  benötigt.

$$K_{Invest} = K_{HE} + K_{HP} + K_{DCDC,HE/HP} + K_{ACDC} \quad (1.19)$$

$$K_{Invest} = \frac{E_{HE}}{E_{HE,Strang}} \cdot K_{HE,Strang} + \frac{E_{HP}}{E_{HP,Strang}} \cdot K_{HP,Strang} + \frac{P_{DCDC,HE} + P_{DCDC,HP}}{150 \text{ kW}} \cdot K_{DCDC} + \frac{\max(P_{DCDC,HE}, P_{DCDC,HP})}{150 \text{ kW}} \cdot K_{ACDC} \quad (1.20)$$

Die Anzahl äquivalenter Vollzyklen der Batterien dienen der Analyse der Batteriealterung. Für die Berechnung werden die Batterieladezustände der HE-Batterie  $SOC_{HE}$  und der HP-Batterie  $SOC_{HP}$  benötigt. Der Index  $i$  steht für die Zeitschritte, um zu zeigen, dass die Differenz zwischen aufeinanderfolgenden Zeitschritten berechnet wird und der Index  $n$  steht für die maximale Anzahl an Zeitschritten.

$$Z_{HE} = \sum_{i=1}^{n-1} |SOC_{HE,i+1} - SOH_{HE,i}| \quad (1.21)$$

$$Z_{HP} = \sum_{i=1}^{n-1} |SOC_{HP,i+1} - SOH_{HP,i}| \quad (1.22)$$

Die gesamte in die Batterien eingespeicherte und ausgespeicherte Energie dient der Analyse, wie sich Änderungen des Energieinhalts der Batterien sowie der Gleichrichter- und Wechselrichterleistung auf die Nutzung der Batterien auswirken. Für die Berechnung wird die Batterieleistung  $P_{AC}$  benötigt.

$$E_{AC, \text{ein}} = \text{abs}\left(\int P_{AC}(P_{AC} < 0) dt\right) \quad (1.23)$$

$$E_{AC, \text{aus}} = \int P_{AC}(P_{AC} > 0) dt \quad (1.24)$$

## 4.2 Auslegungsoptionen

Für die Dimensionierung des Batteriesystems sind verschiedene Auslegungsparameter einstellbar. Zunächst kann der Batterietyp gewählt werden. Er definiert den Energieinhalt je Batteriestrang und die C-Rate, das Verhältnis von Leistung zu Energieinhalt der Batterie. Zur Verfügung stehen drei verschiedene Batterietypen. Batterietyp eins ist die Standardbatterie, welche 37 Ah je Strang besitzt und eine C-Rate von eins hat. Batterietyp drei ist eine High-Power-Batterie, welche 37 Ah je Strang besitzt und eine C-Rate von fünf hat. Batterietyp vier ist eine Ultra-High-Energy-Batterie, welche 148 Ah je Strang besitzt und eine C-Rate von eins hat. Batterietyp zwei entfällt aufgrund fehlender Daten. Der Energieinhalt der Hochleistungs- und Hochenergiebatterie kann jeweils über die Anzahl der parallel geschalteten Batteriestränge eingestellt werden. Für die Berechnung der Energieinhalte  $E_{HE}$  und  $E_{HP}$  werden neben der Nennspannung  $U_{Nenn}$  die Kapazitäten der HE-Batterie  $C_{HE}$  und der HP-Batterie  $C_{HP}$  sowie die Anzahl der parallel geschalteten Stränge der HE-Batterie  $Z_{Strang,HE}$  und der HP-Batterie  $Z_{Strang,HP}$  benötigt.

$$E_{HE} = Z_{Strang,HE} \cdot C_{HE} \cdot U_{Nenn} \quad (1.25)$$

$$E_{HP} = Z_{Strang,HP} \cdot C_{HP} \cdot U_{Nenn} \quad (1.26)$$

Die Nennspannung beträgt 567.54 V, sodass der Energieinhalt der Batterietypen eins und drei je Strang 21 kWh beträgt und der Energieinhalt des Batterietyps vier 84 kWh.

Die maximal übertragbare Leistung jeder Batterie kann mit der Anzahl an DC/DC-Wandlern eingestellt werden. Diese legen fest, wie viel Leistung an die AC/DC-Wandler übertragen



werden kann. Mit der Anzahl an AC/DC-Wandlern wird die maximal vom Batteriesystem übertragbare Leistung definiert. Jeder DC/DC- sowie AC/DC-Wandler kann 150 kW Leistung übertragen. Es wird festgelegt, dass die Anzahl an AC/DC-Wandlern der größten Anzahl an DC/DC-Wandlern der HE- oder HP-Batterie entspricht, sodass jede Batterie bei Einzelbetrieb ihre maximale installierte Leistung nutzen könnte. Für die Berechnung der DC/DC-Leistungen  $P_{DCDC,HE}$  und  $P_{DCDC,HP}$  sowie der AC/DC-Leistung  $P_{ACDC}$  wird die Anzahl der in Reihe geschalteten DC/DC-Wandler benötigt.

### 4.3 Orientierungssimulation

Für den Start der Untersuchung des hybriden Energiespeichersystem wurde ein breites Spektrum an verschiedenen Auslegungsvarianten festgelegt und simuliert. Ziel dieser ersten Simulation ist es eine Auslegungsvariante zu definieren, welche flexible Anpassungen der Parameter im Positiven sowie Negativen erlaubt. Des Weiteren sollen nicht zielführende Variationen der Auslegungsparameter vorab aus der Betrachtung entfernt werden.

In Tabelle X sind die Systemkonfigurationen für die erste Untersuchung zu sehen.

Tabelle 7: Systemkonfigurationen für die erste Untersuchung

Batterietyp HP	Batterietyp HE	$E_{HE}$ in kWh	$E_{HP}$ in kWh	$P_{DCDC,HP}$ in kW	$P_{DCDC,HE}$ in kW	Max. Systemleistung in kW
3	1	84	252	300	300	300
3	1	84	399	300	300	300
3	1	84	546	300	450	300
3	1	126	210	450	150	450
3	1	168	147	750	150	750
3	1	168	294	750	300	750
3	1	210	420	900	300	900
3	1	252	231	900	150	900
3	1	315	294	1500	300	1500

Die Analyse der Simulationsergebnisse entsprechend den definierten Bewertungskriterien ergab, dass das Verhältnis von  $E_{HE}$  zu  $E_{HP}$  mindestens eins betragen muss, damit sich die Aufgabenverteilung der Batterien nicht umkehrt. Des Weiteren ist eine Tendenz zu erkennen, welche zeigt, dass sich mit einem steigenden Verhältnis von  $E_{HE}$  zu  $E_{HP}$  die Simulationsergebnisse verbessern.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen und der Zielsetzung, dass möglichst viele Anpassungen im Positiven und Negativen möglich sind, wurde als Mittelpunkt der Untersuchung folgende Systemkonfiguration gewählt.

Tabelle 8: Systemkonfigurationen für den Mittelpunkt der Untersuchung

Batterietyp HP	Batterietyp HE	$E_{HE}$ in kWh	$E_{HP}$ in kWh	$P_{DCDC,HP}$ in kW	$P_{DCDC,HE}$ in kW	Max. Systemleistung in kW
3	1	126	420	450	450	450

Batterietyp vier wurde hierfür nicht in Betracht gezogen, da eine Anpassung des HE-Energieinhalts lediglich in 84 kWh-Schritten möglich wäre.

#### 4.4 Versuchsplanung

Um die Einflüsse der Auslegungsparameter auf das Systemverhalten zu untersuchen und Wechselwirkungen zwischen den Parametern zu analysieren werden für jede Untersuchung stets zwei Auslegungsparameter variiert, während die restlichen Parameter der Mittelpunktauslegung entsprechen. Die zu variierten Parameterkombinationen sind der Energieinhalt und die maximal übertragbare Leistung der Hochenergiebatterie, der Energieinhalt und die maximal übertragbare Leistung der Hochleistungsbatterie, die maximal übertragbare Leistung der Hochenergiebatterie und die maximal übertragbare Leistung der Hochleistungsbatterie sowie der Energieinhalt der Hochenergiebatterie und der Energieinhalt der Hochleistungsbatterie. Weiterhin werden für den Vergleich der Batterietypen anschließend ausgewählte Konfigurationen mit Batterietyp vier statt Batterietyp eins für die Hochenergiebatterie simuliert. Der Versuchsplan ist in Anlage 1 zu sehen.

#### 4.5 Auswertung der Simulationsergebnisse

Die verschiedenen Variationen von Auslegungsparametern werden anhand der über die Simulationsergebnisse berechneten Bewertungskriterien untersucht.

In Abbildung 26 ist der Einfluss der Variation verschiedener Auslegungsparameter auf den Eigenverbrauchsgrad dargestellt.

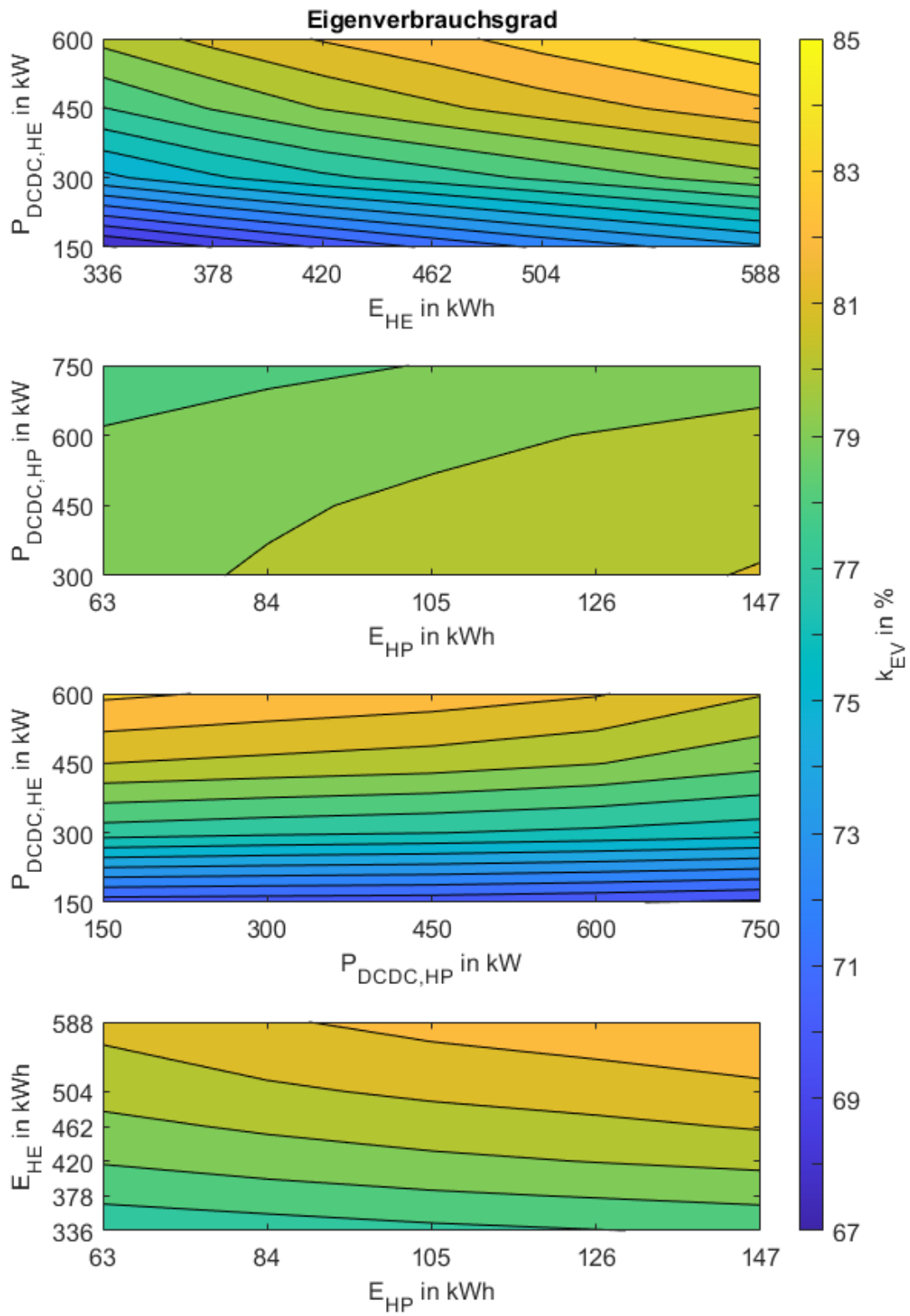


Abbildung 26: Eigenverbrauchsgrad

Im ersten Diagramm ist der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie sowie der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie auf den Eigenverbrauchsgrad zu sehen. Dieser schwankt zwischen 67 % und 85 %. Der Eigenverbrauchsgrad steigt sowohl mit steigendem Energieinhalt der HE-Batterie sowie mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Die DC/DC-Leistung scheint den größeren Einfluss zu haben, da der Anstieg des Eigenverbrauchsgrades über die Variationen der DC/DC-Leistung mit ca. zwölf Prozent deutlich größer ist als über die Variationen des Energieinhalts mit lediglich ungefähr sieben Prozent. Allerdings nimmt mit jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler an der HE-Batterie (150 kW Nennleistung je Wandler) der Einfluss der DC/DC-Leistung ab und der Einfluss des Energieinhalts zu. Mit zunehmender Größe der farbigen Bereiche, kann von einem Sättigungseffekt ausgegangen werden. Mit zunehmendem Eigenverbrauchsgrad steigt die Größe der farbigen Bereiche, allerdings ist dieser Anstieg sehr gering, sodass davon ausgegangen werden kann, dass Eigenverbrauchsgrade von mehr als 85 % erreichbar sind. Demensprechend kann man sagen, dass hohe Energieinhalte und DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie zu einer signifikanten Erhöhung des Eigenverbrauchsgrades führen, allerdings der Einfluss der DC/DC-Leistung bei der HE-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts ist.

Das zweite Diagramm zeigt den Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie auf den Eigenverbrauchsgrad. Er schwankt zwischen 78 % und 81 % sodass angenommen werden kann, dass Anpassungen an der HE-Batterie einen deutlich größeren Einfluss haben als Anpassungen an der HP-Batterie. Dies erklärt sich wahrscheinlich damit, dass die HE-Batterie viel Energie bevorraten kann, sodass ein geringerer Teil der übermäßig generierten PV-Leistung abgeregelt werden muss, da er zwischengespeichert wird. Dasselbe gilt für die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie, da diese festlegt, wie viel Leistung maximal von der HE-Batterie aufgenommen beziehungsweise abgegeben werden kann. Der Eigenverbrauchsgrad steigt mit zunehmendem maximalen Energieinhalt der HP-Batterie und abnehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie, allerdings sinkt der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie mit nahezu jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler an der HP-Batterie. Im selben Zusammenhang steigt der Einfluss der DC/DC-Leistung. Der Anstieg des Eigenverbrauchsgrades über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ist mit ca. ein bis zwei Prozent größer als über die Variationen des Energieinhalts mit maximal einem Prozent. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts ist.

Im dritten Diagramm ist der Einfluss der Variation der DC/DC-Leistungen an der HE- sowie HP-Batterie auf den Eigenverbrauchsgrad zu sehen. Die Ergebnisse schwanken zwischen 69 % und 83 %. Somit zeigt sich, dass die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie einen großen

Einfluss hat, da eine Variation stets zu weit gestreuten Ergebnissen führt. Der Eigenverbrauchsgrad steigt mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie und abnehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie ist mit ca. zwölf Prozent deutlich größer als der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie mit ca. zwei Prozent. Somit scheint, entsprechend den Ergebnissen aus Diagramm eins und drei, der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zu sein. Im Bereich von 150 kW bis 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie wird der Eigenverbrauchsgrad fast ausschließlich durch eine Anpassung der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie beeinflusst. Weiterhin steigt der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie mit nahezu jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler an der HP-Batterie. Im selben Zusammenhang sinkt der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Demensprechend scheinen hohe DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie zu einer signifikanten Erhöhung des Eigenverbrauchsgrades zu führen, während niedrige DC/DC-Leistungen an der HP-Batterie nur zu einer geringen Erhöhung führen.

Im vierten Diagramm wird der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie auf den Eigenverbrauchsgrad abgebildet. Dieser schwankt zwischen 77 % und 83 %. Der Eigenverbrauchsgrad steigt mit zunehmendem Energieinhalt beider Batterien, allerdings ist der Anstieg über die Variationen des Energieinhalts der HE-Batterie mit ca. vier bis fünf Prozent größer als über die Variationen der HP-Batterie mit ungefähr zwei Prozent. Weiterhin sinkt der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie nahezu mit jedem hinzukommenden Batteriestrang (21 kWh je Batteriestrang) an der HP-Batterie. Im selben Zusammenhang steigt der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie. Entsprechend den Ergebnissen aus Diagrammen zwei und vier bestätigt sich die Annahme aus Diagramm drei, dass der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ist.

In den Diagrammen wird deutlich, dass der Eigenverbrauchsgrad mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie, steigendem Energieinhalt der HE-Batterie, steigendem Energieinhalt der HP-Batterie und sinkender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zunimmt. Die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie scheint den größten Einfluss zu haben und darauffolgend der Energieinhalt der HE-Batterie. Den niedrigsten Einfluss scheinen die Auslegungsparameter der HP-Batterie zu haben. Allerdings steigt der Einfluss der DCDC-Leistung an der HP-Batterie, mit steigendem Energieinhalt der HP-Batterie, während der Einfluss des Energieinhalts im selben Zusammenhang abnimmt.

Abbildung 27 zeigt den Einfluss der Variation verschiedener Auslegungsparameter auf die Abregelquote.

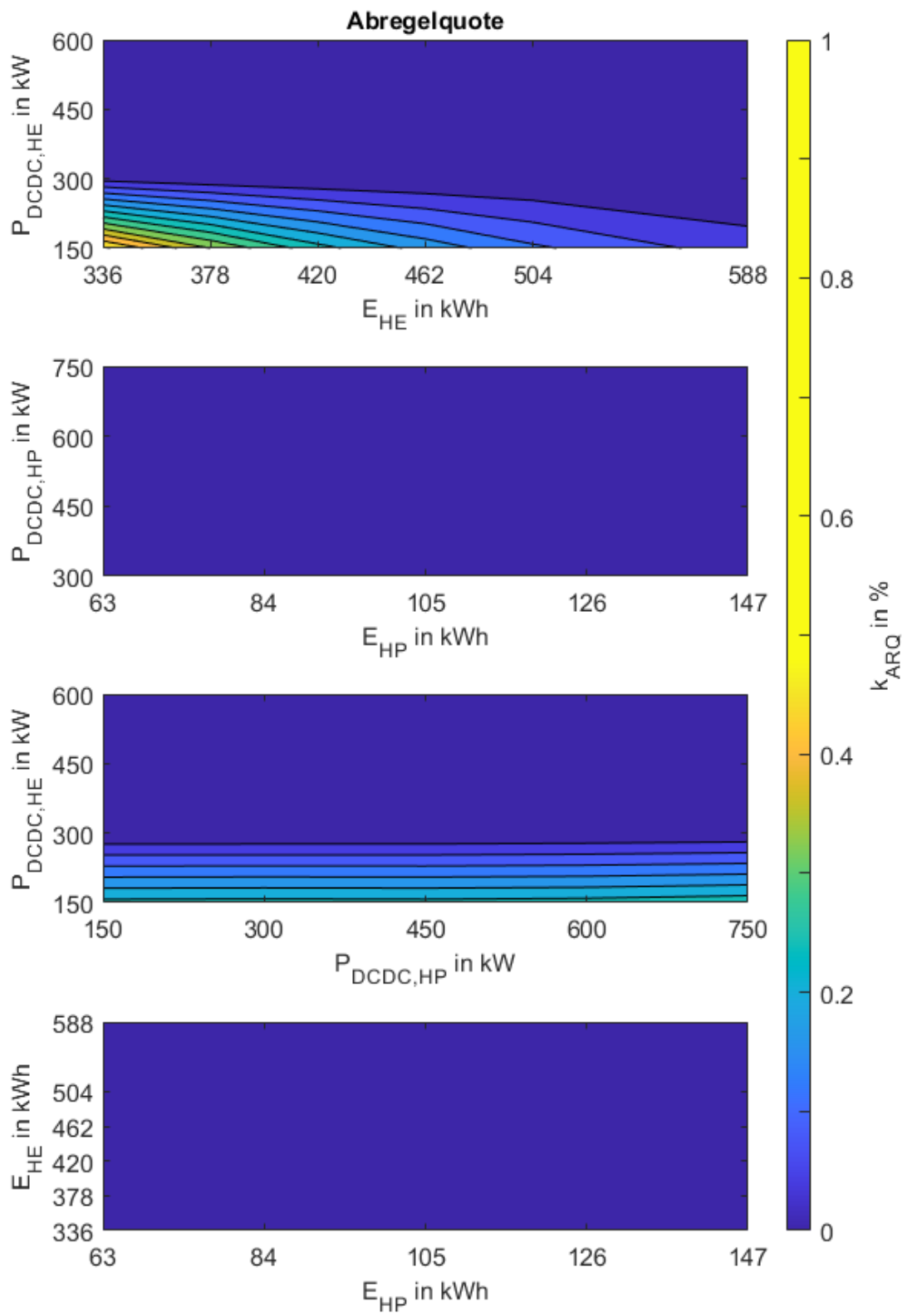


Abbildung 27: Abregelquote

Im ersten Diagramm ist der Einfluss der Variation des Energieinhalts und der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie auf die Abregelquote zu sehen. Sie schwankt zwischen null und einem Prozent. Die Abregelquote sinkt sowohl mit steigendem Energieinhalt der HE-Batterie sowie mit steigender DC/DC-Leistung. Wie bereits beim Eigenverbrauchsgrad scheint die DC/DC-Leistung den größeren Einfluss zu haben, da der betragsmäßige Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung mit ungefähr 0,1 bis ein Prozent größer ist als über die Variation des Energieinhalts mit maximal 0,9 Prozent. Bis 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie sinkt mit hinzukommendem Batteriestrang an der HE-Batterie der Einfluss der DC/DC-Leistung und der Einfluss des Energieinhalts steigt. Weiterhin erfolgt oberhalb von 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie keine weitere Veränderung der Abregelquote, da entsprechend den Simulationsergebnissen viele Werte nahezu null sind. Somit scheint eine Steigerung der DC/DC-Leistung bis auf 300 kW die Abregelverluste stark zu minimieren. Es ist ein Anstieg der Größe der farbigen Bereiche zu sehen, dies liegt an daran, dass bereits ab 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie der Minimalwert von ungefähr null erreicht wird. Somit ist ein deutlicher Sättigungseffekt vorhanden. Demensprechend kann man sagen, dass hohe Energieinhalte und DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie zu einer Verringerung der Abregelquote führen, allerdings der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts ist.

Das zweite Diagramm zeigt den Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie auf die Abregelquote. Die Abregelquote beträgt null Prozent und weist keinerlei Veränderung auf. Somit führt eine Anpassung der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie sowie die Anpassung dessen Energiegehalts zu keiner Veränderung der Abregelquote, sodass davon ausgegangen werden kann, dass diese beiden Parameter keinen Einfluss auf die Abregelquote haben. Dies kann möglicherweise damit erklärt werden, dass wie bereits im obigen Diagramm festgestellt, DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie von 300 kW und mehr zu keiner weiteren Reduktion der Abregelquote führen und in diesem Diagramm dauerhaft 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie bei der Variation von Auslegungsparametern der HP-Batterie anliegen. Weiterhin ist damit ersichtlich, dass der Einfluss der Variation der Auslegungsparameter der HP-Batterie deutlich niedriger als der Einfluss der HE-Batterie ist.

Im dritten Diagramm ist der Einfluss der Variation der DC/DC-Leistungen an der HE- sowie HP-Batterie auf die Abregelquote zu sehen. Die Ergebnisse schwanken zwischen null und 0,3 Prozent. Die Abregelquote sinkt mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Der betragsmäßige Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie beträgt ca. 0,3 Prozent und der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie liegt bei ungefähr null. Somit scheint, entsprechend den Ergebnissen aus

Diagramm eins und drei, der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zu sein. Die Abregelquote wird in diesem Diagramm fast ausschließlich durch eine Anpassung der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie beeinflusst. Allerdings steigt der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ab ca. 600 kW DC/DC-Leistung an der HP-Batterie marginal an. Im selben Zusammenhang sinkt der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Es ist ein Anstieg der Größe der farbigen Bereiche zu sehen, dies liegt daran, dass die Abregelquote, wie bereits im ersten Diagramm, ab 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie ihr Minimum mit null Prozent erreicht. Somit ist ein deutlicher Sättigungseffekt vorhanden. Demensprechend scheinen hohe DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie zu einer Verringerung der Abregelquote zu führen, während niedrige DC/DC-Leistungen an der HP-Batterie nur zu einer sehr geringen Verringerung führen.

Im vierten Diagramm wird der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie auf die Abregelquote abgebildet. Diese beträgt null Prozent und weist keinerlei Veränderung auf. Dies lässt sich wahrscheinlich damit erklären, dass wie bereits in den obigen Diagrammen DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie von 300 kW oder mehr zu keiner weiteren Verringerung der Abregelquote führen, da diese bereits bei null Prozent liegt und in diesem Diagramm dauerhaft 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie anliegen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass, entsprechend den Ergebnissen aus Diagramm zwei und vier der Energieinhalt der HP-Batterie keinerlei Einfluss auf die Abregelquote hat.

In den Diagrammen wird deutlich, dass die Abregelquote mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie und steigendem Energieinhalt der HE-Batterie abnimmt. Die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie scheint den größten Einfluss zu haben und darauffolgend der Energieinhalt der HE-Batterie. Entsprechend den Ergebnissen aus den Diagrammen zwei und vier, scheint der Energieinhalts der HP-Batterie keinen Einfluss zu haben und entsprechend den Ergebnissen aus Diagramm drei, scheint der Einfluss der DC/DC-Leistung deutlich niedriger als der Einfluss der Auslegungsparameter der HE-Batterie zu sein.

In Abbildung 28 ist der Einfluss der Variation verschiedener Auslegungsparameter auf die maximale aufgetretene Einspeiseleistung dargestellt.



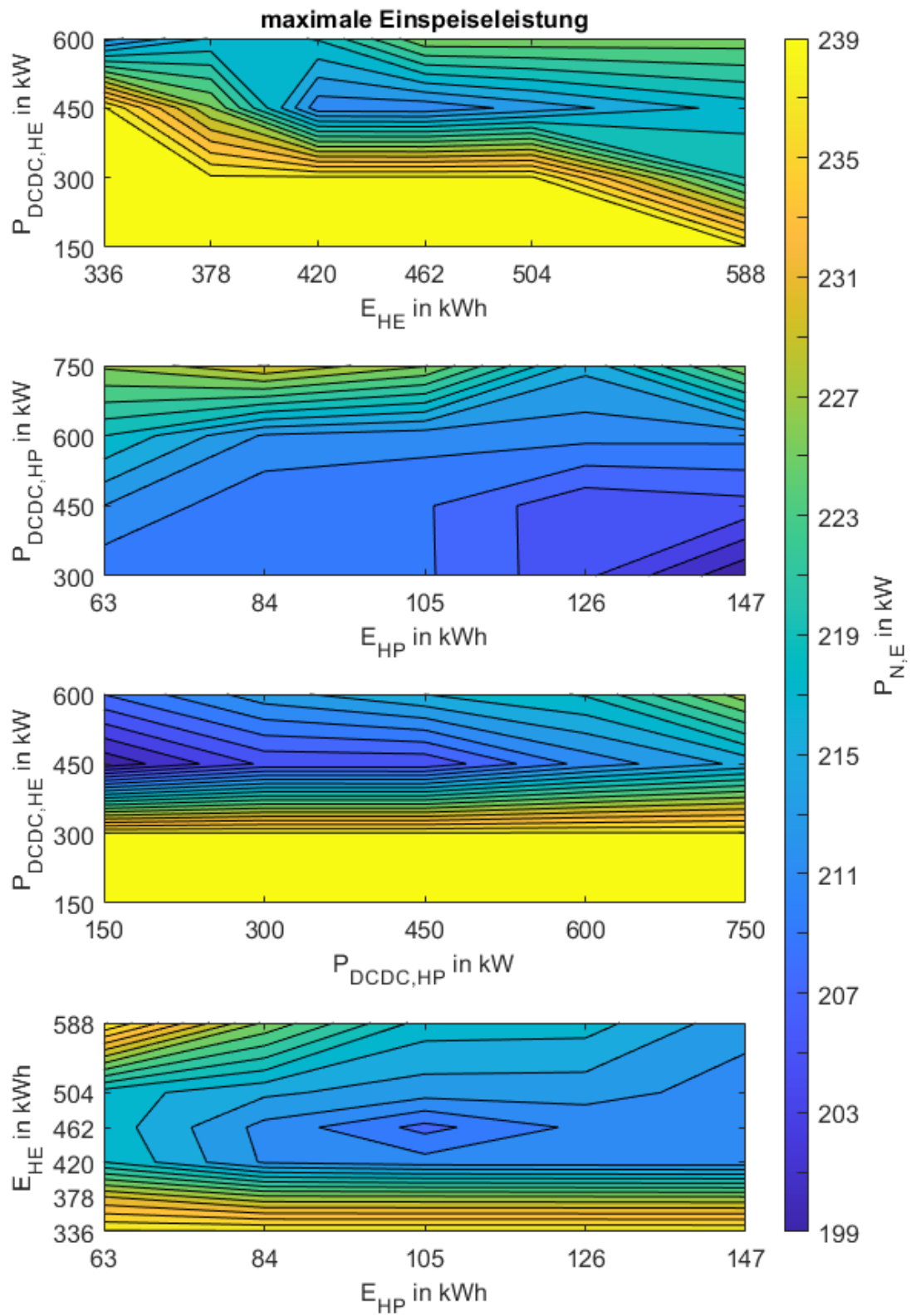


Abbildung 28: maximal aufgetretene Einspeiseleistung

In Diagramm eins ist der Einfluss der Variation der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie sowie des Energieinhalts der HE-Batterie auf die maximale Einspeiseleistung zu sehen. Die Ergebnisse schwanken zwischen 211 kW und 239 kW. Die maximal aufgetretene Einspeiseleistung weist keinen konstanten Anstieg vor. Der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung beträgt ungefähr zweiundzwanzig bis achtundzwanzig Kilowatt und der Anstieg über die Variation des Energieinhalts beträgt ca. null bis vierzehn Kilowatt. Im Bereich von 336 kWh bis 420 kWh Energieinhalt sinkt die Einspeiseleistung weitestgehend mit steigender DC/DC-Leistung bis auf 211 kW und erreicht bereits bei 450 kW und niedrigeren DC/DC-Leistungen ihren Maximalwert von 239 kW. Sie sinkt in diesem Bereich über die möglichen Variationen der DC/DC-Leistung mit ca. 28 kW ähnlich wie über die Variationen des Energieinhalts mit ebenso ungefähr 28 kW. Allerdings ändert sich der Einfluss des Energieinhalts und der DC/DC-Leistung mit hinzukommenden DC/DC-Wandlern sowie Batteriesträngen, sodass zwischen 336 kWh und 378 kWh oberhalb von 450 kW die Einspeiseleistung zunächst mit steigendem Energieinhalt abnimmt doch mit steigender DC/DC-Leistung über die Variationen des Energieinhalts zunimmt. Zwischen 378 kWh und 420 kWh Energieinhalt der HE-Batterie sinkt die Einspeiseleistung wieder über alle Variationen der DC/DC-Leistung mit steigendem Energieinhalt, allerdings kommt es zu einem Vorzeichenwechsel des Anstiegs über die Variationen der DC/DC-Leistung. Im Bereich von 420 kWh bis 504 kWh Energieinhalt sinkt die Einspeiseleistung mit steigender DC/DC-Leistung teilweise bis auf 211 kW, allerdings beginnt sie ab 450 kW DC/DC-Leistung und größer wieder zu steigen, da bei 450 kW DC/DC-Leistung und 420 kWh bis ca. 483 kWh Energieinhalt ein lokales Minimum vorhanden ist. Bei 450 kW DC/DC-Leistung und 462 kWh Energieinhalt wird das maximale Leistungsübertragungspotential, definiert über die C-Rate, der HE-Batterie ausgenutzt, allerdings kann dies nicht die Begründung für das Minima sein, da beispielsweise bei 336 kWh und 300 kW oder auch 588 kWh und 600 kW keine Minima vorliegen. Zwischen 150 kW und 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie sinkt in diesem Bereich die maximale Einspeiseleistung mit steigender DC/DC-Leistung, jedoch führt eine Anpassung des Energieinhalts zu keiner Veränderung der aufgetretenen Einspeiseleistung. Weiterhin wird der Maximalwert der Einspeiseleistung in diesen Bereich bereits bei 300 kW DC/DC-Leistung und niedriger erreicht. Zwischen 504 kWh und 588 kWh Energieinhalt ändert sich erneut der betragsmäßige Anstieg, sodass neben der DC/DC-Leistung auch eine Erhöhung des Energieinhalts der HE-Batterie zu einer Verringerung der maximalen Einspeiseleistung führt. Sie sinkt in diesem Bereich über die möglichen Variationen der DC/DC-Leistung mit ca. 26 kW stärker als über die Variationen des Energieinhalts mit ungefähr 20 kW. Oberhalb von 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie verringert sich der Einfluss des Energieinhalts und der Einfluss der DC/DC-

Leistung steigt. Über das gesamte Diagramm ist zu sehen, dass je niedriger der Energieinhalt ist, desto höhere DC/DC-Leistungen erforderlich sind, damit die maximale Einspeiseleistung auf einem ähnlich niedrigen Wert verbleibt. Weiterhin nimmt die Größe der farbigen Bereiche über das gesamte Diagramm mit steigender Einspeiseleistung zu, sodass von einem Sättigungseffekt bei ca. 239 kW ausgegangen werden kann, da dieser Wert der Abregelungsgrenze der PV-Anlage entspricht. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Abregelquote, da diese erst ab 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie beginnt zu steigen, wo in diesem Diagramm erstmalig die maximale Einspeiseleistung erreicht wird. Die Erhöhung der maximalen Einspeiseleistung geht mit sinkender DC/DC-Leistung einher, da diese definiert, wie viel Energie pro Zeiteinheit von der Batterie aufgenommen werden kann, sodass bei sehr niedrigen DC/DC-Leistungen der Großteil der PV-Energie nicht in die Batterie aufgenommen werden kann und daher ins Netz eingespeist werden muss. Dementsprechend kann man sagen, dass hohe DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie zu einer signifikanten Verringerung der maximalen Einspeiseleistung führen, allerdings ein Minimum bei bereits 450 kW DC/DC-Leistung erreicht wird, während Anpassungen des Energieinhalts in deutlich geringerem Maße zu einer Verringerung führen und somit der Einfluss der DC/DC-Leistung bei der HE-Batterie deutlich größer als der Einfluss des Energieinhalts ist.

Das zweite Diagramm zeigt den Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie auf die maximale Einspeiseleistung. Sie schwankt zwischen 205 kW und 228 kW. Die maximale Einspeiseleistung sinkt weitestgehend mit sinkender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie sowie mit steigendem Energieinhalt. Der betragsmäßige Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung liegt bei ca. achtzehn bis zwanzig Kilowatt, während er über die Variation des Energieinhalts lediglich ungefähr sechs bis vierzehn Kilowatt beträgt. Somit scheint der Einfluss der DC/DC-Leistung der HP-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts zu sein, da sich bis auf wenige Ausnahmen die maximale Einspeiseleistung hauptsächlich durch eine Verringerung der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ändert. Oberhalb von 600 kW DC/DC-Leistung kommt es mehrfach zu Vorzeichenwechseln, sodass eine Erhöhung des Energieinhalts der HP-Batterie zu einer Erhöhung der maximalen Einspeiseleistung führt. Weiterhin sinkt der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zwischen 105 kWh und 126 kWh Energieinhalt und unterhalb von 450 kW DC/DC-Leistung auf null, da eine Veränderung keinerlei Einfluss auf die Einspeiseleistung hat. Dementsprechend scheinen hohe Energieinhalte der HP-Batterie und niedrige DC/DC-Leistungen an der HP-Batterie zu einer signifikanten Verringerung der maximalen Einspeiseleistung zu führen.

In Diagramm drei ist der Einfluss der Variation der DC/DC-Leistungen an der HE- sowie HP-Batterie auf die maximale Einspeiseleistung zu sehen. Diese schwankt zwischen 199 kW

und 239 kW. Somit zeigt sich, dass die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie einen großen Einfluss hat, da eine Variation stets zu weit gestreuten Ergebnissen führt. Der betragsmäßige Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie beträgt ca. zweiundzwanzig bis vierzig Kilowatt und der Anstieg über die Variation an der HP-Batterie beträgt ungefähr null bis achtzehn Kilowatt. Somit scheint die DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ebenfalls einen starken Einfluss auf die maximale Einspeiseleistung zu haben, allerdings geringer als die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Unterhalb von 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie hängt die maximale Einspeiseleistung nahezu ausschließlich von der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie ab. Die maximale Einspeiseleistung sinkt bis 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Oberhalb von 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie kommt es zu einem Vorzeichenwechsel, sodass die maximale Einspeiseleistung mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie steigt. Somit scheint sich bei 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie ein Optimum zu befinden. Oberhalb von 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie erhält die DC/DC-Leistung an der HP-Batterie einen Einfluss auf die maximale Einspeiseleistung, sodass mit sinkender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie die maximale Einspeiseleistung sinkt. Weiterhin ist zu sehen, dass sich in diesem Bereich der Einfluss beider Parameter mit nahezu jedem wegfallenden DC/DC-Wandler an der HP-Batterie ändert. Unterhalb von 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie erreicht die Einspeiseleistung die Abregelungsgrenze, sodass es zu einer Sättigung kommt. Dies deckt sich sowohl mit den Ergebnissen aus Diagramm eins sowie mit den Ergebnissen der Abregelquote. Die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie scheint einen deutlich größeren Einfluss als die DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zu haben, da bei niedriger DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie die maximale Einspeiseleistung nahezu ungeachtet der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie stets ihren Maximalwert hat und bis 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie die DC/DC-Leistung an der HP-Batterie keinen Einfluss auf die maximale Einspeiseleistung hat. Dies bestätigt die Ergebnisse aus Diagramm eins und zwei.

Im vierten Diagramm wird der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie auf die maximale Einspeiseleistung abgebildet. Die maximale Einspeiseleistung schwankt zwischen 208 kW und 238 kW. Der betragsmäßige Anstieg über die Variation des Energieinhalts der HE-Batterie beträgt ca. zwanzig bis dreißig Kilowatt und über die Variation des Energieinhalts der HP-Batterie beträgt er ungefähr null bis vierundzwanzig Kilowatt. Somit ist der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie. Über die Variationen des Energieinhalts der HE-Batterie kommt es zu einem Vorzeichenwechsel des Anstiegs, da oberhalb von 462 kWh die maximale Einspeiseleistung

mit steigendem Energieinhalt zunimmt, allerdings bis 462 kWh die maximale Einspeiseleistung mit steigendem Energieinhalt abnimmt. Zwischen 420 kWh und 504 kWh Energieinhalt an der HE-Batterie sowie zwischen 63 kWh und 84 kWh Energieinhalt der HP-Batterie vollzieht sich der Vorzeichenwechsel, sodass in diesem Bereich die maximale Einspeiseleistung nahezu ausschließlich vom Energieinhalt der HP-Batterie abhängt. Im Bereich von 336 kWh bis 420 kWh Energieinhalt der HE-Batterie hängt die maximale Einspeiseleistung nahezu ausschließlich vom Energieinhalt der HE-Batterie ab. Weiterhin wird bei 336 kWh Energieinhalt der HE-Batterie sowie bei 588 kWh Energieinhalt der HE-Batterie und 63 kWh Energieinhalt der HP-Batterie jeweils die Abregelungsgrenze erreicht. Bei 462 kWh Energieinhalt der HE-Batterie und 105 kWh Energieinhalt der HP-Batterie erreicht die Einspeiseleistung ein Minimum, was, entgegen den Ergebnissen aus Diagramm eins, mit der Ausschöpfung des maximalen Leistungsübertragungspotentials der HE-Batterie zusammenhängen könnte, da die DC/DC-Leistungen an der HE- und HP-Batterie konstant bei 450 kW sind. Dementsprechend scheinen auf die DC/DC-Leistung angepasste Energieinhalte der HE- und HP-Batterie zu einer Verringerung der maximalen Einspeiseleistung zu führen. Des Weiteren scheint der Energieinhalt der HE-Batterie den größeren Einfluss zu haben.

In den Diagrammen wird deutlich, dass die maximale Einspeiseleistung mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie, darauf angepasstem Energieinhalt der HE-Batterie, sinkender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie und darauf abgestimmten Energieinhalt der HP-Batterie abnimmt. Die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie scheint den größten Einfluss zu haben und darauffolgend sowie die DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Den niedrigsten Einfluss scheinen der Energieinhalte der Batterien zu haben, da sie entsprechend den Ergebnissen aus den Diagrammen eins und vier, niedrigere Einflüsse als DC/DC-Leistung haben und in Abhängigkeit dieser gewählt werden müssen.

In Abbildung 29 ist der Einfluss der Variation verschiedener Auslegungsparameter auf die maximal aufgetretene Netzbezugsleistung dargestellt.

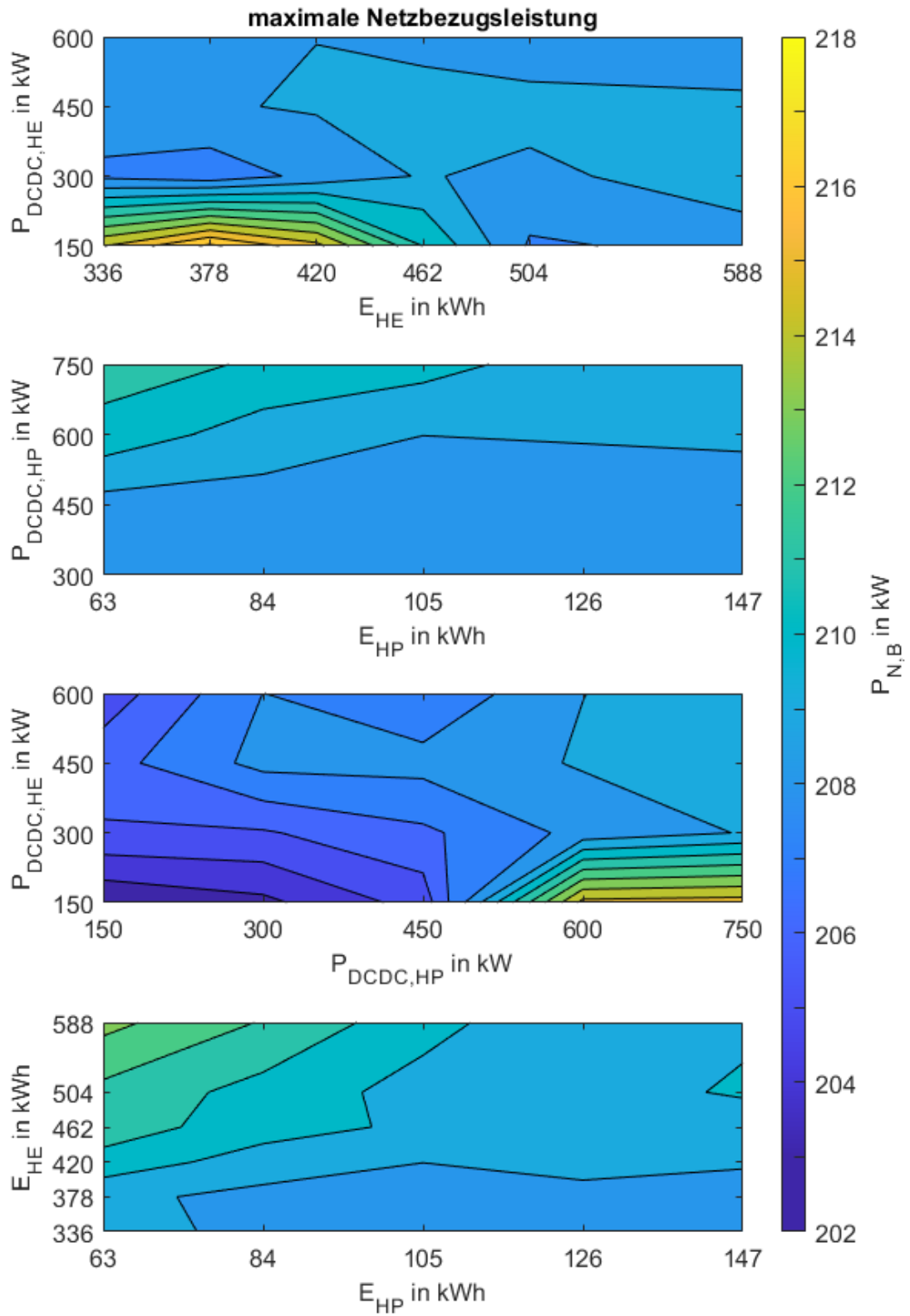


Abbildung 29: maximal aufgetretene Netzbezugsleistung

Im ersten Diagramm ist der Einfluss der Variation des Energieinhalts und der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie auf die maximale Netzbezugsleistung zu sehen. Sie schwankt zwischen 207 kW und 215 kW. Die maximale Netzbezugsleistung sinkt mit steigender DC/DC-Leistung und steigendem Energieinhalt der HE-Batterie. Der betragsmäßige Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie beträgt ca. zwei bis acht Kilowatt und der Anstieg über die Variation des Energieinhalts beträgt ungefähr null bis acht Kilowatt. Die Verringerung der maximalen Netzbezugsleistung mit steigender DC/DC-Leistung lässt sich mit der damit einhergehenden Erhöhung der maximalen Ausspeicherleistung erklären, sodass mehr Batterieleistung für den Eigenverbrauch genutzt werden kann und somit weniger aus dem Netz bezogen werden muss. Weiterhin kann durch einen erhöhten Energieinhalt länger Leistung bereitgestellt werden, sodass ebenfalls weniger aus dem Netz bezogen werden muss. Im Bereich von 150 kW bis 300 kW DC/DC-Leistung und 336 kWh bis 420 kWh hängt die maximale Netzbezugsleistung nahezu ausschließlich von der DC/DC-Leistung ab. Außerhalb dieses Bereiches, bei DC/DC-Leistungen größer als 300 kW und Energieinhalten von über 420 kWh, sind keine klaren Tendenzen bezüglich des betragsmäßigen Anstiegs erkennbar, da die maximale Netzbezugsleistung nahezu konstant ist. Allerdings nimmt die Größe der farbigen Bereiche hier sehr stark zu, sodass anscheinend von einem Sättigungseffekt oberhalb dieser Werte ausgegangen werden kann. Weiterhin befindet oberhalb von ca. 300 kW DC/DC-Leistung und zwischen ungefähr 336 kWh und 399 kWh Energieinhalt ein Minimum. Ein ähnliches Minimum befindet sich bei ungefähr 150 kW DC/DC-Leistung und 504 kWh Energieinhalt. Dementsprechend scheinen hohe Energieinhalte und DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie zu einer deutlichen Verringerung der maximalen Netzbezugsleistung führen. Allerdings nimmt der Einfluss beider oberhalb von 300 kW DC/DC-Leistung und 462 kWh Energieinhalt rapide ab, sodass kaum weitere Verbesserungen zu beobachten sind.

Das zweite Diagramm zeigt den Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie auf die maximal aufgetretene Netzbezugsleistung. Sie schwankt zwischen 208 kW und 212 kW, sodass angenommen werden kann, dass Anpassungen an der HE-Batterie einen größeren Einfluss haben als Anpassungen an der HP-Batterie. Die maximale Netzbezugsleistung sinkt mit zunehmendem maximalen Energieinhalt der HP-Batterie und abnehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Der betragsmäßige Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung beträgt ca. zwei bis vier Kilowatt und der Anstieg über die Variation des Energieinhalts beträgt ungefähr null bis drei Kilowatt. Es ist zu sehen, dass mit steigender DC/DC-Leistung und sinkendem Energieinhalt der Einfluss des Energieinhalts zunimmt und der Einfluss der DC/DC-Leistung abnimmt. Weiterhin nimmt die Größe der farbigen Bereiche mit sinkender DC/DC-Leistung stark zu, sodass anscheinend von einem möglichen

Sättigungseffekt unterhalb von 450 kW DC/DC-Leistung ausgegangen werden kann. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts ist. Weiterhin führen geringe DC/DC-Leistungen an der HP-Batterie zu einer deutlichen Verringerung der maximalen Netzbezugsleistung.

Im dritten Diagramm ist der Einfluss der Variation der DC/DC-Leistungen an der HE- sowie HP-Batterie auf die maximal aufgetretene Netzbezugsleistung zu sehen. Die Ergebnisse schwanken zwischen 203 kW und 216 kW. Somit scheint die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie einen großen Einfluss zu haben, da eine Variation stets zu weit gestreuten Ergebnissen führt. Die maximale Netzbezugsleistung sinkt mit sinkender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Der betragsmäßige Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie beträgt ca. drei bis sieben Kilowatt und der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ungefähr fünf bis dreizehn Kilowatt. Somit scheint der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie zu sein, was allerdings den Ergebnissen aus Diagramm eins und zwei widerspricht. Zwischen 150 kW und 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie sowie im Bereich von 150 kW bis 450 kW und 600 kW bis 750 kW DC/DC-Leistung an der HP-Batterie hängt die maximale Netzbezugsleistung nahezu ausschließlich von der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie ab. Allerdings sinkt unterhalb von 450 kW DC/DC-Leistung an der HP-Batterie die maximale Netzbezugsleistung mit sinkender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie und steigt oberhalb von 600 kW DC/DC-Leistung an der HP-Batterie mit sinkender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Über alle Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie sowie zwischen 450 kW und 600 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie und im Bereich von 450 kW bis 600 kW DC/DC-Leistung an der HP-Batterie und allen Variationen der HE-Batterie ist die maximale Netzbezugsleistung vorwiegend von der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie abhängig. Somit zeigt sich, dass die DC/DC-Leistungen einen starken Einfluss auf die maximale Netzbezugsleistung haben.

Im vierten Diagramm wird der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie auf die maximal aufgetretene Netzbezugsleistung abgebildet. Diese schwankt zwischen 208 kW und 214 kW. Die Netzbezugsleistung sinkt mit zunehmendem Energieinhalt der HP-Batterie und sinkendem Energieinhalt der HE-Batterie. Dies widerspricht den Ergebnissen aus Diagramm eins, da hier hohe Energieinhalte der HE-Batterie zu niedrigen maximalen Netzbezugsleistungen führen. Der betragsmäßige Anstieg über die Variationen des Energieinhalts der HE-Batterie beträgt ca. ein bis vier Kilowatt und der Anstieg über die Variationen des Energieinhalts der HP-Batterie ein bis vier Kilowatt. Mit der Variation des Energieinhalts an der HE-Batterie ändert sich das Systemverhalten deutlich, während eine Variation des Energieinhalts nur zu



geringen Änderungen im Verhalten führt. Dementsprechend scheinen hohe Energieinhalte der HP-Batterie und niedrige Energieinhalte der HE-Batterie zu einer Verringerung der maximalen Netzbezugsleistung zu führen.

In den Diagrammen wird deutlich, dass die maximale Netzbezugsleistung lediglich über den steigenden Energieinhalt der HP-Batterie und eine sinkende DC/DC-Leistung an der HP-Batterie stets reduziert werden kann. Die einstellbaren Auslegungsparameter der HE-Batterie weisen unterschiedliche Interaktionen zu den anderen Auslegungsparametern auf. Die Ergebnisse aus Diagramm eins und drei zeigen, dass DC/DC-Leistungen von ca. 300 kW und größer sowie Energieinhalte von ungefähr 399 kWh und kleiner an der HE-Batterie zu einer weiteren Verringerung der maximal aufgetretenen Netzbezugsleistung führen.

Abbildung 30 zeigt den Einfluss der Variation verschiedener Auslegungsparameter auf die Summe der Umwandlungsverluste.

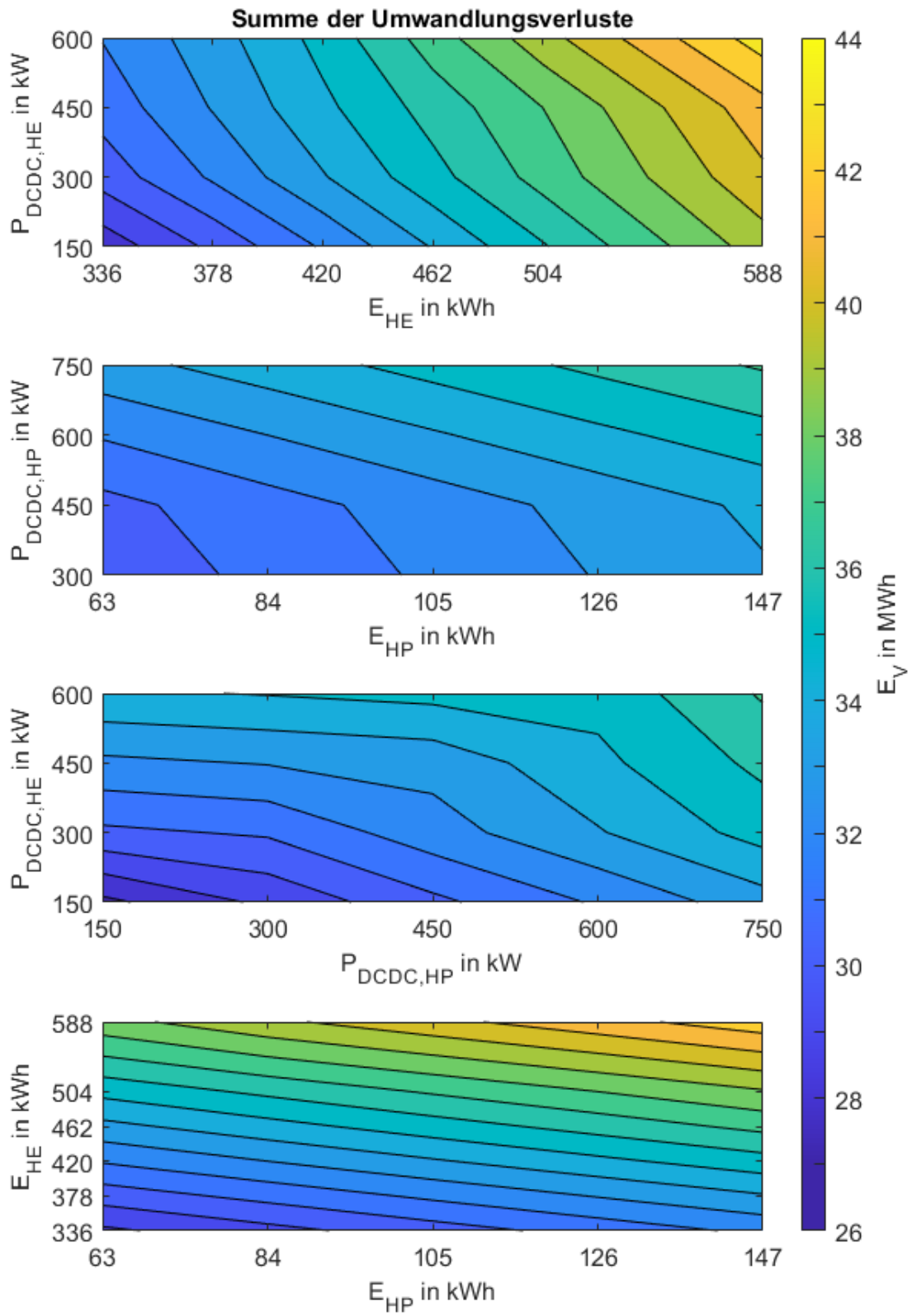


Abbildung 30: Summe der jährlichen Umwandlungsverluste

Im ersten Diagramm ist der Einfluss der Variation des Energieinhalts und der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie auf die Summe der Umwandlungsverluste zu sehen. Die Ergebnisse schwanken zwischen 28 MWh und 43 MWh. Die Umwandlungsverluste steigen sowohl mit steigendem Energieinhalt der HE-Batterie sowie mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Der Anstieg über die Variation der Energieinhalts ist mit ca. elf bis zwölf Megawattstunden deutlich größer als über die Variation der DC/DC-Leistung mit ungefähr vier bis fünf Megawattstunden. Dies erklärt sich wahrscheinlich damit, dass mit steigendem Energieinhalt einerseits mehr der potenziell verfügbaren PV-Energie aufgenommen werden kann und andererseits mehr Energie aus der Batterie zum Eigenverbrauch genutzt werden kann. Somit wird mehr Energie in die Batterien ein- und gespeichert, sodass sich ebenfalls die dabei auftretenden Umwandlungsverluste erhöhen müssen. Mit Variation der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie ändert sich der Einfluss der DC/DC-Leistung und der Einfluss des Energieinhalts stetig. Oberhalb von 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie ändert sich mit Variation des Energieinhalts der Einfluss der DC/DC-Leistung und des Energieinhalts mit nahezu jedem hinzukommenden Batteriestrang und DC/DC-Wandler. Demensprechend kann man sagen, dass hohe Energieinhalte und DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie zu einer Erhöhung der Umwandlungsverluste führen, allerdings der Einfluss des Energieinhalts größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung ist.

Das zweite Diagramm zeigt den Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie auf die Summe der Umwandlungsverluste. Sie schwanken zwischen 30 MWh und 37 MWh, sodass angenommen werden kann, dass Anpassungen an der HE-Batterie einen größeren Einfluss haben als Anpassungen an der HP-Batterie. Die Umwandlungsverluste steigen sowohl mit zunehmendem maximalen Energieinhalt der HP-Batterie sowie mit steigender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Der Anstieg über die Variation des Energieinhalts ist mit ca. drei Megawattstunden ebenso groß wie der Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung mit ungefähr drei Megawattstunden. Bei 450 kW DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ändert sich der Einfluss der beiden Auslegungsparameter. Unter 450 kW ist der Einfluss der DC/DC-Leistung geringer als der Einfluss des Energieinhalts und über 450 kW ist es umgekehrt, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Größe des Einflusses beider von der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie abhängt. Dies kann vermutlich damit erklärt werden, dass sich die DC/DC-Leistung an der HP-Batterie bei weniger als 450 kW unterhalb der Systemleistung befindet, sodass weniger Energie in die Batterie eingespeichert und gespeichert werden kann und damit weniger Umwandlungsverlusten auftreten. Deshalb scheint auch der Einfluss des Energieinhalts hier größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung zu sein. Umgekehrt steigt bei über 450 kW Leistung die Systemleistung im selben Maß wie die DC/DC-Leistung, sodass mehr Energie ein- und gespeichert werden kann.

Damit ist der Einfluss beider Auslegungsparameter nahezu gleich und bleibt mit steigender DC/DC-Leistung konstant.

Im dritten Diagramm ist der Einfluss der Variation der DC/DC-Leistungen an der HE- sowie HP-Batterie auf die Summe der Umwandlungsverluste zu sehen. Die Ergebnisse schwanken zwischen 27 MWh und 37 MWh. Die Umwandlungsverluste steigen sowohl mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie sowie mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie ist mit ca. vier bis sieben Megawattstunden größer als der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie mit ungefähr drei bis sechs Megawattstunden. Somit scheint der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie deutlich größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zu sein. Weiterhin ist zu sehen, dass mit jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler an der HP-Batterie der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie nahezu immer zunimmt und der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie nahezu immer abnimmt. Ebenso verhält es sich mit der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie, da mit jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler an der HE-Batterie der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie nahezu immer zunimmt und der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie nahezu immer abnimmt. Weiterhin ist zu sehen, dass bei weniger als 300 kW DC/DC-Leistung an der HP-Batterie die Umwandlungsverluste nahezu ausschließlich von der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie abhängen. Demensprechend scheinen hohe DC/DC-Leistungen Erhöhung der Umwandlungsverluste zu führen, während sich der Einfluss beider mit jeder Kombination von Leistungen ändert.

Im vierten Diagramm wird der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie auf die Summe der Umwandlungsverluste abgebildet. Sie schwanken zwischen 28 MWh und 44 MW. Somit zeigt sich, dass der maximale Energieinhalt der HE-Batterie einen großen Einfluss hat, da eine Variation stets zu weit gestreuten Ergebnissen führt. Die Umwandlungsverluste steigen mit zunehmendem Energieinhalt beider Batterien, allerdings ist der Anstieg über die Variationen des Energieinhalts der HE-Batterie mit ungefähr zehn bis elf Megawattstunden deutlich größer als über die Variationen der HP-Batterie mit ca. vier bis sechs Megawattstunden.

In den Diagrammen wird deutlich, dass die Summe der jährlichen Umwandlungsverluste über die steigenden Variationen aller variierten Auslegungsparameter zunimmt. Entsprechend den Ergebnissen aus Diagramm eins und vier scheint der Energieinhalt der HE-Batterie den größten Einfluss zu haben. Die andern Auslegungsparameter scheinen, entsprechend den Ergebnissen aus den Diagrammen, alle einen deutlich niedrigeren, allerdings ähnlichen Einfluss zu haben.

In Abbildung 31 ist der Einfluss der Variation verschiedener Auslegungsparameter auf den Selbstversorgungsgrad dargestellt.

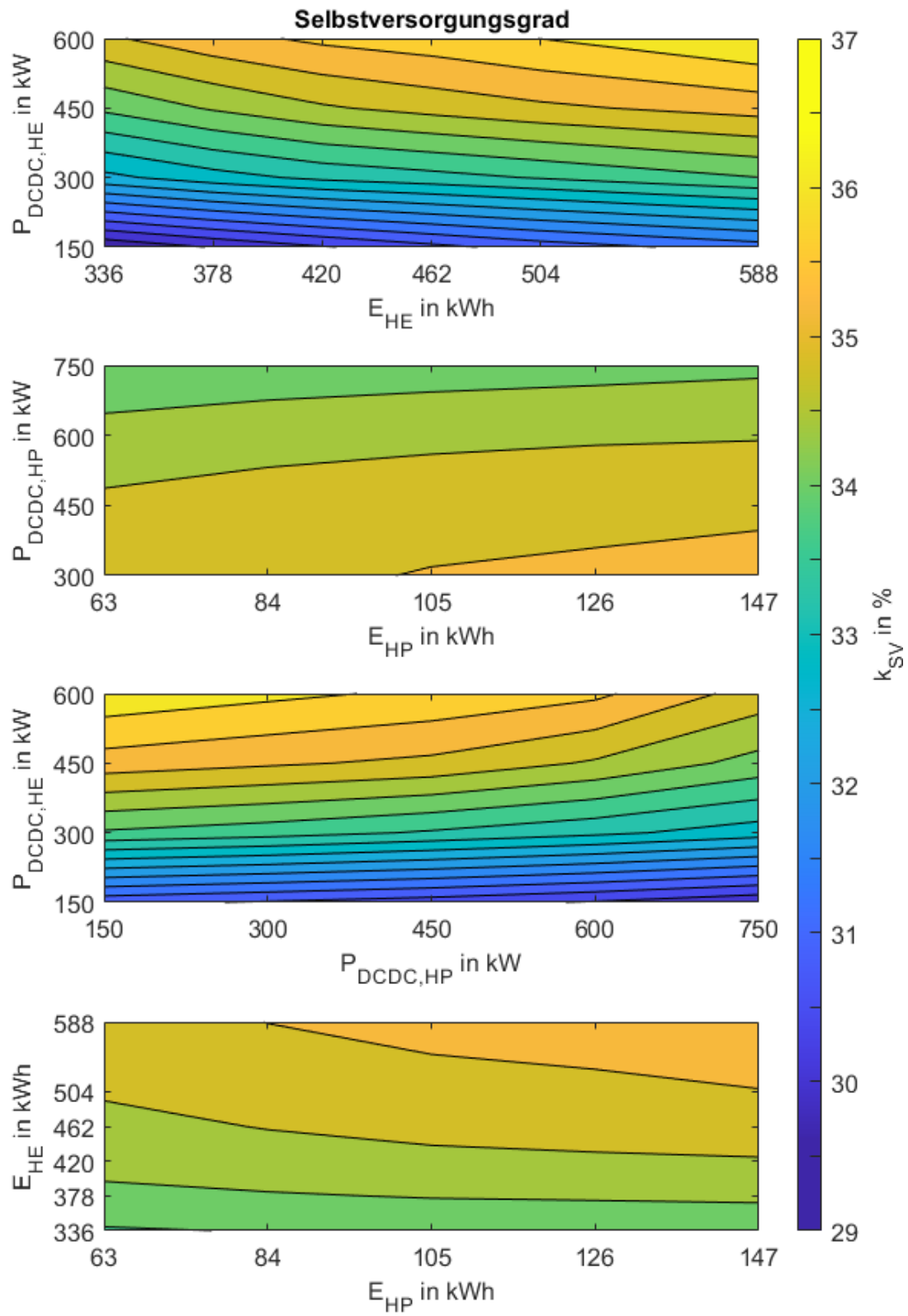


Abbildung 31: Selbstversorgungsgrad

Im ersten Diagramm ist der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie sowie der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie auf den Selbstversorgungsgrad zu sehen. Dieser schwankt zwischen 29 % und 37 %. Der Selbstversorgungsgrad steigt sowohl mit steigendem Energieinhalt der HE-Batterie sowie mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Dies erklärt sich wahrscheinlich damit, dass der maximale Energieinhalt und die DC/DC-Leistung vorgeben, wie viel PV-Leistung und auch Energie in die Batterien eingespeichert werden können. Diese kann dann verwendet werden, um den Netzbezug durch Eigenverbrauch der eingespeicherten PV-Energie zu verringern und somit den Selbstversorgungsgrad zu erhöhen. Die oben genannte Abhängigkeit ist deutlich in Richtung der DC/DC-Leistung verschoben, da der Anstieg des Selbstversorgungsgrades über die Variationen der DC/DC-Leistung mit ca. fünf bis sechs Prozent deutlich größer ist als über die Variationen des Energieinhalts mit lediglich ungefähr zwei Prozent. Allerdings nimmt mit nahezu jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler an der HE-Batterie der Einfluss der DC/DC-Leistung ab und der Einfluss des Energieinhalts zu. Mit zunehmendem Selbstversorgungsgrad steigt die Größe der farbigen Bereiche, allerdings ist dieser Anstieg sehr gering, sodass davon ausgegangen werden kann, dass Selbstversorgungsgrade von mehr als 37 % erreichbar sind. Demensprechend kann man sagen, dass hohe Energieinhalte und DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie zu einer signifikanten Erhöhung des Selbstversorgungsgrades führen, allerdings der Einfluss der DC/DC-Leistung bei der HE-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts ist.

Das zweite Diagramm zeigt den Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie auf den Selbstversorgungsgrad. Er schwankt zwischen 34 % und 35,5 % sodass wie bereits bei einigen vorherigen Bewertungskriterien angenommen werden kann, dass Anpassungen an der HE-Batterie einen deutlich größeren Einfluss haben als Anpassungen an der HP-Batterie. Der Selbstversorgungsgrad steigt mit zunehmendem maximalen Energieinhalt der HP-Batterie und abnehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Allerdings sinkt der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie mit nahezu jedem hinzukommenden Batteriestrang. Im selben Zusammenhang steigt der Einfluss der DC/DC-Leistung. Der Einfluss der DC/DC-Leistung scheint größer zu sein, da der Anstieg des Selbstversorgungsgrades über die Variationen der DC/DC-Leistung mit einem bis anderthalb Prozent größer ist als über die Variationen des Energieinhalts mit maximal einem halben Prozent.

Im dritten Diagramm ist der Einfluss der Variation der DC/DC-Leistung an der HE- sowie HP-Batterie auf den Selbstversorgungsgrad zu sehen. Die Ergebnisse schwanken zwischen 30 % und 36 %. Somit zeigt sich, dass die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie einen großen Einfluss hat, da eine Variation stets zu weit gestreuten Ergebnissen führt. Der Selbstversorgungsgrad steigt mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie und

abnehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie ist mit ca. vier bis fünf Prozent größer als der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie mit ca. ein bis zwei Prozent. Somit scheint der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie ähnlich dem Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zu sein. Im Bereich von 150 kW bis 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie wird der Selbstversorgungsgrad fast ausschließlich durch eine Anpassung der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie beeinflusst. Oberhalb von 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie steigt der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie mit nahezu jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler an der HP-Batterie. Im selben Zusammenhang sinkt der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Demensprechend scheinen hohe DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie zu einer signifikanten Erhöhung des Selbstversorgungsgrades zu führen, während niedrige DC/DC-Leistungen an der HP-Batterie nur zu einer geringen Erhöhung führen.

Im vierten Diagramm wird der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie auf den Selbstversorgungsgrad abgebildet. Dieser schwankt zwischen 33 % und 35,5 %. Der Selbstversorgungsgrad steigt mit zunehmendem Energieinhalt beider Batterien, allerdings ist der Anstieg über die Variationen des Energieinhalts der HE-Batterie mit ca. vier bis fünf Prozent größer als über die Variationen der HP-Batterie mit ungefähr zwei Prozent. Mit nahezu jedem hinzukommenden Batteriestrang an der HP-Batterie steigt der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie und sinkt der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Diagramm zwei scheinen der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie und der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie gleich groß zu sein.

In den Diagrammen wird deutlich, dass der Selbstversorgungsgrad mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie, steigendem Energieinhalt der HE-Batterie, steigendem Energieinhalt der HP-Batterie und sinkender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zunimmt. Die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie scheint den größten Einfluss zu haben und darauffolgend der Energieinhalt der HE-Batterie sowie die DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Den niedrigsten Einfluss scheint der Energieinhalt der HP-Batterie zu haben, da entsprechend den Ergebnissen aus Diagramm zwei und vier, der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ähnlich dem Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie ist, welche jeweils größer als der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie sind.

Abbildung 32 zeigt den Einfluss der Variation verschiedener Auslegungsparameter auf die Summe der jährlichen Netzbezugskosten.



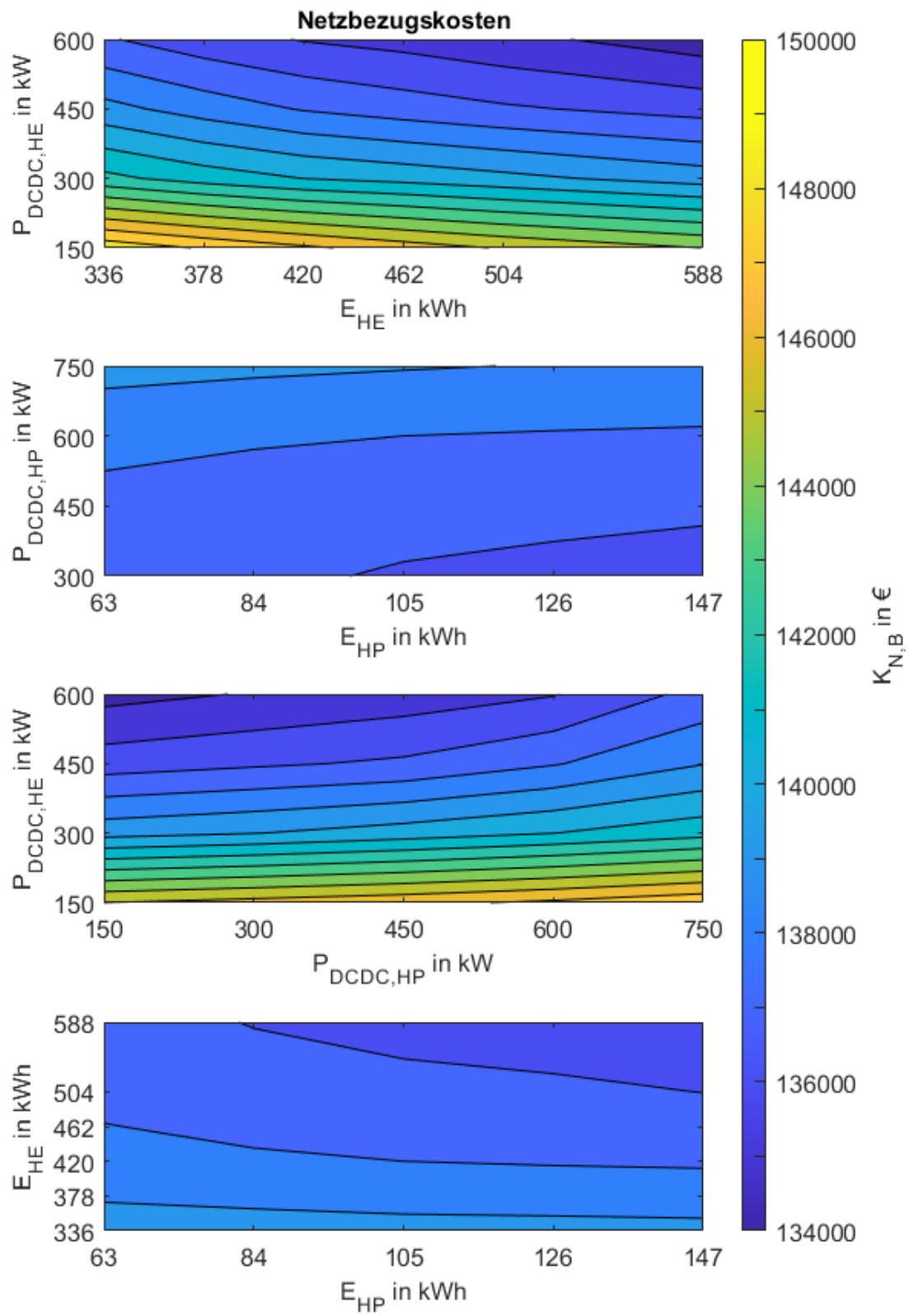


Abbildung 32: Summe der jährlichen Netzbezugskosten

Die Diagramme weisen eine sehr große Ähnlichkeit zu denen des Selbstversorgungsgrades auf.

Im ersten Diagramm ist der Einfluss der Variation des Energieinhalts und der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie auf die Netzbezugskosten zu sehen. Die Ergebnisse schwanken zwischen 134000 € und 149000 €. Die Netzbezugskosten sinken sowohl mit steigendem Energieinhalt der HE-Batterie sowie mit steigender DC/DC-Leistung. Dies erklärt sich wahrscheinlich damit, dass der maximale Energieinhalt und die DC/DC-Leistung entscheiden, wie viel der generierten PV-Energie eingespeichert werden kann. Diese kann dann verwendet werden, um den Netzbezug durch Eigenverbrauch der eingespeicherten PV-Energie zu verringern und somit die Netzbezugskosten erheblich zu senken. Wie bereits beim Selbstversorgungsgrad und einigen weiteren Bewertungskriterien scheint die oben genannte Abhängigkeit deutlich in Richtung der DC/DC-Leistung verschoben zu sein. Der betragsmäßige Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung ist mit ca. 9000 € bis 12000 € deutlich größer als über die Variation des Energieinhalts mit ungefähr 3000 € bis 6000 €. Weiterhin nimmt mit nahezu jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler der Einfluss der DC/DC-Leistung ab und der Einfluss des Energieinhalts zu. Es ist ein geringer Anstieg der Größe der farbigen Bereiche zu sehen, sodass davon ausgegangen werden kann, dass niedrigere Strombezugskosten als 134000 € erreichbar sind. Demensprechend kann man sagen, dass hohe Energieinhalte und DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie zu einer signifikanten Verringerung der Netzbezugskosten führen, allerdings der Einfluss der DC/DC-Leistung bei der HE-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts ist.

Das zweite Diagramm zeigt den Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie auf die Netzbezugskosten. Sie schwanken zwischen 136000 € und 140000 €, sodass angenommen werden kann, dass Anpassungen an der HE-Batterie einen größeren Einfluss haben als Anpassungen an der HP-Batterie. Die Netzbezugskosten sinken mit zunehmendem maximalen Energieinhalt der HP-Batterie und abnehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie, allerdings sinkt der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie mit nahezu jedem hinzukommenden Batteriestrang. Im selben Zusammenhang steigt der Einfluss der DC/DC-Leistung. Der betragsmäßige Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ist mit ca. 2000 € bis 4000 € größer als der Anstieg über die Variationen des Energieinhalts mit maximal 1000 €. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der DC/DC-Leistung bei der HP-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts ist.

Im dritten Diagramm ist der Einfluss der Variation der DC/DC-Leistungen an der HE- sowie HP-Batterie auf die Netzbezugskosten zu sehen. Die Ergebnisse schwanken zwischen 134000 € und 148000 €. Somit zeigt sich, dass die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie einen großen Einfluss hat, da eine Variation stets zu weit gestreuten Ergebnissen führt. Die

Netzbezugskosten sinken mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie und abnehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Der betragsmäßige Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie ist mit ca. 9000 € bis 11000 € größer als der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie mit ca. 2000 € bis 4000 €. Somit scheint der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie etwas größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zu sein. Im Bereich von 150 kW bis 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie werden die Netzbezugskosten fast ausschließlich durch eine Anpassung der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie beeinflusst. Oberhalb von 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie steigt der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie mit nahezu jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler an der HP-Batterie. Im selben Zusammenhang sinkt der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Demensprechend scheinen hohe DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie zu einer signifikanten Verringerung der Netzbezugskosten zu führen, während niedrige DC/DC-Leistungen an der HP-Batterie nur zu einer geringen Verringerung führen.

Im vierten Diagramm wird der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie auf die Netzbezugskosten abgebildet. Diese schwanken zwischen 136000 € und 140000 €. Die Netzbezugskosten sinken mit zunehmendem Energieinhalt beider Batterien, allerdings ist der betragsmäßige Anstieg über die Variationen des Energieinhalts der HE-Batterie mit ca. 2000 € bis 4000 € größer als über die Variationen der HP-Batterie mit maximal 1000 €. Der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie steigt mit nahezu jedem hinzukommenden Batteriestrang an der HP-Batterie. Im selben Zusammenhang sinkt der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie. Entgegen den Ergebnissen aus Diagramm drei scheinen der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie und der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie im vorliegenden Diagramm ähnlich zu sein.

In den Diagrammen wird deutlich, dass die Summe der jährlichen Netzbezugskosten mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie, steigendem Energieinhalt der HE-Batterie, steigendem Energieinhalt der HP-Batterie und sinkender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie abnimmt. Die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie scheint den größten Einfluss zu haben und darauffolgend der Energieinhalt der HE-Batterie und darauffolgend die DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Den niedrigsten Einfluss scheint der Energieinhalt der HP-Batterie zu haben, da entsprechend den Ergebnissen aus Diagramm zwei und vier der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie kleiner als der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie und kleiner als der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ist.

Wie bereits zu Beginn angemerkt, ist eine deutliche Ähnlichkeit zwischen den Diagrammen des Selbstversorgungsgrades und der Netzbezugskosten erkennbar. Dies erklärt sich damit, dass beide als einzigen veränderlichen Parameter in ihrer Berechnungsgleichung die

Netzbezugsleistung  $P_{N,B}$  haben. Lediglich das Vorzeichen ist umgekehrt, sodass beispielsweise bei steigendem Selbstversorgungsgrad die Netzbezugskosten sinken.

Abbildung 33 zeigt den Einfluss der Variation verschiedener Auslegungsparameter auf die Summe der jährlichen Einspeisevergütungen.

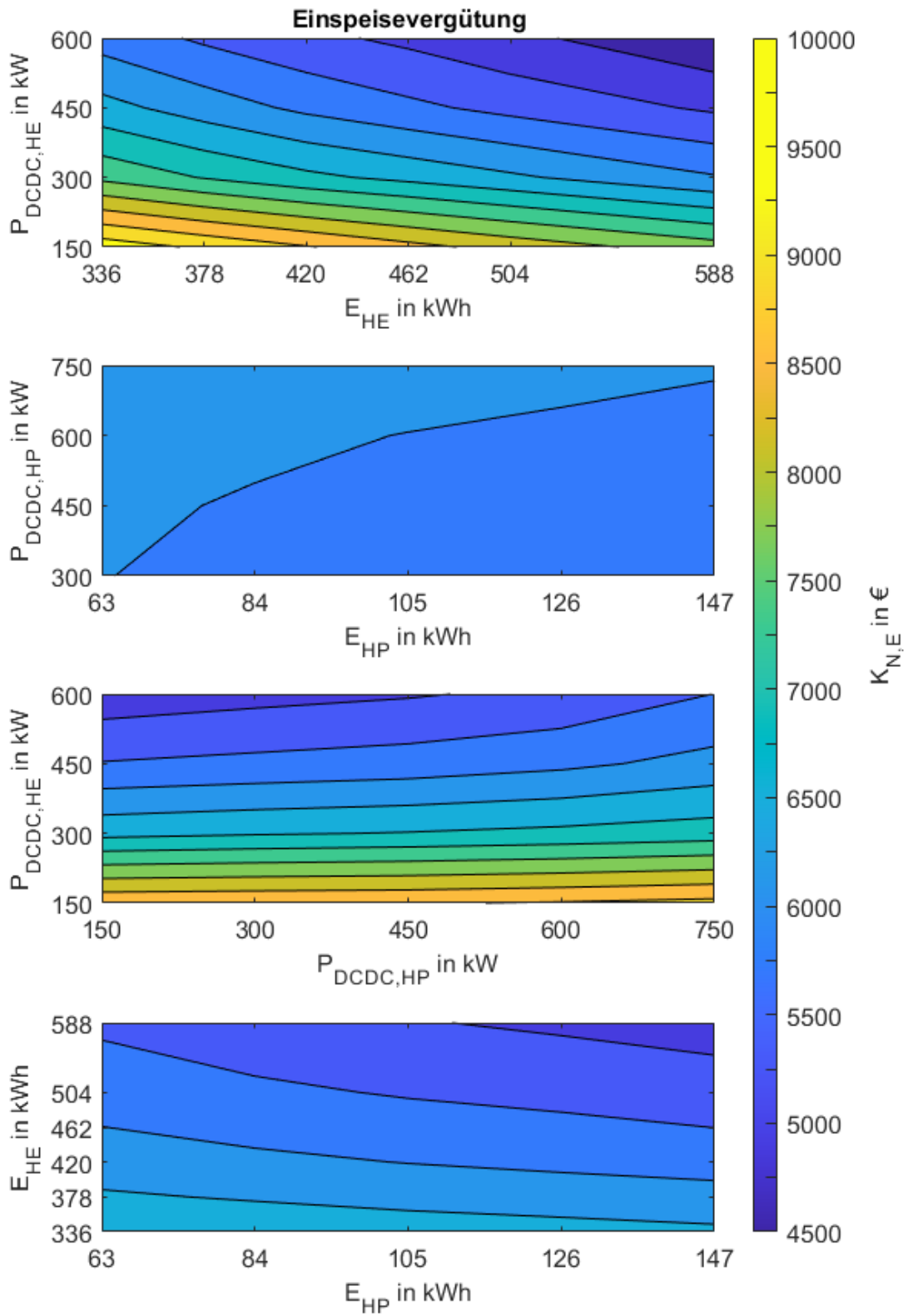


Abbildung 33: Summe der jährlichen Einspeisevergütungen

Erneut ist eine sehr große Ähnlichkeit zu den Diagrammen des Selbstversorgungsgrades und der Summe der jährlichen Netzbezugskosten erkennbar. Allerdings ist auch eine sehr große Ähnlichkeit zum Eigenverbrauchsgrad erkennbar.

Im ersten Diagramm ist der Einfluss der Variation des Energieinhalts und der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie auf die Summe der jährlichen Einspeisevergütungen zu sehen. Die Ergebnisse schwanken zwischen 5000 € und 9600 €. Die Summe der Einspeisevergütungen sinkt sowohl mit steigendem Energieinhalt der HE-Batterie sowie mit steigender DC/DC-Leistung. Dies erklärt sich wahrscheinlich damit, dass der maximale Energieinhalt und besonders die DC/DC-Leistung vorgeben, wie viel der generierten PV-Energie eingespeichert werden kann. Somit kann mehr PV-Energie eingespeichert werden und es wird weniger ins Netz eingespeist, sodass die Summe der Einspeisevergütungen sinkt. Wie bereits beim Selbstversorgungsgrad und einigen weiteren Bewertungskriterien scheint die oben genannte Abhängigkeit deutlich in Richtung der DC/DC-Leistung verschoben zu sein. Der betragsmäßige Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung ist mit ca. 3000 € bis 3500 € größer als über die Variation des Energieinhalts mit ungefähr 1000 € bis 1500 €. Weiterhin nimmt mit nahezu jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler der Einfluss der DC/DC-Leistung ab und der Einfluss des Energieinhalts zu. Es ist ein geringer Anstieg der Größe der farbigen Bereiche zu sehen, sodass davon ausgegangen werden kann, dass eine niedrigere Summe der Einspeisevergütungen als 5000 € möglich ist. Demensprechend kann man sagen, dass hohe Energieinhalte und DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie zu einer Verringerung der Summe der Einspeisevergütungen führen, allerdings der Einfluss der DC/DC-Leistung bei der HE-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts ist.

Das zweite Diagramm zeigt den Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie auf die Summe der jährlichen Einspeisevergütungen. Sie schwankt zwischen 5700 € und 6500 €, sodass angenommen werden kann, dass Anpassungen an der HE-Batterie einen größeren Einfluss haben als Anpassungen an der HP-Batterie. Die Summe der Einspeisevergütungen sinkt mit zunehmendem maximalen Energieinhalt der HP-Batterie und abnehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Weiterhin steigt der Einfluss der DC/DC-Leistung mit nahezu jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler und Batteriestrang an der HP-Batterie. Im selben Zusammenhang sinkt der Einfluss des Energieinhalts. Der betragsmäßige Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ist mit ca. 500 € größer als der Anstieg über die Variationen des Energieinhalts mit maximal 500 €. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der DC/DC-Leistung bei der HP-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts ist.

Im dritten Diagramm ist der Einfluss der Variation der DC/DC-Leistungen an der HE- sowie HP-Batterie auf die Summe der jährlichen Einspeisevergütungen zu sehen. Die Ergebnisse

schwanken zwischen 5000 € und 9000 €. Somit zeigt sich, dass die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie einen großen Einfluss hat, da eine Variation stets zu weit gestreuten Ergebnissen führt. Die Summe der Einspeisevergütungen sinkt mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie und abnehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Der betragsmäßige Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie ist mit ca. 2750€ bis 3750 € größer als der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie mit ca. 250 € bis 1000 €. Somit scheint der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zu sein. Im Bereich von 150 kW bis 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie wird die Summe der Einspeisevergütungen fast ausschließlich durch eine Anpassung der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie beeinflusst. Oberhalb von 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie steigt der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie mit nahezu jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler an der HP-Batterie. Im selben Zusammenhang sinkt der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Demensprechend scheinen hohe DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie zu einer signifikanten Verringerung der Summe der Einspeisevergütungen zu führen, während niedrige DC/DC-Leistungen an der HP-Batterie nur zu einer geringen Verringerung führen.

Im vierten Diagramm wird der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie auf die Summe der jährlichen Einspeisevergütungen abgebildet. Diese schwankt zwischen 5100 € und 6900 €. Die Summe der Einspeisevergütungen sinkt mit zunehmendem Energieinhalt beider Batterien, allerdings ist der betragsmäßige Anstieg über die Variationen des Energieinhalts der HE-Batterie mit ca. 1000 € bis 1500 € größer als über die Variationen der HP-Batterie mit maximal 500 €. Mit nahezu jedem hinzukommenden Batteriestrang an der HP-Batterie steigt der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie und sinkt der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie. Weiterhin steigt mit nahezu jedem hinzukommenden Batteriestrang an der HE-Batterie der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie und sinkt der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie. Entsprechend den Ergebnissen aus Diagramm drei scheint der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zu sein.

In den Diagrammen wird deutlich, dass die Summe der jährlichen Einspeisevergütungen mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie, steigendem Energieinhalt der HE-Batterie, steigendem Energieinhalt der HP-Batterie und sinkender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie abnimmt. Die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie scheint den größten Einfluss zu haben und darauffolgend der Energieinhalt der HE-Batterie. Darauffolgend der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie, da er entsprechend den Ergebnissen aus Diagramm zwei und vier geringer als der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie ist. Den

niedrigsten Einfluss scheint der Energieinhalt der HP-Batterie zu haben, da entsprechend den Ergebnissen aus Diagramm zwei und vier der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie kleiner als der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie und kleiner als der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ist.

Wie bereits zu Beginn angemerkt, ist eine deutliche Ähnlichkeit zwischen den Diagrammen des Eigenverbrauchsgrades und der Summe der jährlichen Einspeisevergütungen erkennbar. Dies erklärt sich damit, dass beide als einzigen veränderlichen Parameter in ihrer Berechnungsgleichung die Einspeiseleistung  $P_{N,E}$  haben. Lediglich das Vorzeichen ist umgekehrt, sodass beispielsweise bei steigendem Eigenverbrauchsgrad die Summe der Einspeisevergütungen sinkt.

In Abbildung 34 ist der Einfluss der Variation verschiedener Auslegungsparameter auf die Investitionskosten dargestellt.



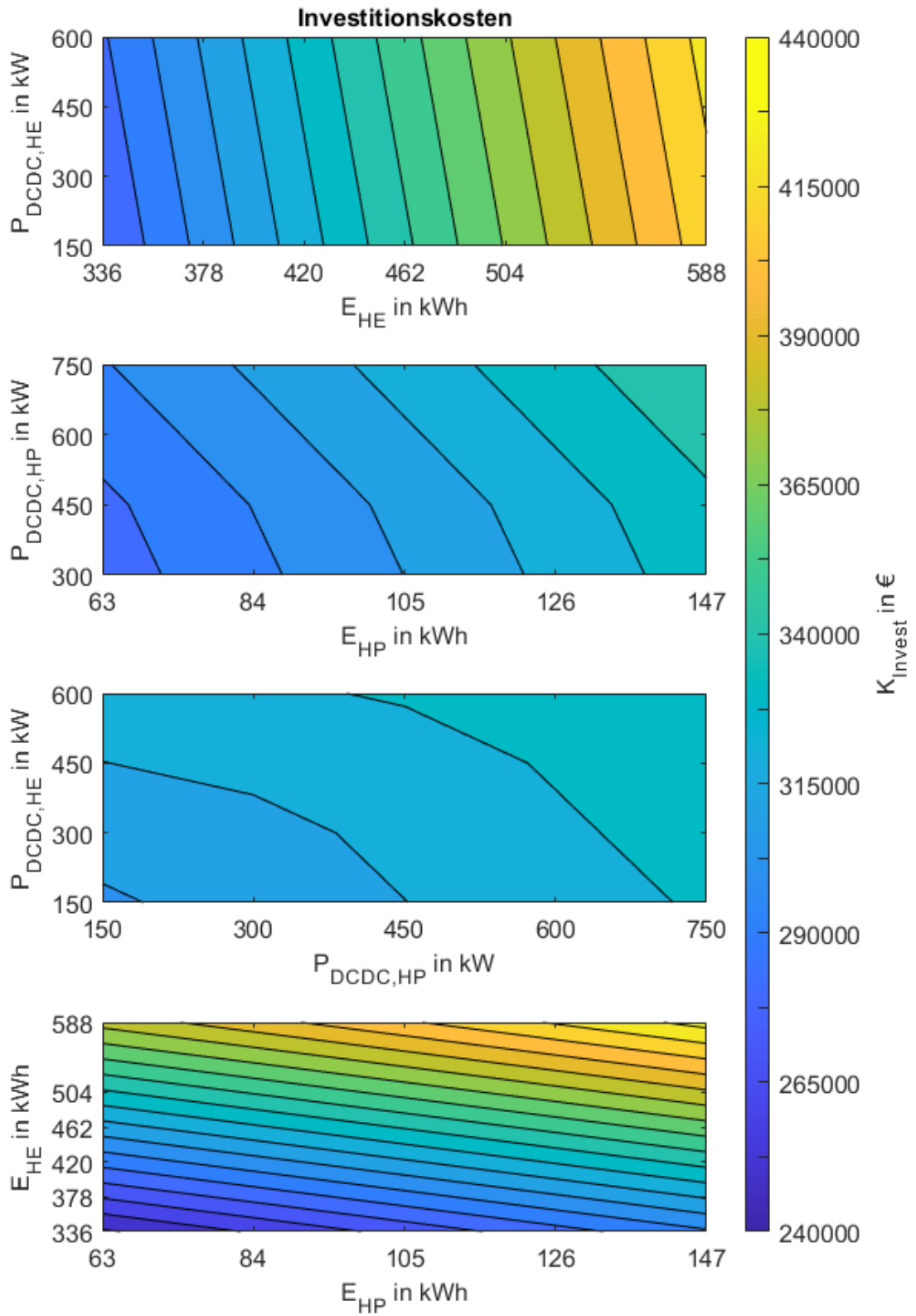


Abbildung 34: Summe der Investitionskosten

Im ersten Diagramm ist der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie sowie der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie auf die Investitionskosten zu sehen. Diese schwanken zwischen 280000 € und 425000 €. Die Investitionskosten steigen sowohl mit steigendem Energieinhalt der HE-Batterie sowie mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Der Energieinhalt scheint den deutlich größeren Einfluss zu haben, da der Anstieg über die Variationen des Energieinhalts mit ca. 100000 € bis 110000 € deutlich größer ist als über die Variationen der DC/DC-Leistung mit maximal 20000 €. Dies erklärt sich damit, dass die Kosten für jeden Batteriestrang an der HE-Batterie mit 11250 € deutlich größer als für jeden DC/DC-Wandler mit 2742 € als auch für jeden AC/DC-Wandler mit 2964 € sind. Weiterhin variiert die Anzahl der Batteriestränge auch deutlich stärker als die Anzahl an Wandlern. Demensprechend kann man sagen, dass hohe Energieinhalte und DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie zu einer Erhöhung der Investitionskosten führen, allerdings der Einfluss des Energieinhalts bei der HE-Batterie deutlich größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung ist.

Das zweite Diagramm zeigt den Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie auf die Investitionskosten. Sie schwanken zwischen 285000 € und 350000 €, sodass angenommen werden kann, dass Anpassungen an der HE-Batterie einen deutlich größeren Einfluss haben als Anpassungen an der HP-Batterie. Dies erklärt sich damit, dass über die Variationen des Energieinhalts der HE-Batterie deutlich mehr Batteriestränge hinzukommen, als es bei der HP-Batterie der Fall ist. Zwar sind die Batteriestränge der HP-Batterie mit 12500 € etwas teurer als bei der HE-Batterie, allerdings erhöht sich die Anzahl der Batteriestränge bei der HE-Batterie um zwölf, während sie sich bei der HP-Batterie lediglich um vier Stränge erhöht. Die Investitionskosten steigen sowohl mit zunehmendem maximalen Energieinhalt der HP-Batterie sowie mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Der Anstieg der Investitionskosten über die Variationen des Energieinhalts der HP-Batterie ist mit ca. 40000 € deutlich größer als über die Variationen der DC/DC-Leistung mit ca. 12500 €. Weiterhin ändert sich der Einfluss beider variierten Auslegungsparameter bei 450 kW DC/DC-Leistung, sodass bei höheren Leistungen als 450 kW der Einfluss des Energieinhalts abnimmt und der Einfluss der DC/DC-Leistung zunimmt. Dies erklärt sich damit, dass bei DC/DC-Leistungen größer als 450 kW mit jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler ebenfalls die Systemleistung ansteigt. Somit erhöht sich der Anstieg der Investitionskosten ab 600 kW DC/DC-Leistung von 2742 € auf 5706 € pro 150 kW, da neben einem DC/DC-Wandler zusätzlich ein neuer AC/DC-Wandler eingebaut wird. Trotzdem kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung ist. Im dritten Diagramm ist der Einfluss der Variation der DC/DC-Leistungen an der HE- sowie HP-Batterie auf die Investitionskosten zu sehen. Die Ergebnisse schwanken zwischen

308000 € und 340000 €. Die Investitionskosten steigen mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HE- und HP-Batterie. Der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ist mit ca. 20000 € bis 30000 € größer als der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie mit maximal 20000 €. Weiterhin ist zu sehen, dass sich der Einfluss der variierten Auslegungsparameter ändert, sobald die DC/DC-Leistungen an den Batterien nicht denselben Wert besitzen. Dies kann erneut damit erklärt werden, dass es zu einer Erhöhung des Anstiegs der Investitionskosten kommt, sobald eine DC/DC-Leistung größer als die andere ist, da sich die Systemleistung stets an der größten DC/DC-Leistung orientiert. Entsprechend den Ergebnissen aus Diagramm eins und drei, ist der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Weiterhin kann man sagen, dass hohe DC/DC-Leistungen an der HE- und HP-Batterie zu einer Erhöhung der Investitionskosten führen und deren Einfluss abhängig vom Verhältnis zueinander ist.

Im vierten Diagramm wird der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie auf die Investitionskosten abgebildet. Diese schwanken zwischen 249000 € und 434000€. Somit zeigt sich, dass der Energieinhalt der HE-Batterie einen großen Einfluss hat, da eine Variation stets zu weit gestreuten Ergebnissen führt. Die Investitionskosten steigen mit zunehmendem Energieinhalt beider Batterien, allerdings ist der Anstieg über die Variationen des Energieinhalts der HE-Batterie mit ca. 90000 € bis 110000 € größer als über die Variationen der HP-Batterie mit ungefähr 30000 € bis 40000 €. Somit zeigt sich, dass der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie ist, da bei der HE-Batterie über eine deutlich größere Anzahl an Batteriesträngen variiert wird.

In den Diagrammen wird deutlich, dass die Investitionskosten mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie, steigendem Energieinhalt der HE-Batterie, steigendem Energieinhalt der HP-Batterie und steigender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zunehmen. Die Energieinhalte der Batterien haben den größten relativen Einfluss und darauffolgend die DC/DC-Leistungen. Die DC/DC-Leistungen haben den geringeren relativen Einfluss, da die Anschaffungskosten für DC/DC- und AC/DC-Wandler deutlich geringer als für die Batteriestränge sind. Als relativer Einfluss wird der Einfluss der Variation eines Auslegungsparameters auf das Bewertungskriterium je hinzukommendem DC/DC-Wandler oder Batteriestrang bezeichnet. Betrachtet man die absoluten Einflüsse, also den Einfluss über alle Variationen der Auslegungsparameter, wird deutlich, dass der Energieinhalt der HE-Batterie den größten Einfluss hat und darauffolgend der Energieinhalt der HP-Batterie. Die DC/DC-Leistungen der Batterien haben nahezu denselben Einfluss,

allerdings scheint der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie etwas größer zu sein, da über eine größere Anzahl an DC/DC-Wandlern variiert wird.

In Abbildung 35 ist der Einfluss der Variation verschiedener Auslegungsparameter auf die Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HE-Batterie dargestellt.

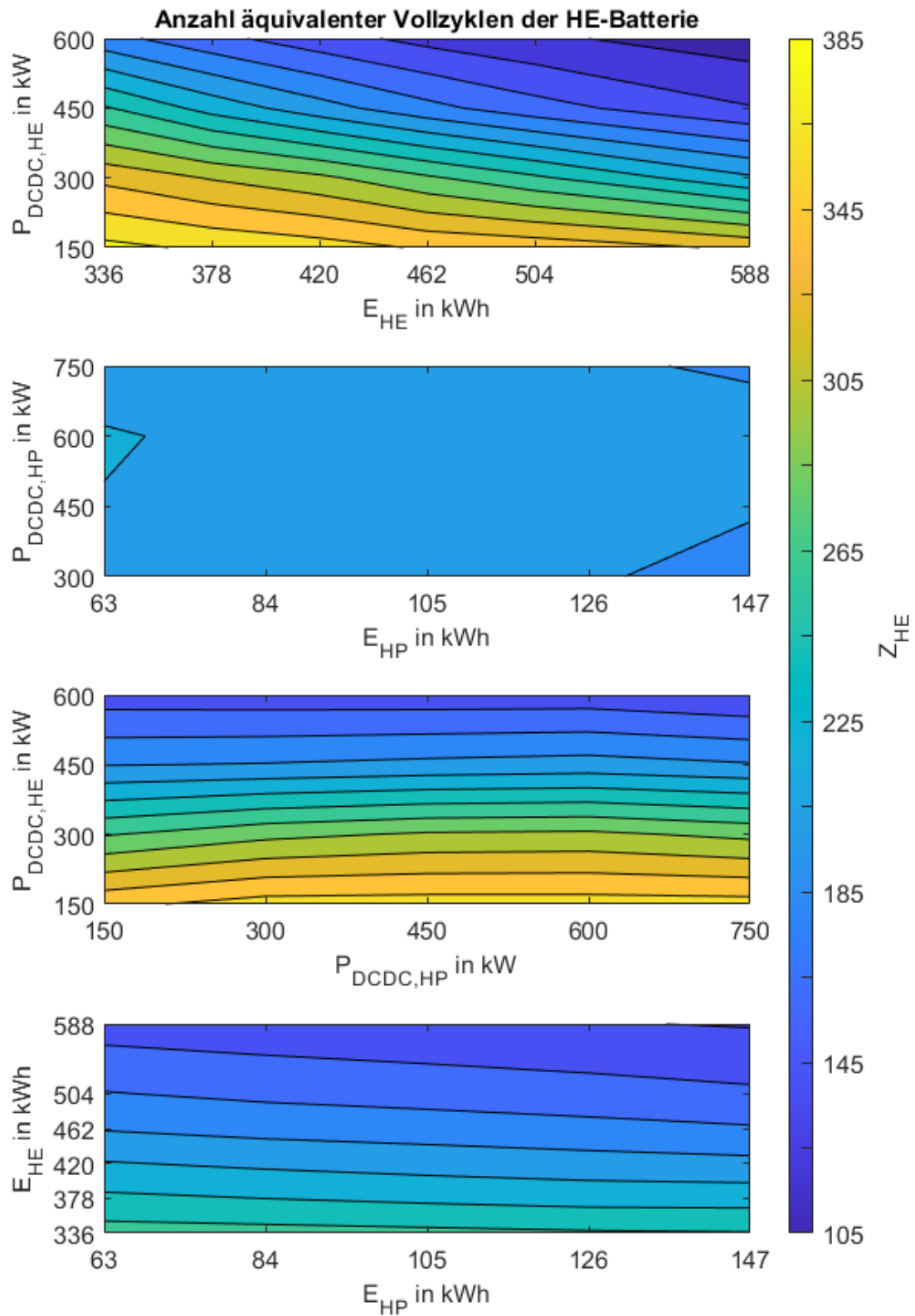


Abbildung 35: Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HE-Batterie

Im ersten Diagramm ist der Einfluss der Variation des Energieinhalts und der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie auf die Anzahl der äquivalenten Vollzyklen der HE-Batterie zu sehen. Sie schwankt zwischen 109 und 385. Die Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HE-Batterie sinkt sowohl mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie sowie mit steigendem Energieinhalt der HE-Batterie. Der betragsmäßige Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung ist mit ca. 200 bis 215 deutlich größer als der Anstieg über die Variation des Energieinhalts mit ungefähr 60 bis 75. Die Verringerung aufgrund des steigenden maximalen Energieinhalts ist darin begründet, dass mehr Energie benötigt wird, um die Batterie voll zu beladen, sodass für einen äquivalenten Vollzyklus mehr Energie benötigt wird. Weiterhin ändert sich ab 450 kW DC/DC-Leistung der Anstieg, sodass der Einfluss des Energieinhalts zunimmt und der Einfluss der DC/DC-Leistung abnimmt. Dies könnte im Zusammenhang mit der Erhöhung der Systemleistung stehen, da ab 600 kW DC/DC-Leistung eine Erhöhung der DC/DC-Leistung ebenfalls zu einer Erhöhung der Systemleistung führt. Weiterhin nimmt oberhalb von 450 kW DC/DC-Leistung und 420 kWh maximalem Energieinhalt der HE-Batterie die Größe der farbigen Bereiche zu, sodass von einem beginnenden Sättigungseffekt ausgegangen werden kann. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass niedrigere Zyklenzahlen als 109 möglich sind. Somit scheinen hohe DC/DC-Leistungen und hohe Energieinhalte an der HE-Batterie zu einer deutlichen Verringerung der Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HE-Batterie zu führen, allerdings ist der Einfluss der DC/DC-Leistung deutlich größer als der Einfluss des Energieinhalts.

Das zweite Diagramm zeigt den Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie auf die Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HE-Batterie. Die Ergebnisse schwanken zwischen 196 und 222, sodass angenommen werden kann, dass Anpassungen an der HE-Batterie einen größeren Einfluss haben als Anpassungen an der HP-Batterie. Dies ist zu erwarten, da die Auslegungsparameter der HP-Batterie keinen direkten Einfluss auf die HE-Batterie haben. Die Anzahl äquivalenter Vollzyklen sinkt mit zunehmendem maximalen Energieinhalt der HP-Batterie. Oberhalb von 600 kW DC/DC-Leistung an der HP-Batterie sinkt die Anzahl äquivalenter Vollzyklen mit steigender DC/DC-Leistung, während sie unterhalb von 600 kW DC/DC-Leistung mit zunehmender DC/DC-Leistung zunimmt. Der betragsmäßige Anstieg über die Variation des Energieinhalts beträgt ca. 20 bis 40 und der Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung beträgt maximal 20. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Auslegungsparameter der HP-Batterie deutlich geringer als der Einfluss der Auslegungsparameter der HE-Batterie ist.

Im dritten Diagramm ist der Einfluss der Variation der DC/DC-Leistungen an der HE- sowie HP-Batterie auf die Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HE-Batterie zu sehen. Die Ergebnisse schwanken zwischen 141 und 370. Somit scheint die DC/DC-Leistung an der

HE-Batterie einen großen Einfluss zu haben, da eine Variation stets zu weit gestreuten Ergebnissen führt. Die Anzahl äquivalenter Vollzyklen sinkt mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Der betragsmäßige Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie beträgt ca. 200 bis 220 und der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie beträgt maximal 20. Somit scheint der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie deutlich größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zu sein. Oberhalb von 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie sowie zwischen 300 kW und 600 kW an der HP-Batterie hängt die Anzahl äquivalenter Vollzyklen an der HE-Batterie nahezu ausschließlich von der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie ab. Im Bereich von 150 kW bis 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie sowie 150 kW bis 300 kW an der HP-Batterie steigt die Anzahl äquivalenter Vollzyklen mit steigendem Energieinhalt der HP-Batterie. Weiterhin sinkt die Anzahl äquivalenter Vollzyklen im Bereich von 300 kW bis 600 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie sowie 600 kW bis 750 kW an der HP-Batterie mit steigendem Energieinhalt der HP-Batterie. Somit bestätigt sich die Annahme aus Diagramm zwei, dass der Einfluss der Auslegungsparameter der HE-Batterie deutlich größer als der Einfluss der Auslegungsparameter der HP-Batterie ist.

Im vierten Diagramm wird der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie auf die Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HE-Batterie abgebildet. Sie schwankt zwischen 138 und 269. Die Anzahl äquivalenter Vollzyklen sinkt mit zunehmendem Energieinhalt der HP- und HE-Batterie. Der betragsmäßige Anstieg über die Variationen des Energieinhalts der HE-Batterie ist mit ca. 120 deutlich größer als der Anstieg über die Variationen des Energieinhalts der HP-Batterie mit ungefähr 20. Dementsprechend scheinen hohe Energieinhalte der HP- und HE-Batterie zu einer Verringerung der Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HE-Batterie zu führen, allerdings ist der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie deutlich größer als der Einfluss der HP-Batterie.

In den Diagrammen wird deutlich, dass die Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HE-Batterie sehr stark von der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie abhängt. Sie sinkt mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie sowie zunehmendem Energieinhalt der HE- und HP-Batterie. Allerdings ist der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie deutlich größer als der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie, welcher wiederum deutlich größer als der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie ist. Der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ist am geringsten und ändert sich über die eigenen Variationen. Somit zeigt sich, dass die Auslegungsparameter der HE-Batterie den größten Einfluss auf die Anzahl der äquivalenten Vollzyklen der HE-Batterie haben. Dies ist zu erwarten, da die Auslegungsparameter der HP-Batterie keinen direkten Einfluss auf die HE-Batterie haben.

Abbildung 36 zeigt den Einfluss der Variation verschiedener Auslegungsparameter auf die Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HP-Batterie.



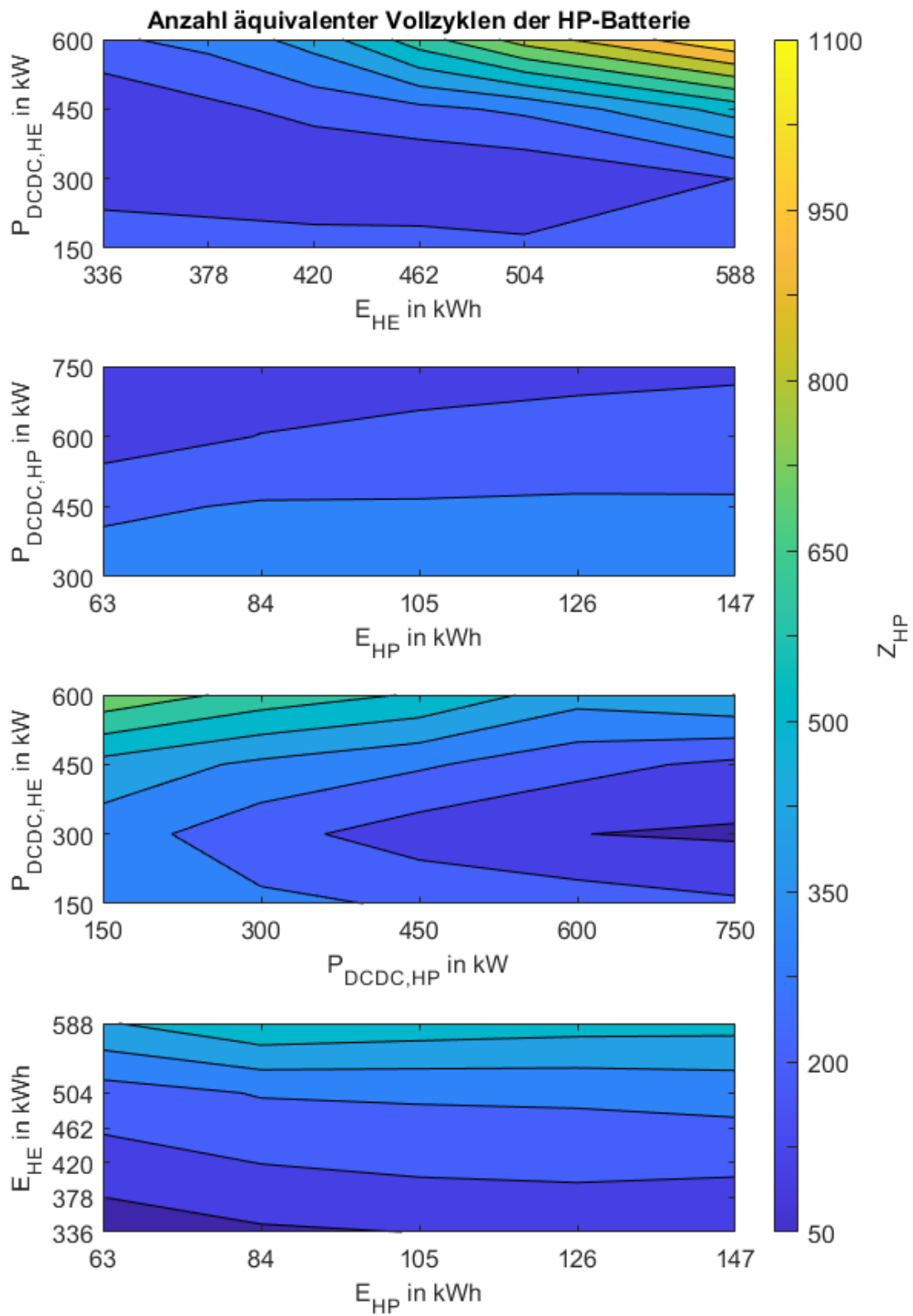


Abbildung 36: Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HP-Batterie

Im ersten Diagramm ist der Einfluss der Variation des Energieinhalts der HE-Batterie und der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie auf die Anzahl der äquivalenten Vollzyklen der HP-Batterie zu sehen. Sie schwankt zwischen 101 und 1099. Die Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HP-Batterie steigt oberhalb von 300 kW DC/DC-Leistung mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie und steigendem maximalen Energieinhalt der HE-Batterie. Der betragsmäßige Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung beträgt maximal 900 und der Anstieg über die Variation des Energieinhalts beträgt ebenfalls maximal 900. Unterhalb von 300 kW DC/DC-Leistung ändert sich der Anstieg, sodass trotz zunehmender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie die Anzahl äquivalenter Vollzyklen an der HP-Batterie abnimmt. Weiterhin sinkt die Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HP-Batterie unterhalb von 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie mit steigendem maximalen Energieinhalt der HE-Batterie bis 504 kWh. Bei größeren Energieinhalten steigt die Anzahl an Vollzyklen erneut an. Somit scheint sich bei 300 kW DC/DC-Leistung und einem Energieinhalt der HE-Batterie von 588 kWh oder niedriger ein Minimum zu befinden. Bis zu diesem Minimum nimmt die Größe der farbigen Bereiche stark zu, sodass von einem Sättigungseffekt ausgegangen werden kann. Weiterhin ist deutlich erkennbar, dass oberhalb von 450 kW DC/DC-Leistung und ca. 420 kWh maximalen Energieinhalt der HE-Batterie die Anzahl äquivalenter Vollzyklen sehr stark zunimmt. Somit scheinen hohe DC/DC-Leistungen und hohe Energieinhalte an der HE-Batterie zu einer deutlichen Erhöhung der Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HP-Batterie zu führen. Weiterhin scheint unter Berücksichtigung des ersten Diagramms der Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HE-Batterie bis 450 kW DC/DC-Leistung und 420 kWh Energieinhalt der HE-Batterie das System weitestgehend über die HE-Batterie zu arbeiten, bevor oberhalb der eben genannten Grenzwerte die HP-Batterie deutlich häufiger vom System beansprucht wird.

Das zweite Diagramm zeigt den Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie auf die Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HP-Batterie. Die Ergebnisse schwanken zwischen 106 und 379, sodass angenommen werden kann, dass Anpassungen an der HE-Batterie einen größeren Einfluss haben als Anpassungen an der HP-Batterie. Dies war nicht zu erwarten, da die Auslegungsparameter der HP-Batterie einen direkten Einfluss auf die HP-Batterie haben. Die Anzahl äquivalenter Vollzyklen steigt mit zunehmendem maximalen Energieinhalt der HP-Batterie und sinkt mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Der betragsmäßige Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung ist mit maximal 225 deutlich größer als der Anstieg über die Variation des Energieinhalts, da dieser kaum erkennbar ist. Somit scheint der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie deutlich größer als der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie zu sein. Weiterhin sinkt mit jedem hinzukommenden Batteriestrang an der HP-Batterie der Einfluss des Energieinhalts und im

selben Zusammenhang steigt der Einfluss der DC/DC-Leistung. Die Reduktion der Anzahl äquivalenter Vollzyklen durch Erhöhung der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie könnte damit zusammenhängen, dass die HP-Batterie möglicherweise bei höheren Leistungen ihrer Aufgabe gerecht wird, lediglich Spitzenlastkappung zu betreiben, sodass ihr Energieinhalt nur zu sehr geringem Maße genutzt wird. Dies würde weiterhin erklären, warum der Einfluss des maximalen Energieinhalts nahezu null ist.

Im dritten Diagramm ist der Einfluss der Variation der DC/DC-Leistungen an der HE- sowie HP-Batterie auf die Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HP-Batterie zu sehen. Die Ergebnisse schwanken zwischen 86 und 777. Somit scheint die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie einen großen Einfluss zu haben, da eine Variation stets zu weit gestreuten Ergebnissen führt. Oberhalb von 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie steigt die Anzahl äquivalenter Vollzyklen mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie und sinkt mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Der betragsmäßige Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie beträgt ca. 300 bis 375 und der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie beträgt ungefähr 300. Somit scheint der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie etwas größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zu sein. Somit bestätigt sich die Annahme aus Diagramm zwei, dass der Einfluss der Auslegungsparameter der HE-Batterie größer als der Einfluss der Auslegungsparameter der HP-Batterie ist. Unterhalb von 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie sinkt die Anzahl äquivalenter Vollzyklen mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Im Bereich oberhalb von 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie und oberhalb von 600 kW DC/DC-Leistung an der HP-Batterie steigt die Anzahl äquivalenter Vollzyklen mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Weiterhin befindet sich bei 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie und 600 kW DC/DC-Leistung und größer an der HP-Batterie ein Minimum. Bis hin zum Minimum steigt die Größe der farbigen Bereiche stark an, allerdings ist im Diagramm vermutlich nur ein geringer Teil des Minimums, aufgrund des gewählten Betrachtungsbereichs zu sehen. Somit kann von einem Sättigungseffekt ausgegangen werden, allerdings kann dies nicht sicher bestätigt werden.

Im vierten Diagramm wird der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie auf die Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HP-Batterie abgebildet. Sie schwankt zwischen 66 und 588. Die Anzahl äquivalenter Vollzyklen steigt mit zunehmendem Energieinhalt der HP- und HE-Batterie. Dies widerspricht den Ergebnissen aus Diagramm zwei, sodass davon ausgegangen werden kann, dass der Energieinhalt der HP-Batterie nahezu keinen Einfluss hat. Der betragsmäßige Anstieg über die Variationen des Energieinhalts der HE-Batterie ist mit ca. 375 deutlich größer als der Anstieg über die Variationen des Energieinhalts der HP-Batterie mit maximal

75. Weiterhin scheint der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie mit jedem hinzukommenden Batteriestrang an der HP-Batterie abzunehmen. Im selben Zusammenhang steigt der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie. Dementsprechend scheinen hohe Energieinhalte HE-Batterie zu einer Erhöhung der Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HP-Batterie zu führen. Weiterhin bestätigt sich die Annahme aus Diagramm zwei, dass der Einfluss der Auslegungsparameter der HE-Batterie größer als der Einfluss der Auslegungsparameter der HP-Batterie ist.

In den Diagrammen wird deutlich, dass die Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HP-Batterie sehr stark von den Auslegungsparametern der HE-Batterie abhängt. Sie steigt mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie sowie zunehmendem Energieinhalt der HE-Batterie. Allerdings ist der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie, welcher wiederum etwas größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ist. Der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie scheint am geringsten zu sein und ändert sich über die eigenen Variationen. Somit zeigt sich, dass die Auslegungsparameter der HE-Batterie den größten Einfluss auf die Anzahl der äquivalenten Vollzyklen der HP-Batterie haben. Dies war nicht zu erwarten, da die Auslegungsparameter der HE-Batterie keinen direkten Einfluss auf die HP-Batterie haben, aber anscheinend darauf wie das System die HP-Batterie betreibt.

In Abbildung 37 ist der Einfluss der Variation verschiedener Auslegungsparameter auf die eingespeicherte Energiemenge dargestellt.

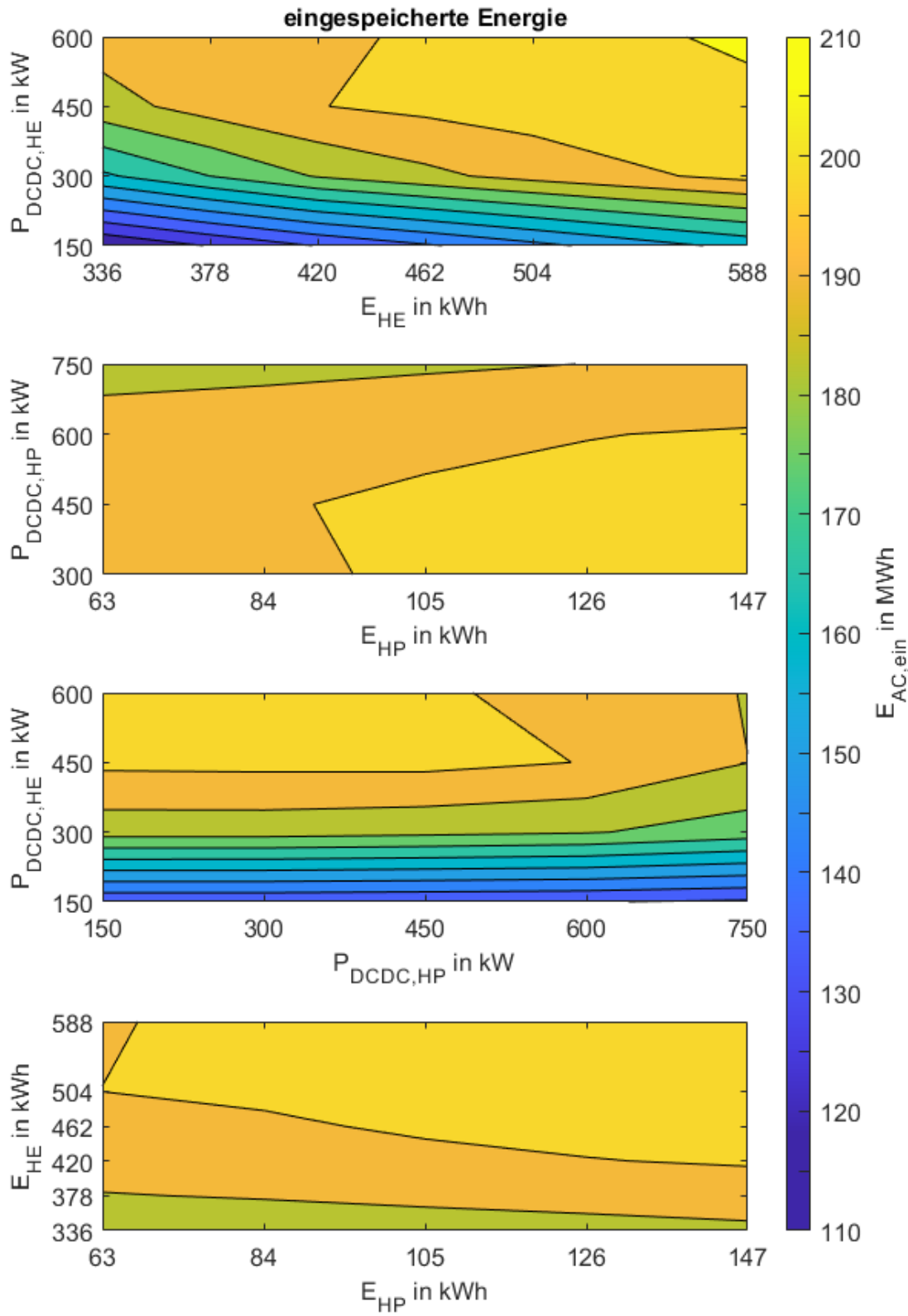


Abbildung 37: Summe der jährlich eingespeicherten Energie

Im ersten Diagramm ist der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie und der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie auf die eingespeicherte Energiemenge dargestellt. Die Ergebnisse schwanken zwischen 118 MWh und 208 MWh. Die in die Batterien eingespeicherte Energie nimmt jeweils mit steigendem Energieinhalt sowie auch mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie zu. Der Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung ist mit ca. 60 MWh bis 70 MWh größer als über die Variation des Energieinhalts mit ungefähr 20 MWh bis 40 MWh. Dies bergründet sich vermutlich damit, dass die DC/DC-Leistung einen direkten Einfluss auf die maximal mögliche Einspeicherleistung hat, welche über die Zeit gesehen direkt die eingespeicherte Energiemenge beeinflusst. Allerdings nimmt ab 300 kW DC/DC-Leistung mit nahezu jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler der Einfluss der DC/DC-Leistung ab und der Einfluss des Energieinhalts zu. Weiterhin ist zu erkennen, dass es zwischen 420 kWh und ca. 441 kWh Energieinhalt bei 450 kW bis 600 kW DC/DC-Leistung zu einem Vorzeichenwechsel des Anstiegs kommt, sodass mit steigender DC/DC-Leistung die eingespeicherte Energiemenge abnimmt. Dies könnte im Zusammenhang mit der Steigerung der Systemleistung auf 600 kW stehen, da die Systemleistung bis 450 kW DC/DC-Leistung 450 kW beträgt. Die Größe der farbigen Bereiche nimmt ab 300 kW DC/DC-Leistung stark zu, sodass von einem beginnenden Sättigungseffekt ausgegangen werden kann. Allerdings ist keine vollständige Sättigung erkennbar, da anscheinend nur ein geringer Teil des Bereichs des maximalen Werts, aufgrund des gewählten Betrachtungsbereichs, zu sehen ist. Demensprechend kann man sagen, dass hohe Energieinhalte und DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie einen großen Einfluss auf die eingespeicherte Energiemenge haben, allerdings der Einfluss der DC/DC-Leistung bei der HE-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts ist.

Das zweite Diagramm zeigt den Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie auf die eingespeicherte Energiemenge. Die eingespeicherte Energiemenge schwankt zwischen 186 MWh und 202 MWh, sodass angenommen werden kann, dass Anpassungen an der HE-Batterie einen deutlich größeren Einfluss haben als Anpassungen an der HP-Batterie. Umgekehrt zum obigen Diagramm steigt die eingespeicherte Energiemenge mit steigendem Energieinhalt der HP-Batterie und sinkender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Der Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung ist mit ca. 10 MWh ähnlich zum Anstieg über die Variation des Energieinhalts mit ebenfalls ungefähr 10 MWh. Mit nahezu jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler steigt der Einfluss der DC/DC-Leistung und sinkt der Einfluss des Energieinhalts der HP-Batterie. Weiterhin ist zu erkennen, dass es zwischen 84 kWh und 105 kWh Energieinhalt bei 300 kW bis 450 kW DC/DC-Leistung zu einem Vorzeichenwechsel des Anstiegs kommt, sodass mit einer Erhöhung der DC/DC-Leistung

die eingespeicherte Energiemenge zunimmt und bei über 450 kW DC/DC-Leistung wieder abnimmt. Dies könnte möglicherweise im Zusammenhang mit der Diskrepanz zwischen Systemleistung und DC/DC-Leistung an der HP-Batterie stehen, da die Systemleistung und die DC/DC-Leistung bis 450 kW identisch sind, allerdings unterhalb von 450 kW eine Reduktion der DC/DC-Leistung zu keiner Änderung der Systemleistung führt. Somit scheinen der Einfluss der DC/DC-Leistung und des Energieinhalts der HP-Batterie ähnlich groß zu sein.

Das dritte Diagramm zeigt wie die Variation der DC/DC-Leistung jeweils an der HE- und HP-Batterie die in die Batterien eingespeicherte Energiemenge beeinflusst. Die Ergebnisse schwanken zwischen 135 MWh und 200 MWh. Somit zeigt sich, dass die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie einen großen Einfluss hat, da eine Variation stets zu weit gestreuten Ergebnissen führt. Die eingespeicherte Energiemenge steigt mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie und abnehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Der Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie ist mit ca. 65 MWh deutlich größer als der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie mit maximal 20 MWh. Somit scheint, entsprechend den Ergebnissen aus Diagramm eins und drei, der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie größer als der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zu sein. Im Bereich von 150 kW bis 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie wird die eingespeicherte Energiemenge fast ausschließlich durch eine Anpassung der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie beeinflusst. Ab 300 kW DC/DC-Leistung an der HP-Batterie steigt der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie mit jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler an der HP-Batterie. Im selben Zusammenhang sinkt der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Sobald an beiden Batterien eine DC/DC-Leistung von 450 kW oder mehr anliegt kann erneut ein Vorzeichenwechsel des Anstiegs beobachtet werden, sodass durch eine Erhöhung der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie die eingespeicherte Energiemenge abnimmt und anschließend wieder zunimmt. Dies könnte sich erneut durch die Erhöhung der Systemleistung auf 600 kW und höher erklären. Weiterhin nimmt die Größe der farbigen Bereiche ab 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie deutlich zu, so dass es möglich ist, dass hier von einem Sättigungseffekt ausgegangen werden kann. Dementsprechend scheinen hohe DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie und niedrige DC/DC-Leistungen an der HP-Batterie zu einer Erhöhung der eingespeicherten Energiemenge zu führen, allerdings ist der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie deutlich größer als der Einfluss der HP-Batterie.

Im vierten Diagramm wird der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie auf die eingespeicherte Energiemenge abgebildet. Sie schwankt zwischen 182 MWh und 205 MWh. Die eingespeicherte Energiemenge steigt mit zunehmendem Energieinhalt beider Batterien. Der

Anstieg über die Variation des Energieinhalts der HE-Batterie ist mit ca. 10 MWh bis 20 MWh größer als der Anstieg über die Variation des Energieinhalts der HP-Batterie mit maximal 10 MWh. Wie bereits in den obigen Diagrammen kommt es zu einem Vorzeichenwechsel des Anstiegs, sodass bei 63 kWh und mehr Energieinhalt der HP-Batterie und einem Energieinhalt der HE-Batterie zwischen 504 und 588 kWh die eingespeicherte Energiemenge mit steigendem Energieinhalt der HE-Batterie zunimmt und anschließend wieder abnimmt. Dementsprechend kann man sagen, dass höhere Energieinhalte beider Batterien zu einer Erhöhung der eingespeicherten Energiemenge führen.

In allen Diagrammen wird deutlich, dass die eingespeicherte Energie mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie, steigendem Energieinhalt der HE-Batterie, steigendem Energieinhalt der HP-Batterie und sinkender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zunimmt. Den größten Einfluss scheinen die Auslegungsparameter der HE-Batterie zu haben. Die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie hat den größten Einfluss und darauffolgend der Energieinhalt der HE-Batterie. Den niedrigsten, allerdings ähnlichen Einfluss scheinen die Auslegungsparameter der HP-Batterie zu haben. Dennoch scheint der Einfluss der DC/DC-Leistung etwas größer als der Einfluss des Energieinhalts zu sein, da der Einfluss der DC/DC-Leistung im direkten Vergleich mit dem Energieinhalt der HP-Batterie die Simulationsergebnisse dominierend verändert.

Abbildung 38 zeigt den Einfluss der Variation verschiedener Auslegungsparameter auf die Summe der jährlich ausgespeicherte Energiemenge.



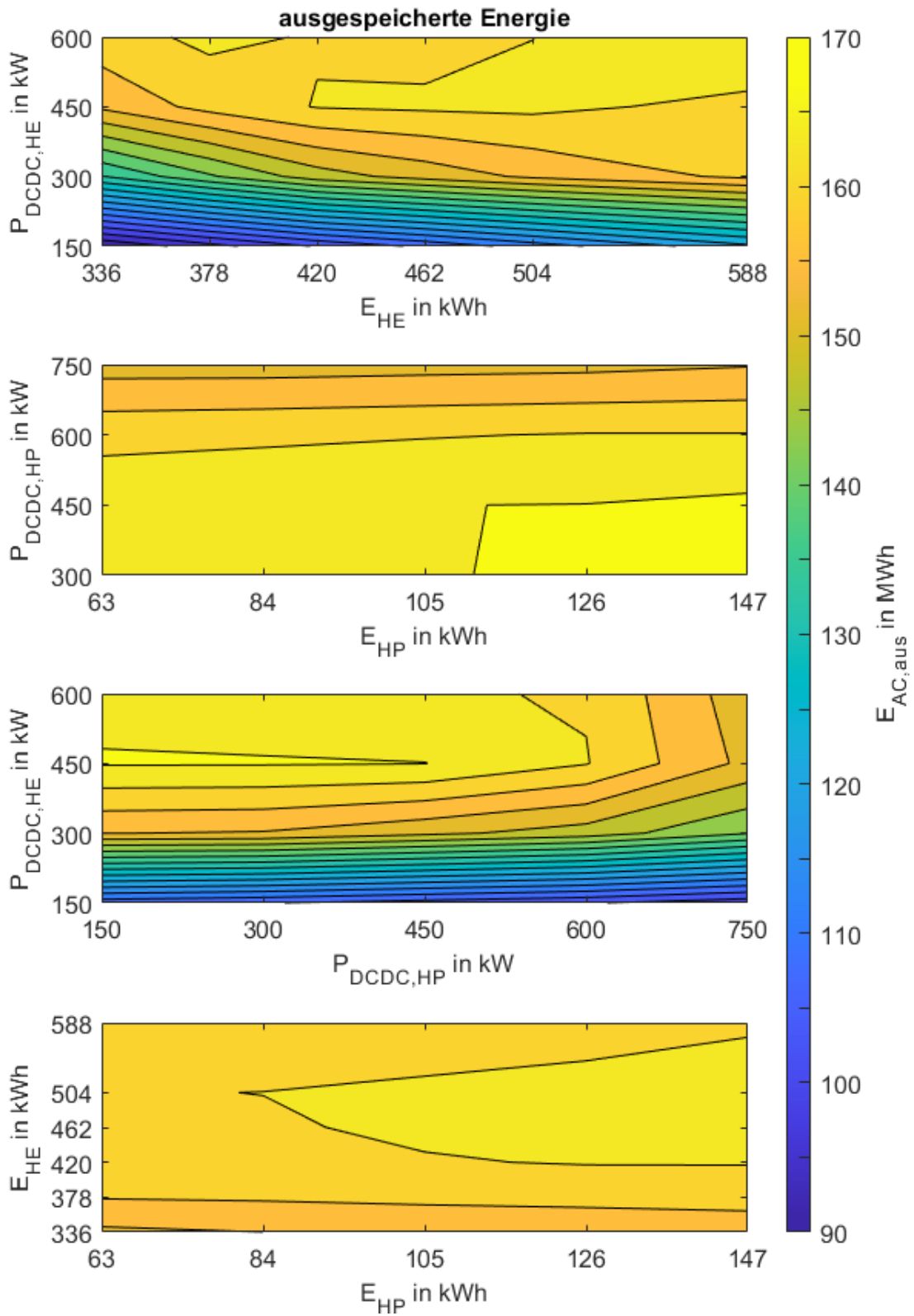


Abbildung 38: Summe der jährlich ausgespeicherten Energie

Im ersten Diagramm ist der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie sowie der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie auf die ausgespeicherte Energiemenge zu sehen. Die Ergebnisse schwanken zwischen 91 MWh und 167 MWh. Die aus den Batterien ausgespeicherte Energie nimmt ebenso wie bei der eingespeicherten Energie jeweils mit steigendem Energieinhalt sowie auch mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie zu. Der Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung ist mit ca. 50 MWh bis 70 MWh deutlich größer als über die Variation des Energieinhalts mit ungefähr 10 MWh bis 30 MWh. Ebenso wie bei der eingespeicherten Energiemenge erklärt sich dies vermutlich damit, dass die DC/DC-Leistung einen direkten Einfluss auf die maximal mögliche Ausspeicherleistung hat, welche über die Zeit gesehen direkt die ausgespeicherte Energiemenge beeinflusst. Wie bei der eingespeicherten Energie nimmt ab 300 kW DC/DC-Leistung mit jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler der Einfluss der DC/DC-Leistung ab und der Einfluss des Energieinhalts zu. Oberhalb von 450 kW DC/DC-Leistung und 420 kWh bis 504 kWh Energieinhalt kommt es zum Vorzeichenwechsel des Anstiegs, sodass nach Erreichen des Maximalwertes und weiterer Erhöhung der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie die ausgespeicherte Energiemenge abnimmt. Dies könnte sich erneut durch die Erhöhung der Systemleistung auf 600 kW erklären. Da die Größe der farbigen Bereiche ab 300 kW DC/DC-Leistung zu nimmt, kann von einem beginnenden Sättigungseffekt ausgegangen werden. Demensprechend kann man sagen, dass hohe Energieinhalte und DC/DC-Leistungen an der HE-Batterie zu einer signifikanten Erhöhung der ausgespeicherten Energiemenge führen, allerdings der Einfluss der DC/DC-Leistung bei der HE-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts ist.

Das zweite Diagramm zeigt den Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie auf die ausgespeicherte Energiemenge. Die ausgespeicherte Energiemenge schwankt zwischen 153 MWh und 168 MWh, sodass wie bereits bei der eingespeicherten Energiemenge angenommen werden kann, dass Anpassungen an der HE-Batterie einen größeren Einfluss haben als Anpassungen an der HP-Batterie. Umgekehrt zum obigen Diagramm steigt die ausgespeicherte Energiemenge mit steigendem Energieinhalt der HP-Batterie und sinkender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Der Anstieg über die Variationen der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ist mit ca. fünfzehn Megawattstunden größer als über die Variationen des Energieinhalts mit maximal fünf Megawattstunden. Somit scheint der Einfluss der DC/DC-Leistung bei der HP-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts zu sein. Die ausgespeicherte Energiemenge hängt oberhalb von 450 kW Nennleistung an der HP-Batterie nahezu ausschließlich von der DC/DC-Leistung ab, während sie unterhalb von 450 kW DC/DC-Leistung nahezu ausschließlich vom Energieinhalt der HP-Batterie abhängt. Letzteres könnte sich möglicherweise mit der Diskrepanz zwischen Systemleistung und

DC/DC-Leistung an der HP-Batterie erklären, da die Systemleistung und die DC/DC-Leistung zwar oberhalb von 450 kW identisch sind, allerdings unterhalb von 450 kW eine Reduktion der DC/DC-Leistung zu keiner Änderung der Systemleistung führt.

Das dritte Diagramm zeigt wie die Variation der DC/DC-Leistung jeweils an der HE- und HP-Batterie die aus den Batterien ausgespeicherte Energiemenge beeinflusst. Sie schwankt zwischen 100 MWh und 168 MWh. Somit zeigt sich, dass die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie einen großen Einfluss hat, da eine Variation stets zu weit gestreuten Ergebnissen führt. Die ausgespeicherte Energiemenge steigt mit zunehmender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie und abnehmender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Der Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie ist mit ca. 60 MWh größer als der Anstieg über die Variation der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie mit ca. 50 MWh. Somit scheint, unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Diagramm eins, der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie größer als der Einfluss des Energieinhalts der HE-Batterie zu sein. Im Bereich von 150 kW bis 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie wird die ausgespeicherte Energiemenge fast ausschließlich durch eine Anpassung der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie beeinflusst. Ab 300 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie steigt der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie mit jedem hinzukommenden DC/DC-Wandler an der HP-Batterie. Im selben Zusammenhang sinkt der Einfluss der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie. Sobald an der HE-Batterien eine DC/DC-Leistung von 450 kW oder mehr anliegt kann erneut ein Vorzeichenwechsel des Anstiegs beobachtet werden, sodass die ausgespeicherte Energiemenge ihren Maximalwert erreicht und bei weiterer Erhöhung der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie wieder abnimmt. Dies könnte sich erneut durch die Erhöhung der Systemleistung auf 600 kW erklären. Weiterhin hängt die ausgespeicherte Energiemenge oberhalb von 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie und oberhalb von 600 kW DC/DC-Leistung an der HP-Batterie nahezu ausschließlich von der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie ab. Bei 450 kW DC/DC-Leistung an der HE-Batterie und 450 kW oder geringeren DC/DC-Leistungen an der HP-Batterie befindet sich ein Maximum. Eine mögliche Erklärung für den Maximalwert könnte sein, dass bei einem Energieinhalt der HE-Batterie von 420 kWh eine DC/DC-Leistung an der HE-Batterie von 450 kW die Übertragung der maximalen Batterieleistung ermöglicht. Hin zum Maximum nimmt die Größe der farbigen Bereiche zu, sodass von einem beginnenden Sättigungseffekt ausgegangen werden kann. Demensprechend scheint eine DC/DC-Leistung angepasst an den Energieinhalt der HE-Batterie und niedrige DC/DC-Leistungen an der HP-Batterie zu einer Erhöhung der ausgespeicherten Energiemenge zu führen.

Im vierten Diagramm wird der Einfluss der Variation des maximalen Energieinhalts der HP-Batterie und des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie auf die ausgespeicherte

Energiemenge abgebildet. Sie schwankt zwischen 154 MWh und 165 MWh. Die ausgespeicherte Energiemenge steigt mit zunehmendem Energieinhalt beider Batterien. Der Anstieg über die Variation des Energieinhalts der HE-Batterie ist mit ca. zehn Megawattstunden größer als der Anstieg über die Variation des Energieinhalts der HP-Batterie mit maximal fünf Megawattstunden. Wie bereits in den obigen Diagrammen kommt es zu einem Vorzeichenwechsel des Anstiegs. Ab 84 kWh Energieinhalt der HP-Batterie und einem Energieinhalt der HE-Batterie zwischen 420 und 588 kWh erreicht die ausgespeicherte Energiemenge ihren Maximalwert, bevor sie bei weiterer Erhöhung des maximalen Energieinhalts der HE-Batterie wieder abnimmt. Unterhalb von 420 kWh Energieinhalt der HE-Batterie hängt die ausgespeicherte Energiemenge nahezu ausschließlich vom Energieinhalt der HE-Batterie ab. Dementsprechend kann man sagen, dass ein hoher Energieinhalt der HP-Batterie und ein darauf abgestimmter Energieinhalt der HE-Batterie zu einer Erhöhung der ausgespeicherten Energiemenge führt.

In den Diagrammen wird deutlich, dass die ausgespeicherte Energie mit steigender DC/DC-Leistung an der HE-Batterie, steigendem Energieinhalt der HE-Batterie, steigendem Energieinhalt der HP-Batterie und sinkender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zunimmt. Den größten Einfluss scheinen die DC/DC-Leistungen an den Batterien zu haben. Die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie hat den größten Einfluss und darauffolgend die DC/DC-Leistung an der HP-Batterie. Den niedrigsten Einfluss scheinen die Energieinhalte der Batterien zu haben, allerdings kann nicht identifiziert werden, welcher Energieinhalt den größeren Einfluss hat, da der Energieinhalt der HE-Batterie, entsprechend den Ergebnissen aus Diagramm vier, auf den Energieinhalt der HP-Batterie angepasst werden muss. Weiterhin muss die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie, entsprechend den Ergebnissen aus Diagramm drei, mit dem Energieinhalt der HE-Batterie abgestimmt werden, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

In nahezu allen betrachteten Bewertungskriterien führt eine Erhöhung der DC/DC-Leistung an der HE-Batterie, einer Erhöhung des maximalen Energieinhalts der HE- und HP-Batterie sowie die Verringerung der DC/DC-Leistung an der HP-Batterie zu einer Verbesserung der Systemergebnisse.

Eine Eigenverbrauchsoptimierung des Betriebs kann entsprechend den oben genannten Empfehlungen geschehen, allerdings ist zu beachten, dass die DC/DC-Leistung an der HE-Batterie sowie der maximale Energieinhalt der HE-Batterie den Eigenverbrauchsgrad deutlich stärker beeinflussen als die Auslegungsparameter der HP-Batterie.

Die Vermeidung der Abregelung kann durch eine Minimierung der Abregelquote erreicht werden. Entsprechend den Simulationsergebnissen scheinen wie bereits bei der Eigenverbrauchsoptimierung die Auslegungsparameter der HE-Batterie den deutlich größeren Einfluss zu besitzen. Allerdings scheint ab einer DC/DC-Leistung an der HE-Batterie von 300 kW und größer keiner der Auslegungsparameter mehr einen Einfluss auf die Abregelquote zu besitzen, da diese ungeachtet der anderen Auslegungsparameter oberhalb von 300 kW stets null Prozent beträgt. Dies deckt sich weitestgehend mit den Ergebnissen der maximalen Einspeiseleistung, da diese bei DC/DC-Leistungen an der HE-Batterien von 300 kW und größer nicht mehr ihren Maximalwert erreicht. Weiterhin wird die maximale Einspeiseleistung am stärksten von den DC/DC-Leistungen an den Batterien beeinflusst.

Entsprechend den Simulationsergebnissen kann eine Minimierung der Umwandlungsverluste nur bei sehr kleinen Systemkonfigurationen erreicht werden. Somit widerspricht dies der Tendenz der vorherigen Ziele ein großes System zu verwenden. Die Summe der jährlichen Umwandlungsverluste verringert sich mit Verringerung aller Auslegungsparameter, allerdings hat der maximale Energieinhalt der HE-Batterie den stärksten Einfluss.

Die Spitzenlastkappung erfordert die Betrachtung mehrerer Bewertungskriterien. Entsprechend der Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HE- und HP-Batterie scheint das System vorwiegend über die HE-Batterie zu arbeiten. Bei höherer DC/DC-Leistung und maximalem Energieinhalt der HE-Batterie, niedriger DC/DC-Leistung an der HP-Batterie sowie höherem maximalen Energieinhalt der HP-Batterie wird die HP-Batterie vermehrt vollgeladen, sodass davon ausgegangen werden kann, dass sie in diesen Bereichen vermehrt vom System verwendet wird. Die HP-Batterie scheint bei niedriger DC/DC-Leistung Spitzenlastkappung auszuführen, da entsprechend den Ergebnissen der maximal aufgetretenen Netzbezugsleistung, mit sinkender DC/DC-Leistung an der HP-Batterie die

maximal aufgetretene Netzbezugsleistung verringert wird. Somit zeigt sich, dass eine intuitive Auslegung der HP-Batterie für die Spitzenlastkappung einerseits zu einer Verschlechterung des Systemverhaltens führt und andererseits die HP-Batterie dadurch keine Spitzenlastkappung ausführt. Eine niedrige DC/DC-Leistung an der HP-Batterie scheint für die Spitzenlastkappung erforderlich zu sein. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die größte Verringerung der maximal aufgetretenen Netzbezugsleistung bei einer DC/DC-Leistung an der HE-Batterie von 300 kW sowie maximalem Energieinhalt der HE-Batterie von 399 kWh und niedriger in Kombination mit niedriger DC/DC-Leistung und hohem maximalem Energieinhalt an der HP-Batterie erreicht wird.

Somit zeigt sich, dass bei der Auslegung des hybriden Batteriespeichersystems die Ziele des Speichereinsatzes abgewogen werden müssen, um ein gewünschtes Systemverhalten zu erreichen, da nicht alle Ziele zeitgleich erreichbar sind. Hinsichtlich der Erfüllung der Ziele des Speichereinsatzes wäre eine Systemkonfiguration mit niedriger DC/DC-Leistung an der HP-Batterie, hohem maximalem Energieinhalt der HP-Batterie, einer DC/DC-Leistung an der HE-Batterie von 300 kW und ungefähr 399 kWh maximaler Energieinhalt der HE-Batterie zu empfehlen. Allerdings müsste diese Systemkonfiguration besonders mit Hinblick auf die Variation aller Auslegungsparameter gemeinsam, anhand weiterer Simulationen analysiert werden, da eine Variation von lediglich zwei der vier Auslegungsparameter keine exakten Ergebnisse darstellen kann.

Im Anschluss an die Untersuchung von Batterietyp eins sollten weiterhin vergleichend dieselben Systemkonfigurationen mit Batterietyp vier simuliert werden, um zu bewerten, welcher Batterietyp bessere Simulationsergebnisse hervorbringt. Allerdings stellten sich die Simulationsergebnisse mit Batterietyp vier als fehlerhaft heraus, sodass diese Untersuchung aus Zeitgründen nicht wiederholt wurde.

## Literaturverzeichnis

- [1] Bocklisch, Prof. Dr.-Ing. T. (2020):  
K2\_HESS\_Grundprinzip\_Teilproblemstellungen\_zu\_HESS, Teilskript der  
Lehrveranstaltung „Hybridspeichersysteme und Sektorenkopplung“ aus dem Modul  
„Methoden und Systemkonzepte für innovative Energiespeicheranwendungen“,  
Professur für Energiespeichersysteme, Technische Universität Dresden [30.11.2020]
- [2] Ausfelder et al. (2017): »Sektorkopplung« - Untersuchungen und Überlegungen zur  
Entwicklung eines integrierten Energiesystems, online: [https://energiesysteme-  
zukunft.de/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/PDFs/ESYS\\_Analyse\\_Sektorkopplung.pdf](https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/PDFs/ESYS_Analyse_Sektorkopplung.pdf) [10.03.2021]
- [3] Binder, J. et al. (2012): Dezentrale Photovoltaik: Autonomie, Eigenverbrauch und  
Netzentlastung durch lokale Strom- und Wärmespeicher, online: [https://www.zsw-  
bw.de/uploads/media/OTTI\\_Dezentrale-PV\\_Binder-Kelm\\_2012\\_07.pdf](https://www.zsw-bw.de/uploads/media/OTTI_Dezentrale-PV_Binder-Kelm_2012_07.pdf) [11.03.2021]
- [4] Hesse, H et al. (2017): Lithium-Ion Battery Storage for the Grid – A Review of  
Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power  
Grids, online: <https://doi.org/10.3390/en10122107> [22.11.2020]
- [5] Bocklisch, T. (2015): Hybrid energy storage systems for renewable energy  
applications, online: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.582> [30.11.2020]
- [6] Zander, W. et al. (2017): dena-NETZFLEXSTUDIE Optimierter Einsatz von  
Speichern für Netz- und Marktanwendungen in der Stromversorgung, online:  
[https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9191\\_dena\\_Netzflexstudie.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9191_dena_Netzflexstudie.pdf)  
[13.11.2020]
- [7] Müller, M. (2018): Stationary Lithium-Ion Battery Energy Storage Systems A Multi-  
Purpose Technology, online: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1388076/1388076.pdf>  
[23.11.2020]
- [8] Mengel, O. (2017): Storage in Power Systems: Frequency Control, Scheduling of  
Multiple Applications, and Computational Complexity, online: [https://www.research-  
collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/171342/Dissertation\\_Olivier\\_NoCV  
.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/171342/Dissertation_Olivier_NoCV.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000171342>)  
[23.11.2020]

- [9] Truong, C. N. et al. (2018): Multi-Use of Stationary Battery Storage Systems with Blockchain Based Markets, online: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.070> [18.11.2020]
- [10] Megawatts Engineering Services Pte Ltd (o. J.): Capacity firming, online: <https://www.megawatts.com.sg/renewable-energy/energy-storage/capacity-firming/> [02.11.2020]
- [11] Paschotta, R. (2020): Stromveredelung, online: <https://www.energie-lexikon.info/stromveredelung.html> [30.10.2020]
- [12] Tesla Germany GmbH (o. J.): HAWAIIAN ISLAND POWERED BY SOLAR ENERGY AFTER DARK, online: [https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/en\\_US/Tesla\\_KIUC-Case%20Study-2017.pdf](https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/en_US/Tesla_KIUC-Case%20Study-2017.pdf) [26.11.2020]
- [13] Tesla Germany GmbH (o. J.): Powerpack – Stromspeichersysteme für Betriebe und Stromversorger, online: [https://www.tesla.com/de\\_DE/powerpack?redirect=no](https://www.tesla.com/de_DE/powerpack?redirect=no) [19.11.2020]
- [14] IRENA - International Renewable Energy Agency (2020): Electricity storage valuation framework: Assessing system value and ensuring project viability, online: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA\\_Storage\\_valuation\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_Storage_valuation_2020.pdf) [11.11.2020]
- [15] Tesla Germany GmbH (2019): Introducing Megapack: Utility-Scale Energy Storage, online: [https://www.tesla.com/de\\_DE/blog/introducing-megapack-utility-scale-energy-storage](https://www.tesla.com/de_DE/blog/introducing-megapack-utility-scale-energy-storage) [20.11.2020]
- [16] Neoen, Aurecon Group (2018): Hornsdale Power Reserve Year 1 Technical and Market Impact Case Study, online: <https://hornsdalepowerreserve.com.au/wp-content/uploads/2020/07/Aurecon-Hornsdale-Power-Reserve-Impact-Study-year-1.pdf> [11.11.2020]
- [17] Tesla Germany GmbH (o. J.): Energie-Großspeicherlösungen Megapack, online: [https://www.tesla.com/de\\_DE/megapack](https://www.tesla.com/de_DE/megapack) [11.11.2020]
- [18] Fluence (o. J.): Fluence Gridstack, online: <https://info.fluenceenergy.com/hubfs/Collateral/Gen6/Gridstack%20Tech%20Spec.pdf> [20.11.2020]
- [19] Fluence (o. J.): Fluence Sunstack, online: <https://info.fluenceenergy.com/hubfs/Sunstack%20Tech%20Spec.pdf> [20.11.2020]
- [20] Fluence (o. J.): Fluence Edgestack, online: <https://info.fluenceenergy.com/hubfs/Edgestack%20Tech%20Spec.pdf> [20.11.2020]



- [21] Aggreko Deutschland (o. J.): Y.Cube 30, online: <https://www.aggreko.com/de-de/products/battery-storage/y-cube-30-minutes> [20.11.2020]
- [22] Aggreko Deutschland (o. J.): Y.Cube 60, online: <https://www.aggreko.com/de-de/products/battery-storage/y-cube-60-minutes> [20.11.2020]
- [23] Rolls-Royce Power Systems AG (o. J.): MTU Energypack QS, online: [https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/products/power-generation/new/mtu-battery-storage-solutions-\(h1\)/mtu-battery-storage-solutions-\(h2\)/16120844\\_qinous\\_spec\\_energypack\\_qs.pdf/\\_jcr\\_content/renditions/original./16120844\\_qinous\\_spec\\_energypack\\_qs.pdf](https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/products/power-generation/new/mtu-battery-storage-solutions-(h1)/mtu-battery-storage-solutions-(h2)/16120844_qinous_spec_energypack_qs.pdf/_jcr_content/renditions/original./16120844_qinous_spec_energypack_qs.pdf) [20.11.2020]
- [24] Rolls-Royce Power Systems AG (o. J.): MTU Energypack QM / QL, online: [https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/products/power-generation/new/mtu-battery-storage-solutions-\(h1\)/mtu-battery-storage-solutions-\(h2\)/16120843\\_qinous\\_spec\\_energypack\\_qm\\_ql.pdf/\\_jcr\\_content/renditions/original./16120843\\_qinous\\_spec\\_energypack\\_qm\\_ql.pdf](https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/products/power-generation/new/mtu-battery-storage-solutions-(h1)/mtu-battery-storage-solutions-(h2)/16120843_qinous_spec_energypack_qm_ql.pdf/_jcr_content/renditions/original./16120843_qinous_spec_energypack_qm_ql.pdf) [20.11.2020]
- [25] Rolls-Royce Power Systems AG (o. J.): Energiespeicherung, online: <https://www.mtu-solutions.com/eu/de/applications/power-generation/power-generation-products/energy-storage-system.html> [20.11.2020]
- [26] ads-tec Holding GmbH (o. J.): Broschüre StoraXe Industrial & Infrastructure, online: [https://www.ads-tec.de/fileadmin/download/doc/brochure/Broschuere\\_Energy\\_Industrial\\_DE.pdf](https://www.ads-tec.de/fileadmin/download/doc/brochure/Broschuere_Energy_Industrial_DE.pdf) [20.11.2020]
- [27] ads-tec Holding GmbH (o. J.): StoraXe-Container-System – SCS Serie, online: <https://www.ads-tec.de/energy-storage/industrial-infrastructure/storaxe-container-system/storaxe-container-system.html> [26.11.2020]
- [28] ads-tec Holding GmbH (o. J.): Broschüre StoraXe Mobiler High Power Charger, online: [https://www.ads-tec.de/fileadmin/download/doc/brochure/Broschuere\\_mHPC\\_DE.pdf](https://www.ads-tec.de/fileadmin/download/doc/brochure/Broschuere_mHPC_DE.pdf) [26.11.2020]
- [29] Nicolai, S. et al. (2014): Hierarchische Speichereinsatzoptimierung, online: <https://doi.org/10.1515/auto-2013-1076> [06.12.2020]
- [30] Muenderlein, J. et al. (2017): Planning, building, efficiency measurement and determination of forecast data of a grid-scale hybrid 5 MW / 5 MWh battery storage system, online: [10.1109/INTLEC.2017.8214155](https://doi.org/10.1109/INTLEC.2017.8214155) [10.12.2020]
- [31] Thien T. (2016): M5BAT – Hybridbatteriespeicher in der Praxis, online: [https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/ess/ressourcen/dateien/04\\_Thien.pdf?lang=de](https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/ess/ressourcen/dateien/04_Thien.pdf?lang=de) [10.12.2020]

- [32] Schweer, D. (2016): Optimization of frequency containment reserve provision in M5BAT hybrid battery storage, online: [10.1109/EEM.2016.7521335](https://doi.org/10.1109/EEM.2016.7521335) [13.12.2020]
- [33] Panagiotis, M. (2019): Hybrid Energy Storage System consisting of a Flywheel and a Lithium-ion Battery for the provision of Primary Control Reserve, online: [10.1109/ICRERA47325.2019.8996553](https://doi.org/10.1109/ICRERA47325.2019.8996553) [11.12.2020]
- [34] bettermarks GmbH (o. J.): „Mittelwert, Median, Modus“, online: <https://de.bettermarks.com/mathe/mittelwert-median-modus/> [06.04.2021]
- [35] Janedu UG (o. J.): Welt der BWL, Perzentil, online: <https://welt-der-bwl.de/Perzentil> [06.04.2021]
- [36] Schulz, H. (o. J.): Feiertage Sachsen 2017, online: <https://www.schnelle-online.info/Sachsen/Feiertage-Sachsen-2017.html> [06.04.2021]
- [37] Polak, F. (o. J.): Meteorologische und kalendarischer Jahreszeiten – wie zeitgemäß ist die Unterscheidung?, online: <https://www.wetter.net/wetter-news/meteorologische-und-kalendarische-jahreszeiten-wie-zeitgemaess-ist-die-unterscheidung> [06.04.2021]
- [38] Böttiger, Dr.-Ing. Michael (2020): Multikriteriell optimierendes Betriebsführungsverfahren für PV-Batteriespeichersysteme, online: <https://core.ac.uk/download/pdf/353950588.pdf> [29.05.2021]

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Aufbau und Funktion der Komponenten in einem BESS nach [4] .....	3
Abbildung 2:	Grundstruktur eines HESS aus [26].....	7
Abbildung 3:	Multi-Use-Betriebskonzept „Zusammenführen von Zielen“ aus [8] .....	8
Abbildung 4:	Multi-Use-Betriebskonzept „Stapeln von Anwendungen“ aus [8].....	9
Abbildung 5:	Struktur der Betriebsführung aus [28].....	16
Abbildung 6:	Schematischer Aufbau des M5BAT aus [30] .....	18
Abbildung 7:	Optimierungsmodell des M5BAT nach [31] .....	19
Abbildung 8:	Aufbau und Regelungskonzept des hybriden Energiespeichers [32] .....	20
Abbildung 9:	Erstellung der Übergangsmatrizen .....	23
Abbildung 10:	Fahrplanerstellung .....	25
Abbildung 11:	Rekonstruktion der Trajektorie .....	26
Abbildung 12:	täglicher Energiebedarf des Betriebes 2017.....	28
Abbildung 13:	Leistungsbedarf des Betriebes 2017 in Wochenansicht .....	29
Abbildung 14:	Median und Perzentile des Leistungsbedarf des Betriebes 2017.....	30
Abbildung 15:	Median und Perzentile des Leistungsbedarfs für Montag bis Donnerstag .....	31
Abbildung 16:	Median und Perzentile der Leistungsbedarfs an Freitagen .....	32
Abbildung 17:	Median und Perzentile des Leistungsbedarfs an Samstagen.....	33
Abbildung 18:	Median und Perzentile des Leistungsbedarfs an Sonntagen .....	34
Abbildung 19:	Vergleich des wöchentlichen Energiebedarfs des Betriebes 2014, 2016, 2017 und 2018 .....	35
Abbildung 20:	wöchentlicher Energiebedarf des Betriebes der Jahre 2014, 2016, 2017 und 2018.....	36
Abbildung 21:	täglicher PV-Ertrag 2017 .....	37
Abbildung 22:	Median und Perzentile der PV-Leistung im Frühling .....	38
Abbildung 23:	Median und Perzentile der PV-Leistung im Sommer.....	39
Abbildung 24:	Median und Perzentile der PV-Leistung im Herbst.....	40
Abbildung 24:	Median und Perzentile der PV-Leistung im Winter .....	41
Abbildung 26:	Eigenverbrauchsgrad .....	50
Abbildung 27:	Abregelquote.....	413

---

Abbildung 28:	maximal aufgetretene Einspeiseleistung .....	56
Abbildung 29:	maximal aufgetretene Netzbezugsleistung.....	61
Abbildung 30:	Summe der jährlichen Umwandlungsverluste .....	65
Abbildung 31:	Selbstversorgungsgrad.....	4169
Abbildung 32:	Summe der jährlichen Netzbezugskosten .....	4172
Abbildung 33:	Summe der jährlichen Einspeisevergütungen.....	4176
Abbildung 34:	Summe der Investitionskosten .....	4180
Abbildung 35:	Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HE-Batterie .....	4184
Abbildung 36:	Anzahl äquivalenter Vollzyklen der HP-Batterie .....	4188
Abbildung 37:	Summe der jährlich eingespeicherten Energie.....	4192
Abbildung 38:	Summe der jährlich ausgespeicherten Energie .....	4196

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich verschiedener Energiespeichertechnologien nach [1].....	5
Tabelle 2:	Multi-Use-Kombinationsmöglichkeiten unterschiedlicher Anwendungsfelder nach [4] .....	10
Tabelle 3:	Lithium-Ionen-Batteriespeichersysteme verschiedener Hersteller .....	133
Tabelle 4:	Komponenten des hybriden Speichersystems nach [28].....	155
Tabelle 5:	Komponenten des hybriden Speichersystems nach [30].....	188
Tabelle 6:	Komponenten des hybriden Speichersystems nach [32].....	200
Tabelle 7:	Systemkonfigurationen für die erste Untersuchung .....	2048
Tabelle 8:	Systemkonfigurationen für den Mittelpunkt der Untersuchung .....	49

# Anhang

## A.1 Versuchsplan

Hybridspeichersystem						
Versuch	Batterietypen		Batterieenergieinhalte		DC/DC-Leistungen	
	HP	HE	HP	HE	HP	HE
1	3	1	126	336	600	450
2	3	1	126	378	600	450
3	3	1	126	462	600	450
4	3	1	126	504	600	450
5	3	1	126	588	600	450
6	3	1	126	336	600	150
7	3	1	126	378	600	150
8	3	1	126	420	600	150
9	3	1	126	462	600	150
10	3	1	126	504	600	150
11	3	1	126	588	600	150
12	3	1	126	336	600	300
13	3	1	126	378	600	300
14	3	1	126	420	600	300
15	3	1	126	462	600	300
16	3	1	126	504	600	300
17	3	1	126	588	600	300
18	3	1	126	336	600	600
19	3	1	126	378	600	600
20	3	1	126	420	600	600
21	3	1	126	462	600	600
22	3	1	126	504	600	600
23	3	1	126	588	600	600
24	3	1	63	420	600	450
25	3	1	84	420	600	450
26	3	1	105	420	600	450
27	3	1	147	420	600	450
28	3	1	63	420	750	450
29	3	1	84	420	750	450
30	3	1	105	420	750	450
31	3	1	126	420	750	450
32	3	1	147	420	750	450
33	3	1	63	420	450	450
34	3	1	84	420	450	450

35	3	1	105	420	450	450
36	3	1	126	420	450	450
37	3	1	147	420	450	450
38	3	1	63	420	300	450
39	3	1	84	420	300	450
40	3	1	105	420	300	450
41	3	1	126	420	300	450
42	3	1	147	420	300	450
43	3	1	63	420	150	450
44	3	1	84	420	150	450
45	3	1	126	420	150	450
46	3	1	105	420	150	450
47	3	1	147	420	150	450
48	3	1	126	420	750	600
49	3	1	126	420	750	300
50	3	1	126	420	750	150
51	3	1	126	420	450	600
52	3	1	126	420	450	300
53	3	1	126	420	450	150
54	3	1	126	420	300	600
55	3	1	126	420	300	300
56	3	1	126	420	300	150
57	3	1	126	420	150	600
58	3	1	126	420	150	300
59	3	1	126	420	150	150
60	3	1	63	336	600	450
61	3	1	63	378	600	450
62	3	1	63	462	600	450
63	3	1	63	504	600	450
64	3	1	63	588	600	450
65	3	1	84	336	600	450
66	3	1	84	378	600	450
67	3	1	84	462	600	450
68	3	1	84	504	600	450
69	3	1	84	588	600	450
70	3	1	105	336	600	450
71	3	1	105	378	600	450
72	3	1	105	462	600	450
73	3	1	105	504	600	450
74	3	1	105	588	600	450
75	3	1	147	378	600	450
76	3	1	147	462	600	450

77	3	1	147	504	600	450
78	3	1	147	588	600	450
79	3	4	126	588	600	450
80	3	4	126	588	600	150
81	3	4	126	588	600	300
82	3	4	126	588	600	600
83	3	4	63	588	600	450
84	3	4	84	588	600	450
85	3	4	105	588	600	450
86	3	4	147	588	600	450
87	3	4	126	504	600	450
88	3	4	126	504	600	150
89	3	4	126	504	600	300
90	3	4	126	504	600	600
91	3	4	63	504	600	450
92	3	4	84	504	600	450
93	3	4	105	504	600	450
94	3	4	147	504	600	450
95	3	4	126	336	600	450
96	3	4	126	336	600	150
97	3	4	126	336	600	300
98	3	4	126	336	600	600
99	3	4	63	336	600	450
100	3	4	84	336	600	450
101	3	4	105	336	600	450
102	3	4	147	336	600	450
103	3	4	126	420	600	150
104	3	4	126	420	600	600
105	3	4	63	420	600	450
106	3	4	84	420	600	450
107	3	4	105	420	600	450
108	3	4	147	420	600	450