
Abschlussbericht an die Deutsche Bundesstiftung Umwelt.

für das Vorhaben:

Entwicklung, Aufbau und Erprobung
einer übergeordneten Energiesteuerung – Energiecockpit



Projektdauer: 30 Monate (09.12.2022– 09.12.2024)

DBU: Aktenzeichen: 37710/01-24/0



Ansprechpartner + Projektleiter:

Georgsmarienhütte GmbH

Reimund Laermann

(☎ 05401/39 6180)

reimund.laermann@gmh-gruppe.de

Unterauftragnehmer:

Limón GmbH, Große Rosenstraße 21, 34117 Kassel

Jochem Maliga, ☎ 0561/220704-0, maliga@limon-gmbh.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungen	4
Tabellen.....	6
Abkürzungen	7
1 Zusammenfassung	8
2 Einleitung.....	9
2.1 Beschreibung der Umweltproblematik	9
2.2 Darstellung der umweltrelevanten Ziele und Energiebilanz-Modellrechnung.....	11
3 Projektablauf.....	12
3.1 Datenanalyse.....	16
3.1.1 Elektrolichtbogenofen Prozesse im Detail	16
3.1.2 Abwärmemengen aus dem Abhitzekessel.....	20
3.1.3 Betrieb der Vakuumanlage	22
3.1.4 Auswirkungen von dem herzustellenden Werkstoff auf die Systeme von GMH	24
3.1.5 Analyse des gemessenen Schalldrucks während des Betriebes des Elektrolichtbogens	26
3.1.6 Analyse der erweiterten Regelung.....	29
3.2 Konzeption des Steuerprogramms	37
3.2.1 Erstellung des Prognosemodell zur weiteren Verwendung im Optimierungskonzept....	37
3.2.2 Konzept zur Optimierung der Regelung der Wärmeübergabe an die Stadtwerke	50
4 Fazit.....	64
Anhang.....	66
A.1 Analysen zum Einfluss des Produkts (Werkstoffnummer auf das Abhitzesystem	66
A.2 Analyse der erweiterten Regelung – Ergänzenden Auswertungen	69
A.3 Decision Tree (Tiefe = 5)	75
A.4 Decision Tree Entscheidungslogik (Tiefe = 5)	78
A.5 Decision Tree (Tiefe = 6) - Logik als Python Programmiercode	78
A.6 Vorhersagegüten für die Entscheidungsbäume mit der Tiefe 5, 6, 7 und 8 für die ersten 5 min (Testdaten)	81

Abbildungen

Abbildung 1: Fließbild GMH & StW GMH (eigene Darstellung)	15
Abbildung 2: Auftragung der Zeitdauern der einzelnen ELO-Zustände im Januar 2022 als Boxplot (598 Chargen)	17
Abbildung 3: (links) Verteilung der Anzahl an Chargen der Gesamtchargen Prozessdauer unterteilt in Zeitintervalle im Januar 2022 (rechts) Auftragung der Zeitdauern der Chargen als Boxplot.....	18
Abbildung 4: Auftragung der Energiebedarfe (Strom) der einzelnen ELO-Zustände im Januar 2022 als Boxplot (598 Chargen)	19
Abbildung 5: (links) Verteilung der Anzahl an Chargen mit spezifischer Energiebedarfsmenge unterteilt in Energieintervalle im Januar 2022 (rechts) Auftragung der Energiebedarfe (Strom) pro Charge als Boxplot.....	20
Abbildung 6: Auftragung der Abwärmemengen (AHK Erzeugung) der einzelnen ELO-Zustände im Januar 2022 (598 Chargen).....	21
Abbildung 7: (links) Verteilung der Anzahl an Chargen mit spezifischer Abwärmemenge unterteilt in Energieintervalle im Januar 2022 (rechts) Abwärmemenge (AHK Erzeugung) pro Charge	22
Abbildung 8: Verteilung der Anzahl an Vakuumchargen mit einer spezifischen Energiemenge einer Vakuumcharge unterteilt in Energieintervalle im Januar 2022	23
Abbildung 9: Mögliche zeitliche Abstimmung zwischen Vakuumanlage und ELO Prozessphasen	24
Abbildung 10: Überblick über die Anzahl an Werkstoffnummer im Zeitraum Januar bis Juni 2022	25
Abbildung 11: (links) Auftragung der elektrischen Energiebedarfe des ELOs der 5 häufigsten Produkte im Zeitraum Januar bis Juni 2022 (rechts) Auftragung der elektrischen Energiebedarfe des ELOs aller Produkte	25
Abbildung 12: Auftragung der Schalldruck Mittelwerte pro ELO-Zustand im Zeitraum Juni 2023.....	26
Abbildung 13: Auftragung des Quotienten der Energiemenge von AHK Erzeugung / ELO Power On pro Charge im Zeitraum Juni 2023 (Oben links & rechts) Streudiagramm gegen den Schalldruck Mittelwert pro Charge und Boxplot für Daten aus ELO-Zustand 8 (Unten links & rechts) Streudiagramm gegen den Schalldruck Mittelwert pro Charge und Boxplot.....	28
Abbildung 14: Erweiterte Freigabelogik zur Wärmeübergabe an die Stadtwerke.....	29
Abbildung 15: Monatliche prozentuale Abdeckung als Quotientenwert der Energiemengen von Übergabe StW./ Netzlast für den Zeitraum Jan. 2019 bis Dez. 2020 und Jan. 2022 bis Jan. 2024	30
Abbildung 16: Auftragung der Leistungswerte Übergabe StW gegen Druck der Dampftrommel für ELO-Zustand 8 und Speicherfüllstand < 60 % (oben: Jahresmonate kombiniert; unten: pro Jahresmonat)32	
Abbildung 17: Prozentuale Verteilung der Übergabe StW - Energiemengen unterteilt in Druck Dampftrommel-Druckbereiche (ELO-Zustand 8 & Speicherfüllstand < 60%).	33

Abbildung 18: 3D-Histogramm - Anzahl der Ereignisse der Leistungswerte von Übergabe StW gegen den Druck der Dampftrommel - Januar 2023 (ELO-Zustand 8; Speicherfüllstand < 60 %)	34
Abbildung 19: 3D-Histogramm - Anzahl der Ereignisse der Leistungswerte von Übergabe StW gegen den Druck der Dampftrommel - Januar 2024 (ELO-Zustand 8; Speicherfüllstand < 60 %)	35
Abbildung 20: 3D-Histogramm – Summe der Energiemengen von Übergabe StW gegen den Druck der Dampftrommel - Januar 2023 (ELO-Zustand 8; Speicherfüllstand < 60 %)	36
Abbildung 21: 3D-Histogramm - Summe der Energiemengen von Übergabe StW gegen den Druck der Dampftrommel - Januar 2024 (ELO-Zustand 8; Speicherfüllstand < 60 %)	36
Abbildung 22: Beispiel zur Verdeutlichung des Unterschieds von Schätzung vs. Vorhersage (Prognose)	38
Abbildung 23: Ansatz 1 und Ansatz 2 (MOR-Ansatz) zur Berechnung zukünftiger Werte	39
Abbildung 24: Mittelwert der Vorhersagegüte je Variante von dem Decision Tree Algorithmus (MOR-Ansatz)	42
Abbildung 25: R ² -Verlauf der einzelnen Varianten für den Decision Tree Algorithmus (MOR-Ansatz) bei Testdaten	43
Abbildung 26: Vergleich der Ansätze 1 und 2 bei der Verwendung vom Decision Tree Algorithmus	44
Abbildung 27: R ² -Verlauf für einzelne Vorhersageschritte des Decision Tree Vorhersagealgorithmus (1 Zeitschritt = 30 s; X = 0 erster Vorhersagezeitpunkt).....	45
Abbildung 28: Mögliche Decision Tree Ausgabewerte für die Vorhersage nach 4 min	47
Abbildung 29: Decision Tree Entscheidungslogik (Tiefe = 6) - Teil I.....	48
Abbildung 30: Decision Tree Entscheidungslogik (Tiefe = 6) - Teil II.....	49
Abbildung 31: Prognosegestützte Freigabelogik – Initiales Konzept	51
Abbildung 32: Absolute Häufigkeiten von Chargen bei jeweiliger Wechselanzahl der Freigabezustände – Initiales Konzept	54
Abbildung 33: Verteilung der Anzahl an Zeitschritten je Freigabezustand und unterteilt je ELO-Zustand – Initiales Konzept.....	55
Abbildung 34: Verhältnis der Anzahl der Zeitschritte von den Druckwerten -3 bar zu -1 bar – Initiales Konzept.....	55
Abbildung 35: Anzahl der Wechsel der Freigabezustände sortiert nach maximalem Druck d. Dampftrommel – Initiales Konzept.....	56
Abbildung 36: Schaltverhalten der prognosegestützten Freigabelogik mit ausgewählten Parametern (Charge 259565, Jan 2022).....	58
Abbildung 37: Prognosegestützte Freigabelogik – Finales Konzept.....	60

Abbildung 38: Absolute Häufigkeiten von Chargen bei jeweiliger Wechselanzahl der Freigabezustände – Finales Konzept.....	62
Abbildung 39: Verteilung der Anzahl an Zeitschritten je Freigabezustand und unterteilt je ELO-Zustand – Finales Konzept	62
Abbildung 40: Verhältnis der Anzahl der Zeitschritte von den Druckwerten -3 bar zu -1 bar – Finales Konzept.....	63
Abbildung 41: Anzahl der Wechsel der Freigabezustände sortiert nach maximalem Druck d. Dampftrommel – Finales Konzept.....	63

Tabellen

Tabelle 1: ELO Betriebsarten und deren Erläuterung.....	13
Tabelle 2: Datentabelle zu den Zeitdauern der einzelnen ELO-Zustände im Januar 2022	17
Tabelle 3: Datentabelle zu den Energiemengen der einzelnen ELO-Zustände im Januar 2022	19
Tabelle 4: Datentabelle zu den Abwärmemengen der einzelnen ELO-Zustände im Januar 2022.....	21
Tabelle 5: Datentabelle zur Boxplot Auswertung der Schalldruck Mittelwerte der einzelnen ELO-Zustände für den Zeitraum Juni 2023.....	27
Tabelle 6: Mögliche Eingangsparameter für die Vorhersagemodell und Kombinationsvarianten V1 bis V6	40
Tabelle 7: Relevante Eingangsparameter für den Decision Tree Vorhersagealgorithmus	46
Tabelle 8: Prognosegestützte Freigabelogik – Initiale Version	52
Tabelle 9: Zeitdauer [min] der ELO-Zustände von Charge 259565 (Jan 2022)	56
Tabelle 10: Prognosegestützte Freigabelogik – Finale Version.....	61

Abkürzungen

Abkürzung	Erklärung / Bedeutung
AHK	Abhitzekeessel
ELO	Elektrolichtbogenofen
GMH	Georgsmarienhütte GmbH
IDE	Integrierte Entwicklungsumgebung (eng.: integrated development environment)
kW	Kilowatt (Einheit für Leistung)
LGA	Lastganganalyse
MW	Megawatt (Einheit für Leistung)
ML	Machine Learning
MZ	Medienzentrale
OHE	One Hot Encoding
R	Korrelationskoeffizient
R ²	Bestimmtheitsmaß
StW GMH	Stadtwerke Georgsmarienhütte
WÜT	Wärmeübertrager

1 Zusammenfassung

Dieses Forschungsprojekt befasst sich mit der effizienten Nutzung von Abwärme, welches einer der zentralen Herausforderungen der stahlproduzierenden Industrie im Kontext der Energiewende und des Klimawandels darstellt. Aufbauend auf bereits abgeschlossenen Forschungsprojekten zur Abwärmenutzung mit der Georgsmarienhütte GmbH als Stahlproduzent und den Stadtwerken Georgsmarienhütte als Wärmeabnehmer und -versorger, werden in diesem Projekt weitere Analysen & Ausarbeitungen durchgeführt. Ziel ist es, die bestehenden Systeme und Prozesse in ausgewählten Bereichen besser zu verstehen und die Abwärmenutzung zu optimieren. Das Gesamtsystem des Stahlwerkes und der Stadtwerke ist in der Weise aufgebaut, dass überschüssige Abwärme aus der Stahlproduktion mittels Elektrolichtbogen über einen Abhitzekeessel gewonnen wird. Diese Wärme wird z.B. über einen Wärmetauscher an die Stadtwerke Georgsmarienhütte weitergeleitet, um den Fernwärmebedarf zu decken. Weitere Wärmeabnehmer sind im Gesamtsystem vorhanden. Zusätzlich verfügt die Wärmezentrale der Stadtwerke über eigenständige Aggregate, im Falle, dass die Abwärme aus dem Stahlwerk nicht ausreicht.

Der Hauptteil der Arbeit besteht aus dem Abschnitt Datenanalyse und Konzeption eines Steuerprogramms zur optimierten Regelung zur Wärmeübergabe an das Wärmenetz der Stadtwerke oder zukünftige weitere Abnehmer.

Im Abschnitt zur Datenanalyse werden die Daten von ausgewählten Aggregaten, deren assoziierten Prozessen und Wechselwirkungen untereinander analysiert, welche bei der Entstehung und der Entwicklung der Abwärme im Stahlwerk in Verbindung stehen. Diese Untersuchungen werden auch im Hinblick auf die mögliche Integration einzelner Prozessinformation als Einflussgröße in ein Prognosemodell durchgeführt. Die Erkenntnisse aus den untersuchten Prozessen erweitern das Verständnis vom Gesamtsystem sowie derer Komponenten und unterstützen bei der Konzeption eines optimierten Steuerprogramms. Im Rahmen dieses Arbeitsteils wird auch eine bereits implementierte erweiterte Regelungslogik zur Wärmeübertragung an die Stadtwerke ausgewertet. Diese Logik erlaubt die Freigabe zur Wärmeübertragung bereits 3 bar (Druckwert der Dampftrommel) vor Einsatz der Kondensatoren, während der Betriebsart „Überhitzen“. Die Auswertungen hierzu zeigen, dass sich durch die erweiterte Regelung der Druckbereich in dem eine Wärmeübergabe an die Stadtwerke stattfindet, zu niedrigeren Drücken verschiebt. Damit findet die Übergabe frühzeitiger statt und ermöglicht prinzipiell mehr Abwärme an die Stadtwerke zu übergeben, bevor die Kondensation einsetzt.

Im zweiten Hauptteil wird durch umfangreiche Auswertung ein geeignetes Prognosemodell entwickelt, welches Teil des Konzeptes zur Optimierung der Regelung zur Wärmeübergabe an die Stadtwerke ist. Dabei hat sich der Decision Tree Algorithmus als das passendste Vorhersagemodell herausgestellt. Mit diesem Algorithmus lässt sich ein Prognosewert zur zukünftigen Abwärmeleistung nach 4 min mit einer Vorhersagegenauigkeit von $R^2 = 73\%$ berechnen. Dieses prognosegestützte Konzept wird anhand von historischen Daten optimiert, um ein möglichst schaltarmes, stabiles und auf erwartbar hohe Abwärmemengen abgestimmtes Reaktionsverhalten zu erzielen. Das finale Konzept, welches als Entscheidungslogik realisiert ist, verarbeitet diverse Ist-Werte (Druckgradient und Druck der Dampftrommel, ELO Betriebszustand) und Ausgabewerte des Prognosemodells um eine frühzeitige Freigabe zur Wärmeübergabe im Verlauf der ELO Prozessphasen zu erreichen.

2 Einleitung

2.1 Beschreibung der Umweltproblematik

Am 24.06.2021 wurde das neue Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) beschlossen. Mit dem novellierten Gesetz wird das deutsche Treibhausgasminderungsziel für das Jahr 2030 auf eine Verminderung um 65 Prozent gegenüber 1990 angehoben. Bis 2040 müssen die Treibhausgase um 88 Prozent reduziert und bis 2045 Treibhausgasneutralität verbindlich erreicht werden. Auch die Vorgaben zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in den einzelnen Sektoren (Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr Landwirtschaft und Abfall) wurden verschärft. Bis 2030 soll der CO₂-Ausstoß der deutschen Industrie im Vergleich zu 1990 auf ca. 140 Mio. Tonnen pro Jahr halbiert werden. Neben dem Ausbau der erneuerbaren Energien kommt daher den Themenfeldern Energieeffizienz und dezentrale Energieversorgung weiterhin eine Schlüsselrolle zu. Sie sind die schnellsten, größten und langfristig preiswertesten Optionen für den Klima- und Ressourcenschutz.

Die Stahlindustrie in Deutschland ist die treibende Kraft für nachhaltige Produkte, setzt Standards für eine umweltverträgliche Produktion und beteiligt sich an modernen Energieeffizienznetzwerken. Durch Einführung neuer Technologien und Ausschöpfung bestehender Potenziale kann das Ziel einer CO₂-neutralen Stahlerzeugung bis 2050 technisch nach Aussagen der Wirtschaftsvereinigung Stahl erreicht werden. Dieser Prozess stellt die Stahlindustrie allerdings vor erhebliche wirtschaftliche Herausforderungen.

Im Jahr 1990 wurden nach Daten der Wirtschaftsvereinigung Stahl in der Stahlindustrie in Deutschland ca. 61 Mio. Tonnen direkte CO₂-Emissionen freigesetzt. Um ca. 21 Prozent wurde diese Emission bis 2015 schon verringert. Zusätzlich sollen bis 2030 ca. 49-51 % CO₂-Emissionen gegenüber 1990 im Industriebereich eingespart werden. Um die im Einklang mit dem Pariser Klimaabkommen durch die deutsche und europäische Politik formulierten Ziele zu erreichen, müsste die Stahlindustrie ihren CO₂-Ausstoß bis 2050 auf 1,4 bis 3,5 Mio. t CO₂ reduzieren.

Die größten Produzenten von Treibhausgasen bzw. die größten Energieverbraucher in Industriebetrieben sind in der Regel die Maschinen und Anlagen selbst sowie die benötigte Prozesswärme. Hinzu kommen die für die Abführung der überschüssigen Wärme benötigte Kühltechnik, die Heizungs- und Lüftungstechnik sowie die Medienbereitstellung, die einen hohen Anteil am Gesamtenergieverbrauch besitzen und dadurch auch Emissionen verursachen.

Verschiedene Gründe erschweren auf den ersten Blick die Analyse bzw. Umsetzung einer energetischen Prozessoptimierung im Stahlherstellungsprozess:

- Prozesse sind direkt oder indirekt voneinander abhängig
- Prozessdaten sind nur in einzelnen Systemen verfügbar, aber werden nicht zentral zusammengeführt
- Systeme sind nicht alle in der Hand eines Betreibers (Unternehmen, Energieversorger, Netzbetreiber, Betreiber eines Nahwärmenetzes)
- Abwärmepotenziale müssen nutzbar gemacht werden

- Oftmals liegt Abwärme auf einem anderen Temperaturniveau vor als benötigt
- Häufig weichen zeitlicher Anfall und Bedarf voneinander ab
- Entfernungen zum nächsten Wärmeabnehmer sind zu groß
- Abwärmeströme sind schadstoffbelastet und müssen gereinigt werden
- die Kosten für Umbaumaßnahmen etc. rechtfertigen sich auf den ersten Blick nicht
- die Einhaltung der Prozessstabilität und Produktqualität schränkt die energetische Optimierung ein

Eine genauere Betrachtung zeigt, dass die vorhandenen Potenziale durch Technologien (Energiewandlungsanlagen) genutzt werden können. Vor dem Hintergrund steigender Energiepreise haben Industriebetriebe im Bereich der Vernetzung von Energieströmen, intelligentem Steuern und Abwärmenutzung aus industriellen Prozessen daher ein großes Potenzial zur Energie- und Kosteneinsparung.

Im Jahr 2012 wurde ein Projekt zur Analyse der bestehenden Abwärme in der Georgsmarienhütte gestartet, das zum Ziel hatte, eine Systematik zur Bewertung der Abwärmeströme zu entwickeln und Möglichkeiten für eine wirtschaftliche Abwärmenutzung aufzuzeigen.

Danach wurde zur Umsetzung im Jahr 2017 ein umfassendes Abwärmeprogramm gestartet, um interne Wärmesenken mit Abwärme zu versorgen und den Bedarf von Erdgas erheblich zu reduzieren. Das Programm wurde von der KfW gefördert. Darüber hinaus wurde im Dezember 2018 eine Abwärmeauskoppelung in Betrieb genommen, wodurch Wärme an die Stadtwerke Georgsmarienhütte übergeben und in das lokale Fernwärmenetz eingespeist wird. Es besteht weiterhin die Überlegung intern weitere Senken zu identifizieren und an die interne Fernwärme anzuschließen. Weiterhin gibt es einen regen Austausch mit den Stadtwerken Georgsmarienhütte über mögliche, weitere Wärmesenken (wie z.B. einer Klärschlamm-trocknung oder ein weiteres Wärmenetz zur Versorgung eines produzierenden Betriebs).

Durch das Projekt „Abwärmenutzung 2.0 - Bewertung und datengestützte Analyse des Abwärmenutzungspotenzials in der Stahlindustrie mittels innovativer Methoden des Machine Learnings am Beispiel der Georgsmarienhütte GmbH“ (Durchführbarkeitsstudie) konnten die weiteren Potentiale der Abwärmenutzung und Prozessoptimierung theoretisch herausgearbeitet und nachgewiesen werden. Die ursprüngliche, jährlich kondensierte Wärmemenge von rund 40.000 MWh/a konnte durch die im Projekt bediente Wärmesenken, und als Potenzial die Substitution der Wärmeerzeugung der Stadtwerke zwar verringert werden, aber es bleibt ein weiteres nutzbares Potenzial von ca. 34.000 MWh/a. Das geplante Projekt zur Klärschlamm-trocknung mittels Abwärme konnte bislang nicht realisiert werden.

In dem Projekt wurde des Weiteren herausgearbeitet, dass weitere Optimierungen durch eine ganzheitliche, übergeordnete Steuerung der Energieströme als großes Potenzial bestehen. Auf Grund der Erkenntnisse aus dem Projekt „Abwärmenutzung 2.0“ ist die hardwareseitige und systemtechnische Umsetzung des Projektes bereits gestartet und die bestehende Anlagentechnik wird für die zukünftige Intelligenz erneuert und verschaltet. Hierzu zählen neue Steuerungstechnik (DDC auf Feldebene); Optimierung der energieführenden Systeme (Rohrleitungen, regelbare Ventile), messtechnische Erweiterungen von Energiezählern, Kameratechnik und weiterer Sensorik (wie z.B. Trübheitssensoren) zur

Erfassung von Einflussgrößen. Die technische Basis ist nach der hardwareseitigen Erweiterung gelegt, um Erprobung und weitere Optimierung der Parameter umzusetzen.

2.2 Darstellung der umweltrelevanten Ziele und Energiebilanz-Modellrechnung

Im Jahr 2017 wurden nach Angaben von Worldsteel weltweit insgesamt 1.691 Millionen Tonnen Stahl produziert. Das mit großem Abstand bedeutendste Herstellerland war 2017 die Volksrepublik China mit 832 Millionen Tonnen. Deutschland ist der acht-größte Stahlproduzent mit 43,6 Millionen Tonnen pro Jahr (das entspricht einem Marktanteil von etwa 2,5 %).

Rund 22 TWh bezieht die Stahlindustrie in Deutschland jedes Jahr an Strom. Dies sind 9 % des industriellen Verbrauchs und 4 % des Gesamtverbrauchs in Deutschland. Der Erdgasbezug liegt bei 27 TWh im Jahr.

Bei einem angenommenen Abwärmepotenzial von 5 % sowohl bei Strom als auch beim Erdgas und einem mittleren Wirkungsgrad der Wandlungstechnologie von 15 % ergibt sich somit eine Energiemenge von 367,5 GWh. Dies entspricht, bei Annahme der CO₂-Emissionen des deutschen Strommixes (474 g/kWh), einem Minderungspotenzial von etwa 175.000 t CO₂-Emissionen bei einer Stromerzeugung oder bei der Annahme einer CO₂-Emissionen für die Wärmeerzeugung mit Erdgas (202 g/kWh) ein Minderungspotenzial von ca. 75.000 t CO₂-Emissionen.

Bezogen auf die oben genannten noch verfügbaren Abwärmemengen des hier betrachteten Elektrolichtbogenofens von 34.000 MWh/a ergeben sich Treibhausgasminderungspotenziale im Rahmen der Wärmeversorgung (Substitution von Erdgas) von ca. 6.800 t CO₂-Emissionen bzw. bei einer Verstromung mit einem Nutzungsgrad von 15 % von ca. 2.400 t CO₂-Emissionen.

3 Projektablauf

Der Hauptteil des Abschlussberichtes dokumentiert die durchgeführten Analysen und Ausarbeitungen des Forschungsvorhabens. Die relevanten Systemkomponenten von der Georgsmarienhütte GmbH und den Stadtwerken Georgsmarienhütte werden einführend beschrieben. Es folgen die zwei großen Arbeitspakete, welche hier im Vorfeld kurz erläutert werden:

Kapitel 3.1 – Datenanalyse

In diesem Arbeitsschritt werden die Daten von ausgewählten Aggregaten und deren assoziierten Prozessen analysiert. Dadurch wird das Verständnis über Abläufe, Zusammenhänge und Auswirkungen von und zwischen einzelnen Systemkomponenten erweitert. Ein Teil der durchgeführten Analysen ist dadurch motiviert, dass hieraus gezielt Erkenntnisse erarbeitet werden sollen, die potenziell bei der Konzeption eines optimierten Steuerprogramms verwendet werden können. Des Weiteren wird ein anderer Teil durchgeführt um Änderung in der Regelung und deren Auswirkung auf das System auszuwerten.

Kapitel 3.2 - Konzeption des Steuerprogramms

In diesem Teil wird durch umfangreiche Auswertung ein geeignetes Prognosemodell entwickelt, welches Teil des Konzeptes zur Optimierung der Regelung zur Wärmeübergabe an die Stadtwerke sein soll. Bei diesem Konzept handelt es sich somit um eine prognosegestützte Freigabelogik. Anhand von historischen Daten wird das Verhalten dieser entwickelten Freigabelogik optimiert und ein finales Konzept präsentiert.

Relevante Aggregate im System

Die Zusammenhänge der einzelnen Aggregate und Anlagenteile sowohl auf der Seite der Georgsmarienhütte GmbH (GMH) als auch auf der Seite der Stadtwerke Georgsmarienhütte (StW GMH) werden durch ein Fließbild in Abbildung 1 veranschaulicht. Diese beiden Systeme sind über einen Wärmetauscher miteinander verbunden, der gleichzeitig die Grenze zwischen den Systemen darstellt. Über den Wärmetauscher kann der Wärmespeicher der Stadtwerke beladen werden. Das Fließbild illustriert einerseits die Systeme der Georgsmarienhütte GmbH, die entweder durch den Abhitzeessel (AHK) oder über die Medienzentrale (MZ) mit Energie versorgt werden. Andererseits zeigt es die Anlagen der Wärmezentrale der Stadtwerke. Dort sind ein Blockheizkraftwerk (BHKW), ein Gaskessel und ein Ölkessel installiert, um den Wärmebedarf des Fernwärmenetzes zu decken, falls die übergebene Wärmeleistung des Stahlwerks nicht ausreicht. Die Georgsmarienhütte GmbH misst alle wesentlichen, durch Rohre transportierten Medien wie Erdgas, Sauerstoff, Argon, Stickstoff, Druckluft und Wärme, ebenso wie die elektrische Energie. Diese Daten werden kontinuierlich als 15 Minuten Werte archiviert und für eine detailliertere Analyse stehen zusätzlich 30-Sekunden-Messwerte für das vergangene Jahr zur Verfügung.

Ein zentraler Punkt des Systems ist der Wärmetauscher, in welchem die Abwärme aus dem Stahlwerk eingespeist wird. Hier kommen die Primär- und Sekundärseite zusammen. Vorrangig wird versucht, den Wärmebedarf des Fernwärmenetzes der Stadtwerke durch die Nutzung der Abwärme aus dem

Stahlwerk zu decken. Der Wärmetauscher hat eine maximale Kapazität von 11 MW, wodurch die übertragbare Wärmemenge begrenzt ist. Wann und in welchem Umfang die Abwärme zur Verfügung gestellt wird, hängt von den Druckverhältnissen in der Dampftrommel des Abhitzekeessels der Georgsmarienhütte ab. Sobald der Druck 17 bar erreicht, wird das Ventil geöffnet und Wärme an die Stadtwerke übertragen. Wenn der Druck einen variablen Schwellenwert überschreitet, beginnt die Kondensation am Rückkühlwerk, d.h. die Wärmeabnahme reicht nicht aus, um einen weiteren Druckanstieg zu verhindern. Der überschüssige Dampf wird kondensiert und die enthaltene Wärme geht verloren. Die Übergabe an die Stadtwerke erfolgt, solange der Druck oberhalb von 16 bar liegt. Sinkt der Druck unter diesen Wert, schließt das Ventil, und die Wärmeübergabe wird unterbrochen. Sollte weiterhin Wärmebedarf im Fernwärmenetz bestehen, übernimmt die Wärmezentrale der Stadtwerke die Versorgung.

Die Menge der verfügbaren Abwärme bei der Georgsmarienhütte hängt im Wesentlichen davon ab, ob der Elektrolichtbogenofen (ELO) in Betrieb ist. Es lassen sich verschiedenen Betriebsarten unterscheiden, siehe dazu Tabelle 1.

Tabelle 1: ELO-Betriebsarten und deren Erläuterung

Betriebsarten	Erläuterung
1	Grundstellung
2	Chargieren 1. Korb
4	Schmelzen 1. Korb
5	Chargieren 2. Korb
6	Schmelzen 2. Korb
8	Überhitzen
16	Abschlacken
32	Abstich Anfang
64	Abstich

Während der Ofen aktiv ist, kann die entstehende Abwärme durch den Abhitzekeessel genutzt werden. Sinkt der Druck in der Dampftrommel jedoch unter 14 bar, wird die Medienzentrale der GMH eingeschaltet, um den internen Wärmebedarf zu decken. Mehrere interne Wärmeabnehmer, darunter die Sauerstoffanlage, die Vakuumanlage, die interne Heizung und die Speisewasservorwärmung können sowohl durch den Abhitzekeessel als auch durch die Medienzentrale versorgt werden. Die interne Heizung kann zusätzlich mit Abwärme aus dem Ofen 63 betrieben werden.

Das Abhitzeprofil des ELO ist sehr dynamisch mit Erzeugungsspitzen in der Überhitzungsphase des Ofenprozesses. Der Gesamtprozess dauert, sofern es nicht zu Störungen kommt, jeweils ca. eine Stunde.

Die Vakuumanlage benötigt je Ofencharge und zeitversetzt zu dieser eine Wärmeleistung von ca. 10 MW über einen Zeitraum von ca. 20 min. Prozesstechnisch hängt der Prozess der Vakuumanlage zeitlich von der nachgelagerten Stranggussanlage ab und kann bislang nicht anhand der verfügbaren Abwärme aus

dem ELO gesteuert werden. Der Wärmebedarf der Gebäudeheizung ist stark von der Witterung geprägt und folgt damit einem saisonalen Profil.

Das Abhitzesystem des ELO weist selber eine Wärmespeicherfähigkeit über das vorhandene Leitungsnetz mit gleitend gefahrenem Dampfdruck sowie mit einem integrierten Dampfspeicher auf.

Im Stahlwerk hat die interne Nutzung der Abwärme stets Vorrang, bevor überschüssige Wärme an die Stadtwerke weitergeleitet wird. Dementsprechend versorgte die Regellogik in der Vergangenheit immer prioritär zunächst die internen Wärmeverbraucher und danach die Speicherkapazität des Dampfsystems. Erst wenn das Dampfsystem fast den Einschaltdruck des Rückkühlwerks erreicht hatte, wurde die Übergabe von Wärme an das Fernwärmesystem der Stadtwerke freigegeben. Im Ergebnis führte dies aufgrund der hohen Dynamik des Abhitzeanfalls dazu, dass während der Wärmeübergabe häufig auch bereits rückgekühlt werden musste.

Aufgrund der Ergebnisse des Projekts Abwärme 2.0 konnten hier bereits Optimierungen in der Regelung umgesetzt werden. Während der Überhitzungsphase des ELO wird nun schon die Freigabe zur Übergabe an das Fernwärmesystem der Stadtwerke erteilt, obwohl der Dampfdruck auf der Abhitzekessel noch nicht seinen maximalen Wert erreicht hat. Damit kann die Übergabe früher starten und über einen längeren Zeitraum erfolgen, womit im Ergebnis eine größere Wärmemenge bei gleicher maximaler Wärmeleistung übertragen werden kann.

Für eine weitere Nutzung der weiterhin verfügbaren Abwärme sind mehrere externe wie interne Verbraucher in der Diskussion. Zu nennen sind hier insbesondere:

- Aufbau eines weiteren Fernwärmenetzes zur Versorgung eines Industriebetriebes der Lebensmittelindustrie und eines Wohngebietes unter Einbindung von Abwärme aus der benachbarten Möbelindustrie
- Errichtung einer Anlage zur Klärschlamm-trocknung
- Stromerzeugung mittels einer ORC-Anlage

Für alle Optionen sollten aus wirtschaftlichen Gründen die Komponenten zur Nutzung oder Übergabe der Abwärme möglichst klein dimensioniert werden und über einen möglichst langen Zeitraum betrieben werden. Damit kann eine hohe Zahl an Vollbenutzungsstunden erreicht werden. Hierfür soll der Grundgedanke des Projektes Abwärme 2.0 weiterverfolgt werden: Die Übergabe oder Nutzung erfolgt bereits bevor die Spitze der Erzeugungsleistung erreicht wird und der Dampfdruck entsprechend angestiegen ist. Die Speicherkapazität des Dampfsystems wird dabei nicht mehr vorrangig bedient. Vielmehr wird der Dampfspeicher zunächst nur teilweise gefüllt und kann im Besten Fall die später auftretende Erzeugungsspitze noch einspeichern, anstatt sie über das Rückkühlwerk an die Umgebung abzugeben.

Flexibilisierungspotenziale auf Seiten der bereits bestehenden Wärmesenken im System (Lastmanagement) können aufgrund technologischer Abhängigkeiten derzeit nicht gehoben werden.

3.1 Datenanalyse

In der Datenanalyse wird das Verhalten von und zwischen einzelnen Systemkomponenten ausgewertet. Deren Erkenntnisse fließen in die Konzeption eines optimierten Steuerprogramms mit ein.

In den einzelnen Kapiteln der Datenanalyse wird z.T. die Boxplot Methode zur Darstellung der Auswertungsergebnisse verwendet, da sie eine kompakte Visualisierungsmethode bietet. Diese Methode ist ein statistisches Diagramm, das zur Visualisierung der Verteilung eines Datensatzes verwendet wird. Sie ermöglicht eine Zusammenfassung der zentralen Tendenz, Streuung und potenziellen Ausreißer in den Daten. Ein Boxplot besteht aus mehreren wesentlichen Elementen. Der Median, dargestellt durch eine mittlere Linie in der Box, teilt den Datensatz in zwei Hälften und gibt den Zentralwert der Daten an. Das arithmetische Mittel, gekennzeichnet durch ein Kreuz, stellt das durchschnittliche Ergebnis dar. Die Box selbst repräsentiert den Interquartilsabstand (IQR), der den Bereich von der ersten Quartile (Q1) bis zur dritten Quartile (Q3) abdeckt und die mittleren 50% der Daten enthält. Von der Box aus verlaufen sogenannte Whiskers (Antennen), die den Bereich der Daten anzeigen, der nicht als Ausreißer betrachtet werden. Diese Whiskers enden bei 1,5-mal dem IQR über oder unter den benannten Quartilen. Datenpunkte, die außerhalb dieses Bereichs liegen, werden als potenzielle Ausreißer markiert und liegen signifikant außerhalb des Bereichs der meisten anderen Datenpunkte. Da Boxplots auf dem Median basieren und nicht auf dem Mittelwert, sind sie weniger anfällig für Verzerrungen durch Ausreißer oder extreme Werte.

3.1.1 Elektrolichtbogenofen Prozesse im Detail

3.1.1.1 ELO-Zeitdauer während einzelner ELO-Zustände & Gesamtchargen

In diesem Unterkapitel werden die Zeitdauern des Elektrolichtbogenofens der einzelnen ELO-Phasen und die Gesamtdauer der Chargen von insgesamt 598 Chargen aus dem Januar 2022 ausgewertet. Der resultierende Boxplot für die einzelnen ELO-Phasen ist in Abbildung 2 und die zugehörigen ausgewerteten Daten in Tabelle 2 dargestellt. Die Analyse der Gesamtdauern ist in Abbildung 3 zusammengefasst.

In der erst genannten Abbildung zeigt sich, dass die Zeitdauer verschiedener ELO-Zustände deutliche Unterschiede in der Verteilung und dem Zentralmaß der Daten aufweisen. Für die Zeitdauer der untersuchten Chargen bei ELO-Zustand 1 ergibt sich einen Medianwert von einer Minute und einen Mittelwert von 5,62 Minuten. Der relativ große Unterschied zwischen diesen beiden Werten deutet auf einige Ausreißer mit erhöhten Werten hin. Der Zeitdauerwert für Chargieren während ELO-Zustand 2 ist relativ niedrig, mit einem Median von 2 Minuten und einem Mittelwert von 2,95 Minuten. Die Werte resultierend während Zustände 4, 6 und 8 weisen die längsten Zeitdauern auf, mit Medianwerten von 14,5 Minuten, 8,5 Minuten und 24,5 Minuten. Die sich ergebenden Zeitwerte bei ELO-Zustände 1, 2, 5, 16, 32 und 64 weisen kürzere Zeitdauern auf, welche unterhalb bzw. gleich 3,5 Minuten liegen.

In Abbildung 3 ist die Verteilung der Gesamtdauern der Chargen im Zeitraum Januar 2022 als Histogramm und Boxplot dargestellt. Das Histogramm zeigt die Anzahl der Chargen für verschiedene Zeitintervalle. Die meisten Chargen finden sich in den Zeitintervallen zwischen 54 und 60 Minuten wieder, wobei die höchste Anzahl von Chargen (50) im Intervall von 55 bis 56 Minuten verzeichnet wurde.

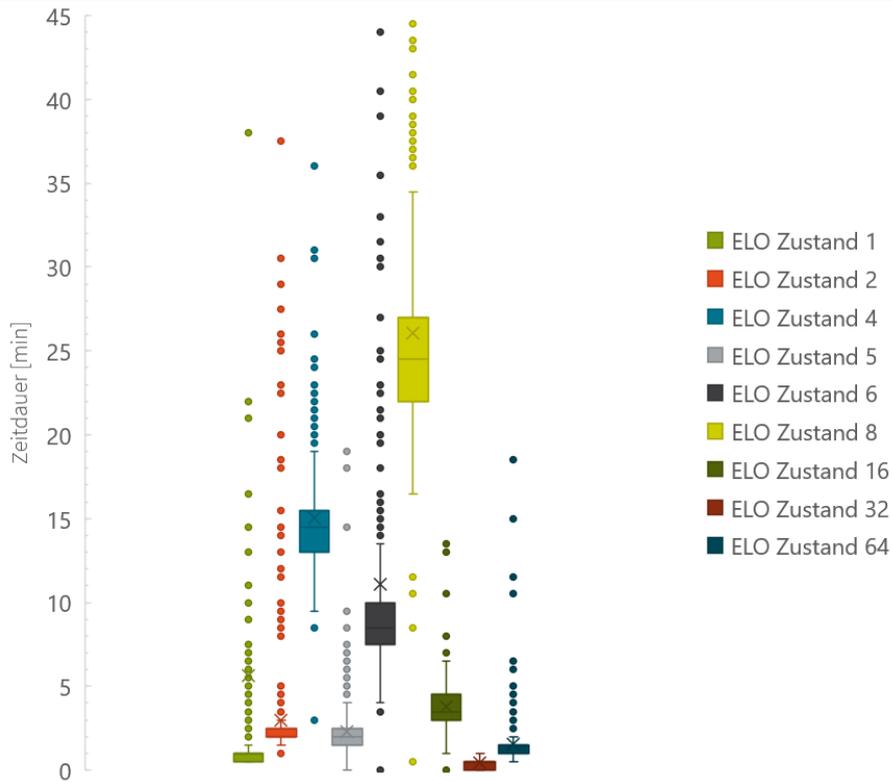


Abbildung 2: Auftragung der Zeitdauern der einzelnen ELO-Zustände im Januar 2022 als Boxplot (598 Chargen)

Der Boxplot auf der rechten Seite in Abbildung 3 ergänzt das Histogramm, indem er die statistische Verteilung darstellt. Der Median der Zeitdauern liegt bei 59 Minuten, welche durch die mittlere Linie innerhalb der Box markiert wird. Die untere und obere Quartile besitzen die Werte 56 bzw. 65 Minuten und zeigen auf, dass 50 % der Chargen eine Dauer zwischen diesen Werten besitzt. Es zeigen sich einige Ausreißer oberhalb des oberen Whiskers, welche darauf hindeuten, dass Chargen existieren, die deutlich längere Zeitwerte als der Großteil der Daten aufweisen. Es handelt sich hier sehr wahrscheinlich um Chargen mit gestörten ELO-Prozessen.

Tabelle 2: Datentabelle zu den Zeitdauern der einzelnen ELO-Zustände im Januar 2022

ELO-Zustand	1	2	4	5	6	8	16	32	64
Mittelwert [min]	5,62	2,95	15,05	2,30	11,11	26,05	3,77	0,42	1,57
Median [min]	1,00	2,00	14,50	2,00	8,50	24,50	3,50	0,50	1,50
Q1 [min]	0,50	2,00	13,00	1,50	7,50	22,00	3,00	0,00	1,00
Q3 [min]	1,00	2,50	15,50	2,50	10,00	27,00	4,50	0,50	1,50
IQR [min]	0,50	0,50	2,50	1,00	2,50	5,00	1,50	0,50	0,50
Q1 - 1,5 IQR [min]	0,00	1,25	9,25	0,00	3,75	14,50	0,75	0,00	0,25
Q3 + 1,5 IQR [min]	1,75	3,25	19,25	4,00	13,75	34,50	6,75	1,25	2,25

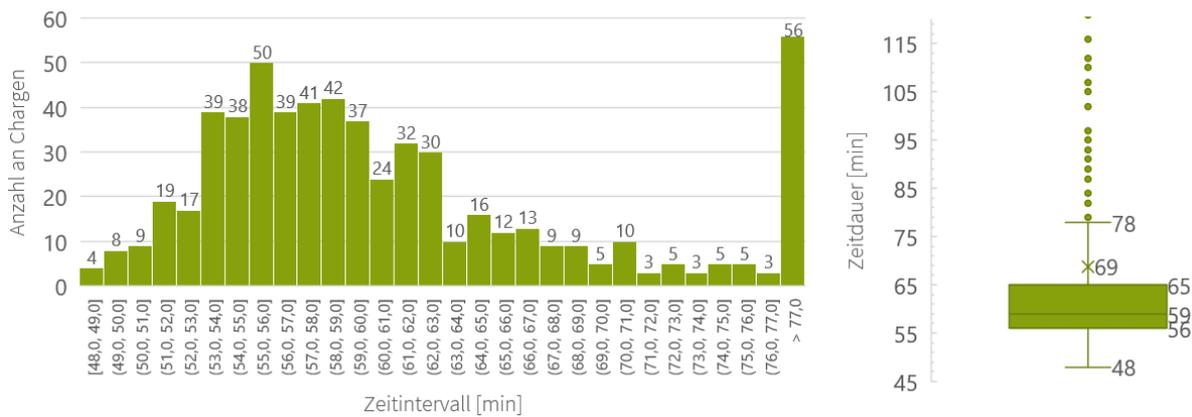


Abbildung 3: (links) Verteilung der Anzahl an Chargen der Gesamtchargen Prozessdauer unterteilt in Zeitintervalle im Januar 2022 (rechts) Auftragung der Zeitdauern der Chargen als Boxplot

3.1.1.2 ELO Energiemengen während einzelner ELO-Zustände & Gesamtchargen

In diesem Unterkapitel werden der elektrische Energiebedarf des Elektrolichtbogenofens während der einzelnen ELO-Phasen und den Gesamtchargen bei 598 Chargen aus dem Januar 2022 analysiert. Der resultierende Boxplot für die einzelnen ELO-Phasen ist in Abbildung 4 und die zugehörigen Daten in Tabelle 3 zusammengefasst.

Der Boxplot zeigt, dass die Zustände 1, 2, 5, 16, 32, und 64 im Vergleich einen sehr geringen elektrischen Energiebedarf besitzen. Der Median und der Mittelwert dieser Zustände liegen alle unter 0,35 MWh. Der Energiebedarf für ELO-Zustand 4, 6, und 8 heben sich hingegen deutlich ab. Der Energiebedarf im Zustand 4 hat einen Median von 18,73 MWh und einen Mittelwert von 18,57 MWh. Zustand 6 zeigt einen Energiebedarf mit einem Median von 10,11 MWh und einem Mittelwert von 10,21 MWh. Der höchste Energiebedarf tritt jedoch im Zustand 8 auf, bei welchem der Median bei 31,71 MWh und der Mittelwert bei 31,91 MWh liegt. Die Interquartilsabstände (IQRs) sind ebenfalls unterschiedlich: Während ELO-Zustand 8 zeigt den größten IQR von 4,51 MWh auf, wodurch eine breitere Streuung der Werte und somit größere Schwankungen im Energiebedarf in diesem Zustand verdeutlicht wird. Im Gegensatz dazu zeigen die Zustände mit geringem Energiebedarf (1, 2, 16, 32, 64) sehr geringe IQRs.

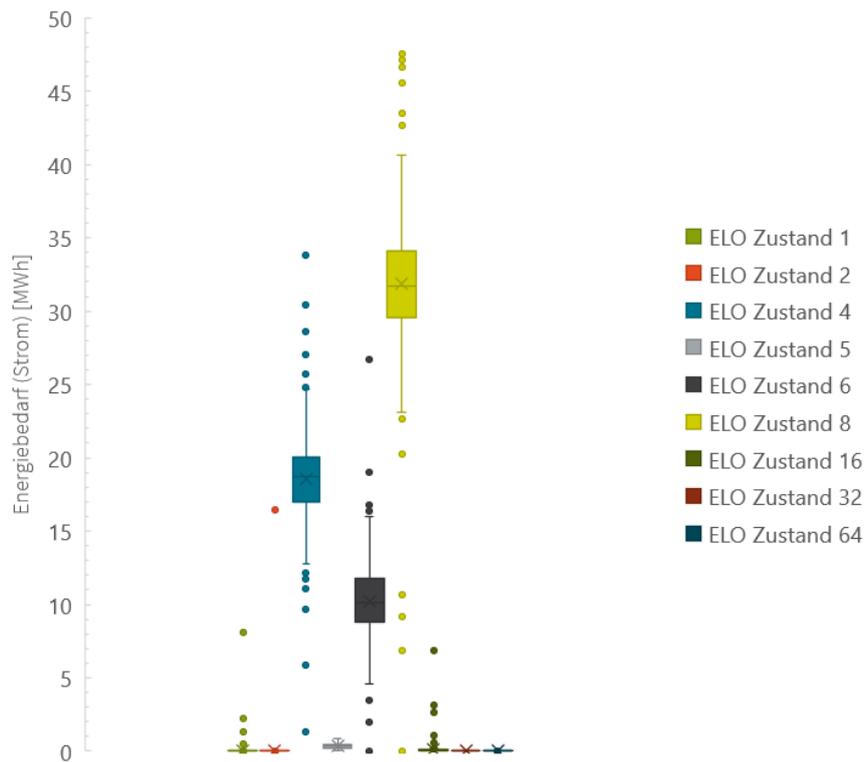


Abbildung 4: Auftragung der Energiebedarfe (Strom) der einzelnen ELO-Zustände im Januar 2022 als Boxplot (598 Chargen)

Tabelle 3: Datentabelle zu den Energiemengen der einzelnen ELO-Zustände im Januar 2022

ELO-Zustand	1	2	4	5	6	8	16	32	64
Mittelwert [MWh]	0,03	0,05	18,57	0,35	10,21	31,91	0,13	0,00	0,01
Median [MWh]	0,01	0,01	18,73	0,35	10,11	31,71	0,03	0,00	0,01
Q1 [MWh]	0,00	0,01	17,01	0,23	8,80	29,60	0,02	0,00	0,01
Q3 [MWh]	0,01	0,02	20,09	0,48	11,75	34,10	0,09	0,01	0,01
IQR [MWh]	0,01	0,00	3,08	0,25	2,95	4,51	0,06	0,01	0,01
Q1 - 1,5 IQR [MWh]	0,00	0,01	12,38	0,00	4,38	22,84	0,00	0,00	0,00
Q3 + 1,5 IQR [MWh]	0,02	0,02	24,71	0,86	16,17	40,86	0,18	0,02	0,02

In Abbildung 5 wird mittels Histogramms, die Verteilung der Anzahl von Chargen mit spezifischer Energiemenge pro Charge dargestellt. Durch einen zusätzlichen Boxplot in dieser Abbildung werden weitere Aspekte dieser Verteilung visualisiert. Die meisten Chargen treten in den Intervallen zwischen 55 MWh und 65 MWh auf. Insbesondere existieren 75 Chargen mit einem elektrischen Energiebedarf im Intervall von 61 bis 62 MWh, welche die größte Anhäufung von Chargen in den vordefinierten Energieintervallen bilden. Weiterhin zeigt sich ein deutlicher Abfall von auftretenden Chargen zu den Energieintervallen unter 50 MWh und über 70 MWh. Der Boxplot rechts ergänzt die Verteilungsdarstellung. Der Median und Mittelwert des elektrischen Energiebedarfs pro Charge liegen bei 61 MWh. Die unteren und oberen Quartile liegen bei 59 MWh und 64 MWh. Es existieren wenige Ausreißer die 70 MWh überschreiten bzw. 52 MWh unterbieten.

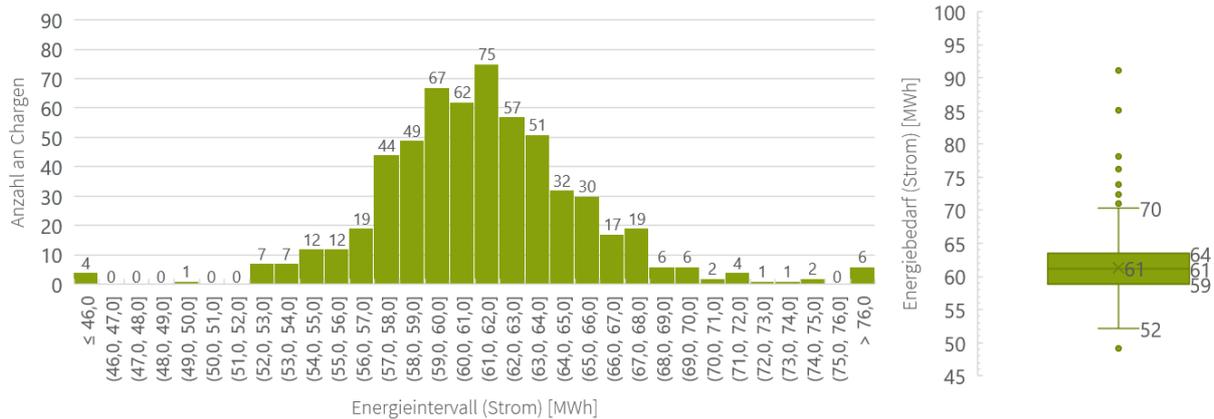


Abbildung 5: (links) Verteilung der Anzahl an Chargen mit spezifischer Energiebedarfsmenge unterteilt in Energieintervalle im Januar 2022 (rechts) Auftragung der Energiebedarfe (Strom) pro Charge als Boxplot

3.1.2 Abwärmemengen aus dem Abhitzekeessel

In diesem Unterkapitel werden die Abwärmemenge im Abhitzekeessel für die einzelnen ELO-Phasen und den Gesamtchargen bei 598 Chargen aus dem Januar 2022 in ausgewertet. Die Boxplotdarstellung in Abbildung 6 visualisiert die zentralen Tendenzen und Streuungen der Daten für jeden ELO-Zustand in Bezug auf die erzeugte Abwärmemenge in MWh und die zugehörigen Daten sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Die Abwärmemengen während ELO-Zustand 8 weisen den höchsten Medianwert von 9,62 MWh auf und darauffolgend die Energiemengen bei ELO-Zustand 4 mit einem Median von 3,57 MWh. Im Zustand 4 zeigt sich eine relativ enge Streuung um den Median im Vergleich zur Verteilung der Abwärmemengen während Zustand 8, welche eine größere Variabilität aufweisen. Die resultierenden Werte assoziiert mit ELO-Zustände 1, 2, 5, 6, 16, 32 und 64 haben deutlich geringere Median- und Mittelwerte. Abbildung 7 zeigt auf der linken Seite ein Histogramm, dass die Häufigkeit der Chargen in Bezug auf spezifische Energiemengen des Parameters AHK Erzeugung pro Charge darstellt. Auf der rechten Seite wird mittels Boxplot die statistische Verteilung zusätzlich veranschaulicht. Das Histogramm zeigt, dass die meisten Chargen eine Abwärmemenge (AHK-Erzeugung) im Bereich von 13,3 bis 14,3 MWh und 15,3 bis 16,3 MWh aufweisen, wobei diese Intervalle je 82 und 69 Chargen umfassen, was die höchsten Häufigkeiten in der Verteilung repräsentieren. Die Häufigkeit der Chargen nimmt in den höheren Energieintervallen tendenziell ab, wobei nur wenige Chargen in den Intervallen über 22,3 MWh liegen. Der Boxplot auf der rechten Seite zeigt einen Median der Abwärmemengen von AHK-Erzeugung bei 15 MWh. Hier liegt das erste Quartil bei 13 MWh und das dritte Quartil bei 18 MWh.

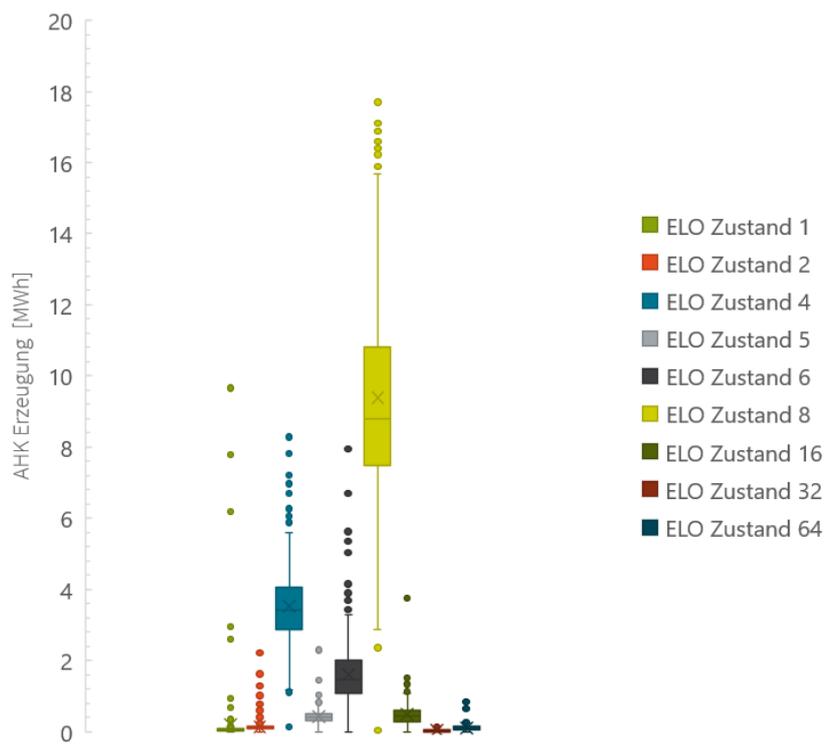


Abbildung 6: Auftragung der Abwärmemengen (AHK Erzeugung) der einzelnen ELO-Zustände im Januar 2022 (598 Chargen)

Tabelle 4: Datentabelle zu den Abwärmemengen der einzelnen ELO-Zustände im Januar 2022

ELO-Zustand	1	2	4	5	6	8	16	32	64
Mittelwert [MWh]	0,13	0,12	3,63	0,45	1,58	9,97	0,50	0,03	0,11
Median [MWh]	0,05	0,10	3,57	0,40	1,41	9,62	0,45	0,03	0,09
Q1 [MWh]	0,02	0,07	2,92	0,30	1,03	7,91	0,28	0,00	0,06
Q3 [MWh]	0,07	0,12	4,11	0,52	1,90	11,76	0,64	0,05	0,13
IQR [MWh]	0,05	0,05	1,19	0,22	0,86	3,85	0,36	0,05	0,08
Q1 - 1,5 IQR [MWh]	0,00	0,00	1,14	0,00	0,00	2,14	0,00	0,00	0,00
Q3 + 1,5 IQR [MWh]	0,14	0,20	5,90	0,86	3,19	17,52	1,17	0,12	0,25

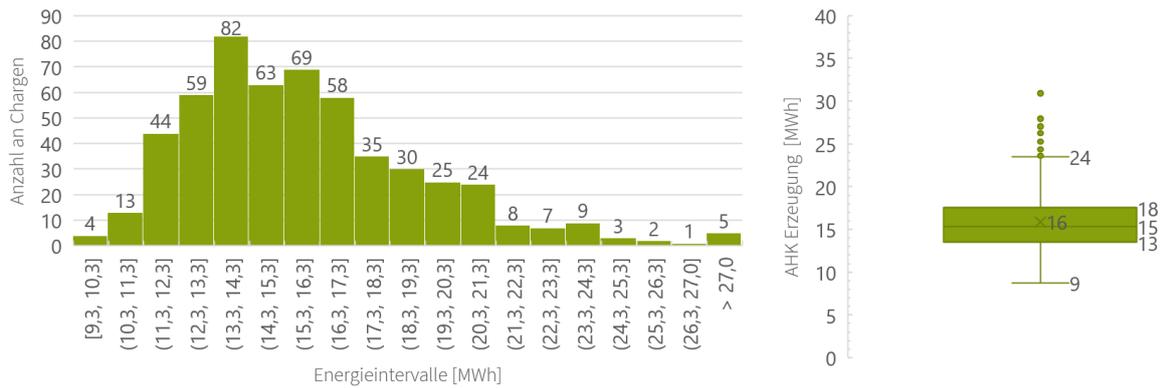


Abbildung 7: (links) Verteilung der Anzahl an Chargen mit spezifischer Abwärmemenge unterteilt in Energieintervalle im Januar 2022 (rechts) Abwärmemenge (AHK Erzeugung) pro Charge

3.1.3 Betrieb der Vakuumanlage

Die Vakuumanlage ist nicht mit den ELO-Prozessphasen synchronisiert, d.h. der aktuell manuell getätigte Start der Vakuumanlage findet nicht gezielt in Zeiträumen statt, in welchem hohen Abwärmemenge im Abhitzekeessel erwartet werden. Das Ziel der folgenden Analyse ist den Betrieb der Vakuumanlage zu verstehen und zu quantifizieren, um daraus einen Vorschlag zu erarbeiten, wann ein Start der Vakuumanlage am sinnvollsten erscheint. Damit die zeitweisen hohen Wärmemengen im Dampfnetz am effektivsten ausgenutzt werden können.

Vakuumanlage - Energiemenge je Vakuumcharge

In diesem Unterkapitel wird das Verhalten der Vakuumanlage analysiert. Der Betrieb der Vakuumanlage ist durch leicht abzugrenzende Zeitabschnitte im Lastgang (Leistung-Zeit-Datenreihe) charakterisiert, welcher hier nicht explizit dargestellt ist. Daher können die Energiemengen je Abschnitt mit hoher Genauigkeit berechnet werden. Diese Abschnitte werden im Folgendem als Vakuumchargen bezeichnet. Die Verteilung der Energienutzung über die verschiedenen Vakuumchargen wird mittels Histogramms, siehe Abbildung 8, ausgewertet, um das allgemeine Nutzungsverhalten der Vakuumanlage besser zu verstehen.

Das Histogramm zeigt eine auffällige Häufung bei sehr niedrigen Energieniveaus, d.h. im Intervall von 0 bis 0,25 MWh, mit einer Anzahl von 816 Vakuumchargen. Bei der Betrachtung, welche hier nicht explizit dargestellt werden, des Lastgang zeigen sich mehrere sehr kurze Zeitabschnitte bei sehr niedrigen Leistungswerte, d.h. unterhalb von 0,5 MW. Diese kleinen Spitzen finden vor oder nach der längeren Betriebsabschnitten statt und werden nicht zu der tatsächlichen Vakuumbehandlung in der Stranggussanlage hinzugezählt. Das linke Drittel des Histogramms fasst somit ein anomales Verhalten zusammen. Der zweite Bereich mit einer hohen Anzahl an Chargen zeigt sich im Energiebereich von circa 2 bis 4 MWh. Das höchste Intervall in diesem Bereich liegt bei 2,75 bis 3 MWh mit 148 Vakuumchargen, gefolgt von den Intervallen 3,25 bis 3,5 MWh und 2,5 bis 2,75 MWh mit 110 bzw. 105 Vakuumchargen. Aus dieser Verteilung wird geschlussfolgert, dass eine durchschnittliche Vakuumcharge bei einem Energiebedarf von circa 3 MWh liegt.

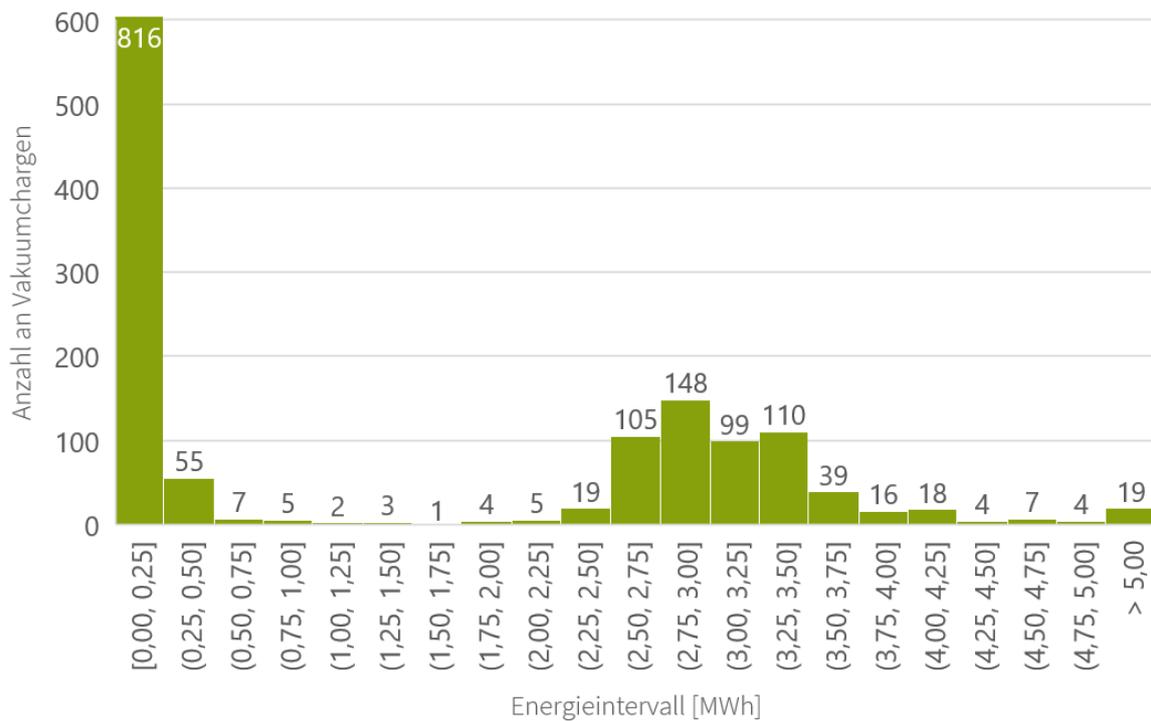


Abbildung 8: Verteilung der Anzahl an Vakuumchargen mit einer spezifischen Energiemenge einer Vakuumcharge unterteilt in Energieintervalle im Januar 2022

Um die Prozessdauer einer typischen Vakuumchargen zu beziffern, kann anstatt die Energiemenge während einer Vakuumcharge die Zeitdauer bestimmt werden. Es ergibt sich eine durchschnittliche Zeitdauer einer Vakuumcharge von 22 Minuten.

Aus den Auswertungen der einzelnen ELO-Zustandsdauern aus Kapitel 3.1.1.1 und den aus diesem Unterkapitel erarbeiteten Informationen lässt sich ein Vorschlag für eine mögliche zeitliche Abstimmung der Vakuumanlage und den ELO-Betriebszuständen präsentieren, welche in Abbildung 9 dargestellt ist. In dieser Darstellung sind die Medianwerte der einzelnen ELO-Zustandsdauern in Minuten angegeben.

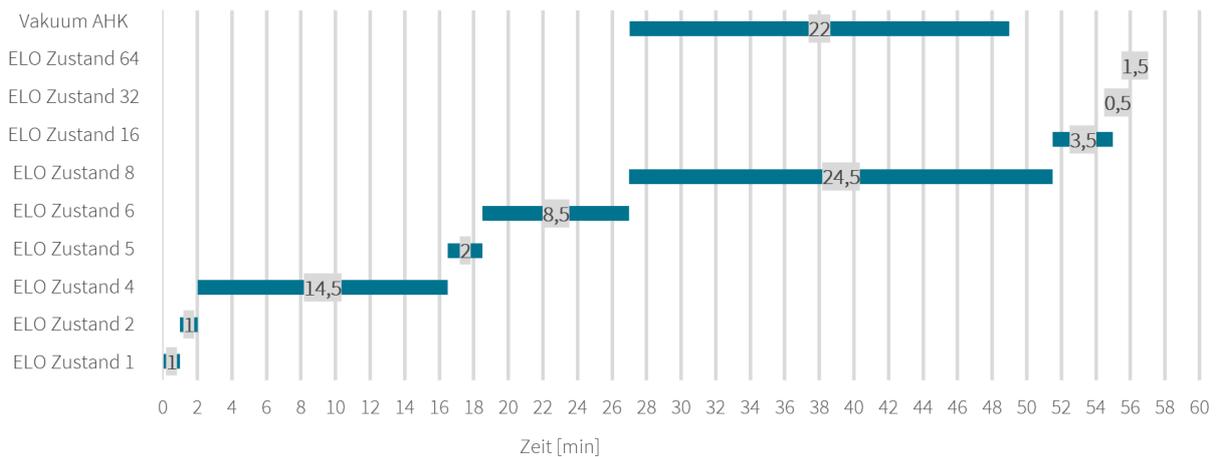


Abbildung 9: Mögliche zeitliche Abstimmung zwischen Vakuumanlage und ELO-Prozessphasen

Der Startzeitpunkt liegt optimalerweise ab ELO-Zustand 8 bzw. frühesten ab Zustand 4, da hier große Abwärmemenge in das Dampfsystem übertragen werden, vgl. dazu auch Abbildung 6.

3.1.4 Auswirkungen von dem herzustellenden Werkstoff auf die Systeme von GMH

In diesem Unterkapitel wird der Einfluss des Produktnamens (Werkstoffnummer/Werkstoffname) auf verschiedene GMH-Systemkomponenten untersucht. Dazu wird ein Datensatz aus dem Zeitraum vom Januar bis Juni 2022 mit insgesamt 3550 Chargen genutzt welcher in Abbildung 10 als Diagramm dargestellt ist. In einem ersten Versuch wird die Information über den herzustellenden Werkstoff als Einflussgröße für die Vorhersage der Abwärmeleistung verwendet. Es stellt sich heraus, dass dieser Ansatz zu keinem Erfolg führt, da die Information wie bspw. die Werkstoffnummer über eine Charge konstant bleibt. Ein Vorhersagealgorithmus, welchem neben der Werkstoffnummer Daten weitere Einflussparameter in einem Takt von 30 Sekunden zur Verfügung steht, stuft den Einfluss der Werkstoffnummer als nicht existent ein und justiert in der Regressionsformel die Konstanten in der Weise, dass die Werkstoffnummer keine Relevanz besitzen. Dies geschieht in allen getesteten Fällen, da die weiteren Einflussparameter generell eine ausreichend hohe Korrelation mit der abhängigen Variable aufweisen. Daher wird in einem zweiten Versuch ein möglicher Zusammenhang von den Energiemengen eine Charge wie z.B. im Bezug auf den elektrischen Energiebedarf des ELOs zum hergestellten Produkt untersucht. Dazu wird eine Auswertung mittels Boxplot Methode für die 5 häufigsten Produkte durchgeführt und diese Verteilung mit der Gesamtverteilung der elektrischen Energiebedarfe des ELOs aller Chargen im genannten Zeitraum verglichen, siehe dazu Abbildung 11. Durch diese Auswertung kann auch auf keine erkennbare Abhängigkeit geschlossen werden. Die Verteilung der Energiebedarfe je Produkt weisen keine eindeutigen Charakteristika auf, sodass nicht über den Energiebedarf eines herzustellenden Werkstoffes auf das Produkt geschlossen werden kann. Im Anhang A.1 finden sich zu dieser Auswertung ergänzende Histogramme. Ein Zusammenhang zwischen der Abwärmemenge pro Charge und dem herzustellenden Produkt wurde auch untersucht. Es konnten jedoch keine eindeutigen Zusammenhänge gefunden werden, sodass auf eine explizite Darstellung dieser Auswertungsergebnisse verzichtet wird.

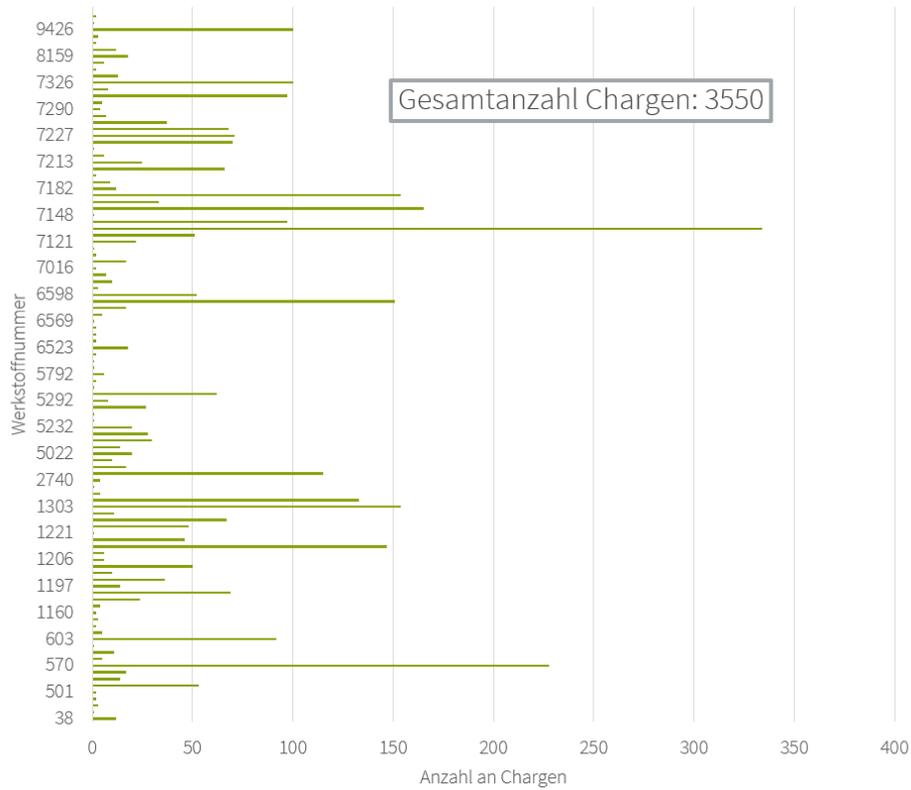


Abbildung 10: Überblick über die Anzahl an Werkstoffnummer im Zeitraum Januar bis Juni 2022

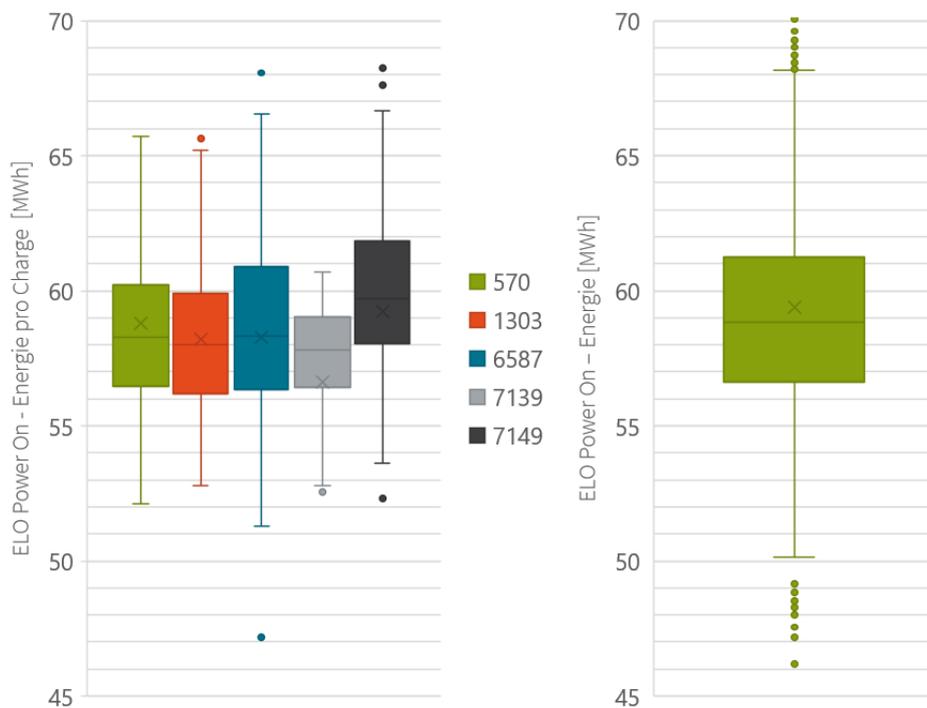


Abbildung 11: (links) Auftragung der elektrischen Energiebedarfe des ELOs der 5 häufigsten Produkte im Zeitraum Januar bis Juni 2022 (rechts) Auftragung der elektrischen Energiebedarfe des ELOs aller Produkte

3.1.5 Analyse des gemessenen Schalldrucks während des Betriebes des Elektrolichtbogens

Durch die Bereitstellung des gemessenen Schalldrucks in Dezibel als Indikator für die Qualität der Schaum Schlacke und deren wärmeisolierender Wirkung während des Betriebes des Elektrolichtbogens kann das betreffende Verhalten analysiert werden und in einem weiteren Schritt eine mögliche Abhängigkeit zur resultierenden Abwärmemenge untersucht werden. Die gefundenen Zusammenhänge könnten dadurch als Einflussgröße in einem Prognosemodell verwendet werden.

3.1.5.1 Verhalten des Schalldrucks während einzelner ELO-Prozessphasen

Es werden die Mittelwerte des Schalldrucks in Dezibel (dB) je ELO-Zustand und Charge bestimmt und diese Werte mittels Boxplot Methode ausgewertet. Eine Darstellung findet sich in Abbildung 12 und die zugehörigen Datentabelle in Tabelle 5.

Die Auswertung der Schalldruckdaten, während der einzelnen ELO Prozessphasen im Juni 2023 zeigt unterschiedliche Schalldruckverteilungen je ELO-Zustand. ELO-Zustand 4 und 6 zeigen die höchsten durchschnittlichen Schalldruckpegel, mit Mittelwerten von 106,07 dB bzw. 104,55 dB. Dies deutet darauf hin, dass in diesen Zuständen die Schallpegel regelmäßig auf einem höheren Niveau liegen und damit generell die lautesten Prozesse darstellen.

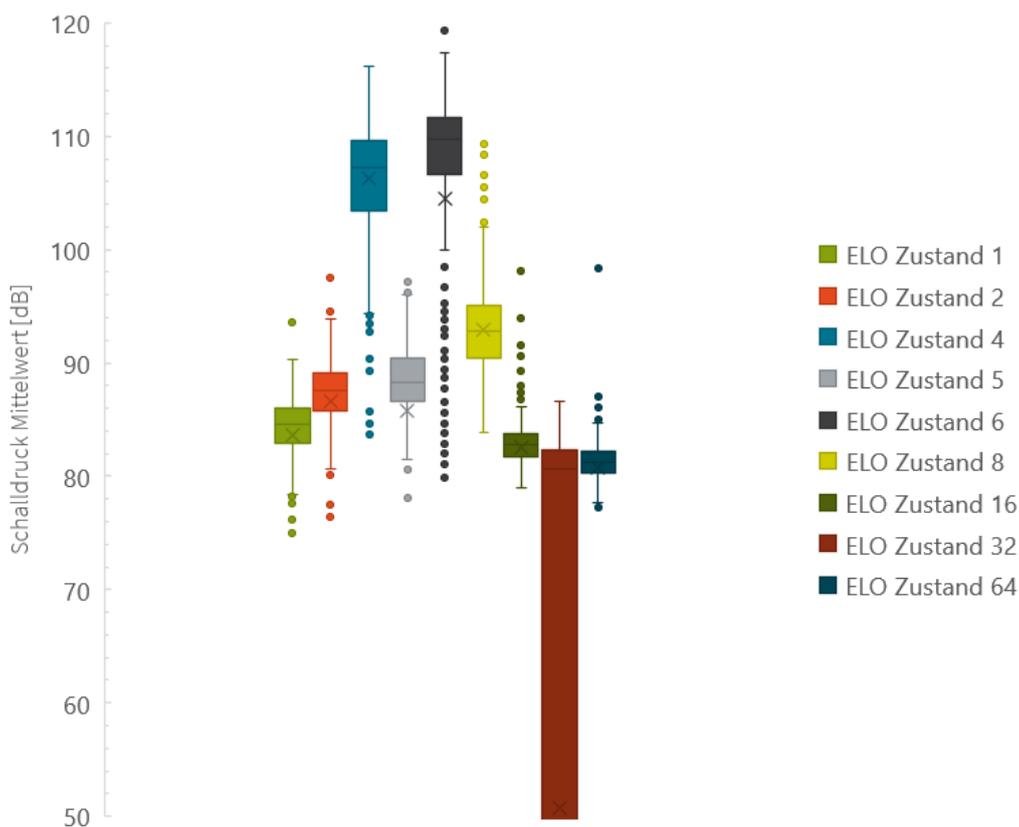


Abbildung 12: Auftragung der Schalldruck Mittelwerte pro ELO-Zustand im Zeitraum Juni 2023

Im Gegensatz dazu weist ELO-Zustand 32 einen deutlich geringeren durchschnittlichen Schalldruckpegel von nur 50,32 dB auf. In dieser ELO-Prozessphase liegt der Median bei 80,56 dB und der

Interquartilsabstand bei 82,28 dB. Diese große Streuung, der niedrige Mittel und deutlich höhere Medianwerte deuten darauf hin, dass es hier Prozesse gibt, die z.T. sehr leise oder sehr laut sein können, wobei die Mehrheit der Messungen in einem sehr niedrigen Dezibel Bereich liegt. ELO-Zustand 1, 2, 5, 8, 16, und 64 zeigen moderatere durchschnittliche Schalldruckpegel zwischen 80 und 92 dB.

Tabelle 5: Datentabelle zur Boxplot Auswertung der Schalldruck Mittelwerte der einzelnen ELO-Zustände für den Zeitraum Juni 2023

ELO-Zustand	1	2	4	5	6	8	16	32	64
Mittelwert [dB]	83,60	86,60	106,07	85,90	104,55	92,67	82,59	50,32	80,64
Median [dB]	84,51	87,53	107,18	88,36	109,69	92,69	82,76	80,56	81,28
Q1 [dB]	82,91	85,80	103,38	86,68	106,75	90,38	81,72	0,00	80,35
Q3 [dB]	85,96	89,17	109,56	90,43	111,67	95,10	83,69	82,28	82,16
IQR [dB]	3,05	3,37	6,18	3,75	4,91	4,72	1,97	82,28	1,81
Q1 - 1,5 IQR [dB]	78,34	80,74	94,11	81,05	99,38	83,30	78,76	0,00	77,63
Q3 + 1,5 IQR [dB]	90,53	94,22	118,82	96,06	119,04	102,18	86,65	205,70	84,88

3.1.5.2 Verhältnis der Energiemengen „AHK-Erzeugung /ELO Power On“ in Abhängigkeit vom Mittelwert des Schalldrucks

Die Abbildung 13 zeigt zwei Streudiagramme, die den Quotienten, berechnet aus der Energiemengen von AHK-Erzeugung und ELO Power On pro Charge, gegen den Schalldruckmittelwert in Dezibel pro Charge darstellt. Durch diese Auftragung wird der Zusammenhang zwischen Abwärmemenge und dem vorherrschenden Schalldruck in der jeweiligen Charge analysiert. Zusätzlich sind rechts neben den Streudiagrammen Boxplots dargestellt, die die Verteilung der Quotientenwerte illustriert. Der obere grau gefärbte Teil wertet die Daten nur für ELO-Zustand 8 und der untere grün gefärbte Teil zusammenfassend für alle ELO-Zustände der jeweiligen Chargen aus.

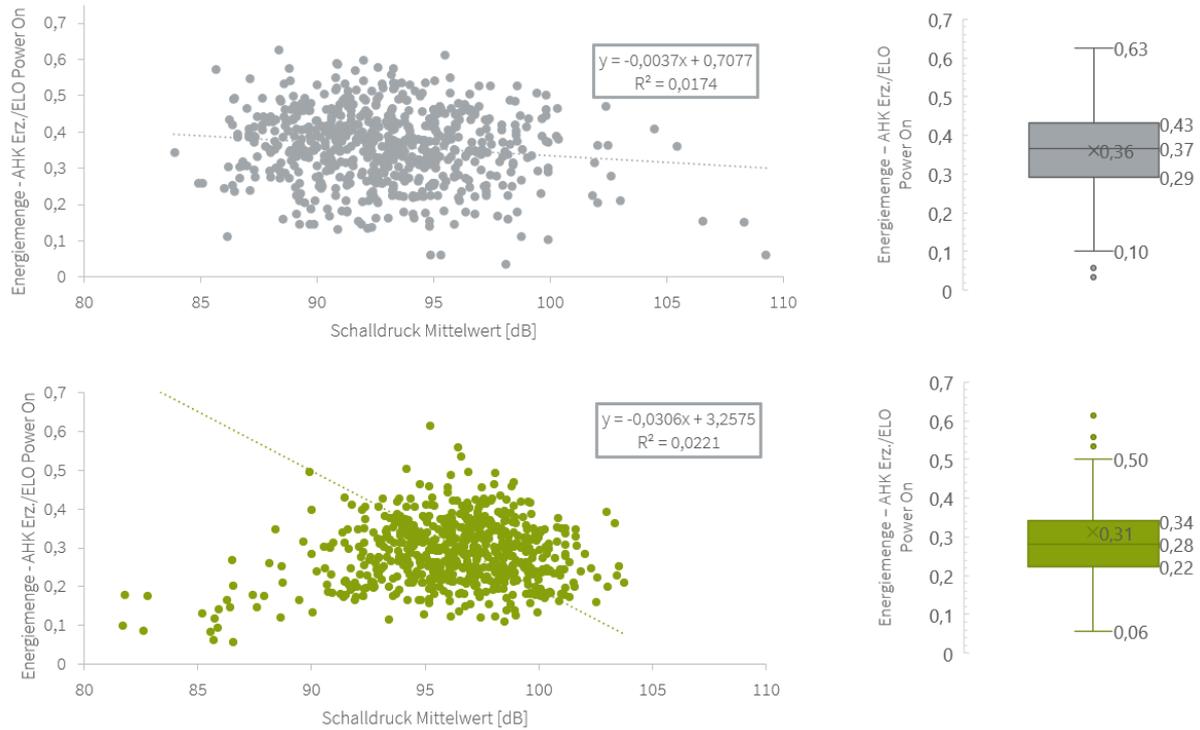


Abbildung 13: Auftragung des Quotienten der Energiemenge von AHK Erzeugung / ELO Power On pro Charge im Zeitraum Juni 2023 (Oben links & rechts) Streudiagramm gegen den Schalldruck Mittelwert pro Charge und Boxplot für Daten aus ELO-Zustand 8 (Unten links & rechts) Streudiagramm gegen den Schalldruck Mittelwert pro Charge und Boxplot

Im oberen Streudiagramm, für die grauen Datenpunkte, ist eine sehr schwache negative Korrelation zu beobachten, welche durch die Regressionsgerade und einem R^2 von 0,0174 dargestellt wird. Dies deutet darauf hin, dass der mittlere Schalldruck pro Charge kaum einen Einfluss auf das Verhältnis von Abwärmemenge zu elektrischem Energiebedarf des ELOs hat. Der zugehörige Boxplot stellt die Verteilung der Quotientenwerte dar. Diese Werte sind hauptsächlich um den Median von 0,37 konzentriert, mit einem relativ geringen Interquartilsabstand. Im unteren Streudiagramm (grüne Datenpunkte) zeigt sich ebenfalls eine schwache negative Korrelation, mit einem R^2 von 0,02. Auch hier deutet der Wert vom Bestimmtheitsmaß darauf hin, dass die Korrelation nicht signifikant ist und der Schalldruckmittelwert nur einen minimalen Einfluss auf die Quotientenwerte hat. Der zugehörige Boxplot zeigt eine größere Streuung der Werte mit einem niedrigen Medianwert von 0,28 da hier alle ELO-Zustände inbegriffen sind. Aufgrund der getätigten Auswertungen wird eine weitere Verwendung des Schalldrucks als Einflussgröße für ein Prognosemodell daher ausgeschlossen. Nach Rücksprache mit den Mitarbeitern von GMH ist der Schalldruck ein wichtiger Parameter, um den Verlauf des ELO-Prozesses während einer Charge zu verfolgen und zu charakterisieren. Daher sollte festgehalten werden, dass für die Bildung eines Prognosemodelles mögliche Zusammenhänge noch weiter untersucht werden könnten, jedoch im Rahmen dieses Vorhabens aus zeitlichen Gründen nicht mehr durchgeführt wurden.

3.1.6 Analyse der erweiterten Regelung

Aufgrund von Optimierungsvorschlägen aus dem abgeschlossenen DBU-Vorhaben *Abwärmenutzung 2.0 – „Bewertung und datengestützte Analyse des Abwärmenutzungspotenzials in der Stahlindustrie mittels innovativer Methoden des Machine Learnings am Beispiel der Georgsmarienhütte GmbH“* wurde die Regelung des Wärmetauschers zur Übergabe an die Stadtwerke erweitert.

Diese erweiterte und auch aktuell aktive Logik erlaubt die Freigabe zur Wärmeübertragung bereits 3 bar (Druckwert der Dampftrommel) vor Einsatz der Kondensatoren, falls die Betriebsart „Überhitzen“ (ELO-Zustand 8) aktiv ist. In Abbildung 14 stellt dies den Entscheidungspfad mit „ja“ dar. Während aller anderen ELO-Zustände findet eine Freigabe 1 bar vor Einsatz der Kondensatoren statt.

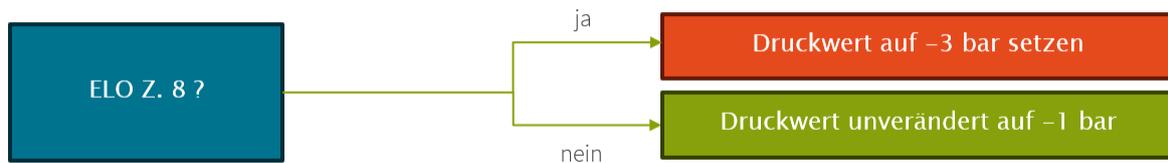


Abbildung 14: Erweiterte Freigabelogik zur Wärmeübergabe an die Stadtwerke

In den folgenden Unterkapiteln werden diese Veränderung der Regelung analysiert, um deren Auswirkung auf die Übergabe an die Stadtwerke auszuwerten. Es wird vermutet, dass durch Regelungsänderung mehr Wärme an die Stadtwerke übergeben wird.

3.1.6.1 Auswertung der erweiterten Regelung über die prozentuale monatliche Abdeckungsrate

In einem ersten Schritt wird versucht die möglichen Auswirkungen auf die Übergabe mit Hilfe der prozentualen Abdeckung zu bestimmen. Die Abdeckung wird definiert als die Energiemenge von Übergabe StW zur Netzlast pro Monat. Ein Vergleich des Zeitraumes von Jan. 2019 bis Dez. 2020 und Jan. 2022 bis Jan. 2024 wird in Abbildung 15 dargestellt. Die erweiterte Regelung ist seit April 2024 aktiv. Die Auswertung zeigt, dass die Abdeckung von April 2023 bis Jun 2023 die höchsten Werte im Vergleich zu allen dargestellten Vorjahresmonaten aufzeigt. In den weiteren Monaten existieren jedoch Abdeckungsdaten, welche niedriger Werte aufweisen als in den Vorjahresmonaten, wie bspw. Juli 2023 mit einer Abdeckung von 90 % und im Vergleich dazu im Juli 2020 mit einem Wert von 104 %. Der Nachweis einer Veränderung bzw. einer Erhöhung der prozentualen monatlichen Abdeckung der erweiterten Regelung kann mit dieser Auswertungsmethode nicht erzielt werden. Daher wird im folgenden Unterkapitel eine andere Herangehensweise angewendet.

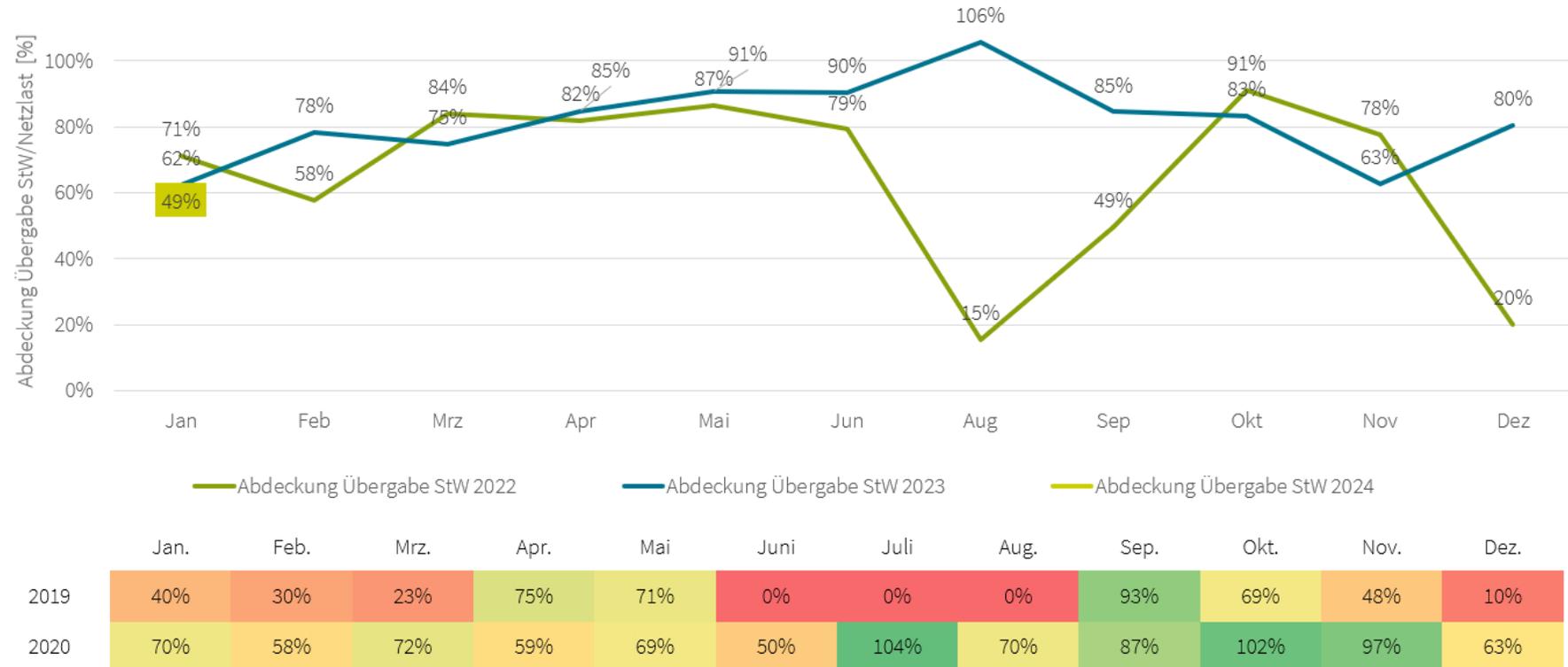


Abbildung 15: Monatliche prozentuale Abdeckung als Quotientenwert der Energiemengen von Übergabe StW./ Netzlast für den Zeitraum Jan. 2019 bis Dez. 2020 und Jan. 2022 bis Jan. 2024

3.1.6.2 Auswertung der erweiterten Regelung durch die zusammenhängende Analyse der Parameter Übergabe StW und Druck der Dampftrommel

Zum Nachweis einer möglichen Veränderung im Übergabeverhalten durch die erweiterte Regelung werden die Parameter Übergabe StW und der Druck der Dampftrommel in 2- und 3-dimensionalen Diagrammen, im Vergleich der Jahresmonate Januar 2022 bis 2024, ausgewertet.

Die Auftragung der Leistungswerte von Übergabe StW gegen den Druck der Dampftrommel für ELO-Zustand 8 und Speicherfüllstand < 60 % wird in Abbildung 16 dargestellt. Die Auswertungsdarstellung stellt nur ELO-Zustand 8 dar, da nur hier eine Auswirkung der erweiterten Regelung erwartet wird. Zusätzlich werden nur Datenpunkte dargestellt, welche bei einem Speicherfüllstand von unter 60 % existieren. Dadurch werden nur Punkte dargestellt, bei welchem der Füllstand ausreichend niedrig ist, dass eine Übergabe stattfindet. Des Weiteren wird damit eine vergleichbare Situation zwischen den Jahresmonaten geschaffen. Es zeigt sich deutlich, dass im Januar 2024 eine Verschiebung der Punktwolke sichtbar wird bzw. die Übergabe in einem neuen Druckbereich stattfindet. Dieser Druckbereich verschiebt sich zu niedrigeren Drücken, d.h. von circa 19 bar auf 17 bar. Damit findet die Übergabe frühzeitiger statt und ermöglicht mehr Wärme an die Stadtwerke zu übergeben, bevor die Kondensation einsetzt. Es lässt sich festhalten, dass über diesen Ansatz ein Nachweis der Auswirkung auf die Übergabe möglich ist.

Eine Auftragung der prozentualen Verteilung der Energiemengen der Übergabe StW unterteilt in Druckbereiche der Dampftrommel während ELO-Zustand 8 und einem Speicherfüllstand < 60 % wird in Abbildung 17 dargestellt. Es handelt sich hier um ein Histogramm mit einer relativen Auftragung der Energiemengen differenziert in einzelne Druckbereichsintervalle. Durch diese Auftragung lassen sich weitere Aspekte der Auswirkung der erweiterten Regelung bestimmen. Jede Säule in diesem Histogramm repräsentiert den relativen Anteil von der Gesamtenergiemenge innerhalb eines Jahres, welcher im spezifischen Druckbereich übergeben wurden. Dabei findet bspw. 11 % der Übergabe im Januar 2024 in einem Druckbereich von über 17,5 bar bis einschließlich 18 bar statt. Die Darstellung zeigt, dass im Vergleich zu den Vorjahresmonaten ein größerer Teil der Energie schon bei niedrigeren Drücken übergeben wird. Dies wird auch durch den kumulierten Anteil, dargestellt als gepunktete Linie, in Abbildung 17, belegt.

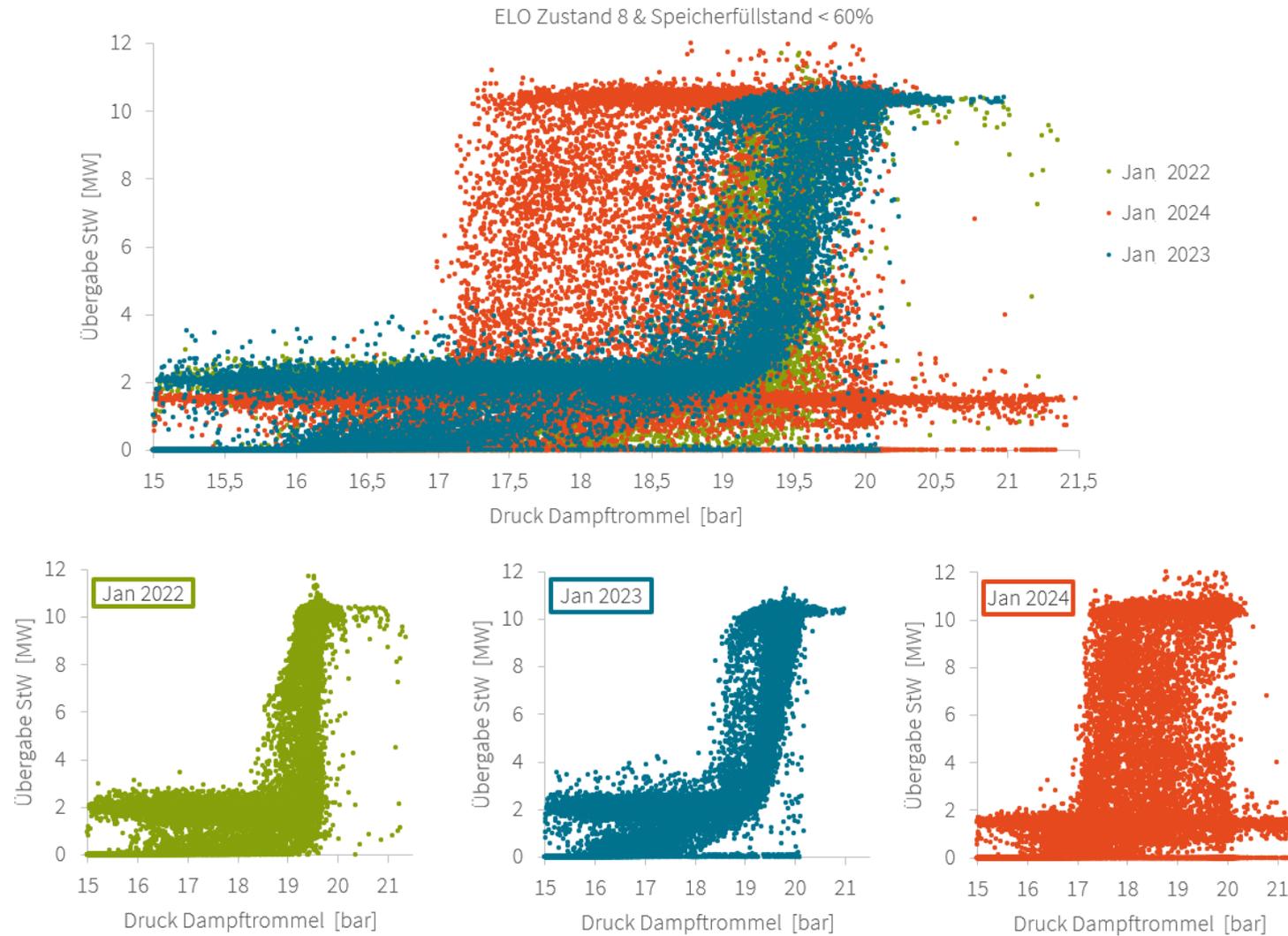


Abbildung 16: Auftragung der Leistungswerte Übergabe StW gegen Druck der Dampftrommel für ELO-Zustand 8 und Speicherfüllstand < 60 %
(oben: Jahresmonate kombiniert; unten: pro Jahresmonat)

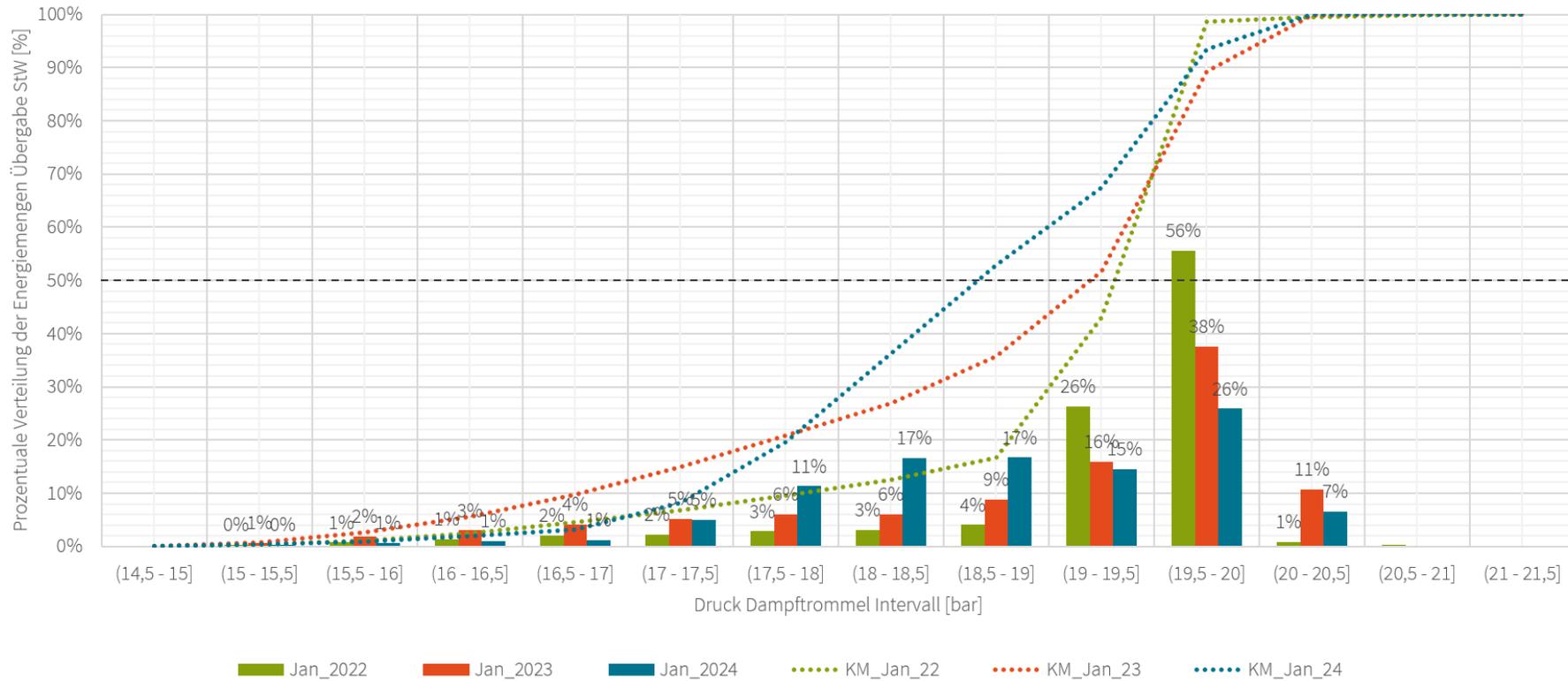


Abbildung 17: Prozentuale Verteilung der Übergabe StW - Energiemengen unterteilt in Druck Dampftrommel-Druckbereiche (ELO-Zustand 8 & Speicherfüllstand < 60%).

Die Auftragung der Leistungswerte von Übergabe StW gegen den Druck der Dampftrommel für ELO-Zustand 8 und Speicherfüllstand < 60 % aus Abbildung 16 lässt sich mit einer 3-dimensionalen Darstellung erweitern. Dadurch können einzelnen Leistungs- und Druckintervalle differenziert und quantifiziert werden. Auf der hinzugekommen z-Achse werden zusätzlich die Anzahl der Ereignisse und die Summe der Energiemengen aufgetragen. Die Erkenntnisse aus den vorherigen 2-dimensionalen Diagrammen führen zu der Entscheidung, dass es ausreichend ist ein Vorjahresmonat im Vergleich zu Januar 2024 zu untersuchen und damit die Auswirkung der erweiterten Regelung auszuwerten. Es findet somit im Folgenden ein Vergleich der Daten aus Januar 2023 und Januar 2024 statt. Das 3D-Histogramm für den Januar 2023 mit Anzahl der Ereignisse auf der z-Achse ist in Abbildung 18 dargestellt. Der Begriff „Unterteilung“ in den Achsentiteln deutet daraufhin, dass es sich um Intervalle handelt und bspw. mit dem Wert 11 das Intervall (10,5 -11] repräsentiert wird. Diese verkürzte Schreibweise wird wegen des Aspektes der Übersichtlichkeit gewählt. Die Farbgebung der Säulen verdeutlicht zusätzlich den jeweiligen dargestellten Druckbereich der Dampftrommel. Jede Säule stellt die kumulierte Anzahl an Zeitschritten für eine Kombination aus Übergabeleistung- und Druckbereich dar, d.h. im Druckbereich (19,5 – 20] bar und Übergabeleistungsbereich (10 – 10,5] MW ergeben sich 1925 Zeitschritte (höchste Säule im Diagramm), mit der Dauer eines Zeitschrittes von 30 s. Das Häufigkeitsdiagramm stellt auch die Zeitschritte dar, bei welchen keine Übergabe (0 MW) stattfindet. Dies kann in verschiedenen Druckbereichen stattfinden, weist jedoch im Bereich von (13 -13,5] bar bis (16,5 -17] bar eine deutlich erhöhte Zahl an Ereignissen auf. Der Leistungsbereich (1,5-2,5] MW und einem Druck von (15 -19,5] bar ist ein weiterer markanter Bereich und stellt das Grundlastniveau dar.

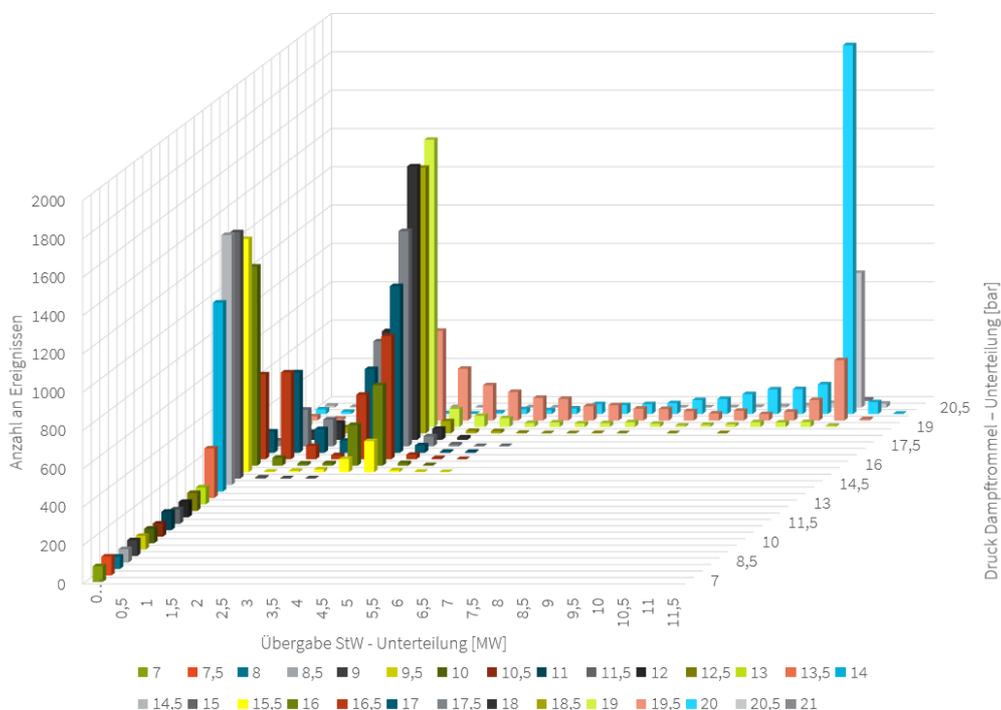


Abbildung 18: 3D-Histogramm - Anzahl der Ereignisse der Leistungswerte von Übergabe StW gegen den Druck der Dampftrommel - Januar 2023 (ELO-Zustand 8; Speicherfüllstand < 60 %)

Im Januar 2024 lag der Speicherfüllstand im letzten Drittel des Monats größtenteils über 60 %. Da nur die Energiemenge in die Auswertung einberechnet wird, welche während ELO-Zustand 8 und einem Speicherfüllstand < 60 % übergeben wird, ergeben sich Unterschiede in der absoluten Häufigkeit an Ereignissen und Energiemengen. Das 3D-Histogramm für Januar 2024 mit der Anzahl der Ereignisse auf der z-Achse ist in Abbildung 19 abgebildet. Im Vergleich zu Abbildung 18 lässt sich der bereits in 2-dimensionalen Darstellung neue Druck- und Leistungsbereich bei der Übergabe StW für Januar 2024 erkennen. Dadurch ergeben sich auch in dieser Darstellung eine erhöhte Anzahl an oder neue Ereignisse im Druckbereich ab 17 bar und einem Leistungsbereich ab 3 MW. Die absolute Häufigkeit der Ereignisse im Bereich des Grundlastniveaus sinkt und ist nicht mehr so markant ausgeprägt wie im Vorjahresmonat bzw. vor der Implementierung der erweiterten Regelung.

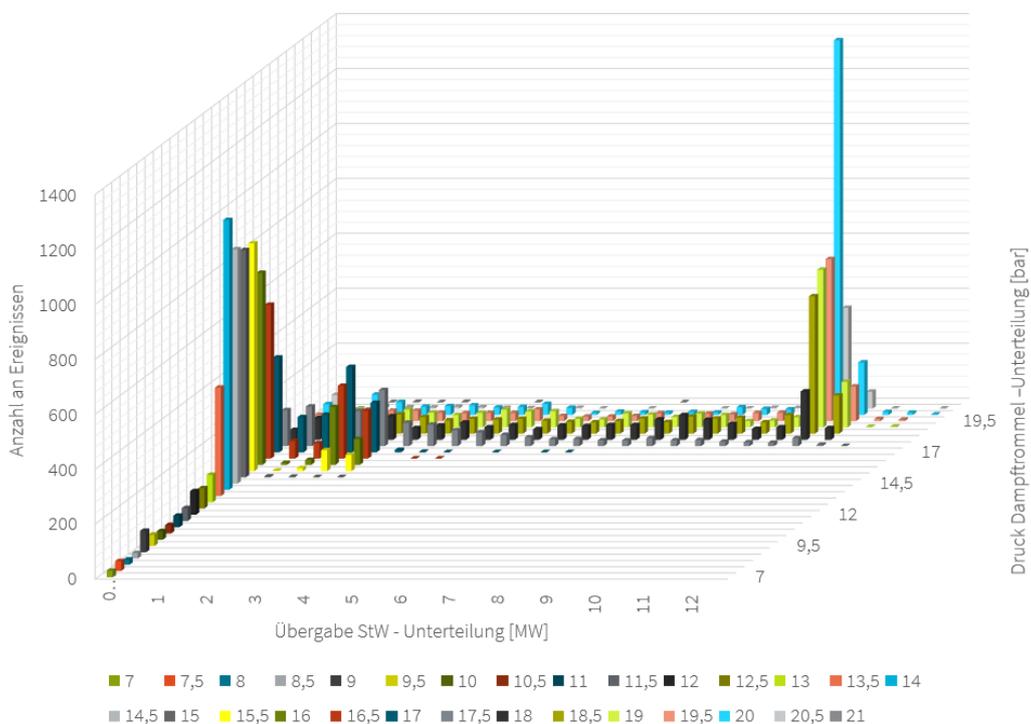


Abbildung 19: 3D-Histogramm - Anzahl der Ereignisse der Leistungswerte von Übergabe StW gegen den Druck der Dampftrömmel - Januar 2024 (ELO-Zustand 8; Speicherfüllstand < 60 %)

Durch die Auftragung der Energiemengen je Druck- und Leistungsbereich lassen sich weitere Erkenntnisse gewinnen. Dazu werden im Folgenden die Jahresmonate in Abbildung 20 und Abbildung 21 verglichen. Der Übergabebereich um 0 MW weist nachvollziehbarerweise in beiden Abbildungen Säulen mit einer kumulierten Energiemenge von 0 MWh auf. In Abbildung 20 sind die Bereiche im Grundlast- und Maximalniveau jeweils deutlich erkennbar.

Durch die erweiterte Regelung ergeben sich in den bereits angesprochenen neu gebildeten Übergabebereichen jeweils erkennbare kumulierte Energiemenge. Durch die Auftragung der Energiemengen zeigt sich sehr deutlich, dass durch die erweiterte Regelung die Energiemengen im Grundlastbereich absinken und mehr Energie im Druckbereich ab 17 bar und einem Leistungsbereich ab 3 MW übergeben wird.

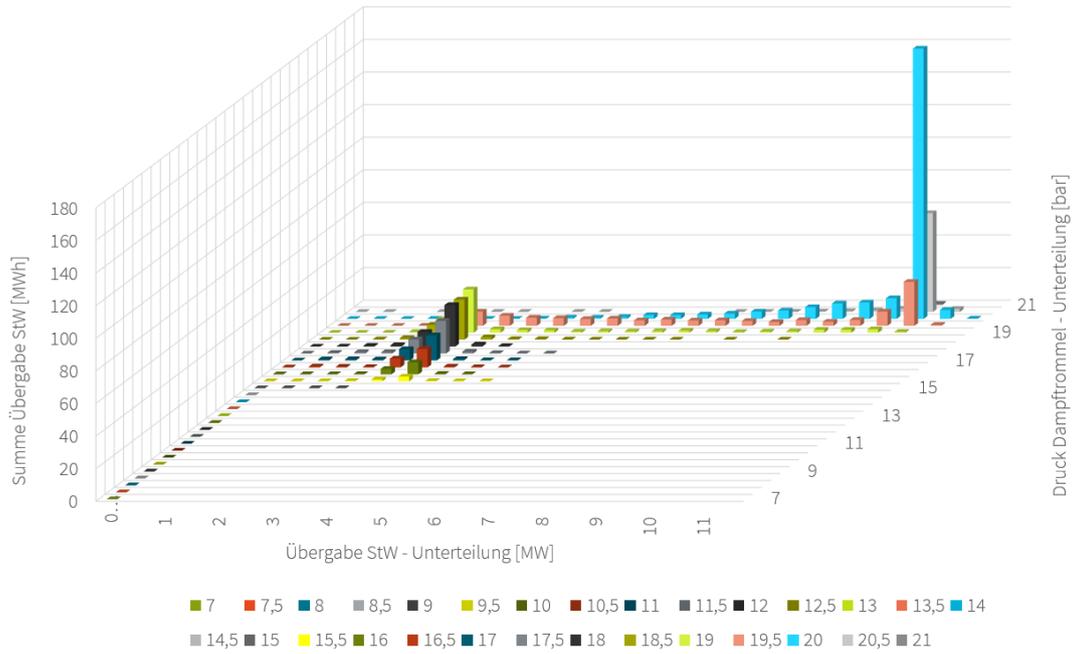


Abbildung 20: 3D-Histogramm – Summe der Energiemengen von Übergabe StW gegen den Druck der Dampftrommel - Januar 2023 (ELO-Zustand 8; Speicherfüllstand < 60 %)

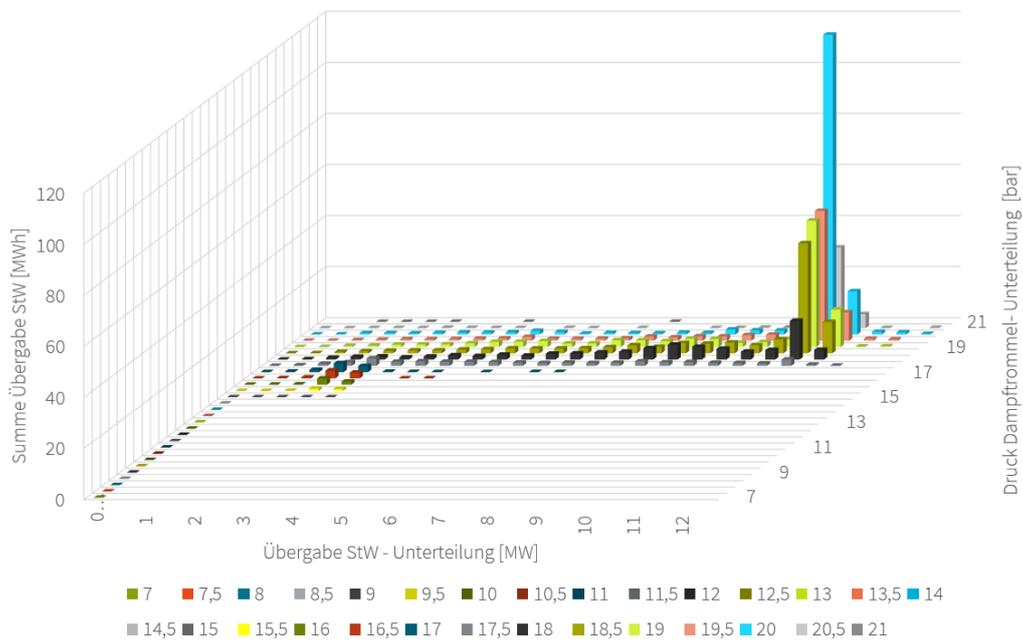


Abbildung 21: 3D-Histogramm - Summe der Energiemengen von Übergabe StW gegen den Druck der Dampftrommel - Januar 2024 (ELO-Zustand 8; Speicherfüllstand < 60 %)

Im Anhang A.1 finden sich für die 3-dimensionalen Darstellung zusätzliche Tabellen, welche die expliziten Werte jeder Säule dokumentieren.

3.2 Konzeption des Steuerprogramms

3.2.1 Erstellung des Prognosemodell zur weiteren Verwendung im Optimierungskonzept

In diesem Kapitel wird ein passendes Prognosemodell erarbeitet, welche in das Konzept zur Optimierung der Regelung zur Wärmeübergabe an die Stadtwerke, integriert werden soll. Die folgenden Unterkapitel stellen Grundlagen zum Verständnis der Vorhersagemodelle, verwendete Eingangsparameter, die Auswertung der Modelle und das als am geeigneten bewerteten Modell zur weiteren Verwendung vor.

3.2.1.1 Grundlagen zum Prognosemodell

Zur Einführung soll der Unterschied zwischen einer Schätzung und einer Vorhersage (Prognose) erläutert werden. Anhand eines Beispiels, siehe dazu Abbildung 22, werden die Begrifflichkeiten beschrieben.

Eine Schätzung, in der Statistik, bezieht sich auf die Berechnung eines Wertes für eine unbekannte Größe (Output - Y) durch ein Modell, basierend auf vorhandenen Daten (Input - X). Zum Beispiel lässt sich die Abwärmeleistung „AHK-Erzeugung“ über die Zeit berechnen. In Abbildung 22 wird dies durch die bisherigen Zeitschritte (-4, -3, -2, -1) dargestellt, in denen der Input - X bereits bekannt ist und zur Schätzung eines Wertes innerhalb dieser Zeitpunkte genutzt werden kann.

Eine Vorhersage hingegen bezieht sich auf die Prognose zukünftiger Werte basierend auf einem Modell, das aus historischen Daten gelernt hat. Hierbei wird versucht, die Entwicklung über den beobachteten Zeitraum hinaus zu berechnen. In Abbildung 22 sind die zukünftigen Zeitschritte (0, 1, 2) durch Fragezeichen markiert. An diesen Punkten sollen die zukünftigen Werte von AHK-Erzeugung basierend auf den bisherigen Zeitpunkten und Eingangsparameter (Input - X) wie "ELO Power On" und "ELO-Zustand" prognostiziert werden.

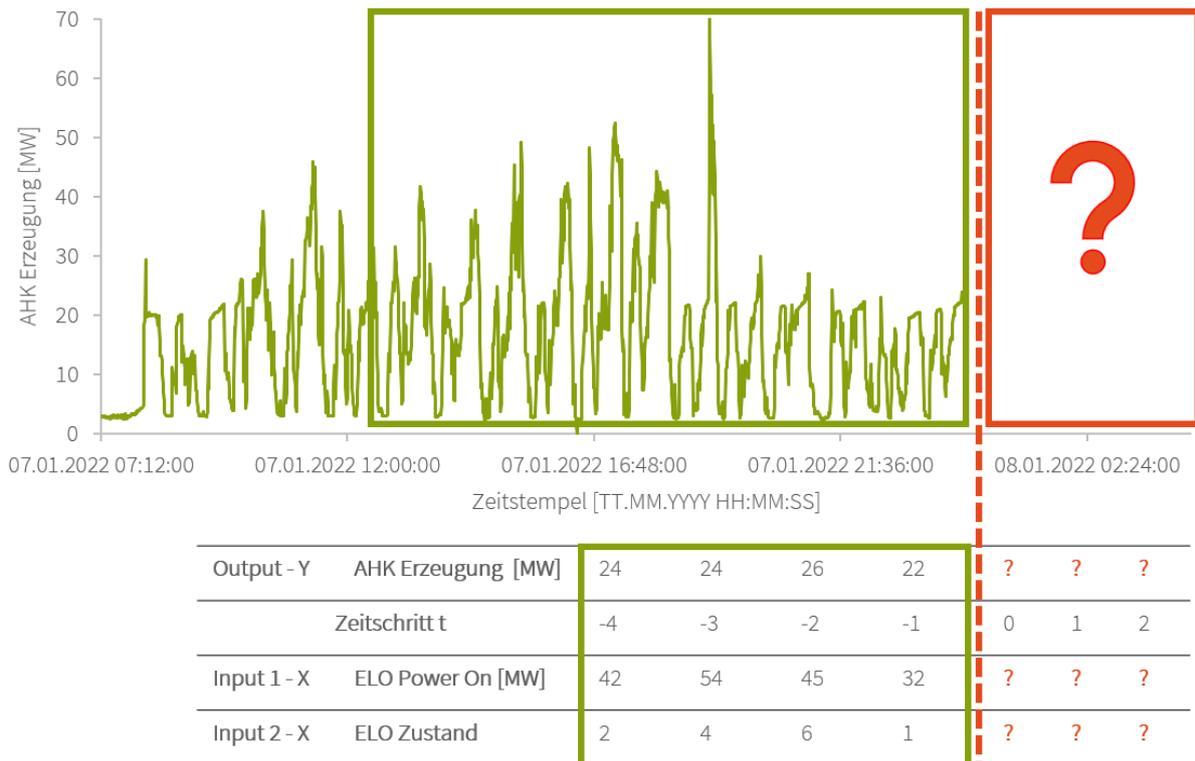


Abbildung 22: Beispiel zur Verdeutlichung des Unterschieds von Schätzung vs. Vorhersage (Prognose)

Eine Schätzung nutzt bestehende Daten, um eine unbekannte Größe innerhalb der vorhandenen Daten zu bestimmen (Zeitschritte -4 bis -1), während eine Vorhersage zukünftige Werte antizipiert (Zeitschritte 0, 1, 2). Für das Vorhaben eines optimierten Konzeptes zur Wärmeübergabe an die Stadtwerke sollen zukünftige Werte für die Abwärmeleistung berechnet werden, d.h. das zu verwendende Modell muss eine Vorhersage durchführen.

Um zukünftige Werte vorherzusagen, lassen sich mindestens zwei unterschiedliche Ansätze unterscheiden, die jeweils ihre eigenen Vor- und Nachteile bieten, siehe dazu Abbildung 23.

Der erste Ansatz nutzt eine einzige Regressionsformel, um alle zukünftigen Werte ($Y(t=0)$, $Y(t=1)$, $Y(t=2)$) basierend auf den aktuellen Eingangswerten (Input-X) zu berechnen. Diese Methode hat den Vorteil, dass sie sehr einfach und effizient ist, da nur eine einzige mathematische Formel verwendet wird, um alle Zeitpunkte abzudecken. Dies sorgt für eine konsistente Vorhersage, da die gleiche Berechnung für verschiedene Zeitpunkte angewendet wird. Allerdings kann diese Einfachheit auch eine Schwäche sein. Da die Formel für alle Zeitschritte gleichbleibt, könnte sie nicht immer die Veränderungen im System korrekt abbilden, insbesondere wenn die Eigenschaften des Systems im Laufe der Zeit variieren. Dies könnte zu weniger genauen Vorhersagen führen, da eine einzige Formel möglicherweise nicht in der Lage ist, alle relevanten Muster oder Abweichungen in den Daten zu erfassen.

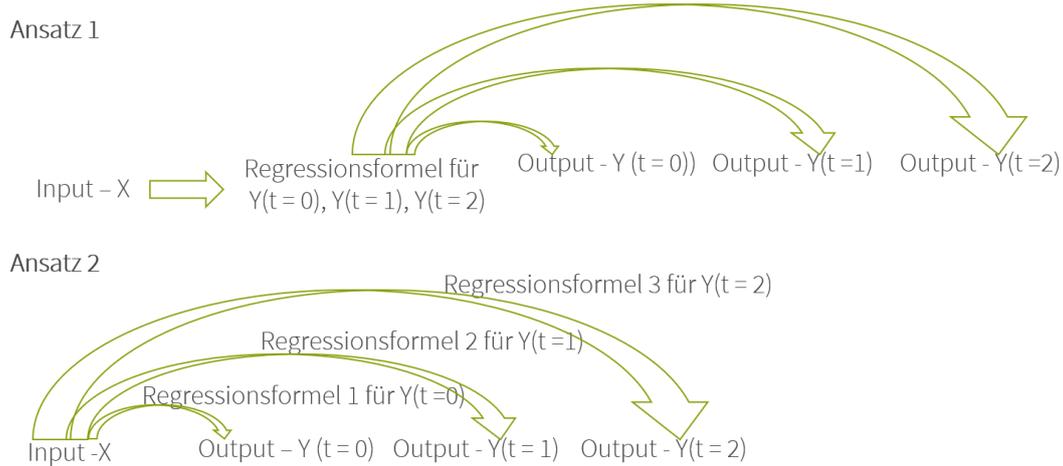


Abbildung 23: Ansatz 1 und Ansatz 2 (MOR-Ansatz) zur Berechnung zukünftiger Werte

Der zweite Ansatz, auch als MOR-Ansatz (Multiple Output Regression) verwendet hingegen für jeden zukünftigen Wert eine separate Regressionsformel. Eine Formel wird spezifisch für $Y(t=0)$ entwickelt, eine Andere für $Y(t=1)$ und dies lässt sich beliebig fortführen. Dieser Ansatz ermöglicht eine höhere Flexibilität, da jede Formel spezifisch an die Anforderungen des jeweiligen Zeitschritts angepasst werden kann. Dadurch kann dieser Ansatz präziser sein, insbesondere in Systemen mit komplexen Dynamiken, da jede Formel die Eigenheiten der jeweiligen Vorhersagezeit abbildet. Der Nachteil dieses Ansatzes liegt jedoch in der erhöhten Komplexität, da für jeden Zeitschritt eine eigene Formel entwickelt und berechnet werden muss. Eine Erweiterung des zweiten Ansatzes lässt sich in der Weise konstruieren, dass die Vorhersagewerte der vorherigen Zeitschritte verwendet, um die Werte der nächsten Zeitschritte zu berechnen. Im Rahmen dieses Vorhaben wird diese Erweiterung nicht weiterverfolgt und ausgewertet.

3.2.1.2 Beschreibung der Eingangsparameter & Varianten

Durch die bereitgestellten Daten von GMH sind einige Parameter bekannt, welche zur Bildung eines Vorhersagemodells für zukünftige Werte der Abwärmeleistung herangezogen werden können. Dazu gehören ELO Power On, alle ELO-Zustände und die Abwärmeleistungswerte (AHK-Erzeugung) der letzten drei Zeitschritte. Es werden weitere Parameter konstruiert, welche kumulierte Summenwerte andere Parameter darstellen. Durch die letzten drei bekannten Abwärmeleistungswerten und den kumulierte Summenwerten wird versucht dem betreffenden Modell zusätzliche Informationen bereitzustellen, welche potenziell Einfluss auf die zu prognostizierenden Werte haben und damit eine genauere Vorhersage zu ermöglichen. Dazu gehören „KumSum ELO Energie pro Charge“ und „KumSum ELO Energie pro ELO-Zustand“, welche die ELO Power On Energiewerte über den Verlauf der Zeit pro Charge oder pro ELO-Zustand summiert. Weiterhin wird die kumulierte Summe der Zeit durch „KumSum Zeitintervall pro Charge“ und „KumSum Zeitintervall pro ELO-Zustand“ als Minutenwerte ermittelt. Zusätzlich werden die Parameter „KumSum AHK Erz. Energie pro Charge“ und „KumSum AHK Erz. Energie pro ELO-Zustand“ als energetische Eingangsparameter verwendet. Alle Eingangsparameter sind im Zeilenbereich „Input“ in Tabelle 6 zusammengefasst. In der Zeile Output ist der Vorhersageparameter, d.h. die Abwärmeleistung der nächsten 60 min, vermerkt. In dieser Tabelle werden auch die Kombinationen an Eingangsparameter, welche als Varianten 1 bis 6 (V1 bis V6) bezeichnet werden, aufgelistet, welche im Laufe der Auswertungen auf die Höhe des Bestimmtheitsmaßes, für Ansatz 1 und 2, analysiert werden.

Tabelle 6: Mögliche Eingangsparameter für die Vorhersagemodell und Kombinationsvarianten V1 bis V6

Parameter	V1	V2	V3	V4	V5	V6
ELO-Zustand 1 - 64 (einzeln)	x	x	x	x		
ELO Power On [MW]	x	x	x	x		
KumSum ELO Energie pro Charge [MWh]	x	x	x	x		
KumSum ELO Energie pro ELO-Zustand [MWh]	x	x	x	x		
Input KumSum Zeitintervall pro Charge [min]	x	x		x	x	x
KumSum Zeitintervall pro ELO-Zustand [min]	x	x		x		
KumSum AHK Erz. Energie pro Charge [MWh]				x		
KumSum AHK Erz. Energie pro ELO-Zustand [MWh]				x		
Letzten 3 Werte von AHK Erzeugung [MW]		x	x	x	x	
Output Abwärmeleistung der nächsten 60 min [MW]	x	x	x	x	x	x

Allgemein wird durch die verschiedenen Varianten eine Auswertung zur Höhe der Einflussnahme zusätzlicher Informationen durch die jeweiligen kumulierten Summe oder einzelne Parameter bei der Vorhersage ermöglicht. Die verschiedenen Varianten verwenden eine unterschiedliche Anzahl an Eingangsparameter. Die Variante 1 enthält bspw. nicht die letzten 3 Werte von AHK-Erzeugung um diesen Einfluss im Vergleich zu den Varianten 2 bis 5 zu untersuchen. Varianten 4 nutzt alle Eingangsparameter. Je mehr Parameter integriert werden, desto komplexer wird das jeweilige Vorhersagemodell ausgebildet. Damit steigt der notwendige Rechenaufwand zur Bildung des Modelles. Dagegen wird mit Variante 6 versucht mit nur einem Parameter, nämlich der kumulierten Summe der Zeit pro Charge, ein einfaches Modell zu erzeugen, und in der Auswertung festzustellen, ob hiermit vergleichbare gute Ergebnisse erzielt werden können. Auf Hinblick auf die spätere Integration in die GMH Programmierumgebung sollte das Modell die niedrigst mögliche Komplexität aufweisen, um z.B. den Rechenaufwand während der Berechnung der zukünftige Werte und den Programmieraufwand zu minimieren.

3.2.1.3 Auswertung der Varianten V1 bis V6

Die verschiedenen Varianten werden im ersten Schritt an zwei verschiedene Vorhersagealgorithmen getestet. Der erste Algorithmus verwendet als Grundlage die polynomiale Regression. Dieser kann verschiedene maximale Grade an Potenzen in der Regressionsformel enthalten. Dabei werden polynomiale

Regressionsformel bis zum Grad 4 untersucht. Der zweite Algorithmus ist der sogenannte Decision Tree. Zur Auswertung wird ein Verfahren aus dem Bereich des Machine Learning verwendet, indem die Daten aufteilt werden, d.h. in Trainings- und Testdaten. Es wird mit einer Aufteilung der Daten von 75 % zu 25 % von Trainings zu Testdaten gearbeitet. Die Trainingsdaten dienen dazu den Vorhersagealgorithmus an die Daten anzupassen, z.B. die Konstanten der Regressionsformel. Das Bestimmtheitsmaß kann nun jeweils für die Trainingsdaten und die zurückgehaltenen Testdaten bestimmt werden. Dabei ist die Vorhersagegüte, welche mit Hilfe der Testdaten ermittelt wird, aussagekräftiger, da dieser R^2 -Wert eine Bewertung abgibt, wie der Algorithmus auf unbekannte Daten reagiert. Die verschiedenen Vorhersagemodelle wurden auf Daten von 589 zusammenhängenden Chargen aus dem Januar 2022 angepasst und bewertet.

Die Auswertung der Bestimmtheitsmaße zeigt relativ schnell, dass mit der polynomiale Regression, bei verschiedenen maximalen Graden, es nicht möglich ist, R^2 -Werte für die Testdaten zu ermitteln bzw. liegen diese Werte für alle Varianten bei null. Auf eine explizite Darstellung aller Ergebnisse wird daher verzichtet und auszugweise einzelne Werte eingegangen. Die mittleren Vorhersagegütewerte für eine mehrschrittige Vorhersage von 120 Zeitschritte (60 min) liegt bspw. bei Variante 4 (Trainingsdaten) bei 0,54 für Ansatz 1 und 2. In der generellen Zeit der MOR-Ansatz bessere Ergebnisse. Die Auswertung der beiden Ansätze wird im darauffolgenden Kapitel detailliert durchgeführt. Eine genauere Analyse des Verhaltens der verschiedenen Algorithmen, basierend auf der polynomialen Regression, zeigt, dass beim Auftreten von gestörten ELO-Prozessen, d.h. bspw. eine überdurchschnittliche Zeitdauer eines ELO-Zustands während einer Charge, die angepassten Regressionsformel anomal hohe Ausgabewerte für die Abwärmeleistung zeigen. Dieses Ausreißerverhalten findet dermaßen oft statt, dass eine Bestimmung der Vorhersagegüte für die Testdaten nicht möglich ist.

Im Gegenzug ist es möglich den Decision Tree die mittlere Vorhersagegüte über eine mehrschrittige Vorhersage von 120 Zeitschritte (60 min) für alle Varianten der Eingangsparameter zu erstellen. Daher erweist sich dieser Algorithmus deutlich robuster gegen Ausreißer bzw. unbekannte Daten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 24 zusammengefasst. In diesem Teilkapitel wird nur auf die Ergebnisse des MOR-Ansatzes eingegangen, da dieser die höheren Bestimmtheitsmaßwerte zeigt. Eine detaillierte Auswertung wird dazu in darauffolgenden Kapitel durchgeführt.

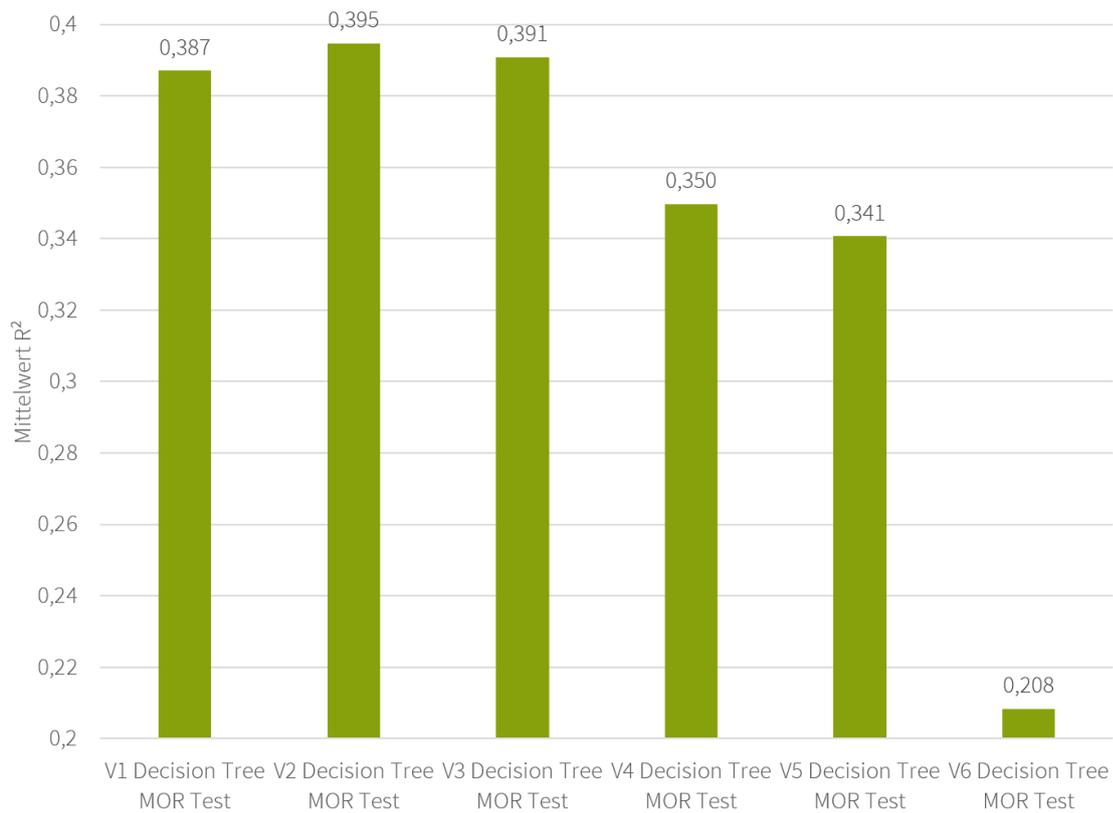


Abbildung 24: Mittelwert der Vorhersagegüte je Variante von dem Decision Tree Algorithmus (MOR-Ansatz)

Es zeigt sich, dass sich bei Variante 2 (V2) der höchste mittlere Wert ergibt, jedoch zeigen V1 und V3 in diesem Vergleich ähnliche hohe Werte. Der Vergleich von Variante 5 und 6 zeigt, dass die Hinzunahme von Vergangenheitswerten von AHK-Erzeugung zu einer klaren Erhöhung der Vorhersagegüte führt. Die Vorhersage alleine durch die kumulierte Summe der Zeitdauer scheint nicht ausreichend zu sein, um eine nutzbare Prognose zu erhalten. Das Bestimmtheitsmaß lässt sich auch für jeden einzelnen Vorhersageschritt auswerten und dadurch können sich weitere Erkenntnisse erarbeiten, siehe dazu Abbildung 25. Die durch Verwendung der Vergangenheitswerte von AHK-Erzeugung verbesserte Vorhersage der zukünftigen Zeitschritte wird in dieser Darstellung deutlicher. Die Varianten V2 bis V5 können im Vergleich zu V1 in den circa 10 bis 15 ersten Zeitschritten (5 – 7,5 min) zeigen, dass die R²-Werte anfänglich über 0,9 liegen und sich erst nach einigen Minuten auf die Höhe der Werte von V1 absinken.

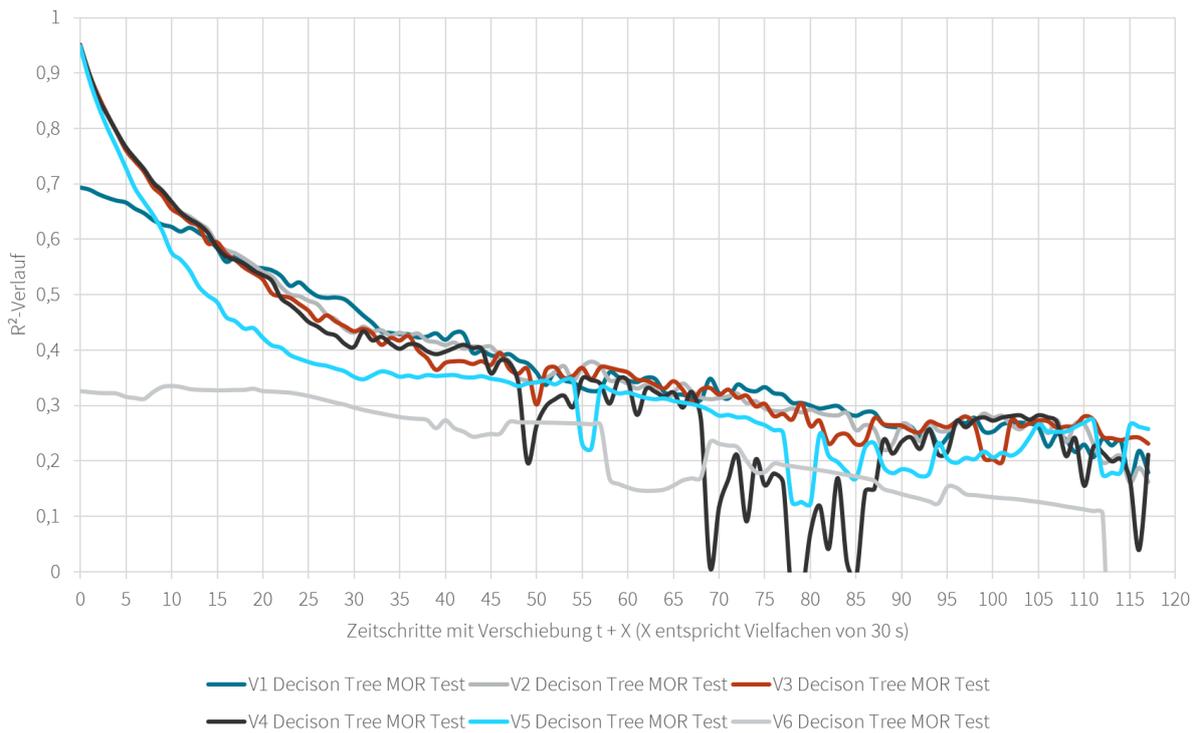


Abbildung 25: R²-Verlauf der einzelnen Varianten für den Decision Tree Algorithmus (MOR-Ansatz) bei Testdaten

Durch die Rückschlüsse aus dieser Auswertung wird entschieden, dass mit Variante 2 vom Decision Tree Algorithmus (MOR) weitergearbeitet wird, um ein Konzept zur Optimierung der Regelung der Wärmeübergabe an die Stadtwerke zu erstellen.

3.2.1.4 Auswertung der Ansätze 1 und 2

Zu der Auswertung der Ansätze 1 und 2 werden die Bestimmtheitsmaße aller Varianten der Eingangsparmeter, bei der Verwendung des Decision Trees, verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 26 zusammengefasst. In allen Fällen ergibt sich durch den MOR-Ansatz (Ansatz 2) ein höheres mittleres Bestimmtheitsmaß. Daher wird der zweite Ansatz für ein prognosegestützte Konzept zur Wärmeübergabe verwendet. Die höheren Bestimmtheitsmaße für Ansatz 2 ergeben sich wahrscheinlich durch eine besser Anpassungsmöglichkeit der einzelnen Entscheidungsbäume auf den jeweiligen Zeitschritt.

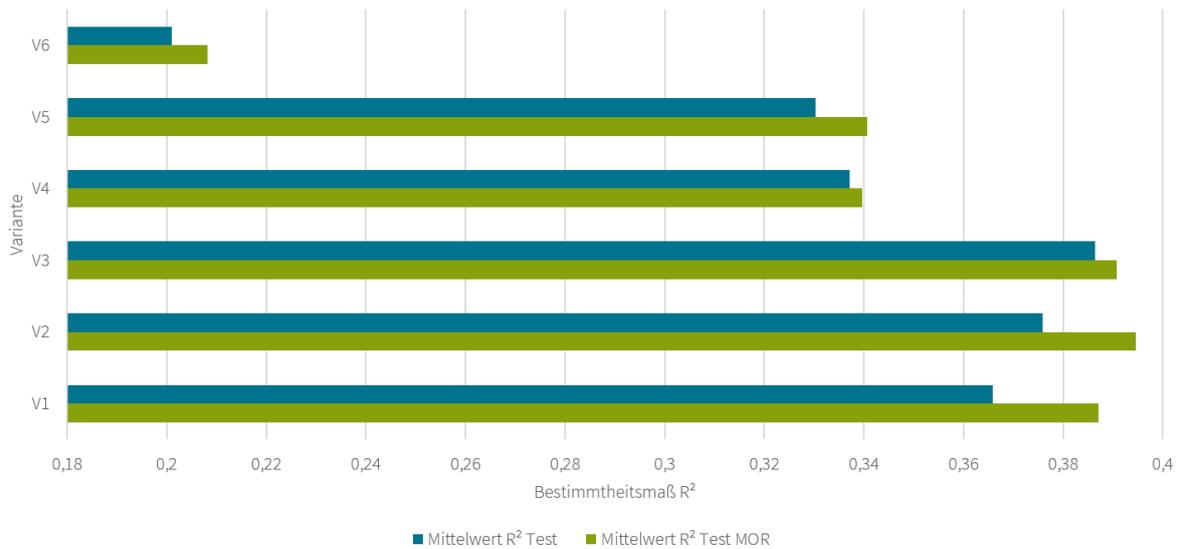


Abbildung 26: Vergleich der Ansätze 1 und 2 bei der Verwendung vom Decision Tree Algorithmus

3.2.1.5 Das Prognosemodell zur weiteren Verwendung im Detail

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein geeignetes Prognosemodell zur Vorhersage der Abwärmeleistung des Abhitzeessels für zukünftige Zeitschritte entwickelt und optimiert. Hierbei wurden diverse mathematische Modelle in Betracht gezogen und verglichen. Um ein passendes Modell auszuwählen, wird sich an verschiedene Leitfragen orientiert. Eine wichtige Frage dabei ist, welches Modell eine hohe Vorhersagegüte beim Test mit GMH-Daten zeigt. Es wird außerdem untersucht, wie sich die Modelle bei der Prognose von Unregelmäßigkeiten im Verlauf einer oder mehrerer Chargen verhalten. Ein weiteres Kriterium ist, wie gut sich das trainierte Modell nachvollziehen lässt. Schließlich wird auch der Aufwand zur Implementierung des Vorhersagealgorithmus in eine andere Programmiersprache bewertet.

Dabei hat sich der Decision-Tree-Algorithmus als das geeignetste Modell herausgestellt, da es die höchste Vorhersagegüte erzielen konnte, bei gestörten ELO Prozesse eine robust Reaktionsverhalten aufweist, die Möglichkeit bietet die Entscheidungsbaumlogik im Detail darzustellen sowie nachvollziehen und aus Wenn-Dann-Abfragen besteht, welche die Möglichkeit bieten in jegliche Programmumgebung implementiert zu werden. Es soll noch angemerkt werden, dass der Rechenaufwand zur Bildung der Entscheidungsbaummodelle deutlich niedriger liegt als von der polynomialen Regressionsformel, wenn Grade größer 2 zur Verwendung kamen.

Der Decision-Tree-Algorithmus wurde mithilfe einer großen Anzahl historischer GMH-Daten trainiert. Eine detailliertere Angabe zu den verwendeten Eingangsparametern ist in Tabelle 7 dargestellt. Für jeden Zeitwert in der Zukunft existiert eine Decision Tree Entscheidungsbaum, welcher bis zu siebzehn Parameter verwenden kann. Die genutzte Anzahl an Parametern wird in der Trainingsphase bestimmt. Für die Vorhersage mittels 6 Ebenen nach 4 Minuten werden vierzehn relevante Parameter verwendet. Die Prognose der Abwärmeleistung weist eine Vorhersagegüte mit einem R^2 -Wert von 73 % auf, siehe dazu Abbildung 27. Dieser Zeitpunkt wird gewählt, da er eine zufriedenstellende Ausgewogenheit aus ausreichend hoher Vorhersagegüte und zeitlicher Voraussicht darstellt. Der resultierenden

Entscheidungsbaum hat insgesamt 6 Ebenen (Tiefe = 6) und 64 Ausgabewerte. Die erste Ebene ist abhängig von dem Parameter ELO Power On. Darauf folgen Entscheidungen mit verschiedenen Kombinationen von Parametern mit kumulierten Summen (bspw.: KumSum Zeitintervall pro Charge), den ELO-Zuständen 1 bis 8 und verschiedenen Zeitwerten der Abwärmeleistung AHK Erzeugung (letzter-, vorletzter-, vorvorletzter bekannter Wert).

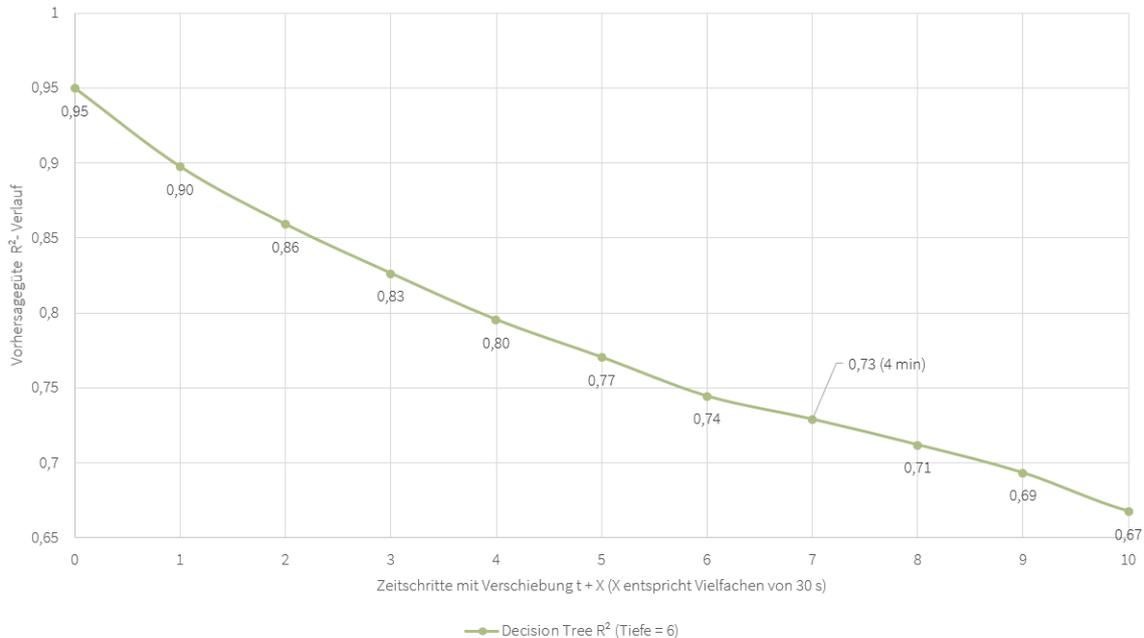


Abbildung 27: R²-Verlauf für einzelne Vorhersageschritte des Decision Tree Vorhersagealgorithmus (1 Zeitschritt = 30 s; X = 0 erster Vorhersagezeitpunkt)

Im Laufe der Auswertung wurden auch Decision Tree Algorithmen mit anderen maximalen Ebenenanzahlen untersucht. Der Entscheidungsbaum mit einer Tiefe von 5 kann eine Vorhersagegüte von 70 % erreichen nach 4 min erreichen und enthält 32 unterschiedliche Ausgabewerte. Die Darstellung der Entscheidungsbaumlogik und Auswertung bei der Verwendung im prognosegestützten Konzept finden sich im Anhang A.3 und bieten die Möglichkeit, ein weniger komplexes Modell ggf. in die GMH Programmlogik zu integrieren. Der Decision Tree mit einer Tiefe von 7 besitzt eine Bestimmtheitsmaß von 74 % mit 128 Ausgabewerte. Durch die Erhöhung der maximalen Ebenen auf 7 steigt die Komplexität stark an. Durch eine Verwendung von 8 Ebene stagniert die Vorhersagegüte bei 74 % einhergehend jedoch mit einer Anzahl an Ausgabewerte von 256. Auf eine detaillierte Dokumentation im Anhang für die Entscheidungsbäume mit einer Tiefe von 7 und 8 wird verzichtet, da diese Modelle zur weiteren Integration, wegen ihrer erhöhten Komplexität und mangelnder Verbesserung der Vorhersagegüte, nicht empfehlenswert erscheinen. Eine Übersicht der Vorhersagegüten der besprochenen Ebenentiefen findet sich in Anhang A.6. Der entscheidungsbaumbasierende Vorhersagealgorithmus mit 6 Ebene wird hier als ein guter Kompromiss aus Komplexität und erreichbarer Vorhersagegüte bewertet und daher für das Optimierungskonzept ausgewählt.

Tabelle 7: Relevante Eingangsparameter für den Decision Tree Vorhersagealgorithmus

Nr.	Parameter	Anmerkungen
1	ELO Power On [MW]	-
2	KumSum Zeitintervall pro Charge [min]	<p>Die Abkürzung <i>KumSum</i> bedeutet „Kumulierte Summe“ und besitzt die Einheit Minuten.</p> <p>Der Start einer Chargen orientiert sich an den GMH Daten und ist auf die Sekunde genau dokumentiert (Original) . Alle Parameter, wie z.B. ELO Power On [MW], liegen jedoch in 30 Sekundenschritten vor. Der Start der Charge wurde daher auf 30 Sekundenschritte gerundet (Gerundet). Beispiele:</p> <p>Original: 2024-06-24 10:00:14 -> Gerundet: 2024-06-24 10:00:00 Original: 2024-06-24 10:00:15 -> Gerundet: 2024-06-24 10:00:00 Original: 2024-06-24 10:00:16 -> Gerundet: 2024-06-24 10:00:30 Original: 2024-06-24 10:00:44 -> Gerundet: 2024-06-24 10:00:30 Original: 2024-06-24 10:01:45 -> Gerundet: 2024-06-24 10:02:00 Original: 2024-06-24 10:01:46 -> Gerundet: 2024-06-24 10:02:00</p> <p>Es wurde "abgerundet" bei den Sekunden 1-15 bzw. 31-44 und "aufgerundet" bei Sekunden 16-29 bzw. 45-59.</p>
3	KumSum Zeitintervall pro ELO-Zustand [min]	Mit jedem Wechsel vom ELO-Zustand beginnt eine neue Kumulation der Energiewerte.
4	KumSum ELO Energie pro Charge [MWh]	Die Energie-Werte ergeben sich durch folgende Umrechnung: Energie [MWh] = ELO Power On [MW] /120. Weitere Anmerkungen zum Start der Charge finden sich beim Parameter „KumSum_Zeitintervall_pro_Charge [min]“
5	KumSum ELO Energie pro ELO-Zustand [MWh]	Mit jedem Wechsel vom ELO-Zustand beginnt eine neue Kumulation der Energiewerte. Die Energie-Werte ergeben sich durch folgende Umrechnung: Energie [MWh] = ELO Power On [MW] /120.
6	ELO-Zustand 1	<p>Die ELO-Zustände werden innerhalb Decision Tree Entscheidungslogik als einzelne Parameter angesehen. Jeder ELO-Zustand kann den Wert 1 oder 0 annehmen. Die ELO-Zustände 5 und 6 finden sich nicht explizit in den von GMH bereitgestellten Daten. Dort werden die ELO-Zustände 2 und 4 wiederholt genutzt. Ein eigenes Python Skript hat diese auf die ELO-Zustände 5 und 6 umgeschrieben. Dieses Skript hat die ELO-Zustände 2, welche nach dem Durchlaufen von ELO-Zustand 4 auftreten, als ELO-Zustand 5 umgeschrieben. Alle ELO-Zustände 4 wurden in analoger Weise in ELO-Zustand 6 neu benannt.</p>
7	ELO-Zustand 2	
8	ELO-Zustand 4	
9	ELO-Zustand 5	
10	ELO-Zustand 6	
11	ELO-Zustand 8	
12	AHK Erzeugung [MW] (letzter bekannter Wert)	Letzter bekannter Wert ist gleichbedeutend mit dem aktuellen Wert der Abwärmeleistung.
13	AHK Erzeugung [MW] (vorletzter bekannter Wert)	
14	AHK Erzeugung [MW] (vorvorletzter bekannter Wert)	

Für den Entscheidungsbaum mit der Tiefe von 6 ergeben sich 64 unterschiedliche Ausgabewerte zur Abwärmeleistung, welche in Abbildung 28 dargestellt sind.

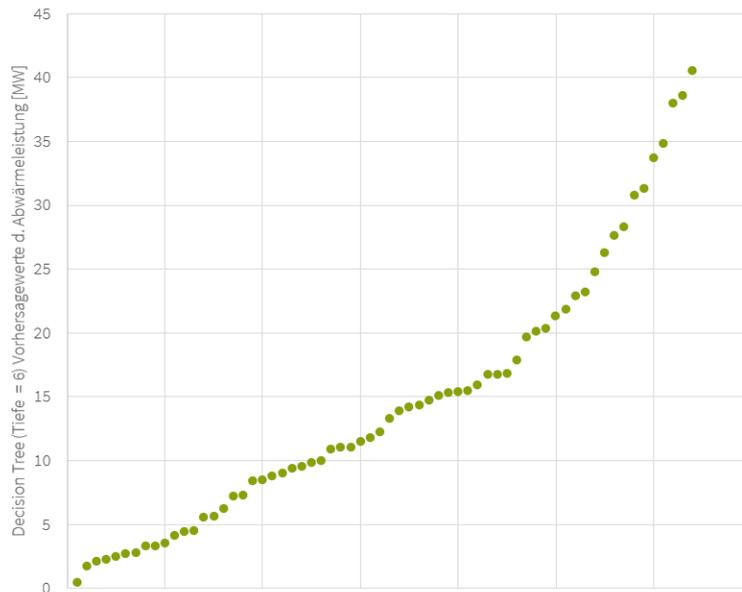


Abbildung 28: Mögliche Decision Tree Ausgabewerte für die Vorhersage nach 4 min

Die Decision Tree Entscheidungslogik wird im Folgendem explizit dargestellt. Zur besseren Lesbarkeit ist diese in zwei Teile, d.h. in Teil I: Abbildung 29 und Teil II: Abbildung 30 aufgeteilt. Die beiden Teile können in der Reihenfolge I → II untereinander gelesen werden. Die erste Entscheidungsebene (Ebene 1) beginnt mit einer Abfrage des Wertes von ELO Power On, welcher in zwei Hauptpfade unterteilt wird: ELO Power On \leq 51.3150 (Teil I, Ebene 1) und ELO Power On $>$ 51.3150 (Teil II, Ebene 2). Diese Logik (Tiefe = 6) ist weiterhin als Python Programmiercode im Anhang A.5 bereitgestellt.

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4	Ebene 5	Ebene 6	Ausgabe
ELO Power On ≤ 51,32	ELO Power On ≤ 0,89	KumSum Zeitintervall p. Charge ≤ 36,25	KumSum Zeitintervall p. Charge ≤ 3,75	ELO Z. 2 ≤ 0,5	AHK Erz. vorvorletzter Wert ≤ 6,15	2,46
				Andernfalls	Andernfalls	3,29
					KumSum Zeitintervall p. ELO Z. ≤ 0,75	4,52
					Andernfalls	7,33
			Andernfalls	KumSum Zeitintervall p. ELO Z. ≤ 3,25	ELO Z. 1 ≤ 0,5	9,39
				Andernfalls	Andernfalls	2,7
					KumSum Energie p. ELO Z. ≤ 5,34	3,31
					Andernfalls	7,24
		Andernfalls	AHK Erz. letzter Wert ≤ 2,48	AHK Erz. letzter Wert ≤ 1,12	KumSum Energie p. ELO Z. ≤ 12,48	0,5
				Andernfalls	Andernfalls	2,14
					AHK Erz. letzter Wert ≤ 2,15	1,74
					Andernfalls	2,24
			Andernfalls	AHK Erz. letzter Wert ≤ 5,54	AHK Erz. letzter Wert ≤ 3,94	2,81
					Andernfalls	3,54
					KumSum Energie p. Charge ≤ 56,95	5,59
					Andernfalls	4,18
	Andernfalls	KumSum Zeitintervall p. Charge ≤ 48,75	AHK Erz. letzter Wert ≤ 20,11	KumSum Zeitintervall p. Charge ≤ 13,75	AHK Erz. letzter Wert ≤ 2,85	11,83
					Andernfalls	15,36
				Andernfalls	ELO Z. 5 ≤ 0,5	11,06
					Andernfalls	8,53
			Andernfalls	ELO Z. 8 ≤ 0,5	KumSum Energie p. Charge ≤ 15,31	16,74
					Andernfalls	8,43
					KumSum Energie p. Charge ≤ 48,95	30,79
					Andernfalls	16,78
		Andernfalls	AHK Erz. letzter Wert ≤ 17,31	ELO Z. 8 ≤ 0,5	KumSum Zeitintervall p. Charge ≤ 50,25	10,89
					Andernfalls	4,48
				Andernfalls	KumSum Energie p. ELO Z. ≤ 26,93	11,48
					Andernfalls	6,26
			Andernfalls	KumSum Energie p. Charge ≤ 57,11	AHK Erz. letzter Wert ≤ 29,73	13,89
					Andernfalls	28,33
					KumSum Zeitintervall p. Charge ≤ 91	9,03
					Andernfalls	15,38

Abbildung 29: Decision Tree Entscheidungslogik (Tiefe = 6) - Teil I

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4	Ebene 5	Ebene 6	Ausgabe
Andernfalls (ELO P. > 51,32)	AHK Erz. letzter Wert <= 22,09	KumSum Zeitintervall p. ELO Z. <= 12,25	AHK Erz. letzter Wert <= 12,42	AHK Erz. letzter Wert <= 5,29	KumSum Zeitintervall p. Charge <= 18,25	15,14
				Andernfalls	Andernfalls	9,86
				Andernfalls	ELO Z. 6 <= 0,5	17,91
			Andernfalls	ELO Z. 8 <= 0,5	Andernfalls	14,18
				Andernfalls	KumSum Energie p. Charge <= 11,69	20,34
				Andernfalls	Andernfalls	16,86
				Andernfalls	AHK Erz. vorletzter Wert <= 21,68	21,84
				Andernfalls	Andernfalls	24,76
		Andernfalls	AHK Erz. letzter Wert <= 19,16	KumSum Energie p. ELO Z. <= 29,68	ELO Z. 4 <= 0,5	13,27
				Andernfalls	Andernfalls	9,55
				Andernfalls	AHK Erz. letzter Wert <= 8,02	5,62
				Andernfalls	Andernfalls	8,77
			Andernfalls	KumSum Zeitintervall p. Charge <= 31,75	KumSum Energie p. Charge <= 26,41	11,05
				Andernfalls	Andernfalls	37,97
				Andernfalls	KumSum Energie p. ELO Z. <= 24,83	20,14
					Andernfalls	14,38
	Andernfalls	KumSum Energie p. ELO Z. <= 24,94	KumSum Energie p. Charge <= 23,54	KumSum Energie p. ELO Z. <= 13,64	AHK Erz. letzter Wert <= 36,2	23,2
					Andernfalls	34,83
				Andernfalls	KumSum Energie p. ELO Z. <= 16,51	14,71
					Andernfalls	10,04
			Andernfalls	AHK Erz. letzter Wert <= 34,28	KumSum Energie p. ELO Z. <= 21,08	31,29
				Andernfalls	Andernfalls	22,94
				Andernfalls	KumSum Energie p. ELO Z. <= 21,4	40,55
				Andernfalls	Andernfalls	33,72
		Andernfalls	AHK Erz. letzter Wert <= 36,16	KumSum Energie p. Charge <= 56,41	AHK Erz. letzter Wert <= 29,42	15,92
				Andernfalls	Andernfalls	21,35
				Andernfalls	AHK Erz. letzter Wert <= 28,73	12,23
				Andernfalls	Andernfalls	15,51
			Andernfalls	KumSum Energie p. Charge <= 56,6	AHK Erz. letzter Wert <= 52,21	26,27
				Andernfalls	Andernfalls	38,58
				Andernfalls	AHK Erz. vorvorletzter Wert <= 51,84	19,67
					Andernfalls	27,66

Abbildung 30: Decision Tree Entscheidungslogik (Tiefe = 6) - Teil I

3.2.2 Konzept zur Optimierung der Regelung der Wärmeübergabe an die Stadtwerke

Das Konzept zur Optimierung der Regelung der Wärmeübergabe an die Stadtwerke wird nun in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert. Dabei wird im ersten Schritt das initiale prognosegestützte Konzept bzw. Freigabelogik dargestellt. Dieses Konzept erweitert die aktuell bestehende Freigabelogik-Regelung zur Wärmeübertragung an die Stadtwerke. Die aktuell bestehende Freigabelogik ist in 3.1.6 (Abbildung 14) beschrieben. Im weiteren Verlauf wird das Verhalten der neuen prognosegestützten Freigabelogik anhand historischer Daten ausgewertet. Die Erkenntnisse der qualitativen und quantitativen Auswertungen führen zu einem optimierten bzw. finalen Konzept.

3.2.2.1 *Initiales prognosegestütztes Konzept*

Das prognosegestützte Konzept hebt die Beschränkung des Freigabewertes von -3 bar vor Einsatz der Kondensatoren von ELO-Zustand 8 auf. Der Eintritt dieses Freigabewertes wird grundsätzlich von mehreren Parametern abhängig gemacht und ist als Entscheidungslogik, bestehend aus mehreren Abfragepfaden, realisiert. Diese Parameter bestehen aus Ist-Werten und Vorhersagewerten des Decision Tree Prognosemodells. Die Ist-Werte sind der aktuelle Freigabewert der Logik, d.h. „-3 bar“ oder „-1 bar“ und der aktuelle Druckgradient. Das Machine Learning Prognosemodell stellt Vorhersagewerte für die Abwärmeleistung in vier Minuten bereit. Abbildung 31 stellt die prognosegestützte Regelung in der Form des initialen Konzeptes dar.

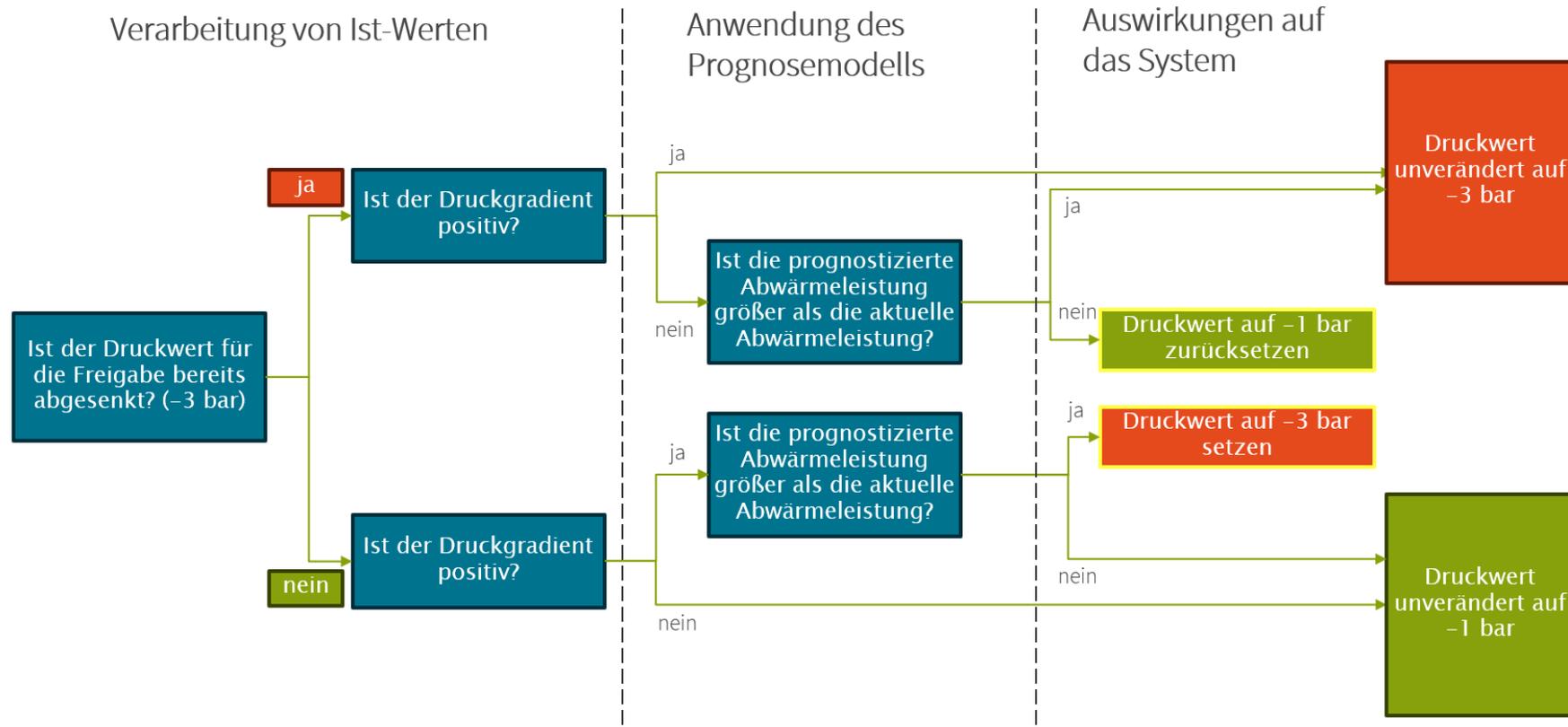


Abbildung 31: Prognosegestützte Freigabelogik – Initiales Konzept

Diese Regelung folgt einer Entscheidungsbaumlogik zur Regulierung des Freigabewertes und lässt sich in drei Bereiche unterteilen: Verarbeitung von Ist-Werten, Anwendung des Prognosemodells, sowie Auswirkungen auf das System. Im Bereich *Verarbeitung von Ist-Werten* wird geprüft, ob der Druckwert für die Freigabe bereits abgesenkt ist (-3 bar) und ob der Druckgradient positiv ist. Im darauffolgenden Bereich *Anwendung des Prognosemodells* wird je nach Pfad noch zusätzlich überprüft, ob die prognostizierte Abwärmeleistung nach 4 min größer ist als die aktuelle Abwärmeleistung. Das Prognosemodell für sich arbeitet wiederum mit ausgewählten Ist-Werten, welche in Tabelle 7 beschrieben sind. Die *Auswirkungen auf das System* können eine Veränderung oder Beibehaltung des Freigabedruckwertes ergeben. Insgesamt ergeben sich 6 Pfade. Alle Pfade sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Prognosegestützte Freigabelogik – Initiale Version

	Verarbeitung von Ist-Werten		Anwendung des Prognosemodells	Auswirkungen auf das System
	Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4
	Ist der Druckwert für die Freigabe bereits abgesenkt (-3 bar) ?	Ist der Druckgradient positiv?	Ist die prognostizierte Abwärmeleistung nach 4 min größer als die aktuelle Abwärmeleistung?	
Pfad 1	Ja	Ja	-	Druckwert unverändert auf -3 bar
Pfad 2	Ja	Nein	Ja	Druckwert unverändert auf -3 bar
Pfad 3	Ja	Nein	Nein	Druckwert auf -1 bar zurücksetzen
Pfad 4	Nein	Ja	Ja	Druckwert auf -3 bar setzen
Pfad 5	Nein	Ja	Nein	Druckwert unverändert auf -1 bar
Pfad 6	Nein	Nein	-	Druckwert unverändert auf -1 bar

Diese Entscheidungsbaumlogik ermöglicht eine systematische Überprüfung und Anpassung des Freigabedruckwertes basierend auf aktuellen und prognostizierten Werten.

3.2.2.2 Quantitative & qualitative Auswertung zur Optimierung der Freigabelogik

Die Freigabelogik des initialen Konzeptes wurde im Hinblick auf ihr Verhalten anhand historischer Daten, speziell in einem Wintermonat mit 589 Chargen (Januar 2022), ausgewertet und optimiert. Die Auswertung erfolgte grundlegend auf zwei Arten: quantitative Auswertung & qualitative Auswertung.

Quantitative Auswertung: Über alle in den historischen Daten enthaltenden Chargen hinweg werden die Daten statistisch ausgewertet und verschiedene Aspekte des Verhaltens der prognosegestützten Freigabelogik untersucht. Dazu gehören die Anzahl an Wechsel der Freigabezustände pro Charge und die Häufigkeitsverteilung dieser Werte über alle Chargen hinweg. Die Häufigkeitsverteilung ist in Abbildung 32 zu sehen. Zusätzlich wurde die Anzahl an Zeitschritten je Freigabezustand und je ELO-Zustand analysiert. Diese Auswertung ermöglicht es zu quantifizieren, bei wie vielen Zeitschritten der jeweilige Freigabezustand durch die prognosegestützte Freigabelogik ausgelöst wird. Des Weiteren lässt sich

dadurch auf die Verteilung schließen, in welchen Phasen des ELO Prozesses der jeweilige Freigabezustand auftritt. Dies ist in Abbildung 33 visualisiert. Die Anzahl der Zeitschritte je Freigabezustand „-3 bar zu -1 bar“ wird zusätzlich als Quotientenwert dargestellt. Um das Verhalten der prognosegestützten Freigabelogik bei Chargen mit einer überdurchschnittlichen Menge an unregelmäßigen bzw. gestörten ELO Prozessphasen auszuwerten, wird die Anzahl der Wechsel der Freigabezustände pro Charge und der maximale Druck der Dampftrommel der jeweiligen Charge aufgetragen. Durch das Sortieren der Werte nach dem maximalen Druck der Dampftrommel ist es möglich, einzelne Chargen leichter zu identifizieren, welche ein Ausreißerverhalten zeigten. Ein Beispiel hierfür ist die überdurchschnittlich hohe Anzahl an Wechseln der Freigabezustände bei einem niedrigen maximalen Druck der Dampftrommel für eine Charge, siehe auch Abbildung 35.

Qualitative Auswertung: Das Verhalten der prognosegestützten Freigabelogik wurde bei einzelnen Chargen qualitativ analysiert, d.h. durch die Darstellung ausgewählter Parameter kann das Reaktionsverhalten der prognosegestützten Freigabelogik direkt untersucht werden, siehe auch Abbildung 36.

Durch diese Auswertungen wurde die prognosegestützte Freigabelogik optimiert, um folgendes Zielverhalten zu erreichen:

- *Schaltarmes Verhalten:* Es sollte eine möglichst geringe Anzahl an Wechseln zwischen den Freigaben -1 bar und -3 bar während einer Charge geben. Es wird darauf abgezielt ein Reaktionsverhalten der Logik mit mehr als vier -3 bar Freigabephasen möglichst auf ein Minimum zu reduzieren.
- *-3 bar Freigabephasen bei ELO-Zuständen mit hohen Abwärmemengen:* Der Freigabezustand -3 bar sollte überwiegend in zeitlichem Zusammenhang zu den ELO Phasen "Erstes Schmelzen", "Zweites Schmelzen" und "Überhitzen" (ELO-Zustände 4, 6 und 8) stehen. ELO-Zustand 8 hat hierbei die höchste Priorität.
- *Generell stabiles Verhalten:* Besonders bei Chargen mit starken Unregelmäßigkeiten während des ELO Prozesses (Störphasen) sollte ein stabiles Verhalten gewährleistet werden.

Auswertung der prognosegestützten Freigabelogik – Initiale Version

Die Verteilung der Anzahl der Wechsel der Freigabezustände von -1 bar zu -3 bar pro Charge von insgesamt 589 Chargen wird in Abbildung 32 dargestellt. Bezogen auf die Interpretation der Abbildung ist zu beachten, dass z.B. 4 Wechsel 2 Phasen mit -3 bar oder 6 Wechsel 3 Phasen mit -3 bar Druckwerten zur Freigabe entsprechen. Damit lässt sich aus Abbildung 32 erkennen, dass z.B. in 265 von 589 Chargen zwei -3 bar Zeitphasen (4 Wechsel) entstehen. Die prognosegestützte Freigabelogik in der initialen Version resultiert am häufigsten mit der Freigabe von zwei -3 bar Zeitphasen (Abs. Häufigkeit = 265) und der Freigabe von drei -3 bar Zeitphasen (Abs. Häufigkeit = 200). Abbildung 32 Weiterhin zeigt sich, dass 50 Chargen existieren bei den mindestens zehn oder mehr Wechsel stattfinden. Die prognosegestützte Freigabelogik in der initialen Version sollte somit in der Weise verändert werden, dass mehr als zehn Wechsel pro Charge vermieden werden.

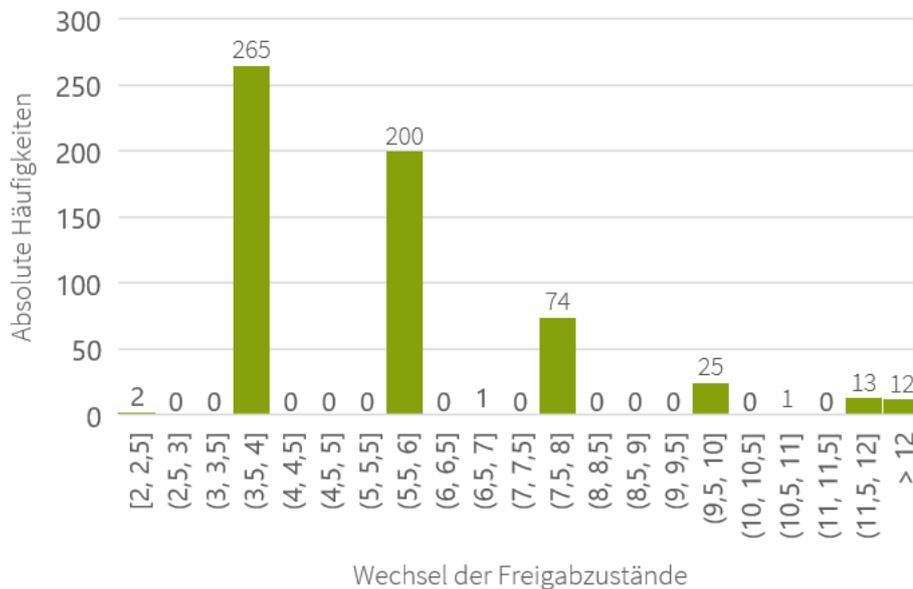


Abbildung 32: Absolute Häufigkeiten von Chargen bei jeweiliger Wechselanzahl der Freigabezustände – Initiales Konzept

Die Abbildung 33 fasst das Reaktionsverhalten der Freigabelogik (initiale Version) zusammen. Es zeigt sich, dass Phasen mit -3 bar Freigabewerten überwiegend in ELO-Zustand 4, 6 und 8 präsent sind. Damit treten die -3 bar Freigaben vordergründig bei erwartbar hohen Abwärmemengen auf und dieses Verhalten ist gewünscht. In Abbildung 34 wird das Verhältnis der Anzahl der Zeitschritte im jeweiligen Freigabewert dargestellt. Da die Anzahl der Zeitschritte stark von der Länge der jeweiligen ELO-Zustände abhängt, kann durch die Quotientenbildung dieser Aspekt eliminiert werden. Damit wird klarer ersichtlich, dass mindestens bei den ELO-Zuständen 4 und 8 die -3 bar Freigabewerte, bzw. dass der Quotientenwert über 1 liegt, überwiegen.

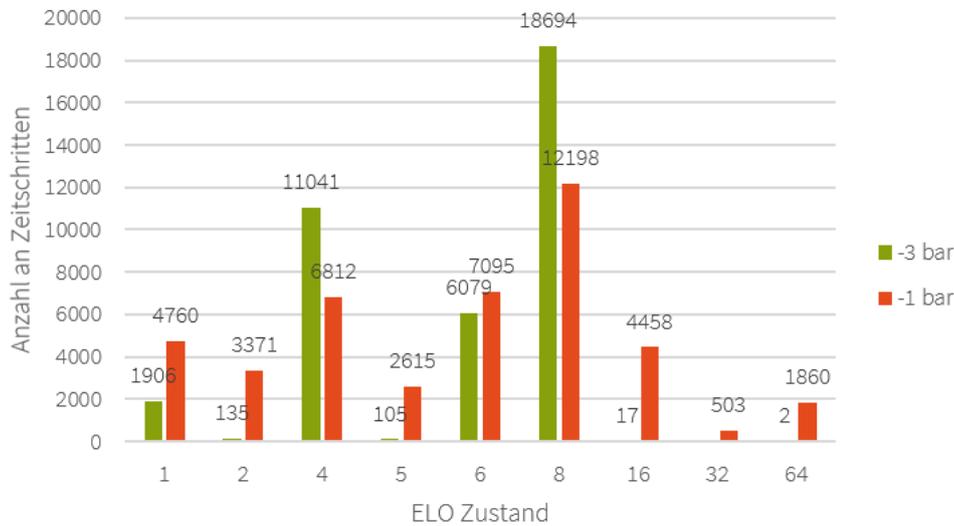


Abbildung 33: Verteilung der Anzahl an Zeitschritten je Freigabezustand und unterteilt je ELO-Zustand – Initiales Konzept

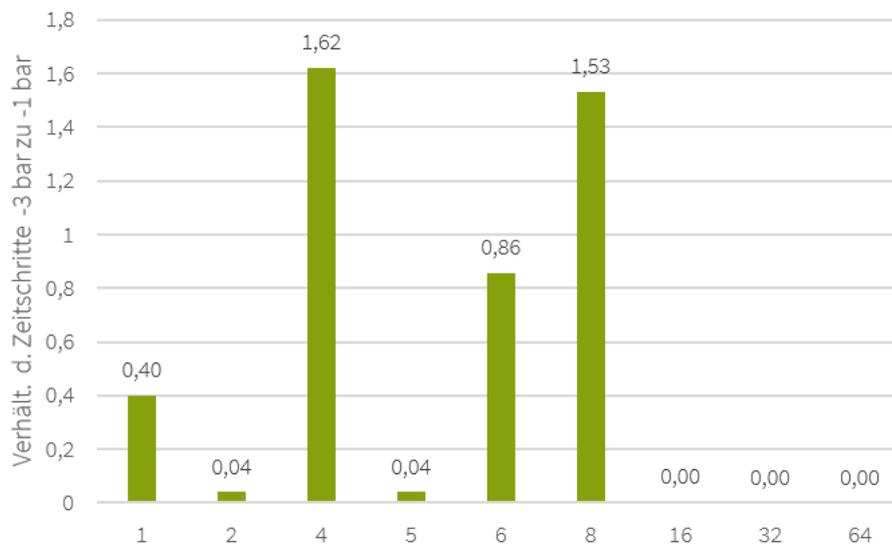


Abbildung 34: Verhältnis der Anzahl der Zeitschritte von den Druckwerten -3 bar zu -1 bar – Initiales Konzept

Um das Verhalten der prognosegestützten Freigabelogik bei Chargen mit einer überdurchschnittlichen Zeit an unregelmäßigen bzw. gestörten ELO-Prozessphasen auszuwerten, wird die Anzahl der Wechsel der Freigabezustände pro Charge und der maximale Druck der Dampftrommel der jeweiligen Charge aufgetragen. Die Abbildung 35 stellt die Ergebnisse für die initiale Versionsfreigabelogik dar. Es lässt sich erkennen, dass bei Chargen mit niedrigen Maximaldrücken der Dampftrommel pro Charge, d.h. maximalen Druckwerten unterhalb von circa 19,5 bar (rechtes Drittel des Diagramms), die Anzahl der Wechsel der Freigabezustände z.T. 10 Wechsel pro Charge deutlich übersteigt.

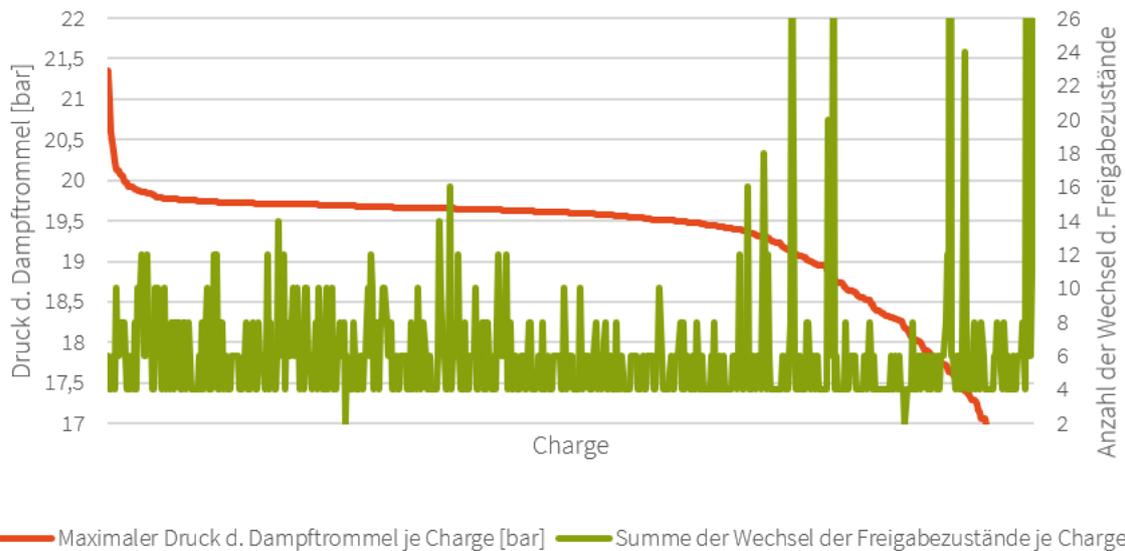


Abbildung 35: Anzahl der Wechsel der Freigabezustände sortiert nach maximalem Druck d. Dampftrommel – Initiales Konzept

Durch eine qualitative Analyse dieser auffälligen Chargin kann das Schaltverhalten gezielt analysiert werden, um Rückschlüsse auf Verbesserungsmöglichkeiten zu ziehen. Dazu wird exemplarisch mittels einer qualitativen Analyse die Charge 265565 ausführlich beschrieben.

In Abbildung 36 wird das Schaltverhalten der prognosegestützten Freigabelogik mit ausgewählten Parametern für die Charge 259565 im Zeitraum Januar 2022 dargestellt (Beginn: 07:50:30 Uhr; Ende: 09:14:00 Uhr, Dauer: 83,5 min). In der Darstellung werden die Daten der Parameter *Druck_Dampftrommel [bar]*, *AHK_Erzeugung [MW]*, *ELO-Zustand* und *Druckgradient-Dampftrommel [bar/min]* wiedergegeben. Die Freigabewert -3 bar und -1 bar nehmen zur besseren Veranschaulichung jeweils die Werte 0 (inaktiv) oder 100 (aktiv) an. Die Charge 259565 ist mit 83,5 Minuten überdurchschnittlich lang. Der Median der Dauer einer Charge liegt bei 59 Minuten, vgl. dazu Abbildung 3. Die Überhitzungsphase ist mit 50,5 Minuten etwa doppelt so lang wie der Medianwert von 24,5 Minuten für die Zeitdauer des ELO-Zustands 8, wie auch in Abbildung 2 und Tabelle 9 zu sehen ist. Es zeigen sich 8 Phasen (16 Wechsel) mit dem Druckfreigabewert von -3 bar.

Tabelle 9: Zeitdauer [min] der ELO-Zustände von Charge 259565 (Jan 2022)

ELO-Zustand	1	2	4	5	6	8	16	32	64
Zeitdauer [min]	1	1,5	15	2,5	7,5	50,5	4	1	1

Während der ersten 30 Minuten der Überhitzungsphase liegt der Druck der Dampftrommel näherungsweise konstant bei circa 19,5 bar und der Druckgradient schwankt stark zwischen positiven und negativen Werten. Die real gemessene Abwärmeleistung der ersten 20 min in ELO-Zustand 8 liegt bei etwa 25 bis 45 MW und die prognostizierte Abwärmeleistung zeigt während dieser Phase ähnlich hohe Werte. Da die prognosegestützte Freigabelogik abfragt, ob der Druckgradient positiv ist, resultieren in der soeben

beschriebenen Überhitzungsphase gehäuft Wechsel der Freigabedruckwerte. Es sollte festgehalten werden, dass diese vielen Wechsel bei so hohen Druckwerten stattfinden, dass die Freigabe auch bei Freigabedruckwert von -1 bar erfolgen würde. Ein Wechsel der Freigabedruckwerte hätte keine Auswirkungen auf die Freigabe zur Übergabe an Stadtwerke.

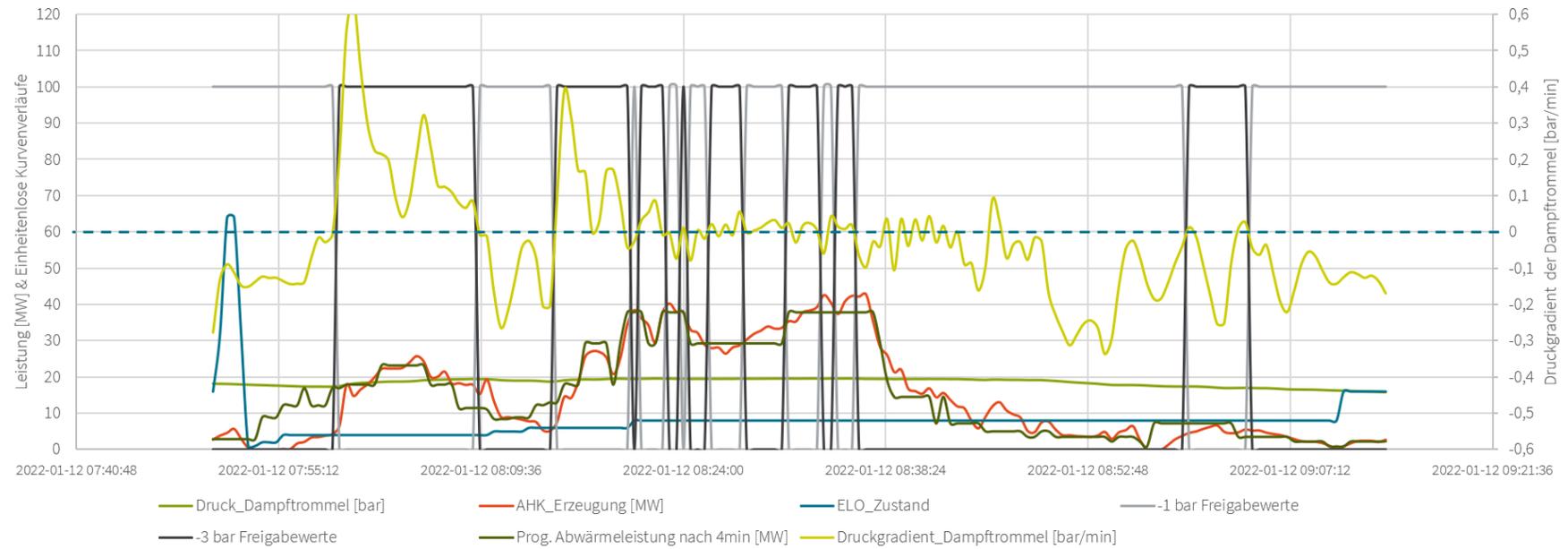


Abbildung 36: Schaltverhalten der prognosegestützten Freigabelogik mit ausgewählten Parametern (Charge 259565, Jan 2022)

Durch die Auswertungen konnten diverse Erkenntnisse über das Reaktionsverhalten der prognosegestützten Freigabelogik gewonnen werden, die teilweise zuvor beschrieben wurden. Dadurch ergaben sich Anpassungen am initialen Konzept, die erneut ausgewertet wurden. Die Erkenntnisse aus den Iterationen der Auswertungen werden im Folgenden beschrieben. Aus diesen Erkenntnissen resultiert ein finales Konzept. Durch die Analyse der Datenreihen zeigt sich, dass in größeren Zeitabschnitten der Überhitzungsphase der Druck in der Dampftrommel etwa konstant bei circa 19,5 bar bleibt, während der Druckgradient stark zwischen leicht positiven und leicht negativen Werten schwankt. Es treten hier viele Wechsel der Freigabezustände auf. Daraus leitete sich die Erkenntnis ab, dass die Entscheidungsfrage zum Druckgradienten einen auf die Schwankungen angepassten Schwellenwert des Druckgradienten berücksichtigen sollte. Die Abfrage zum Ist-Wert des Druckgradienten befindet sich auf Ebene 2 der prognosegestützte Freigabelogik (vgl. dazu Tabelle 8). Bei detaillierter Betrachtung der möglichen Pfade lässt sich erkennen, dass durch Pfad 1 und Pfad 2 auf Ebene 2 der -3 bar Freigabewert beibehalten wird. Da während der Überhitzungsphase die Vorhersagewerte der Abwärmeleistung nach 4 min und die real gemessene Abwärmeleistung zeitweise in ELO-Zustand 8 ähnlich hohe Werte aufweisen, kann es, in Kombination mit den benannten minimalen Druckgradienten Schwankungen, in diesem Fall zu ungewünschtem Wechsel auf Pfad 3 kommen. Die Auswertung haben gezeigt, dass ein Schwellenwert von -0,1 bar/min in Ebene 2 für Pfad 1-3 ein schaltärmeres Verhalten gewährleistet. Weiterhin kann allein Pfad 4 aus einem -1 bar Druckfreigabewert ein Wechsel auf die -3 bar Freigabe bewirken. Daher sollte der Druckgradienten Schwellenwert bei 0 bar/min in Pfad 4 beibehalten werden, um in diesen Phasen des ELO-Prozesses einen Wechsel der Freigabezustände zu ermöglichen. Durch die Auswertung des initialen prognosegestützten Freigabelogik konnte erkannt werden, dass ein Druckfreigabewert von -3 bar zum Teil nach kurzen ELO-Störphasen bei relativ niedrigen Drücken der Dampftrommel (unter 16 bar) erteilt wurde. Der Grund findet sich im Auftreten von zeitweise positiven Druckgradienten und größere Vorhersagewerte nach 4 Minuten als die aktuelle Abwärmeleistung. Es zeigt sich weiterhin, dass es während relativ niedrigeren Drücke in der Dampftrommel während oder kurz nach ELO Störphasen zu starken Fluktuationen des Druckgradienten um 0 bar/min kommt. In diesen Zeiten sind die Prognosen teilweise auch höher als die reale Abwärmeleistung. Eine -3 bar Freigabe wird zeitweise auch hier erteilt. Um in den Beiden beschriebenen Fällen -3 bar Freigaben zu minimieren, zeigen die Auswertungen, dass Integration eines Schwellenwertes für den Dampftrommeldruck die eben genannten Fälle abfangen kann. Aus der Analyse des Druckverlaufs der Dampftrommel wird ein Schwellenwert von 16 bar gewählt, da Chargen, die kein Ausreißerverhalten zeigen, nicht unter einen Dampftrommeldruck von 16 bar fallen. Die -3 bar Freigabe ohne Integration des gewählten Schwellenwertes hätte wahrscheinlich keine große Auswirkung auf die tatsächliche Freigabe an die Stadtwerke, da der Druck in der Dampftrommel insgesamt zu niedrig ist. Sie führt jedoch zu einem schaltärmeren Verhalten. Die prognostizierte Abwärmeleistung kann während der ELO-Zustände 1, 2, 16, 32 und 64 größer als die aktuelle Abwärmeleistung sein. Um ein Wechsel auf den Freigabewert von -3 bar zu minimieren, werden diese Fälle logikbedingt durch die Hinzunahme einer weiteren Abfragebedingung auf Ebene 3 ausgeschlossen.

3.2.2.3 *Finales Konzept*

Durch die im Vorkapitel beschriebenen Auswertungen und Erkenntnisse ergibt sich das in Abbildung 37 dargestellte finale Konzept. Die finale Decision Tree Entscheidungslogik zur Prognose der Abwärmeleistung nach 4 Minuten in Abbildung 29 & Abbildung 30 dargestellt ist.

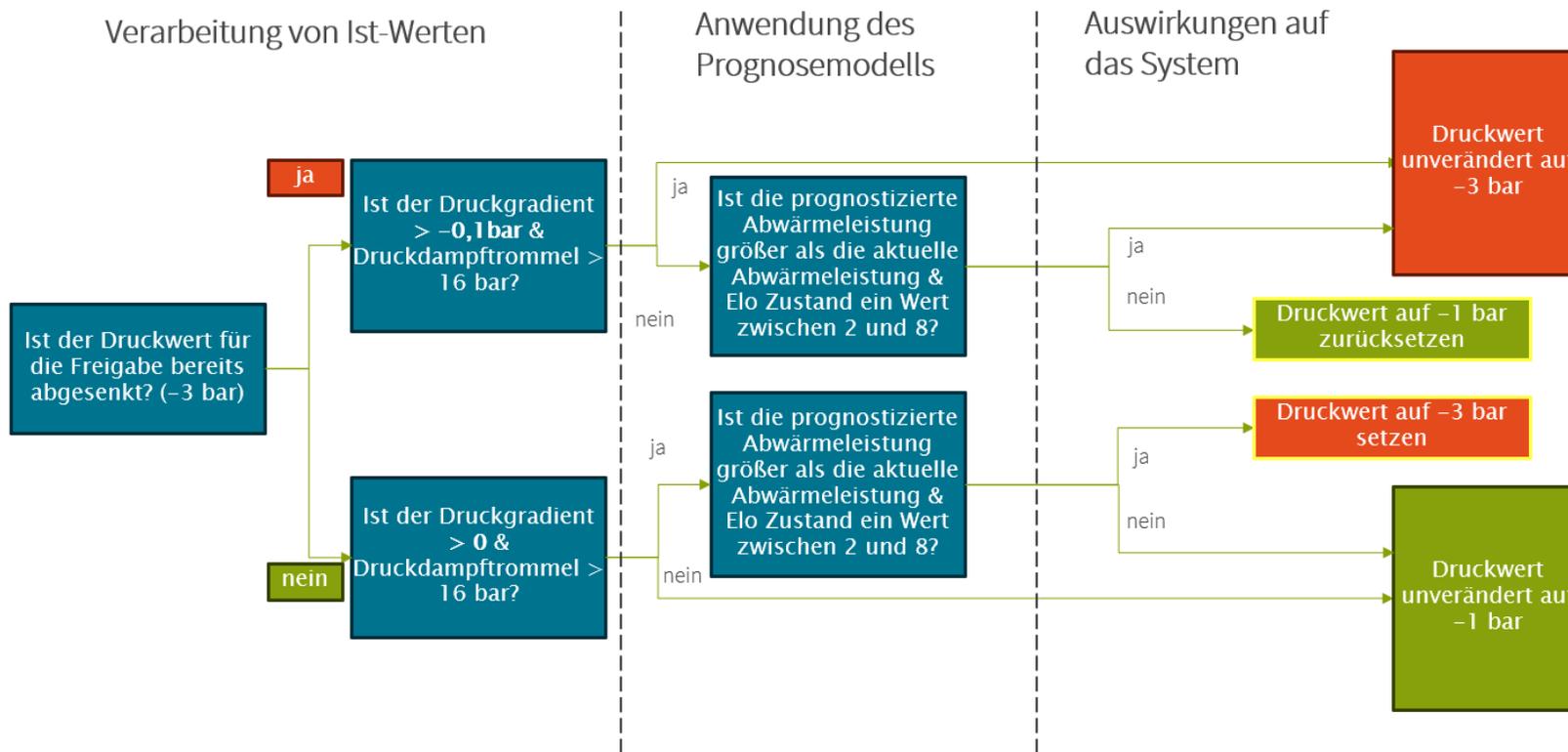


Abbildung 37: Prognosegestützte Freigabelogik – Finales Konzept

Eine Zusammenfassung findet sich zusätzlich in Tabelle 10. Im Vergleich zum initialen Konzept haben sich die Entscheidungsfragen auf Ebene 2 und Ebene 3 geändert. Diese Änderungen führen im Allgemeinen zu einem schaltärmeren und stabileren Reaktionsverhalten. Die folgende quantitative Auswertung unterstützt diese Aussage.

Tabelle 10: Prognosegestützte Freigabelogik – Finale Version

Verarbeitung von Ist-Werten		Anwendung des Prognosemodells & Verarbeitung von Ist-Werten		Auswirkungen auf das System
Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4	
Ist der Druckwert für die Freigabe bereits abgesenkt (-3 bar) ?	Ist der Druckgradient negativ und größer als -0,1 bar/min und Dampftrommeldruck > 16 bar ?	Ist die prognostizierte Abwärmeleistung größer als die aktuelle Abwärmeleistung und ELO-Zustand ein Wert zwischen 2 und 8 ?		
Pfad 1	Ja	Ja	-	Druckwert unverändert auf -3 bar
Pfad 2	Ja	Nein	Ja	Druckwert unverändert auf -3 bar
Pfad 3	Ja	Nein	Nein	Druckwert auf -1 bar zurücksetzen
	Ist der Druckgradient positiv und Dampftrommeldruck > 16 bar ?			
Pfad 4	Nein	Ja	Ja	Druckwert auf -3 bar setzen
Pfad 5	Nein	Ja	Nein	Druckwert unverändert auf -1 bar
Pfad 6	Nein	Nein	-	Druckwert unverändert auf -1 bar

Der Vergleich von Abbildung 32 mit Abbildung 38 zeigt eine deutliche Veränderung der Verteilung. Es resultieren 42 Chargen, bei denen kein Wechsel der Freigabezustände auftritt. Es handelt sich hier um Chargen mit größeren ELO-Störphasen, welche in Abbildung 41 im „rechten Drittel“, d.h. bei maximalen Dampftrommeldrücken von circa 19 bar abgebildet sind. Eine Freigabewert von -3 bar ist hier nicht gewünscht. Das Auftreten von Chargen, bei denen sich kein Wechsel der Freigabezustände ergeben, konnte im Vergleich im initialen Konzept nicht beobachtet werden. Die Häufigkeit von auftretenden Chargen, bei denen einmal die -3 bar Freigabe gesetzt wird, ist stark angestiegen, von 2 auf 113 Chargen. Das finale Konzept schaltet am häufigsten zwei Mal in den Druckfreigabewert -3 bar. Dieses Verhalten wird bei 358 Chargen ausgelöst, somit 93-mal öfter als im initialen Konzept. Die Zahl der Chargen in denen drei Mal in den Freigabezustand -3 bar geschaltet wird, ist um eins gesunken. Vier oder fünf Wechsel ergeben sich insgesamt fünf Mal. Dieser Wert hat sich im Vergleich zum initialen Konzept um den Faktor zehn reduziert.

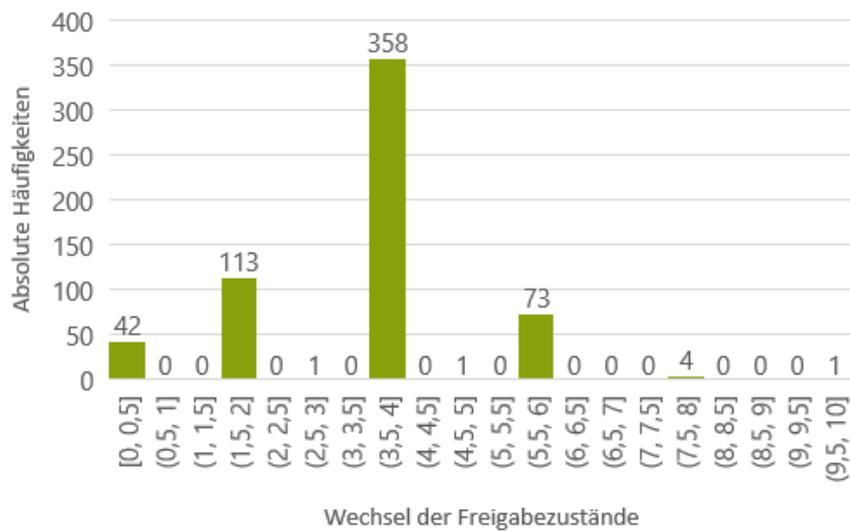


Abbildung 38: Absolute Häufigkeiten von Chargen bei jeweiliger Wechselanzahl der Freigabezustände – Finales Konzept

Der Vergleich von Abbildung 39 & Abbildung 40 des finalen Konzeptes mit Abbildung 33 & Abbildung 34 zeigt, dass in ELO-Zustand 1 die Anzahl der Zeitschritte von 1906 auf null gesunken ist. Die ELO-Zustände 2, 16, 32 und 64 zeigen ähnlich niedrige Werte. Die Quotientenwerte von ELO-Zustand 4 und 6 sinken von 1,62 auf 0,96 sowie 0,86 auf 0,46 auf akzeptable Weise. Die Verhältniszahl für ELO-Zustand 8 ist von 1,53 auf 1,72 gestiegen. Der Entwicklung der besprochenen Quotientenwerte deckt sich mit dem gewünschten Zielverhalten.

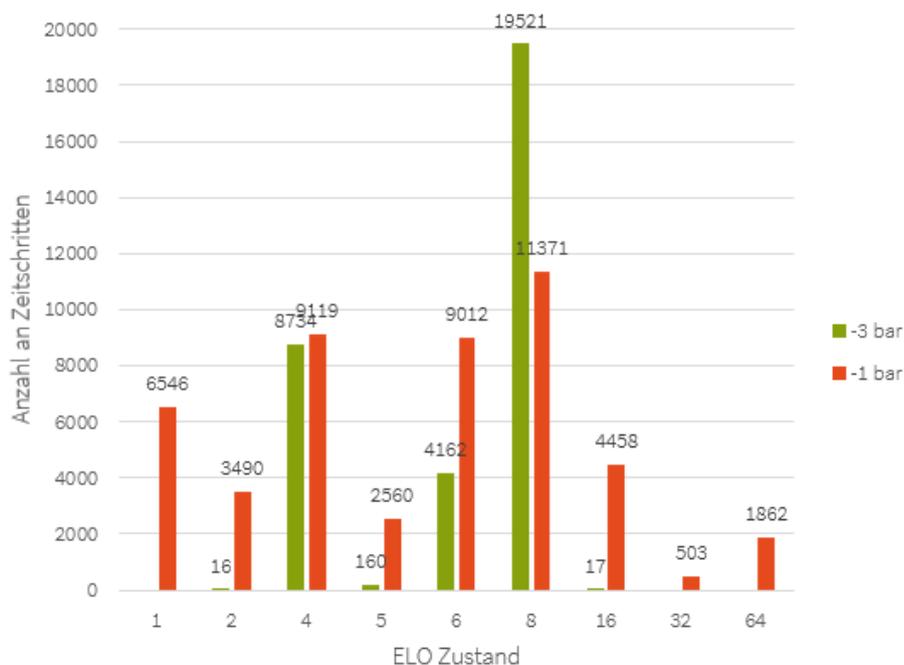


Abbildung 39: Verteilung der Anzahl an Zeitschritten je Freigabezustand und unterteilt je ELO-Zustand – Finales Konzept

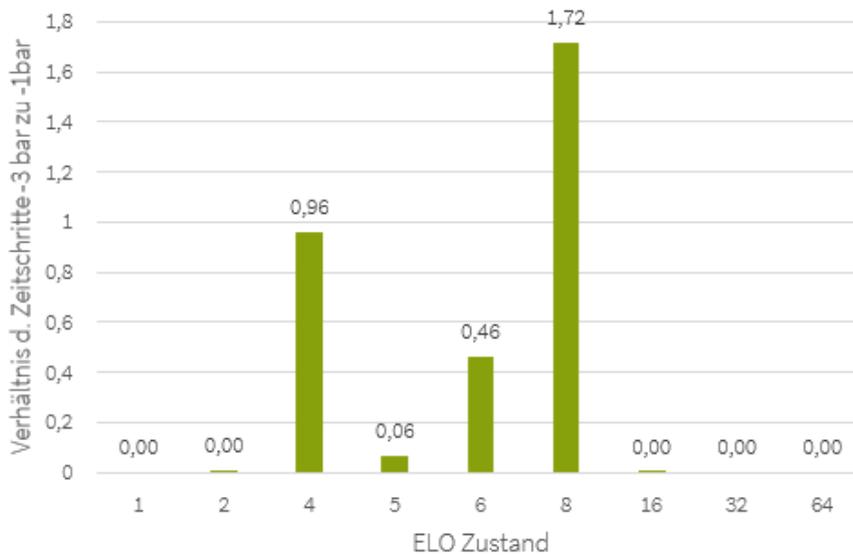


Abbildung 40: Verhältnis der Anzahl der Zeitschritte von den Druckwerten -3 bar zu -1 bar – Finales Konzept

In Abbildung 41 zeigt sich, wie oben erläutert, ein optimiertes Verhalten explizit bei Chargen mit maximalen Dampftrommelrücken von unter 19 bar. Die Anzahl der Wechsel in diesem Druckbereich konnte drastisch minimiert werden.

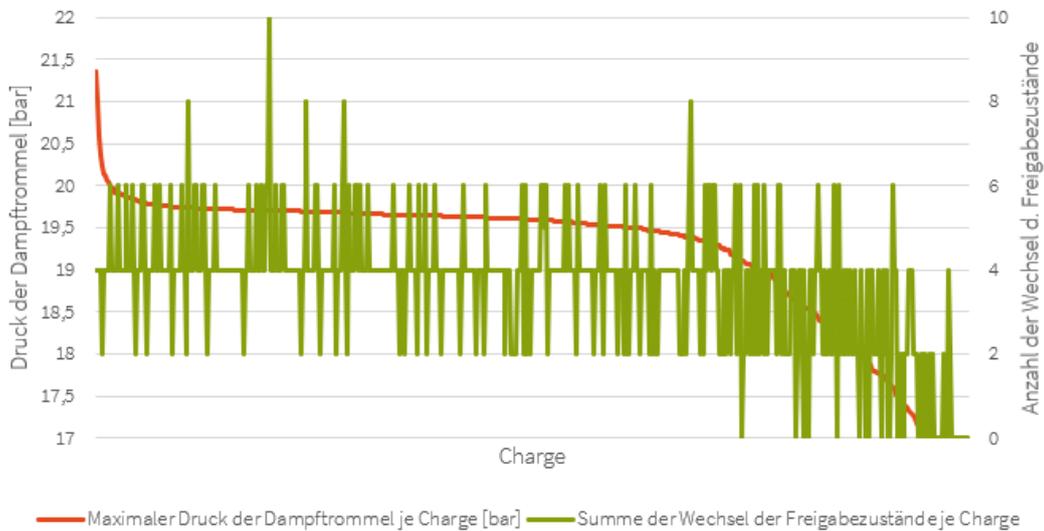


Abbildung 41: Anzahl der Wechsel der Freigabezustände sortiert nach maximalem Druck d. Dampftrommel – Finales Konzept

4 Fazit

Im Abschnitt zur Datenanalyse konnten die Daten von ausgewählten Aggregaten und deren assoziierten Prozessen analysiert werden. Dazu wurden bspw. die Prozessdauern, der elektrische Energiebedarf, der gemessene Schalldruck und die resultierenden Abwärmemengen aus den Daten im Betrieb des Elektrolichtbogenofens (ELO) untersucht. Die Erkenntnisse aus dieser Art von Analysen erweiterten das Verständnis von Systemkomponenten und die damit einhergehenden Parameter, welche potenziell als Einflussgrößen in das Prognosemodell, innerhalb der Konzeption des optimierten Steuerprogramms, integriert werden sollten. Im Rahmen der Datenanalyse wird auch eine bereits implementierte erweiterte Regelungslogik zur Wärmeübertragung an die Stadtwerke ausgewertet. Dabei hat sich gezeigt, dass sich durch die erweiterte Regelung der Druckbereich, in dem eine Wärmeübergabe an die Stadtwerke stattfindet, zu niedrigeren Drücken verschiebt und frühzeitiger Abwärme an die Stadtwerke zu übergeben kann, bevor die Kondensation einsetzt. Durch die Auswertungen der erweiterten Regelungslogik konnte gezeigt werden, dass sich dadurch eine frühzeitigere Wärmeübergabe einstellt. Die Entwicklung eines erweiterten Konzeptes zur Wärmeübergabe, welches sich nicht nur auf den ELO-Zustand 8 beschränkt, wurde dadurch zusätzlich motiviert.

Im zweiten Hauptteil wird durch umfangreiche Auswertungen ein geeignetes Prognosemodell entwickelt, welches Teil des Konzeptes zur weiteren Optimierung der Regelung zur Wärmeübergabe an die Stadtwerke ist. Dabei hat sich der Decision Tree Algorithmus als das passendste Vorhersagemodell zur Prognose der zukünftigen Abwärmeleistung nach 4 min mit einem R^2 -Wert von 73 % herausgestellt. Das Bestimmtheitsmaß sinkt dabei mit jedem zukünftigen Zeitschritt. Dabei wird für jeden Prognosewert eine eigenständige, auf den Zeitschritt angepasste Decision Tree Entscheidungsbaumlogik erstellt. Dieser Ansatz lässt sich in der Weise erweitern, dass die Vorhersagewerte der vorherigen Zeitschritte verwendet wird, um die Werte der nächsten Zeitschritte zu berechnen. Eine Auswertung dieses erweiterten zweiten Ansatzes wird als sinnvoll erachtet.

Damit wurde die Grundlage geschaffen, um dem Abhitzesystem weitere Abwärmemengen für eine zusätzliche Nutzung zu entnehmen und gleichzeitig die Versorgung der internen Wärmeverbraucher von GMH weiterhin sicherzustellen. Die entwickelte prognosebasierte Regelung trägt hierzu bei, indem sie

- schon bei geringen Dampfdrücken im System die Übergabe von Wärme freigibt, sofern eine steigende Abwärmeleistung in der nahen Zukunft prognostiziert wird,
- damit Speicherkapazitäten im Dampfsystem von GMH für die Zeiträume freihält, in denen die Abwärmeleistung die verfügbaren Übergabekapazitäten übersteigt,
- durch die Entkopplung der Freigabe des ELO-Zustands 8 weitere Zeiträume für eine Übergabe oder Nutzung von Abwärme bei niedrigen Systemdrücken erschließt,
- durch die Anknüpfung an den jeweils aktuellen Zustand des Systems, insbesondere den Druckgradienten, implizit auch die interne Abnahme von Wärme durch die Verbraucher von GMH berücksichtigt und
- bei sinkender prognostizierter Abwärmeleistung die Übergabe frühzeitig beendet, um ausreichend Wärme im System für die interne Nutzung zu behalten.

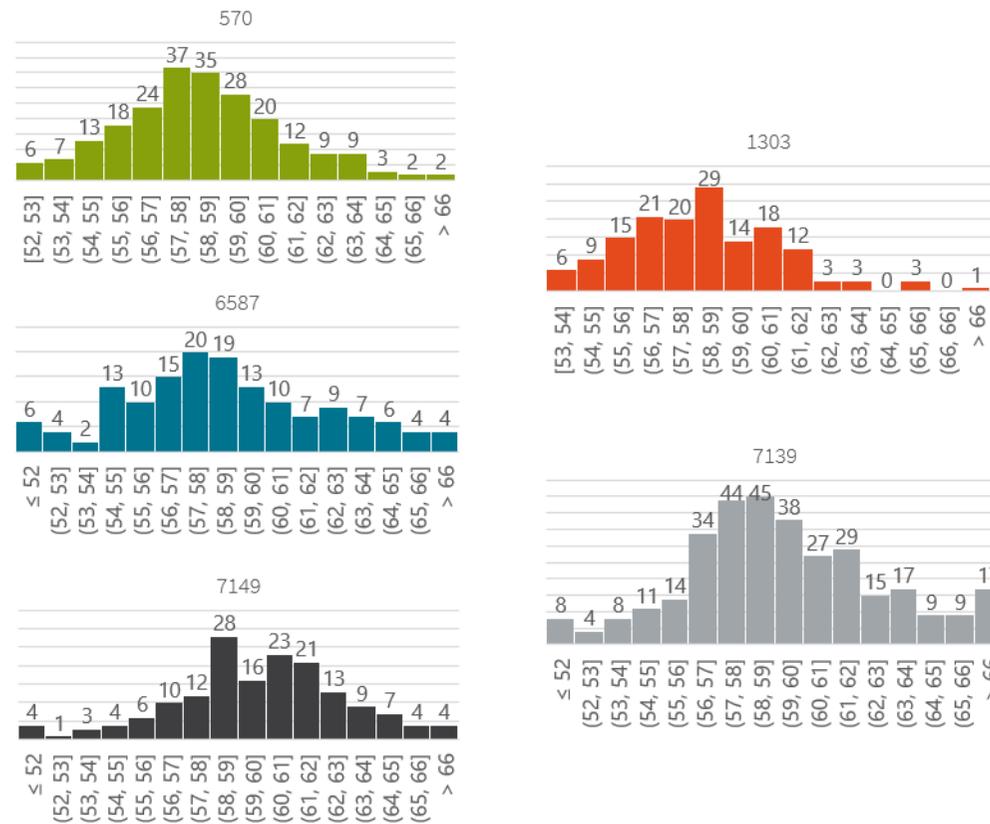
Eine Implementierung des finalen Konzeptes zur Regelungsoptimierung in GMH Programmierlogik ist in Planung. Eine anschließende Auswertung zu deren Auswirkungen auf das Wärmeübergabeverhalten wird als zukünftige Aufgabe empfohlen. Die Auswirkungen noch zu implementierender Wärmesenken könnten darüber hinaus mittels einer Simulation des Gesamtsystems auch quantitativ genauer bestimmt werden.

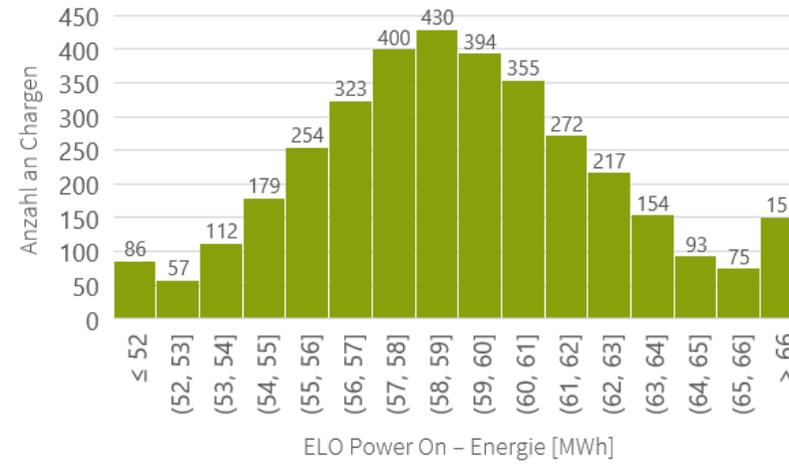
Anhang

A.1 Analysen zum Einfluss des Produkts (Werkstoffnummer auf das Abheizsystem)

Histogramme zum elektrischen Energiebedarf des ELO bei den 5 häufigsten Produkten im Vergleich zum Bedarf aller Chargen

Anzahl an Chargen mit bestimmtem Energiebedarf unterteilt in Energieintervalle in MWh





A.2 Analyse der erweiterten Regelung – Ergänzenden Auswertungen

Tabelle mit der Anzahl der Ereignisse differenziert in Leistungsbereiche für Übergabe StW und Druckbereiche für den Druck der Dampftrommel im Januar 2022

	Anzahl an Ereignissen von Übergabe StW – Jan 2022																					Druck Dampftrommel - Unterteilung [bar]																					Gesamtergebnis
	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5	17	17,5	18	18,5	19	19,5	20	20,5	21	21,5													
Füllstand größer 60 %	325	309	76	85	89	94	95	94	93	134	131	157	242	355	566	765	1064	1212	1836	2648	3376	3927	3890	3382	2936	3760	3301	2						34944									
Füllstand kleiner 60 %	886	841	152	170	180	165	269	294	298	315	316	385	587	1063	1231	1442	1816	2158	2771	3285	3739	3618	3684	3138	3033	4305	3806	59	24	15			44045										
1	463	359	31	23	12	12	12	32	37	25	28	40	55	80	68	70	50	59	88	86	136	159	185	40									2150										
2	33	26			3		15	8	3	19	18	18	57	78	60	63	99	82	134	186	254	301	188	13									1658										
4	96	166	27	24	22	22	39	24	26	37	30	53	143	209	276	378	473	641	810	1112	1292	1041	822	682	519	773	188						9925										
5	4	2			5		11	20	15	16	20	18	25	31	30	39	48	80	102	130	126	152	171	147	220	91							1503										
6	281	253	61	90	78	81	120	107	114	114	116	126	136	299	268	284	442	557	649	632	593	566	521	460	467	212	21						7648										
ELO Z. 8	9	35	33	33	60	45	54	76	76	87	82	94	122	269	437	481	571	593	808	911	1061	941	1091	1136	1221	3030	3596	59	24	15			17050										
0,5	9	35	33	33	60	45	54	76	76	87	82	94	122	269	437	481	570	496	573	490	381	217	170	126	87	66	9	2					5180										
1																	1	2	5	14	48	37	39	39	40	54	21	1	2	2			305										
1,5																		4	9	53	106	114	172	180	221	217	30				1		1107										
2																		43	136	201	307	326	395	484	429	332	25						2678										
2,5																		46	76	138	200	232	299	293	319	369	32	2			1		2007										
3																		2	8	15	18	15	16	13	27	232	27	1						374									
3,5																									10	132	23							168									
4																									12	130	31	2						175									
4,5																									6	95	34	2						137									
5																									12	88	31					1		132									
5,5																									8	57	36							101									
6																									10	68	34	3						115									
6,5																									11	69	44							124									
7																									17	64	43							124									
7,5																									10	75	48	1			1			135									
8																									1	63	68							132									
8,5																									1	68	77							148									
9																										67	88	2			1			158									
9,5																										54	146	6	1	3				210									
10																										165	484	13	8	2				672									
10,5																										556	2204	24	13	1				2798									
11																										8	57							65									
11,5																												3						3									
12																											1	1						2									
16					5	18	16	27	17	12	17	38	66	59	93	78	79	119	141	150	243	409	464	574	199	1							2825										
32																																			268								
64																																			1018								
Gesamtergebnis	1211	1150	228	255	269	259	364	388	391	449	447	542	829	1418	1797	2207	2880	3370	4607	5933	7115	7545	7574	6520	5969	8065	7107	61	24	15			78989										

Tabelle mit der Anzahl der Ereignisse differenziert in Leistungsbereiche für Übergabe StW und Druckbereiche für den Druck der Dampftrommel im Januar 2023

Anzahl an Ereignissen von Übergabe StW – Jan 2023	Druck Dampftrommel - Unterteilung [bar]																					Gesamtergebnis											
	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5	17		17,5	18	18,5	19	19,5	20	20,5	21			
Füllstand größer 60 %	298	336	37	49	52	51	42	43	74	94	90	108	170	352	599	655	694	701	740	852	1145	1074	1104	941	825	534	706	296	29	12691			
Füllstand kleiner 60 %	3295	3264	194	214	286	305	360	396	424	456	461	571	932	2084	3502	3887	4589	5293	5792	6277	6427	6139	5671	4510	4169	2958	3287	834	8	76585			
1	3094	2892	70	64	89	92	88	85	94	78	108	109	120	144	116	125	134	125	176	161	180	223	222	69	6	3				8667			
2	30	44		16	16	3	14	20	30	49	29	27	98	163	186	165	270	235	308	279	353	417	248	24						3024			
4	77	178	13	2	6	19	23	32	36	61	65	112	254	519	920	1009	1261	1672	1772	1985	2099	1653	1062	749	565	355	219	35		16753			
5	1	16	21	18	13	12	18	44	52	50	30	31	55	81	162	154	189	200	270	227	243	194	179	153	139	33	13			2598			
6	11	35	25	44	79	107	141	146	115	143	148	185	271	733	945	882	1114	1226	1088	1078	847	808	687	384	236	107	36			11621			
ELO Z. 8	82	99	65	70	83	72	76	69	97	75	81	94	89	259	986	1305	1292	1220	1080	896	526	220	70	47	35	32	36	14		27601			
0,5		82	99	65	70	83	72	76	69	97	75	81	94	89	259	986	1305	1292	1220	1080	896	526	220	70	47	35	32	36	14		9070		
1																		2	7	11	70	125	142	88	32	6	3				486		
1,5																		2	15	12	19	65	76	79	90	42	3	4	2		409		
2																			63	190	305	385	505	520	532	483	60	3	1		3047		
2,5																			168	442	675	920	1166	1466	1429	1535	468	4	2		8275		
3																			9	15	25	43	54	68	70	99	271	2	2		658		
3,5																			2	3	5	6	11	13	13	59	185	7			304		
4																				1		2	5	2		12	46	150	24	2		244	
4,5																									3	21	118	21	1			166	
5																									1	23	110	30				164	
5,5																									1	20	80	50				151	
6																									2	20	79	49				150	
6,5																									1	25	62	52				140	
7																										17	61	56	1			135	
7,5																									1	7	49	72	1			130	
8																										9	36	79	2			126	
8,5																									1	15	52	105	4			177	
9																										25	34	127	7			193	
9,5																										24	46	128	12			210	
10																										26	104	157	24			311	
10,5																										6	318	1916	696	8		2944	
11																											7	74	28			109	
11,5																																2	
16																																	2
32																																	2
64																																	2
Gesamtergebnis	3593	3600	231	263	338	356	402	439	498	550	551	679	1102	2436	4101	4542	5283	5994	6532	7129	7572	7213	6775	5451	4994	3492	3993	1130	37	89276			

Tabelle mit der Anzahl der Ereignisse differenziert in Leistungsbereiche für Übergabe StW und Druckbereiche für den Druck der Dampftrommel im Januar 2024

Anzahl an Ereignissen von Übergabe StW – Jan 2024		Druck Dampftrommel - Unterteilung [bar]																				Gesamtergebnis								
		7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5		17	17,5	18	18,5	19	19,5	20	20,5
ELO Z. 8 / Füllstand kl. 60 %	24	36	19	20	78	41	31	31	42	47	86	74	100	395	982	853	834	977	1028	1121	1116	1314	1518	1744	1671	1318	2127	540	9	18176
0,5	24	36	19	20	78	41	31	31	42	47	86	74	100	395	982	853	830	831	706	624	469	274	112	45	36	27	45	51	6909	
1																	2	11	18	55	137	120	107	87	64	41	74	8	1	725
1,5																		71	192	250	302	123	103	76	50	40	45	7	2	1261
2																2	64	111	190	193	209	88	71	65	37	32	4	1	1067	
2,5																	1		9	87	43	60	55	31	31	6	2	325		
3																		1	2	77	52	49	43	30	36	6	296			
3,5																		1	1	58	63	54	52	30	26	3	288			
4																				49	47	52	68	29	30	2	1	278		
4,5																				1	42	52	51	57	43	39	285			
5																					32	40	50	60	20	27	3	232		
5,5																				1	25	53	42	31	17	7	1	177		
6																			1	27	49	41	29	17	12	176				
6,5																				20	55	46	50	19	10	1	201			
7																				22	54	54	48	29	8	216				
7,5																				28	73	44	36	22	11	214				
8																				22	88	61	51	27	8	1	258			
8,5																				22	75	55	44	25	28	1	250			
9																				16	59	57	25	30	23	3	213			
9,5																				13	40	40	25	31	20	3	172			
10																				13	45	68	37	42	37	9	1	252		
10,5																				29	174	485	561	578	1350	364	3541			
11																				5	46	156	179	140	207	65	798			
11,5																				1					2	7	10	1	21	
12																								3	6	8	17			
12,5																										3	1	4		

Tabelle mit der Summe der Energiemengen von Übergabe StW [MWh] differenziert in Leistungsbereiche für Übergabe StW und Druckbereiche für den Druck der Dampftrommel im Januar 2022

	Summe Übergabe StW [MWh] - Jan 2022															Druck Dampftrommel - Unterteilung [bar]										Gesamtergebnis								
	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5	17	17,5	18	18,5	19		19,5	20	20,5	21	21,5			
Füllstand kleiner 60 %	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	1,60	3,78	6,62	10,40	11,07	14,00	15,32	20,16	131,41	277,52	4,12	1,85	0,83	498,68			
ELO Z.8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	1,60	3,78	6,62	10,40	11,07	14,00	15,32	20,16	131,41	277,52	4,12	1,85	0,83	498,68			
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
0,5																	0,00	0,00	0,02	0,11	0,20	0,17	0,12	0,17	0,14	0,14	0,02	0,00			0,00			
1																	0,01	0,01	0,04	0,10	0,28	0,21	0,24	0,25	0,26	0,36	0,14	0,01	0,01		0,01			
1,5																		0,06	0,11	0,58	1,25	1,31	1,99	2,05	2,48	2,44	0,32				0,01			
2																		0,71	2,10	3,07	4,85	5,18	6,14	7,57	6,70	5,02	0,37					0,01		
2,5																		0,77	1,33	2,45	3,40	3,90	5,19	5,04	5,56	6,75	0,60	0,03			0,02			
3																		0,05	0,15	0,31	0,39	0,31	0,33	0,22	0,60	5,32	0,65	0,02						
3,5																			0,03		0,03			0,03	0,30	3,53	0,62							
4																								0,35	4,04	0,93	0,06							
4,5																								0,21	3,35	1,21	0,07					0,04		
5																								0,48	3,59	1,28								
5,5																								0,34	2,46	1,59								
6																								0,48	3,20	1,57	0,15							
6,5																								0,57	3,69	2,42								
7																								1,01	3,74	2,38								
7,5																								0,54	4,34	3,02	0,06					0,06		
8																								0,06	4,20	4,26								
8,5																								0,07	4,55	5,23						0,14		
9																									4,82	6,65	0,15						0,07	
9,5																								4,48	11,28	0,47	0,15	0,23					0,16	
10																								13,64	40,56	1,31	0,57						0,16	
10,5																								47,30	187,63	1,79	1,11	0,08					0,08	
11																								0,35	4,42								0,08	
11,5																									0,28									0,28
12																									0,10	0,10								0,19
Gesamtergebnis	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	1,60	3,78	6,62	10,40	11,07	14,00	15,32	20,16	131,41	277,52	4,12	1,85	0,83	498,68			

Tabelle mit der Summe der Energiemengen von Übergabe StW [MWh] differenziert in Leistungsbereiche für Übergabe StW und Druckbereiche für den Druck der Dampftrommel im Januar 2023

	Summe von Übergabe StW [MWh] – Jan 2023																					Gesamtergebnis										
	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5	17		17,5	18	18,5	19	19,5	20	20,5	21		
Füllstand kleiner 60 %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,046	4,43	11,47	18,62	25,60	32,28	37,62	37,49	54,54	99,19	233,80	66,60	0,69	622,39		
ELO Z. 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,046	4,43	11,47	18,62	25,60	32,28	37,62	37,49	54,54	99,19	233,80	66,60	0,69	622,39		
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
0,5																	0,02	0,01	0,07	0,57	0,70	0,45	0,10	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01			1,98	
1																	0,01	0,05	0,06	0,42	0,73	0,82	0,56	0,20	0,05	0,02	0,01				2,94	
1,5																	0,02	0,15	0,14	0,23	0,64	0,83	0,86	0,95	0,45	0,03	0,04	0,02			4,38	
2																		1,10	3,34	5,37	6,94	8,63	8,98	9,14	8,27	1,03	0,03	0,01			52,82	
2,5																		2,85	7,47	11,33	15,43	20,02	25,49	24,56	26,58	8,72	0,07	0,06			142,59	
3																		0,20	0,30	0,52	0,85	1,13	1,27	1,40	2,13	6,20	0,04	0,02			14,07	
3,5																		0,06	0,08	0,16	0,16	0,27	0,35	0,35	1,55	4,96	0,22				8,17	
4																		0,03		0,03	0,15	0,07		0,37	1,44	4,68	0,79	0,06			7,63	
4,5																					0,07				0,11	0,74	4,17	0,72	0,03			5,84
5																									0,04	0,95	4,47	1,16				6,62
5,5																									0,05	0,83	3,28	2,28				6,44
6																									0,10	0,95	3,83	2,26				7,14
6,5																									0,05	1,30	3,22	2,70				7,27
7																										0,96	3,36	3,20	0,05			7,58
7,5																									0,06	0,42	2,96	4,43	0,06			7,94
8																										0,72	2,39	5,10	0,13			8,33
8,5																									0,07	0,89	3,51	7,14	0,27			11,89
9																										1,83	2,48	9,43	0,51			14,26
9,5																										1,85	3,56	10,07	0,93			16,41
10																										2,11	8,74	12,64	1,96			25,45
10,5																										0,50	26,93	165,79	60,60	0,69		254,51
11																											0,62	5,47	1,85			7,94
11,5																												0,19				0,19
Gesamtergebnis	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,046	4,43	11,47	18,62	25,60	32,28	37,62	37,49	54,54	99,19	233,80	66,60	0,69	622,39		

Tabelle mit der Summe der Energiemengen von Übergabe StW [MWh] differenziert in Leistungsbereiche für Übergabe StW und Druckbereiche für den Druck der Dampftrommel im Januar 2024

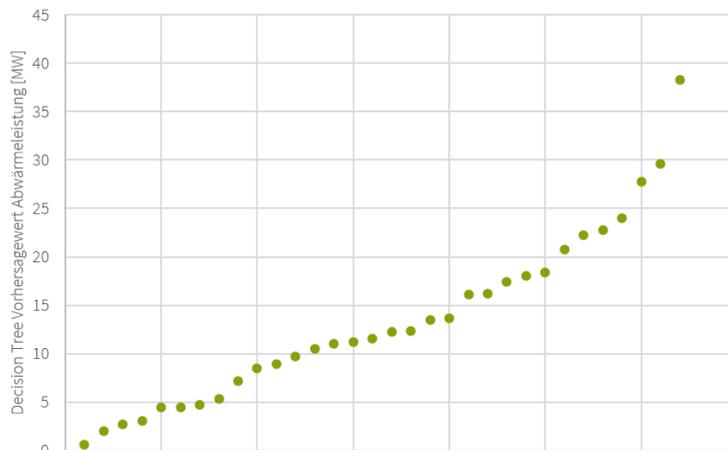
Summe von Übergabe StW [MWh] – Jan 2024		Druck Dampftrommel - Unterteilung [bar]																				Gesamtergebnis									
		7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5		17	17,5	18	18,5	19	19,5	20	20,5	21
Füllstand kleiner 60 %		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	1,75	3,84	5,89	7,40	30,07	67,70	99,48	99,82	86,97	154,71	39,38	0,25	597,30
ELO Z. 8		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	1,75	3,84	5,89	7,40	30,07	67,70	99,48	99,82	86,97	154,71	39,38	0,25	597,30
0		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5																		0,01	0,00	0,01	0,09	0,20	0,22	0,15	0,06	0,01	0,02	0,02	0,00		0,81
1																		0,01	0,07	0,12	0,36	0,89	0,77	0,71	0,54	0,42	0,28	0,48	0,07	0,01	4,74
1,5																		0,01	0,90	2,46	3,08	3,51	1,42	1,09	0,83	0,52	0,40	0,51	0,05	0,02	14,81
2																		0,01	0,78	1,24	2,31	2,42	2,91	1,23	1,01	0,94	0,57	0,43	0,06	0,02	13,92
2,5																						0,17	1,58	0,83	1,13	1,02	0,59	0,61	0,14	0,04	6,11
3																					0,02	0,04	1,78	1,20	1,11	1,04	0,67	0,80	0,11		6,77
3,5																				0,03	0,03	1,57	1,69	1,46	1,45	0,81	0,72	0,08		7,84	
4																							1,58	1,43	1,60	2,04	0,94	0,91	0,07	0,03	8,61
4,5																					0,03	1,46	1,92	1,92	2,06	1,52	1,42			10,34	
5																						1,28	1,55	1,86	2,32	0,75	1,01		0,12	8,89	
5,5																					0,04	1,11	2,29	1,89	1,37	0,75	0,31	0,04		7,80	
6																					0,05	1,25	2,42	1,98	1,39	0,82	0,58			8,50	
6,5																						1,10	2,79	2,40	2,66	0,99	0,52	0,05		10,51	
7																						1,18	3,05	3,09	2,65	1,63	0,46		0,06	12,11	
7,5																						1,75	4,46	2,55	2,30	1,33	0,67			13,07	
8																						1,35	5,84	4,00	3,23	1,75	0,58	0,06		16,82	
8,5																						1,51	5,01	3,78	3,12	1,72	1,94	0,07		17,15	
9																						1,17	4,24	4,23	1,67	2,19	1,61	0,22		15,32	
9,5																						1,07	3,08	3,16	1,94	2,40	1,55	0,23		13,43	
10																						0,98	3,74	5,45	3,01	3,59	3,20	0,73	0,08	20,78	
10,5																						2,48	15,18	43,11	49,52	50,89	117,44	31,59		310,20	
11																						0,45	3,80	12,29	14,67	11,14	16,92	5,48		64,75	
11,5																						0,09				0,19	0,75	1,04	0,09	2,15	
12																									0,30	0,49	0,79			1,57	
12,5																											0,20	0,10		0,30	
Gesamtergebnis		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	1,75	3,84	5,89	7,40	30,07	67,70	99,48	99,82	86,97	154,71	39,38	0,25	597,30

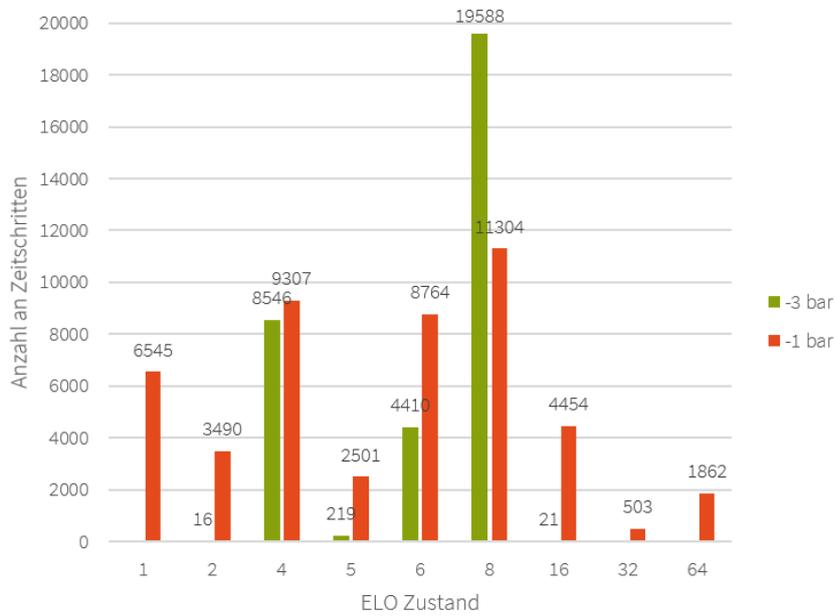
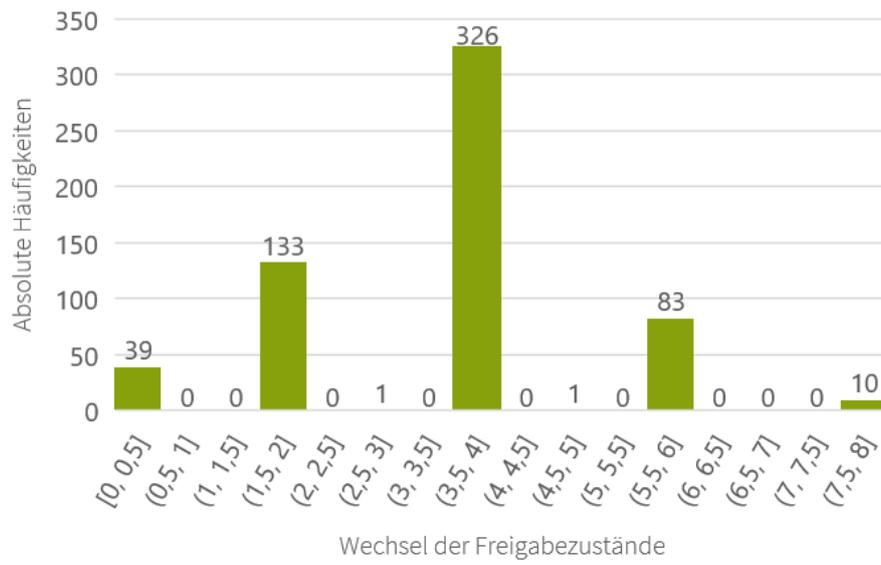
A.3 Decision Tree (Tiefe = 5)

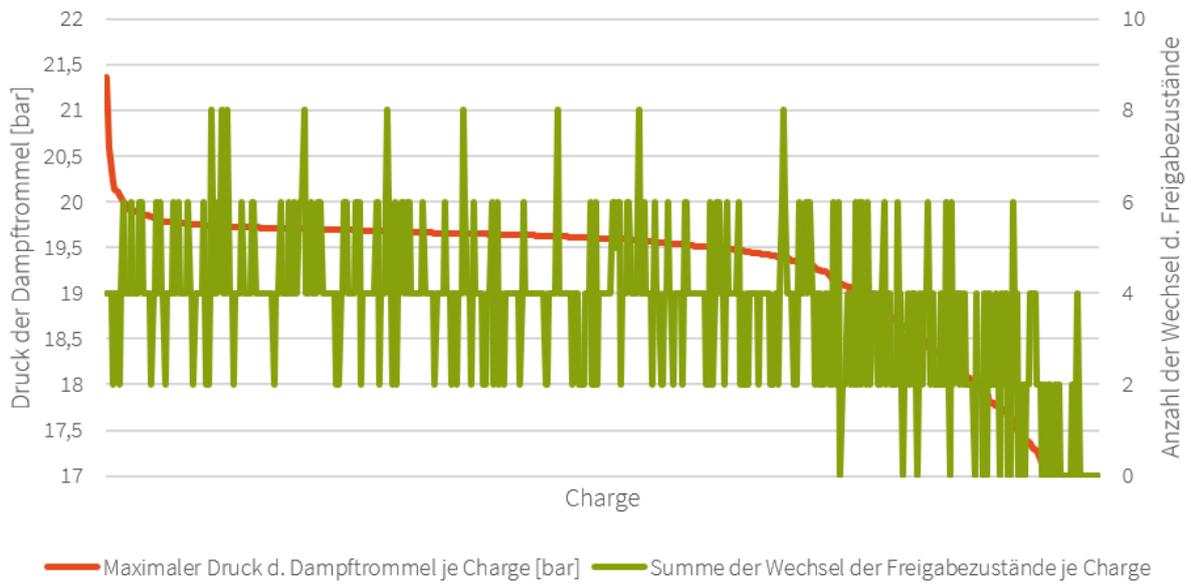
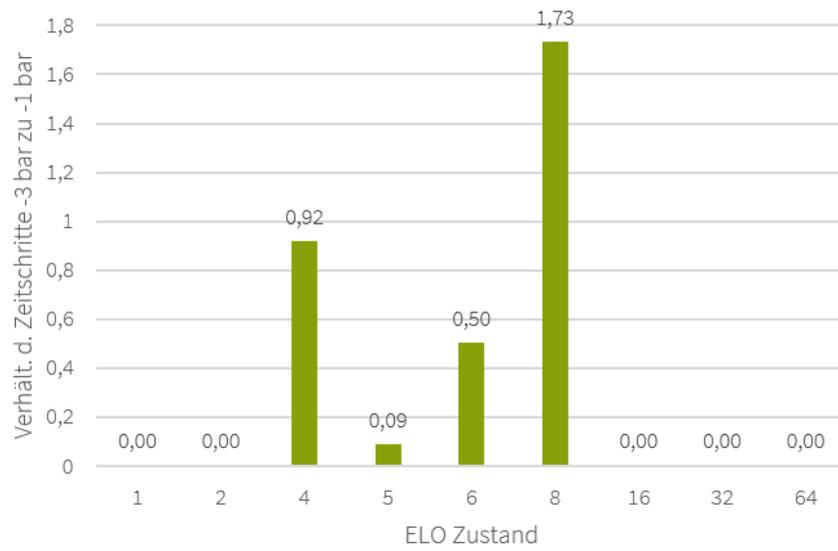
Tabelle mit Eingangsparametern

Nr.	Parameter	Anmerkungen
1	ELO_Power_On [MW]	-
2	KumSum_Zeitintervall_pro_Charge [min]	<p>Die Abkürzung <i>KumSum</i> bedeutet „Kumulierte Summe“ und besitzen die Einheit Minuten.</p> <p>Der Start einer Chargen orientiert sich an den GMH Daten und ist auf die Sekunde genau dokumentiert (Original) . Alle Parameter, wie z.B. ELO Power On [MW], liegen jedoch in 30 Sekundenschritten vor. Der Start der Charge wurde daher auf 30 Sekundenschritte gerundet (Gerundet). Beispiele:</p> <p>Original: 2024-06-24 10:00:14 -> Gerundet: 2024-06-24 10:00:00 Original: 2024-06-24 10:00:15 -> Gerundet: 2024-06-24 10:00:00 Original: 2024-06-24 10:00:16 -> Gerundet: 2024-06-24 10:00:30 Original: 2024-06-24 10:00:44 -> Gerundet: 2024-06-24 10:00:30 Original: 2024-06-24 10:01:45 -> Gerundet: 2024-06-24 10:02:00 Original: 2024-06-24 10:01:46 -> Gerundet: 2024-06-24 10:02:00</p> <p>Es wurde "abgerundet" bei den Sekunden 1-15 bzw. 31-44 und "aufgerundet" bei Sekunden 16-29 bzw. 45-59.</p>
3	KumSum_Zeitintervall_pro_ELO_Zustand [min]	Mit jedem Wechsel vom ELO-Zustand beginnt eine neue Kumulation der Energiewerte.
4	KumSum_Energie_pro_Charge [MWh]	Die Energie-Werte ergeben sich durch folgende Umrechnung: Energie [MWh] = ELO Power On [MW] /120. Weitere Anmerkungen zum Start der Charge finden sich beim Parameter „KumSum_Zeitintervall_pro_Charge [min]“
5	KumSum_Energie_pro_ELO_Zustand [MWh]	Mit jedem Wechsel vom ELO-Zustand beginnt eine neue Kumulation der Energiewerte. Die Energie-Werte ergeben sich durch folgende Umrechnung: Energie [MWh] = ELO Power On [MW] /120.
6	ELO-Zustand 2	Die ELO-Zustände werden innerhalb Decision Tree Entscheidungslogik als einzelne Parameter angesehen. Jeder ELO-Zustand kann den Wert 1 oder 0 annehmen.
7	ELO-Zustand 8	
8	AHK-Erzeugung [MW] (letzter Wert)	Letzter bekannter Wert der Abwärmeleistung.

Abbildung zur Beschreibung und Auswertung innerhalb des finalen Konzeptes







A.4 Decision Tree Entscheidungslogik (Tiefe = 5)

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4	Ebene 5	Ausgabe
Wenn ELO Power On <= 51,32	Wenn ELO Power On <= 0,89	Wenn KumSum Zeit p. Charge <= 36,25	Wenn KumSum Zeit p. Charge <= 3,75	Wenn ELO Z <= 0,5	2,68
		Andernfalls	Andernfalls	Andernfalls	5,84
			Wenn AHK Erzeugung <= 2,48	Wenn KumSum Zeit pro ELO Zustand <= 3,25	8,87
			Andernfalls	Andernfalls	4,44
				Wenn AHK Erzeugung <= 1,12	0,58
				Andernfalls	1,99
				Wenn AHK Erzeugung <= 5,54	2,99
				Andernfalls	4,06
		Wenn KumSum Zeit p. Charge <= 48,75	Wenn AHK Erzeugung <= 20,11	Wenn KumSum Zeit p. Charge <= 13,75	13,84
		Andernfalls	Andernfalls	Wenn ELO Z <= 0,5	10,99
				Andernfalls	22,8
			Wenn AHK Erzeugung aktuelles <= 17,31	Wenn ELO Z <= 0,5	4,71
			Andernfalls	Andernfalls	7,17
				Wenn KumSum Energie p. Charge <= 57,11	16,1
			Andernfalls	Andernfalls	9,74
	Wenn AHK Erzeugung <= 22,09	Wenn KumSum Zeit pro ELO Zustand <= 12,25	Wenn AHK Erzeugung <= 12,42	Wenn AHK Erzeugung <= 5,29	12,72
		Andernfalls	Andernfalls	Wenn ELO Z <= 0,5	18,56
				Andernfalls	22,22
			Wenn AHK Erzeugung <= 19,16	Wenn KumSum Energie p. ELO Z <= 29,68	11,52
			Andernfalls	Andernfalls	8,45
				Wenn KumSum Zeit p. Charge <= 31,75	11,19
			Andernfalls	Andernfalls	17,41
		Wenn KumSum Energie p. ELO Z <= 24,94	Wenn KumSum Energie p. Charge <= 23,54	Wenn KumSum Energie p. ELO Z <= 13,64	24,02
		Andernfalls	Andernfalls	Andernfalls	12,54
				Wenn AHK Erzeugung <= 34,28	18,79
			Andernfalls	Andernfalls	36,39
				Wenn KumSum Energie p. Charge <= 56,41	18,06
			Andernfalls	Andernfalls	13,47
				Wenn KumSum Energie p. Charge <= 56,6	27,77
			Andernfalls	Andernfalls	20,76

A.5 Decision Tree (Tiefe = 6) - Logik als Python Programmiercode

Hinweis: Zahlen in englischer Notation

```
def decision_tree_logic(ELO_Zustand_1, ELO_Zustand_2, ELO_Zustand_4, ELO_Zustand_5, ELO_Zustand_6, ELO_Zustand_8, ELO_Power_On, KumSum_Energie_pro_Charge, KumSum_Energie_pro_ELO_Zustand, KumSum_Zeitintervall_pro_Charge, KumSum_Zeitintervall_pro_ELO_Zustand, AHK_Erzeugung_vorvorletzter_Wert, AHK_Erzeugung_vorletzter_Wert, AHK_Erzeugung_letzter_Wert):
```

```
    if ELO_Power_On <= 51.3150:
        if ELO_Power_On <= 0.8910:
            if KumSum_Zeitintervall_pro_Charge <= 36.2500:
                if KumSum_Zeitintervall_pro_Charge <= 3.7500:
                    if ELO_Zustand_2 <= 0.5000:
                        if AHK_Erzeugung_vorvorletzter_Wert <= 6.1543:
                            return 2.4629
                        else:
                            return 3.2945
                    else:
                        if KumSum_Zeitintervall_pro_ELO_Zustand <= 0.7500:
                            return 4.5235
                        else:
                            return 7.3261
                else:
                    if KumSum_Zeitintervall_pro_ELO_Zustand <= 3.2500:
                        if ELO_Zustand_1 <= 0.5000:
                            return 9.3930
```

```

else:
    return 2.7048
else:
    if KumSum_Energie_pro_ELO_Zustand <= 5.3405:
        return 3.3142
    else:
        return 7.2417
else:
    if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 2.4760:
        if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 1.1229:
            if KumSum_Energie_pro_ELO_Zustand <= 12.4812:
                return 0.5025
            else:
                return 2.1429
        else:
            if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 2.1542:
                return 1.7372
            else:
                return 2.2433
    else:
        if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 5.5440:
            if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 3.9356:
                return 2.8101
            else:
                return 3.5368
        else:
            if KumSum_Energie_pro_Charge <= 56.9492:
                return 5.5924
            else:
                return 4.1816
else:
    if KumSum_Zeitintervall_pro_Charge <= 48.7500:
        if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 20.1055:
            if KumSum_Zeitintervall_pro_Charge <= 13.7500:
                if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 2.8478:
                    return 11.8318
                else:
                    return 15.3597
            else:
                if ELO_Zustand_5 <= 0.5000:
                    return 11.0621
                else:
                    return 8.5304
        else:
            if ELO_Zustand_8 <= 0.5000:
                if KumSum_Energie_pro_Charge <= 15.3092:
                    return 16.7448
                else:
                    return 8.4297
            else:
                if KumSum_Energie_pro_Charge <= 48.9461:
                    return 30.7888
                else:
                    return 16.7774
    else:
        if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 17.3124:
            if ELO_Zustand_8 <= 0.5000:
                if KumSum_Zeitintervall_pro_Charge <= 50.2500:
                    return 10.8862
                else:
                    return 4.4750
            else:
                if KumSum_Energie_pro_ELO_Zustand <= 26.9266:
                    return 11.4776
                else:
                    return 6.2558
        else:
            if KumSum_Energie_pro_Charge <= 57.1120:
                if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 29.7259:
                    return 13.8928
                else:
                    return 28.3281
            else:
                if KumSum_Zeitintervall_pro_Charge <= 91.0000:
                    return 9.0262
                else:

```

```

        return 15.3841
else:
    if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 22.0925:
        if KumSum_Zeitintervall_pro_ELO_Zustand <= 12.2500:
            if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 12.4197:
                if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 5.2925:
                    if KumSum_Zeitintervall_pro_Charge <= 18.2500:
                        return 15.1378
                    else:
                        return 9.8584
                else:
                    if ELO_Zustand_6 <= 0.5000:
                        return 17.9136
                    else:
                        return 14.1773
            else:
                if ELO_Zustand_8 <= 0.5000:
                    if KumSum_Energie_pro_Charge <= 11.6891:
                        return 20.3436
                    else:
                        return 16.8579
                else:
                    if AHK_Erzeugung_vorletzter_Wert <= 21.6783:
                        return 21.8371
                    else:
                        return 24.7576
        else:
            if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 19.1637:
                if KumSum_Energie_pro_ELO_Zustand <= 29.6816:
                    if ELO_Zustand_4 <= 0.5000:
                        return 13.2714
                    else:
                        return 9.5471
                else:
                    if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 8.0211:
                        return 5.6237
                    else:
                        return 8.7691
            else:
                if KumSum_Zeitintervall_pro_Charge <= 31.7500:
                    if KumSum_Energie_pro_Charge <= 26.4077:
                        return 11.0547
                    else:
                        return 37.9703
                else:
                    if KumSum_Energie_pro_ELO_Zustand <= 24.8253:
                        return 20.1438
                    else:
                        return 14.3760
    else:
        if KumSum_Energie_pro_ELO_Zustand <= 24.9406:
            if KumSum_Energie_pro_Charge <= 23.5433:
                if KumSum_Energie_pro_ELO_Zustand <= 13.6408:
                    if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 36.1974:
                        return 23.1991
                    else:
                        return 34.8335
                else:
                    if KumSum_Energie_pro_ELO_Zustand <= 16.5135:
                        return 14.7079
                    else:
                        return 10.0371
            else:
                if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 34.2832:
                    if KumSum_Energie_pro_ELO_Zustand <= 21.0763:
                        return 31.2858
                    else:
                        return 22.9393
                else:
                    if KumSum_Energie_pro_ELO_Zustand <= 21.4035:
                        return 40.5537
                    else:
                        return 33.7226
        else:
            if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 36.1589:
                if KumSum_Energie_pro_Charge <= 56.4083:

```

```

if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 29.4205:
    return 15.9182
else:
    return 21.3542
else:
if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 28.7288:
    return 12.2316
else:
    return 15.5063
else:
if KumSum_Energie_pro_Charge <= 56.5964:
if AHK_Erzeugung_letzter_Wert <= 52.2080:
    return 26.2720
else:
    return 38.5825
else:
if AHK_Erzeugung_vorvorletzter_Wert <= 51.8357:
    return 19.6668
else:
    return 27.6634
    
```

A.6 Vorhersagegüten für die Entscheidungsbäume mit der Tiefe 5, 6, 7 und 8 für die ersten 5 min (Testdaten)

