

Gerald Duckstein

Entwicklung und Implementierung einer Regelung
für ein virtuelles Kraftwerk aus
Blockheizkraftwerken

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Renz
Zweitgutachter : Prof. Dr.-Ing. Holger Kapels

Abgegeben am 02. Februar 2015

Gerald Duckstein

Thema der Bachelorthesis

Entwicklung und Implementierung einer Regelung für ein virtuelles Kraftwerk aus Blockheizkraftwerken

Stichworte

Virtuelles Kraftwerk, Blockheizkraftwerk, Fahrplan, Day-Ahead-Handel, Kaskadenregelung, Pufferspeicher, Java, Jadex, Multiagentensystem

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit stellt einen Regelungsalgorithmus vor, der die Fahrplaneinhaltung eines virtuellen Kraftwerkes aus Blockheizkraftwerken für den Day-Ahead-Handel gewährleistet. Die Regelung wird in Java implementiert. Die Simulation des Virtuellen Kraftwerkes soll auf einem Multiagentensystem laufen.

Gerald Duckstein

Title of the paper

Development and implementation of a control for a virtual power plant from cogeneration units

Keywords

Virtual power plant, cogeneration unit, time table, day-ahead market, cascade control, puffer storage, Java, Jadex, multi-agent system

Abstract

This paper presents a control algorithm that ensures the compliance schedule of a virtual power plant from cogeneration for the day-ahead market. The control is implemented in Java. The simulation of the virtual power plant will run on a multi-agent system.

Danksagung

Viele Menschen haben mich bei dieser Bachelorthesis unterstützt.

Ich bedanke mich

- bei meinen Prüfern Herrn Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Renz und Herrn Prof. Dr.-Ing. Holger Kapels. Sie hatten immer ein offenes Ohr und Zeit für mich!
- beim C4DSI, insbesondere bei Petrit und Peter, die mich super betreut und mir hilfreiche Anregungen gegeben haben, danke dafür! Danke auch für dieses interessante Thema!
- bei Matthias und Johannes, die mir inhaltlich mit ihrem Fachwissen immer wieder weiterhelfen konnten
- bei Hans, für die Motivation und Gelassenheit
- bei meinen Freunden Birga, Akim, Konrad und Sven – die Korrektur gelesen haben, auch wenn sie selber mit ihrem eigenen Studium mehr als genug zu tun haben sowie auch für die netten und lustigen Abende, die mir geholfen haben den Kopf frei zu bekommen!
- bei meiner Familie, die mir stets den Rücken frei gehalten hat
- und bei allen anderen Menschen, die ich an dieser Stelle vergessen habe zu erwähnen und mir auf verschiedener Weise geholfen haben.

Inhalt

| | |
|---|----|
| Tabellenverzeichnis | 7 |
| Abbildungsverzeichnis | 8 |
| 1 Einleitung | 12 |
| 1.1 Motivation | 12 |
| 1.2 Problemstellung | 13 |
| 1.3 Aufbau der Arbeit | 15 |
| 2 Grundlagen: Energiewirtschaft und Stand der Technik | 16 |
| 2.1 Marktteilnehmer | 16 |
| 2.2 Energievermarktung | 17 |
| 2.3 Verpflichtung zur Fahrplaneinhaltung und zum Bilanzkreisausgleich | 18 |
| 2.4 Blockheizkraftwerk | 20 |
| 2.5 Schichtenspeicher | 22 |
| 2.6 Spitzenlastkessel | 23 |
| 2.7 Virtuelles Kraftwerk | 23 |
| 2.7.1 SchwarmEnergie | 24 |
| 2.7.2 Next Kraftwerke GmbH | 24 |
| 2.8 Bereits vorhandene Lösungsansätze | 25 |
| 2.9 Begriffsdefinition in der Arbeit | 25 |
| 2.9.1 Dispatch, Re-Dispatch, Fahrplan und Interner Re-Dispatch | 25 |
| 2.9.2 Fahrplantreue | 26 |
| 2.9.3 Ist-Leistung und Fahrplanleistung des VK | 26 |
| 2.9.4 Systemzustand | 26 |
| 2.9.5 Last | 26 |
| 2.9.6 Liegenschaft | 26 |
| 3 Anforderungen | 28 |
| 3.1 Zusätzliche Anforderungen an die Regelung | 28 |
| 3.2 Fahrplaneinhaltung | 28 |
| 3.3 Deckung der Wärmelast | 29 |
| 3.4 Szenarien | 29 |
| 4 Technische Analyse | 30 |
| 4.1 Beschreibung des Gesamtsystems | 30 |
| 4.2 Die Liegenschaft als Simulinkmodell | 33 |
| 4.3 Systemidentifikation von BHKW und SLK | 39 |
| 4.3.1 Analyse des regelungstechnischen Verhaltens des BHKW | 40 |
| 4.3.2 Analyse des regelungstechnischen Verhaltens des SLK | 47 |
| 4.4 Systemidentifikation des Schichtenspeichers | 48 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.4.1 | Sprungantwort mit Beladung durch BHKW | 49 |
| 4.4.2 | Sprungantwort mit Veränderung der thermischen Last..... | 54 |
| 4.5 | Berechnung des Füllstandes | 55 |
| 4.6 | Harte Regelung der Liegenschaft..... | 56 |
| 4.7 | Zusammenfassung der Technischen Analyse | 57 |
| 5 | Entwurf..... | 59 |
| 5.1 | Problemanalyse..... | 59 |
| 5.2 | Interne Re-Dispatch-Maßnahmen | 60 |
| 5.3 | Kaskadenregelung..... | 62 |
| 5.4 | Regelalgorithmen des Agenten | 63 |
| 5.5 | Weitere Optionale Lösungsmöglichkeiten für den Agenten | 65 |
| 5.5.1 | Keine Regelung | 65 |
| 5.5.2 | Ständige Regelung auf den Soll-Füllstand..... | 66 |
| 5.6 | Regelalgorithmen des Dispatchers..... | 66 |
| 5.6.1 | Schaltpotentialanalyse | 67 |
| 5.6.2 | Interne Regelleistung berechnen | 75 |
| 5.6.3 | Zusatzleistung berechnen..... | 78 |
| 5.6.4 | Verteilung der internen Regelleistung auf die Liegenschaften – Stellglied 80 | |
| 5.7 | Weitere Lösungsmöglichkeiten für den Dispatcher..... | 84 |
| 5.7.1 | Alternativer Möglichkeit die Interne Regelleistung zu berechnen..... | 84 |
| 5.7.2 | Alternativer Möglichkeit zur Verteilung der Internen Regelleistung | 85 |
| 6 | Implementierung und Test | 86 |
| 6.1 | Agent..... | 86 |
| 6.2 | Dispatcher | 88 |
| 6.3 | Ist-Last-Generator | 92 |
| 6.3.1 | Prognoselast..... | 92 |
| 6.3.2 | Ist-Last..... | 92 |
| 6.4 | Test-Cases | 93 |
| 6.4.1 | Test-Case 1: Prognose-Last = Ist-Last | 93 |
| 6.4.2 | Test-Case 2: Regelung auf Sollfüllstand..... | 96 |
| 6.4.3 | Test-Case 3: Test des Stellgliedes des Dispatchers..... | 103 |
| 6.4.4 | Test-Case 4: Schaltpotentialanalyse mit einer Liegenschaft..... | 108 |
| 6.4.5 | Test-Case 5: Regelung des Fahrplans bei Ausfall von BHKW-Leistung 118 | |
| 6.4.6 | Test-Case 6: Validierung der Ist-Last als realistischer Verlauf..... | 125 |
| 6.4.7 | Test-Case 7: Finale Validation der Regelung mit VK aus 3 Liegenschaften für 1 Tag..... | 127 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.4.8 | Zusammenfassung der Test-Cases | 134 |
| 7 | Use-Cases und Bewertung | 136 |
| 7.1 | Use-Case 1: Schaltpotentialanalyse | 136 |
| 7.1.1 | Winter, 1 Woche, 40 Liegenschaften | 138 |
| 7.1.2 | Frühling, 1 Woche, 40 Liegenschaften..... | 140 |
| 7.1.3 | Sommer, 1 Woche, 40 Liegenschaften | 142 |
| 7.1.4 | Herbst, 1 Woche, 40 Liegenschaften | 145 |
| 7.1.5 | Fazit | 147 |
| 7.2 | Use-Case 2: Fahrplaneinhaltung | 148 |
| 7.2.1 | Winter | 150 |
| 7.2.2 | Frühling | 153 |
| 7.2.3 | Sommer | 155 |
| 7.2.4 | Herbst | 158 |
| 7.2.5 | Zusammenfassung | 161 |
| 7.3 | Use-Case 3: Steuerung der elektrischen Leistung | 162 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 164 |
| 8.1 | Zusammenfassung | 164 |
| 8.2 | Verbesserung des bestehenden Regelungsalgorithmus | 166 |
| 8.3 | Einsatz des Optimierers für eine rollierende Resttagsplanung | 167 |
| 8.4 | Bewertung der Verbesserungsansätze..... | 168 |
| 9 | Anhang..... | 169 |
| 9.1 | Konfigurationstabelle | 169 |
| 9.2 | Inhalt der des digitalen Datenträgers..... | 169 |
| 10 | Literaturverzeichnis..... | 171 |
| | Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Bachelorarbeit | 174 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 1-1: Bruttostromerzeugung in Deutschland für 2011 bis 2013, Quelle: (1) . | 12 |
| Tabelle 4-1: Ein- und Ausgänge des Simulinkmodells der Liegenschaftn | 34 |
| Tabelle 4-2: Eingänge des Liegenschaftsmodells | 36 |
| Tabelle 4-3: Ausgänge des Simulinkmodells | 38 |
| Tabelle 5-1: Aktionskatalog des Agenten: | 65 |
| Tabelle 5-2: Berechnung des limitierenden Abschaltpotentials | 75 |
| Tabelle 6-1: Betrachtung der Ist-Füllstände für Auswahl der Liegenschaften..... | 103 |
| Tabelle 6-2: Einschaltpotential der Liegenschaften | 103 |
| Tabelle 6-3. Betrachtung der Füllstände zur Auswahl der Liegenschaft für Abschaltung von Leistung | 106 |
| Tabelle 6-4: Abschaltpotential der Liegenschaften | 106 |
| Tabelle 6-5: Ergebnisse der Test-Cases | 135 |
| Tabelle 7-1: Kategorien des Schaltpotentials | 136 |
| Tabelle 7-2: Fazit Schaltpotentialanalyse | 147 |
| Tabelle 7-3: Gesamtergebniss von UC 2..... | 161 |
| Tabelle 7-4: Abrufsignale für ein VK aus drei Liegenschaften | 162 |
| Tabelle 9-1: ConfigFileLiegenschaft einer Liegenschaft mit zwei BHKWs..... | 169 |
| Tabelle 9-2: Inhalt des digitalen Datenträgers | 170 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1-1: Parallelbetrieb von BHKW, Pufferspeicher und SLK, Quelle: (6)..... | 13 |
| Abbildung 1-2: Ein- und Ausschalthandlung eines BHKW..... | 14 |
| Abbildung 2-1: Regelzonen in Deutschland, Quelle: (11)..... | 16 |
| Abbildung 2-2: Stromvertriebswege, Quelle: (2 S. 47)..... | 17 |
| Abbildung 2-3: Abweichung von prognostizierter elektrischer Last zu tatsächlicher, Quelle: (15)..... | 18 |
| Abbildung 2-4: Ungleichgewicht von Erzeugung und Verbrauch von elektrischer Energie, Quelle: (17)..... | 19 |
| Abbildung 2-5: Jahreslinie der Wärmelast mit Einsatz von BHKW-Modulen, Quelle: (12 S. 401)..... | 21 |
| Abbildung 2-6: Ist-Leistung eines BHKW nach Sollwertvorgabe, Quelle: (21)..... | 22 |
| Abbildung 2-7: Schichtenspeicher mit idealisierter Temperaturschichtung, Quelle: (22)..... | 23 |
| Abbildung 2-8: Heizkessel Logano plus SB745 mit 800 kW, Quelle: (23)..... | 23 |
| Abbildung 2-9: SchwarmDirigent von Lichtblick SE, Quelle: (24)..... | 24 |
| Abbildung 4-1: Gesamtsystem zur Simulation des virtuellen Kraftwerkes..... | 30 |
| Abbildung 4-2: Ausgabe des Exportskripts für ein VK aus 2 Liegenschaften..... | 31 |
| Abbildung 4-3: Programmcode um Liegenschafts-Objekt in Java aus XML- und DLL-Dateien zu generieren..... | 32 |
| Abbildung 4-4: Fahrplan für eine Liegenschaft und für 2 Tage des Optimierers als Matlab-Struct..... | 32 |
| Abbildung 4-5: Koordinierende und interagierende Agenten, Quelle: (35)..... | 33 |
| Abbildung 4-6: Gesamtsystem des Liegenschaftsmodells (37 S. 14)..... | 39 |
| Abbildung 4-7: Die Liegenschaft als Regelstrecke..... | 39 |
| Abbildung 4-8: Relevante Parameter aus der Konfigurationstabelle für das BHKW..... | 42 |
| Abbildung 4-9: Aufnahmen der Antwortfunktion bei Aufschalten einer Rampe..... | 43 |
| Abbildung 4-10: Rampenförmige Testfunktion an BHKW..... | 43 |
| Abbildung 4-11: Nichtlineare Kennlinie des BHKW-Übertragungsgliedes..... | 44 |
| Abbildung 4-12: MRT des BHKWs von 15 Minuten..... | 45 |
| Abbildung 4-13: MST des BHKW von 15 Minuten..... | 46 |
| Abbildung 4-14: Übertragungsverhalten des BHKW..... | 46 |
| Abbildung 4-15: Übertragungsverhalten des BHKW-Modell zusätzlich mit Gesamtwirkungsgrad und Tot- / Rampenzeit..... | 47 |
| Abbildung 4-16: Leistungskennlinie des SLK..... | 47 |
| Abbildung 4-17: Übertragungsverhalten des SLK..... | 48 |
| Abbildung 4-18: Regelungstechnische Modell des SLK mit Wirkungsgrad und Tot- oder Rampenzeit..... | 48 |
| Abbildung 4-19: Sprungantwort des Pufferspeichers mit 100 kW und Geraden zur Bestimmung der Zeitonstante T_s | 50 |
| Abbildung 4-20: Sprungantwort bei negativem Sprung von 600 kW..... | 53 |
| Abbildung 4-21: Sprungantwort bei negativen Sprung der Last..... | 54 |
| Abbildung 4-22: Sprungantwort bei positiven Lastsprung..... | 55 |
| Abbildung 4-23: Links: Zwangs-Einschaltung, Rechts: Zwangs- Ausschaltung durch harte Regelung..... | 57 |
| Abbildung 5-1: Eskalation der Störung auf Liegenschaftsebene bis zur Abweichung des Fahrplans..... | 60 |
| Abbildung 5-2: Grundprinzip der Regelung..... | 61 |
| Abbildung 5-3: Kaskadenregelung für das VK..... | 62 |
| Abbildung 5-4: Grundprinzip des Agenten..... | 64 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 5-5: Flussdiagramm für die Schaltpotentialanalyse | 68 |
| Abbildung 5-6: Verlauf der Ist-Last bei Leistungserhöhung eines BHKW ohne Kompensation..... | 69 |
| Abbildung 5-7: Kompensation der Beladung durch gegenteiligen Regeleinriff oder nicht prognostizierte zusätzliche Last | 70 |
| Abbildung 5-8: Zeithorizont von zwei Stunden zum Zeitpunkt t_0 | 70 |
| Abbildung 5-9: Flussdiagramm zur Berechnung Einschaltpotentials nach Kennlinie | 71 |
| Abbildung 5-10: Flussdiagramm zur Berechnung des limitierenden Einschaltpotentials | 72 |
| Abbildung 5-11: Thermisches Abschaltpotential | 73 |
| Abbildung 5-12: Berechnung des elektrischen Abschaltpotentials nach Kennlinie ... | 74 |
| Abbildung 5-13: Flussdiagramm zur Berechnung der Interne Regelleistung | 76 |
| Abbildung 5-14: Linearer Anstieg der Energie, Quelle: (44 S. 50) | 77 |
| Abbildung 5-15: Flussdiagramm zur Berechnung der Zusatzleistung..... | 79 |
| Abbildung 5-16: Flussdiagramm des Stellgliedes FB202 | 80 |
| Abbildung 5-17: Flussdiagramm und schematische Darstellung des Prozesses zur Einschaltung von interner Regelleistung..... | 82 |
| Abbildung 6-1: Implementierung des Agenten..... | 87 |
| Abbildung 6-2: Funktionsschaltbild des Dispatchers | 89 |
| Abbildung 6-3: Prognoselast und beispielhafte Ist-Last..... | 93 |
| Abbildung 6-4: Vorgehensweise bei TC 1..... | 94 |
| Abbildung 6-5: Elektrische BHKW-Leistung des Simulinkmodells und der DLL | 95 |
| Abbildung 6-6: Gemessene Last des Simulinkmodells und der DLL | 95 |
| Abbildung 6-7: Mittlere Speichertemperatur des Simulinkmodells und der Last..... | 96 |
| Abbildung 6-8: Reaktion der Regelung auf einen Sollwertsprung durch Erhöhen und Verringern des Soll-Füllstandes..... | 97 |
| Abbildung 6-9: Ist-Füllstand erreicht Sollwert ohne Überschwingen..... | 98 |
| Abbildung 6-10: Erreichen des unteren Sollwertes ohne Unterschwingen | 99 |
| Abbildung 6-11: Sprungartige Erhöhung und Verringerung der Last | 100 |
| Abbildung 6-12: Reaktion der Regelung auf nicht prognostizierte Lasterhöhung ... | 101 |
| Abbildung 6-13: Reaktion der Regelung auf nicht prognostizierte Lastverringerng | 102 |
| Abbildung 6-14: Speicherfüllstand und Limitierendes elektrische Einschaltpotential der Liegenschaften | 104 |
| Abbildung 6-15: Abruf von zusätzlicher Leistung..... | 105 |
| Abbildung 6-16: Limitierendes Abschaltpotential der Liegenschaften und ihre Füllstände | 107 |
| Abbildung 6-17: Abruf des limitierenden Abschaltpotentials | 108 |
| Abbildung 6-18: Fahrplan zum Validieren der Schaltpotentialanalyse | 109 |
| Abbildung 6-19: Thermisches Schaltpotential für eine Liegenschaft | 110 |
| Abbildung 6-20: Elektrisches Schaltpotential berechnet aus dem thermischen Schaltpotential | 112 |
| Abbildung 6-21: Kennlinienschaltpotential | 114 |
| Abbildung 6-22: Limitierende Schaltpotential..... | 116 |
| Abbildung 6-23: Soll-Summenfahrplan mit Schaltgrenzen..... | 118 |
| Abbildung 6-24.: Leistungsverlauf des VK ohne Störung und mit Dispatcher-Regelung | 119 |
| Abbildung 6-25: Speicherfüllstände der Liegenschaften und Verletzung der oberen Speichergrenze in Liegenschaft 1 | 120 |
| Abbildung 6-26: Verletzung der unteren Toleranzgrenze des Fahrplans ohne Dispatcher-Regelung..... | 121 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 6-27: Keine Verletzung der unteren Toleranzgrenze bei Einsatz der Dispatcher-Regelung..... | 122 |
| Abbildung 6-28: Speicherfüllstand bei zu großer thermischer Last..... | 123 |
| Abbildung 6-29: Ist-Leistung des VK verletzt obere Toleranzgrenze | 124 |
| Abbildung 6-30: Dispatcher-Eingriff zur Reduzierung der Summenleistung des VK125 | |
| Abbildung 6-31: Vergleich der mittleren Ist-Last bei unterschiedlicher Anzahl an Liegenschaften | 126 |
| Abbildung 6-32: Soll- und Ist-Füllstand der Speicher bei ausgeschalteter Regelung sowie thermische Prognose- und Ist-Last..... | 128 |
| Abbildung 6-33: Fahrplan und Ist-Leistung des VK ohne Regelung | 129 |
| Abbildung 6-34: Soll- und Ist-Füllstand der Speicher mit eingeschalteter Regelung | 130 |
| Abbildung 6-35: Ist-Leistung des VK und Grenzverletzungen mit eingeschalteter Regelung | 131 |
| Abbildung 6-36: Histogramm der Fahrplanabweichung bei VK aus drei Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013 | 132 |
| Abbildung 6-37: Vergleich der Toleranzgrenzverletzungen des FP bei VK aus drei Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013 | 133 |
| Abbildung 6-38: Vergleich der benötigten Ausgleichsenergie bei VK aus drei Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013 | 133 |
| Abbildung 6-39: Vergleich der zusätzlichen Schalthandlungen des VK aus drei Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013 | 134 |
| Abbildung 7-1: Schaltpotential in der Winterwoche | 138 |
| Abbildung 7-2: Relatives Einschaltpotential, 1.-7. Januar 2013..... | 139 |
| Abbildung 7-3: Relatives Abschaltpotential, 1.-7. Januar 2013..... | 139 |
| Abbildung 7-4: Schaltpotential in der Frühlings-Woche | 140 |
| Abbildung 7-5: Relatives Einschaltpotential, 18.-24. März 2013..... | 141 |
| Abbildung 7-6: Relatives Abschaltpotential, 18.-24. März, 2013..... | 141 |
| Abbildung 7-7: Schaltpotential in der Sommer-Woche | 142 |
| Abbildung 7-8: Relatives Einschaltpotential, 24.-30. Juni 2013 | 143 |
| Abbildung 7-9: Relatives Abschaltpotential, 24.-30- Juni 2013..... | 144 |
| Abbildung 7-10: Schaltpotential im Herbst..... | 145 |
| Abbildung 7-11: Relatives Einschaltpotential, 23.-29. September 2013 | 146 |
| Abbildung 7-12: Relatives Abschaltpotential, 23.-29. September 2013..... | 146 |
| Abbildung 7-13: Vergleich der Ist-Leistung bei Einsatz des Reglers zum Nicht-Einsatz des Reglers in der Winter-Woche..... | 149 |
| Abbildung 7-14: Histogramm der Fahrplanabweichung bei VK aus 40 Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013 | 150 |
| Abbildung 7-15: Vergleich der Toleranzgrenzverletzungen des Fahrplans bei VK aus 40 Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013 | 150 |
| Abbildung 7-16: Vergleich der benötigten Ausgleichsenergie bei VK aus 40 Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013 | 151 |
| Abbildung 7-17: Vergleich der Schalthandlungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013..... | 152 |
| Abbildung 7-18: Histogramm der Fahrplanabweichung, bei VK aus 40 Liegenschaften, 18.-24. März 2013 | 153 |
| Abbildung 7-19: Vergleich der Toleranzgrenzverletzungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 18.-24. März 2013 | 153 |
| Abbildung 7-20: Vergleich der benötigten Ausgleichsenergie bei VK aus 40 Liegenschaften, 18.-24. März 2013 | 154 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 7-21: Vergleich der Schalthandlungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 18.-24. März 2013..... | 154 |
| Abbildung 7-22: Histogramm der Fahrplanabweichungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 24.-30. Juni 2013..... | 155 |
| Abbildung 7-23: Vergleich der Toleranzgrenzverletzungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 24.-30. Juni 2013..... | 156 |
| Abbildung 7-24: Vergleich der benötigten Ausgleichsenergie bei VK aus 40 Liegenschaften, 24.-30. Juni 2013..... | 156 |
| Abbildung 7-25: Vergleich der Schalthandlungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 24.-30. Juni 2013..... | 157 |
| Abbildung 7-26: Histogramm der Fahrplanabweichungen bei 40 Liegenschaften, 23.-29. September 2013..... | 158 |
| Abbildung 7-27: Vergleich der Toleranzgrenzverletzungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 23.-29. September 2013..... | 159 |
| Abbildung 7-28: Vergleich der benötigten Ausgleichsenergie bei VK aus 40 Liegenschaften, 23.-29. September 2013..... | 159 |
| Abbildung 7-29: Vergleich der Schalthandlungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 23.-29. September 2013..... | 160 |
| Abbildung 7-30: Verbesserung der gemessenen Werte durch Einsatz des Reglers | 161 |
| Abbildung 7-31: Abruf von Zusatzleistung..... | 162 |
| Abbildung 8-1: BHKW ein- oder ausschalten ohne zusätzliche Schalthandlung | 167 |
| Abbildung 8-2: Rollierende Resttagsplanung, Quelle: (20 S. 95)..... | 168 |

1 Einleitung

1.1 Motivation

Im Rahmen der Energiewende verändert sich die Art und Weise wie elektrische Energie in Deutschland produziert wird. Bislang produzieren zentrale Großkraftwerke einen hohen Anteil der elektrischen Jahreserzeugung. Im Jahr 2014 haben Braunkohle-, Steinkohle- und Atomkraftwerke zusammen 60 % der gesamten brutto¹ erzeugten² elektrischen Energie von 610,4 TWh erbracht (1). Jedoch übernehmen immer mehr dezentrale Energieanlagen (DEA) wie Windkraft- oder Solaranlagen diese Aufgabe. So stieg der Anteil an erneuerbarer Energie von 2012 bis 2014 von 22,8 % auf 25,8 % und war damit zuletzt größer als der Anteil der Braunkohle mit 25,6 % (2014).

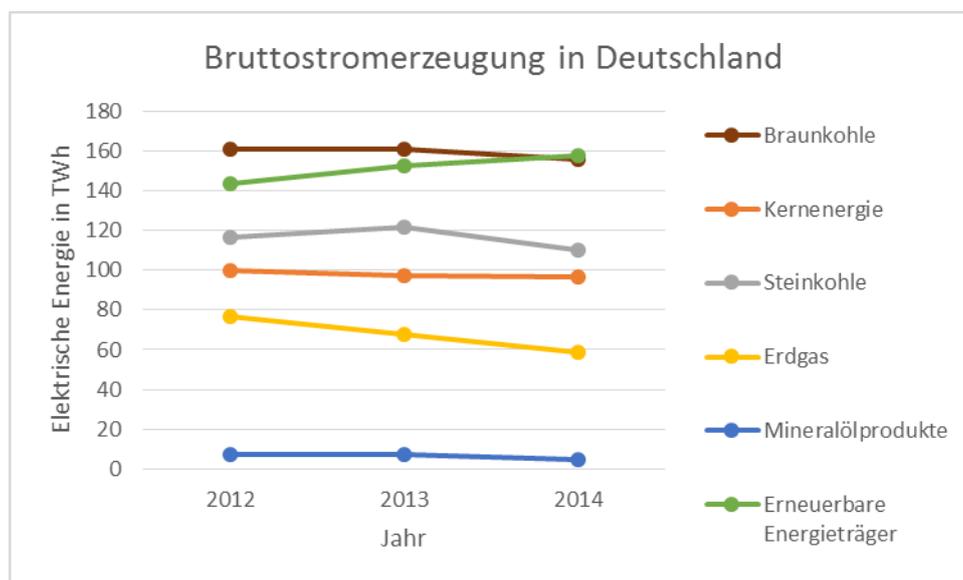


Tabelle 1-1: Bruttostromerzeugung in Deutschland für 2011 bis 2013, Quelle: (1)

DEA können dabei zu einem virtuellen Kraftwerk (VK) zusammengesetzt werden und wirken nach außen wie ein großes einzelnes Kraftwerk. Dadurch wird es möglich, dass DEA als VK gemeinsam elektrische Energie am Spotmarkt anbieten können. Dieser teilt sich auf in den Day-Ahead-Handel für Energielieferung am nächsten Tag und Intraday-Handel für Energielieferungen am selben Tag. (2).

Voraussetzung für den Day-Ahead-Handel ist, dass das VK einem Fahrplan (FP) folgen kann, der am Vortag abgegeben wurde. Ein FP zeigt für jeden Zeitpunkt eines Tages an, welche elektrische Leistung das VK erbringen muss.

Das Center for Demand Side Integration (C4DSI) der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, untersucht im Forschungsprojekt SMART-POWER-HAMBURG (SPH) wie ein Verbund von Liegenschaften über Kraft-Wärme-Kopplung(KWK)-Anlagen Energiedienstleistungen erbringen können (3). Des Weiteren wird untersucht, wie Blockheizkraftwerke (BHKW) betrieben werden können,

¹ Gemessen an den Generatorklemmen

² Energie kann im Sinne des Energieerhaltungsgesetzes nur von einer Energieform in die andere umgewandelt werden. Eine „Erzeugung“ oder „Verbrauch“ ist nicht möglich (56). Dennoch werden zur Vereinfachung innerhalb dieser Bachelorthesis diese Begriffe in Verbindung mit Energie verwendet.

um als VK am Spotmarkt teilzunehmen. Liegenschaften stellen dabei eine räumlich abgegrenzte Einheit aus Abnehmer und Erzeuger von elektrischer und thermischer Energie dar.

Windkraft- und Photovoltaikanlagen können wirtschaftlich nur begrenzt in ihrer Leistung verringert werden. Jede Leistungsminderung unter das technisch mögliche Niveau bedeutet einen Verlust von nutzbarer Energie (4). Allerdings muss das Stromnetz zu jeder Zeit ausgeglichen sein zwischen Erzeugung und Verbrauch. Um nun einen Fahrplan des VKs einhalten zu können, muss das VK seine elektrische Leistung flexibel einstellen können. BHKWs lassen sich in ihrer Leistung modulieren (5) und koppeln somit die Produktion von elektrischer Energie mit der Erzeugung von Wärme, mit der die Liegenschaften versorgt werden.

Dabei kann die Wärmeversorgung durch einen Schichtenspeicher gepuffert werden, sodass die Wärmeerzeugung durch BHKWs zeitlich vom Wärmeverbrauch entkoppelt werden kann. Durch diese Entkopplung kann die Laufzeit der BHKWs in Zeiten verlagert werden, in der höhere Stromgutschriften erzielt werden. Daneben bietet der Pufferspeicher noch weitere Vorteile. Zum Beispiel kann ein taktender Betrieb der BHKW vermieden werden, was zu geringerem Verschleiß führt. Außerdem können kurzzeitige Wärmelastspitzen vom Pufferspeicher gedeckt und ein Spitzenlastkessel (SLK) muss nicht zusätzlich zugeschaltet werden (6). Ein Beispiel für den parallelen Betrieb von BHKW, Pufferspeicher und SLK ist in folgender Abbildung 1-1 zu sehen:

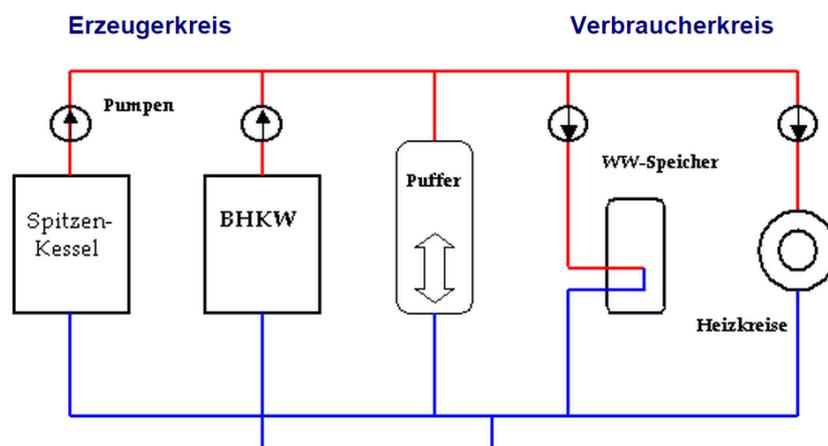


Abbildung 1-1: Parallelbetrieb von BHKW, Pufferspeicher und SLK, Quelle: (6)

Das BHKW und der Spitzenlastkessel sind hier parallel zum Pufferspeicher ins Heizungsnetz eingebunden. Insbesondere bei Neuanlagen mit Brennwertkessel kommt dieses Anlagenschema zum Einsatz.

BHKWs sind gut regelbare Kraftwerke, die schnell auf Schwankungen der Stromeinspeisung durch volatile Kraftwerke und der Nachfrage reagieren können (7). Damit können sie einen wichtigen Beitrag zur Energiewende liefern, in der immer mehr elektrische Energie aus regenerativer Quelle erzeugt wird.

1.2 Problemstellung

Im Rahmen des SPH-Projektes wird der Fahrplan des VK von einem Fahrplanerzeuger (Optimierer) so gestaltet, dass sowohl der Wärmebedarf der Liegenschaften gedeckt als auch die Erzeugung von elektrischer Energie mit möglichst hohen Erlösen am Spotmarkt realisiert wird. Da die Wärmelast der Liegenschaften über den Tag nicht

fehlerfrei prognostiziert werden kann, kommt es dort immer wieder zu Abweichungen. Um die thermischen Abweichungen ausregeln zu können, wird das BHKW bei geringer thermischer Abnahme in seiner Leistung gedrosselt bzw. bei zu hoher thermischer Abnahme in seiner Leistung erhöht.

Das ausregeln des thermischen Bedarfs der Liegenschaften führt dazu, dass der abgegebene Fahrplan des VKs nicht mehr eingehalten werden kann. Um dennoch den Fahrplan einhalten zu können, müssen nun andere BHKWs vom VK zum Aushelfen aktiviert werden. Dieser gezielte Eingriff wird interner Redispatch genannt. Dieser Begriff ist angelehnt an den Begriff „Redispatch“, Maßnahmen zur Netzstabilisierung durch die Übertragungsnetzbetreiber und bedeutet so viel wie Kraftwerkseinsatzplanung (8).

Die internen Redispatch-Maßnahmen³ müssen eine Anzahl an Randbedingungen erfüllen. Zu den technischen zählt die begrenzte Kapazität des Pufferspeichers. Dieser darf nur bis zu einer Füllstandsgrenze beladen und nicht unbegrenzt entladen werden, da zu hohe Temperaturen zu Verkalkung des Speichers führen (9) und durch zu niedrige der Wärmebedarf der Liegenschaft nicht gedeckt wird.

Außerdem müssen die regelungstechnischen Eigenschaften der Anlagen berücksichtigt werden. Eventuell kann die Leistung nur über eine Tot- oder Rampenzeit abgerufen werden.

Neben den technischen gibt es auch betriebswirtschaftliche Randbedingungen, die berücksichtigt werden müssen. Die Anlagenbetreiber der BHKWs des SMART-POWER-HAMBURG-Projektes stellen die Anforderung die Schalthandlungen zu begrenzen, da diese zu höheren Betriebskosten führen.

Schalthandlungen sind Ein- und Ausschalthandlungen. Der Zustandswechsel zwischen ausgeschalteter zu eingeschalteter Anlage wird Einschalthandlung bezeichnet und umgekehrt ist es die Ausschalthandlung. Folgende Abbildung 1-2 stellt eine Einschalthandlung zum Zeitpunkt t_0 und eine Ausschalthandlung zum Zeitpunkt t_1 dar.

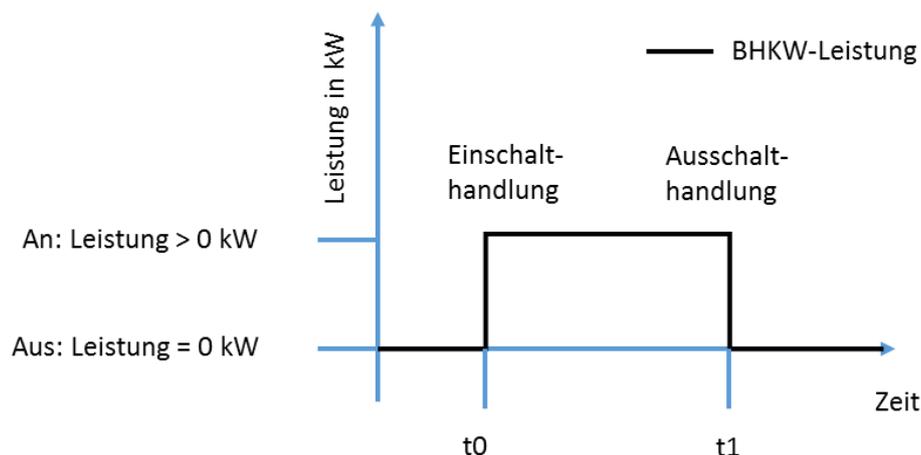


Abbildung 1-2: Ein- und Ausschalthandlung eines BHKW

³ „Interne Redispatch-Maßnahmen“, wird als Begriff im Rahmen dieser Thesis verwendet. In anderen Arbeiten werden diese Maßnahmen auch als Resttagsplanung bezeichnet. Sie dazu Kapitel 2

Um diese Redispatch-Maßnahmen unter Berücksichtigung aller Randbedingungen durchzuführen, ist ein Regler notwendig. Dieser wird im Rahmen dieser Bachelorarbeit entwickelt und implementiert.

Die Bachelorarbeit soll damit folgende Fragen beantworten:

1. Wie kann ein Regelungsalgorithmus aussehen, der die Fahrplaneinhaltung gewährleistet und gleichzeitig die von einer Prognose abweichende Ist-Wärmelast der Liegenschaften deckt?
2. Wie erfüllt dieser Regelungsalgorithmus die betriebswirtschaftliche Anforderung, Schalthandlungen zu minimieren?

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in acht Kapitel unterteilt. Im zweiten Kapitel werden die wichtigsten Grundlagen und Definitionen erklärt die für das Verständnis der Arbeit hilfreich sind.

Anschließend wird im dritten Kapitel auf die Anforderungen der Regelung eingegangen. Diese teilen sich auf in Anforderungen an die Fahrplaneinhaltung, an die Wärmedeckung der Liegenschaften und in weitere Anforderungen.

Im vierten Kapitel der Technischen Analyse wird das bestehende Gesamtsystem aus Liegenschaft und Optimierer für die Fahrplangenerierung und weitere Bausteine eingegangen. Insbesondere die regelungstechnischen Eigenschaften des Liegenschaftsmodells werden hier für den Entwurf der Regelung untersucht.

Im fünften Kapitel findet der Entwurf der Regelung statt. Dabei wird auf die Erkenntnisse der Technischen Analyse zurückgegriffen um die Algorithmen für die Regelung gemäß den Anforderungen zu entwickeln. In Kapitel 5.5 und 5.7 werden alternative Regelalgorithmen beschrieben, die im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr implementiert werden.

Das sechste Kapitel handelt von der Umsetzung der Regelung in Java und der Test-Cases, mit denen die Regelung auf Funktionalität überprüft wird.

Im siebten Kapitel werden Use-Cases behandelt. Mit den Ergebnissen dieser kann anschließend die Regelung bewertet werden.

Das letzte Kapitel fasst die Arbeit zusammen und beschreibt, welchen Mehrwert die Regelung gegenüber dem bisherigen Stand erbracht hat. Im Ausblick wird skizziert, wie die Regelung verbessert werden kann und welche Alternativen zum Regelungskonzept dieser Thesis möglich sind um die Anforderungen an Fahrplantreue⁴ und Wirtschaftlichkeit zu erfüllen. Abschließend wird eine Empfehlung abgegeben, wie weiterführende Arbeiten auf dieser Bachelorthesis aufbauen können.

⁴ „Fahrplantreue“ wird im Kapitel 2 definiert

2 Grundlagen: Energiewirtschaft und Stand der Technik

In diesem Kapitel wird auf die Vermarktung des VK am Spotmarkt eingegangen. Danach legt dieses Kapitel die Grundprinzipien der Kraft-Wärme-Kopplung dar. Zuletzt wird auf Betreiber von virtuelle Kraftwerke eingegangen, die bereits BHKWs als VK vermarkten sowie auf weitere Lösungsansätze.

2.1 Marktteilnehmer

Grundsätzlich wird der Strompreis nach dem Prinzip von Angebot und Nachfrage bestimmt. Bei hoher Nachfrage und geringem Angebot steigt der Preis, während bei sinkender Nachfrage und großem Angebot dieser sinkt. Der Handel von elektrischer Energie unterliegt jedoch besonderen Rahmenbedingungen. Diese kann wirtschaftlich nur bedingt gespeichert werden, weshalb Erzeugung und Nachfrage zeitlich gekoppelt sind. Bei Ausfall von Kraftwerken steigt der Preis bei gleichbleibendem Bedarf während bei Überkapazität dieser genauso unmittelbar sinkt (10).

Ein Ungleichgewicht in Erzeugung und Abnahme von elektrischer Energie lässt sich an der Netzfrequenz feststellen. Dieser muss im zentraleuropäischen Verbundnetz in einem Bereich um 50 Hz liegen. Bei höherer Netzfrequenz ist die gesamte Erzeugungsleistung größer als die Abnahme, bei niedriger Frequenz ist die Abnahme größer als die Erzeugung elektrischer Leistung.

In Deutschland sind die vier Übertragungsnetzbetreiber Amprion, EnBW TransnetBW, Tennet TSO und die 50Hz Transmission für die Einhaltung der Netzfrequenz verantwortlich. Jeder Übertragungsnetzbetreiber ist somit verantwortlich für seine Regelzone. Die Aufteilung der Regelzonen ist in der folgenden Abbildung dargestellt:



Abbildung 2-1: Regelzonen in Deutschland, Quelle: (11)

Diese Regelzonen sind wiederum in Bilanzkreise (BK) eingeteilt. Dabei fasst ein BK wiederum eine Menge an Verbrauchern und Erzeugern elektrischer Energie zusammen. Ein Bilanzkreis umfasst alle Einspeisungs- und Entnahmestellen der

bilanzkreisbildenden Nutzer des Netzes oder die jeweiligen Energielieferanten innerhalb eines Übertragungsnetzes. Von diesen übernimmt ein Betreiber die Funktion des Bilanzkreisverantwortlichen. Dieser übermittelt täglich dem übergeordneten ÜNB (Übertragungsnetzbetreiber) um 12 Uhr einen Fahrplan im viertelstündlichen Raster für den folgenden Tag (12 S. 465). Der Fahrplan ist eine Prognose über die elektrische Leistung des BK. Für die Einhaltung dieser ist der BKV verantwortlich. Findet beispielsweise durch schlechte Windprognosen eine größere Einspeisung durch Windkraftanlagen statt, wird mehr elektrische Energie im BK erzeugt, während bei nicht vorhergesehenem Mehrbedarf zu wenig elektrische Energie bilanziert wird. Damit wird der Fahrplan nicht eingehalten.

Diese Fahrplanabweichung provoziert, dass das ÜNB mittels Regelenergie eingreift um die Abweichung zu kompensieren. Die Kosten der Regelenergie muss der BKV am Folgetag übernehmen (13).

Somit gelten als Marktteilnehmer Verbraucher und Erzeuger die in einem BK zusammengefasst sind. Diese benennen dem ÜNB einen BKV, der für die Einhaltung des abgegebenen Fahrplans zuständig ist.

2.2 Energievermarktung

Unternehmen können über die Beschaffungsart für elektrische Energie frei bestimmen. Folgende Abbildung zeigt die verschiedenen Stromvertriebswege und die Komplexität:

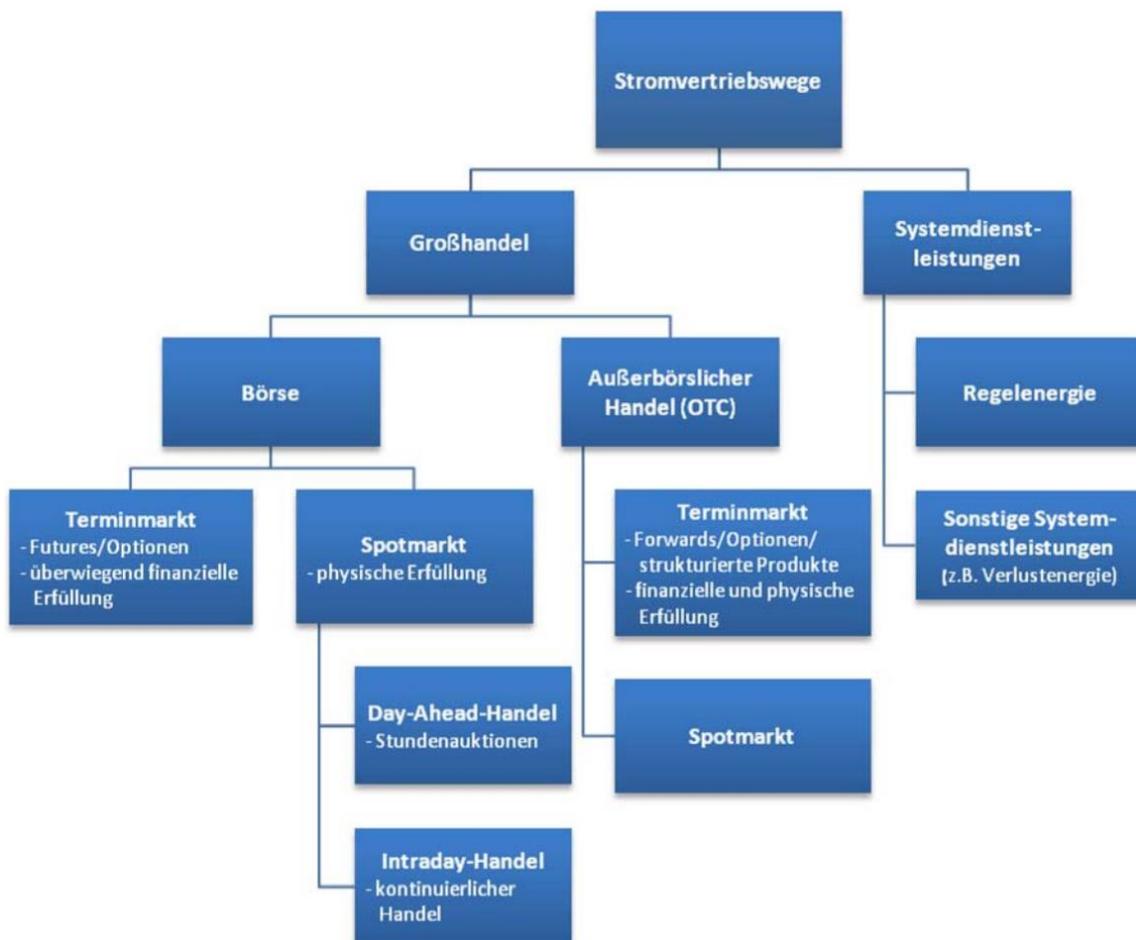


Abbildung 2-2: Stromvertriebswege, Quelle: (2 S. 47)

Das VK, welches Gegenstand dieser Bachelor-Arbeit ist, soll elektrische Energie am Day-Ahead-Spotmarkt anbieten. Daher wird auf im Folgenden genauer auf den Spot-Markt eingegangen.

Am Spotmarkt werden kurzfristige Stromhandelsgeschäfte abgeschlossen. Hierbei kommen Anbieter und Abnehmer nicht direkt in Kontakt, sondern werden über die Börse der Energy Exchange (EPEX Spot SE) vermittelt. Für den Handel stehen zwei Auktionsarten zur Verfügung: Der Day-Ahead oder der Intraday-Auktion.

Die Day-Ahead-Auktion oder auch der Day-Ahead-Handel findet jeden Tag um 12:00 Uhr statt. Es werden Strommengen für den gesamten nächsten Tag gehandelt, die am nächsten Tag entsprechend von den Vertragspartnern abgenommen oder erzeugt werden müssen.

Dabei werden die zu handelnden Leistungsmengen in Stundenblöcke eingeteilt. Das Mindestvolumen beträgt 0,1 MW. Es können jedoch auch davon abweichend andere Blockgrößen gehandelt werden. Die Preise müssen sich im Rahmen von -3.000€ und 3.000€ je MWh befinden. Negative Energiepreise kommen zustande, wenn zu viel elektrische Energie erzeugt wurde (2 S. 50).

Im Rahmen der Intraday-Auktion kann dagegen elektrische Energie kurzfristig für denselben Tag beschafft und verkauft werden. Prognoseabweichungen des Fahrplans eines Marktteilnehmers können so während des Tages durch Einkauf- oder Verkauf von elektrischer Energie kompensiert werden. Genauso wie in der Day-Ahead-Auktion können Stundenblöcke, aber auch einzelne Viertelstundenblöcke gehandelt werden. Das Mindestvolumen beträgt auch hierbei wieder 0,1 MW. Die Preisspanne reicht von -9.999€ bis 9.999€ je MWh und es kann bereits ab 15 Uhr für den Folgetag gehandelt werden (2 S. 53). Zwischen Kontraktabschluss und physikalischer Erfüllung (Energieerzeugung oder Energieabnahme) welche am selben Tag stattfinden soll, darf minimal 45 Minuten liegen (14).

2.3 Verpflichtung zur Fahrplaneinhaltung und zum Bilanzkreisausgleich

Im wirklichen Betrieb weicht die Ist-Leistung innerhalb eines BK von der Prognose in Form des abgegebenen Fahrplans ab. Beispielsweise ist die elektrische Ist-Last größer als die im Fahrplan berücksichtigte.

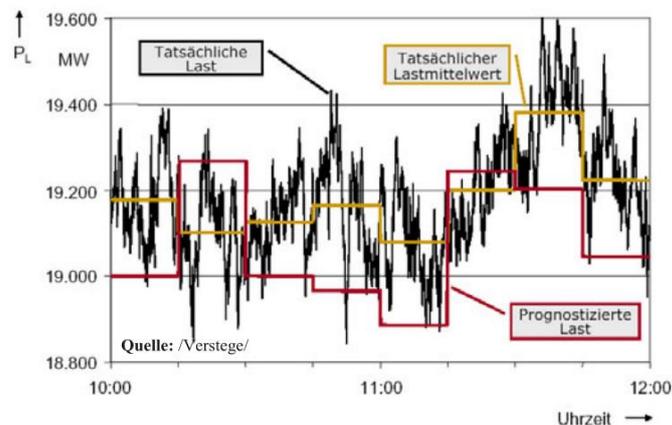


Abbildung 2-3: Abweichung von prognostizierter elektrischer Last zu tatsächlicher, Quelle: (15)

Strom kann in Netzen nicht gespeichert werden, daher gilt es Einspeisung und Verbrauch zu jeder Zeit im Gleichgewicht zu halten. ÜNB regeln diese Ungleichgewichte mittels Primär- und Sekundärregelung und Minutenreserve aus (12 S. 269). Ein Ungleichgewicht führt zu einer Änderung der Netzfrequenz. Wenn diese vom Sollwert von 50 Hz abweicht, können Schäden an elektrischen Geräten auftreten. Beispielsweise führt eine Netzfrequenz von unter 47,5 Hz zu mechanischen Resonanzschwingungen an Generatoren, die diese zerstören können (16).

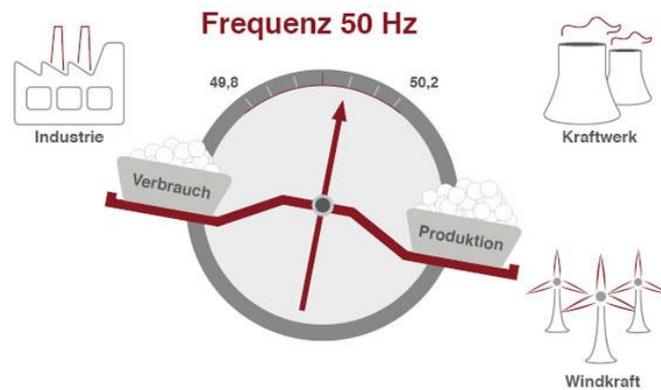


Abbildung 2-4: Ungleichgewicht von Erzeugung und Verbrauch von elektrischer Energie, Quelle: (17)

BKV sind nach § 4 Abs. 2 StromNZV für eine ausgeglichene Viertelstunden-Leistungsbilanz verantwortlich. Dazu müssen diese entsprechend sorgfältig den abzugebenden Fahrplan erstellen um Bilanzabweichungen möglichst gering zu halten (18). Prognosepflichtverletzungen aufsichtsrechtliche Maßnahmen der Bundesnetzagentur zur Folge haben.

Dennoch hat es in der Vergangenheit insbesondere in Stunden mit steilen Last- oder Produktionsflanken Systemungleichgewichte gegeben, die auf fehlende Prognosesorgfalt zurückzuführen sind. So hat es am 24. Dezember 2012 eine Überproduktion von elektrischer Energie gegeben, die zur Ausschöpfung der Regelausschüttung geführt hat (19 S. 1).

Daher hat die Bundesnetzagentur ein Positionspapier zur Verantwortung der BKV veröffentlicht, welche die Verpflichtungen der BKV klarstellt (19 S. 2):

1. Einspeisung, insbesondere von erneuerbaren Energie-Anlagen (EEG-Anlagen) müssen kurzfristig prognostiziert werden um bilanzausgleichende Maßnahmen am Intra-Day-Handel auszuführen. Abweichungen von einer Day-Ahead-Prognose (Fahrplan) sollen somit ausgeglichen werden.
2. Beschaffungsstrategien für Stromkunden müssen viertelstundenscharf sein. Dies betrifft insbesondere Stromversorger, die bei einer nur stundenscharfen Lastprognose ihre Prognosepflicht verletzen.
3. Abweichungen des Lastverhaltens von Verbrauchern aufgrund extremer Wetterlage muss nach bestem Vermögen berücksichtigt werden.
4. Bei Ausfall von Kraftwerksleistung ist der BKV verpflichtet einer Stunde Ersatz zu beschaffen.
5. In reinen Handelsbilanzkreisen, in denen keine physische Ein- oder Ausspeisung von elektrischer Energie erfolgt, sind Bilanzkreisabweichungen generell nicht zulässig und gelten als Prognosepflichtverletzung.

Insbesondere für die in dieser Arbeit zu entwickelnden Regelung ergibt sich damit die Anforderung, einen Fahrplan viertelstundengenau einzuhalten. Wird allerdings eine

Abweichung prognostiziert, kann diese durch Tätigwerden am Intra-Day-Handel ausgeglichen werden.

2.4 Blockheizkraftwerk

Blockheizkraftwerke (BHKW) arbeiten nach dem Prinzip der gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung (KWK) und gehören zu dem Kraftwerkstyp Heizkraftwerk (HKW).

BHKWs bestehen aus einem Motor, der im Betrieb Wärme erzeugt, die über Wärmetauscher abgeführt werden kann. Über einen Generator wird zusätzlich aus der kinetischen Energie des Motors elektrische erzeugt, welche ins Netz eingespeist oder für den Eigenverbrauch genutzt werden kann.

KWK-Anlagen sind in der Anschaffung teurer als übliche reine Kesselanlagen, allerdings sind die variablen Energiezeugungskosten niedriger. Dafür müssen KWK-Anlagen eine hohe Laufzeit erreichen um die hohen Investitionskosten auf eine größere Energiemenge zu verteilen.

KWK-Anlagen werden daher eher zur Grundlastdeckung konzipiert. Günstige Kessel decken dabei die auftretenden thermischen Lastspitzen. In

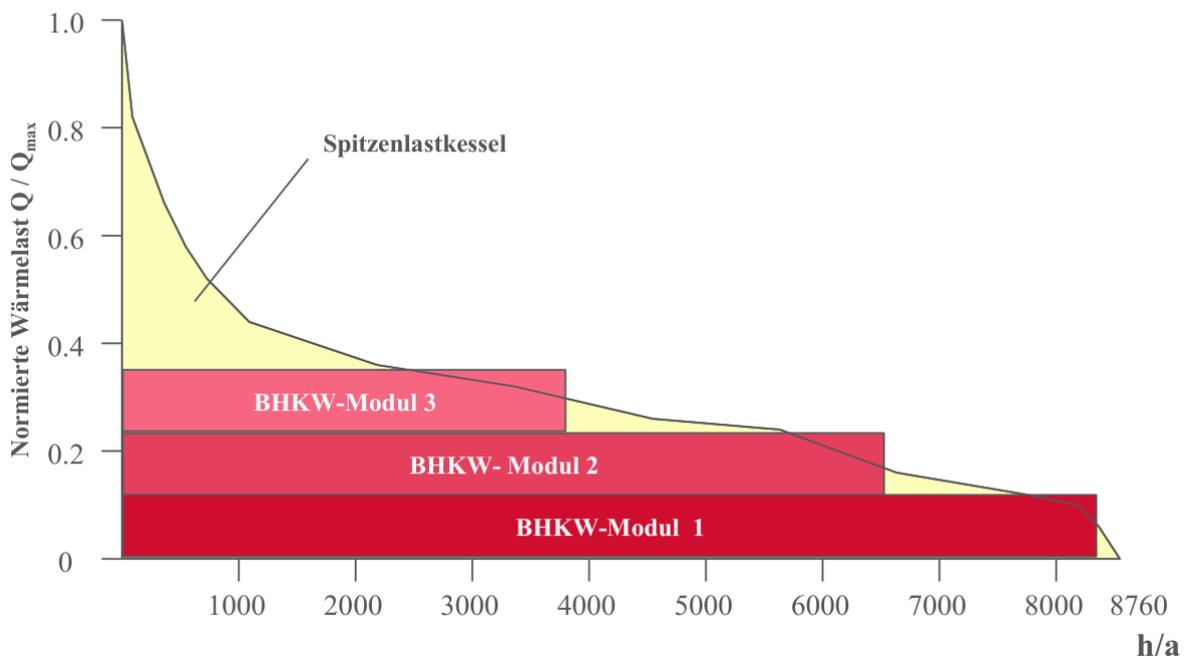


Abbildung 2-5 ist der beispielhafte Einsatz von BHKW-Modulen dargestellt.

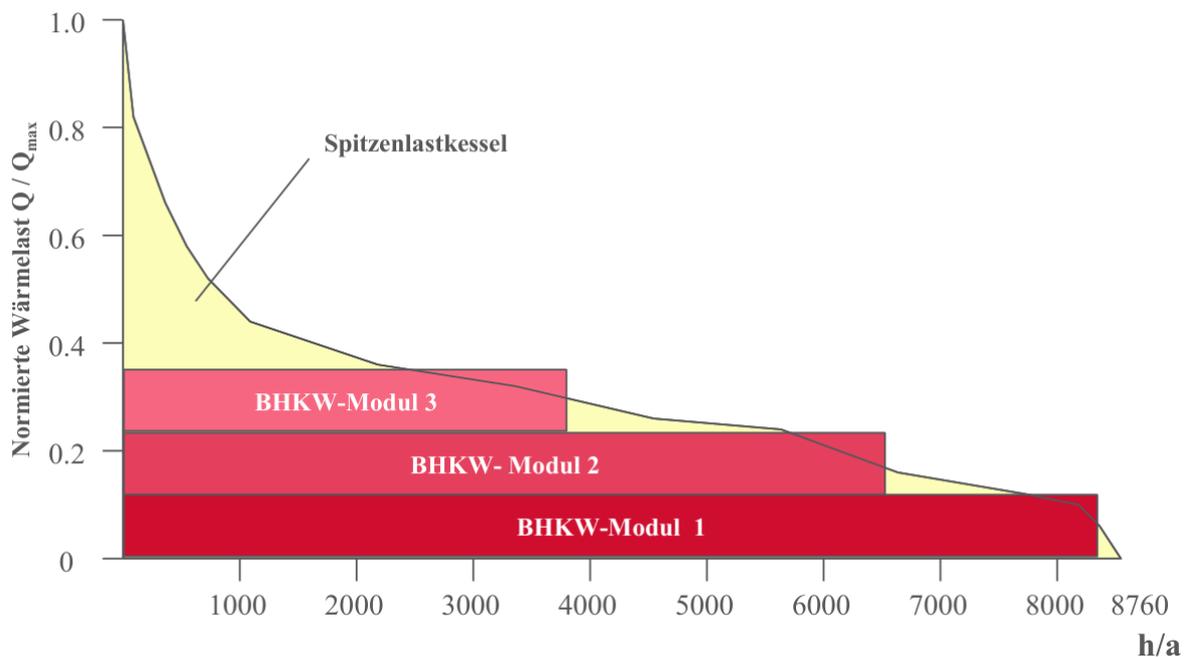


Abbildung 2-5: Jahreslinie der Wärmelast mit Einsatz von BHKW-Modulen, Quelle: (12 S. 401)

Zu sehen ist, dass das BHKW-Modul 1 fast durchgängig über das Jahr einen kleineren Anteil der maximalen Wärmelast deckt. BHKW-Modul 2 und BHKW-Modul 3 werden dagegen nur ca. 6500 Stunden und ca. 3800 Stunden betrieben. Die Spitzenlast, die nur wenige Stunden im Jahr anfällt wird dabei von einem Spitzenlastkessel gedeckt. Ebenso wird die Last in den Stunden vom SLK gedeckt, die anfällt wenn die laufenden BHKWs diese nicht decken können. In dieser Betriebsart fahren die BHKWs wärmeorientiert, da deren Betrieb von der anfallenden Wärmelast abhängig ist (12 S. 410-413).

Durch den Einsatz eines Wärmespeichers lässt sich die Stromproduktion von der Wärmelast entkoppeln. Dabei wird der Speicher mit der überschüssigen Wärme aufgeladen. Wenn der Wärmebedarf steigt, wird dieser wieder entladen (12 S. 412).

Dadurch lassen sich BHKW auch strompreisorientiert betreiben.

Ziel dieser Fahrweise ist es, erzeugten Strom an der Börse zu vermarkten, die Eigenstromnutzung oder die Senkung von Stromlastspitzen. Dabei hat die Wärmeversorgung weiterhin höchste Priorität (20 S. 16). Das BHKW-Modul 2 und 1 entsprechen in obiger Abbildung beispielsweise dieser Fahrweise.

Im Rahmen dieser Bachelorthesis werden die BHKWs strompreisgeführt. Sie sollen möglichst hohe Erlöse erzielen.

Eine wichtige Kennzahl von BHKWs ist ihre Stromkennzahl. Diese gibt das Verhältnis von elektrischer zu thermischer Leistung wieder (12 S. 425):

$$\sigma = \frac{P_{el}}{P_{th}} \quad (2-1)$$

Interessant ist ebenfalls das regelungstechnische Verhalten von BHKWs. Kenntnissen des Anlagenbetreibers HAMBURG ENERGIE GmbH folgen BHKWs Leistungssprüngen über eine Rampe. Das bedeutet, dass eine Leistungssollvorgabe nicht sprunghaft verfolgt werden kann (21).

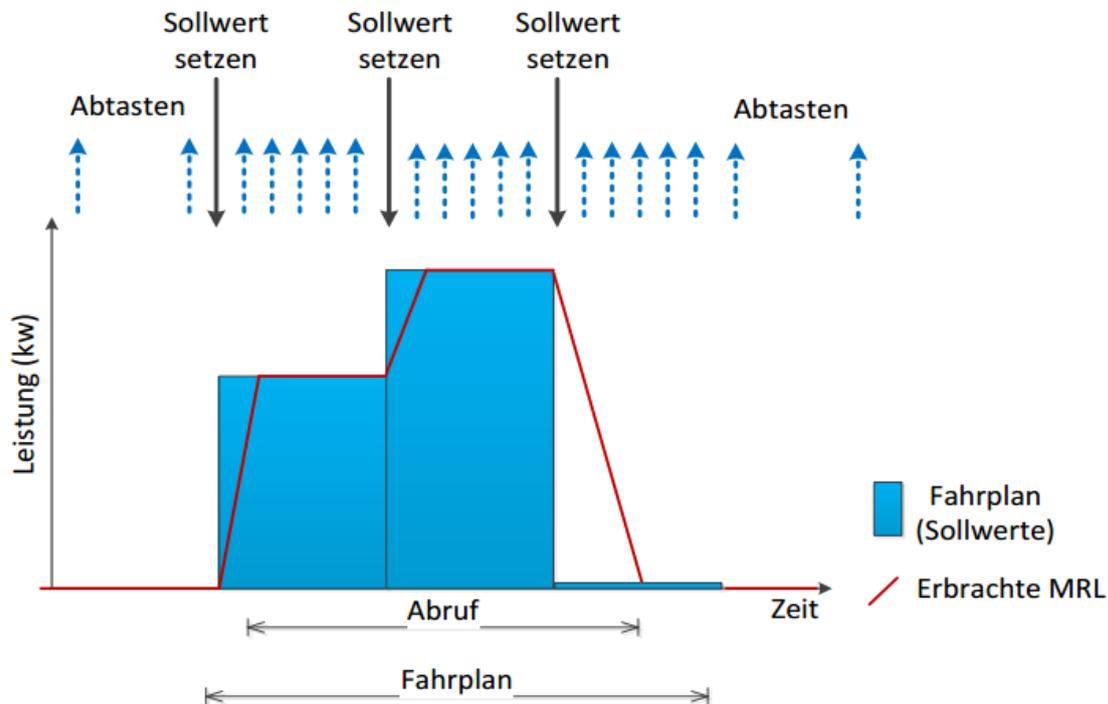


Abbildung 2-6: Ist-Leistung eines BHKW nach Sollwertvorgabe, Quelle: (21)

Zu sehen ist in obiger Abbildung, dass eine sprunghafte Soll-Leistung nicht direkt umgesetzt wird. Die Ist-Leistung (hier „Erbrachte MRL“ in rot) steigt nur rampenförmig an.

Da nach Angaben des C4DSI Sprungantwort eines BHKWs auch von der Rampenfunktion abweichen kann und generell BHKWs unterschiedliches Verhalten aufweisen, kann auch eine Totzeit angenommen werden, die den Ist-Wert der Leistung zeitlich vom Soll-Wert verschiebt.

2.5 Schichtenspeicher

Ein Schichtenspeicher ist ein Wärmespeicher, der von oben mit erhitztem Wasser beschickt wird. Dabei entstehen aufgrund der relativ geringen Wärmeleitfähigkeit Schichten von Wasser mit unterschiedlicher Temperatur. Warmes Wasser befindet sich aufgrund seiner geringeren Dichte oben und kaltes Wasser unten im Schichtenspeicher.

Der Vorteil einer Schichtung besteht darin, dass auch bei fast leerem Speicher noch relativ warmes Wasser entnommen werden. Bei einem durchmischten Speicher würde stattdessen die Temperatur des entnommenen Wasser kontinuierlich abnehmen, was zur Folge hat, dass früher nachgeheizt werden müsste (22).

In Abbildung 2-7 ist die idealisierte Temperaturschichtung dargestellt. Der Speicher links ist nur zu 30 % aufgeladen, weshalb die kalte Wasserschicht entsprechend einen größeren Anteil am Volumen des Speichers einnimmt. Rechts ist der Speicher zu 80

% aufgeladen, weshalb die warme Schichttemperatur den größeren Raum im Speicher einnimmt.

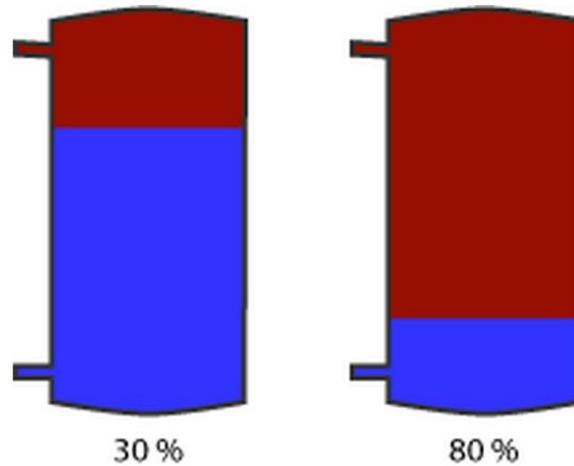


Abbildung 2-7: Schichtenspeicher mit idealisierter Temperaturschichtung, Quelle: (22)

2.6 Spitzenlastkessel

Spitzenlastkessel sind Heizkessel, welche hauptsächlich zur Deckung der thermischen Spitzenlast verwendet werden. Sie sind häufig Bestandteil von BHKWs und dienen auch als Reservekessel (22). In Abbildung 2-8 ist ein Heizkessel der Firma Buderus mit 800 kW dargestellt.



Abbildung 2-8: Heizkessel Logano plus SB745 mit 800 kW, Quelle: (23)

2.7 Virtuelles Kraftwerk

Ein virtuelles Kraftwerk (VK) ist ein Zusammenschluss von mehreren dezentralen und selbstständigen Kraftwerken. Diese können zum Beispiel BHKWs sein. Die einzelnen Kraftwerke werden durch ein geeignetes Kommunikationsnetz gesteuert. Dieser Verbund aus Einzelanlagen hat im Vergleich zum nicht verbundenen Betrieb folgende Vorteile:

- Bessere Regelbarkeit
- Bessere Planbarkeit
- Bessere Zuverlässigkeit

Das VK kann Fähigkeiten entwickeln, die sonst nur von konventionellen Großkraftwerken erreicht werden. Insbesondere erleichtert die Organisation von BHKWs als VK die Vermarktung an Strommärkten (20 S. 16).

Betreiber von virtuellen Kraftwerken sind zum Beispiel die Unternehmen Next Kraftwerke GmbH und Lichtblick SE.

Im Folgenden werden diese beiden Betreiber kurz vorgestellt. Danach gibt es einen kleinen Überblick über weitere Ansätze, die Fahrplanteile sowie weitere Anforderungen für ein virtuelles Kraftwerk zu erfüllen.

2.7.1 SchwarmEnergie

SchwarmEnergie ist ein Konzept der Lichtblick SE, bei dem viele einzelne Erzeugungsanlagen zu einem VK zusammengeschaltet werden. Dabei kommen Speicher, BHKWs, Photovoltaikanlagen und auch Batterien von Elektrofahrzeugen zum Einsatz. Der erzeugte Strom dieser Anlagen wird SchwarmStrom genannt.

Gesteuert werden die DEA von einem sogenannten SchwarmDirigenten. Dieser vernetzt die Erzeugungsanlagen sowie Batterien und Speicher miteinander (24).

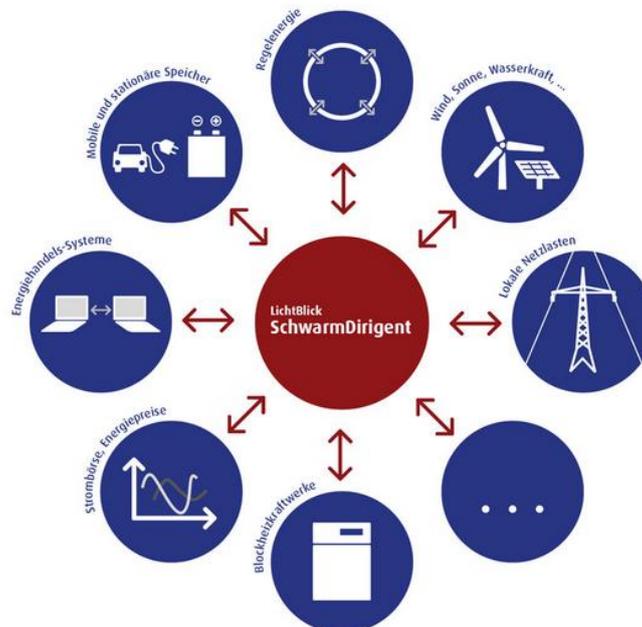


Abbildung 2-9: SchwarmDirigent von Lichtblick SE, Quelle: (24)

2.7.2 Next Kraftwerke GmbH

Next Kraftwerke GmbH ist nach eigener Auskunft einer der größten Betreiber von virtuellen Kraftwerken in Deutschland. Dabei werden Biogas-, Biomasse-, KWK-, Wasserkraft-, Windkraft-, und Solaranlagen eingebunden.

BHKWs können von Next Kraftwerke GmbH mittels einer sogenannten Next-Box an den Regelenergiemarkt angeschlossen werden. Des Weiteren bietet Next die Direktvermarktung von KW-Anlagen an (25).

2.8 Bereits vorhandene Lösungsansätze

Die Problematik, bei gegebenen Randbedingungen und sich kontinuierlich ändernden Anlagenzuständen ein VK anzusteuern und zu regeln, so dass ein initialer Fahrplan eingehalten werden kann, ist nicht neu. So gibt es bereits mehrere Arbeiten zu diesem Thema. Daher werden in diesem Kapitel zwei Dissertationen diskutiert, die Lösungsansätze bieten.

Aktive Einsatzplanung in holonischen Kraftwerken

Im Rahmen der Dissertation von Tröschel wird die agentenbasierte⁵ „aktive Einsatzplanung“ entwickelt.

Mit diesem Konzept zur reaktiven Koordination DEA, wird das reaktive Verhalten von Anlagen vorrausschauend optimiert. Des Weiteren wird das holonische Virtuelle Kraftwerk eingeführt, das dezentrale Anlagen zu selbstähnlichen Virtuellen Ressourcen bündelt und hierarchisch anordnet. Damit wird darüber hinaus ergeben sich Verbesserungen bezüglich des Kommunikationsaufwands und der Skalierbarkeit des dezentralen Energiemanagementsystems (26).

Entwicklung und Bewertung von Algorithmen zur Einsatzplanerstellung virtueller Kraftwerke

Die Dissertation von Steck beschäftigt sich mit unterschiedlichen Verfahren auf Basis der „Gemischt Ganzzahligen Linearen Programmierung“ und weiteren selbst entwickelten Algorithmen auf Basis von heuristischen und linear-heuristischen Ansätzen. Diese werden miteinander in Hinblick auf Rechenzeit untersucht (20).

Gemeinsam ist diesen Arbeiten, dass die Fahrplaneinhaltung über mathematische Lösungsansätze bewältigt wird, wohingegen in dieser Arbeit ein „klassischer“ Regler zu entwickeln ist, der für Fahrplantreue (Erläuterung in Kapitel 2.9.2) sorgen soll.

2.9 Begriffsdefinition in der Arbeit

Zum besseren Verständnis werden in den nachfolgenden Unterkapiteln Begriffe für diese Arbeit näher definiert.

2.9.1 Dispatch, Re-Dispatch, Fahrplan und Interner Re-Dispatch

Unter Dispatch wird die Einsatzplanung von Kraftwerken durch Kraftwerksbetreiber verstanden. Dagegen bedeutet Re-Dispatch die kurzfristige Änderung des Kraftwerkseinsatzes, welches von ÜNB initiiert wird. Ziel des Dispatches ist es, die Kraftwerksleistung nach betriebswirtschaftlichen Aspekten möglichst günstig auszunutzen. Bei der Einsatzplanung werden Kraftwerke mit geringen variablen Kosten wie Kohlekraftwerke (da diese geringe Brennstoffkosten haben) stärker berücksichtigt, als Kraftwerke mit hohen Brennstoffkosten.

Die Kraftwerke können dabei über die Zeit in ihrer Leistung moduliert betrieben werden. Beispielsweise kann es sinnvoll sein, dass ein Kraftwerk nur für eine bestimmte Zeit eingeschaltet wird mit einer bestimmten Leistung. Diese Informationen werden in einem Fahrplan festgehalten. Somit gibt ein Fahrplan (FP) den zeitlichen

⁵ Die Regelung, die in dieser Bachelorthesis entwickelt wird, soll ebenfalls auf einem Multi-Agenten-System arbeiten. In Kapitel 4 wird darauf eingegangen.

Verlauf der elektrischen Leistung eines Kraftwerkes wieder (25). Mit Fahrplan ist also die Summe aller einzelnen BHKW-Fahrpläne gemeint. Sollte der Begriff doch nur für ein BHKW gemeint sein, so ist dies dem Kontext zu entnehmen.

Im Rahmen dieser Bachelorthesis wird der Begriff Interner Re-Dispatch verwendet. In Anlehnung an den Begriff Resttagsplanung aus der Dissertation (20 S. 16) bedeutet dies die Planung der BHKWs im virtuellen Kraftwerk auf Basis aktueller Anlagendaten. Dabei stellt eine Interne Re-Dispatch-Maßnahme beispielsweise die Erhöhung der Leistung einzelner BHKW dar, als Reaktion auf einen sich leerenden Speicher.

2.9.2 Fahrplantreue

Die Fahrplantreue beschreibt, wie gut ein Fahrplan von einem VK eingehalten wird. Gemessen wird die Fahrplantreue an der Anzahl der zusätzlich benötigten Schalthandlungen und der nötigen Ausgleichsenergie, die eingekauft werden müsste um bilanziell den Fahrplan einzuhalten. Je mehr Ausgleichsenergie ein VK benötigt um Über- und Unterdeckung des Fahrplans auszugleichen und je öfter BHKWs ein- oder ausgeschaltet werden ohne, dass dies nach deren einzelnen BHKW-Fahrplänen vorgesehen war, desto weniger Fahrplantreue liegt vor.

2.9.3 Ist-Leistung und Fahrplanleistung des VK

Im Rahmen dieser Arbeit wird für die elektrische Soll-Leistung des gesamten VK nach Fahrplan auch einfach der Begriff Fahrplan verwendet. Wenn nach Fahrplan zum Beispiel die Leistung 0 kW beträgt, so bedeutet dies, dass die Soll-Leistung des VK 0 kW ist. Mit Ist-Leistung des VK ist die elektrische Ist-Leistung des gesamten VK gemeint, also die Summe aller elektrischen Ist-Leistungen aller BHKWs.

2.9.4 Systemzustand

Mit Systemzustand sind alle aktuellen, sowohl dynamischen als auch statischen Größen und Eigenschaften des VK gemeint. So gehört zum aktuellen Systemzustand der Speicherfüllstand in jeder Liegenschaft, die aktuelle thermische und elektrische Leistung der BHKWs, Restriktionen wie minimale Einschalt- und Ausschaltzeiten⁶ - kurz die Zusammenfassung aller Anlagendaten der Liegenschaften, des VK.

2.9.5 Last

Mit Last ist grundsätzlich die thermische Last der Liegenschaften gemeint. Sie wird in Diagrammen als Betrag mit positivem Vorzeichen angegeben.

2.9.6 Liegenschaft

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird der Begriff Liegenschaft verwendet. Nach dem „Kompetenzcenter Ingenieursvermessung (CCES)“ (27) wird dieser in der Immobilienwirtschaft häufig verwendet, ist jedoch nicht gesetzlich definiert. Allerdings ist der Begriff im Sinne des Liegenschaftskatasters, ein von den Vermessungs- und Katasterverwaltungen der Länder geführtes öffentliches Register definiert ist aber in dieser hier nicht gemeint.

⁶ Die minimale Lauf- und Ausschaltzeit werden in Kapitel 4.4 näher beschrieben.

Im Sinne dieser Bachelorarbeit wird der Begriff Liegenschaft definiert als eine Einheit aus Verbrauchern und Erzeugern von elektrischer und thermischer Energie. Die Erzeuger sind ein oder mehrere BHKW, ein SLK und ein Schichtenspeicher als Puffer. Die Liegenschaft wird hierbei als Modell in Simulink verwendet und stellt die Regelstrecke dar, für die die Regelung in dieser Arbeit entwickelt und implementiert wird.

3 Anforderungen

Diese Thesis soll die Frage klären, wie eine Regelung für ein virtuelles Kraftwerk von BHKWs zur Fahrplaneinhaltung konkret aufgebaut sein kann und wie dabei Schalthandlungen minimiert werden können. Hauptziele sind somit die Fahrplantreue und die Wirtschaftlichkeit des VK⁷. Diese Ziele sollen mit Hilfe eines Reglers erreicht werden und nicht über mathematische Optimierung, wie beispielsweise über GGLP-Verfahren⁸.

Zusätzlich zu den in Kapitel 1.2 festgestellten Anforderungen, gibt es im Sinne der zukünftigen Weiterverwendung der Regelung weitere Anforderungen, die vom C4DSI gestellt wurden. Diese sind in 3.1 aufgeführt. Außerdem gibt es zusätzliche Anforderungen die unterschieden werden müssen zwischen der Fahrplaneinhaltung des VKs und Einhaltung des Wärmebedarfs der Liegenschaften. Diese sind in Kapitel 3.2 und 3.3 aufgeführt. In Kapitel 3.4 werden die Use-Cases beschrieben mit denen das Regelungskonzept auf Praxistauglichkeit geprüft und bewertet werden soll.

3.1 Zusätzliche Anforderungen an die Regelung

Zusätzlich sollen Anforderungen berücksichtigt werden, die vom C4DSI gestellt wurden oder sich aus den technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen herleiten, die in Kapitel 2 dargelegt wurden. Diese sind:

1. Implementation der Regelung in Java um eine Verteilung der Regelung auf einem Multi-Agentensystem vornehmen zu können
2. Modularisierung der Regelung im Bausteinprinzip um die Regelung einfach erweitern zu können
3. Skalierbarkeit der Regelung auf unterschiedlich große VKs
4. Zusätzlicher Leistungsabruf durch die Regelung abseits des Fahrplans
5. Der abgebende Fahrplan für den Day-Ahead-Handel soll für einen Zeitraum von 15-Minuten-Intervallen eingehalten werden
6. Kein GGLP-Verfahren

Für Anforderung 4 ist es notwendig, das Schaltpotential der Regelung zu analysieren. Dieses besagt, wie viel elektrische Leistung das VK ein- oder abschalten kann, ohne die Randbedingungen zu verletzen.

3.2 Fahrplaneinhaltung

Die Anforderung, einen Fahrplan trotz Störung einzuhalten, zieht weitere Nebenforderungen nach sich. Diese werden nachfolgend aufgezählt:

1. Einhaltung des Fahrplans in einem Toleranzband von +/- 10 %
2. Implementation eines Auswahlalgorithmus, der die Füllstände der Speicher in den Liegenschaften berücksichtigt
3. Aufnahme der elektrischen Ist-Leistung zur Bestimmung der Fahrplantreue
4. Berücksichtigung von Totzeiten der BHKWs

⁷ Beide Begriffe sind in Kapitel 2.9 beschrieben

⁸ Gemischt Ganzzahligen Linearen Programmierung, siehe auch Kapitel 2.8

5. Schalthandlungen sollen minimiert werden
6. Zählung der Schalthandlungen

3.3 Deckung der Wärmelast

1. Kein Leerlaufen der Pufferspeicher
2. Schalthandlungen der BHKWs sollen minimiert werden
3. Zählung der Schalthandlungen

3.4 Szenarien

Um zu überprüfen, ob die Regelung die bisher gestellten Anforderungen erfüllt, sind Szenarien zu durchlaufen. Diese werden im Folgenden erläutert. Ziel ist es dabei Schwächen und Stärken der Regelung zu ermitteln. Somit kann in einer weiterführenden Arbeit möglicherweise die Regelung verbessert werden.

Szenario 1: Schaltpotentialanalyse

Es wird das Schaltpotential eines VK aus 40 Liegenschaften für vier einwöchige Zeiträume gemessen, die jeweils eine Jahreszeit repräsentieren. Dabei soll festgestellt werden, wie groß das Schaltpotential über alle vier Jahreszeiten aufgrund des Algorithmus der Schaltpotentiale ist.

Szenario 2: Fahrplaneinhaltung

Ein VK aus 40 Liegenschaften soll für vier einwöchige Zeiträume, die jeweils eine Jahreszeit repräsentieren, einen Fahrplan abfahren. Dieses Szenario wird einmal ohne Regelung und einmal mit Regelung durchgeführt.

Folgende Werte sollen aufgenommen und miteinander verglichen werden:

1. Anzahl Verletzung obere Speichergrenze
2. Anzahl Verletzung untere Speichergrenze
3. Einschalthandlungen
4. Abschalthandlungen
5. Verletzung des Fahrplans durch Überdeckung
6. Verletzung des Fahrplans durch Unterdeckung
7. Ausgleichsenergie um Fahrplanabweichungen zu kompensieren

Szenario 3: Steuerung der elektrischen Leistung

Es wird ein definierter Eingriff in den Fahrplan vorgenommen. Innerhalb eines vorher definierten Zeitraums, soll das VK seine Leistung modulieren können, ohne Berücksichtigung des Fahrplans.

4 Technische Analyse

Die technische Analyse beschreibt das Gesamtsystem, dessen Bausteine teilweise bereits von Projektpartnern entwickelt wurden, so wie das Simulinkmodell der Liegenschaft. Dazu wird dieses auch regelungstechnisch untersucht und analysiert.

4.1 Beschreibung des Gesamtsystems

Innerhalb des SPH-Projektes sind bereits Bausteine für die Simulation eines VK aus Liegenschaften mit BHKWs entwickelt worden. Damit ist die Gesamtstruktur vorgegeben und wird um die Fahrplanregelung und einem Baustein für die Ist-Last durch diese Bachelorarbeit erweitert. Im Rahmen der Technischen Analyse, wird kurz auf diese Bausteine eingegangen und das Gesamtsystem beschrieben.

Dieses wird durch folgende Abbildung 4-1 dargestellt:

GESAMTSYSTEM

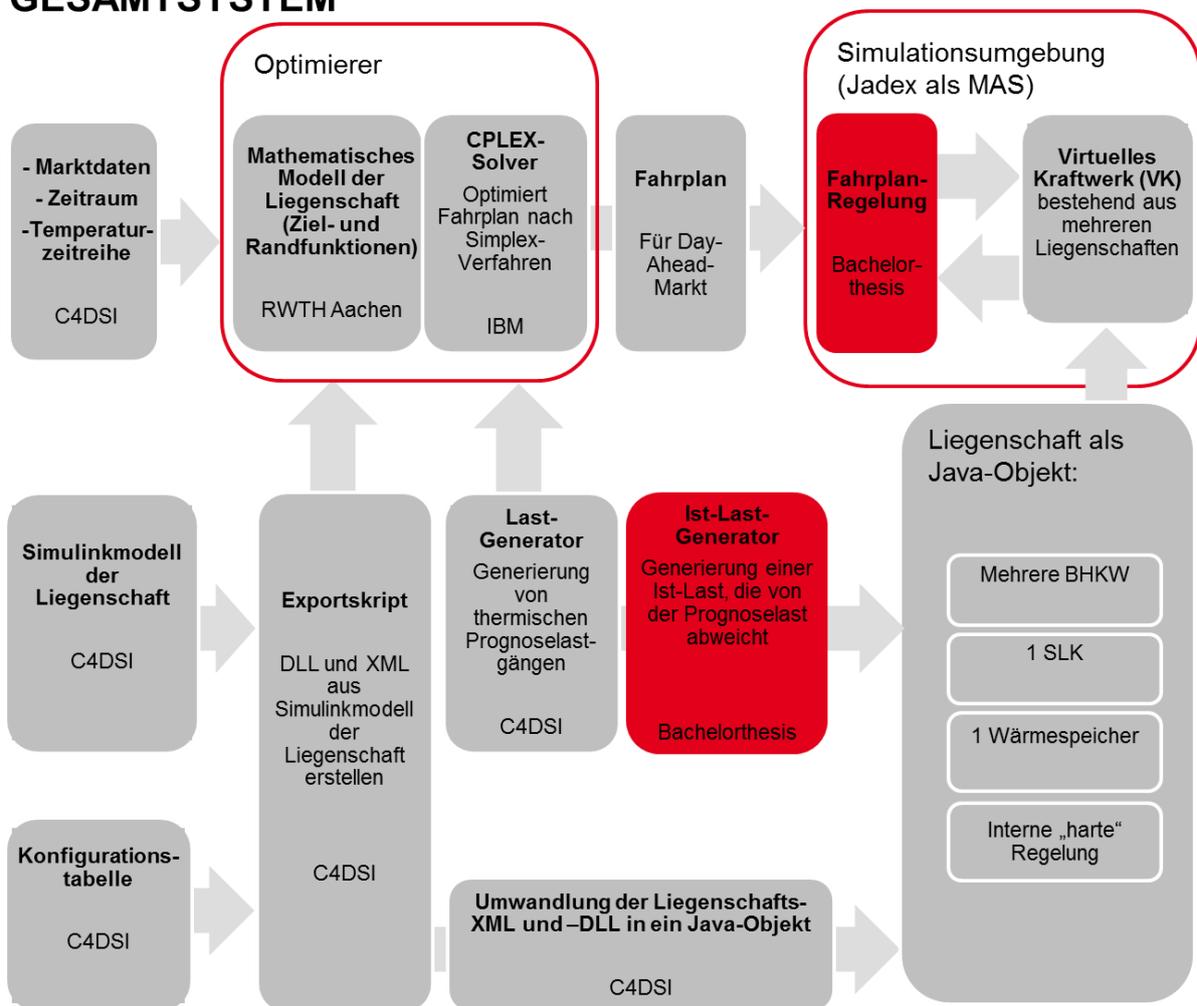


Abbildung 4-1: Gesamtsystem zur Simulation des virtuellen Kraftwerkes

Die Entwickler der jeweiligen Bausteine sind im unteren Teil der Bausteine eingetragen. Die Bausteine Fahrplan-Regelung und Ist-Last-Generator, welche im Rahmen dieser Bachelorthesis entwickelt und implementiert werden, sind rot eingefärbt.

Das Grundprinzip des Systems ist wie folgt:

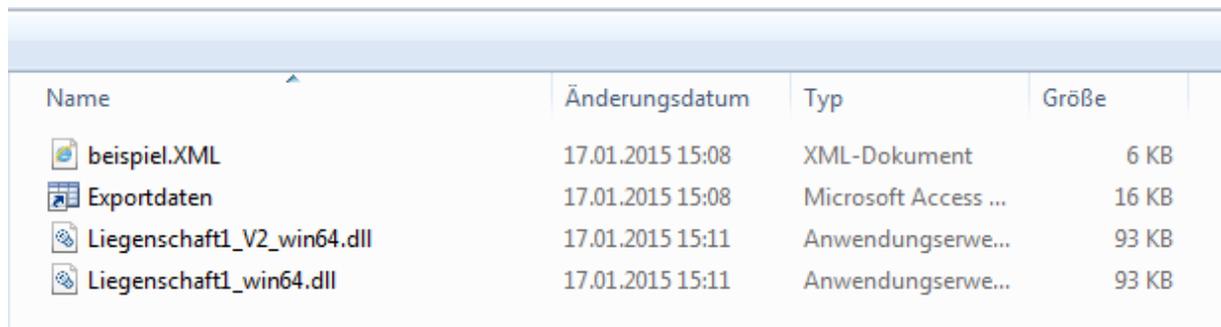
Mittels einer Konfigurationstabelle im Excel-Format werden die Parameter der Liegenschaft, wie BHKW-Leistungen, Leistung des SLK, Speichergröße und weitere festgelegt. Im Anhang befindet sich in Kapitel 9.1 eine Konfigurationstabelle für eine Liegenschaft mit zwei BHKWs.

Daneben existiert das Simulinkmodell der Liegenschaft, welche als Schablone fungiert. Mittels des Exportskriptes kann für ein VK eine XML-Datei generiert werden und für jede einzelne Liegenschaft eine DLL.

XML steht für „Extensible Markup Language“ und ist eine Auszeichnungssprache zur Darstellung von Daten die hierarchisch strukturiert sind. Genutzt wird XML für den einfachen Austausch von Daten (28). In der XML sind für jede Liegenschaft die Parameter aus der Konfigurationstabelle gespeichert und hierarchisch angeordnet.

DLL steht für „Dynamic Link Library“ und stellt eine dynamische Programmbibliothek dar (29). In der DLL sind die Funktionen aus dem Simulinkmodell enthalten. Somit kann ein anderes Programm auf die DLL zugreifen um eine Liegenschaft zu simulieren die sich genauso verhält wie das Simulinkmodell.

Die Ausgabedateien des Export-Skripts für ein VK aus zwei Liegenschaften sind in Abbildung 4-2 zu sehen: eine „beispiel.XML“, eine Matfile (Matlab-File) mit Exportdaten, in der zum Beispiel die Temperaturzeitreihe enthalten ist und zwei DLL-Dateien, die für zwei Liegenschaften stehen.



| Name | Änderungsdatum | Typ | Größe |
|----------------------------|------------------|----------------------|-------|
| beispiel.XML | 17.01.2015 15:08 | XML-Dokument | 6 KB |
| Exportdaten | 17.01.2015 15:08 | Microsoft Access ... | 16 KB |
| Liegenschaft1_V2_win64.dll | 17.01.2015 15:11 | Anwendungserwe... | 93 KB |
| Liegenschaft1_win64.dll | 17.01.2015 15:11 | Anwendungserwe... | 93 KB |

Abbildung 4-2: Ausgabe des Exportskripts für ein VK aus 2 Liegenschaften

Aus der XML- und den DLL-Dateien kann mittels Java-Methoden für jede Liegenschaft ein Java-Objekt der Klasse Teilmodell_Liegenschaft erstellt werden. Folgender Programmcode ist dafür notwendig:

```

// Konstruktor um Objekt der Klasse Teilmodelle zu erstellen
Teilmodelle teilmodelle = new Teilmodelle();

try {
    // Laden der XML- und der DLL-Dateien in das Teilmodell
    teilmodelle = Teilmodelle.LoadTeilmodelle(xmlPfad, xmlName);
    System.out.println("kein Fehler beim DLL laden");
} catch (JAXBException e) {
    System.out.println("Fehler beim DLL laden");
}

// Teilmodell_Liegenschaft erstellen
Teilmodell_Liegenschaft tML = teilmodelle.getTeilmodell_Liegenschaft()[0];

// Registrierung der DLL
tML.registerDll();

```

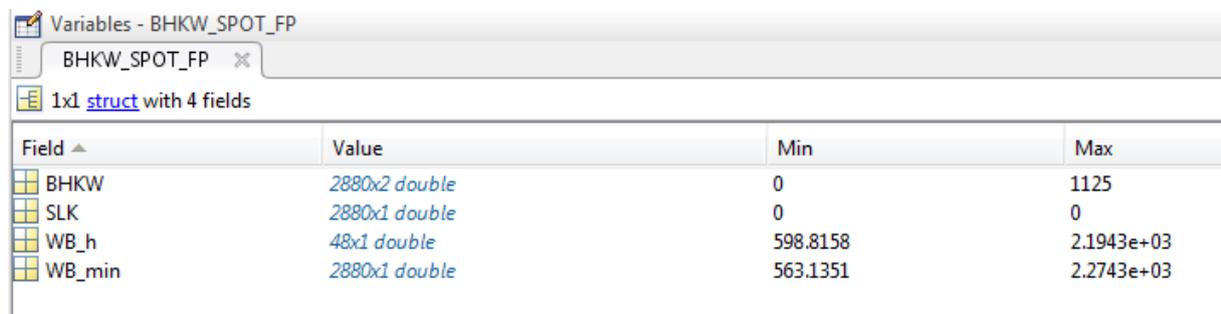
Abbildung 4-3: Programmcode um Liegenschafts-Objekt in Java aus XML- und DLL-Dateien zu generieren

Die Klasse Teilmodelle ist eine Schablone für verschiedene Arten von Modellen. Aus dem Objekt der Klasse Teilmodelle wird ein Objekt der Klasse Teilmodell_Liegenschaft erstellt. Es sind aber auch Objekte anderer Klassen möglich, die ebenfalls eine Erweiterung der Klasse Teilmodelle darstellen, wie z. B. ein Schwimmbad-Modell.

Nun kann aus der XML ein Fahrplan generiert werden. Dafür wird der Optimierer benutzt, der aus mehreren Matlab-Skripten und Funktionen besteht. Es erstellt mittels Marktdaten, einem eingegebenen Zeitraum, einer Temperaturzeitreihe der XML und einer thermischen Prognoselast für jede Liegenschaft einen Fahrplan für das VK. Ziel der Optimierung des Fahrplanes ist es, die Deckungsbeiträge aus dem Betrieb der BHKWs zu maximieren. Dabei gilt (30):

$$\text{Deckungsbeitrag} = \text{Erlöse} - \text{Kosten} \quad (4.1)$$

Der erzeugte Fahrplan ist ein Matlab-Struct, dessen Felder in Abbildung 4-4 zu sehen sind:



| Field | Value | Min | Max |
|--------|---------------|----------|------------|
| BHKW | 2880x2 double | 0 | 1125 |
| SLK | 2880x1 double | 0 | 0 |
| WB_h | 48x1 double | 598.8158 | 2.1943e+03 |
| WB_min | 2880x1 double | 563.1351 | 2.2743e+03 |

Abbildung 4-4: Fahrplan für eine Liegenschaft und für 2 Tage des Optimierers als Matlab-Struct

Innerhalb des Fahrplan-Optimierers erstellt eine Funktion der RWTH Aachen ein mathematisches Modell der Liegenschaften. Dieses dient als Eingangsinformation für den CPLEX-Solver.

Das mathematische Modell ist als gemischt ganzzahliges lineares Optimierungsproblem in Matlab formuliert (31).

Das Problem wird mittels des CPLEX-Solvers der Firma IBM gelöst. Dieses ist Programmsystem welches zum Lösen von linearen Optimierungsproblemen genutzt werden kann (32). Der Fahrplan wird anschließend über eine noch zu implementierende Regelung dem VK zugeführt. Das VK besteht aus einer oder mehrerer Liegenschaften. Jede Liegenschaft besteht dabei wiederum aus einem oder mehreren BHKWs, einem Schichtenspeicher und einer internen „Harten Regelung“, die ein Leerlaufen oder Überfüllen des Speichers verhindern soll. Das Modell der Liegenschaft wird im Kapitel 4.2 näher erläutert.

Die Simulation selbst kann entweder in einer Programmierumgebung, in der der Simulationsablauf sequentiell stattfindet oder auf einer Plattform für parallele Prozesse ausgeführt werden. Innerhalb von SPH wird für das virtuelle Kraftwerk eine Regelung der Liegenschaften auf dem Multi-Agenten-System Jadex angestrebt. Jadex wurde an der Universität Hamburg entwickelt. Ein Multi-Agenten-System besteht aus mehreren Agenten. Ein Agent besteht aus einem Softwaremodul, welches sich autonom verhalten kann und mit anderen Agenten Daten austauscht und interagiert. Dabei können die Agenten auch kooperieren um ein gemeinsames Ziel zu verfolgen (33).

Folgende Abbildung aus der Masterthesis (34) verdeutlicht das Zusammenspiel von mehreren Agenten:

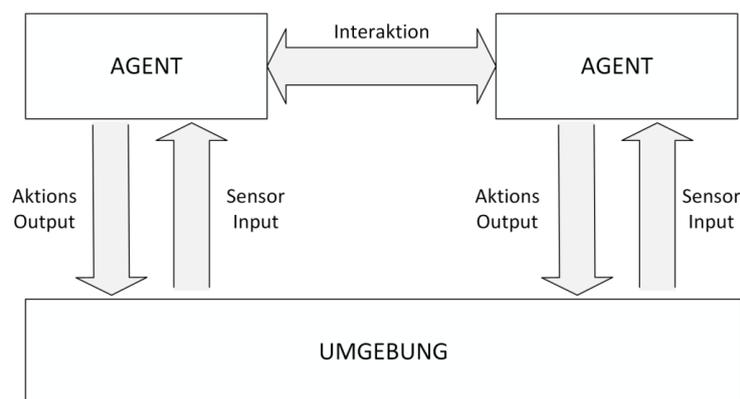


Abbildung 4-5: Koordinierende und interagierende Agenten, Quelle: (35)

Auf das VK bezogen, kann ein Agent den Regler für eine Liegenschaft darstellen. Durch die parallele Arbeit der Agenten können Programmabläufe schneller ausgeführt werden (35).

Für eine Simulation und damit auch Test der zu implementierenden Regelung ist es notwendig eine Störgröße zu schaffen. Diese stellt die Differenz von thermischer Prognoselast der Liegenschaften und einer Ist-Last dar. Daher gehört zum Gesamtsystem auch noch der Baustein Ist-Last-Generator. Dieser wird im Rahmen der Bachelorthesis implementiert.

4.2 Die Liegenschaft als Simulinkmodell

Im Rahmen des Teilprojekts 1 „Simulation“ von Smart Power Hamburg soll das Modell einer Liegenschaft entwickelt werden (36). Dieses wurde vom C4DSI als Simulinkmodell erstellt. Dieses Modell stellt die Regelstrecke für die Regelung dar. In Abbildung 4-1 ist die erste Ebene des Modells dargestellt. In dieser befinden sich alle Ein- und Ausgänge.

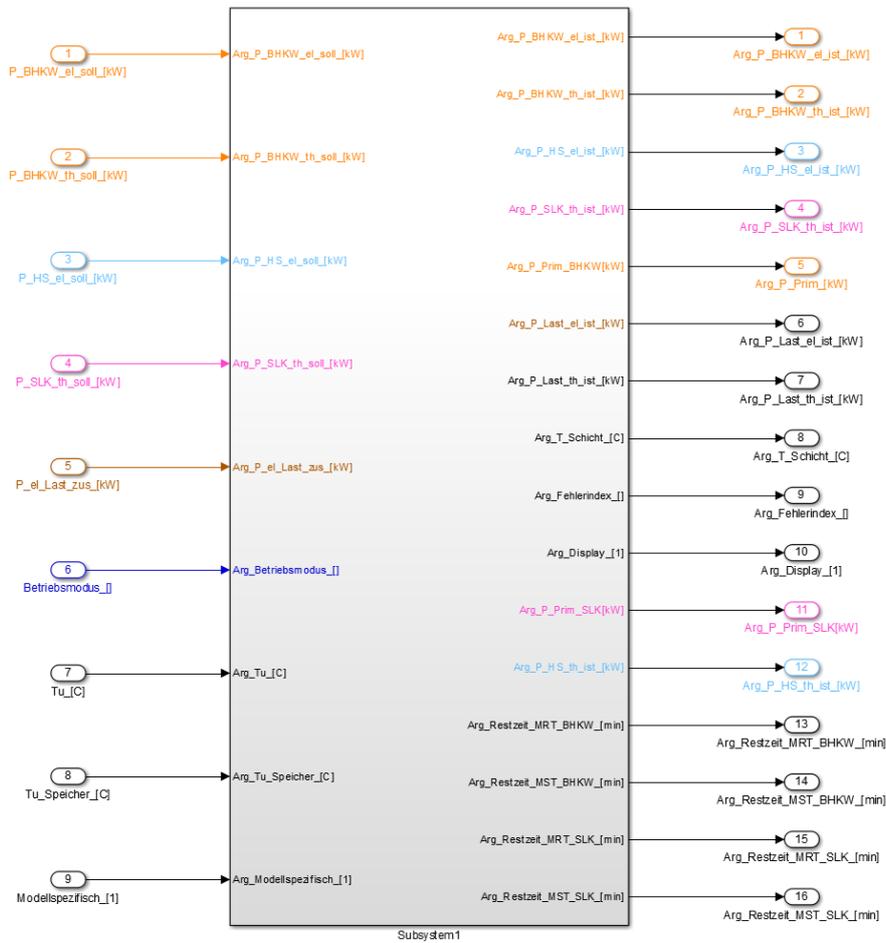


Tabelle 4-1: Ein- und Ausgänge des Simulinkmodells der Liegenschaftn

In Tabelle 4-2 sind die Eingänge und in Tabelle 4-3 die Ausgänge des Simulinkmodells beschrieben.

| Portnummer | Bezeichnung Simulink | in | Einheit | Kommentar |
|------------|-------------------------|----|---------|---|
| 1 | P_BHKW_el_soll_[kW] | | kW | Es wird ein Array übergeben, dessen Elemente die einzelnen Sollvorgaben der elektrischen BHKW-Leistungen für die nächste Minute darstellen. |
| 2 | P_BHKW_th_soll_[kW] | | kW | Es wird ein Array übergeben, dessen Elemente die einzelnen Sollvorgaben der thermischen BHKW-Leistungen für die nächste Minute darstellen. |
| 3 | P_HS_el_soll_[kW] | | kW | Es wird ein Array übergeben, dessen Elemente die einzelnen Sollvorgaben der elektrischen HS-Leistungen für die nächste Minute darstellen. |
| 4 | P_SLK_th_soll_[kW] | | kW | Es wird ein Array übergeben, dessen Elemente die einzelnen Sollvorgaben der thermischen SLK-Leistungen für die nächste Minute darstellen. |
| 5 | P_el_Last_zus_[kW] | | kW | Es wird ein Array übergeben, dessen Elemente die zusätzliche elektrische Last der Liegenschaft darstellen. Dieser Eingang wird aktuell für die Regelung nicht belegt. Für die Zukunft kann jedoch mit dem Anlegen einer elektrischen Last kann der Eigenverbrauch der Liegenschaft untersucht werden. Z. b. im Rahmen einer Eigenverbrauchsoptimierung. |
| 6. | Betriebsmodus_[] | | | Der Betriebsmodus gibt an, ob die Liegenschaft wärme- oder stromgeführt betrieben werden soll. |
| 7. | Tu_[C] | | °C | Es wird ein Array übergeben, dessen Elemente die Umgebungstemperatur darstellen. In der Ebene Subsystem 1 ist dieser Eingangsport mit einem Terminator-Element verbunden. Daher hat dieser Eingang keine Auswirkung auf die Liegenschaft und damit auf die Regelstrecke. |
| 8. | Tu_Speicher_[C] | | °C | Es wird ein Array übergeben, dessen Elemente die Umgebungstemperatur des Speichers darstellen. |

| | | | |
|----|----------------------|----|--|
| 9. | Modellspezifisch_[1] | kW | Hier wird ein Array übergeben, dessen Elemente die thermische Last darstellen. |
|----|----------------------|----|--|

Tabelle 4-2: Eingänge des Liegenschaftsmodells

Die Ausgänge sind in folgender Tabelle erläutert:

| Portnummer | Bezeichnung in Simulink | Einheit | Kommentar |
|------------|-------------------------|---------|---|
| 1. | Arg_P_BHKW_el_ist_[kW] | kW | Gibt ein Array der elektrischen Ist-Leistungen der BHKWs zurück. |
| 2. | Arg_P_BHKW_th_ist_[kW] | kW | Gibt ein Array der thermischen Ist-Leistungen der BHKWs zurück. |
| 3. | Arg_P_HS_el_ist_[kW] | kW | Gibt ein Array der elektrischen Ist-Leistungen der HS zurück. |
| 4. | Arg_P_SLK_th_ist_[kW] | kW | Gibt ein Array der thermischen Ist-Leistungen der SLK zurück. |
| 5. | Arg_P_Prim_[kW] | kW | Gibt ein Array des aktuellen Primärenergiebedarfs der BHKWs zurück. |
| 6. | Arg_P_Last_el_ist_[kW] | kW | Gibt ein Array der elektrischen Ist-Last der Liegenschaft zurück. |
| 7. | Arg_P_Last_th_ist_[kW] | kW | Gibt ein Array der thermischen Ist-Last der Liegenschaft zurück. |
| 8. | Arg_T_Schicht_[C] | °C | Gibt ein Array aus 15 Elementen zurück, die die einzelnen Schichttemperaturen darstellen. |
| 9. | Arg_Fehlerindex_[] | | Durch diesen Ausgangsport wird ein Fehlerindex ausgegeben. Dieser kann z. B. bestimmte Fehlerfälle die in der Liegenschaft aufgetreten sind anzeigen. Aktuell wird dieser Ausgang nicht verwendet und gibt eine konstante 0 zurück. |

| | | | |
|-----|-----------------------------|---------|--|
| 10. | Arg_Display_[1] | | Durch diesen Ausgang kann ebenfalls in Zukunft eine Fehlermeldung ausgegeben werden. Aktuell wird dieser Ausgang nicht verwendet und gibt eine konstante 0 zurück. |
| 11. | Arg_P_Prim_SLK[kW] | kW | Gibt ein Array des aktuellen Primärenergiebedarfs der SLKs zurück. |
| 12. | Arg_P_HS_th_ist_[kW] | kW | Gibt ein Array der thermischen Ist-Leistung der HS zurück. |
| 13. | Arg_Restzeit_MRT_BHKW_[min] | Minuten | Gibt ein Array der Minimum Running Time der BHKWs zurück. |
| 14. | Arg_Restzeit_MST_BHKW_[min] | Minuten | Gibt ein Array der Minimum Shutdown Time der BHKWs zurück. |
| 15. | Arg_Restzeit_MRT_SLK_[min] | Minuten | Gibt ein Array der Minimum Running Time der SLKs zurück. |
| 16. | Arg_Restzeit_MST_SLK_[min] | Minuten | Gibt ein Array der Minimum Shutdown Time der SLKs zurück. |

Tabelle 4-3: Ausgänge des Simulinkmodells

Das Liegenschaftsmodell besteht aus drei Untermodellen. Diese sind:

- BHKW-Modell
- Spitzenlastkessel
- Heizstab (Wird für die Regelung nicht verwendet und ist somit nicht Teil dieser Arbeit)
- Schichtenspeicher

In Abbildung 4-6 ist das Gesamtsystem des Liegenschaftsmodells dargestellt:

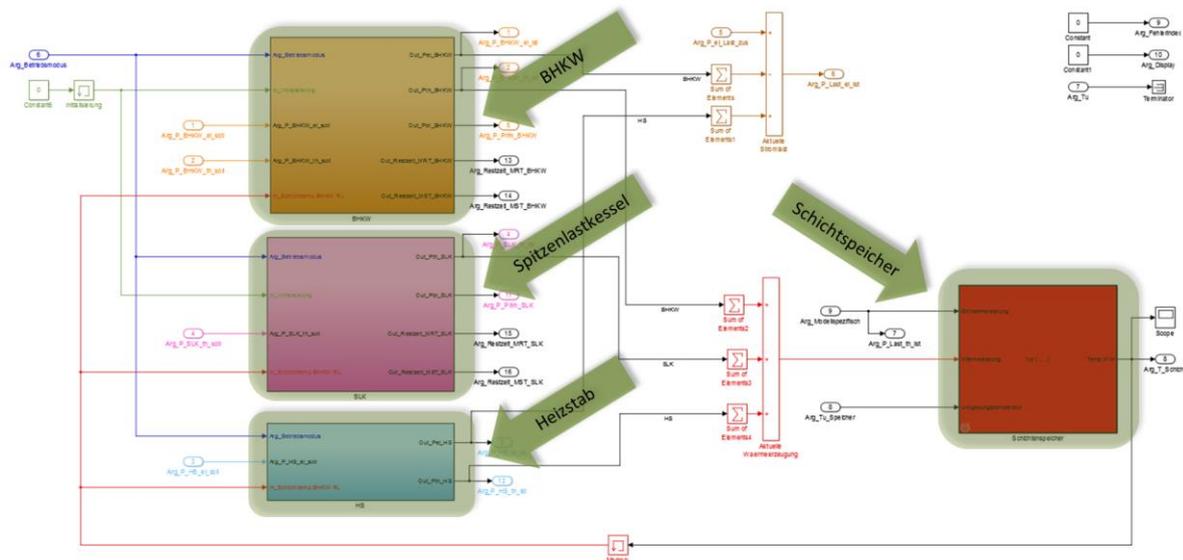


Abbildung 4-6: Gesamtsystem des Liegenschaftsmodells (37 S. 14)

Entscheidend für die Regelung ist die Beladung des Speichers. Aus dem Simulink-Modell ist ersichtlich, dass jede thermische erzeugte Leistung aufsummiert und dem Speicher zugeführt wird und keine Verzögerungsglieder oder anderes Übertragungsglieder zwischen Erzeugeranlagen und Speicher eingebaut sind.

4.3 Systemidentifikation von BHKW und SLK

Aus Abbildung 4-6 ist zu erkennen, dass die die thermische Ausgangsleistung von BHKW und SLK addiert und dem Schichtenspeicher zugeführt werden. Die thermische Ist-Last ist direkt an den Schichtenspeicher angeschlossen. Somit kann das regelungstechnische Verhalten der gesamten Regelstrecke durch Übertragungsglieder dargestellt werden. Dabei müssen diese im weiteren Verlauf analysiert werden. In Abbildung 4-7 sind die Übertragungsglieder dargestellt.

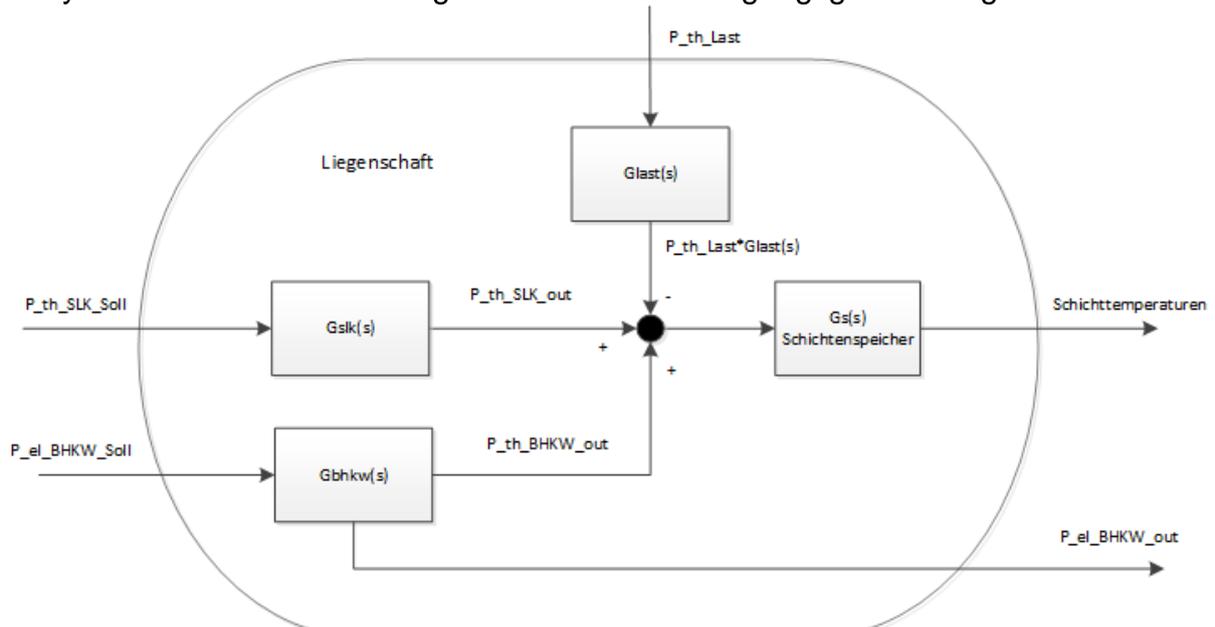


Abbildung 4-7: Die Liegenschaft als Regelstrecke

Dabei stellen $G_{bhkw}(s)$, $G_{slk}(s)$ die Übertragungsfunktionen der Eingangsleistungen für den Schichtenspeicher dar. $G_{last}(s)$ ist die Übertragungsfunktion der Last, an den Schichtenspeicher. $G_s(s)$ ist die Übertragungsfunktion des Schichtenspeichers. Die Ausgangsgröße des Schichtenspeichers sind deren Schichttemperaturen, welche gleichzeitig zusammen mit der elektrischen Leistung des BHKW-Modells Ausgangsgrößen des Gesamtmodells der Liegenschaft sind.

Das Übertragungsverhalten der Leistungserzeuger BHKW und SLK lassen sich durch zwei Vorgehensweisen analysieren:

1. Analyse der Konfigurationstabelle der Liegenschaft
2. Analyse durch Anlegen einer Testfunktion an den Eingang des BHKW/SLK und Auswertung der Antwortfunktion

4.3.1 Analyse des regelungstechnischen Verhaltens des BHKW

Im ersten Schritt wird die Konfigurationstabelle aus 9.1 untersucht. Diese Tabelle enthält die Rahmendaten der Liegenschaft, auf deren Basis das Modell generiert wird. Laut dem C4DSI sind die modellrelevanten Eigenschaften des BHKW folgende:

| Parameter laut Konfigurationstabelle | Erläuterung |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • elektrische maximal BHKW-Leistung [kW] | |
| <ul style="list-style-type: none"> • elektrische minimale BHKW-Leistung [kW] | |
| <ul style="list-style-type: none"> • thermische maximal BHKW-Leistung [kW] | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Stromkennzahl [-] | Verhältnis von elektrischer zu thermischer Leistung, Siehe (2-1) |
| <ul style="list-style-type: none"> • minimale Laufzeit [h] | Abgekürzt MRT (Minimum Running Time), die Mindestlaufzeit, die ein BHKW nach Einschaltung an bleibt ohne von außen abgeschaltet werden zu können. Laut Konfigurationstabelle beträgt diese 15 Minuten. |
| <ul style="list-style-type: none"> • Minimale Ausschaltzeit [h] | Abgekürzt MST (Minimum Shutdown Time), die Mindestausschaltzeit, die ein BHKW nach Ausschaltung aus bleibt ohne von außen wieder eingeschaltet werden zu können. Laut Konfigurationstabelle beträgt diese 15 Minuten. |
| <ul style="list-style-type: none"> • maximale Rampe nach oben [kW] | <p>Der mittlere elektrische Leistungszugewinn, der bei Leistungserhöhung mittels Sollwertvorgabe maximal nach einer Stunde vom BHKW erreicht werden kann.</p> <p>Laut Konfigurationstabelle ist diese für beide BHKW gleich ihrer maximalen elektrischen Leistung. Daher fährt das BHKW bei Leistungsänderung keine Rampe ab sondern erreicht die Sollwertvorgabe, solange diese innerhalb des Arbeitsbereiches liegt unmittelbar im nächsten Zeitschritt.</p> |

| | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • maximale Rampe nach unten [kW] | <p>Der mittlere elektrische Leistungsabfall, der bei Leistungsminderung mittels Sollwertvorgabe maximal nach einer Stunde vom BHKW erreicht werden kann.</p> <p>Laut Konfigurationstabelle ist diese für beide BHKW gleich ihrer maximalen elektrischen Leistung. Daher fährt das BHKW bei Leistungsänderung keine Rampe ab sondern erreicht die Sollwertvorgabe, solange diese innerhalb des Arbeitsbereiches liegt unmittelbar im nächsten Zeitschritt.</p> |
|--|---|

Abbildung 4-8: Relevante Parameter aus der Konfigurationstabelle für das BHKW

Aus diesen Parametern lässt sich schließen, dass die Sollwertvorgabe der elektrischen Leistung wie folgt berücksichtigt wird:

1. Das BHKW kann nur eine maximale elektrische und thermische Leistung erbringen
2. Das BHKW kann nur bis zur minimale elektrische und thermische Leistung heruntergefahren werden, darunter wird das BHKW abgeschaltet.
3. Das BHKW hat eine minimale Laufzeit, was bedeutet, dass ein BHKW nach dem Einschalten erst nach dieser Laufzeit wieder abgeschaltet werden kann
4. Das BHKW hat eine minimale Ausschaltzeit, was bedeutet, dass ein BHKW nach dem Ausschalten erst nach dieser Laufzeit wieder eingeschaltet werden kann
5. Das BHKW hat eine maximale Rampe nach oben, die angibt wie groß die Leistungssteigerung des BHKW in einer Stunde sein kann
6. Das BHKW hat eine maximale Rampe nach unten, die angibt wie groß die Leistungsverringerng des BHKW in einer Stunde sein kann

Mit Formel (2-1) wird die Übertragungsfunktion der BHKW für die thermische Ausgangsleistung bestimmt zu:

$$G_{bhkw}(s) = \sigma \quad (4-2)$$

Diese Übertragungsfunktion liegt der Annahme zugrunde, dass zum einen die Stromkennzahl über den gesamten Leistungsbereich konstant ist, des Weiteren sind keine Totzeit, Verzögerungszeiten und Rampenzeiten zwischen Führungssprung und Führungssprungantwort vorhanden.

Außerdem gilt die Einschränkung, dass für die Übertragungsfunktion $G_{bhkw}(s)$ der Eingangswert $P_{el,BHKW}$ sich zwischen der minimalen und maximalen Leistung befindet:

$$P_{el,BHKW,min} \leq P_{el,BHKW} \leq P_{el,BHKW,max} \quad (4-3)$$

Um festzustellen, wie sich elektrische Eingangsleistungen auf die thermische Leistung auswirken, kann eine Rampe als Test-Funktion aufgeschaltet werden, die folgender Zeitfunktion entspricht:

$$P_{el,BHKW,Rampe}(t) = \frac{1 \text{ kW}}{\text{min}} \times t \quad (4-4)$$



Abbildung 4-9: Aufnahmen der Antwortfunktion bei Aufschalten einer Rampe

Im Folgenden wird die Antwortfunktion eines BHKWs auf die rampenförmige Testfunktion (4-12) untersucht. Das BHKW hat folgende Parameter nach Konfigurationstabelle in Kapitel 9.1.

Die Erwartung ist, dass das BHKW erst ab einer aufgeschalteten elektrischen Leistung von 202,5 kW einschaltet. Die gemessene Ist-Leistung wird aufgrund der Rampenzeit sprunghaft erfolgen. Dann soll die thermische Leistung im Einschaltmoment nach Formel (2-1) 269 kW entsprechen.

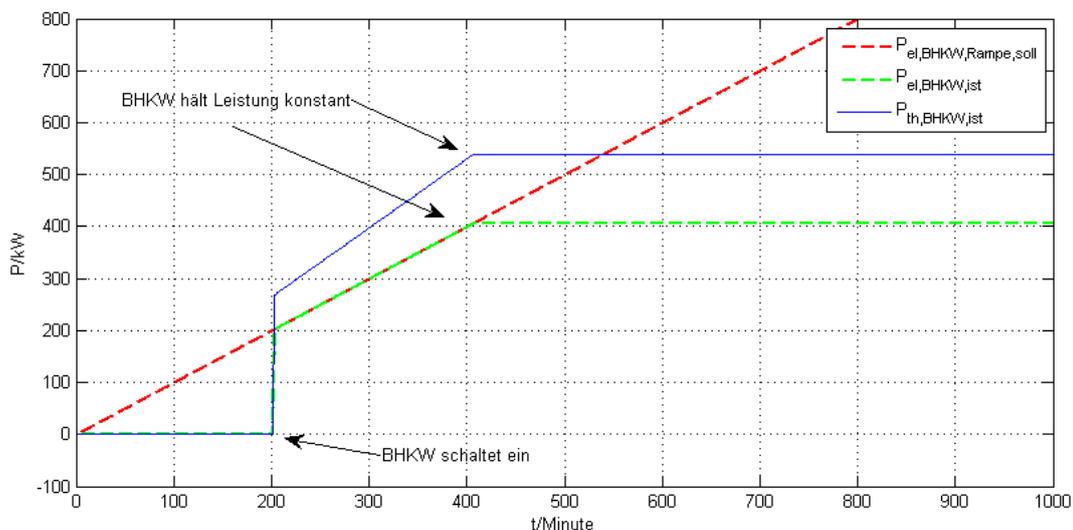


Abbildung 4-10: Rampenförmige Testfunktion an BHKW

Wie in Abbildung 4-10 zu sehen wird ab der minimalen Leistung eingeschaltet und die maximale Leistung konstant gehalten, wenn die maximale elektrische Leistung der Rampe erreicht wurde. Wie erwartet schaltet das BHKW sprunghaft ein, da der Parameter ramp_up eine sprunghafte Einschaltung auf die maximale Leistung erlaubt.

Somit entspricht das regelungstechnische Verhalten bei Nichtberücksichtigung der minimalen Einschaltzeit und der minimalen Ausschaltzeit des BHKWs in Bezug auf die elektrische Ausgangsleistung folgender Kennlinie:

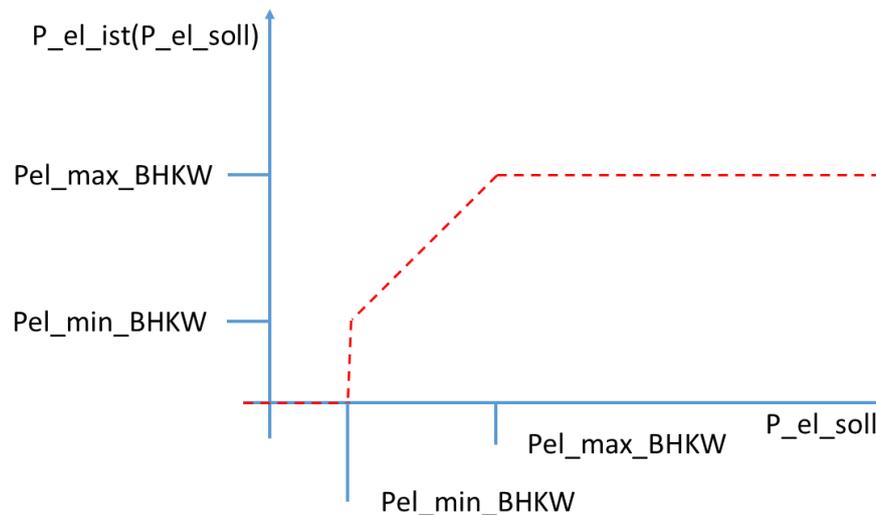


Abbildung 4-11: Nichtlineare Kennlinie des BHKW-Übertragungsgliedes

P_{el_soll} ist der elektrische Eingangswert und P_{el_ist} die gemessene elektrische Ist-Leistung des BHKWs. $P_{el_min_BHKW}$ stellt die minimale und $P_{el_max_BHKW}$ die maximale elektrische Leistung des BHKWs dar. Die thermische Ausgangsleistung ist im obigen Kennliniendiagramm nicht eingezeichnet.

Und es gilt:

$$P_{el,BHKW,ist} = \begin{cases} P_{el,BHKW,max} & P_{el,BHKW,soll} \geq P_{el,BHKW,max} \\ P_{el,BHKW,soll} & P_{el,BHKW,max} \geq P_{el,BHKW,soll} \geq P_{el,BHKW,min} \\ 0 & P_{el,BHKW,soll} < P_{el,BHKW,min} \end{cases} \quad (4-5)$$

Zusätzlich zur Übertragungsfunktion durch die Kennlinie, wird das Ausgangssignal des BHKWs durch die Minimum Running Time (Minimale Laufzeit)(Abk. MRT) und Minimum Shutdown Time (minimale Ausschaltzeit) (Abk. MST) beeinflusst. Die MRT gibt die Mindestzeit an, die ein BHKW laufen muss bevor sie abgeschaltet wird. Die MST gibt die Mindestauszeit an, die ein BHKW mindestens ausgeschalt sein muss um wieder eingeschaltet werden zu können. Realisiert sind diese Vorgaben durch Zähler im Liegenschaftsmodell.

Um diese Vorgaben zu überprüfen, wird das BHKW mit einer Rechteckfunktion als Testfunktion mit der Höhe $P_{el_min_BHKW}$ und der Breite von einer Minute getestet. Ein Impuls als Testfunktion würde ausreichen. Jedoch kann die Liegenschaft nur minütlich aufgelöste zeitdiskretisierte Signale annehmen und aufgeschaltete Eingangsleistungen wirken mindestens eine Minute.

Für die Überprüfung der MRT wird ein BHKW im ausgeschalteten Zustand mit der Rechteck-Testfunktion eingeschaltet. Die angeschlossene elektrische Leistung beträgt für einer Minute der minimalen elektrischen Leistung des BHKWs. Gemessen wird, wann das BHKW nach dem Einschalten wieder ausschaltet.

Die Testfunktion lautet:

$$P_{el,soll,Rechteck} = P_{el,BHKW,min} \times \text{rect}\left(\frac{t - t_0}{T}\right) \quad (4-6)$$

Und es gilt:

$$T = 1 \text{ Minute} \quad (4-7)$$

$$t_0 = 100 \text{ Minuten} \quad (4-8)$$

In der folgenden Abbildung ist die Antwort auf die Testfunktion zu ersehen:

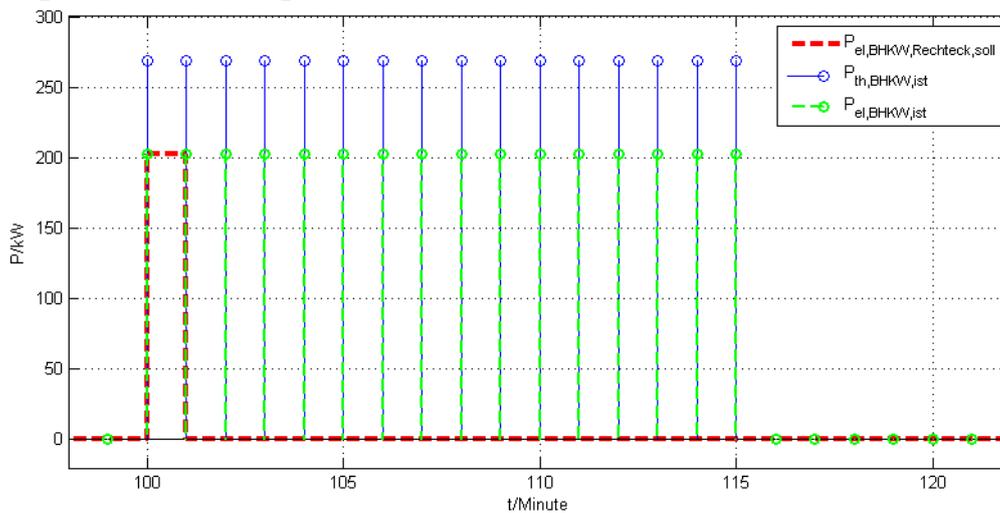


Abbildung 4-12: MRT des BHKWs von 15 Minuten

Zur Minute 100 wird die Mindestleistung des BHKWs für eine Minute eingeschaltet. Die Eingangsleistung sinkt daher nach einer Minute wieder auf 0 kW. Das BHKW läuft jedoch insgesamt 15 Minuten. Dieses Verhalten entspricht der Erwartung nach der Analyse der Liegenschaftsparameter aus der Konfigurationstabelle.

Zur Überprüfung des MST wird wie folgt vorgegangen:

Bei eingeschaltetem BHKW wird mittels eines negativen Sprungs die Eingangsleistung in Minute 100 auf 0 kW reduziert. Um das BHKW jedoch einzuschalten, ist ein positiver Sprung vorher notwendig. Daher wird als Testsignal wieder ein Rechtecksignal eingesetzt, dessen Breite mindestens der MRT entspricht. Nach dem Abschalten wird nach einer Minute wieder eingeschaltet mittels einem Sprung. In Folgender Abbildung 4-13 ist die Reaktion des BHKWs auf das Testsignal dargestellt:

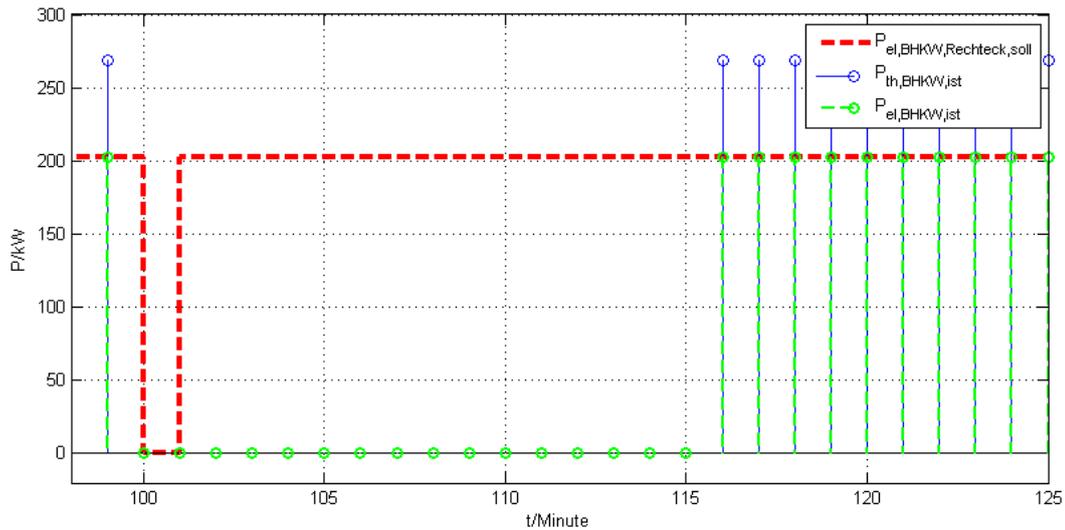


Abbildung 4-13: MST des BHKW von 15 Minuten

Zu erkennen ist, dass das BHKW erst 15 Minuten nachdem es ausgeschaltet wurde wieder eingeschaltet werden kann.

Die Schaltfreigabe ist wie folgt abhängig:

$$Einschaltfreigabe = \begin{cases} true & Restzeit(MST) = 0 \text{ Minuten} \\ false & Restzeit(MST) \geq 0 \text{ Minuten} \end{cases} \quad (4-9)$$

$$Abschaltfreigabe = \begin{cases} true & Restzeit(MRT) = 0 \text{ Minuten} \\ false & Restzeit(MRT) \geq 0 \text{ Minuten} \end{cases} \quad (4-10)$$

Damit ergibt sich ein weiteres nichtlineares Verhalten des BHKW. Das regelungstechnische BHKW-Modell ist in folgender A2bbildung dargestellt.

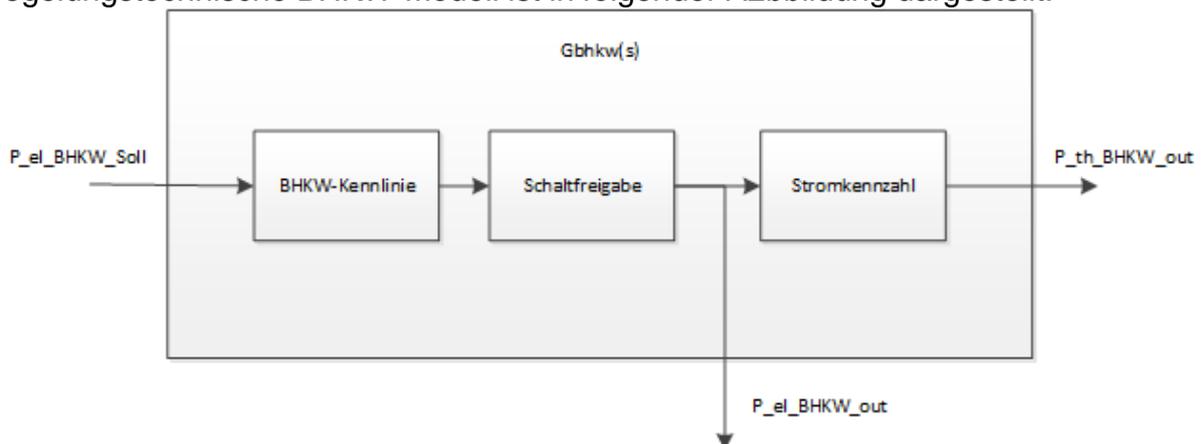


Abbildung 4-14: Übertragungsverhalten des BHKW

Unter Berücksichtigung von Gesamtwirkungsgrad und Tot- oder Rampenzeit sieht das Bild wie folgt aus:

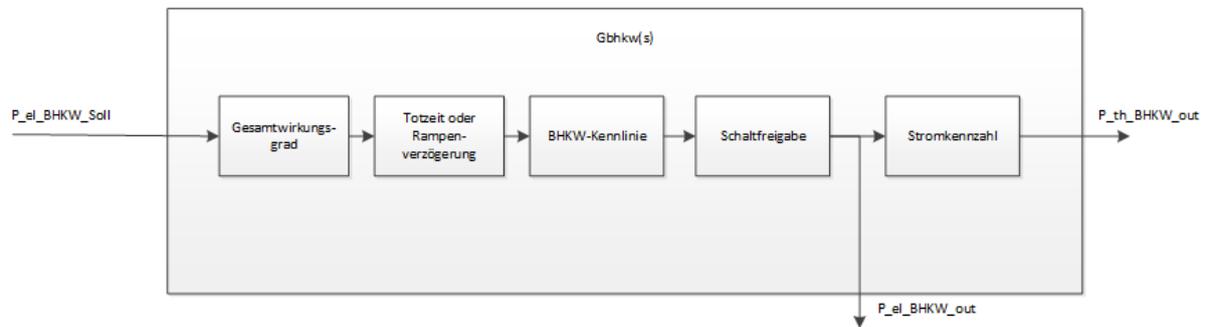


Abbildung 4-15: Übertragungsverhalten des BHKW-Modell zusätzlich mit Gesamtwirkungsgrad und Tot- / Rampenzeit

Das aktuelle Simulinkmodell berücksichtigt diese Parameter jedoch noch nicht. So ist der Gesamtwirkungsgrad 1.

4.3.2 Analyse des regelungstechnischen Verhaltens des SLK

Das regelungstechnische Verhalten entspricht weitestgehend dem des BHKW. Daher wird in diesem Kapitel weniger ausführlich auf das Verhalten eingegangen und lediglich das Ergebnis der Untersuchung festgehalten. Die Herleitung der Ergebnisse findet sich im Anhang.

Genauso wie das BHKW hat auch das SLK Kennlinienverhalten. So kann die Ausgangsleistung des SLK sich nur zwischen der Mindestleistung und Maximalleistung befinden. Abbildung 4-16 zeigt die Abhängigkeit der Ausgangsleistung von der Sollvorgabe.

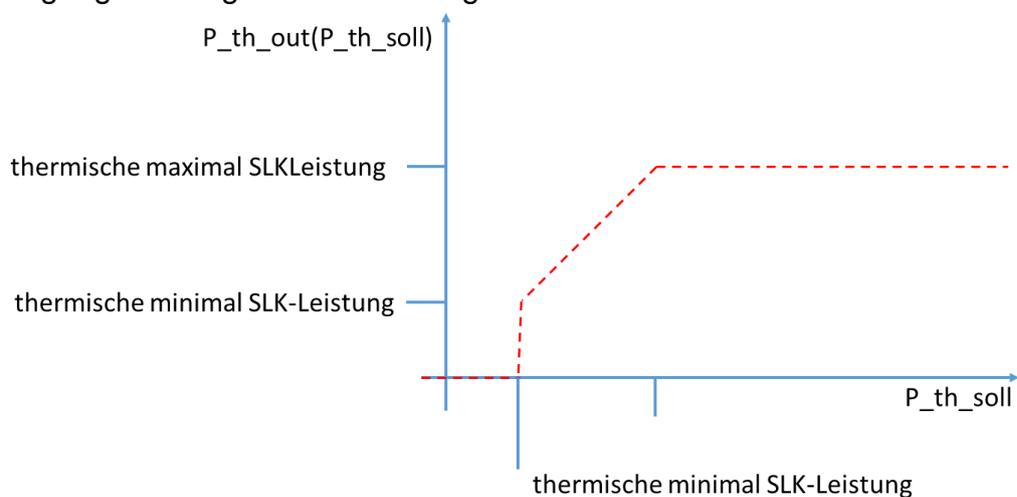


Abbildung 4-16: Leistungskennlinie des SLK

Weiterhin hat das SLK eine Schaltfreigabe, aufgrund der Mindestlaufzeit und Mindestausschaltzeit. Beide betragen nach der Konfigurationstabelle allerdings nur 3 Minuten.

Somit ergibt sich auch für das SLK das regelungstechnische Verhalten nach folgender Abbildung:

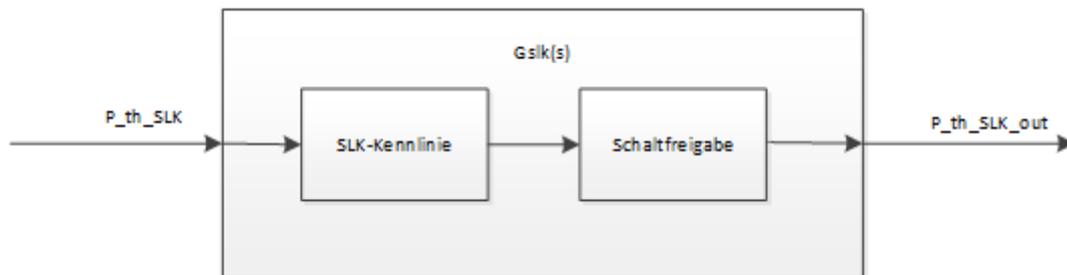


Abbildung 4-17: Übertragungsverhalten des SLK

Würden Wirkungsgrad und Tot- oder Rampenzeit berücksichtigt, ergäbe sich folgende Darstellung des regelungstechnischen Verhaltens:

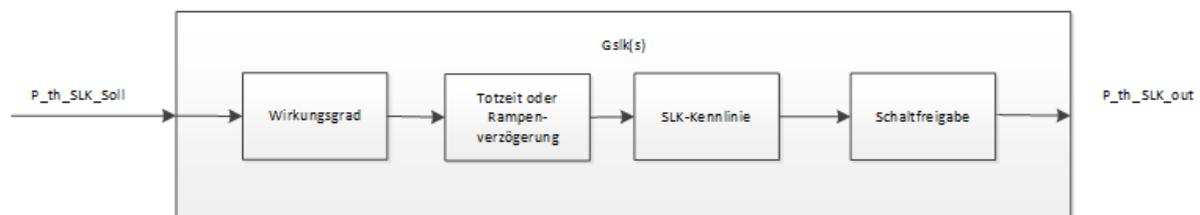


Abbildung 4-18: Regelungstechnische Modell des SLK mit Wirkungsgrad und Tot- oder Rampenzeit

Der Wirkungsgrad ist aber fest auf 1 eingestellt und eine Rampe wird bei Sollleistungsvorgaben nicht abgefahren sondern diese sprungartig wenn möglich erreicht.

4.4 Systemidentifikation des Schichtenspeichers

Der Schichtenspeicher stellt ein zentraler Teil der Regelstrecke dar. Daher ist es notwendig, die regelungstechnischen Eigenschaften des Speichers zu ermitteln. Da zum Schichtenspeicher die physikalischen Eigenschaften unbekannt sind, kann keine theoretische Analyse gemacht werden. Es werden daher die Eigenschaften experimentell bestimmt.

Nach (38 S. 345), kann die Analyse experimentell erfolgen.

Bei der experimentellen Analyse wird aus der mathematischen Beschreibung des Verhaltens von Eingangs- und Ausgangsgröße das Regelstreckenmodell bestimmt. Dabei stellen Führungs- und Störgrößen die Eingangsgrößen dar.

Das Simulinkmodell der Liegenschaft und damit auch das des Schichtenspeichers stellt ein zeitdiskretes unbekanntes System dar. Zur Vereinfachung der Systemanalyse des Schichtenspeichers wird hier allerdings wie zeitkontinuierliches Modell betrachtet um den Berechnungsaufwand zu verringern und um Methoden aus der kontinuierlichen Regelungstechnik anzuwenden.

Mittels der Grenzwertsätze der LAPLACE-Transformation können aus Sprungantwortfunktionen der Typ und die Übertragungsfunktion einer unbekanntes Strecke bestimmt werden.

Die Übertragungsfunktion der Regelstrecke wird als $G_s(s)$ bezeichnet. Diese wird beschrieben als ein Bruchpolynom, dessen Zählerpolynom den Grad m und dessen Nennerpolynom den Grad n hat. Dabei gilt:

$$m \leq n \quad (4-11)$$

$$Gs(s) = \frac{X_a(s)}{X_e(s)} = \frac{b_m \times s^m + b_{m-1} \times s^{m-1} + \dots b_1 \times s + b_0}{a_n \times s^n + a_{n-1} \times s^{n-1} + \dots a_1 \times s + a_0} \quad (4-12)$$

Der Einheitssprung ist im Bildbereich:

$$X_e(s) = \frac{1}{s} \quad (4-13)$$

Und im Zeitbereich:

$$X_e(t) = E(t) \quad (4-14)$$

Die Sprungantwort selbst ist dann:

$$\begin{aligned} X_a(s) &= Gs(s) \times X_e(s) = \\ &= \frac{b_m \times s^m + b_{m-1} \times s^{m-1} + \dots b_1 \times s + b_0}{a_n \times s^n + a_{n-1} \times s^{n-1} + \dots a_1 \times s + a_0} \times \frac{1}{s} \end{aligned} \quad (4-15)$$

Aus dem Endwert

$$X_a(t \rightarrow \infty) = \lim_{n \rightarrow 0} s \times Gs(s) \times X_e(s) = \lim_{n \rightarrow 0} Gs(s) \quad (4-16)$$

kann dann das prinzipielle Verhalten der Strecke bestimmt werden.

Im Folgenden wird der Schichtenspeicher mittels BHKW beladen.

4.4.1 Sprungantwort mit Beladung durch BHKW

Während der Beladung durch das BHKW wird das SLK nicht eingeschaltet und befindet sich im ausgeschalteten Zustand. Die Ist-Last wird ebenfalls auf 0 kW eingestellt. Damit wird sichergestellt, dass nur die Sprungantwort bei Einwirkung des BHKW gemessen wird.

4.4.1.1 Positiver Sprung

Es wird ein Sprung auf den Schichtenspeicher von 600 kW draufgegeben. Von Minute 500 bis Minute 501 füllt sich der Speicher um ca. 8 kWh. Eine Leistung von 600 kW entspricht aber einer minütlichen Ladung von 10 kWh.

Ab Minute 501 beträgt die Laderate wie erwartet 10 KWh.

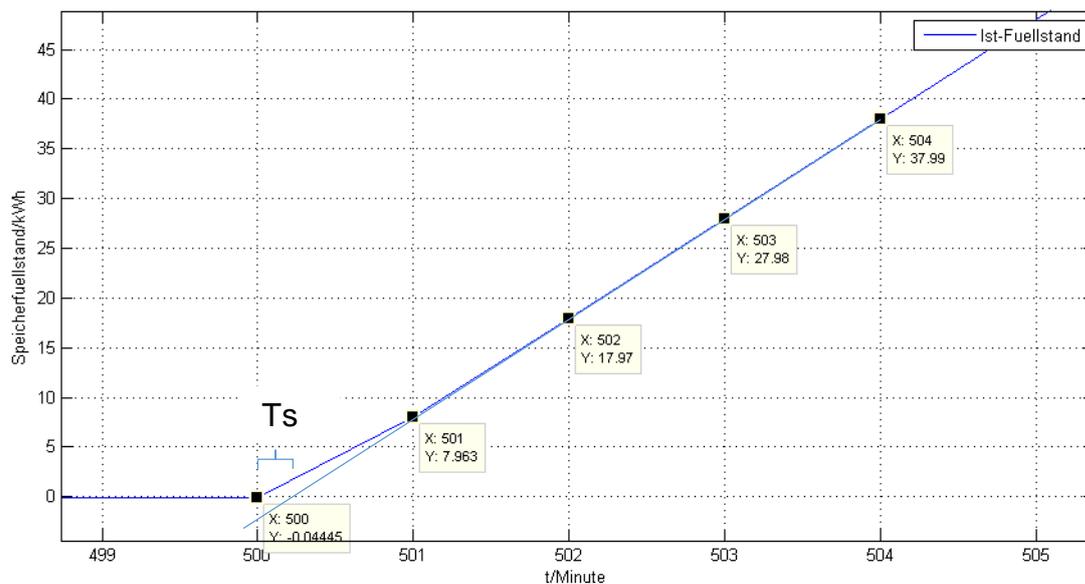


Abbildung 4-19: Sprungantwort des Pufferspeichers mit 100 kW und Geraden zur Bestimmung der Zeitkonstante T_s

Auf der Aufnahme ist zu ersehen, dass der Speicher seinen Füllstand stetig erhöht bei sprungförmiger Anregung mit 600 kW. Dargestellt ist der Zeitraum bis 5 Minuten nach dem Sprung. Nach der Verletzung der oberen Speichergrenze werden die BHKWs von der harten Regelung abgeschaltet und der Füllstand sinkt. Somit ist die Regelstrecke im Ganzen nichtlinear. Daher gilt die Definition der Regelstrecke als linear nur in einem Bereich um den Arbeitspunkt des Speichers. Dieser Bereich soll zwischen unterer und oberer Speichergrenze liegen. Mit dieser Einschränkung gilt:

$$X_a(t \rightarrow \infty) = \infty \quad (4-17)$$

Damit gilt, dass der Schichtenspeicher integrierendes Verhalten aufweist. Damit $a_0 = 0$ und es gilt:

$$G_S(s) = \frac{b_m \times s^m + b_{m-1} \times s^{m-1} + \dots + b_1 \times s + b_0}{a_n \times s^n + a_{n-1} \times s^{n-1} + \dots + a_1 \times s}$$

$$= \frac{b_m \times s^m + b_{m-1} \times s^{m-1} + \dots + b_1 \times s + b_0}{(a_n \times s^{n-1} + a_{n-1} \times s^{n-2} + \dots + a_1) \times s} \quad (4-18)$$

Aus Anfangswert und Anfangssteigung der Sprungantwort kann nun der Elementtyp bestimmt werden.

Der Anfangswert ist:

$$x_a(t = 0) = -0,04445 \text{ kWh} \approx 0 \quad (4-19)$$

Ein exakter Füllstand von 0 kWh konnte ohne größeren Aufwand aufgrund von Rundungsfehlern nicht eingestellt werden. Der erreichte Wert wird aber als ausreichend nah an 0 kWh angenommen, sodass auf 0 kWh gerundet wird.

Die Anfangssteigung ist:

$$x_a(t = 0) \neq 0 \quad (4-20)$$

Damit gilt:

$$n = m + 1 \quad (4-21)$$

Dies bedeutet jedoch, dass die Regelstrecke ein einfaches I-Verhalten aufweist. Da jedoch die Steigung von Minute 500 bis Minute 501

$$\begin{aligned} \Delta_{1.Minute} &= \frac{x_a(t = 501) - x_a(t = 500)}{1 \text{ Minute}} \\ &= \frac{7,963 \text{ kWh} - (-0,0445 \text{ kWh})}{1 \text{ min}} \approx \frac{8 \text{ kWh}}{\text{min}} \end{aligned} \quad (4-22)$$

kleiner ist als die Steigung ab Minute 1:

$$\begin{aligned} \Delta_{1.Minute+} &= \frac{x_a(t = 504 \text{ min}) - x_a(t = 501 \text{ min})}{504 \text{ min} - 501 \text{ min}} \\ &= \frac{37,99 \text{ kWh} - 7,963 \text{ kWh}}{3 \text{ min}} \approx \frac{10}{\text{min}} \end{aligned} \quad (4-23)$$

muss ein IT1-Verhalten vorliegen.

Damit lautet die kontinuierliche Übertragungsfunktion des Pufferspeichers (bei Vereinfachung durch Annahme eines zeitkontinuierlichen Verhaltens) im Bildbereich:

$$G_S(s) = \frac{Ks}{s \times (1 + T_s \times s)} \quad (4-24)$$

Die Konstante T_s kann bestimmt werden aus dem Schnittpunkt der Geraden mit der Zeitachse:

K_s wird bestimmt aus der Sprunghöhe und der Steigung der Geraden ab der Minute, in der die Steigung konstant ist (hier nach der ersten Minute der Beladung):

$$\Delta_{1.Minute+} = \frac{10}{\text{Minute}}$$

Die Sprungfunktion ist:

$$P_y(t) = P_{y0} \times E(t) \quad (4-25)$$

Mit

$$P_{y0} = 600 \text{ kW} \quad (4-26)$$

Allgemein gilt:

$$\frac{dx(t)}{dt} = K_s \times P_{y0} = \Delta_{1.Minute+} = \frac{10 \text{ kWh}}{\text{Minute}} \quad (4-27)$$

Umgestellt nach K_s :

$$\begin{aligned} K_s &= \frac{dx(t)}{dt} \times \frac{1}{P_{y0}} = \frac{10 \text{ kWh}}{\text{Minute}} \times \frac{1}{600 \text{ kW}} = \frac{10}{600} \times \frac{\text{kWh}}{\text{Minute} \times \text{kW}} \\ &= \frac{10}{600} \times \frac{h}{\text{Minute}} = \frac{10}{600} \times \frac{h}{\frac{1}{60} h} = 1 \end{aligned} \quad (4-28)$$

Der Schnittpunkt wird rechnerisch ermittelt.

Allgemein gilt die Geradengleichung:

$$y = m \times t + b \quad (4-29)$$

Mit y als Füllstandshöhe, m als Steigung, t als Zeit, b als Anfangsfüllstand bei $t = 0$.
Mit den beiden (x/y)-Punkten P1(501. Minute / 7,963 kWh) und P2(502. Minute / 17,97 kWh) und der bekannten Steigung von $m = 10 \text{ kWh/Minute}$ ergibt sich:

$$y(t) = \frac{10 \text{ kWh}}{\text{Minute}} \times t - 2 \text{ kWh} \quad (4-30)$$

Bei einem Füllstand von $y(t) = 0 \text{ kWh}$ ergibt sich:

$$T_s = t = \frac{2 \text{ kWh}}{600 \text{ kW}} = \frac{1}{300} h = 0,2 \text{ Minuten} = 12 \text{ sek} \quad (4-31)$$

Die Übertragungsfunktion der Regelstrecke lautet somit:

$$G_s(s) = \frac{K_s}{s \times (1 + T_s \times s)} = \frac{1}{(s \times (1 + 12 \text{ sek} \times s))} \quad (4-32)$$

Daraus lässt sich schließen:

- Die minütliche Ladung des Schichtenspeichers ist nach einer Minute bei konstanter Eingangsleistung konstant
- Die minütliche Ladung des Schichtenspeichers wird im Rahmen dieser Bachelorarbeit Minutenladung genannt und hat die Einheit kWh, bei 600 kW ist die Beladung pro Minute $600 \text{ kWh}/60 = 10 \text{ kWh}$
- Bei einem Führungssprung und konstant anliegender Leistung wird der Schichtenspeicher nach einer Minute nur mit 80% der aktuellen und 20% der vorherigen Minutenladung beladen

Somit gilt:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minutenladung} \\
 &= \frac{\text{Thermische Eingangsleistung des Schichtenspeichers}}{60} h \\
 &= \frac{P_{th,e}}{60} h
 \end{aligned} \tag{4-33}$$

Und für die Beladeleistung gilt:

$$P_{Beladung} = P_{th,BHKW} + P_{th,SLK} - P_{th,Last} = \text{Thermische Eingangsleistung des Schichtenspeichers} \tag{4-34}$$

$$Q_{neu} = Q_{alt} + \int_{t_{Start}}^{t_{Ende}} (0,2 \times P_{Beladung}(t - 1 \text{ minute}) + 0,8 \times P_{Beladung}(t)) dt \tag{4-35}$$

Q_{neu} ist der neue Füllstand nach der Beladung mit der Summenleistung aus thermischer Eingangs- (BHKW und SLK) und Ausgangsleistung (Last), Q_{alt} der bisherige, t_{Start} und t_{Ende} ist die Endzeit der Beladung.

4.4.1.2 Negativer Sprung

Um die Schlussfolgerungen aus dem vorherigen Kapitel zu überprüfen, wird ein negativer Sprung auf den Schichtenspeicher gegeben.

Es wird eine BHKW-Leistung von 600 kW abgeschaltet was dazu führt, dass der Speicher bilanziell mit -600 kW entladen wird.

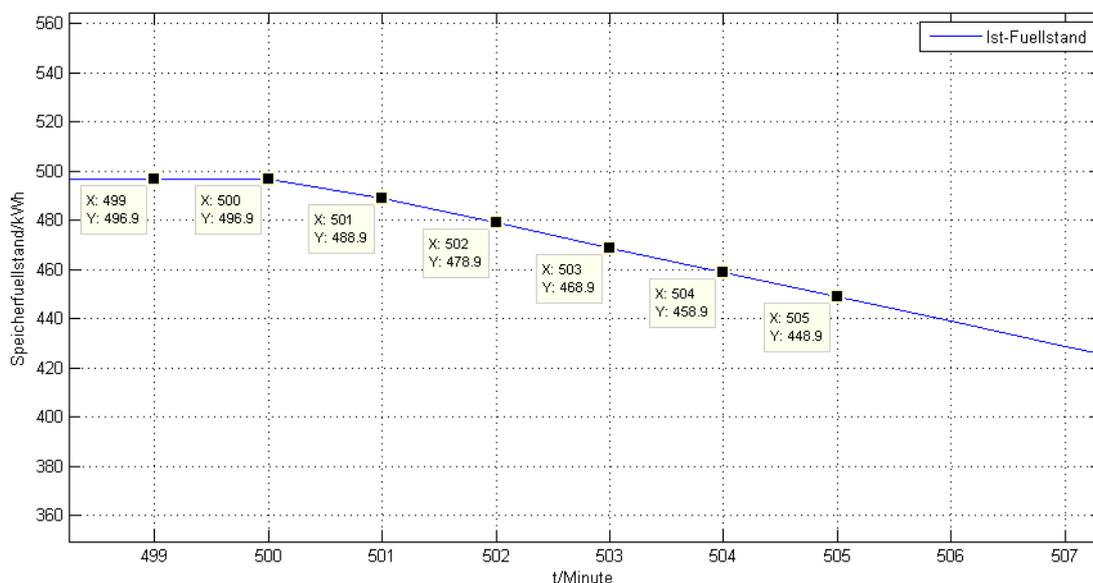


Abbildung 4-20: Sprungantwort bei negativem Sprung von 600 kW

Zu erkennen ist, dass in der ersten Minute der Leistungsverringerung der Schichtenspeicher nur zu 80% der Minutenentladung entladen wird. In der ersten Minute sinkt der Speicher um 8 kWh. Nach der ersten Minute entlädt sich der Schichtenspeicher mit 100% der Minutenentladung jede Minute. Was einer Steigung des Füllstandes von -10 kWh/Minute entspricht.

Somit gelten die Erkenntnisse aus Kapitel 4.4.1.1 als validiert.

4.4.2 Sprungantwort mit Veränderung der thermischen Last

Es wird die Last variiert. Dabei soll untersucht werden, wie sich eine Laständerung auf den Speicherfüllstand auswirkt.

Negativer Lastsprung

Die Last wird um 600 kW verringert. Dies führt bei konstant gehaltener Eingangsleistung zu einem Beladen des Speichers. Ab Minute 100 wird beladen. In Minute 101 hat sich der Speicher um 8 kWh beladen. Jede weitere Minute belädt sich der Speicher konstant um 10 kWh.

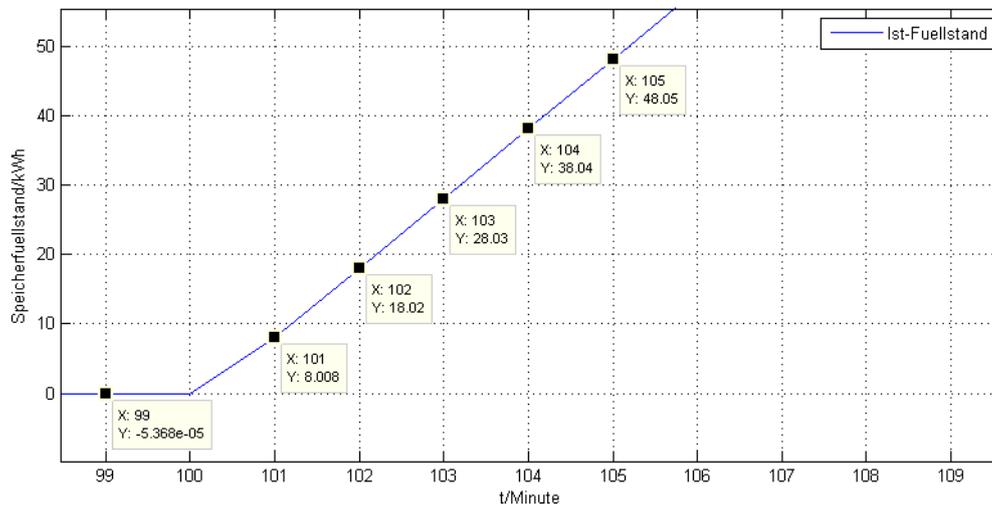


Abbildung 4-21: Sprungantwort bei negativen Sprung der Last

Positiver Lastsprung

Bei konstanter Eingangsleistung wird die Last in Minute 100 um 600 kW erhöht. zu erkennen ist, dass bei positivem Lastsprung der Schichtenspeicher entladen wird.

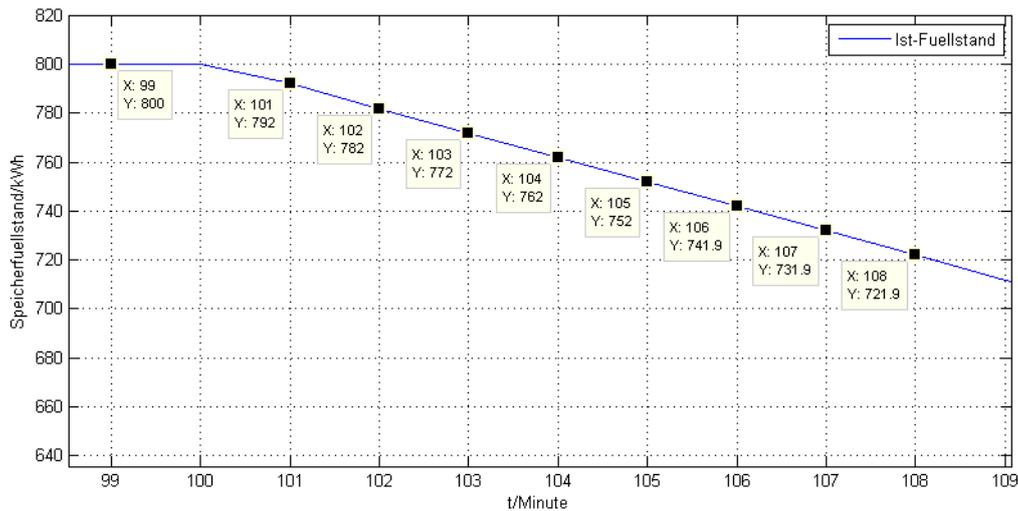


Abbildung 4-22: Sprungantwort bei positiven Lastsprung

Die Ist-Last entlädt den Speicher wie erwartet. Wenn die Ist-Last kleiner ist als die thermische Eingangsleistung, steigt der Füllstand. Bei größerer Ist-Last als thermischer Eingangsleistung sinkt der Füllstand. Somit steigt oder sinkt der Füllstand des Speichers in Abhängigkeit der anliegenden thermischen Bilanzleistung.

Somit wirkt sich die thermische Last der Liegenschaft ähnlich auf den Ist-Füllstand aus wie die Beladung durch den Speicher.

4.5 Berechnung des Füllstandes

Die Wärmemenge in einem Wärmespeicher hängt von der Temperaturspreizung ab. Diese ist die Differenz zwischen der Vorlauf- und Rücklaufemperatur. Je größer diese ist, desto höher ist die nutzbare Energie je Liter Wasser im Speicher (39).

Die Berechnung der Wärmemenge des komplett aufgeladenen Speichers erfolgt nach folgender Formel:

$$Q_{ges} = m \times C \times \Delta T_{ges} \quad (4-36)$$

m ist die Masse des Speichermediums. Im hiesigen Wärmespeicher wird Wasser verwendet. Laut Konfigurationstabelle in Kapitel 9.1 beträgt das Volumen 20.000 m³. Nach (40) beträgt die Dichte ρ von Wasser bei 20°C ca. 1 kg/m³. Die Dichte ist abhängig von der Temperatur. Die Abhängigkeit wird laut dem C4DSI allerdings im Speichermodell nicht berücksichtigt. Daher kann diese Dichte für den gesamten Temperaturbereich verwendet werden. Somit gilt (41):

$$m = V \times \rho \quad (4-37)$$

C ist die Wärmekapazität von Wasser. Diese liegt bei 4,18 kJ/(kg x K) (42). ΔT_{ges} ist die Temperspreizung, diese liegt laut Konfigurationstabelle bei 39 Kelvin. Somit beträgt die Gesamtwärmeenergie im Speicher:

$$Q_{ges} = 20.000 \text{ kg} \times 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}} \times 39 \text{ K} = 3260400 \text{ kJ} \quad (4-38)$$

$$= 905,7 \text{ kWh}$$

Die Berechnung des Ist-Füllstandes erfolgt über die Temperatur der einzelnen Wasserschichten im Speicher. Laut C4DSI hat jede Schicht Simulinkmodell das gleiche Volumen. Somit kann das arithmetische Mittel der gemessenen Temperaturen der Schichten um die Rücklaufemperatur reduziert werden um die Differenztemperatur zu bilden. Die Rücklaufemperatur ist dieselbe wie beim BHKW und SLK. Diese beträgt laut Konfigurationstabelle 50°C. Somit berechnet sich die Temperaturdifferenz zu:

$$\Delta T_{Ist} = \overline{T_{Schichten}} - T_{Rück} \quad (4-39)$$

Somit gilt:

$$Q_{Ist} = m \times C \times \Delta T_{Istst} \quad (4-40)$$

Beispielsweise beträgt der Füllstand bei einer mittleren Schichttemperatur von 60°C:

$$Q_{ist} = 20.000 \text{ kg} \times 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}} \times (60^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}) \quad (4-41)$$

$$= 232,2 \text{ kWh}$$

Der Bereich zwischen leerem Speicher bei 0 kWh und vollem Speicher bei 905,7 kWh wird im Rahmen dieser Arbeit als Arbeitsbereich definiert.

4.6 Harte Regelung der Liegenschaft

Im Liegenschaftsmodell ist eine harte Regelung eingebaut. Diese triggert auf die Über- oder Unterschreitung von je einer bestimmten Schichttemperatur. Damit wird gewährleistet, dass bei Leerlaufen des Speichers BHKW und SLK eingeschaltet und bei Vollwerden des Speichers BHKW und SLK abgeschaltet werden.

Leerlaufen bedeutet, dass der Ist-Füllstand auf < 0 kWh absinkt, Volllaufen bedeutet, dass der Ist-Füllstand > 905,7 kWh ansteigt.

Liegt einer negativen Leistungsbilanz vor, entlädt sich der Speicher. Die Schichttemperaturen sinken dabei ab.

Wenn die Bilanzleistung positiv ist lädt sich der Speicher auf. Dabei steigen die Schichttemperaturen im Schichtenspeicher.

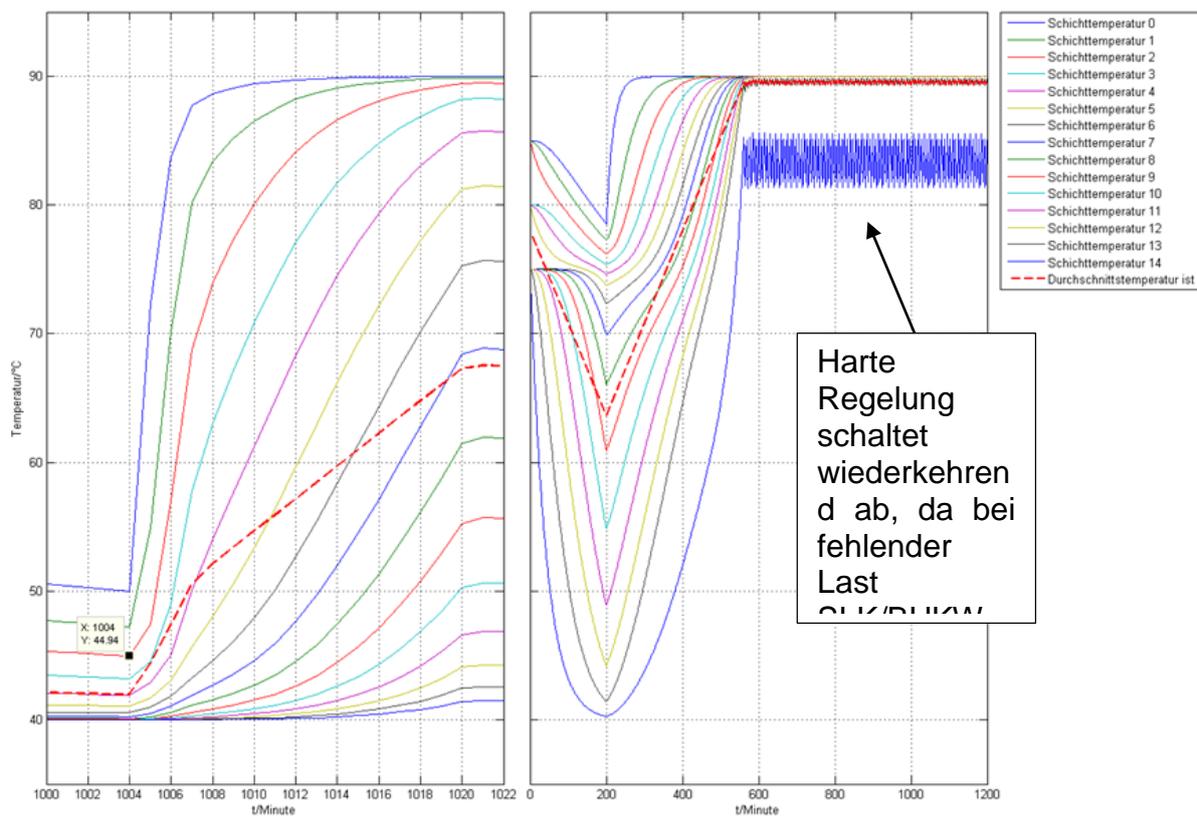


Abbildung 4-23: Links: Zwangs-Einschaltung, Rechts: Zwangs- Ausschaltung durch harte Regelung

Links in Abbildung 4-23 ist eine Zwangseinschaltung zu erkennen. Bei einer Bilanzleistung von -50 kW sinkt die durchschnittliche Temperatur linear um ca. $0,036 \text{ }^\circ\text{C}$ pro Minute ab. Ab Minute 1004 schaltet die Liegenschaft alle BHKWs und das SLK mit ihrer Maximalleistung ein. Getriggert wird dabei auf die Schichttemperatur 3. Sobald diese unter 45°C fällt wird für die Dauer der MRT eingeschaltet.

Rechts in Abbildung 4-23 ist eine Zwangsabschaltung zu erkennen. Wenn die Schichttemperatur 14 über 85°C ansteigt, werden Anlagen für die Dauer ihrer MST abgeschaltet, damit die Schichttemperaturen absinken. Bei einer permanenten Beladung mit 250 kW durch das SLK wird dieses für die Dauer seiner MST abgeschaltet und lädt danach den Speicher wieder auf. Dies führt dazu, dass die Temperaturen periodisch ansteigen und wieder abfallen, sobald die Schichttemperatur 14 wieder über 85°C ansteigt.

Somit erlaubt die harte Regelung den Ist-Füllstand der Speicher nur in einem Arbeitsbereich. Wird eine obere oder untere Speichergrenze verletzt wird provoziert dies die harte Regelung, die die BHKWs und das SLK der entsprechenden Liegenschaft für die Dauer ihrer Mindestlaufzeit einschaltet oder für die Dauer ihrer Mindestabschaltzeit ausschaltet.

4.7 Zusammenfassung der Technischen Analyse

Das BHKW- und SLK-Modell weisen ein komplexes nichtlineares Übertragungsverhalten auf. Zum einen kann eine Ausgangsleistung nur über eine Kennlinie erreicht werden und zum anderen können beide Anlagen nicht mit hoher Frequenz getaktet werden.

Die Schaltfreigabe erlaubt bei den BHKW das Wiedereinschalten erst nach einer Ruhezeit von mindestens 15 Minuten. Ebenfalls nach 15 Minuten darf ein eingeschaltetes BHKW erst wieder ausgeschaltet werden.

Gleiches Verhalten weißt das SLK auf, welches allerdings nach 3 Minuten wieder ein- oder ausgeschaltet werden kann.

Entgegen der Realität sind die Gesamtwirkungsgrade von BHKW und SLK bei 100 %. Dies liegt an der Einstellung durch die Konfigurationstabelle und wird für diese Bachelorarbeit auch nicht angepasst.

Der Schichtenspeicher weißt ein IT1-Verhalten auf (Bei Vereinfachung auf zeitkontinuierliches Verhalten). Es integriert die anliegende thermische Bilanzleistung über die Zeit mit einer Verzögerung in der ersten Minute auf. Für die Auslegung der Regelung kann aber in Absprache mit dem C4DSI die Regelung als einfaches I-Glied aufgefasst werden.

Ein weiteres Element, welches für die Regelung zu berücksichtigen ist, stellt die harte Regelung des Liegenschaftsmodells dar. Diese verhindert ein Leerlaufen sowie ein Überfüllen des Schichtenspeichers und wird ausgelöst, wenn bestimmte Schichttemperaturen im Speicher je eine maximale oder minimale Temperatur über- oder unterschreiten. Die Erkenntnis ist:

- Wenn die Schichttemperatur 14 über 85°C ansteigt, werden BHKW und SLK abgeschaltet
- Wenn die Schichttemperatur 3. unter 45°C absinkt werden BHKW und SLK eingeschaltet

Diese Erkenntnisse werden für den Entwurf der Regelung im folgenden Kapitel 5 berücksichtigt.

5 Entwurf

Auf Grundlage der technischen Analyse in Kapitel 4 werden in diesem Kapitel die Möglichkeiten diskutiert, wie die Anforderungen aus Kapitel 3 erfüllt werden können. Zuerst wird hierbei die Problemstellung genauer herausgearbeitet. Anschließend Lösungsmöglichkeiten analysiert, gegeneinander abgewogen und am Schluss der Algorithmus ausgearbeitet, der in Kapitel 5.6.2 implementiert wird.

5.1 Problemanalyse

Zur Teilnahme an Day-Ahead-Handel gilt es einen am Vortag abgegebenen Fahrplan einzuhalten. Dieser FP zeigt an, wie die elektrische Leistung über den Tag verlaufen soll. Da nur die BHKWs der Liegenschaften elektrische Leistung liefern, wird treten Fahrplanabweichungen nur durch Störung der BHKWs auf.

In Kapitel 4.6 wurde die harte Regelung der Liegenschaft untersucht. Diese schaltet BHKWs und SLKs ein oder, wenn der Füllstand des entsprechenden Speichers leerläuft oder wenn dieser zu hoch ist. Solange also der Füllstand einer Liegenschaft sich im Arbeitsbereich des Schichtenspeichers befindet, werden die BHKWs allein durch den Fahrplan beeinflusst.

Der Fahrplan basiert auf eine stündlich gemittelte Wärmelastprognose für den Folgetag. Da die Wärmeprogno**se** **nur** eine Prognose ist, stellen sich Abweichung zwischen der realen Wärmelast und Wärmelastprognose ein. Diese wiederum führen dazu, dass die Wärmeerzeuger wie BHKW und SLK nicht mehr dem abgegebenen Fahrplan folgen können.

Somit treten nur Eingriffe durch die harte Regelung auf, wenn die Ist-Last auf Liegenschaftenebene nicht mit der prognostizierten Last übereinstimmt. Wenn also die Ist-Last größer ist als die Prognoselast, können Speicher leerlaufen und wenn die Ist-Last kleiner als prognostiziert ist, volllaufen.

Diese Eskalation wird dargestellt:

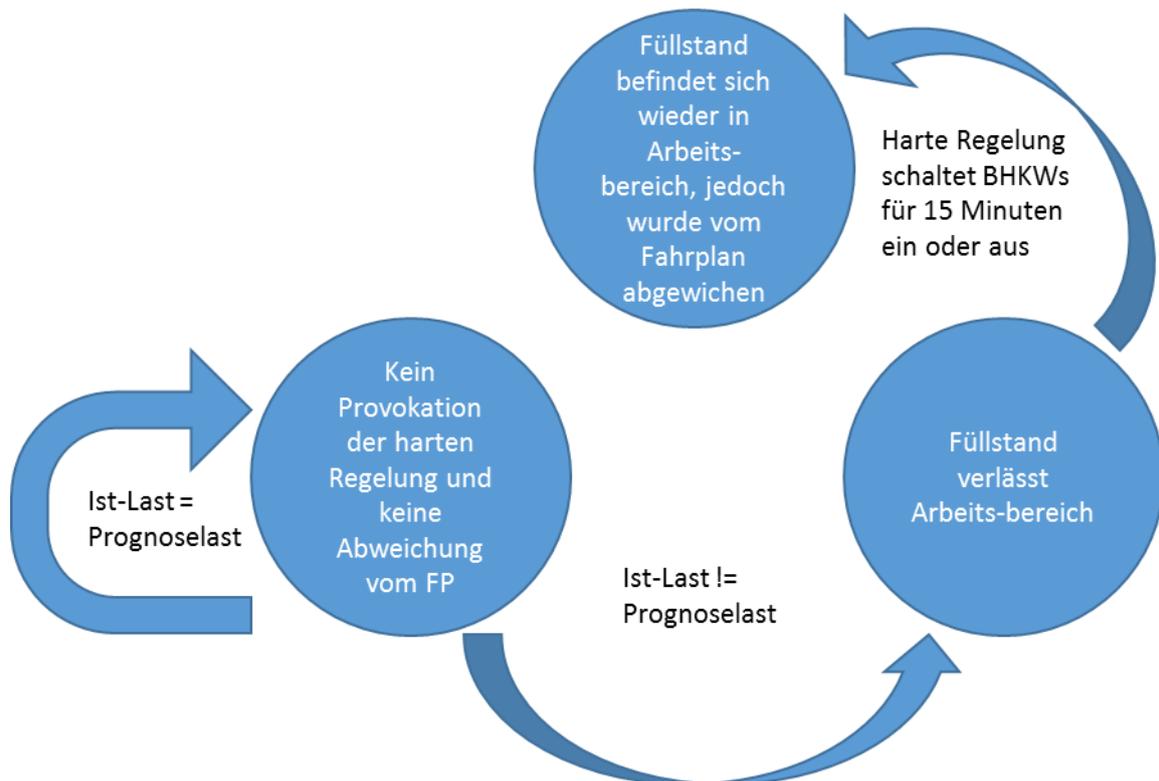


Abbildung 5-1: Eskalation der Störung auf Liegenschaftsebene bis zur Abweichung des Fahrplans

5.2 Interne Re-Dispatch-Maßnahmen

Um den Fahrplan einzuhalten können sog. Internen Re-Dispatch-Maßnahmen (Siehe Kapitel 2.9.1) eingeleitet werden. Mit diesen kann folgendes erreicht werden:

1. Einhaltung des Ist-Füllstandes im Arbeitsbereich
2. Kompensation von Fahrplanabweichungen durch gegenläufigen BHKW-Betrieb

Zu 1:

Bei drohendem Volllaufen des Speichers kann die Regelung thermische Eingangsleistung reduzieren. Fahrplanneutral wäre ein Abschalten von SLK-Leistung. Nicht Fahrplanneutral wäre die Leistungsmodulation der BHKWs. Jedoch kann die Regelung die Leistung im Teillastbereich drosseln, oder steigern, ohne dabei Schalthandlungen durchzuführen. Dies hätte den Vorteil, dass die BHKW sofort wieder ihre Leistung nach Fahrplan einstellen könnten, sobald der Ist-Füllstand nicht mehr droht den Arbeitsbereich zu verlassen.

Das SLK kann verhindern, dass der Speicher leerläuft, und die harte Regelung provoziert wird. Falls die Last jedoch zu groß wird, können BHKWs im Teillastbereich unterstützen.

Zu 2:

Falls bereits vom Fahrplan abgewichen wurde, kann diese Abweichung durch eine gegenläufige Fahrweise einzelner BHKWs kompensiert werden. Dazu muss zentral die Fahrplanabweichung festgestellt und die geeignete Liegenschaft ausgewählt werden, deren BHKWs die Abweichung kompensieren. Beispielsweise kann eine unplanmäßige Leistungserhöhung in Liegenschaft 1 kompensiert werden durch die Leistungsminderung der BHKWs in Liegenschaft 2.

Aus diesen beiden internen Re-Dispatch-Maßnahmen ergibt sich folgender Regelablauf:

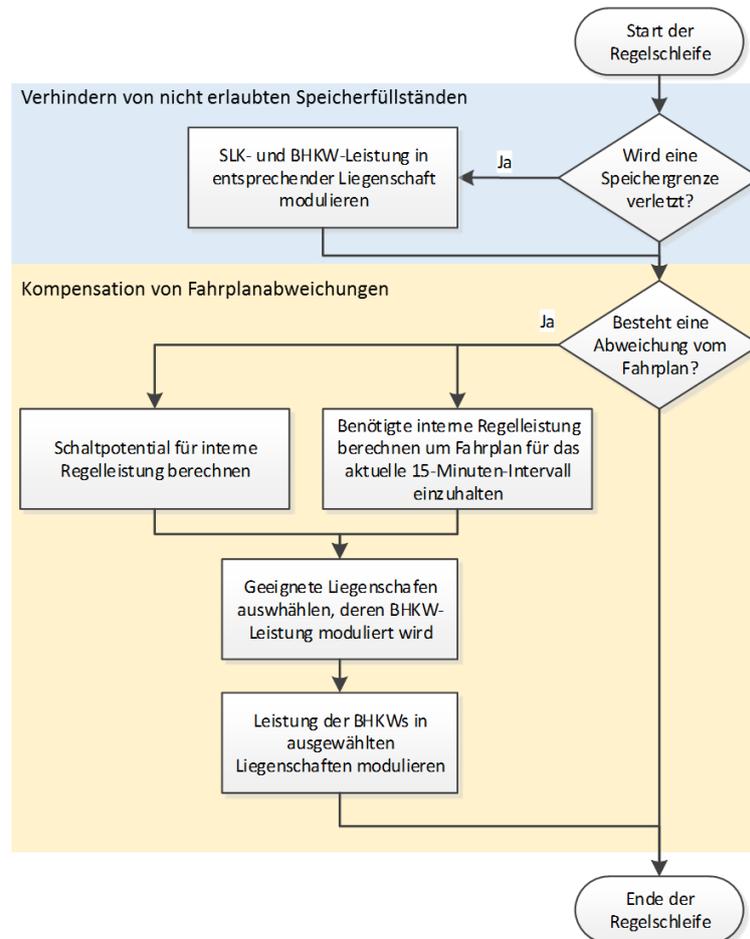


Abbildung 5-2: Grundprinzip der Regelung

Im ersten Schritt der Regelung wird überprüft, ob eine Verletzung der Speichergrenzen droht, also der Ist-Füllstand möglicherweise seinen Arbeitsbereich verlässt und damit die harte Regelung provoziert. Wenn dies der Fall ist, wird die Regelung die SLK- und BHKW-Leistung der entsprechenden Liegenschaft so modulieren, dass der Füllstand wieder im Arbeitsbereich liegt.

Da nun möglicherweise durch den Einsatz der BHKW vom Fahrplan abweichende elektrische Leistung erbracht oder zurückgehalten wurde, wird im nächsten Schritt geprüft, ob die Ist-Leistung des gesamten VK vom Fahrplan abweicht. In diesem Falle wird untersucht, welche Liegenschaften Schaltpotential für interne Regelleistung zur Verfügung stellen können und es wird berechnet, wie viel interne Regelleistung notwendig ist.

Als Schaltpotential wird die elektrische Leistung bezeichnet, die eine Liegenschaft aktuell zusätzlich einschalten oder abschalten kann. Das einschaltbare Schaltpotential wird als Einschaltpotential bezeichnet, das abschaltbare Schaltpotential als Abschaltpotential. Wie in Kapitel 4.3.1 festgestellt, weisen die BHKW ein Kennlinienverhalten auf. Es kann nur eine maximale Leistung abgefahren werden. Des Weiteren kann eine Leistungserhöhung in einer „aushelfenden“ Liegenschaft dazu führen, dass in dieser der Ist-Füllstand ebenfalls die obere Speichergrenze verletzt. Eine Abschaltung von BHKW-Leistung könnte dagegen den Ist-Füllstand in entsprechender Liegenschaft zu stark absenken. Dies muss bei der Berechnung des Schaltpotentials berücksichtigt werden.

Als Interne Regelleistung wird die Leistung definiert, die ein- oder ausgeschaltet werden muss um die mittlere Ist-Leistung des VK gemäß Anforderung in 0 im aktuellen 15-Minuten-Intervall wieder auf den Fahrplan zu regeln. Der Begriff ist angelehnt an den Begriff Regelernergie, der in Kapitel 2.3 besprochen wurde.

Anschließend wird die Interne Regelleistung durch einen Auswahlalgorithmus auf die Liegenschaften verteilt. Dabei modulieren die BHKWs ihre Leistung entsprechend und die Ist-Leistung des VK zu erhöhen oder zu verringern.

5.3 Kaskadenregelung

Mit den beiden grundlegenden Maßnahmen aus Kapitel 5.2 ergeben sich weitere Anforderungen an die Regelung. So muss der Füllstand der Speicher fortwährend gemessen werden um ihn mit dem Soll-Füllstand, der sich aus dem Fahrplan ergibt zu vergleichen und eine drohende Grenzverletzung des Speichers zu detektieren, bevor die harte Regelung eingreift.

In Kapitel 0 wurde aufgenommen, dass die Regelung verteilt ablaufen soll, für einen Betrieb auf einem Multi-Agentensystem. Außerdem soll der Fahrplan im Mittel über 15-Minuten-Intervalle eingehalten werden. Mit dieser Anforderung sowie den im vorherigen Kapitel diskutierten Re-Dispatch-Maßnahmen erscheint es sinnvoll, eine Kaskadenregelung zu implementieren.

Nach (43 S. 252) ist die Implementierung einer unterteilbaren Regelstrecke in eine Kaskadenregelung sinnvoll, wenn mehrere Größen zu regeln sind. Da die Regelung nach Anforderung ohnehin verteilt arbeiten soll, wird sie als Kaskadenregelung implementiert. Dazu werden die Aufgaben der Regelung auf einen Hauptregler und mehrere Hilfsregler aufgeteilt.

In Abbildung 5-3 ist die Kaskadenregelung dargestellt:

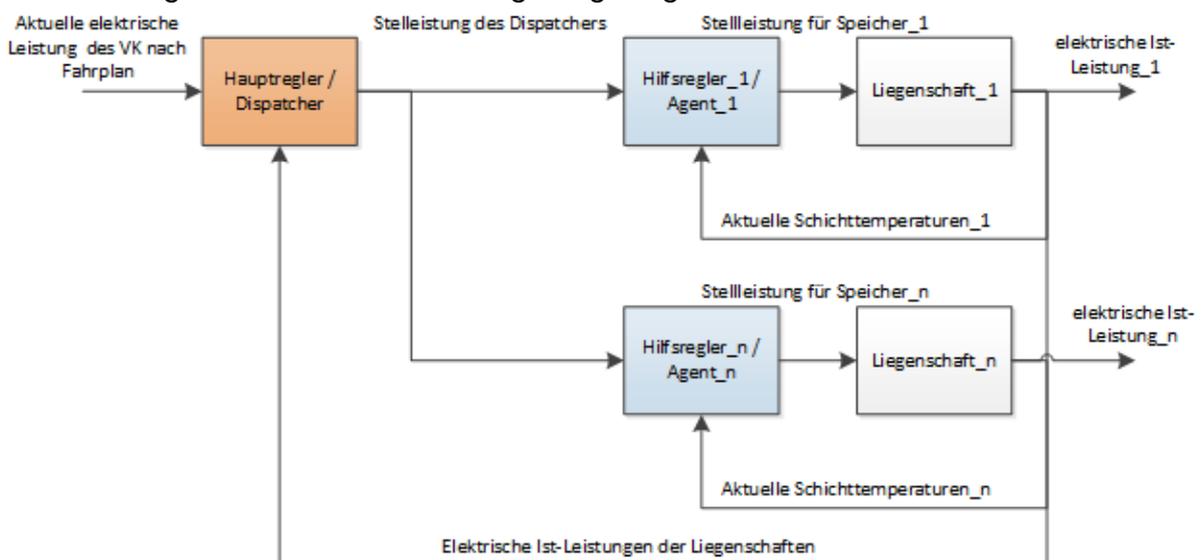


Abbildung 5-3: Kaskadenregelung für das VK

Dabei wird die Regelung in einen Hauptregler, den sogenannten Dispatcher und mehreren Hilfsreglern, den sogenannten Agenten aufgeteilt. Der Dispatcher übernimmt dabei Aufgaben, die auf das gesamte virtuelle Kraftwerk wirken. Die Agenten übernehmen die Regelung der Ist-Füllstände auf Liegenschaftsebene.

Am Ausgang der Liegenschaftsmodelle wird die elektrische Ist-Leistung gemessen. Diese wird dem Dispatcher übergeben, welcher mittels Vergleich zur aktuellen Sollleistung nach Fahrplan und unter Berücksichtigung von der internen Regelleistung und des Schaltpotentials die elektrische Stelleistung jeder einzelnen Liegenschaft berechnet. Die Agenten verarbeiten die Stellgröße des Dispatchers. Dabei berechnen sie wiederum die thermische Stelleistung, die an den Speicher übergeben wird.

Die in Abbildung 5-2 dargestellten Regelaufgaben werden nun weiter ausgefächert und dabei wie folgt verteilt:

1. Agent: Verhindern von nicht erlaubten Speicherfüllständen

- a. Messung des Ist-Füllstandes nach Formel (4-39)
- b. Berechnung der nötigen Füllstandsänderung um Ist-Füllstand im Arbeitsbereich zu halten
- c. Berechnung der dadurch notwendigen thermischen Eingangsleistung des Speichers
- d. Berechnung der möglichen ein- oder abschaltbaren thermischen Leistung
- e. Verteilung der notwendigen und möglichen thermischen Leistung auf die SLK und BHKW

2. Dispatcher: Kompensation von Fahrplanabweichungen

- a. Schaltpotential für interne Regelleistung berechnen
- b. Benötigte interne Regelleistung berechnen um Fahrplan für das aktuelle 15-Minuten-Intervall einzuhalten
- c. Geeignete Liegenschaften auswählen deren BHKW-Leistung moduliert wird
- d. Leistung der BHKWs in ausgewählten Liegenschaften modulieren

5.4 Regelalgorithmen des Agenten

Ziel des Agenten ist es, den Füllstand des Speichers im Arbeitsbereich zu halten. Dazu wurde aufbauend auf die entwickelte Arbeitsteilung in Kapitel 5.3 ein Algorithmus entwickelt.

Grundsätzlich schwankt der Ist-Füllstand aufgrund der thermischen Eingangsleistung und der Wärmelast. Jedoch kann ein Soll-Füllstand(t) berechnet werden, der sich aus dem einzelnen Fahrplan für die jeweilige Liegenschaft ergibt. Dieser Sollfüllstand gibt es Auskunft darüber, welchen Füllstand der Speicher hat, wenn die Ist-Last gleich der Prognoselast ist und die BHKWs und das SLK nicht vom Fahrplan abgewichen sind.

Folgende Abbildung zeigt, welcher Bedingungen vorliegen müssen, damit der Agent regelt:

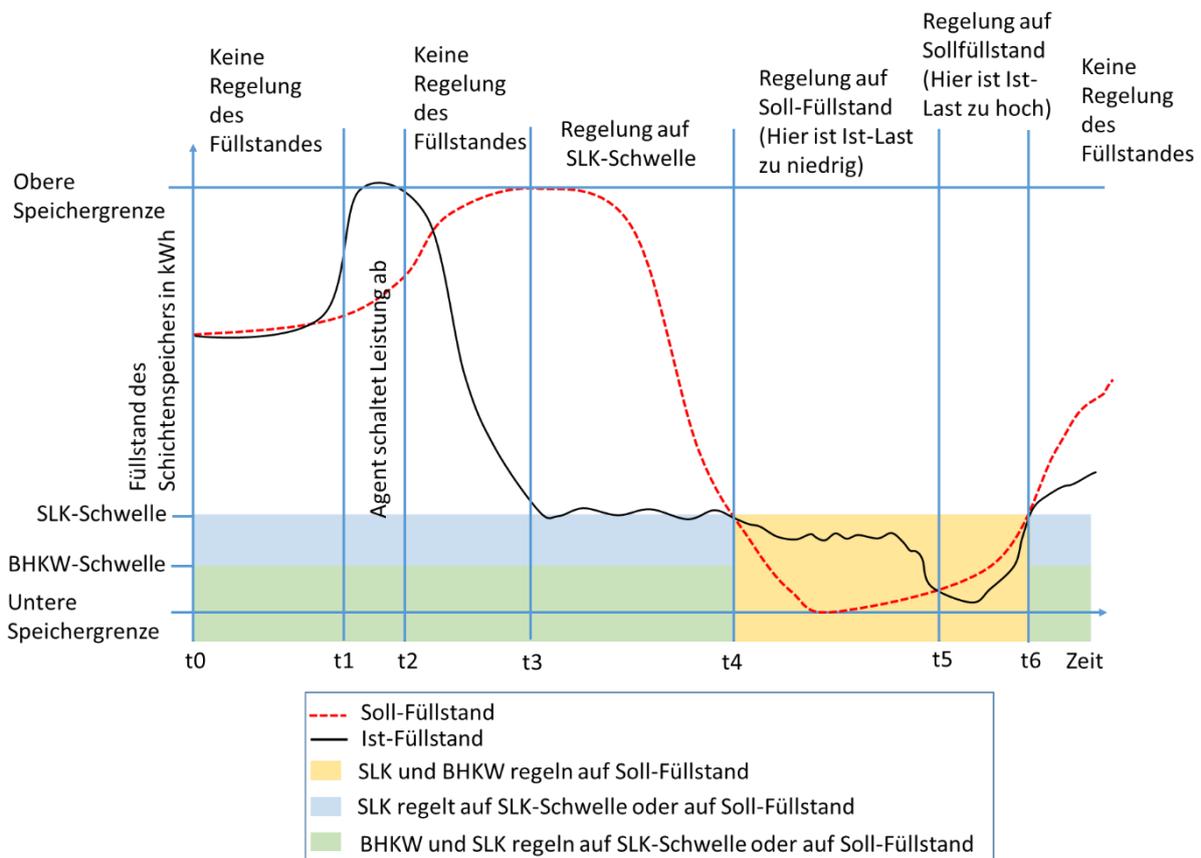


Abbildung 5-4: Grundprinzip des Agenten

Zu sehen ist ein typischer Verlauf des Soll-Füllstandes nach Fahrplan und des Ist-Füllstandes. Im ersten ZeitKapitel folgt der Ist-Füllstand dem Soll-Füllstand. Ab t_1 jedoch kann z. B. durch zu geringe Ist-Last der Ist-Füllstand ansteigen und damit die obere Speichergrenze verletzen und den Arbeitsbereich verlassen. Ab t_2 sinkt der Ist-Füllstand wieder und fällt kurzzeitig unter die SLK-Schwelle. Diese ist eine Füllstandshöhe, die beliebig eingestellt werden kann.

Durch den Einsatz des SLK wird jedoch der Ist-Füllstand gehalten. Ab t_4 fällt der Soll-Füllstand unter die SLK-Schwelle. In diesem gelb markierten Bereich wird der Ist-Füllstand möglichst auf den Soll-Füllstand gehalten. Ab t_6 wird wieder lediglich auf die SLK-Schwelle geregelt, falls der Ist-Füllstand unter diese herabsinkt, da der Soll-Füllstand wieder über der SLK-Schwelle liegt.

Ziel dieser Regelstrategie ist es, so wenig wie möglich zu regeln und lediglich nicht erlaubte Füllstände, die die harte Regelung provozieren zu verhindern. Da eine Provokation zur Folge hat, dass die BHKWs mit maximaler Leistung mindestens 15 Minuten eingeschaltet oder 15 Minuten ausgeschaltet werden, wird versucht mit weniger BHKW-Leistung und in kürzerer Zeit den Ist-Füllstand in den Arbeitsbereich zu ziehen.

Die Verletzung der unteren Grenze kann sogar gänzlich ohne BHKW-Einsatz verhindert werden, wenn die Ist-Last nicht größer wird als die Leistung des SLK. Bei sehr großer Last kann jedoch der Ist-Füllstand trotz SLK-Einsatz sehr stark absinken und fällt unter die BHKW-Schwelle. Dann wird versucht mittels BHKW-Leistung im Teillastbereich die möglicherweise kurze Lastspitze abzufangen.

Es wird darauf hingewiesen, dass der Agent keine Schalthandlungen zum Regeln ausführt sondern lediglich den Teillastbereich verwendet. Ausgeschaltete BHKWs können somit nicht für den Regelvorgang verwendet werden. Eingeschaltete BHKWs werden zum Füllstand absenken lediglich im Teillastbereich bis auf die Mindestleistung gedrosselt.

Somit kann folgender Aktionskatalog für den Agenten aufgestellt werden:

| Bedingung | Aktion |
|--|--|
| Droht im nächsten Zeitschritt die Verletzung der oberen Speichergrenze -> Füllstand im nächsten Zeitschritt muss berechnet werden mit Formel (4-35) | BHKW-Leistung bis auf Minimalleistung modulieren, SLK ausschalten |
| Ist-Füllstand > Obere Speichergrenze | BHKW-Leistung bis auf Minimalleistung modulieren, SLK ausschalten |
| BHKW-Schwelle < Ist-Füllstand < SLK-Schwelle UND Soll-Füllstand > SLK-Schwelle | SLK schaltet ein um Ist-Füllstand über SLK-Schwelle zu heben |
| Ist-Füllstand < BHKW-Schwelle UND Soll-Füllstand > SLK-Schwelle | SLK wird eingeschaltet und BHKW im Teillastbereich moduliert um Ist-Füllstand über SLK-Schwelle zu heben |
| BHKW-Schwelle > Soll-Füllstand < SLK-Schwelle | Ist-Füllstand wird von SLK und BHKW auf Soll-Füllstand geregelt |
| Soll-Füllstand < BHKW-Schwelle | Ist-Füllstand wird von SLK und BHKW auf Soll-Füllstand geregelt |

Tabelle 5-1: Aktionskatalog des Agenten:

Nach diesem Aktionskatalog wird der Regler in Kapitel 6.1 implementiert.

5.5 Weitere Optionale Lösungsmöglichkeiten für den Agenten

In Kapitel 5.4 wurde der Regelalgorithmus des Agenten für die weitere Implementierung dargestellt. Dabei handelt der Agent nach einem Aktionskatalog. Bestimmte Konstellationen von Anlagenwerten führen zu bestimmten Aktionen.

In diesem Kapitel sollen weitere Lösungsmöglichkeiten vorgestellt werden, nach denen der Agent ebenfalls implementiert werden kann. Diese können im Rahmen dieser Bachelorthesis aus Zeitgründen jedoch nicht mehr getestet werden.

5.5.1 Keine Regelung

Anstatt einen Algorithmus zu implementieren, der verhindern soll, dass die Speichergrenzen verletzt werden, kann auch auf eine Regelung verzichtet werden. Es

wird dabei die Harte Regelung der Liegenschaft ausgenutzt, die bei zu hohem und zu niedrigem Füllstand die BHKWs und das SLK ab- oder ein einschalten.

Vorteile wären:

- Kein Implementationsaufwand
- Verringerte Rechenzeit durch praktischen Wegfall der inneren Regelschleife
- Einfachere Fehlersuche, da lediglich der Dispatcher Programmierfehler enthalten kann

Nachteile wären:

- Möglicherweise höhere Anzahl an Fahrplanabweichungen, die über die Toleranzgrenze des Fahrplans hinausgehen, da der Füllstand durch Modulation im Teillastbereich der BHKWs nicht im Arbeitsbereich gehalten wird und damit die Harte Regelung häufiger provoziert wird
- Höhere Anzahl an Schalthandlungen durch Nicht-Ausnutzen des Teillastbereiches

5.5.2 Ständige Regelung auf den Soll-Füllstand

Anstelle den Ist-Füllstand erst unterhalb der SLK-Schwelle auf den Soll-Füllstand zu regeln, wäre es auch denkbar, ihn im gesamten Arbeitsbereich zu auf den Soll-Füllstand zu halten.

Vorteile wären:

- Eine nicht prognostizierte plötzlich eintretende und länger anhaltende thermische Spitzenlast würde den Ist-Füllstand nicht unter die untere Speichergrenze führen, sofern der Soll-Füllstand genügend Abstand zu dieser aufweist
- Eine nicht prognostizierte plötzlich eintretende und länger anhaltender Wegfall von thermische Last würde den Ist-Füllstand nicht über die obere Speichergrenze führen, sofern der Soll-Füllstand genügend Abstand zu dieser aufweist

Nachteile wären:

- Der Agent würde selbst bei minimaler Abweichung der Ist-Last von der Prognoselast die wärmeerzeugenden Anlagen modulieren um den Soll-Füllstand exakt einzuhalten
- Kompensatorisches Verhalten der Ist-Last, beispielsweise ein nicht prognostizierter Wegfall von Ist-Last nach einer nicht prognostizierten Spitzenlast, würden nicht ausgenutzt werden

5.6 Regelalgorithmen des Dispatchers

Ziel des Dispatchers ist die Einhaltung des Fahrplans. Dazu kompensiert der Dispatcher Fahrplanabweichung durch Erhöhung oder Drosselung der BHKW-Leistung.

Im nächsten wird der Algorithmus für die Berechnung des Schaltpotentials, die Berechnung der internen Regelleistung und der Auswahlalgorithmus zur Verteilung der Regelleistung auf die Liegenschaften beschrieben. Die Anordnung im Gesamtalgorithmus findet sich in Abbildung 5-2.

5.6.1 Schaltpotentialanalyse

Für die Verteilung der Regelleistung ist es notwendig, zu analysieren (Schaltpotentialanalyse), welche Liegenschaften interne Regelleistung bereitstellen können, dessen Abruf die Einregelung des VK auf den Fahrplan ermöglicht.

Das Einschaltpotential oder das Abschaltpotential wird abgerufen, wenn die mittlere Ist-Leistung des VK der aktuellen Viertelstunde droht die untere oder obere Toleranzgrenze des Fahrplans zu verletzen.

Für die Berechnung des Schaltpotentials müssen sowohl die Grenzen des Speichers als auch die technischen Einschränkungen durch die BHKW-Kennlinie (Siehe Kapitel 4.3.1) beachtet werden.

Es gilt, dass nur so viel BHKW-Leistung erhöht oder gedrosselt wird, ohne dass eine Verletzung Speichergrenzen stattfindet. Wenn nun das thermische Schaltpotential bestimmt wurde, muss aus diesem das elektrische berechnet werden. Im letzten Schritt wird das limitierende Schaltpotential, also das vom Betrag her kleinere ausgewählt.

Im folgenden Flussdiagramm ist der Ablauf zur Analyse dargestellt:

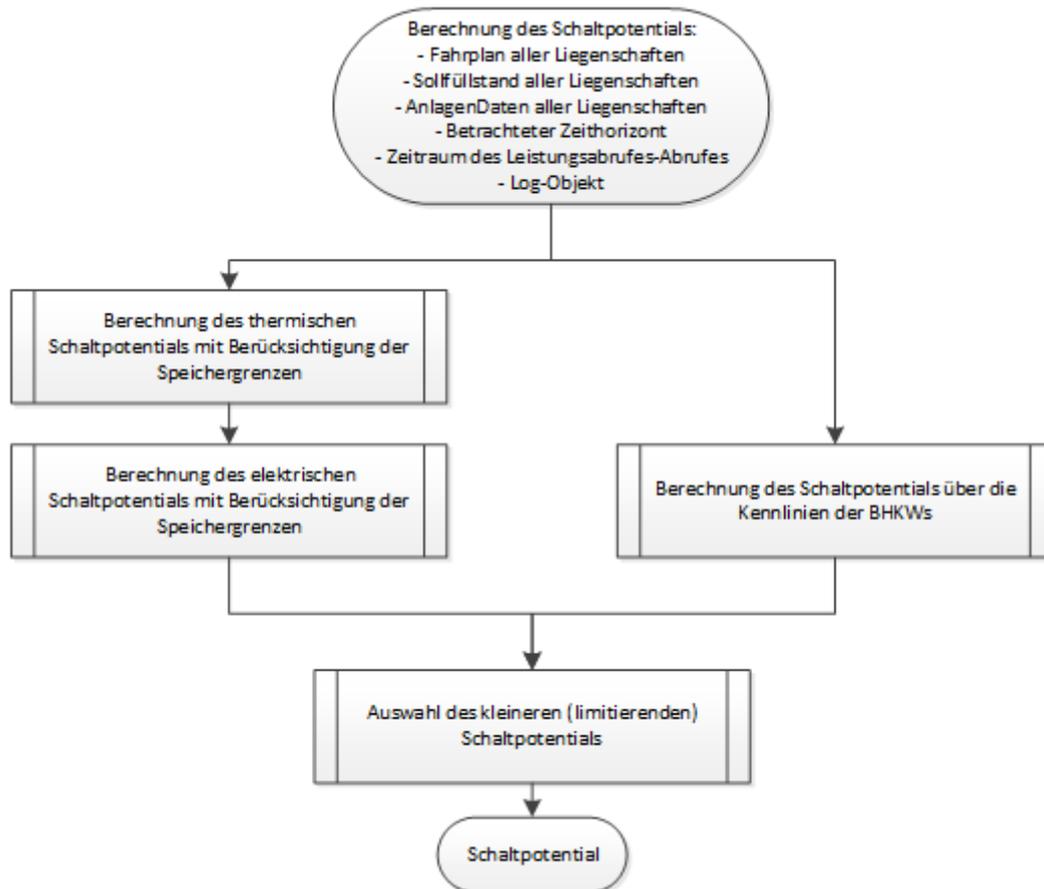


Abbildung 5-5: Flussdiagramm für die Schaltpotentialanalyse

Mit dem Fahrplan, dem Sollfüllstand aller Liegenschaften, den aktuellen Anlagendaten, einem Zeithorizont (wird im Kapitel 5.6.1.1 näher beschrieben), der Dauer des Leistungsabrufes und einer Datei zu Loggen des Schaltpotentials, wird dieses berechnet. Der linke Pfad im Flussdiagramm zeigt, die Berechnung des Schaltpotentials bei Berücksichtigung der Speichergrenzen und der rechte das Schaltpotential, welches sich aus dem Kennlinienverhalten der BHKWs ergibt.

Im nächsten Kapitel wird die Einschaltpotentialanalyse vorgestellt und danach die Abschaltpotentialanalyse.

5.6.1.1 Einschaltpotentialanalyse

Im vorherigen Kapitel bestand die Rahmenbedingung beim Leistung zuschalten darin, dass der Soll-Füllstand die obere Grenze nicht verletzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Erhöhung der BHKW-Leistung zum betrachteten Zeitraum eine Parallelverschiebung des weiteren Ist-Füllstandsverlaufes nach oben bedeutet, wenn die Ist-Last nicht von der Prognoselast abweicht. Dadurch kann die obere Speichergrenze verletzt werden. Dies ist in folgender Abbildung dargestellt:

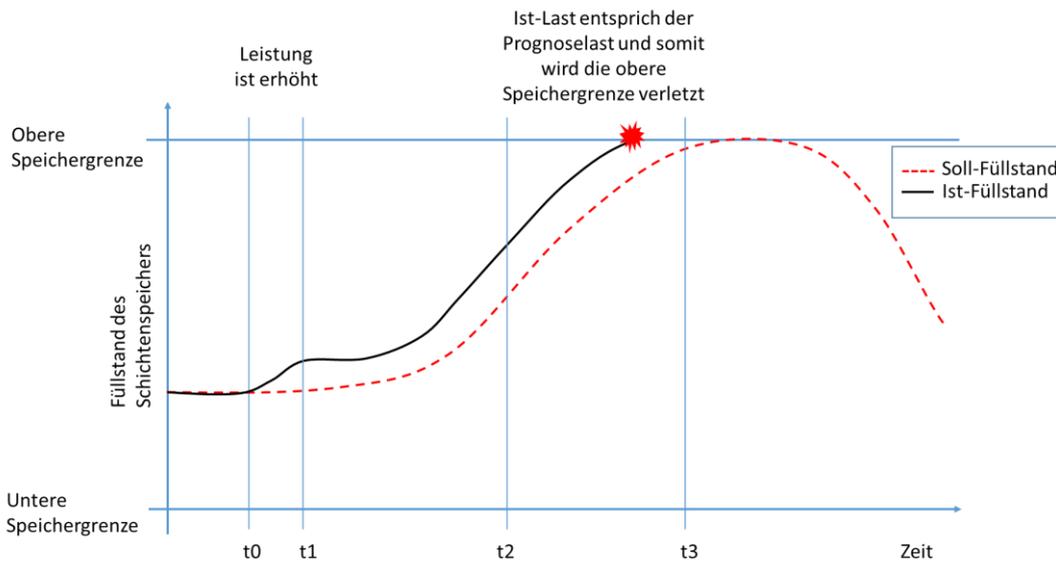


Abbildung 5-6. Verlauf der Ist-Last bei Leistungserhöhung eines BHKW ohne Kompensation

Hier wird zwischen t_2 und t_3 die obere Speichergrenze verletzt. Die Ist-last entsprach der Prognoselast und konnte somit die zusätzlich eingeschaltete BHKW-Leistung nicht kompensieren. Auch hat kein gegenteiliger Regeleingriff stattgefunden.

Wie stark die Leistung zum Zeitpunkt t_0 erhöht werden darf hängt davon ab, ob und wann davon ausgegangen wird, dass die Zusatzleistung kompensiert wird.

Dabei werden folgende Annahmen getroffen:

1. Eine Kompensation findet auf jeden Fall statt
2. Eine Kompensation dauert mindestens für eine Dauer der sog. Kompensationszeit an

Aus diesen Annahmen resultiert, dass die Leistungserhöhung nur so groß sein darf, dass bis zum Ende der Kompensationszeit ohne Kompensation die obere Speichergrenze nicht verletzt wird.

Für die folgenden Ausführungen wird die Zeit in der die Kompensation erwartet wird als Zeithorizont bezeichnet.

Innerhalb des Zeithorizontes muss folgender Zusammenhang gelten:

$$\begin{aligned}
 & \text{Obere Speichergrenze} \\
 & \geq \text{Beladung} \\
 & + \text{höchster zu erreichende Füllstand des Zeithorizontes}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

Mit Beladung ist die Füllstandserhöhung gemeint, die durch die Leistungserhöhung der BHKWs zustande kommt.

Die Kompensation der Beladung des Speichers ist in folgender Abbildung dargestellt:

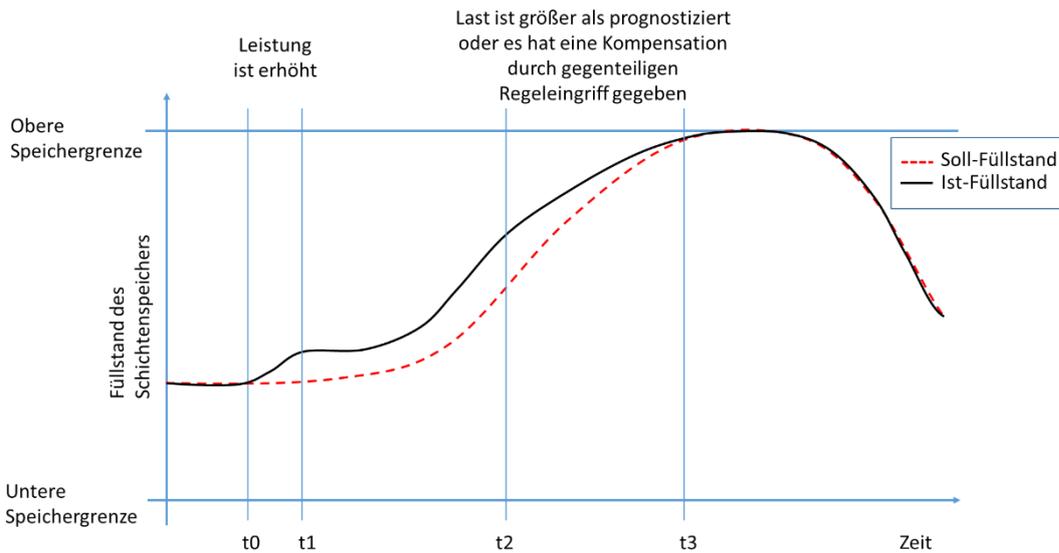


Abbildung 5-7: Kompensation der Beladung durch gegenteiligen Regeleingriff oder nicht prognostizierte zusätzliche Last

Auch hier wird zwischen t_0 und t_1 die BHKW-Leistung erhöht. Jedoch sinkt der Ist-Füllstand ab t_2 wieder und es kommt nicht zu einer Verletzung der oberen Speichergrenze.

In folgender Abbildung ist der Zeithorizont abgebildet:

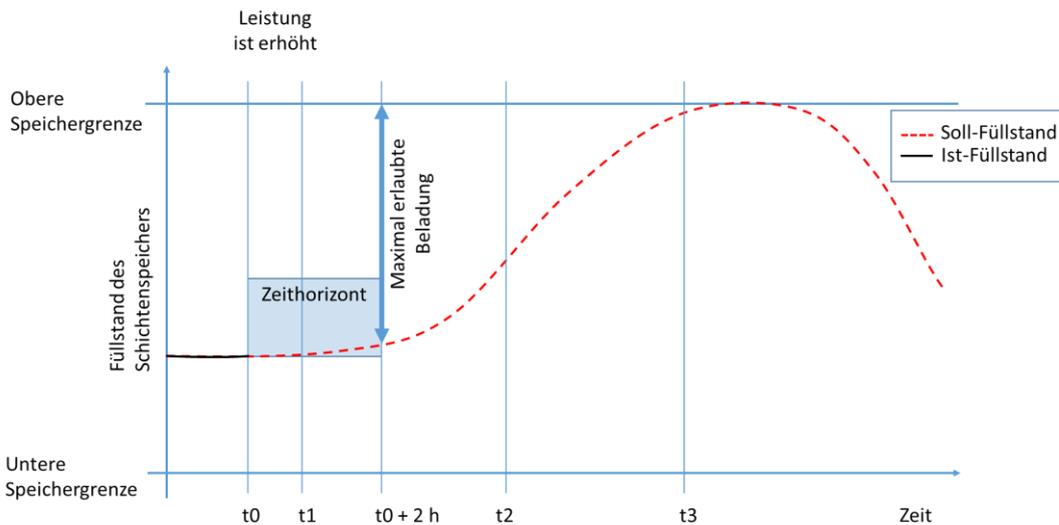


Abbildung 5-8: Zeithorizont von zwei Stunden zum Zeitpunkt t_0

Es gilt:

$$\begin{aligned}
 & \text{maximal erlaubte Beladung} \\
 & \leq \text{Obere Speichergrenze} \\
 & - \text{höchster zu erreichende Füllstand des Zeithorizontes}
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

Das thermische Einschaltpotential ergibt sich dann aus der Zeit, in der die Beladung stattfinden soll. Folgende Formel wird dazu verwendet:

$$Einschaltpotential_{thermisch} = \frac{\text{maximal erlaubte Beladung}}{t_{Einschaltung}} \quad (5.3)$$

$t_{Einschaltung}$ ist die Zeit, in der zusätzliche Leistung eingeschaltet werden soll.

Das elektrische Einschaltpotential wird anschließend gemäß Abbildung 5-5 aus dem thermischen Einschaltpotential berechnet. Dabei wird mittels der Stromkennzahl mit Formel (2-1) das mögliche elektrische Einschaltpotential aus dem thermischen berechnet. Bei mehr als einem BHKW in der entsprechenden Liegenschaft, wird das elektrische Einschaltpotential gewichtet nach der maximalen BHKW-Leistung aufgeteilt. Somit würden leistungsstärkere BHKW absolut mehr Einschaltpotential beitragen als leistungsschwächere.

Im letzten Schritt wird das Einschaltpotential nach Kennlinie analysiert. Da keine Einschalthandlungen vorgenommen werden, wird nur der Teillastbereich bei bereits eingeschalteten Anlagen berücksichtigt. Wenn ein BHKW beispielsweise auf Mindestleistung fährt, so gilt als elektrisches Einschaltpotential nach Kennlinie die Differenz aus Maximaler elektrischer Leistung zu Mindestleistung.

Folgendes Flussdiagramm stellt die Analyse des Einschaltpotentials nach Kennlinie dar:

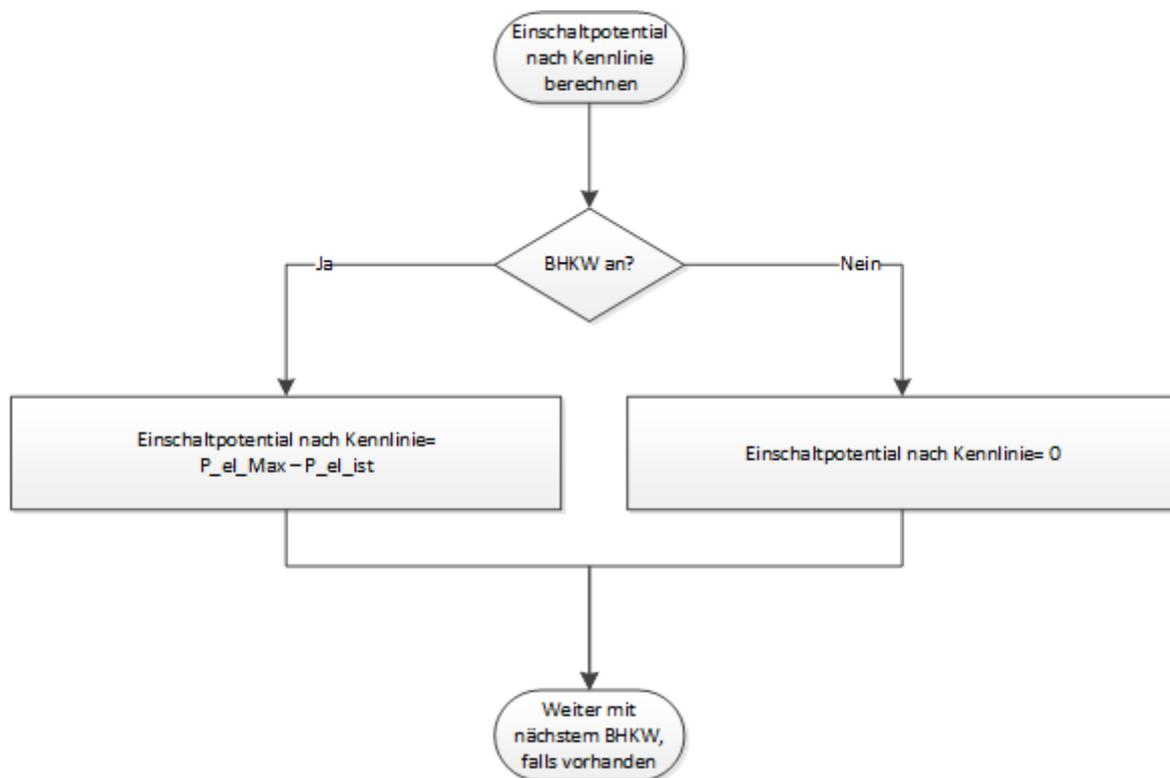


Abbildung 5-9. Flussdiagramm zur Berechnung Einschaltpotentials nach Kennlinie

Zur Berechnung des limitierenden Einschaltpotentials wird verglichen zwischen elektrischen Einschaltpotential, bei dem die Speichergrenzen nicht verletzt wird und dem Einschaltpotential nach Kennlinie. Das kleinere Einschaltpotential ist dann das limitierende Einschaltpotential. Folgendes Flussdiagramm stellt dies dar:

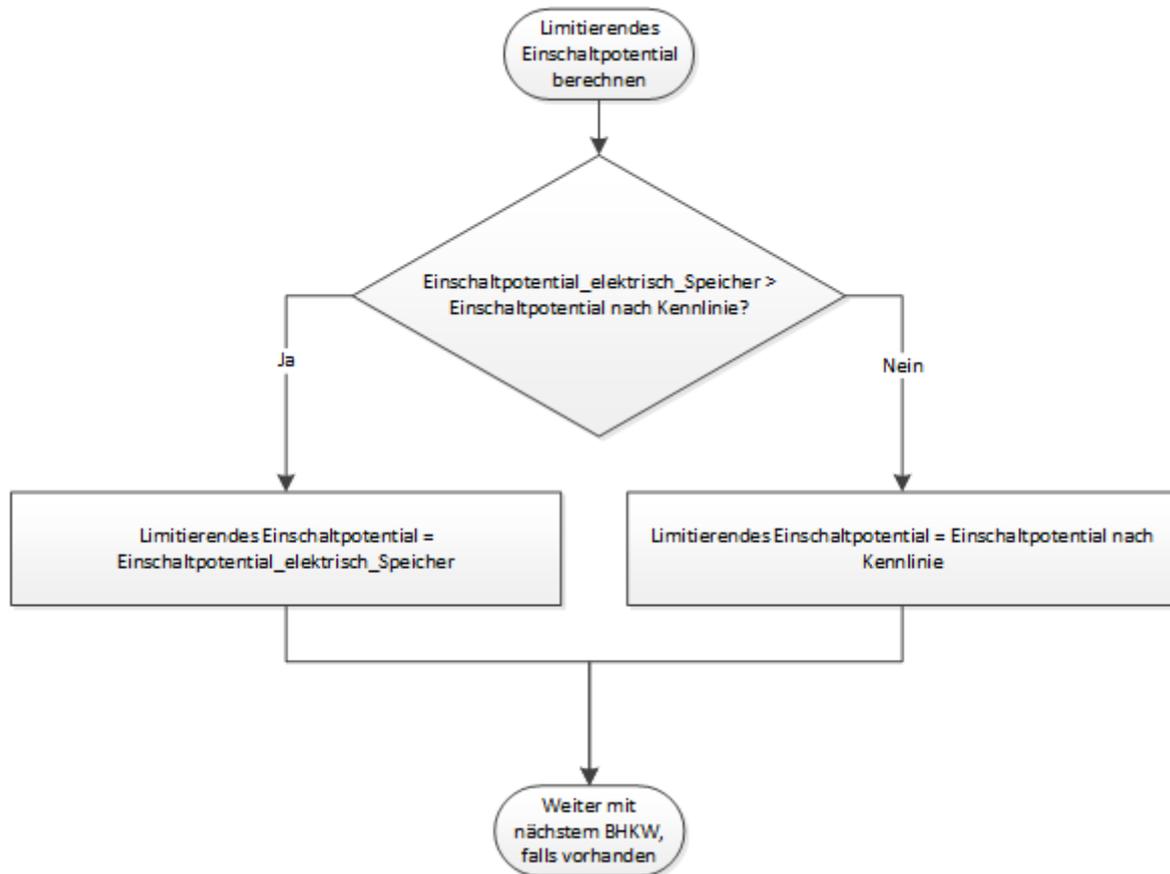


Abbildung 5-10: Flussdiagramm zur Berechnung des limitierenden Einschaltpotentials

5.6.1.2 Abschaltpotentialanalyse

Um zu verhindern, dass die untere Grenze durch zufällige Lastspitzen verletzt wird, wurde in Kapitel 5.4 die sog. SLK-Schwelle eingeführt. Der Füllstand darf dann nicht unter diese Schwelle sinken. Bei Unterschreitung schaltet das SLK ein um den Füllstand wieder über diese SLK-Schwelle zu heben.

Daher kann nur die Füllstandsdifferenz aus Ist-Füllstand und SLK-Schwelle zum Abschalten von thermischer Leistung verwendet werden:

$$Abschaltpotential_{thermisch} = \frac{Fuellstand_{ist} - SLK-Schwelle}{t_{verringderung}} \quad (5.4)$$

$t_{verringderung}$ ist die Zeit, in der die Leistung verringert werden soll.

Folgende Abbildung erläutert, wann sich Abschaltpotentiale ergeben:

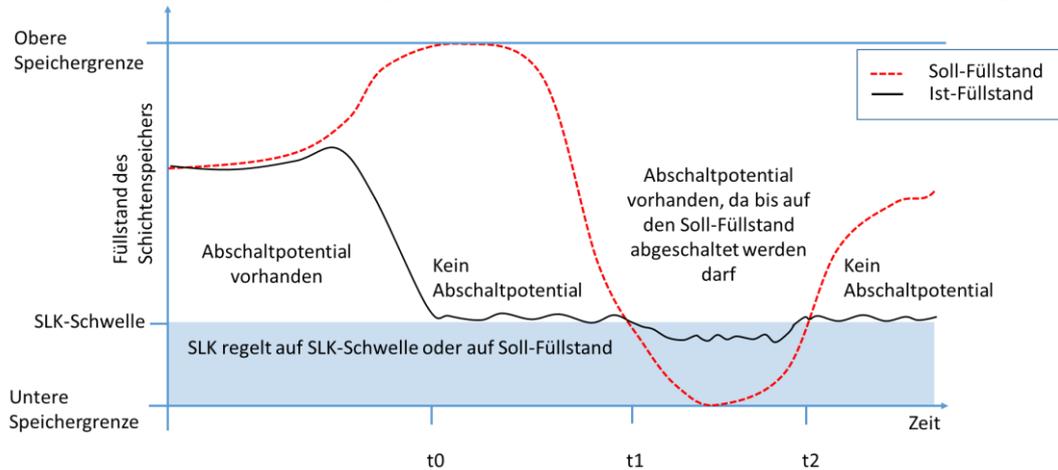


Abbildung 5-11: Thermisches Abschaltpotential

Bis t_0 kann Leistung der BHKW abgeschaltet werden, ohne, dass der SLK den Füllstand halten muss. Zwischen t_0 und t_1 befindet sich der Ist-Füllstand auf der SLK-Schwelle. Hier kann nicht abgeschaltet werden.

Zwischen t_1 und t_2 besteht wieder Abschaltpotential, da sich der Ist-Füllstand über dem Soll-Füllstand befindet.

Nun muss das thermische Abschaltpotential in ein elektrisches umgewandelt werden. Dies geschieht auf gleichem Wege wie der Berechnung des elektrischen Abschaltpotentials im vorherigen Kapitel. Die elektrische Abschaltleistung wird mittels Stromkennzahl aus der thermischen Abschaltleistung berechnet. Leistungstärkere BHKWs schalten dabei mehr ab als kleinere, sofern mehr als ein BHKW einer Liegenschaft abschalten kann.

Das Kennlinienabschaltpotential ergibt sich aus der Differenz von Ist-Leistung der BHKWs und deren Mindestleistung. Da keine zusätzlichen Schalthandlungen ausgeführt werden sollen, können nur Anlagen Abschaltpotential liefern, die bereits mit einer Leistung $>$ Mindestleistung fahren. Folgendes Flussdiagramm stellt die Berechnung dar:

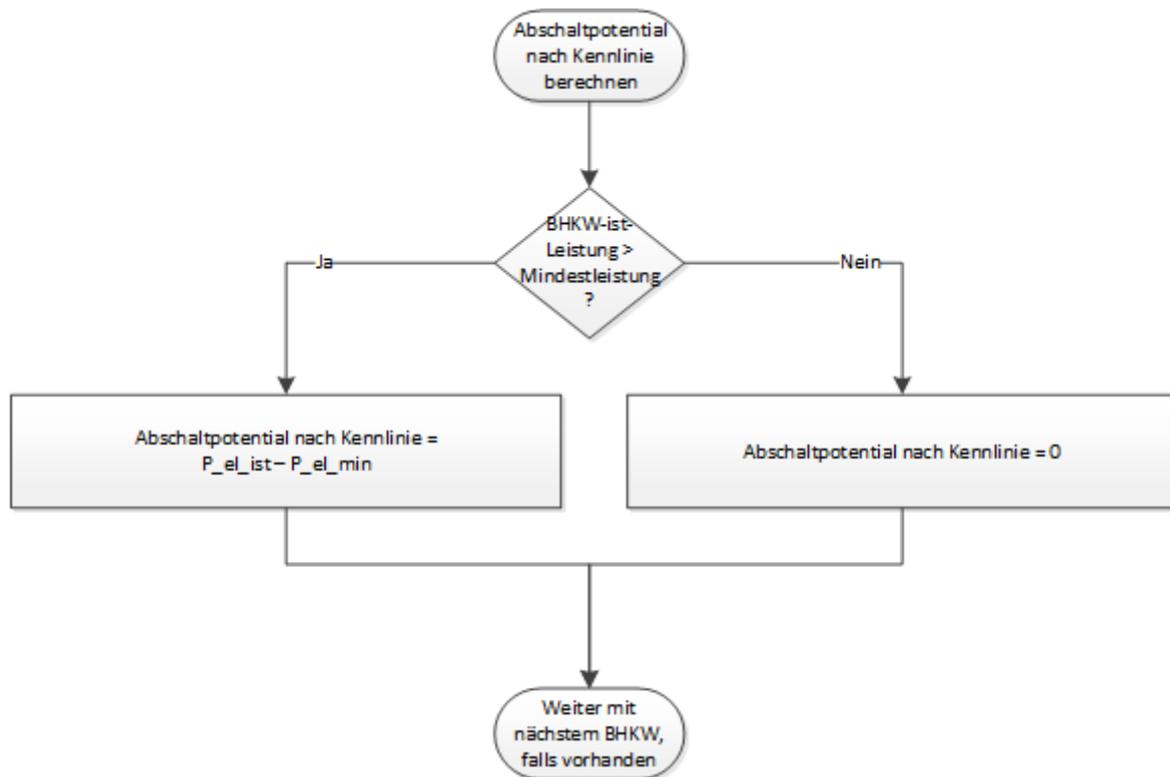


Abbildung 5-12: Berechnung des elektrischen Abschaltpotentials nach Kennlinie

Im letzten Schritt muss das thermische Abschaltpotential mit dem Kennlinienabschaltpotential nach Kennlinie verglichen werden. Das betragsmäßig kleinere wird als limitierendes Abschaltpotential berücksichtigt⁹.

⁹ In der Auswertung wird nur noch „Schaltpotential des VK“ geschrieben. „Limitierendes Schaltpotential“ wird hier nur verwendet um aufzuzeigen, dass es grundsätzlich mehrere Schaltpotentiale gibt, wovon das kleinste das limitierende ist.

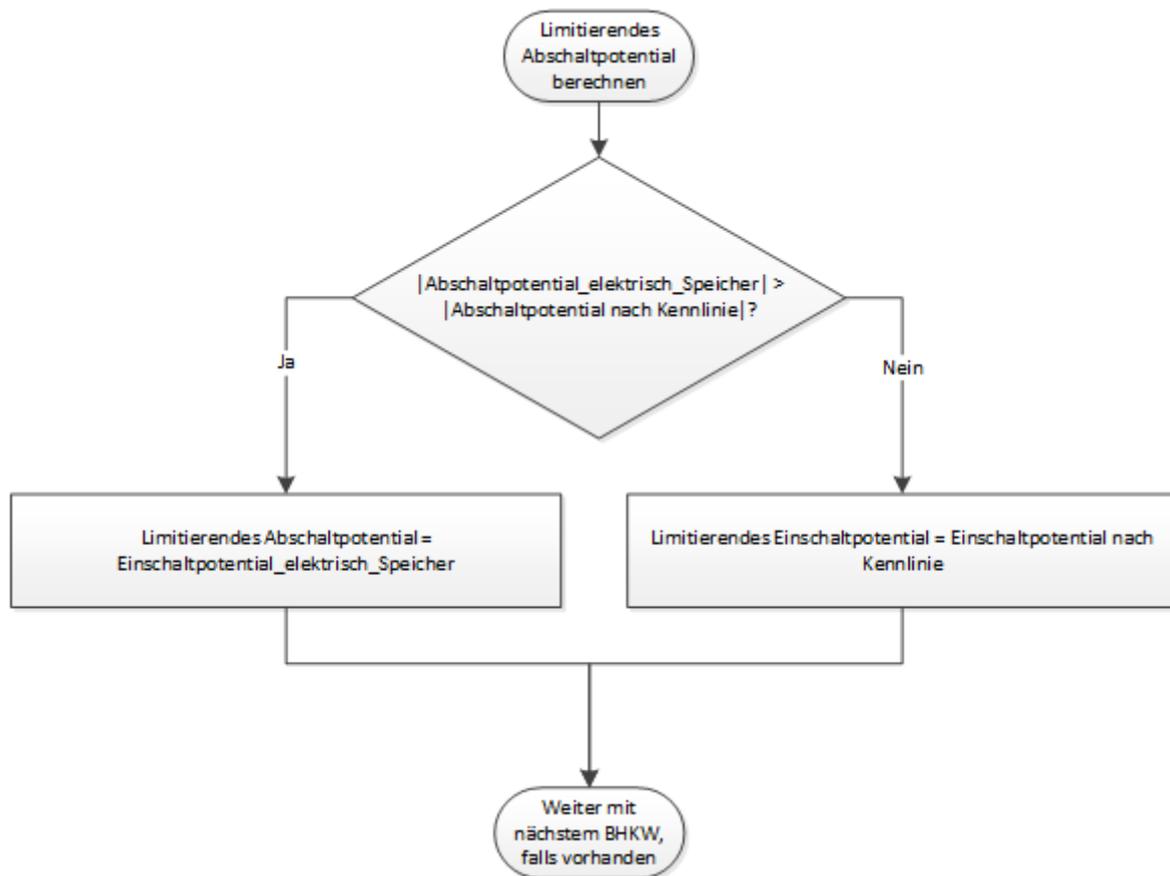


Tabelle 5-2: Berechnung des limitierenden Abschaltpotentials

5.6.2 Interne Regelleistung berechnen

Die interne Regelleistung wird benötigt um die Ist-Leistung des VK auf den Fahrplanwert zu bringen. Sie berechnet sich aus der aktuellen Fahrplanleistung, der Ist-Leistung, dem historischen Verlauf der Ist-Leistung und aktuellen Sollleistung laut Fahrplan.

Dabei gilt folgendes Flussdiagramm:

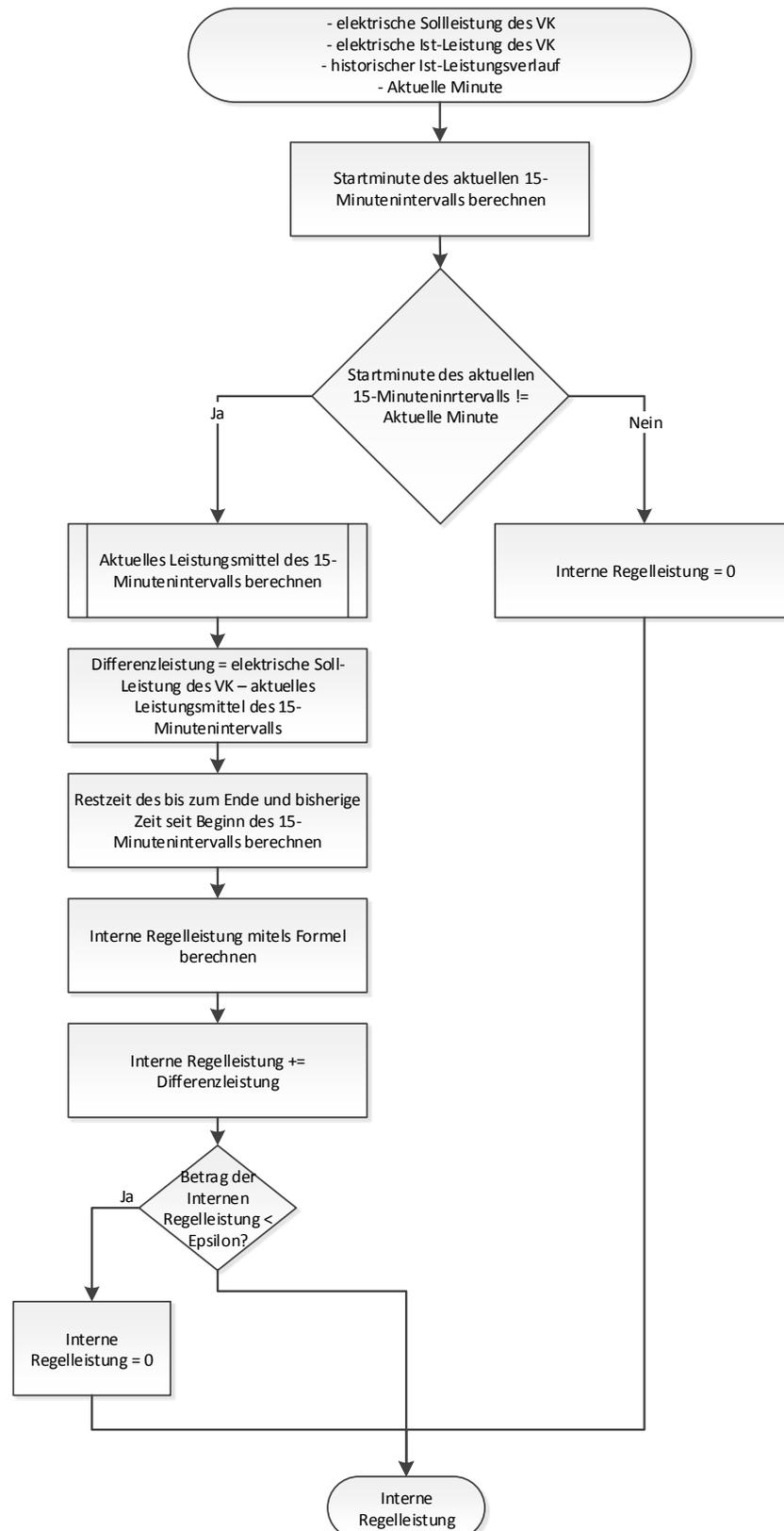


Abbildung 5-13: Flussdiagramm zur Berechnung der Internen Regelleistung

Zur Berechnung der Internen Regelleistung wird der Mittelwert der bisherigen Minuten gebildet, seit Beginn des 15-Minutenintervalls.

Zur Berechnung der Regelleistung wird angenommen, dass der bisherige Leistungsmittelwert ohne Gegenregelung beibehalten wird.

RL: Restleistung, Mittlere Leistung von aktueller Minute bis Ende des Intervalls
IRL: Interne Regelleistung, die notwendig ist um den Sollleistungswert über das gesamte Intervall zu erhalten
SL: Sollleistung nach Fahrplan¹⁰

Für die Restleistung wird folgende Ersetzung vorgenommen:

$$RL = SL + RL \quad (5.6)$$

Und die Trendleistung wird gleichgesetzt mit der Sollleistung

$$TL = SL \quad (5.7)$$

Dann kann nach der Regelleistung umgestellt werden:

$$IRL = \frac{(BZ + RZ) \times SL - BZ \times BL}{RZ} - SL \quad (5.8)$$

Durch Differenzbildung kann es zu sehr kleinen absoluten Werte kommen, bedingt durch Rundungsfehler bei der Berechnung von double-Werten in Java (45). Daher wird als letzter Schritt die Interne Regelleistung auf 0 gesetzt, wenn dessen Betrag kleiner als ein in der Methode definiertes Epsilon ist. Standardmäßig beträgt Epsilon = 0,01.

5.6.3 Zusatzleistung berechnen

Eine Anforderung ist, dass das VK abweichend vom Fahrplan zusätzliche Leistung ein- oder ausschalten kann. In diesem Kapitel wird der Algorithmus hierzu dargelegt.

Die Berechnung der Zusatzleistung erfolgt aus einem Array von Objekten der Klasse AbrufSignal. Diese Klasse beinhaltet die Daten zum Leistungsabruf, wie Leistungshöhe, Startzeit und Endzeit.

Dabei können die Zeiträume, in denen die Abrufe stattfinden sich überlappen. In diesem Fall wird die abgeforderte Leistung aufsummiert. Somit kann auch ein Abrufsignal ein anderes (teilweise) kompensieren, wenn die Abrufzeiten sich überlappen und die Zusatzleistungen unterschiedliche Vorzeichen haben.

Implementiert wird nach folgendem Flussdiagramm:

¹⁰ Elektrische Soll-Leistung des gesamten VK

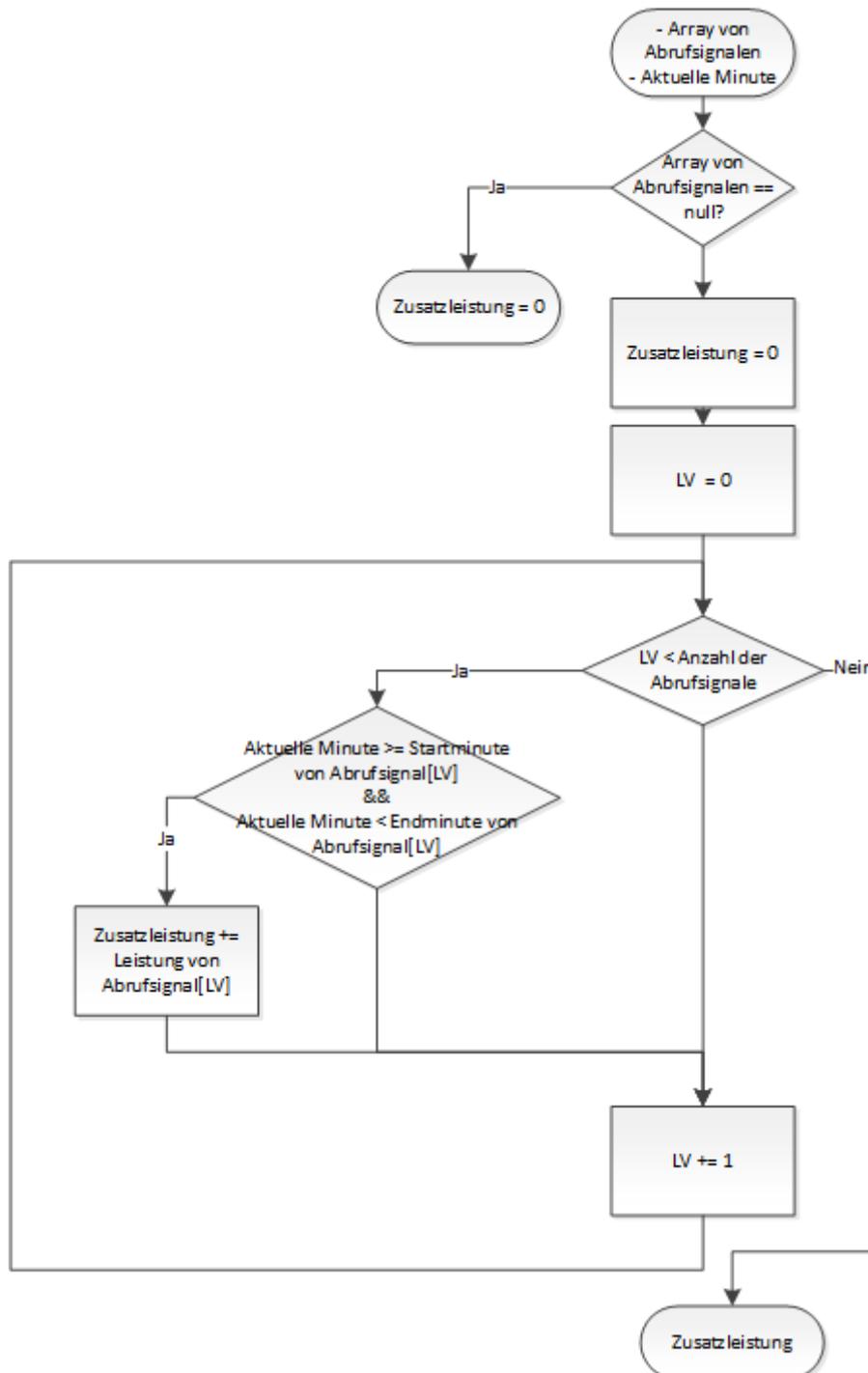


Abbildung 5-15: Flussdiagramm zur Berechnung der Zusatzleistung

Zuerst wird abgefragt, ob es ein Abrufsignal gibt. Wenn dem Dispatcher keines übergeben wurde, ist die Zusatzleistung 0 kW. Wenn ein Abrufsignal übergeben wurde, wird über alle Abrufsignale iteriert. Innerhalb der Schleife wird dann abgefragt, ob die aktuelle Minute innerhalb eines Abrufsignalzeitraums liegt. Sollte also gerade Leistung zusätzlich abgerufen werden, wird die Zusatzleistung aufsummiert um die des aktuell betrachteten Abrufsignals. Anschließend wird diese ausgegeben.

5.6.4 Verteilung der internen Regelleistung auf die Liegenschaften – Stellglied

Das Stellglied ist der aufwendigste Funktionsbaustein des Dispatchers. Er regelt den Fahrplan des VK aus und setzt Abrufsignale um.

Die Funktionsweise ist wie folgt:

Das Stellglied berechnet die obere und untere Leistungsgrenze, welche vom jeweiligen Toleranzband um den Fahrplan herum abhängig sind. Dann wird geprüft, ob zusätzliche Leistung abgerufen werden soll. Bei einem Leistungsabruf wird die Interne Regelleistung mit der Abrufleistung aufaddiert.

Nun wird geprüft, ob die Leistung des VK erhöht oder abgesenkt werden soll. Entsprechend wird die interne Regelleistung auf die Liegenschaften verteilt.

Folgendes Flussdiagramm veranschaulicht die Vorgehensweise des Stellgliedes:

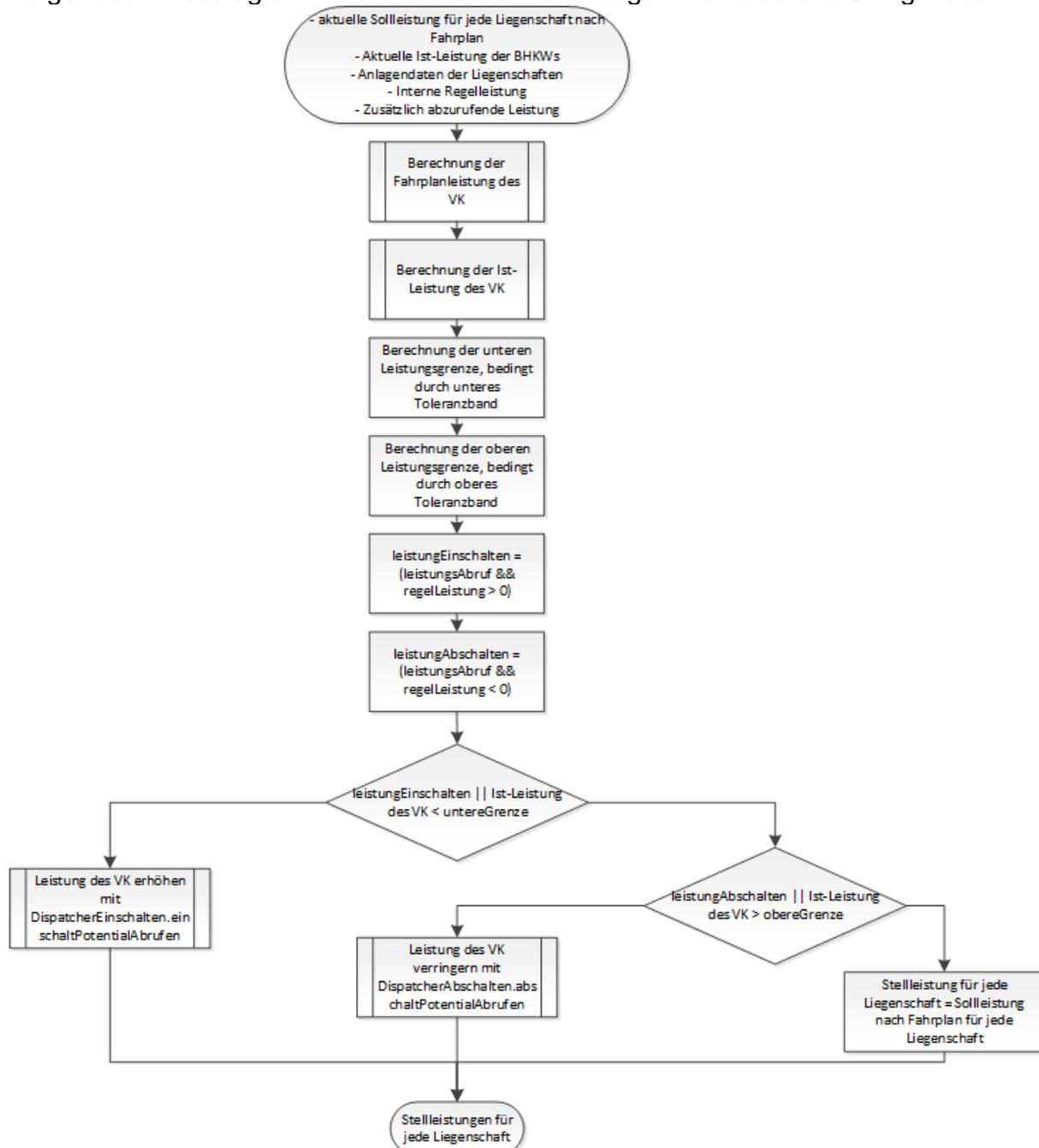


Abbildung 5-16: Flussdiagramm des Stellgliedes FB202

Im Folgenden werden die Methoden zum Ein- und Abschalten von Schaltpotential vorgestellt. Insbesondere die Auswahl der Liegenschaften, die ihr Schaltpotential aktivieren sollen wird näher beschrieben:

Ist-Leistung erhöhen mit Methode

DispatcherEinschalten.einschaltPotentialAbrufen:

In dieser Methode wird so viel Interne Regelleistung eingeschaltet, wie es das zuvor berechnete Einschaltpotential erlaubt. Die Interne Regelleistung wird dabei nicht gleichmäßig auf die Liegenschaften aufgeteilt sondern selektiv. Es wird zuerst das Einschaltpotential der Liegenschaft verwendet, dessen Ist-Füllstand die größte Differenz zum Soll-Füllstand aufweist. Dabei gilt:

$$\text{Füllstandsdiﬀerenz} = \text{Soll-Füllstand} - \text{Ist-Füllstand} \quad (5-9)$$

Wenn das Einschaltpotential dieser Liegenschaft nicht ausreicht, wird die Liegenschaft mit der zweitgrößten Differenz herangezogen. Dies wird solange weitergeführt, bis entweder die Interne Regelleistung komplett verteilt wurde oder keine Liegenschaft mehr Einschaltpotential hat.

Das Flussdiagramm sieht hierbei so aus:

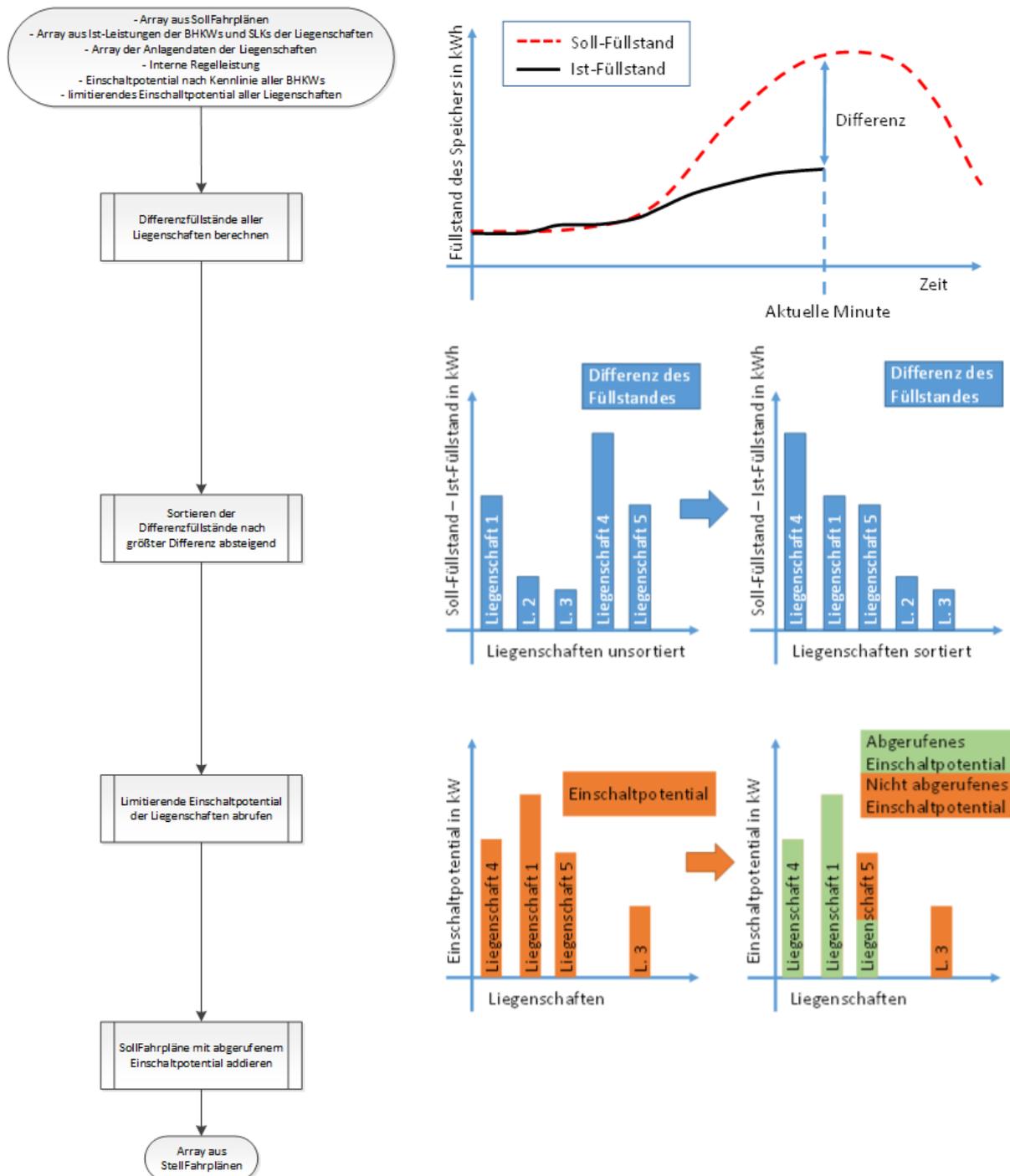


Abbildung 5-17: Flussdiagramm und schematische Darstellung des Prozesses zur Einschaltung von interner Regelleistung

Rechts vom Flussdiagramm sind Arbeitsschritte als Diagramm dargestellt. Hervorzuheben ist, dass die Liegenschaften nur nach der Füllstandsdifferenz sortiert werden und nicht nach ihrem Einschaltpotential. Ziel ist es, zuerst die Liegenschaften einzuschalten, die am frühesten drohen die untere Speichergrenze zu verletzen. Um die Verletzung der unteren Speichergrenze zu verhindern, leisten die BHKWs dieser Liegenschaften zuerst Regelleistung was zu einer Erhöhung der thermischen Eingangsleistung für den Schichtenspeicher führt und somit die Verletzung abwenden kann.

In der schematischen Darstellung rechts vom Flussdiagramm wird beispielhaft der Vorgang für ein VK von 5 Liegenschaft dargestellt. Zu erkennen ist im ersten Diagramm, dass zuerst die Differenzen von Soll-Füllstand zu Ist-Füllstand gemessen werden. Diese werden in ein Array gespeichert. Anschließend wird das Array absteigend sortiert. In der schematischen Darstellung hat Liegenschaft 4 die größte Differenz. Daher wird das Einschaltpotential von Liegenschaft 4 als erstes herangezogen um die interne positive Regelleistung zu erfüllen. Im dritten Diagramm ist zu sehen, dass Liegenschaft 2 überhaupt kein Einschaltpotential hat. Jedoch reichen die Einschaltpotentiale von Liegenschaft 4, 1 und 5 aus. Es werden dann so lange die Einschaltpotentiale abgerufen, wie nötig ist. Das Einschaltpotential von Liegenschaft 5 wird nur zur Hälfte, das von Liegenschaft 3 gar nicht abgerufen.

Ist-Leistung verringern DispatcherAbschalten.abschaltPotentialAbrufen:

In dieser Methode wird ähnlich vorgegangen wie in **DispatcherEinschalten.einschaltPotentialAbrufen**. Daher kann das Flussdiagramm aus Abbildung 5-17 zum Verständnis betrachtet werden. Unterschiedlich ist allerdings die Berechnung der Füllstandsdifferenz. Anders als beim Einschalten wird hier die Differenz wie folgt gebildet:

$$\text{Füllstandsdifferenz} = \text{Ist-Füllstand} - \text{Soll-Füllstand} \quad (5-10)$$

Dann wird nach der größten Füllstandsdifferenz sortiert und das Abschaltpotential beginnend bei der ersten Liegenschaft abgerufen.

5.7 Weitere Lösungsmöglichkeiten für den Dispatcher

In Kapitel 5.5 wurde der Regelalgorithmus des Dispatchers für die weitere Implementierung dargestellt. Dieser hauptsächlich aus drei Teilen:

- Schaltpotentialanalyse
- Interne Regelleistung berechnen
- Zusatzleistung berechnen
- Verteilung der internen Regelleistung auf die Liegenschaften - Stellglied

Für die Berechnung der internen Regelleistung und Verteilung dieser auf die Liegenschaften sollen hier weitere mögliche Algorithmen vorgestellt werden. Aus Zeitgründen können diese nicht implementiert werden.

5.7.1 Alternativer Möglichkeit die Interne Regelleistung zu berechnen

In Kapitel 5.6.2 wurde aufgezeigt, wie die Interne Regelleistung anhand der bisherigen Ist-Leistung und der Soll-Leistung nach Fahrplan des aktuellen 15-Minuten-Intervalls nach berechnet wird. Sie ist dabei das Ergebnis einer linearen Dabei wird die gemittelte Ist-Leistung seit Anbeginn des Intervalls fortgeschrieben. Die erzeugte elektrische Energie wird dabei linear fortgesetzt angenommen, also ein linearer Trend angenommen.

Anstatt der **linearen Trendberechnung** nach (44 S. 45)

$$\hat{y}(t) = m \times t + b \quad (5-11)$$

mit $\hat{y}(t)$ als elektrische erzeugte Energie, m als Steigung und b der Schnittpunkt mit der Y-Achse, lassen sich auch weitere Trendberechnungsverfahren anwenden. Der Verlauf der erzeugten elektrischen Energie kann fortgesetzt werden mit Hilfe von folgenden weiteren Regressionsfunktionen (46 S. 9):

- **Logarithmische Trendberechnung**, wenn die Rate der erzeugten elektrischen Energie schnell ansteigt oder abnimmt und dann weitestgehend gleich bleibt:

$$\hat{y}(t) = c \times \ln t + b \quad (5-12)$$

mit c und b als Konstante, ln ist der natürliche Logarithmus.

- **Polynomische Trendberechnung**, wenn die erzeugte elektrische Energie fluktuiert (zu- und wieder abnimmt):

$$\hat{y}(t) = b + c_1 \times t^1 + c_2 \times t^2 + \dots + c_n \times t^n \quad (5-13)$$

Mit c1 bis cn als Konstanten.

- **Potenzielle Trendberechnung**, wenn die erzeugte Energie mit einer bestimmten Rate zunimmt:

$$\hat{y}(t) = c \times t^b \quad (5-14)$$

Mit c und b als Konstanten.

- **Exponentielle Trendberechnung**, wenn die erzeugte elektrische Energie mit stetig steigender Tendenz ansteigt oder abfällt:

$$\hat{y}(t) = c \times e^{b \times t} \quad (5-15)$$

Die Eignung dieser weiteren Trendberechnungsverfahren muss allerdings erst noch überprüft werden. Dazu könnten für jede dieser Berechnungsverfahren Simulationen durchgeführt werden. Anschließend werden die Fahrplantreue und die Anzahl der Schalthandlungen miteinander verglichen.

5.7.2 Alternativer Möglichkeit zur Verteilung der Internen Regelleistung

Bei der Verteilung der Internen Regelleistung werden die Liegenschaften bevorzugt, deren Ist-Füllstand des Speichers entweder stark über dem Soll-Füllstand liegt (negative Regelleistung) oder stark unter dem Soll-Füllstand (positive Regelleistung) liegt.

Denkbar wäre auch eine Verteilung nach der Zeit, bis eine Speichergrenze ohne Regelvorgang des Dispatchers verletzt wird. Für die Berechnung dieser Zeit kann der weitere Verlauf des Soll-Füllstandes um die Differenz von aktuellem Ist-Füllstand zum aktuellen Soll-Füllstand erhöht oder gesenkt werden. Dann kann an der Zeitachse abgelesen werden, wann eine Verletzung der Speichergrenze eintritt.

Soll nun Regelleistung eingeschaltet werden, kann die Liegenschaft bevorzugt werden, bei der als nächstes eine Verletzung der unteren Speichergrenze prognostiziert wird. Soll dagegen Regelleistung abgeschaltet werden, kann die Liegenschaft bevorzugt werden, bei der als nächstes eine Verletzung der oberen Speichergrenze zu erwarten ist.

Eine Implementierung dieses Algorithmus kann aus Zeitgründen in dieser Bachelorthesis nicht mehr stattfinden.

6 Implementierung und Test

Dieses Kapitel stellt die Implementierung der im Kapitel 5 vorgestellten Algorithmen vor. Aufgrund des Umfangs durch die Vielzahl an Bausteinen, sei hier darauf verwiesen, dass die detaillierte Beschreibung dieser den Kommentaren im Quellcode zu entnehmen sind. Dieser befindet sich auf der beiliegenden DVD. Daher werden hier die Bausteine nur im groben beschrieben und der Fokus auf die Schnittstellen gelegt.

Für die Implementierung werden folgende Anforderungen aus Kapitel 3 besonders berücksichtigt:

1. Implementation der Regelung in Java um eine Verteilung der Regelung auf einem Multi-Agentensystem vornehmen zu können
2. Modularisierung der Regelung im Bausteinprinzip um die Regelung einfach erweitern zu können

Um diese Anforderungen zu erfüllen, wird die Regelung in Bausteine aufgebaut. Dabei wird jeder Baustein als Java-Methode implementiert. Diese können, um zum Beispiel einen anderen Algorithmus zu berücksichtigen, durch Bausteine mit den gleichen Schnittstellen ausgetauscht werden.

Im Folgenden werden zuerst die Bausteine und der Aufbau des Agenten und dann der des Dispatchers dargestellt. Anschließend werden die wichtigsten Funktionalitäten der Regelung mit Test-Cases überprüft.

6.1 Agent

Der Agent hat vordergründig die Aufgabe den Ist-Füllstand einer Liegenschaft im Arbeitsbereich zu halten. Er wird als Java-Objekt von der Klasse InnererRegelkreis instanziiert. Es muss für jede Liegenschaft ein Agent instanziiert werden.

Die Eingangsdaten sind:

- Aktuelle Stelleistung vom Dispatcher der Klasse SollFahrplan
- Aktuelle Anlagendaten als Objekt der Klasse AnlagenDaten
- Eine 4 zeilige Matrix mit 1 Spalte¹¹ (kann für zukünftige Anwendungen um weitere Spalten ergänzt werden) mit der der Betriebsart (1 = Wärmegeführt, 2 = Stromgeführt), der Außentemperatur, Speicherumgebungstemperatur, und der Ist-Last.

Nachfolgende Parameter können über Setter des Agenten verändert werden. Das Verhalten des Agenten wird wie folgt durch diese beeinflusst:

- **SLK-Schwelle:** Gibt die Höhe der SLK-Schwelle an. Je höher diese ist, desto häufiger wird der Ist-Füllstand auf den Soll-Füllstand vom Agenten geregelt. Eine sehr niedrige Schwelle jedoch verringert den Puffer zur unteren Speichergrenze, was dazu führen kann, dass diese häufiger verletzt wird. Standardwert ist 100 kWh.
- **BHKW-Schwelle:** Gibt die Höhe der BHKW-Schwelle an. Je höher diese ist, desto eher regeln die BHKWs den Füllstand mit, was tendenziell zu größerer

¹¹ In MATLAB wäre dies ein Spaltenvektor, jedoch muss für die Java-Regelung hier ein Array aus Arrays erstellt werden. Die Erste Dimension entspricht den Zeilen und in jeder Zeile befindet sich ein Array mit einem Element.

Fahrplanabweichung führt. Eine sehr niedrige Schwelle jedoch verringert den Puffer zur unteren Speichergrenze, was dazu führen kann, dass diese häufiger verletzt wird. Standardwert ist 50 kWh

Der Aufbau des Agenten ist im folgender Abbildung 6-1 dargestellt:

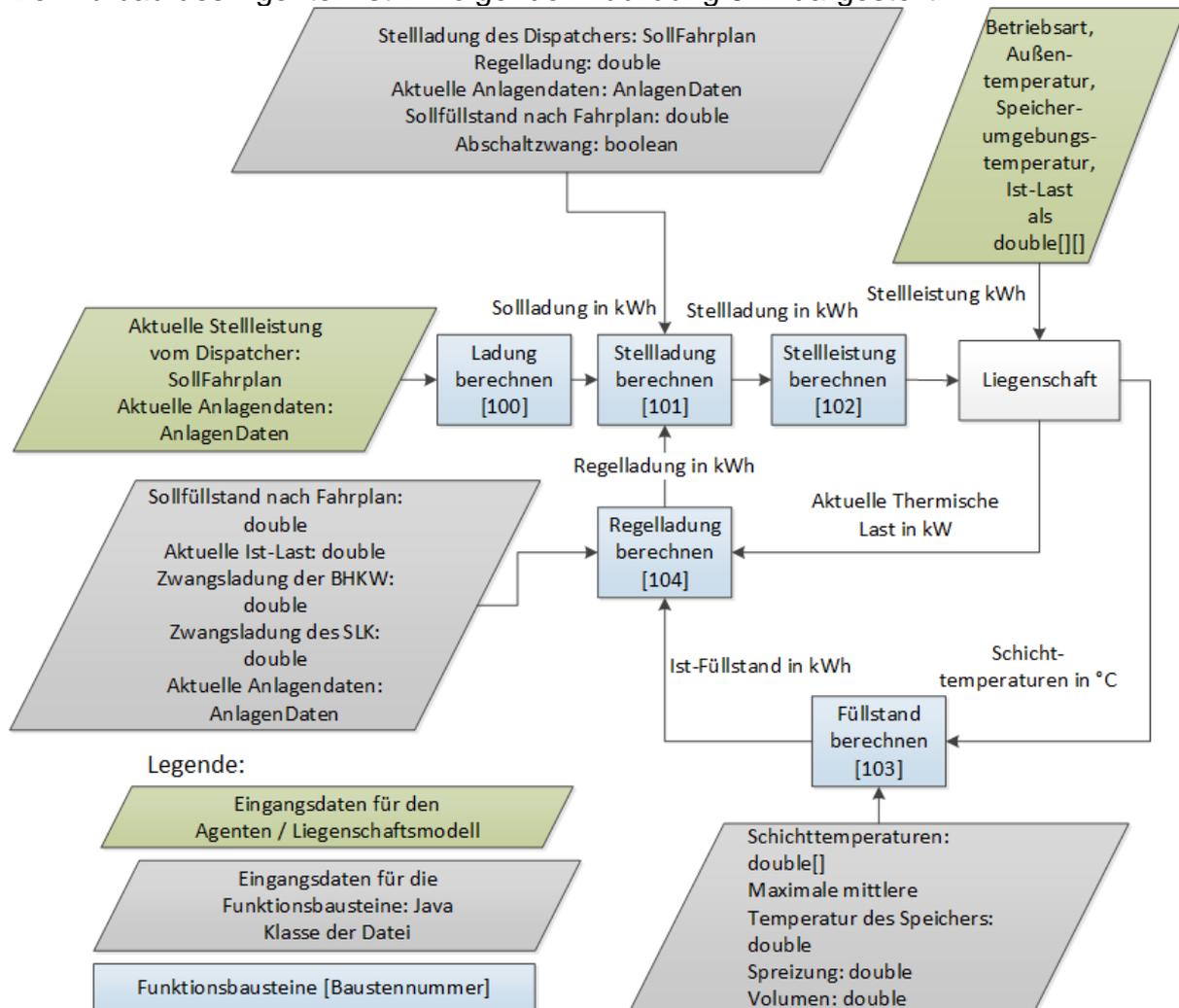


Abbildung 6-1: Implementierung des Agenten

Nachfolgend die Erläuterung zu den einzelnen Bausteinen:

FB 100 – Ladung berechnen

Als Stellgröße vom Dispatcher erhält FB 100 die Stelleistungen für die BHKW und das SLK, sowie die Anlagendaten, in denen u. a. die Stromkennzahl der BHKW enthalten sind. Aus diesen Daten wird die Sollladung berechnet, also die thermische Leistung, die an den Schichtenspeicher übergeben werden soll.

FB 101 – Stellladung berechnen

Aus der Stelleistung und der Regelladung, sowie dem Sollfüllstand wird die Stellladung für den Schichtenspeicher berechnet. Zusätzlich wird dem FB 101 über die boolesche Variable „Abschaltzwang“ mitgeteilt, ob momentan noch abgeschaltet werden soll. Hintergrund ist, dass sobald die obere Speichergrenze verletzt wurde, so lange abgeschaltet werden soll, bis der Ist-Füllstand wieder auf dem Soll-Füllstand sinkt. Somit wird bei anhaltender Last verhindert, dass wärmeerzeugende Anlagen takten und den Ist-Füllstand ständig gegen die obere Speichergrenze fahren.

Die Regelladung ist die Ladung, die der Sollladung aufaddiert wird um den Ist-Füllstand in den Arbeitsbereich zu ziehen.

FB 102 – Stelleistung berechnen

Aus der Stellladung wird die Stelleistung berechnet. Dieser Baustein übernimmt damit die Umkehrung von FB 100.

FB 103 – Füllstand berechnen

Dieser Baustein ist das Messglied des Agenten. Auf Basis der Schichttemperaturen wird der aktuelle Ist-Füllstand nach Formel (4-34) berechnet.

FB 104 – Regelladung berechnen

In diesem Baustein wird bestimmt, welche thermische Ladung in kWh an den Speicher zusätzlich übergeben werden muss, um den Ist-Füllstand in den Arbeitsbereich zu ziehen.

Dazu wird im ersten Schritt ein Zielfüllstand definiert de nach dem Aktionskatalog des Agenten in Tabelle 5-1. Wenn der Sollfüllstand unterhalb der SLK-Schwelle liegt, ist der Zielfüllstand der Sollfüllstand. Ansonsten ist der Zielfüllstand die SLK-Schwelle.

Die Regelladung berechnet sich nach folgender Formel:

$$\begin{aligned} \text{Regelladung} &= \text{Zielfüllstand} - \text{Ist-Füllstand} \\ &+ \text{Lastladung} - \text{Zwangsladung}_{BHKW} \\ &- \text{Zwangsladung}_{SLK} \end{aligned} \quad (6-1)$$

Anschließend wird berücksichtigt, dass der Speicher eine neue Beladungsgröße nur zu 80 % annimmt und die vormalige Beladung zu 20 % nachschwingt. Nach Formel (4-37) gilt somit:

$$\begin{aligned} \text{Regelladung}_{\text{gewichtet}} \\ = \frac{\text{Regelladung} - \alpha \times P_{\text{Beladung}}(t - 1 \text{ Minue})}{1 - \alpha} \end{aligned} \quad (6-2)$$

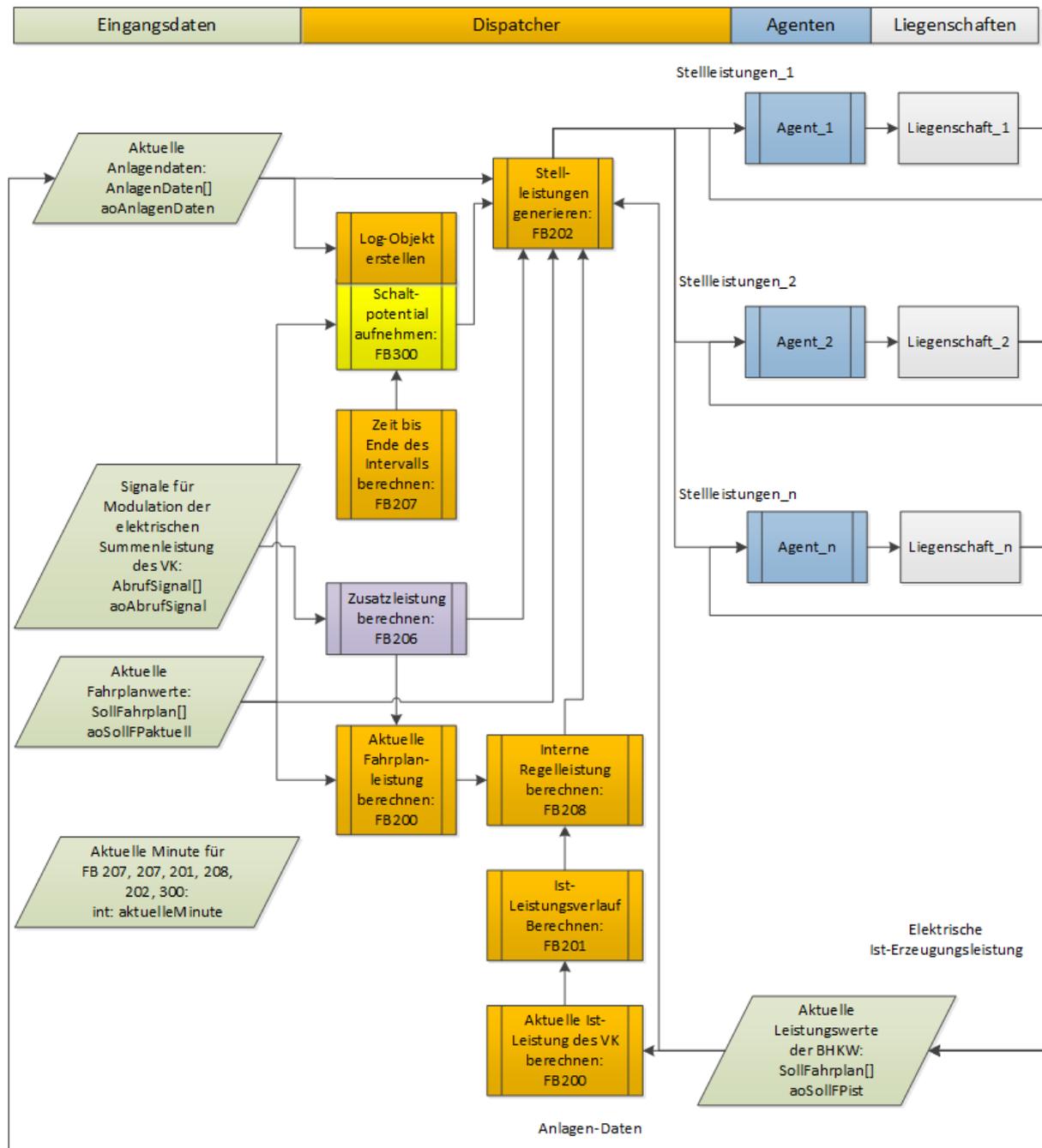
Mit $\alpha = 0,2$ und der Beladung nach Formel vom (4-34).

Mit der gewichteten Regelladung wird somit verhindert, dass eine Beladungsänderung zu einer Verletzung der oberen oder unteren Speichergrenze führt, weil eine vorherige Beladung noch nachschwingt.

6.2 Dispatcher

Der Dispatcher regelt die Einhaltung des Fahrplans des VK. Des Weiteren kann der Dispatcher die Leistung des VK auch abweichend vom Fahrplan erhöhen oder verringern.

In der Abbildung 6-2 ist das Funktionsschaltbild des Dispatchers dargestellt.



Legende:



Abbildung 6-2: Funktionsschaltbild des Dispatchers

Zusammenhängende Bausteine erhalten die gleichen Eingangsdaten, so dass sich ein Eingangsfeil auf einen der Bausteine auf die alle zusammenhängenden beziehen.

Nachfolgend eine kurze Erklärung der Eingangsdaten:

- **aoAnlagenDaten:** Die Anlagendaten werden in einem Array aus Objekten der Klasse AnlagenDaten übergeben. Die Anlagendaten enthalten Informationen wie z. B. die Stromkennzahlen, Mindest- und Maximalleistungen der BHKW und des SLK sowie sonstige Größen und Werte der Liegenschaften.
- **aoSollFPaktuell:** Die Leistungswerte, die die einzelnen BHKWs und der SLKs der Liegenschaften in der aktuellen Minute erreichen sollen sind einem Array aus Objekten der Klasse SollFahrplan gespeichert. Jedes Element des Arrays ist für eine Liegenschaft bestimmt.
- **aoAbrufSignal:** Der Dispatcher erhält die Aufforderung die Leistung des VK zu modulieren in Form von Objekten der Klasse AbrufSignal. In diesen steht für welchen Zeitraum das VK seine Leistung erhöhen oder absenken soll. Die Abrufsignale werden als Array dem Dispatcher übergeben. Abrufsignale sind optional. Bei keiner Anforderung kann ein „null“ übergeben werden.
- **aktuelleMinute:** Die aktuelle Minute ist notwendig um auf die aktuellen Werte zuzugreifen. Dieser wird als Integer übergeben.
- **aoSollFPist:** Die aktuellen Ist-Leistungen der BHKWs und SLKs aller Liegenschaften werden in einem Array aus Objekten der Klasse SollFahrplan übergeben.

Nachfolgende Parameter können über Setter-Methoden des Dispatchers verändert werden. Das Verhalten des Dispatchers wird wie folgt durch diese beeinflusst:

- **zeitHorizont:** Dieser Parameter beeinflusst die Analyse des Einschaltpotentials. Ein größerer Zeithorizont kann zu einem geringeren analysierten Einschaltpotential führen. Ein kleinerer Zeithorizont kann zu größeren analysierten Einschaltpotentialen führen. Jedoch ist bei einem kleinen Wert auch die Wahrscheinlichkeit größer, dass die obere Speichergrenze verletzt wird. Im Kapitel zur Schaltpotentialanalyse ist die Bedeutung dieses Parameters ausführlich beschrieben. Der Standardwert liegt bei 120, was 120 Minuten entspricht.
- **toleranzBandOben:** Breite des oberen Toleranzbandes für den Fahrplan des VK. Standardmäßig ist ein Wert von 0,1 eingetragen, was bedeutet, dass die Ist-Leistung des VK 10 % über der Soll-Leistung nach Fahrplan sein darf, ohne dass der Dispatcher gegenregelt.
- **toleranzBandUnten:** Breite des unteren Toleranzbandes für den Fahrplan des VK. Standardmäßig ist ein Wert von 0,1 eingetragen, was bedeutet, dass die Ist-Leistung des VK 10 % unter der Soll-Leistung nach Fahrplan sein darf, ohne dass der Dispatcher gegenregelt.

Die Funktionsweise wird im Folgenden beschrieben:

FB 200 – Summenberechnung:

Dieser Baustein berechnet aus dem Array von Objekten der Klasse SollFahrplan die elektrische Summenleistung.

FB201 – Ist-Leistungsverlauf berechnen:

Dieser Baustein zeichnet die Ist-Leistung des VK in einem Array auf. Es erhält von FB200 die aktuelle Ist-Leistung und übergibt FB208 das Array mit den Ist-Leistungswerten.

FB 208 - Berechnung der internen Regelleistung:

Regelleistung innerhalb des VK ist notwendig, falls die aktuelle Leistung von der Soll-Leistung abweicht, also der Fahrplan droht nicht eingehalten zu werden. Die aktuelle Ist-Leistung berechnet FB200 aus `aoSollFPist`, einem Array mit den Soll-Ist-Leistungen der Liegenschaften. Dann wird die aktuelle Ist-Leistung in FB201 einem Array hinzugefügt, welches die bisherigen Ist-Leistungen enthält.

Die Sollleistung des VK ist der Fahrplanwert zuzüglich einer Abrufleistung. Die Summe wird mittels FB200 berechnet.

In FB208 wird die notwendige interne Regelleistung berechnet um bis zum Ende des 15-Minutenintervalls die Leistung auf den Sollwert zu regeln.

FB 300 - Berechnung des Schaltpotentials:

Über Funktionsbaustein 300 wird das Schaltpotential berechnet. Dieses ist die Leistung, die das VK zusätzlich ein oder ausschalten kann. Vorher wird jedoch ein Log-Objekt erstellt, welches das Schaltpotential für die aktuelle Minute in aufnimmt. Für Die Schaltpotentialanalyse sind zusätzliche Eingangsdaten die Zeit bis zum Ende des Intervalls, die aktuellen Soll-Leistungswerte der Anlagen, so wie die aktuelle Minute.

FB 202 - Berechnung des Stellfahrplans für jede Liegenschaft:

FB202 stellt das Stellglied des Dispatchers dar. In diesem Baustein wird die interne Regelleistung auf die Liegenschaften verteilt. Dabei wird das zuvor berechnete Schaltpotential berücksichtigt.

FB206 – Zusatzleistung berechnen:

Dieser Baustein nimmt Abrufsignale entgegen, die anzeigen, wann und in welcher Höhe das VK seine elektrische Leistung unabhängig vom Fahrplan erhöhen oder verringern soll. Wenn sich mehrere Abrufsignale zeitlich überlappen, wird für die überlappende Zeit die Summe aus der Abrufhöhe als zusätzlich zu erbringende Leistung berechnet.

Berücksichtigung von Rampen- oder Totzeit der BHKW

Nach Abbildung 2-6 können BHKWs ihre Leistung nur rampenförmig ändern, aber nicht sprunghaft eine Sollvorgabe umsetzen. Des Weiteren soll nach Anforderung eine Totzeit berücksichtigt werden.

Die Rampen- und die Totzeit wird berücksichtigt, indem die innere Regelschleife (Agent) in jeder Minute und die äußere (Dispatcher) jede 5. und 10. Minute des 15-Minuten-Intervalls durchlaufen wird.

Zu Beginn eines jeden 15-Minuten-Intervalls wird der Fahrplanwert vom Dispatcher an die Liegenschaften weitergeleitet. Nach 5 Minuten wird erstmalig über FB 208 geprüft, ob der Trend der mittleren Leistung der Fahrplanleistung entspricht. Daraufhin wird die interne Regelleistung berechnet. Dieser Vorgang wiederholt sich in der 10. Minute des 15-Minuten-Intervalls. Die Stellgröße zwischen der ersten und der 5. Minute des Intervalls ist immer der Fahrplanwert, ab der 5. und 10. die Stellgröße, die ggf. interne Regelleistung berücksichtigt.

Somit „wartet“ der Dispatcher ab und Rampen- und Totzeiten führen nicht zu einem Aufschwingen der Regelung.

6.3 Ist-Last-Generator

Eine Störung des VK tritt nur auf, wenn die Ist-Last stark genug von der Prognoselast abweicht. Außerdem soll die Ist-Last in einem realistischen Rahmen von der Prognose abweichen.

Der Ist-Last-Generator wird als MATLAB-Skript implementiert. Bei Ausführung dieser wird über ein Datei-Öffnen-Dialog die Prognoselast ausgewählt, die in eine Ist-Last umgewandelt werden soll.

Im Folgenden wird die Erzeugung der Störgröße hergeleitet und im Sinne der ersten Anforderung validiert in Kapitel 6.4.6 validiert. Die Forderung nach Provokation der harten Regelung wird in Kapitel 6.4.7 validiert.

6.3.1 Prognoselast

Als Prognoselast werden Standardlastprofile für ein Einfamilienhaus aus dem Bestand des C4DSI verwendet. Diese werden für eine Kombination aus Brauchwassererwärmung und Heizbedarf in Abhängigkeit des Mittelwertes der Außentemperatur, des Jahresverbrauches und des Gebäudezustandes nach (47) berechnet.

Standardlastprofile werden verwendet um die Last eines Verbrauchers zu prognostizieren, der nicht gemessen wird. Es gibt verschiedene Standardlastprofile für verschiedene Verbrauchertypen wie beispielsweise Haushalt oder Gewerbe. Dabei ist das Standardlastprofil eine Vereinfachung. Es wird davon ausgegangen, dass das jeweilige Profil im Durchschnitt von der gesamten Verbrauchergruppe abgenommen wird. Dabei gilt, dass die Prognose für eine große Anzahl von Verbrauchern in der Summe besser eingehalten wird als für eine kleine (48). Dies offenbart auch den Nachteil von Standardlastprofilen. Sie geben nicht den realen Lastverlauf der einzelnen Verbraucher wieder, da individuelles Verbrauchsverhalten nicht berücksichtigt wird. Zum Beispiel kann in einer einzelnen Liegenschaft das Wärmeempfinden der Bewohner dazu führen, dass die Heizung mehrere Stunden früher als in anderen Liegenschaften eingeschaltet wird. Oder wenn die Bewohner für einige Stunden das Haus verlassen, die Heizung abstellen. Des Weiteren kann es Lastspitzen geben durch gleichzeitige Warmwasserentnahme an mehreren Entnahmestellen.

6.3.2 Ist-Last

Die Hauptforderung ist, dass die Ist-Last möglichst realistisch von der Prognoselast abweicht. Daher

wurde nach (20) die Prognoselast mit einem Amplitudenfehler und einem Zeitfehler belegt.

Der Amplitudenfehler wirkt als Multiplikator, der die Prognoselast in jeder Minute variiert. Der Zeitfehler stellt eine Zeitverschiebung der Prognoselast dar, deren Ausmaß zufällig ist.

Die Generierung von variierten Ist-Lastgängen in der Dissertation (20) ist nicht näher beschrieben. Daher werden über das individuelle Verbrauchsverhalten folgende Annahmen getroffen:

1. Die Wärme wird im Haushalt auf zwei Arten verwendet:

- Raumerwärmung mittels Heizung
 - Warmwasser für Körperhygiene oder Reinigung des Haushaltes
2. Der Ist-Lastgang kann im Vergleich zur Lastprognose um bis 3 Stunden vor- oder nacheilen. Diese Zeitverschiebung entspricht dem Zeitfehler. Der maximale Betrag des Zeitfehlers wird in Absprache mit dem C4DSI mit 3 Stunden angenommen.
 3. Der Warmwasserverbrauch kann sich in jeder Minute stark ändern und kann die Prognoselast um den zufälligen Warmwasserstörfaktor 0 bis 2 (Verdopplung des Wärmebedarfs) verändern.

Zur Berechnung der Zufallszahlen Zeitfehler und Warmwasserstörfaktor wird nach dem Indifferenzprinzip eine Gleichverteilung angenommen (49).

Folgendes Bild zeigt das beispielhafte Ergebnis des Ist-Lastgenerators:

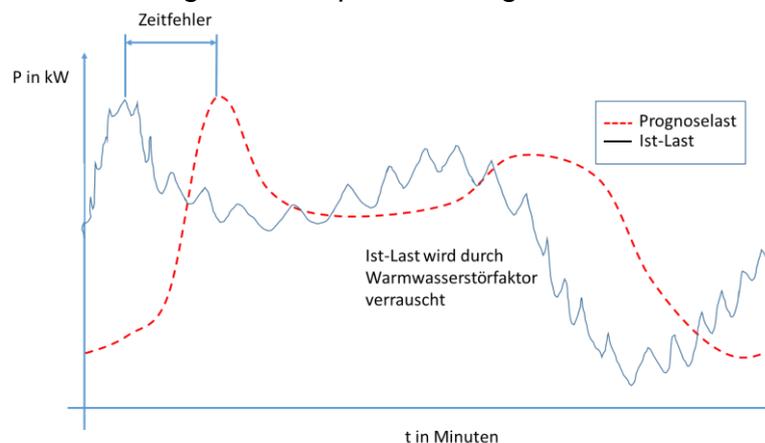


Abbildung 6-3: Prognoselast und beispielhafte Ist-Last

Hierbei eilt die Ist-last der Prognoselast voraus. Des Weiteren schwankt die Ist-Last in jeder Minute aufgrund des Warmwasserstörfaktors.

6.4 Test-Cases

Um die Funktionalität der Regelung und des Ist-Last-Generators zu überprüfen, werden diese über Testfälle, sog. Test-Cases geprüft.

Für Alle Test-Cases wird der gleiche Liegenschaftstyp verwendet. Die Parameter sind in der Konfigurationstabelle 9.1 zu finden.

6.4.1 Test-Case 1: Prognose-Last = Ist-Last

In diesem Test-Case wird überprüft, ob die Liegenschaft als DLL und von Java gesteuerte Liegenschaft sich exakt verhält, wie das Simulink-Modell.

Dafür wurde das Simulink-Modell in ein Testbett eingebettet und die die Ausgabewerte gespeichert. Diese werden mit den Ausgabewerten der Java-Umgebung verglichen. Die Differenz muss über alle Zeitpunkte 0 sein, damit ausgesagt werden kann, dass die DLL sich gleich dem Simulinkmodell verhält.

Das vorhandene Testbett wurde dafür um „To Workspace“-Bausteine erweitert. Folgende Werte werden mit diesen Bausteinen in den Workspace geladen:

1. Elektrische Ist-Leistung der BHKWs
2. Thermische Ist-Leistung der BHKWs
3. Thermische Ist-Leistung des SLK
4. Mittelwert der Schichttemperaturen

Diese Werte wurden ebenfalls aus der Liegenschaft in der Java-Umgebung gespeichert.

Die Vorgehensweise ist dem folgenden Schema zu entnehmen:

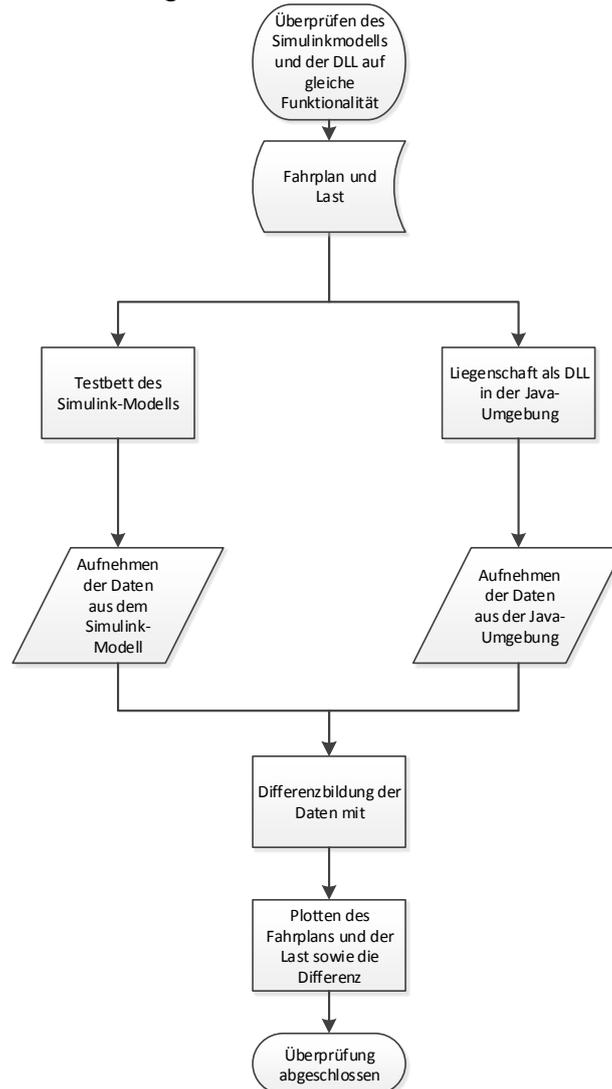


Abbildung 6-4: Vorgehensweise bei TC 1

Eingangsleistung

Es wurde der Fahrplan von zwei BHKWs einer Liegenschaft zugeführt. Zu sehen ist, dass sowohl die gemessene Leistung der BHKWs des Simulinkmodells, als auch jene der DLL identisch sind und sich somit eine Differenz von 0 über den gesamten Zeitraum ergibt.

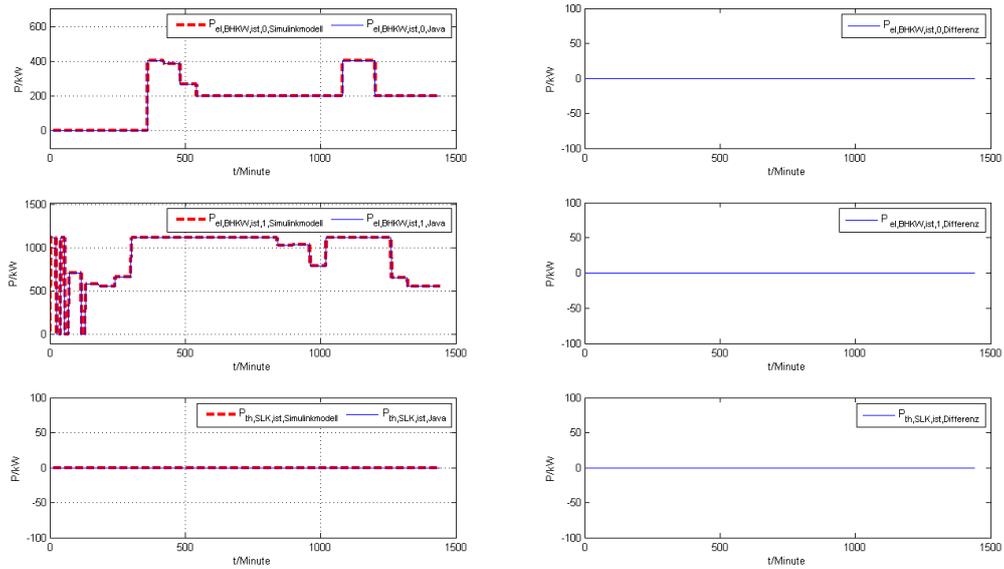


Abbildung 6-5: Elektrische BHKW-Leistung des Simulinkmodells und der DLL

Thermische Ist-Last

Die gemessene thermische Ist-Last ist ebenfalls identisch und es gibt keine Abweichung.

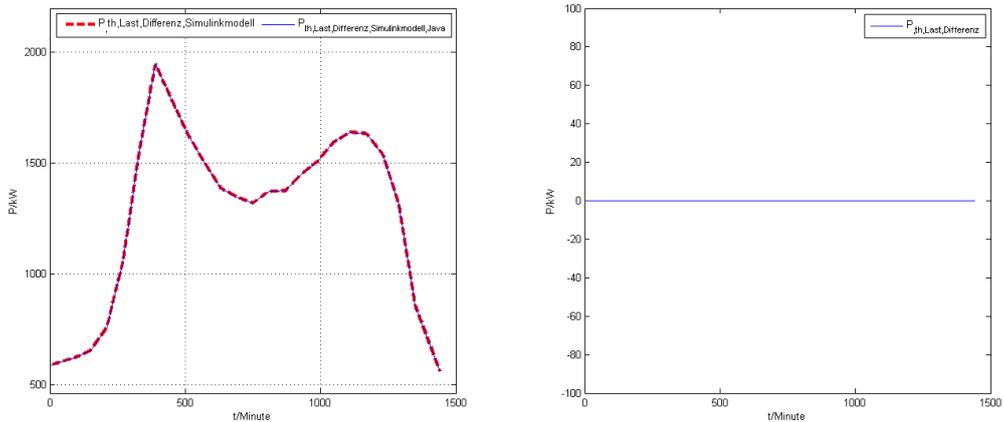


Abbildung 6-6: Gemessene Last des Simulinkmodells und der DLL

Speichertemperatur

Es wurde außerdem die gemittelte Speichertemperatur verglichen. Auch hier sind die Werte identisch.

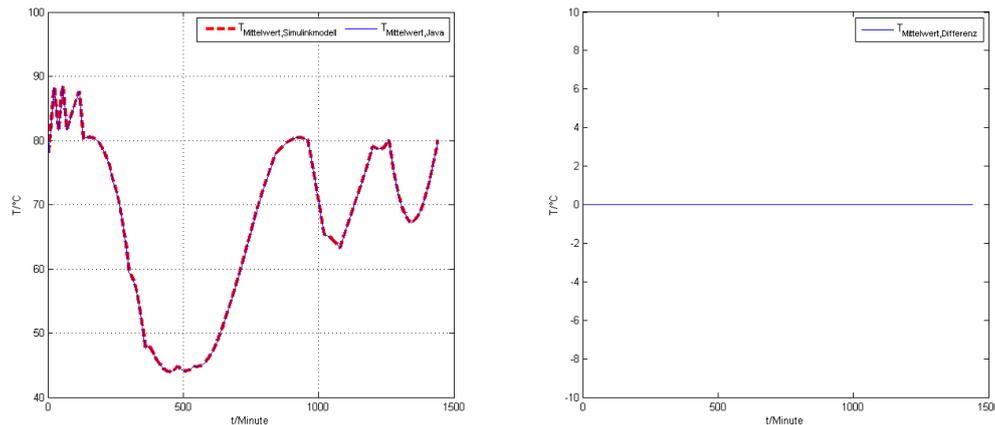


Abbildung 6-7: Mittlere Speichertemperatur des Simulinkmodells und der Last

Resultat von TC1

Die Differenz ist für alle gemessenen Größen über den gesamten Testzeitraum 0. Daher ist damit validiert, dass das Simulink-Modell exakt so arbeitet wie die DLL.

6.4.2 Test-Case 2: Regelung auf Sollfüllstand

In diesem Test-Case wird untersucht, ob der Agent eine Änderung des Soll-Füllstandes nachfährt. Dabei muss die Regelung auch die Anforderung erfüllen, die obere und auch die untere Speichergrenze nicht zu verletzen (Sofern die SLK-Schwelle auf die maximale Füllstandshöhe gesetzt wird).

Diese Funktionalität wird immer dann benötigt, wenn der Ist-Füllstand unter die SLK-Schwelle tritt und exakt nachgefahren werden soll. Dabei wurde die SLK-Schwelle auf die obere Speichergrenze gelegt. Dies bedeutet, dass der Agent jeden Soll-Füllstand versucht nachzufahren. Dies wurde eingestellt, um das Testen dieser Funktionalität einfach zu halten, da so der Soll-Füllstand nicht beachtet werden muss und der Regler jederzeit den Soll-Füllstand exakt einzuhalten versucht.

Folgende Abbildung 6-8 zeigt, wie der Soll-Füllstand angehoben und wieder abgesenkt wird:

In Minute 500 steigt der Soll-Füllstand auf die obere Speichergrenze. In Minute 1000 sinkt dieser wieder auf 0 kWh. Ziel muss sein, dass der Agent die Eingangsleistung des Speicher so wählt, dass ohne Überschwingen oder Unterschwingen, welche die Speichergrenzen verletzen und die harte Regelung provozieren würden, der Soll-Füllstand erreicht wird.

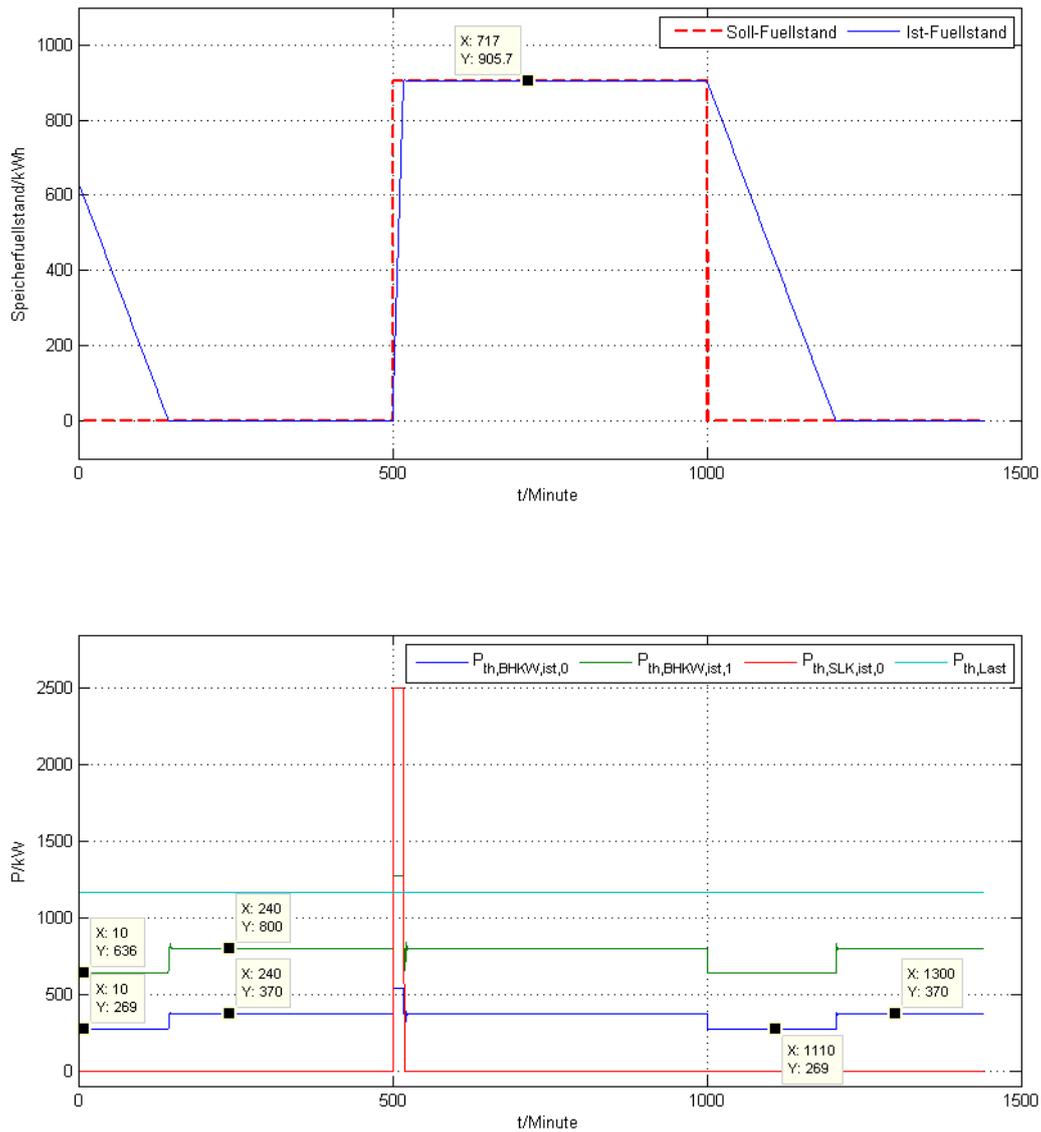


Abbildung 6-8: Reaktion der Regelung auf einen Sollwertsprung durch Erhöhen und Verringern des Soll-Füllstandes

6.4.2.1 Positiver Sollwertsprung

In diesem Kapitel wird untersucht, ob die Regelung ein Überschwingen beim Erreichen der oberen Speichergrenze von 905.67 kWh erlaubt. Die Erwartung ist, dass dies nicht passiert, da dies programmatisch verhindert wird. Auf den leeren Speicher wird ein Sprung von 905,67 kWh an die obere Speichergrenze angefordert.

Im Folgenden wird untersucht, wie die BHKWs und das SLK eingesetzt werden um den Sollfüllstand zu erreichen.

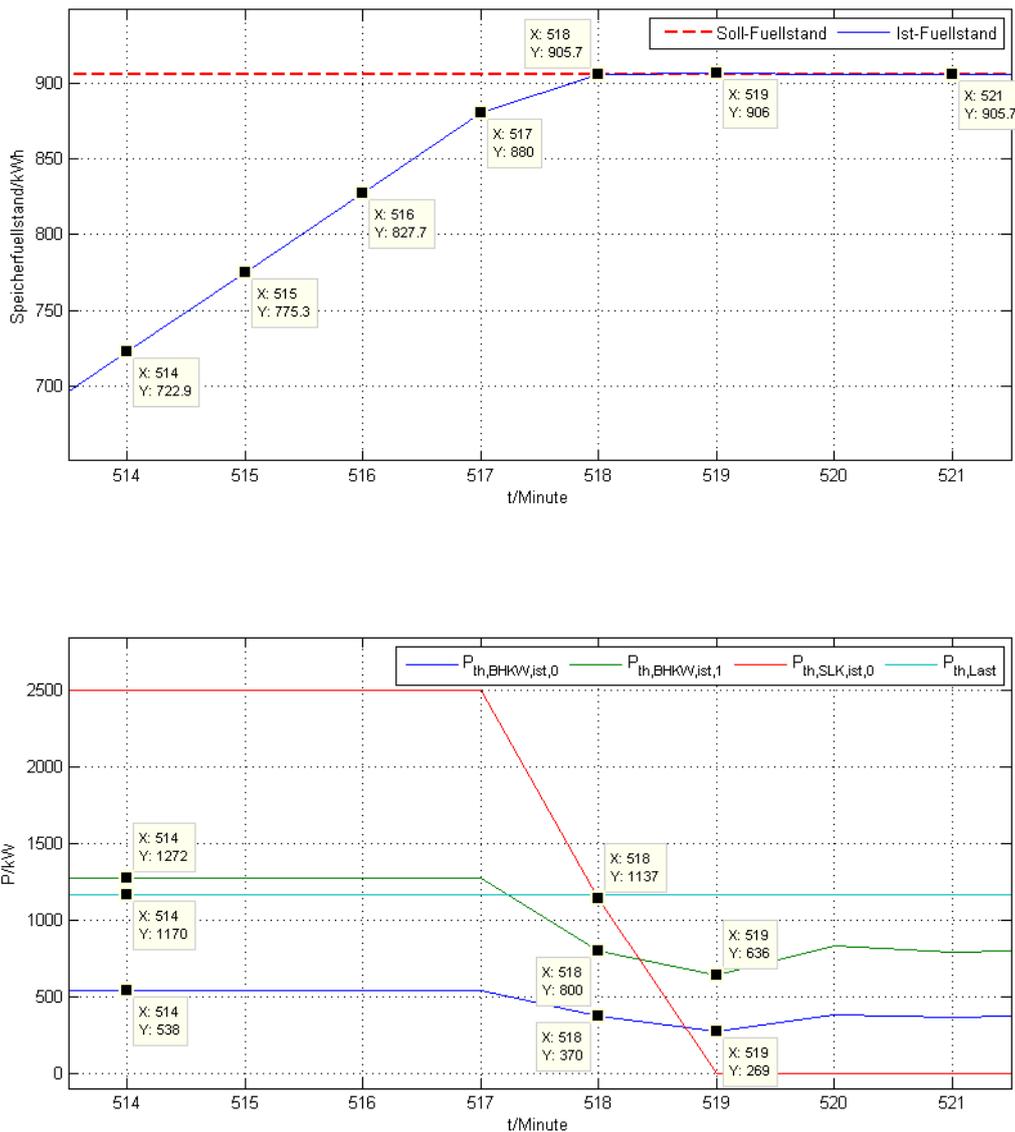


Abbildung 6-9: Ist-Füllstand erreicht Sollwert ohne Überschwingen

Zu erkennen ist, dass kurz vor Erreichen des Sollfüllstandes, die Leistung von BHKW und SLK gedrosselt wird. Damit wird berücksichtigt, dass 20 % der Beladung bei Änderung dieser aus der Vorminute nachschwingt:

Bis Minute 517 beträgt die Beladung des Speichers 52,3 kWh. Die Differenz in dieser Minute des Füllstandes zum Sollfüllstand beträgt 905,67 kWh – 880 kWh = 25,67 kWh. Mit Hilfe der Formel (6-2) lässt sich die einzustellende Regelladung berechnen:

$$Regelladung_{gewichtet} = \frac{Regelladung - \alpha \times P_{Beladung}(t-1 \text{ Minute})}{1 - \alpha} = \frac{25,67 \text{ kWh} - 52,3 \text{ kWh} \times 0,2}{1 - 0,2} \approx 19 \text{ kWh}$$

Mit dieser Regelladung wird der Sollfüllstand in Minute 518 annähernd erreicht. Die Differenz von 905,67 kWh – 906 kWh = 0,03 kWh wird zurückgeführt auf Rundungsfehler in der Darstellung des Matlab-Plots.

In der Log-Datei wird ein gemessener Füllstand von 905,6944949161733 kWh angegeben was somit dem gerundeten Zielwert entspricht.

6.4.2.2 Negativer Sollwertsprung

Im Folgenden wird der volle Speicher komplett entleert. Dabei wird untersucht, ob der untere Sollwert ohne Unterschwingen erreicht wird.

Nun wird das Erreichen des unteren Sollfüllstandes und wie dabei die Leistung der Anlagen moduliert wird:

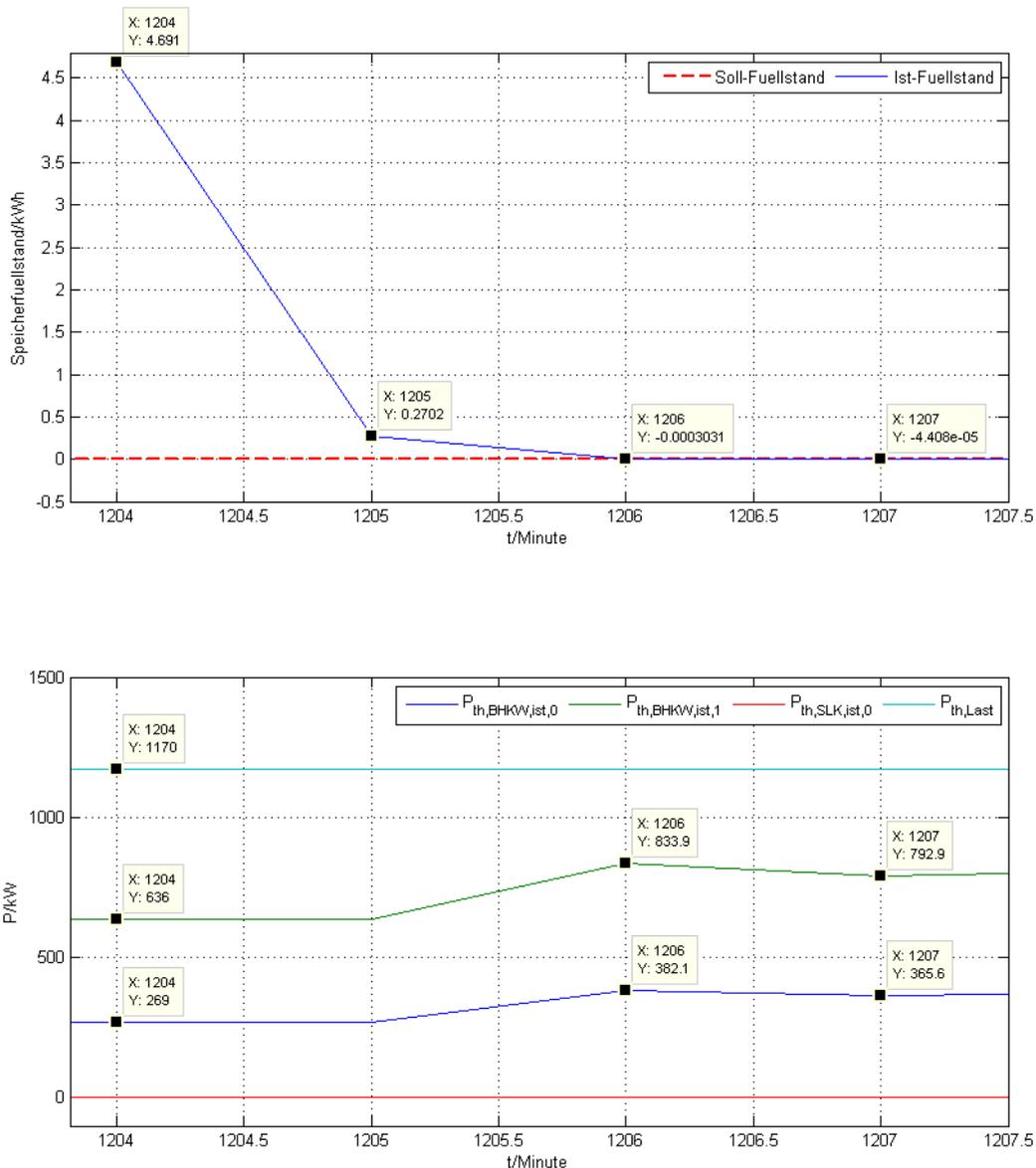


Abbildung 6-10: Erreichen des unteren Sollwertes ohne Unterschwingen

Bis zur Minute 1205 beträgt die Entladung 4,42 kWh/min. In Minute 1205 würde bei Fortführung dieser Entladeleistung die untere Grenze verletzt werden. Daher wird nun die nächste Entladung mit Berücksichtigung des Nachschwingens der vorherigen Entladung berechnet:

$$\begin{aligned}
 \text{Regelladung}_{\text{gewichtet}} &= \frac{\text{Regelladung} - \alpha \times P_{\text{Beladung}}(t - 1 \text{ Minute})}{1 - \alpha} \\
 &= \frac{-0,27 \text{ kWh} - (-4,42 \text{ kWh}) \times 0,2}{1 - 0,2} \approx 0,76 \text{ kWh}
 \end{aligned}$$

Nun wird sogar positive Regelladung abgerufen um das Entladen so abzubremsen, dass in der nächsten Minute Der Füllstand bei 0 kWh liegt. Zu sehen ist, dass der Füllstand bei -0,003 kWh in Minute 1206 liegt. Dies wird auf Rundungsfehler zurückgeführt. Somit funktioniert das Erreichen der unteren Grenze ohne Unterschwingen.

6.4.2.3 Aufnahmen der Störspaltungantwort

Im Folgenden wird bei konstantem Sollfüllstand eine Störung auf den Speicher gegeben. Dabei wird die Last um 100 kW sprunghaft erhöht und abgesenkt. Im Folgenden Bild ist dies zu sehen:

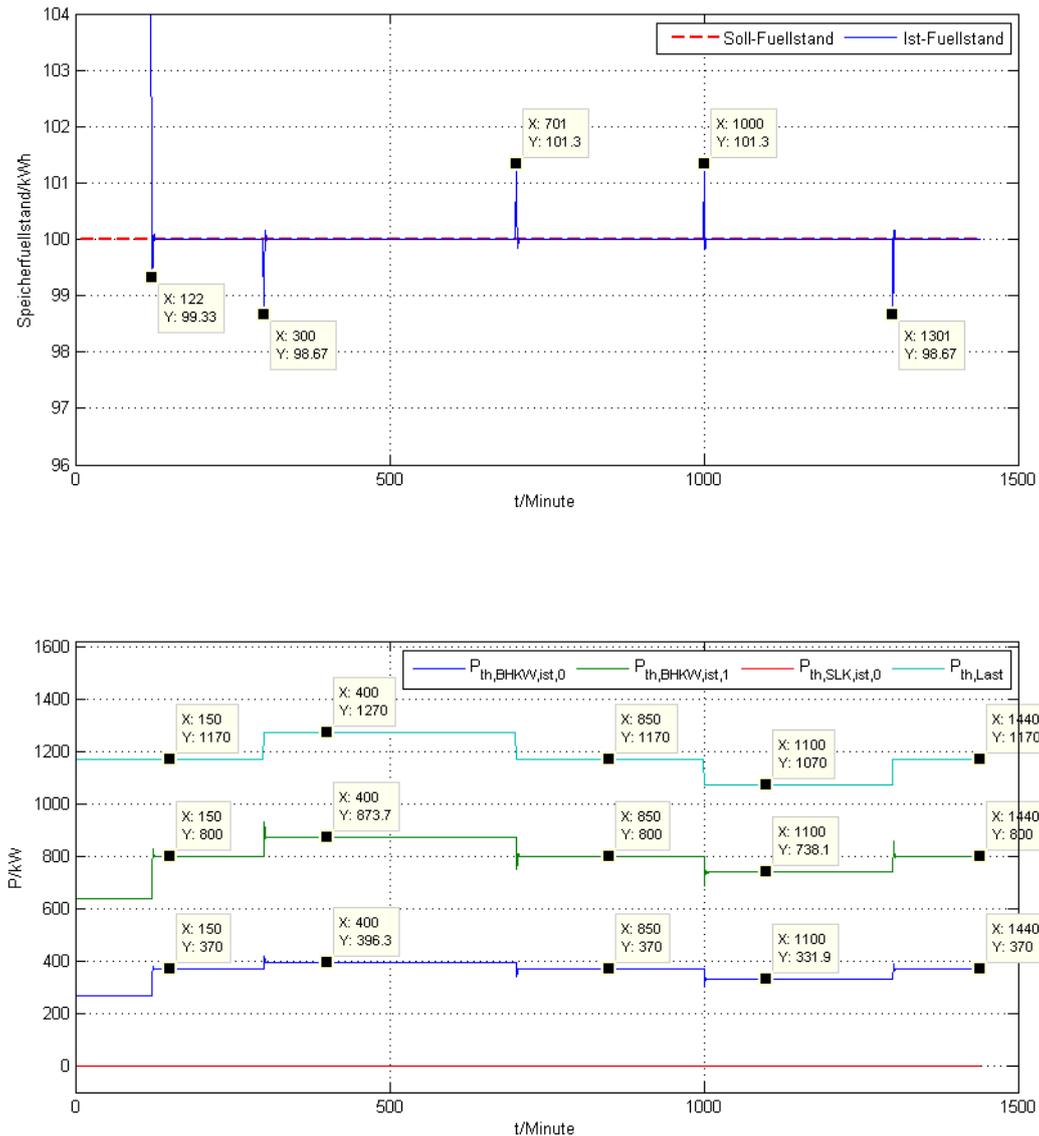


Abbildung 6-11: Sprunghafte Erhöhung und Verringerung der Last

Die Last ändert sich um 100 kW, weshalb das SLK nicht eingeschaltet wird. Dies wird erst bei einer Laständerung eingeschaltet, wenn diese größer als die Mindestleistung des SLK ist. Vorher wird nur der Teillastbereich der BHKW ausgenutzt.

Damit wird verhindert, dass das SLK ein Aufschwingen verursacht und die Regeldifferenz überkompensiert. Somit wird das SLK nur eingeschaltet, wenn dies wirklich sinnvoll ist.

Da die Ist-Last mit einem Verzug von 1 Minute gemessen wird, eilt die Regelung um 1 Minute hinterher. Dies ist im Folgenden zu erkennen:

In Minute 300 beträgt die Last an der Liegenschaft 1270 kW. Dies führt dazu, dass der Füllstand des Speichers auf 98,67 kWh fällt. 100 kW zusätzlicher Last entsprechen

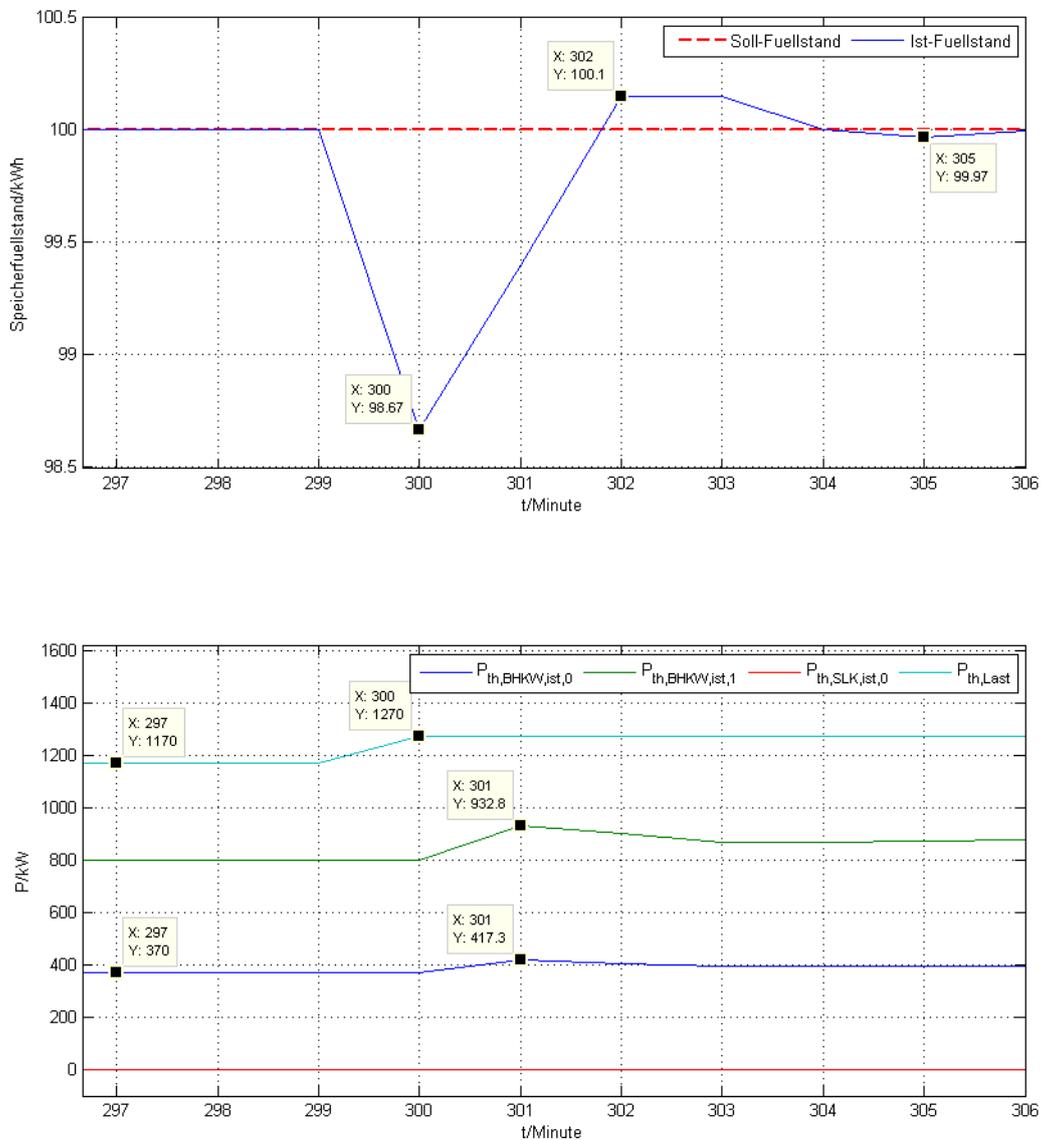


Abbildung 6-12: Reaktion der Regelung auf nicht prognostizierte Lasterhöhung

einer Entladung von 1,67 kWh. Zusätzlich kommt noch die aktuelle Differenz zum Soll-Füllstand hinzu. Diese beträgt $100 \text{ kWh} - 98,67 \text{ kWh} = 1,335 \text{ kWh}$. Somit muss für die nächste Minute zusätzliche thermische Energie von 3 kWh geleistet werden ($1,335 \text{ kWh} + 1,67 \text{ kWh}$). Diese zusätzliche Energie entspricht einer Zusatzleistung von $3 \text{ kWh} \cdot 60/h = 180,1 \text{ kW}$. Diese Zusatzleistung wird von beiden BHKW anteilig aufgefangen.

$$P_{th,Zusatz} = P_{th,BHKW0,ist} + P_{th,BHKW1,ist} - P_{th,BHKW0,soll} - P_{th,BHKW1,soll}$$

$$= 932,8 \text{ kW} + 417,3 \text{ kW} - 370 \text{ kW} - 800 \text{ kW} = 180,1 \text{ kW}.$$

In Minute 302 wird ein Überschwingen von 0,1 kWh gemessen. Dies wird zurückgeführt auf Rundungsfehler.

Nun wird untersucht wie sich ein negativer Sprung auf die Regelung auswirkt:

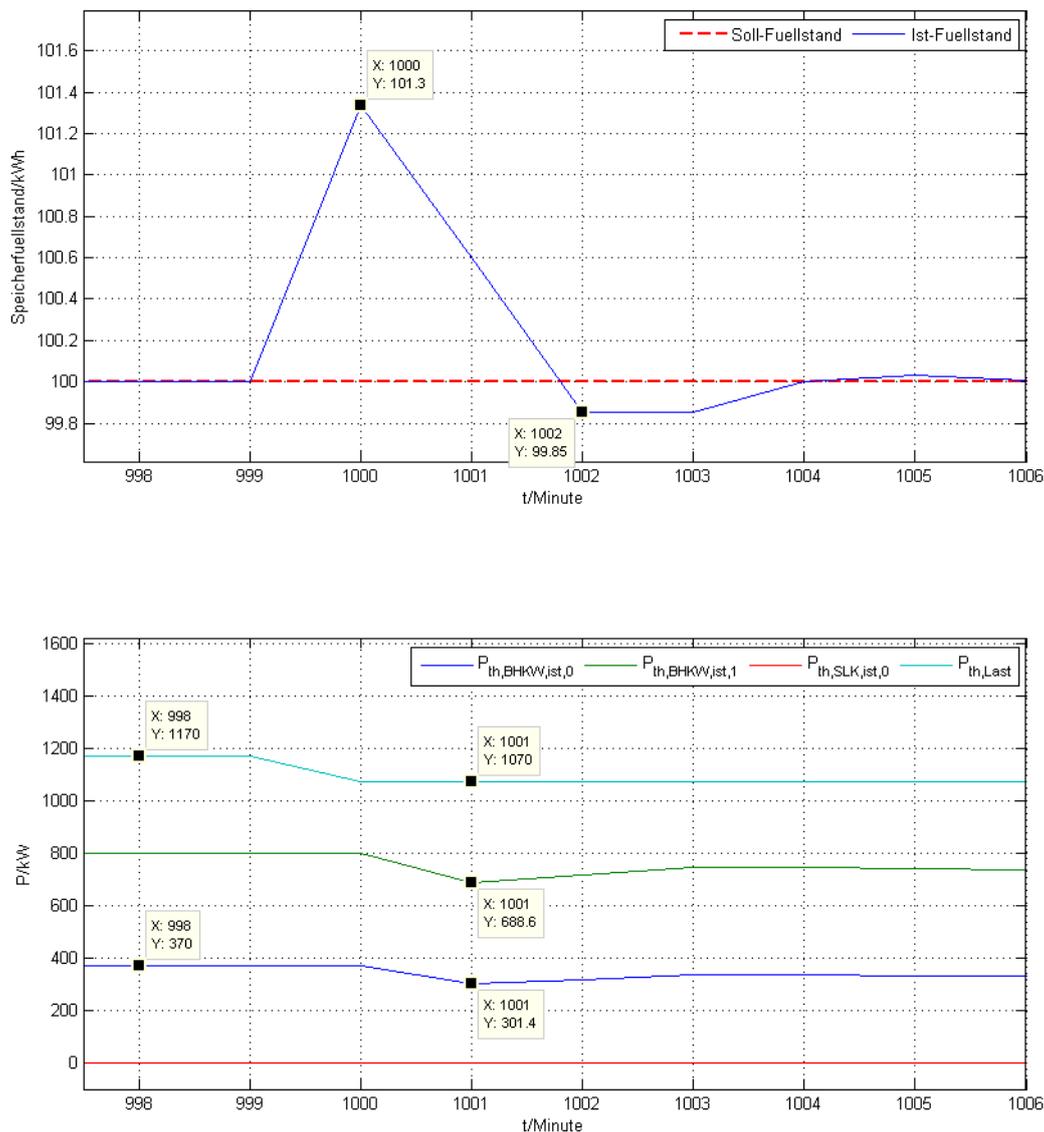


Abbildung 6-13: Reaktion der Regelung auf nicht prognostizierte Lastverringernung

In Minute 1000 beträgt Last 100 kW weniger als in der Minute zuvor. Dadurch wird eine Minute später die Regelung veranlasst gegen zu regeln. Dafür wird eine Abschaltleistung berechnet die anteilig auf die beiden BHKW aufgeteilt wird.

Zuerst wird die Füllstandsdifferenz berechnet. Diese beträgt

$$\begin{aligned} \text{Füllstandsdifferenz} &= \text{Füllstand}_{\text{Soll}} - \text{Füllstand}_{\text{Ist}} = 100 \text{ kWh} - 101,3 \text{ kWh} \\ &= -1,3 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Die fehlende Lastentladung beträgt:

$$\text{Lastentladung}_{\text{Fehl}} = -\frac{100 \text{ kW}}{60} \times h = -1,67 \text{ kWh}$$

In der Summe fehlt also eine Ladung von $1,3 \text{ kWh} + 1,67 \text{ kWh} \approx 3 \text{ kWh}$.

Dies entspricht einer Zurückhaltung von Leistung von 180 kW.

$$\begin{aligned} P_{th,Zusatz} &= P_{th,BHKW0,ist} + P_{th,BHKW1,ist} - P_{th,BHKW0,soll} - P_{th,BHKW1,soll} \\ &= 301,4 \text{ kW} + 688,6 \text{ kW} - 370 \text{ kW} - 800 \text{ kW} \approx -180 \text{ kW}. \end{aligned}$$

Wie im Bild zu ersehen, liefern die BHKW exakt die angeforderte Regelladung. Der Unterschwinger in Minute 1003 wird auf Rundungsfehler zurückgeführt.

6.4.3 Test-Case 3: Test des Stellgliedes des Dispatchers

In diesem TC wird untersucht, ob das Stellglied des Dispatchers das Schaltpotential korrekt berücksichtigt und die geeigneten Liegenschaften zum Abruf des Schaltpotentials auswählt.

Dafür wird die Leistungsabruffunktion des Reglers verwendet. Somit wird auch der Leistungsabruf getestet.

Im ersten Teil dieses Kapitales wird ein Abruf von positiver und im zweiten Kapitel ein Abruf von negativer Zusatzleistung vom Dispatcher ausgeführt.

6.4.3.1 Einschalten von positiver Zusatzleistung

Es wird durch ein Abrufsignal dem Dispatcher mitgeteilt, dass zum Zeitpunkt $t = 150$. Minute eine elektrische Leistung von 300 kW zusätzlich erbracht werden soll.

Beim Einschalten werden die Einschaltpotentiale der Liegenschaft selektiv abgerufen. Dabei werden zuerst das Einschaltpotential der Liegenschaft mit der größten Differenz von Soll-Füllstand zu Ist-Füllstand abgerufen, danach das der Liegenschaft mit der zweitgrößten Differenz usw. Dabei wird so viel Einschaltpotential abgerufen, wie angefragt wurde, in diesem Fall 300 kW.

Zur Überprüfung des Auswahlalgorithmus, werden die Liegenschaften mit unterschiedlichen Einschaltpotentialen ausgestattet. Dafür erhalten die Liegenschaften unterschiedlich starke Lasten.

Durch diese Lasten ergeben sich in der 150. Minute folgende Ist-Füllstände und daraus resultierende Differenzfüllstände:

| Liegenschaft | Soll-Füllstand | Ist-Füllstand | Differenz-Füllstand |
|--------------|----------------|---------------|---------------------|
| 1 | 869,39 kWh | 800,33 kWh | 69,06 kWh |
| 2 | 869,39 kWh | 709,02 kWh | 160,36 kWh |
| 3 | 869,39 kWh | 871,84 kWh | -2,45 kWh |

Tabelle 6-1: Betrachtung der Ist-Füllstände für Auswahl der Liegenschaften

Nun wird untersucht, welches Einschaltpotential die Liegenschaften haben.

| Liegenschaft | Einschaltpotential | Abgerufenes Einschaltpotential |
|--------------|--|--------------------------------|
| 1 | 146,1 kW | 71,8 kW |
| 2 | 228,2 kW | 228,2 kW |
| 3 | 76,0 kW | 0 kW |
| | Summe abgerufenes Einschaltpotential: | 300 kW |

Tabelle 6-2: Einschaltpotential der Liegenschaften

Zu erkennen ist, dass das Einschaltpotential aus Liegenschaft 2 vollständig abgerufen wird. Aus Liegenschaft 1 wird nur ein Teil des Einschaltpotentials abgerufen, während aus Liegenschaft 3 kein Einschaltpotential verwendet wird.

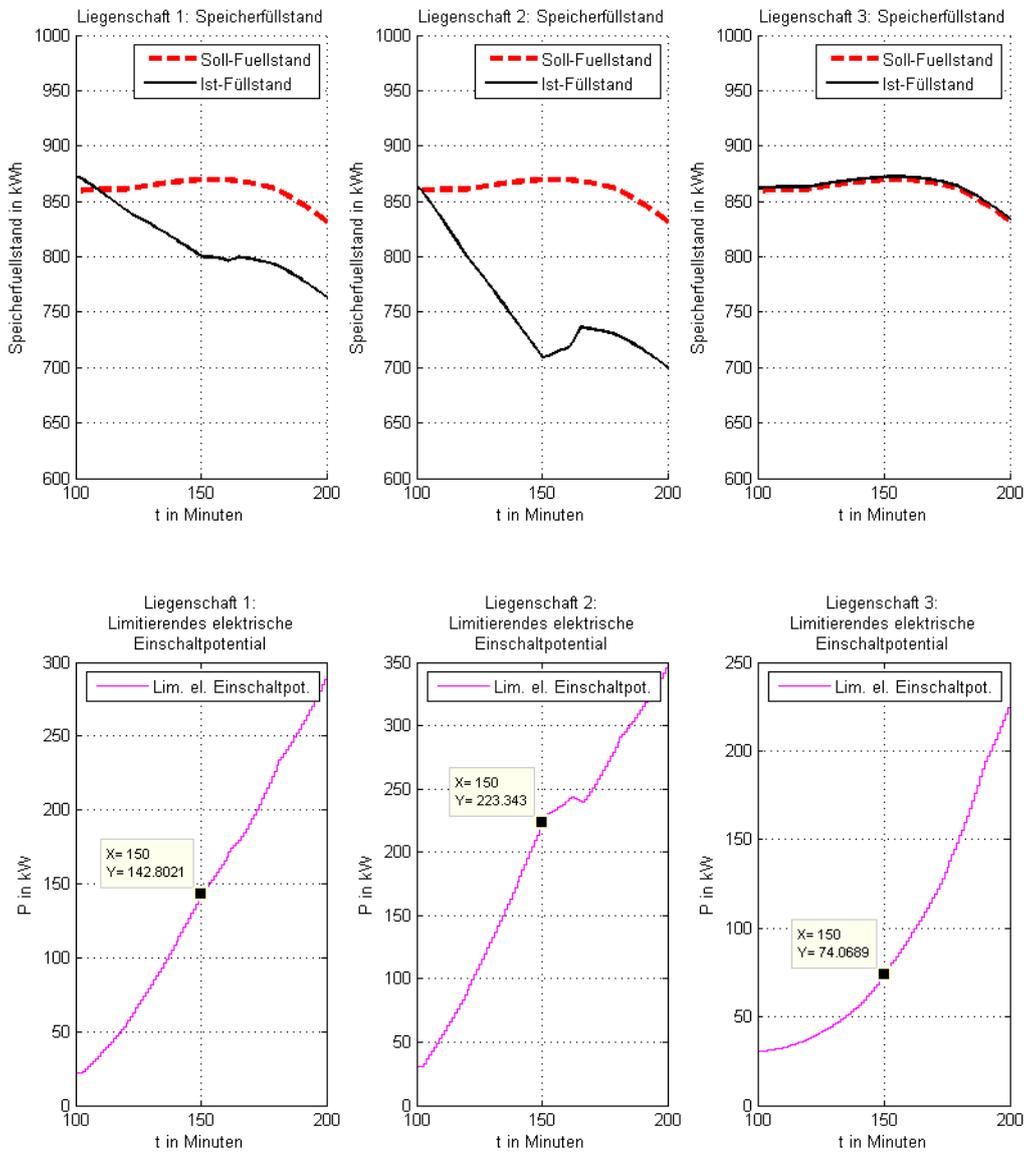


Abbildung 6-14: Speicherfüllstand und Limitierendes elektrische Einschaltpotential der Liegenschaften

Der Abruf der zusätzlichen elektrischen Leistung ist in folgendem Bild zu erkennen:

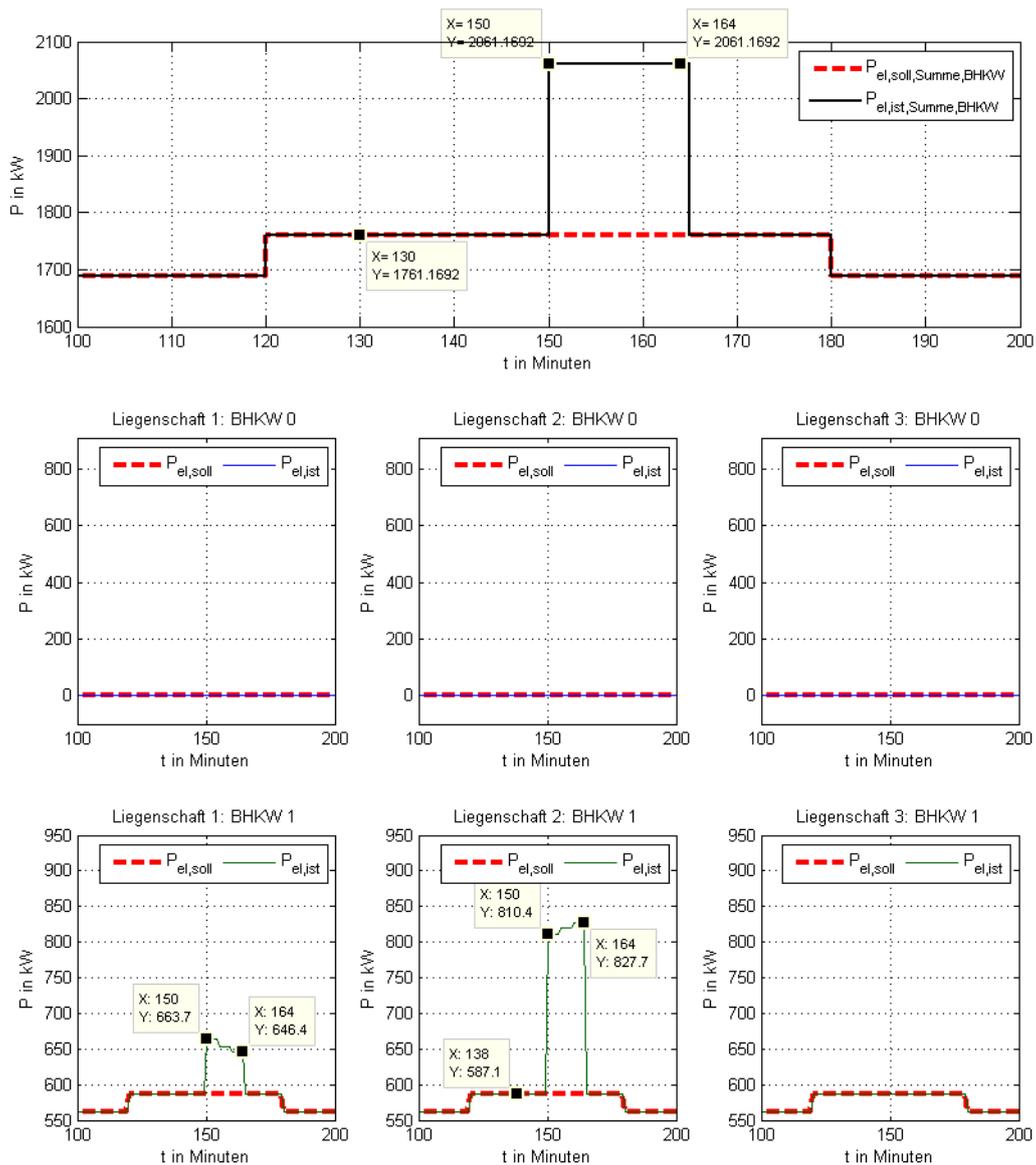


Abbildung 6-15: Abruf von zusätzlicher Leistung

Zu sehen ist, dass die Leistung des BHKW 1 von Liegenschaft 1 und 2 eingeschaltet wird. Außerdem ist zu erkennen, dass in Liegenschaft 2 die größere Leistung eingeschaltet wird. Damit ist bewiesen, dass der Auswahlalgorithmus funktioniert und das Einschaltpotential Liegenschaft mit der größten Differenz zum Soll-Füllstand zuerst abrufen und dann nachrangig die der weiteren Liegenschaften mit einer geringeren Differenz.

6.4.3.2 Einschalten von negativer Zusatzleistung

Es wird durch ein Abrufsignal dem Dispatcher mitgeteilt, dass zum Zeitpunkt $t = 150$. Minute eine elektrische Leistung von 40 kW abgeschaltet werden soll.

Beim Abschalten werden die Abschaltpotentiale der Liegenschaft selektiv abgerufen. Dabei werden zuerst das Abschaltpotential der Liegenschaft mit der größten Differenz von Ist-Füllstand zu Soll-Füllstand abgerufen, danach das der Liegenschaft mit der

zweitgrößten Differenz usw. Dabei wird so viel Abschaltpotential abgerufen, wie angefragt wurde, in diesem Fall 40 kW.

Zur Überprüfung des Auswahlalgorithmus, werden die Liegenschaften mit unterschiedlichen Abschaltpotentialen ausgestattet. Dafür erhalten die Liegenschaften unterschiedlich starke Lasten.

Durch diese Lasten ergeben sich in der 150. Minute folgende Ist-Füllstände und daraus resultierende Differenzfüllstände:

| Liegenschaft | Soll-Füllstand | Ist-Füllstand | Differenz-Füllstand |
|--------------|----------------|---------------|---------------------|
| 1 | 869,39 kWh | 800,33 kWh | -69,06 kWh |
| 2 | 869,39 kWh | 709,02 kWh | -160,36 kWh |
| 3 | 869,39 kWh | 871,84 kWh | 2,45 kWh |

Tabelle 6-3. Betrachtung der Füllstände zur Auswahl der Liegenschaft für Abschaltung von Leistung

Bei der Berechnung der Differenz wird anders als beim Einschalten von Zusatzleistung die Differenz von Soll- zu Ist-Füllstand wie folgt berechnet:

$$\text{Füllstands-Differenz} = \text{Ist-Füllstand} - \text{Soll-Füllstand}$$

Mit dieser Änderung kann zur Berechnung der Reihenfolge in der die Abschaltpotentiale ausgewählt werden dieselbe Methode verwendet werden.

Nun wird untersucht, welches Abschaltpotential die Liegenschaften haben.

| Liegenschaft | Abschaltpotential | Abgerufenes Abschaltpotential |
|--------------|--|-------------------------------|
| 1 | 24,55 kW | 15,44 kW |
| 2 | 24,55 kW | 0,0 kW |
| 3 | 24,55 kW | 24,55 kW |
| | Summe abgerufenes Einschaltpotential: | 40 kW |

Tabelle 6-4: Abschaltpotential der Liegenschaften

Zu erkennen ist, dass das Abschaltpotential aus Liegenschaft 2 überhaupt nicht abgerufen wird. Aus Liegenschaft 1 wird nur ein Teil des Abschaltpotentials abgerufen, während aus Liegenschaft 3 ein Teil des Abschaltpotentials verwendet wird.

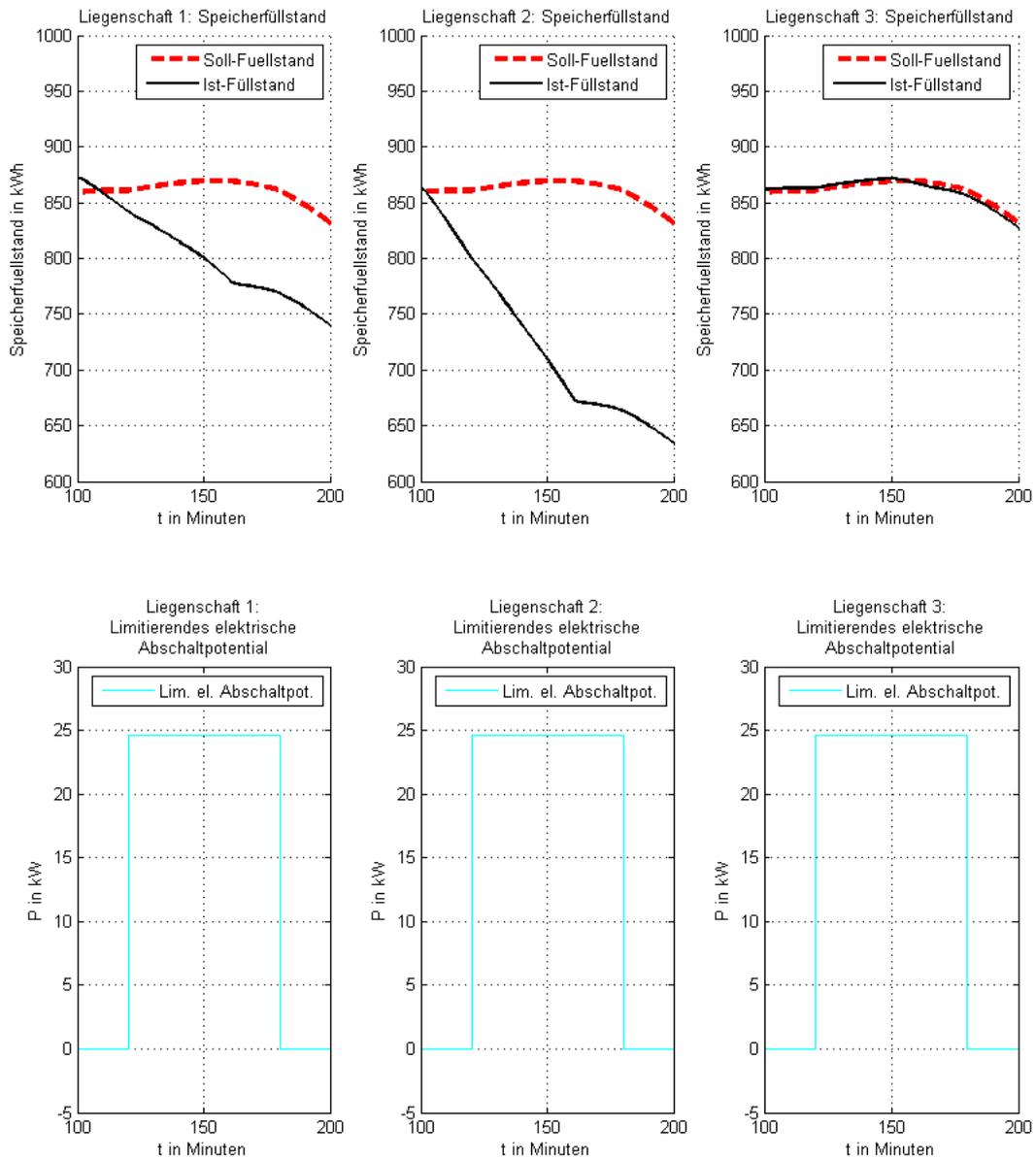


Abbildung 6-16: Limitierendes Abschaltpotential der Liegenschaften und ihre Füllstände

Der Abruf von Abschaltbarer Leistung ist in folgender Abbildung zu sehen:

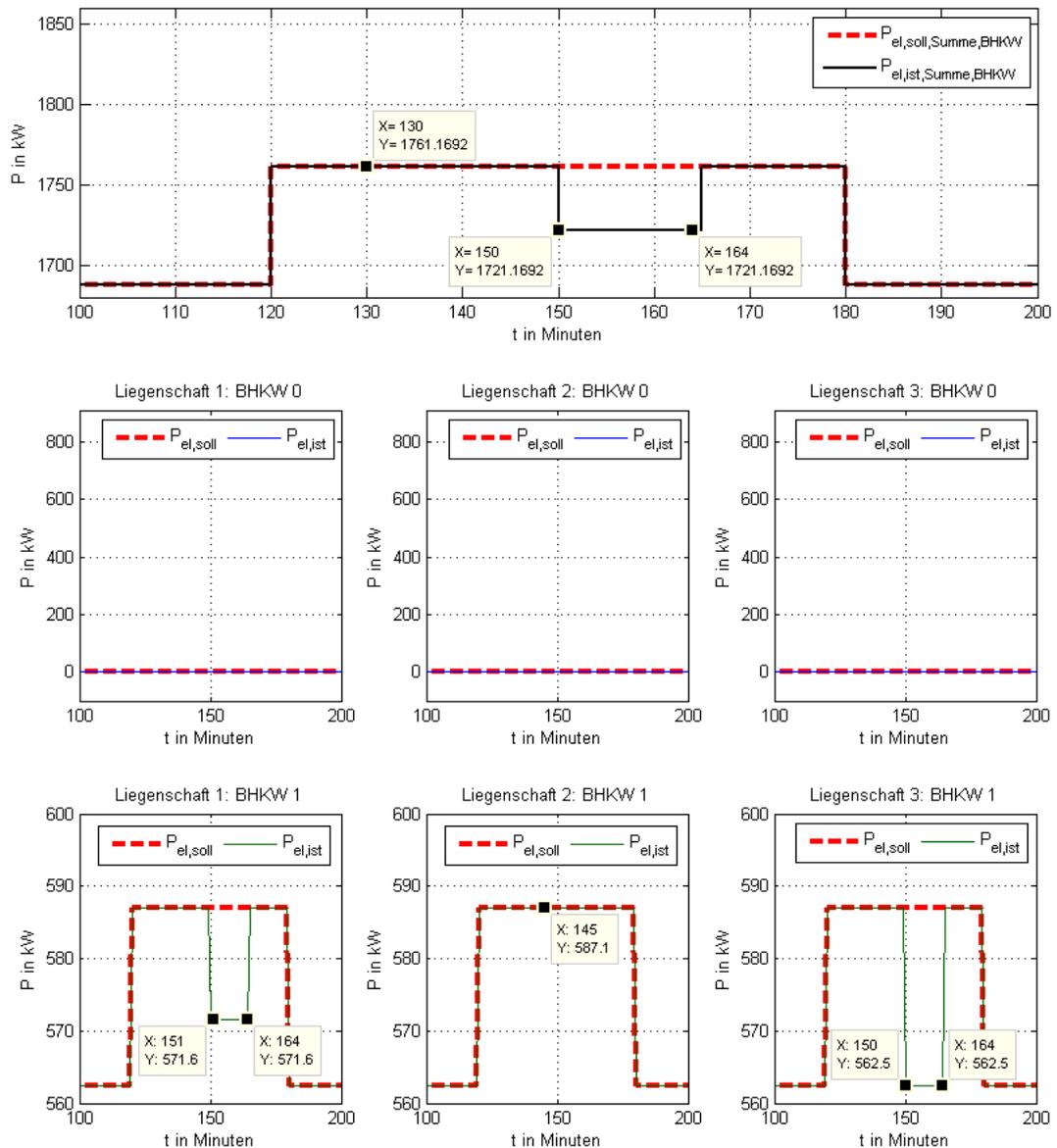


Abbildung 6-17: Abruf des limitierenden Abschaltpotentials

Zu erkennen ist, dass die Anforderung, 40 kW elektrischer Summenleistung abzuschalten erfüllt wird. Im ersten Plot ist dies zu erkennen. Ebenfalls zu sehen ist, dass das Abschaltpotential der dritten Liegenschaft komplett und von der ersten Liegenschaft teilweise abgerufen wird.

Somit funktioniert der Algorithmus auch zum Abschalten von elektrischer Leistung.

6.4.4 Test-Case 4: Schaltpotentialanalyse mit einer Liegenschaft

Zur Validierung der Schaltpotentialanalyse wird das Schaltpotential einer Liegenschaft berechnet.

Der Fahrplan sieht wie folgt aus:

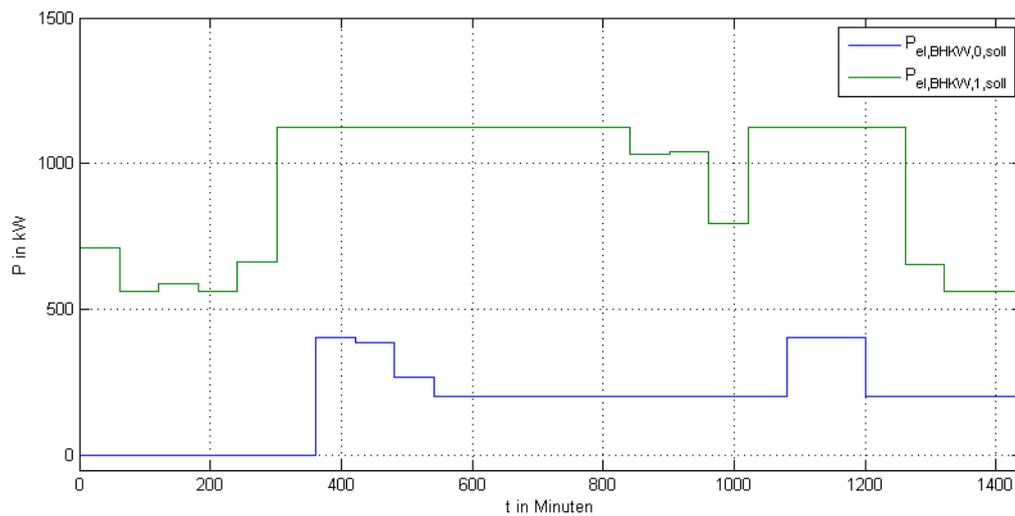


Abbildung 6-18: Fahrplan zum Validieren der Schaltpotentialanalyse

Der Fahrplan gilt für einen Tag.

Setting für die Potentialanalyse:

Es wird untersucht, wie viel Leistung für eine Stunde ein- oder abgeschaltet werden kann. Der Zeithorizont ist dabei 2 Stunden breit.

6.4.4.1 Validierung der Berechnung des thermischen Schaltpotentials

Es wird im Folgenden kontrolliert, ob das thermische Schaltpotential korrekt berechnet wird.

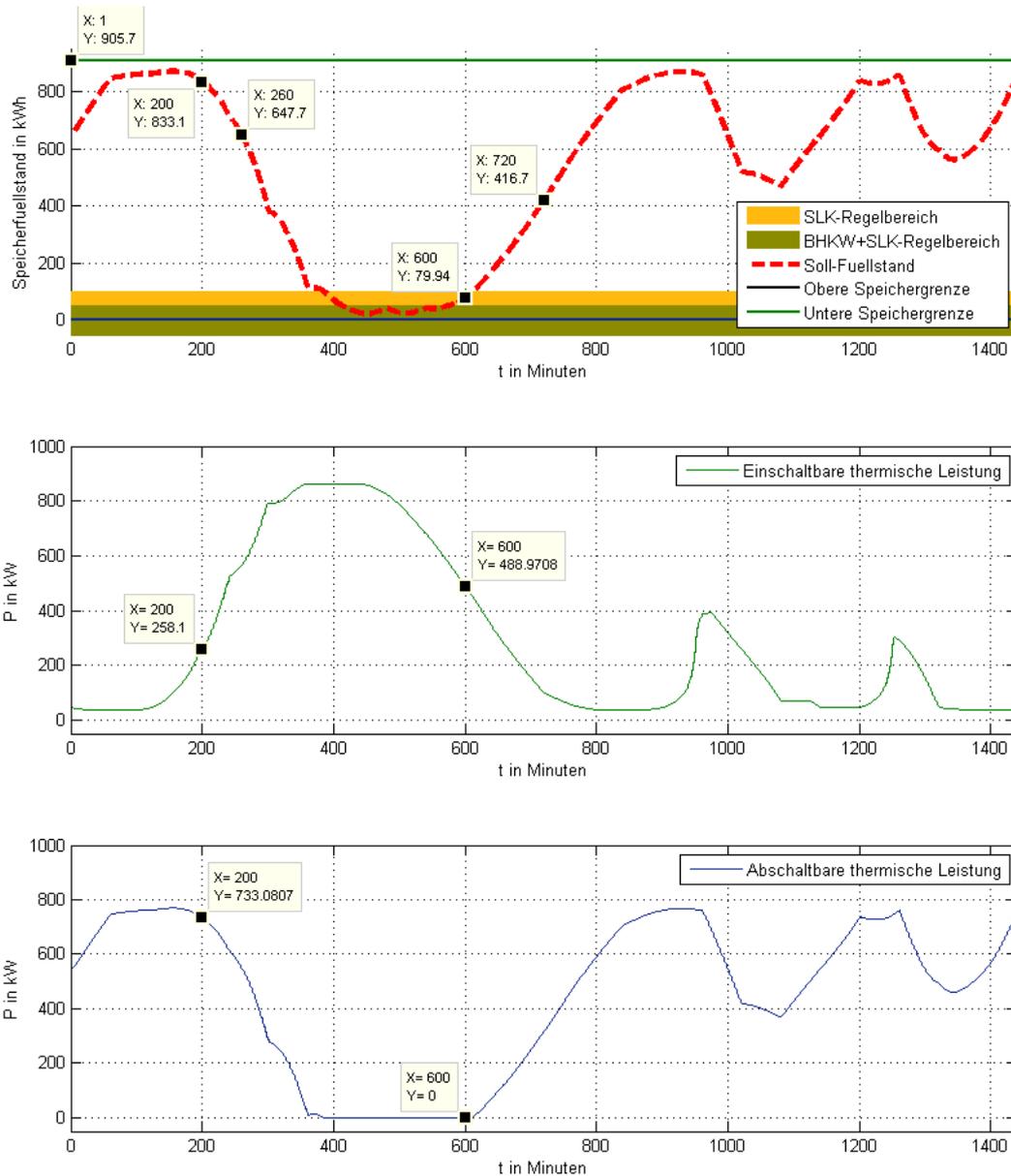


Abbildung 6-19: Thermisches Schaltpotential für eine Liegenschaft

Einschalten von thermischer Leistung

t = 200 minuten, Einschalten:

Ab diesem Zeitpunkt wird für den Zeithorizont von 120 Minuten die Minute ermittelt, in der die minimale thermische zusätzlich eingeschaltete Leistung möglich ist. Da diese in Minute 260 möglich ist, beträgt sie die Differenz aus oberer Speichergrenze und Soll-Füllstand in Minute 260 geteilt durch die Einschaltdauer von 1 Stunde.

$$Beladung \leq Obere\ Speichergrenze - limitierender\ Füllstand\ des\ Zeithorizontes$$

$$Beladung \leq 905,7\ kWh - 647,7\ kWh = 258\ kWh$$

Das thermische Einschaltpotential beträgt dann:

$$Einschaltpotential_{thermisch} = \frac{Beladung}{t_{Einschaltung}}$$

$$Einschaltpotential_{thermisch} = \frac{258\ kWh}{1\ h} = 258\ kW$$

Dies entspricht auch dem von der Potentialanalyse berechnetem Einschaltleistungswert im mittleren Plot.

t = 600 minuten, Einschalten:

Ab diesem Zeitpunkt steigt der Sollfüllstand stetig an. Daher wird das thermische Einschaltpotential durch den Füllstand am Ende des Zeithorizontes bestimmt, da dieser am höchsten ist. Dieser beträgt 416,7 kWh.

Mit den Formeln (5.2) und (5.3) ergibt sich als maximal mögliche Beladung:

Beladung ≤ *Obere Speichergrenze* – *höchster Füllstand des Zeithorizontes*

$$\text{Beladung} \leq 905,7 \text{ kWh} - 416,7 \text{ kWh} = 489 \text{ kWh}$$

Das thermische Einschaltpotential beträgt dann:

$$\text{Einschaltpotential}_{\text{thermisch}} = \frac{\text{Beladung}}{t_{\text{Einschaltung}}}$$

$$\text{Einschaltpotential}_{\text{thermisch}} = \frac{489 \text{ kWh}}{1 \text{ h}} = 489 \text{ kW}$$

Dies entspricht auch dem von der Potentialanalyse berechnetem Einschaltleistungswert im mittleren Plot.

Die Berechnung der maximalen thermischen Abschaltleistung wird einmal für die Minute 200 und für die Minute 600 kontrolliert.

Abschalten von thermischer Leistung**t = 200 minuten, Abschalten:**

In Minute 200 ist der Sollfüllstand bei 833,1 kWh.

Nach (5.4) gilt:

$$\text{Abschaltpotential}_{\text{thermisch}} = \frac{\text{Fuellstand}_{\text{ist}} - \text{SLK-Schwelle}}{t_{\text{verringderung}}}$$

$$\text{Abschaltpotential}_{\text{thermisch}} = \frac{833,1 \text{ kWh} - 100 \text{ kWh}}{1 \text{ h}} = 733,1 \text{ kW}$$

Dies entspricht dem gerundeten im dritten Plotfenster zu ersehenden Wert.

t = 600 minuten, Abschalten:

Der Zweite Fall ist ein Soll-Füllstand der sich unterhalb der SLK-Schwelle von 100 kWh-Speicherfüllstand befindet.

Daher kann nicht abgeschaltet werden, außer, der Ist-Füllstand befindet sich über dem Soll-Füllstand. Da aber hier das Schaltpotential vor dem Abfahren des Tages durchgeführt wird gilt:

$$P_{\text{th,abschaltbar,Speicher}} = 0$$

Auch dieser Wert wird in Plot 3 angezeigt.

Somit gilt die Berechnung des thermischen Schaltpotentials als korrekt.

6.4.4.2 Validierung des elektrischen Schaltpotentials, der sich aus dem thermischen Schaltpotential ergibt

Die Berechnung des elektrischen Schaltpotentials aus dem thermischen Schaltpotential wird kontrolliert. Im folgenden Bild ist im ersten Plot der Fahrplan abgebildet, im mittleren die einschaltbare elektrische Leistung und im unteren Plot die abschaltbare elektrische Leistung.

Im ersten Schritt werden die auffälligen Lücken im Einschalt- und Abschaltpotential erklärt. In diesen Lücken fällt die Schaltleistung sprunghaft auf 0 kW ab.

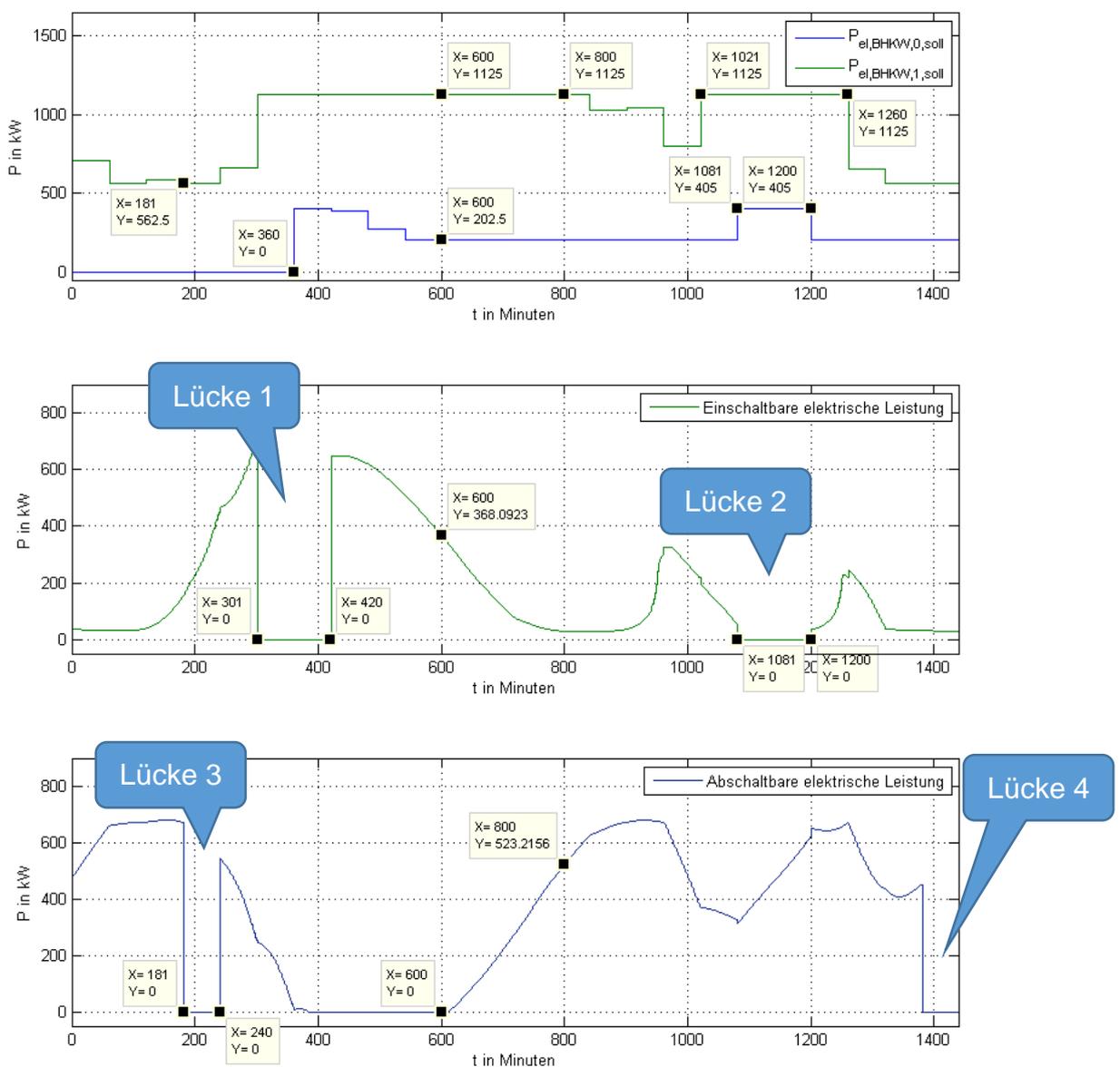


Abbildung 6-20: Elektrisches Schaltpotential berechnet aus dem thermischen Schaltpotential

Lücke 1:

Nach Fahrplan ist BHKW 1 zum Zeitpunkt 301. Minute für längere Zeit auf Maximalleistung. BHKW 0 ist bis Minute 360 ausgeschaltet. Da die BHKW laut Regelungskonzept nur im Teillastbereich moduliert werden, kann keines der BHKW seine Leistung erhöhen. Dadurch ergibt sich zwischen Minute 301 und Minute 360 ein Einschaltpotential von 0 kW.

Lücke 2:

Von Minute 1082 bis Minute 1200 befindet sich die Leistung beider BHKW auf Maximalwert. Dadurch kann keine zusätzliche Leistung eingeschaltet werden.

Lücke 3:

Von Minute 181 bis Minute 240 befindet sich BHKW 1 auf Minimalleistung und BHKW 0 ist ausgeschaltet. Dadurch ergibt sich ebenfalls ein Zeitraum, in dem Leistung nicht verringert werden kann.

Lücke 4: Beide BHKW befinden sich auf Minimalleistung. Daher kann keine Leistung abgeschaltet werden.

Validierung des Einschaltpotentials:

Zum Zeitpunkt 600. Minute befindet sich das BHKW 1 auf Maximalleistung und BHKW 0 auf Minimalleistung. Dadurch kann das BHKW 0 seine Leistung erhöhen. Nach Abbildung 6-19 ergibt sich ein Einschaltpotential von 689 kWh. Mit Formel (2-1) ergibt sich eine einschaltbare Leistung von:

$$P_{el,einschaltbar} = \sigma_{BHKW,0} \times P_{th,einschaltbar} = 0,7527 \times 492,5 \text{ kW} = 370,1 \text{ kW} \quad (6.3)$$

Dies entspricht der Einschaltleistung im zweiten Plot.

Validierung des Abschaltpotentials:

Zum Zeitpunkt 800. Minute kann das BHKW 1 abschalten, während BHKW 0 bereits auf Minimalleistung ist und daher die Leistung nicht weiter verringern kann. Somit kann nur BHKW 1 Leistung zurücknehmen.

Die abschaltbare elektrische Leistung ist nach Formel (2-1) somit:

$$P_{el,abschaltbar} = \sigma_{BHKW,1} \times P_{th,abschaltbar} = 0,8844 \times 588,6 \text{ kW} = 520,6 \text{ kW} \quad (6.4)$$

Dies entspricht dem gerundeten Wert aus Plot 3 der letzten Abbildung.

Somit ist die Berechnung der elektrischen Schaltleistung aus der thermischen Schaltleistung korrekt.

6.4.4.3 Validierung der Berechnung der elektrischen Kennlinien-Schaltleistung durch Max-/Min-Leistung der BHKW

Unabhängig von der thermischen Schaltleistung ergibt sich durch das Kennlinienverhalten der BHKW eine weitere Begrenzung der Schaltleistung.

Im folgenden Bild ist im ersten Plot der Fahrplan abgebildet und im unteren das sich direkt daraus bildende elektrische Kennlinien-Schaltpotential.

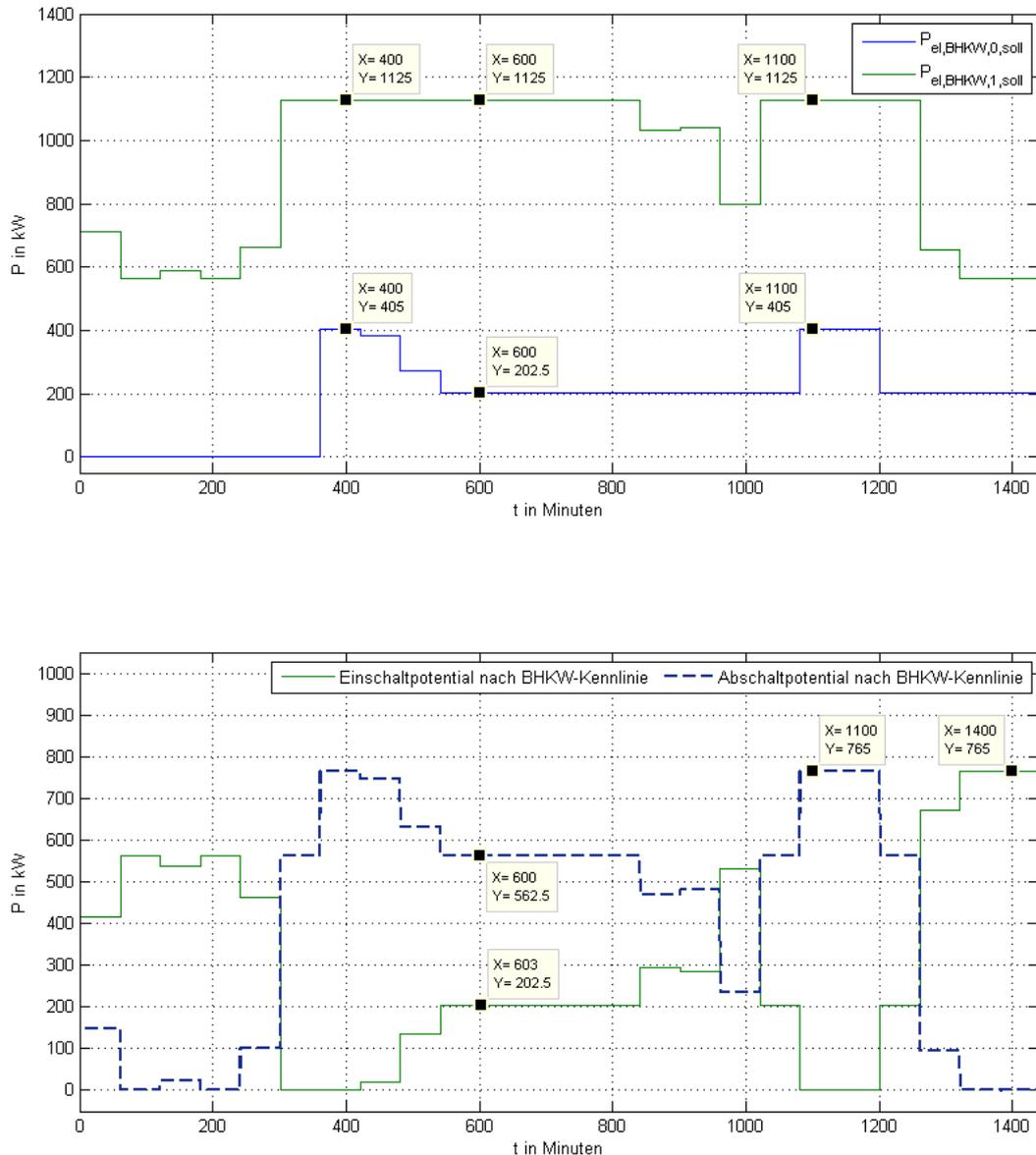


Abbildung 6-21: Kennlinienschaltpotential

Minute 600:

In Minute 600 ist zu erkennen, dass das Einschaltpotential sich allein aus dem Teillastbereich des BHKW 0 ergibt. Dieses läuft bei Minimalleistung und kann daher auf seine Maximalleistung eingeschaltet werden.

In derselben Minute läuft das BHKW 1 auf Maximalleistung kann daher bis zur Mindestleistung abgeschaltet werden.

Minute 1100:

Es ergibt sich ein Abschaltpotential von 765 kW. Dies ist die Summe aus der gesamten Teillastleistung beider BHKW, die beide auf Maximalleistung fahren. Gleichzeitig ergibt sich dadurch kein Einschaltpotential.

Minute 1400:

Beide BHKW laufen auf Minimalleistung. Dadurch ergibt sich das maximale Einschaltpotential von 765 KW, was der Summe der Teillastleistung beider BHKW entspricht.

Dadurch ergibt sich jedoch eine Abschaltleistung von 0 KW.

Das Ergebnis im zweiten Plot der Abbildung 6-21 ist somit korrekt.

6.4.4.4 Validierung des limitierenden Schaltpotentials

Das limitierende Schaltpotential ist stets das kleinere Schaltpotential aus Kennlinienschaltpotential und Speicherschaltpotential. In Folgender Abbildung ist dieses abgebildet:

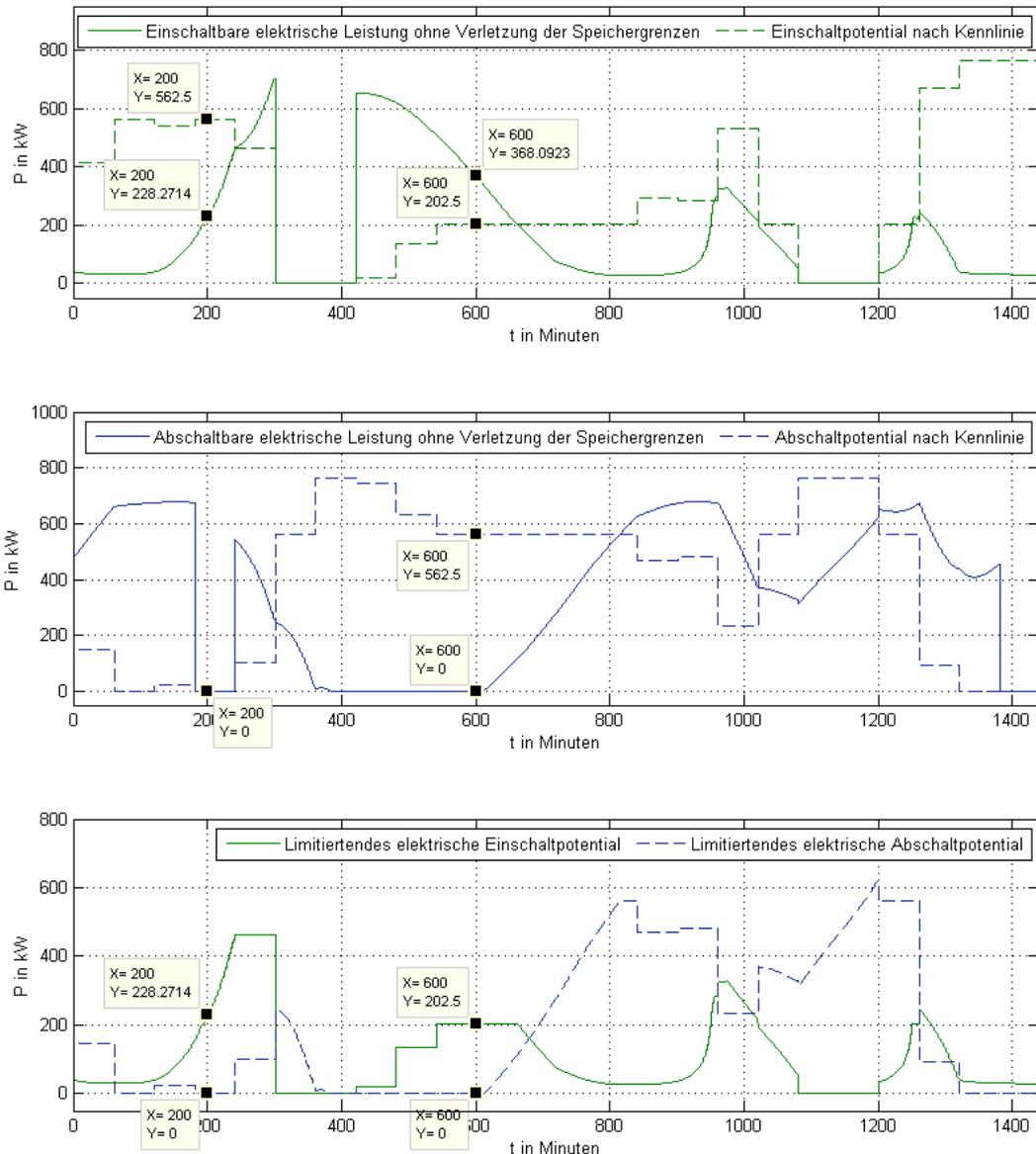


Abbildung 6-22: Limitierende Schaltpotential

Minute 200:

Einschaltpotential durch Speicher: 228,3 kW

Einschaltpotential durch Kennlinie: 562,5 kW

Erwartetes limitierende Einschaltpotential: 228,3 kW

Berechnetes limitierende Einschaltpotential: 228,3 kW

Abschaltpotential durch Speicher: 0 kW

Abschaltpotential durch Kennlinie: 0 kW

Erwartetes limitierende Abschaltpotential: 0 kW

Berechnetes limitierende Abschaltpotential: 0 kW

Minute 600:

Einschaltpotential durch Speicher: 368 kW

Einschaltpotential durch Kennlinie: 202,5 kW

Erwartetes limitierende Einschaltpotential: 202,5 kW

Berechnetes limitierende Einschaltpotential: 202,5 kW

Abschaltpotential durch Speicher: 0 kW

Abschaltpotential durch Kennlinie: 562,5 kW

Erwartetes limitierende Abschaltpotential: 0 kW

Berechnetes limitierende Abschaltpotential: 0 kW

Somit gilt die Berechnung des limitierenden Schaltpotentials als korrekt und die Validierung der Schaltpotentialanalyse ist erfolgreich.

Im Folgenden Bild wurden die Schaltpotentiale dem Soll-Summenfahrplan aufaddiert oder abgezogen:

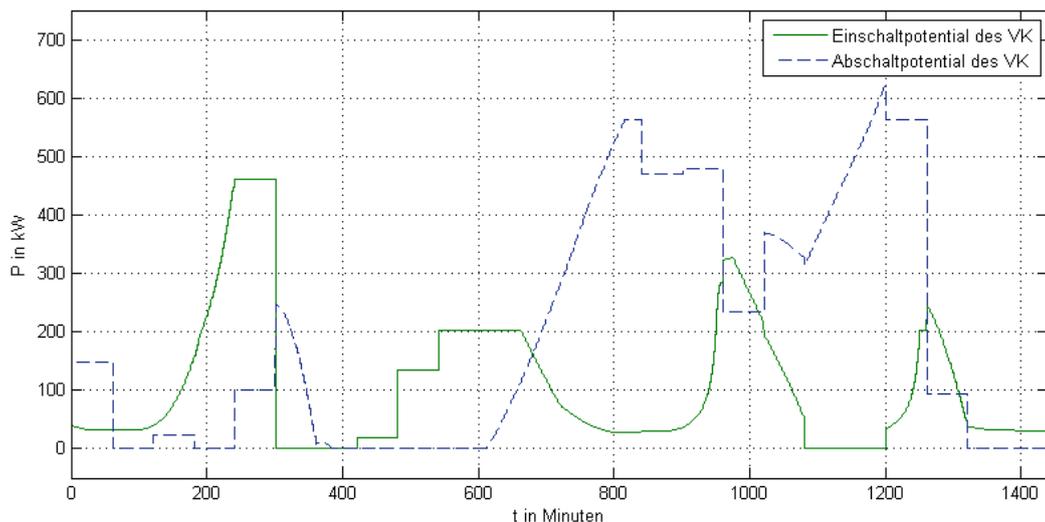
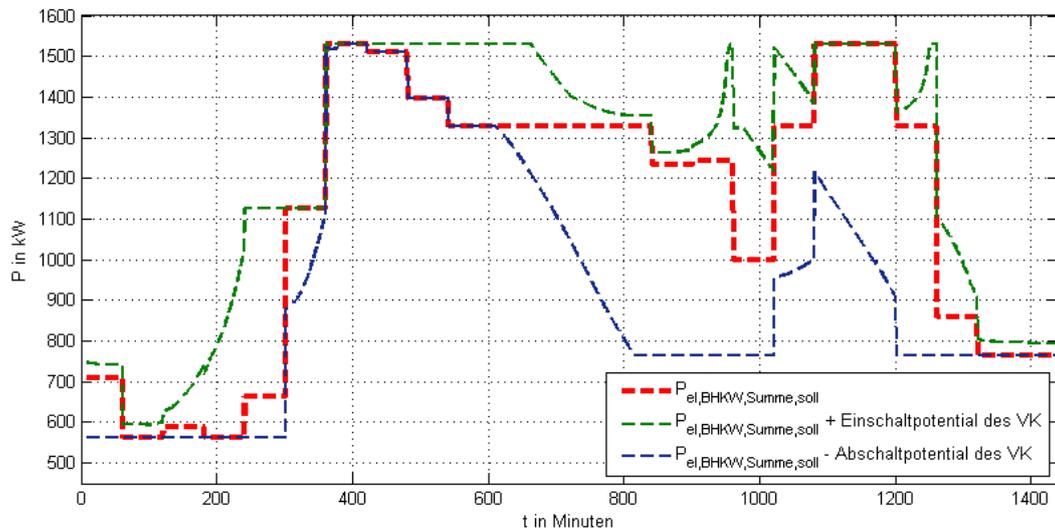


Abbildung 6-23: Soll-Summenfahrplan mit Schaltgrenzen

In dieser Darstellung ist gut erkennen, wann und um welchen Betrag eine Leistung für eine Stunde eingeschaltet werden kann.

6.4.5 Test-Case 5: Regelung des Fahrplans bei Ausfall von BHKW-Leistung

Es wird überprüft, ob der Dispatcher bei Ausfall oder Zwangseinschaltung von BHKWs dennoch den Fahrplan des VK einhalten kann. Im ersten Fall wird eine Zwangsabschaltung der BHKW provoziert, im zweiten Fall eine Zwangseinschaltung.

Zuerst allerdings wird geprüft, ob die Dispatcher-Regelung bei Fehlen einer Störgröße Regeleinriffe unternimmt. Dies wäre ein Fehler des Dispatchers.

6.4.5.1 Regelung des Fahrplans ohne Störgröße

In folgender Abbildung ist zu der Verlauf der Summenleistung des VK abgebildet.

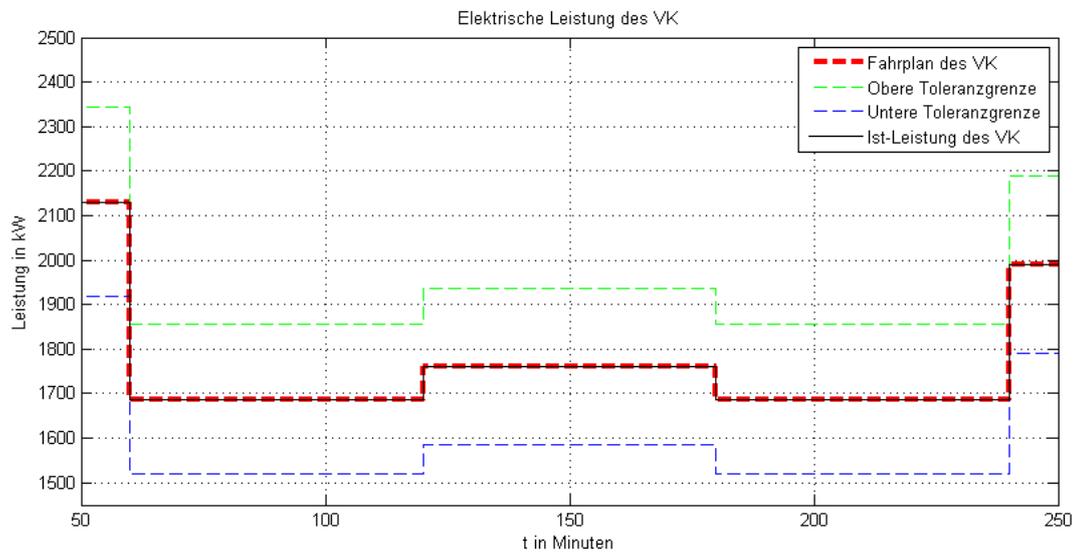


Abbildung 6-24.: Leistungsverlauf des VK ohne Störung und mit Dispatcher-Regelung

Die Dispatcher-Regelung verursacht bei fehlender Störung keine Abweichung der Ist-Leistung von der Fahrplan-Leistung. Somit ist sichergestellt, dass der Dispatcher sich nicht negativ auf die Ist-Leistung auswirkt.

6.4.5.2 Regelung des Fahrplans bei Ausfall von BHKWs

Es wird ein VK aus drei gleichen Liegenschaften gebildet. Dabei wird die thermische Last einer Liegenschaft künstlich verringert, so dass die obere Speichergrenze gerissen wird was eine Zwangsabschaltung der BHKWs dieser Liegenschaft provoziert. Da nun ein Drittel der Leistung des VK fehlt, muss der Dispatcher die fehlende Leistung durch eine Leistungserhöhung der anderen BHKWs ausgleichen.

In folgender Abbildung ist zu sehen, dass der Ist-Füllstand in Liegenschaft 1 die obere Speichergrenze verletzt. In dieser Liegenschaft hat der Agent alle eingeschalteten BHKWs auf die Mindestleistung moduliert. Dieser Leistungsabfall hat aber nicht ausgereicht um die Grenzverletzung zu verhüten. Daher wird die Grenze verletzt und die harte Regelung der Liegenschaft schaltet die BHKWs komplett für 15 Minuten ab.

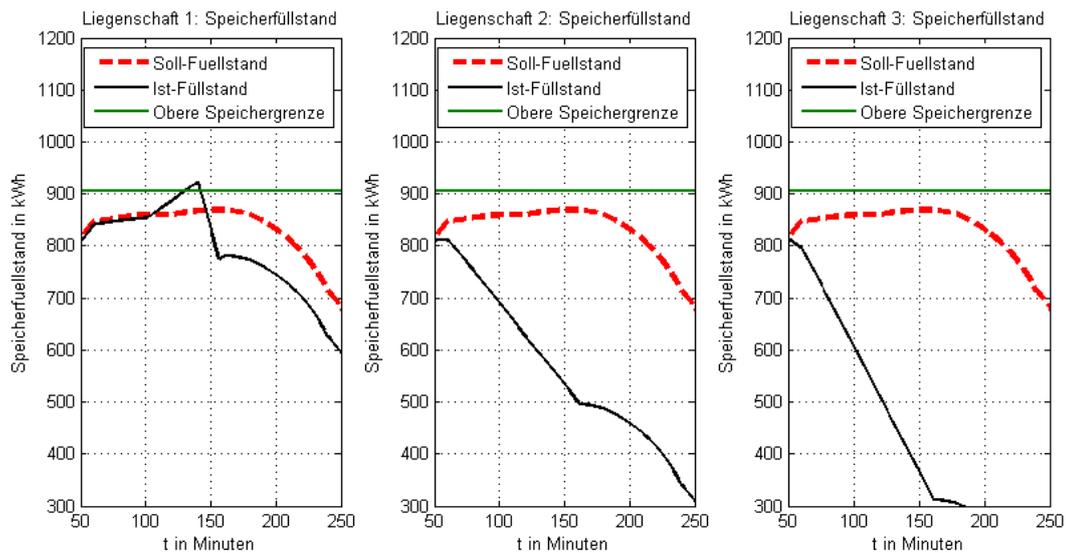


Abbildung 6-25: Speicherfüllstände der Liegenschaften und Verletzung der oberen Speichergrenze in Liegenschaft 1

Auswirkung auf die Summenleistung des VK ohne Dispatcher-Regelung

In folgender Abbildung ist im ersten Plot zu sehen, dass ab Minute 130 die Leistung im geringfügig reduziert wird. Dies ist die Einwirkung des Agenten, der im Teillastbereich die BHKWs in Liegenschaft 1 auf deren Mindestleistung moduliert. Da dies nicht ausreicht schalten ab Minute 140 die BHKWs komplett ab und die Ist-Leistung des VK unterschreitet die untere Toleranzgrenze.

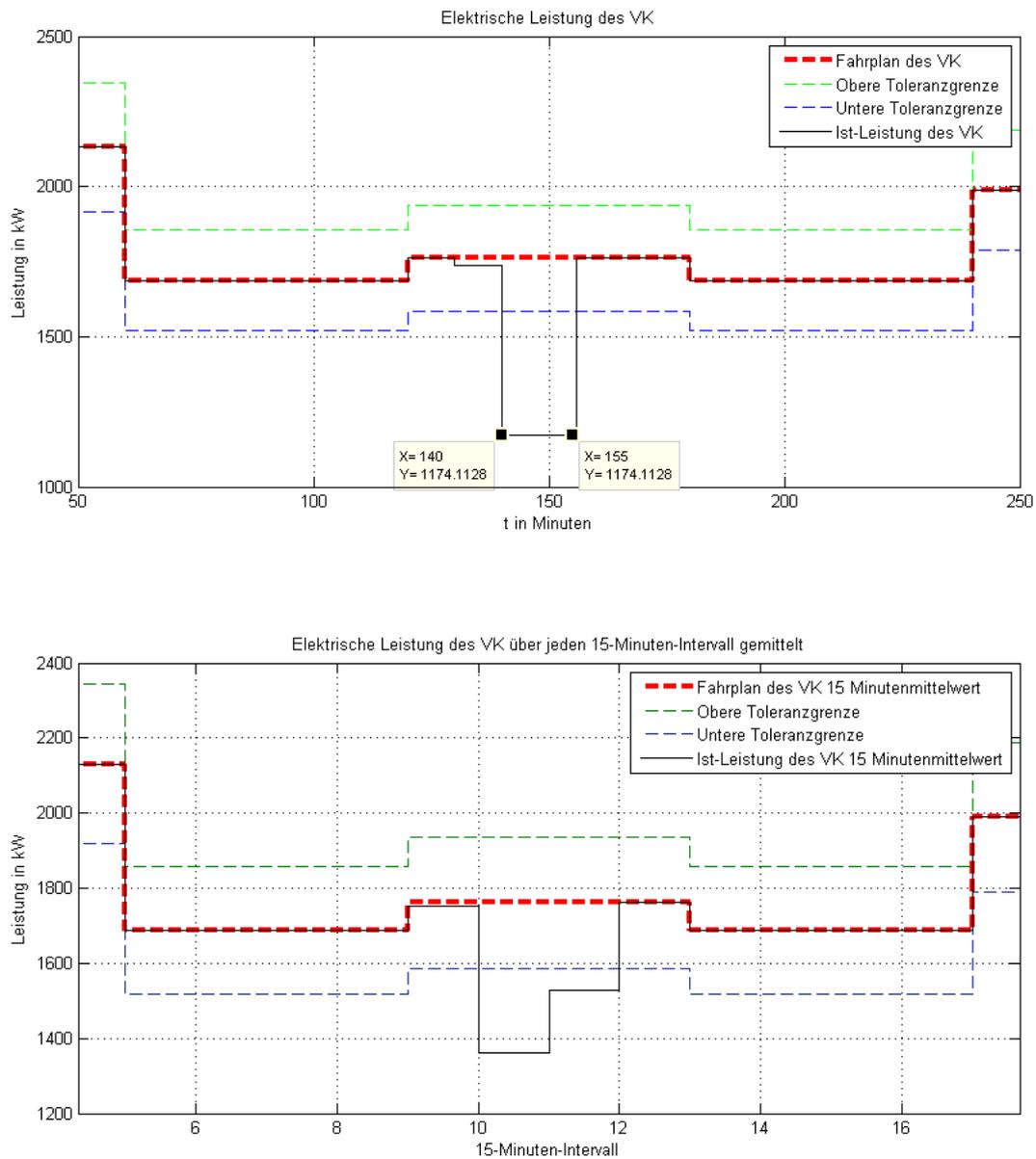


Abbildung 6-26: Verletzung der unteren Toleranzgrenze des Fahrplans ohne Dispatcher-Regelung

Im zweiten Plot ist der 15-Minuten-Mittelwert der Fahrplan- und Ist-Leistung des VK. Zu sehen ist, dass die BHKW-Zwangsabschaltung sowohl das 9. als auch das 10. 15-Minuten-Intervall tangiert. In beiden Intervallen ist die Ist-Leistung zu gering und der Fahrplan wird nicht eingehalten.

Auswirkung auf die Summenleistung des VK mit Dispatcher-Regelung

Mit der Dispatcher-Regelung wird die fehlende Leistung von den anderen Liegenschaften kompensiert, in diese ihre BHKW-Leistung nach Möglichkeit erhöhen. Dies ist in folgender Abbildung dargestellt:

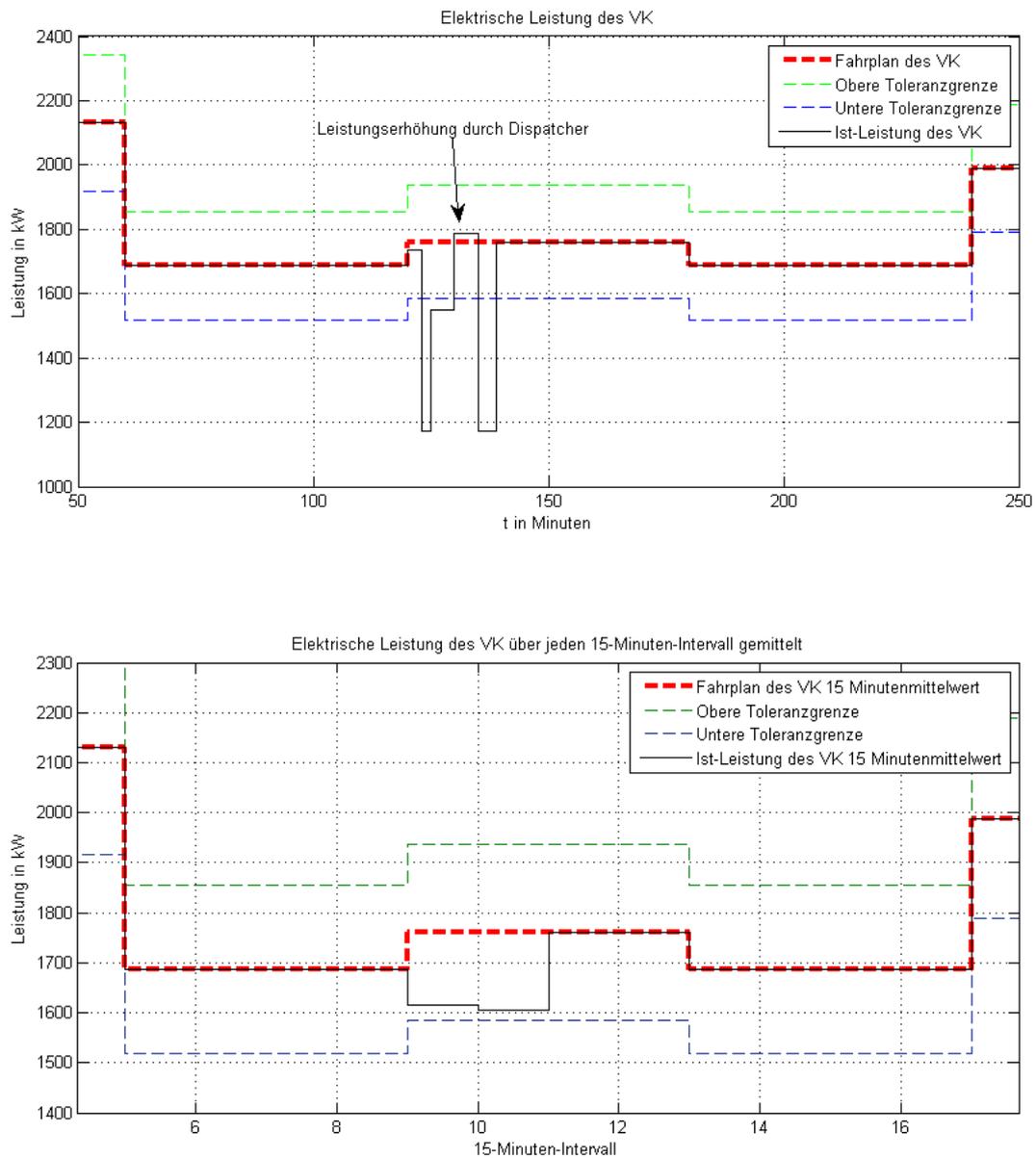


Abbildung 6-27: Keine Verletzung der unteren Toleranzgrenze bei Einsatz der Dispatcher-Regelung

Zu sehen ist, dass innerhalb des 15-Minuten-Intervalls die untere Toleranzgrenze zwar weiterhin verletzt wird, aber im Mittel über das ganze Intervall keine Verletzung mehr stattfindet. Im ersten Plot ist mit einem Pfeil gekennzeichnet, wann der Dispatcher die Leistung des VK über den Fahrplan hinaus erhöht. Somit ist über das 9. und 10. 15-Minuten-Intervall die mittlere Leistung im Toleranzbereich.

6.4.5.3 Regelung des Fahrplans bei Zwangseinschaltung von BHKWs

Es wird ein VK aus drei gleichen Liegenschaften gebildet. Dabei wird die thermische Last on zwei Liegenschaften künstlich erhöht, so dass der Ist-Füllstand in einem Zeitraum, in der der Soll-Füllstand größer als die SLK-Schwelle ist, abgesenkt wird. Dies führt dazu, dass in beiden Liegenschaften zusätzlich BHKW-Leistung eingeschaltet wird. In der Summe sind dies 405 kW elektrisch. Jedoch darf im betrachteten Zeitraum zusätzlich maximal 3982,25 kW elektrisch eingeschaltet werden. Daher wird die obere Toleranzgrenze des Fahrplans gerissen.

In folgender Abbildung ist zu sehen, dass der Ist-Füllstand in Liegenschaft 1 die untere Speichergrenze verletzt. In dieser Liegenschaft hat der Agent alle eingeschalteten BHKWs in Liegenschaft 1 und 2 auf die Maximalleistung moduliert. Dieser Leistungserhöhung stört jedoch die Ist-Leistung des VK.

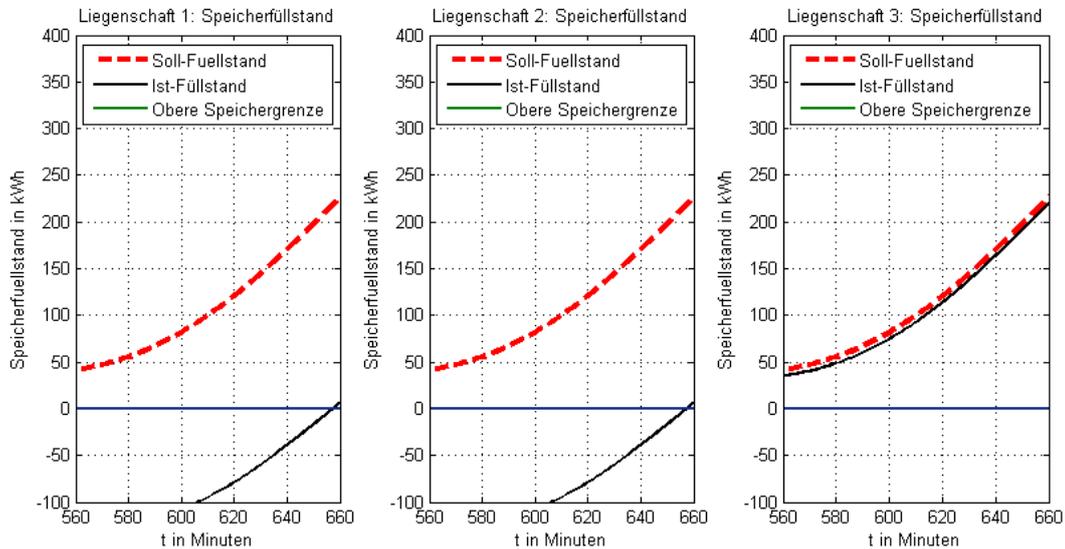


Abbildung 6-28: Speicherfüllstand bei zu großer thermischer Last

Auswirkung auf die Summenleistung des VK ohne Dispatcher-Regelung

Es wird untersucht, ob bei gegebener thermischer Zusatzlast in Liegenschaft 1 und 2 und damit einhergehender Einschaltung von BHKW-Leistung die obere Grenze verletzt wird.

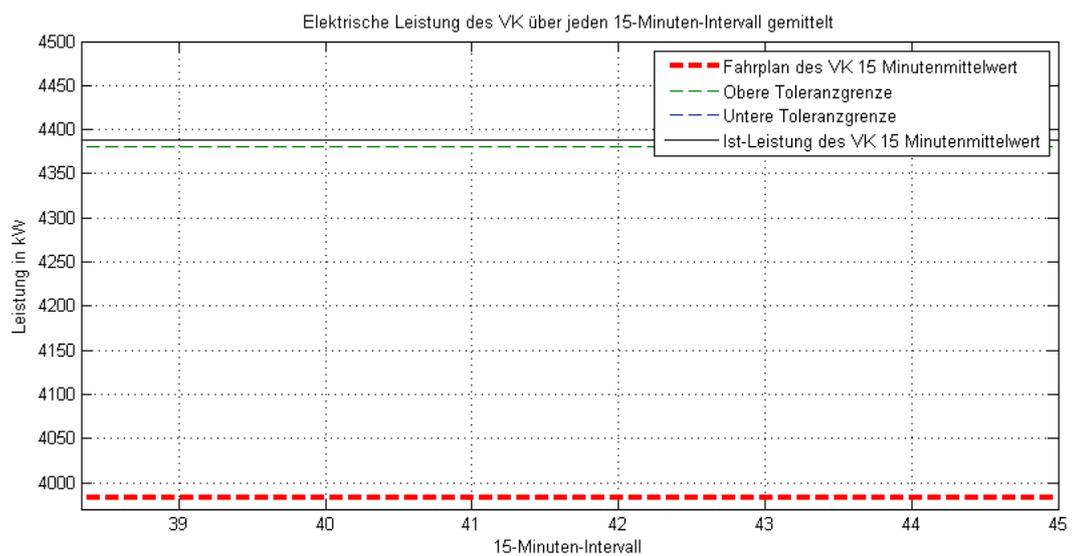
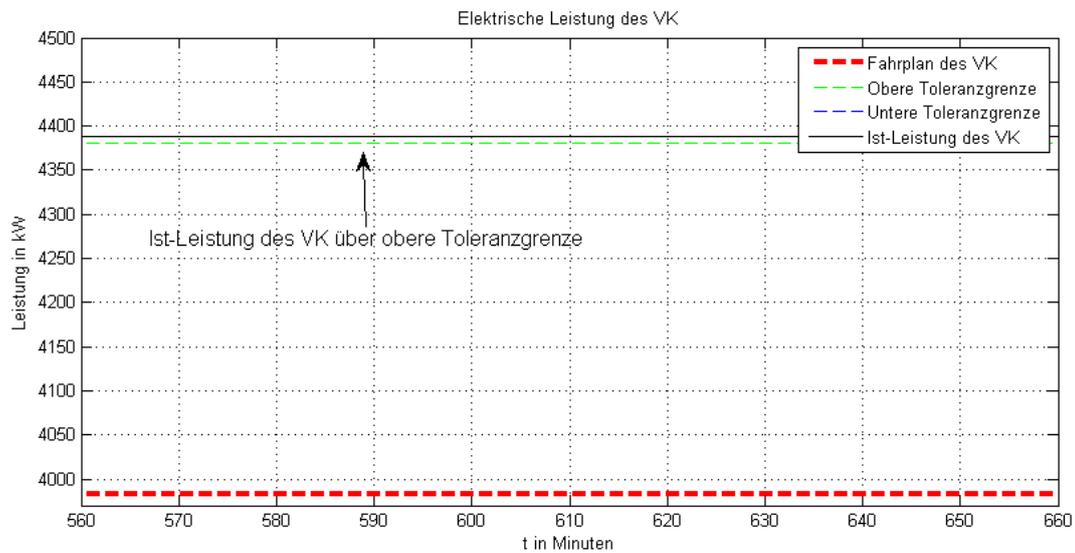


Abbildung 6-29: Ist-Leistung des VK verletzt obere Toleranzgrenze

Wie in obiger Abbildung zu sehen, ist die Ist-Leistung des VK zwischen Minute 560 und 660 oberhalb der Toleranzgrenze.

Auswirkung auf die Summenleistung des VK mit Dispatcher-Regelung

In folgender Abbildung wird die Auswirkung der Zusatzeinschaltung der BHKWs durch den Agenten in Liegenschaft 1 und 2 auf die Summenleistung des VK dargestellt:

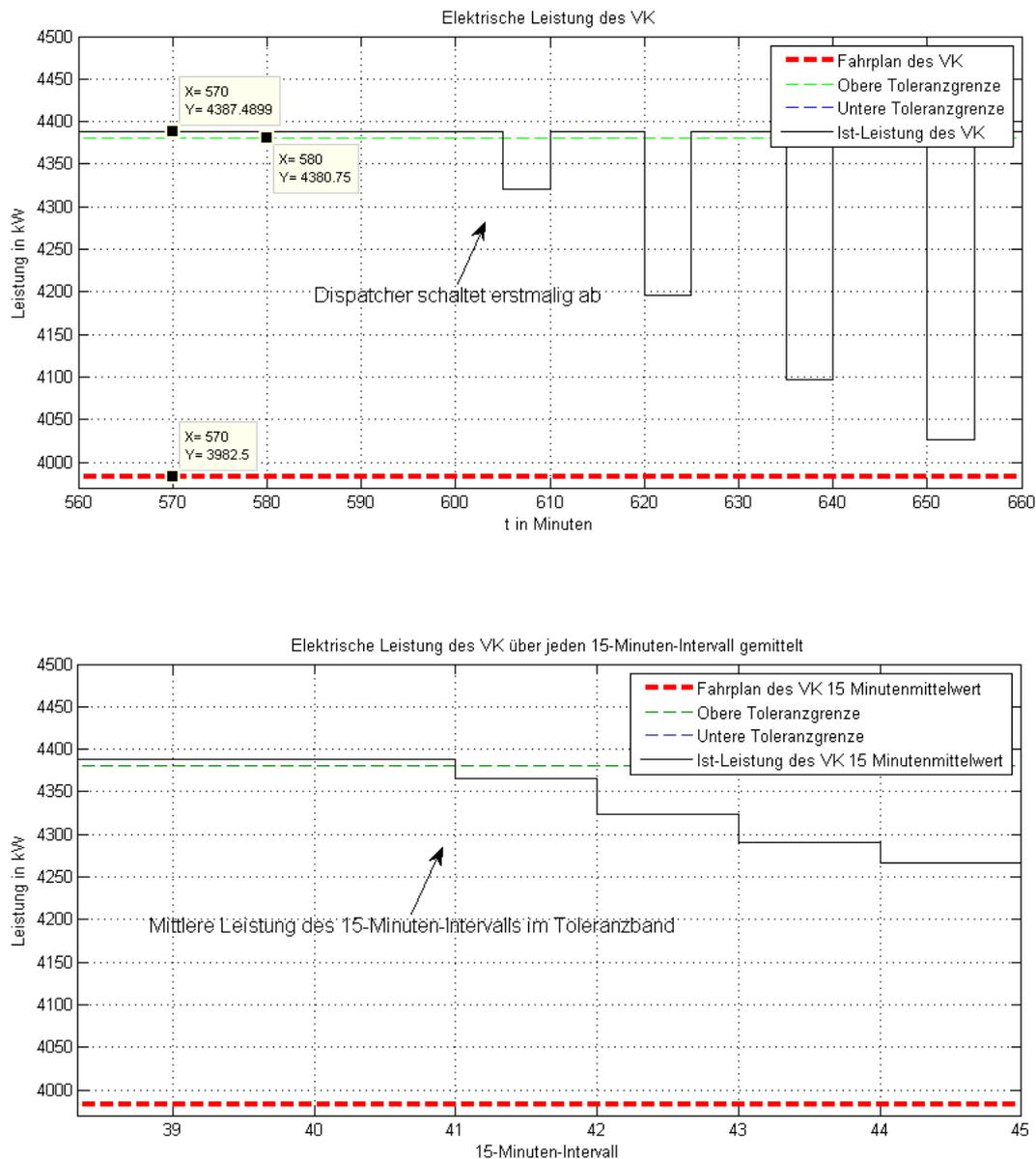


Abbildung 6-30: Dispatcher-Eingriff zur Reduzierung der Summenleistung des VK

Zu erkennen ist, dass ab Minute 605 wieder Abschaltpotential vorhanden ist und der Dispatcher die BHKW-Leistung in Liegenschaft 3 verringern kann. Somit wird ab dem 41. 15-Minuten-Intervall wieder der Fahrplan eingehalten und die obere Toleranzgrenze nicht verletzt.

Somit ist validiert, dass der Dispatcher, sofern Abschaltpotential vorhanden ist, BHKWs zur Fahrplaneinhaltung abschaltet.

6.4.6 Test-Case 6: Validierung der Ist-Last als realistischer Verlauf

In Kapitel 6.3.1 wurde festgestellt, dass das Standardlastprofil nur auf eine größere Menge an Verbrauchern anwendbar ist. Daher wird überprüft, ob eine größere Menge der erzeugten Ist-Last im Durchschnitt dem Standardlastprofil entspricht. Zur

Validierung der erzeugten Ist-Lastgänge wird untersucht, ob diese im Durchschnitt bei größer werdender Anzahl sich dem Prognoselastgang annähern. In folgender Abbildung wird die mittlere Ist-Last von 3, 10, 20 und 40 Liegenschaften mit der einer Liegenschaft verglichen:

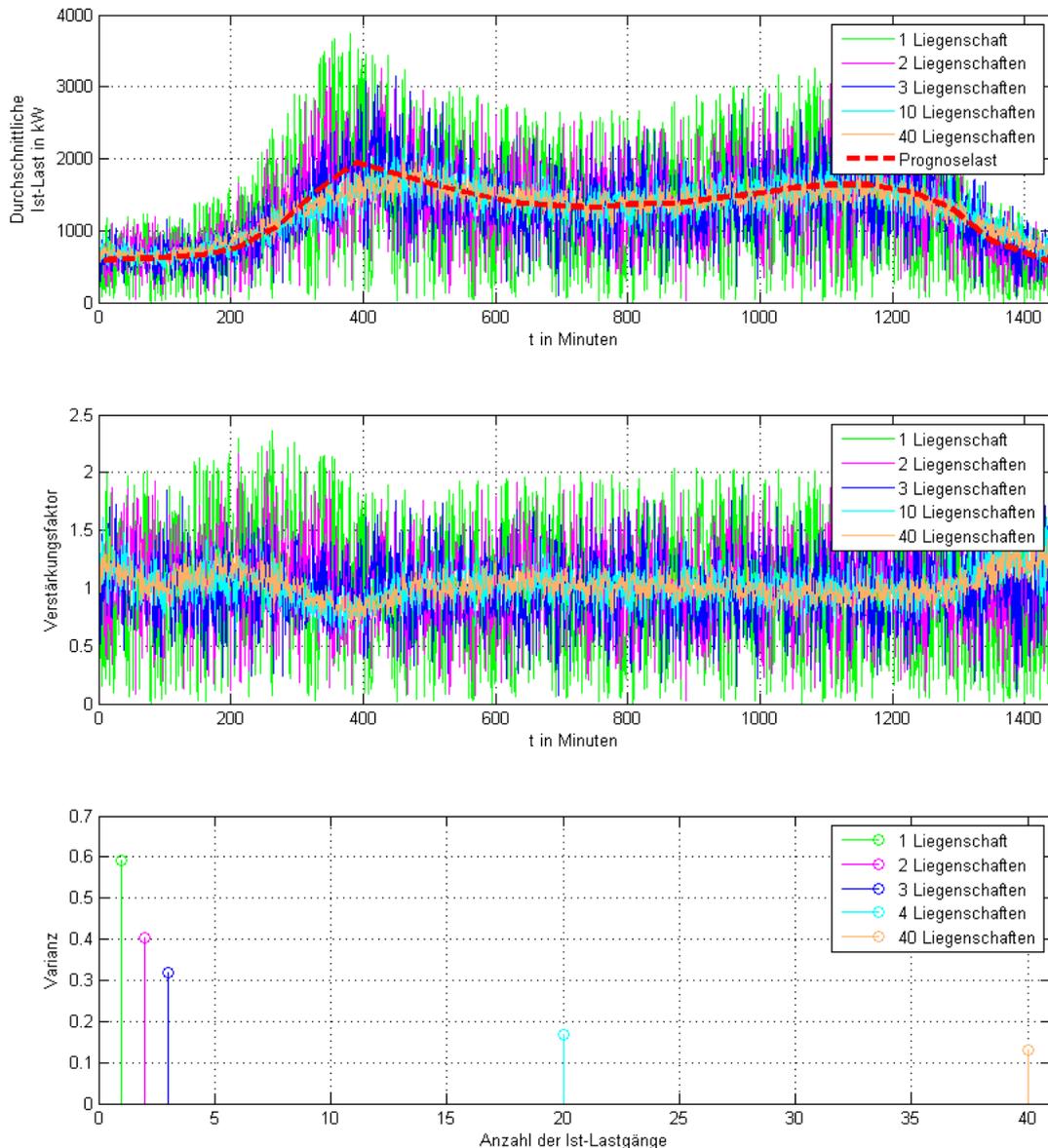


Abbildung 6-31: Vergleich der mittleren Ist-Last bei unterschiedlicher Anzahl an Liegenschaften

Zu sehen ist, dass die Varianz mit steigender Anzahl an Liegenschaften abnimmt.

Als Fazit gilt:

Die Ist-Last für 40 Liegenschaften genügt der ersten Anforderung, deren Abweichung zur Prognoselast im realistischen Bereich zu halten. Bei einer größeren Anzahl an Liegenschaften entspricht die mittlere Ist-Last über alle Liegenschaften tendenziell der Prognoselast. Dies entspricht dem Grundprinzip von Standardlastgängen, dass diese nur für eine große Anzahl an Verbrauchern im Mittel gelten.

6.4.7 Test-Case 7: Finale Validation der Regelung mit VK aus 3

Liegenschaften für 1 Tag

Zur finalen Validation der Regelung wird ein kleines VK aus drei Liegenschaften gebildet und dessen Fahrplan ohne und mit Regelung abgefahren. Dabei ist die Erwartung, dass die Verletzungen der Toleranzgrenzen des Fahrplanes, die notwendige Ausgleichsenergie und die Anzahl der Schalthandlungen bei Einsatz des Reglers geringer ausfallen als ohne Regelung. Zur Validierung wird der Fahrplan für einen Tag geplottet und die Ist-Last sowie die Ist-Leistung des VK näher betrachtet. Des Weiteren soll hiermit auch geprüft werden, ob die Ist-Last des Ist-Last-Generators aus Kapitel 6.3 auch zur Provokation der Regelung führt.

6.4.7.1 Ohne Regelung

Ohne Regelung ergibt sich, dass aufgrund der fehlprognostizierten Last der Ist-Füllstand die Speichergrenzen verletzt. Dadurch wird die harte Regelung provoziert, was zur Folge hat, dass der Fahrplan nicht eingehalten wird. Die Ist-Leistung fällt zeitweise unter die untere Speichergrenze. Dies liegt daran, dass zum einen der Ist-Füllstand niedrig ist und die Last in dem Zeitraum bis auf 200 % der Prognoselast erhöht wurde.

Weiter ist in Abbildung 6-32 im zweiten und dritten Plot zu erkennen, dass die Ist-Last stark rauscht und der auf 15-Minuten-Intervalle gemittelte Verlauf zum Prognoseverlauf zeitlich verschoben ist. Damit ist sichergestellt, dass die Ist-Last den Anforderungen an eine realistische Last aus Kapitel 6.3.2 genügt.

Die elektrische Ist-Leistung des VK wird in folgender Abbildung untersucht.

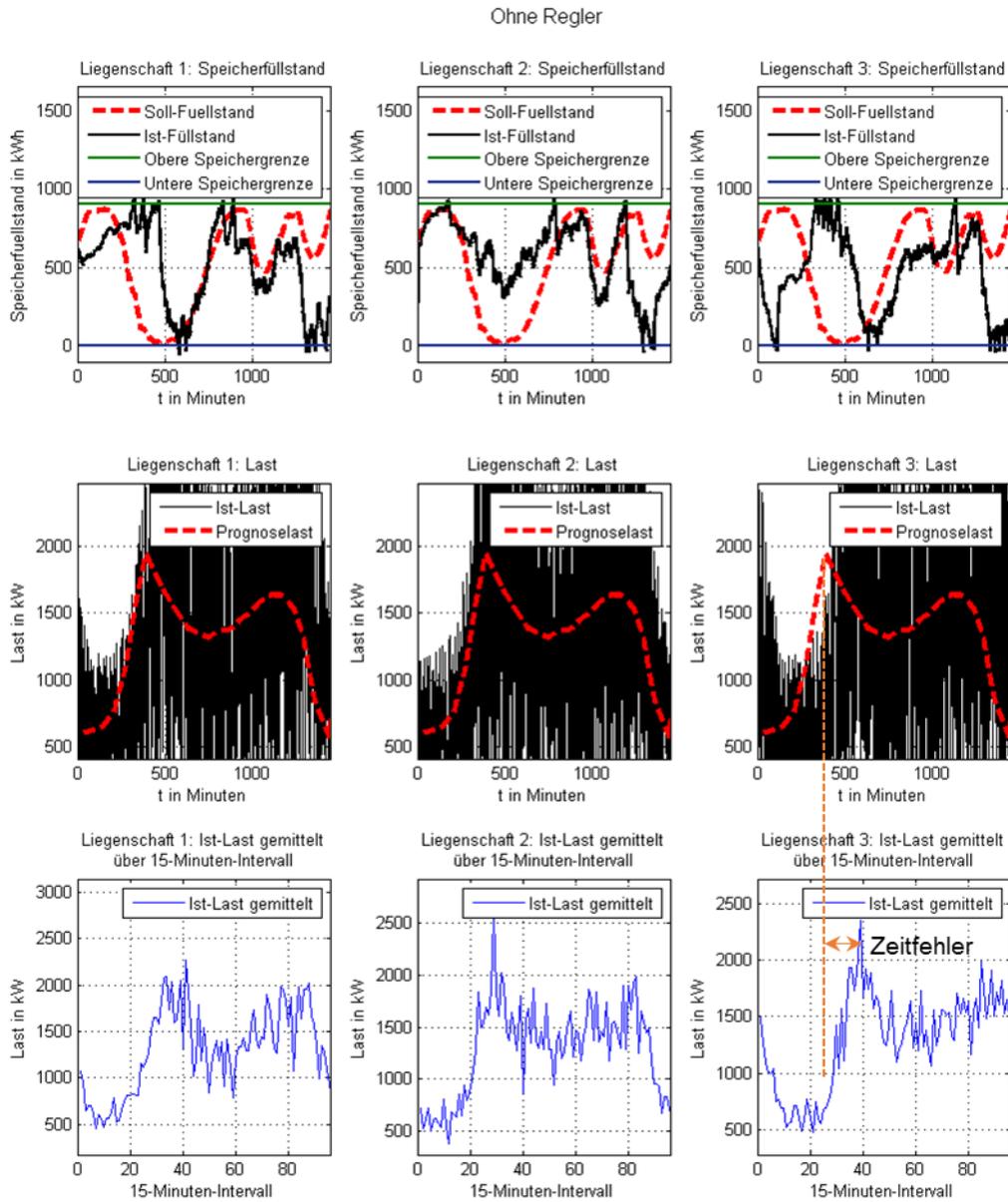


Abbildung 6-32: Soll- und Ist-Füllstand der Speicher bei ausgeschalteter Regelung sowie thermische Prognose- und Ist-Last

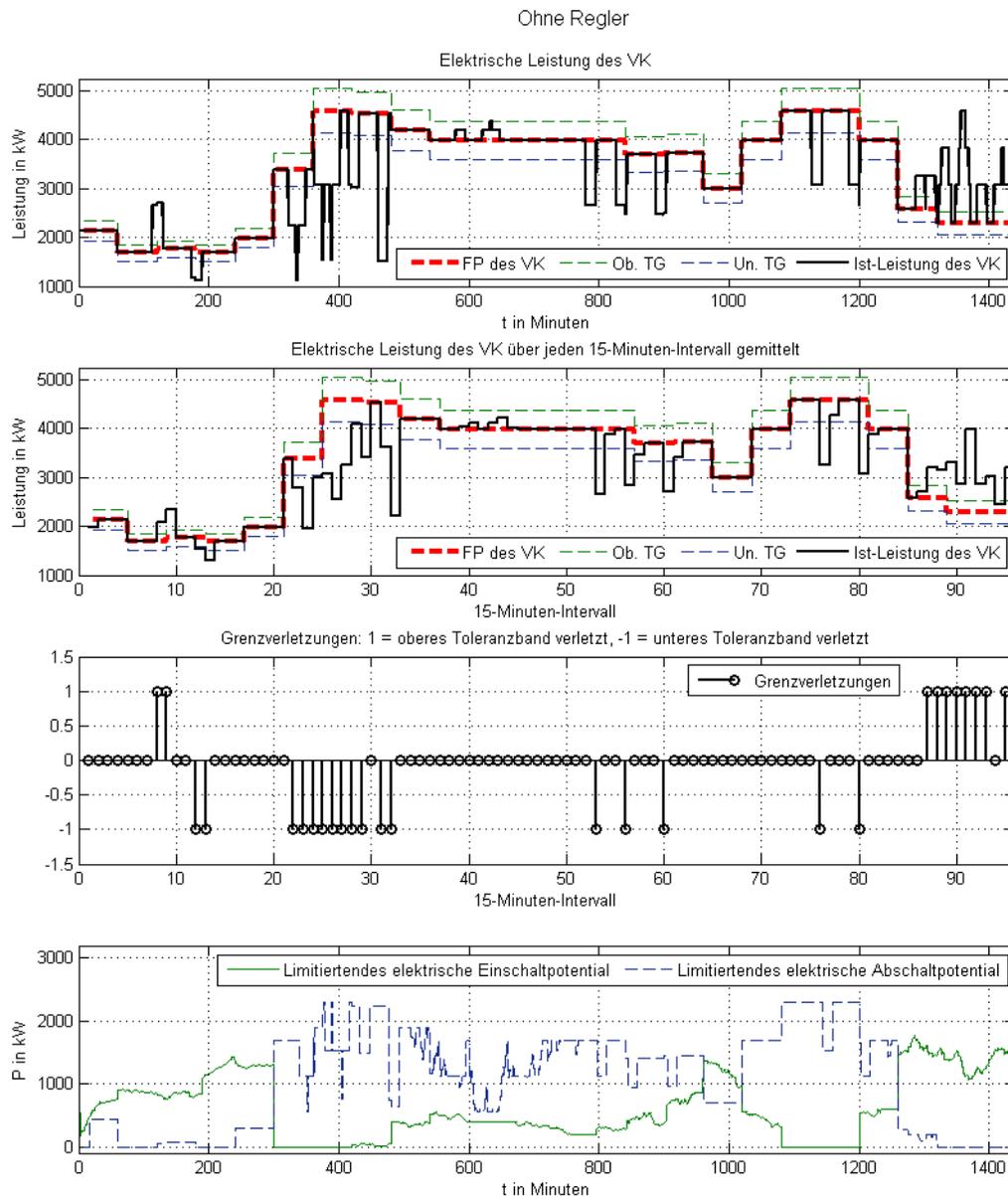


Abbildung 6-33: Fahrplan und Ist-Leistung des VK ohne Regelung¹²

Zu erkennen ist, dass die Summenleistung in mehreren 15-Minuten-Intervallen nicht im Toleranzband verbleibt. Diese Grenzverletzungen im 15-Minuten-Intervall werden im dritten Plot in Abbildung 6-33 über Ausschläge zu 1 für eine Verletzung der oberen Toleranzgrenze und zu -1 für Verletzung der unteren Toleranzgrenze angezeigt. Zu erkennen ist auch, dass Ist-Lasten im Intervallmittel die eine Toleranzgrenze verletzen zu Ausschlägen im dritten Plot führen.

6.4.7.2 Mit Regelung

Nun wird untersucht, wie das Einschalten der Regelung sich auf den Füllstand der Speicher auswirkt. Die Last ist identisch zur Simulation ohne Regelung.

¹² „Limitierendes Ein- oder Abschaltpotential“ im vierten Plot wird auch in anderen Diagrammen als „Ein- oder Abschaltpotential des VK“ bezeichnet.

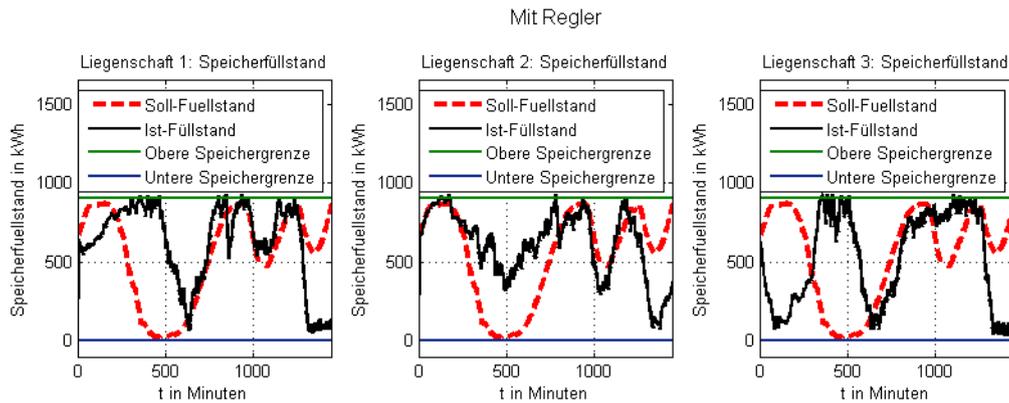


Abbildung 6-34: Soll- und Ist-Füllstand der Speicher mit eingeschalteter Regelung

In Abbildung 6-34 ist zu erkennen, dass der Ist-Füllstand für den ersten Tag die untere Speichergrenze nicht verletzt. Lediglich die obere Speichergrenze wird verletzt. Dies ist plausibel, da eine Verletzung der unteren Grenze durch Einschalten des SLK leichter zu verhindern ist als die Verletzung der oberen Speichergrenze, die allein durch Zurückhalten von BHKW-Leistung im Teillastbereich verhindert wird.

In folgender Abbildung ist der Verlauf der elektrischen Ist-Leistung des VK abgebildet:

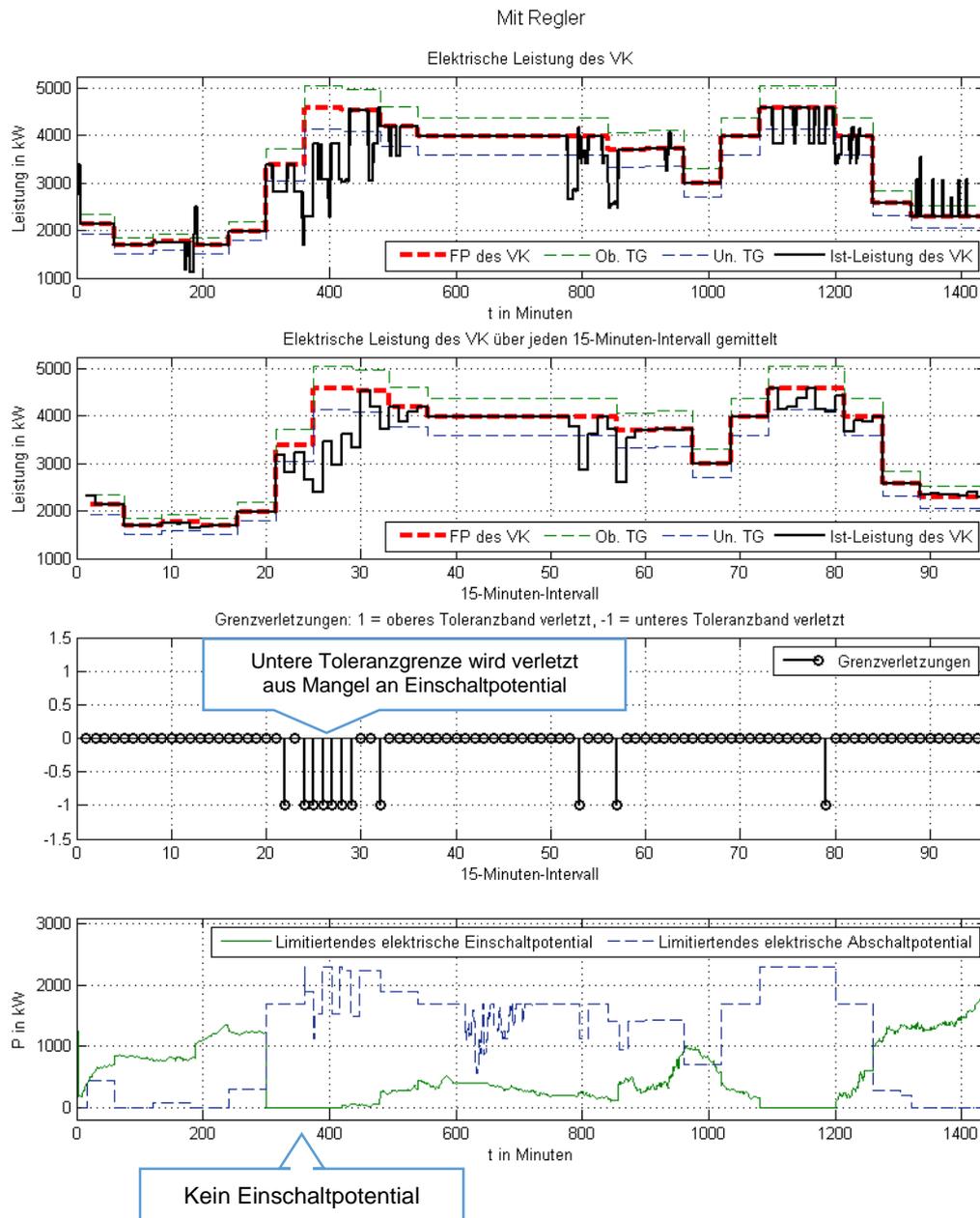


Abbildung 6-35: Ist-Leistung des VK und Grenzverletzungen mit eingeschalteter Regelung

In Abbildung 6-35 ist zu erkennen, dass bei Einschaltung der Regelung nur noch die untere Toleranzgrenze des Fahrplans verletzt wird, was eine Verbesserung darstellt im Vergleich zum Abfahren des Fahrplans ohne Regelung.

Die verbleibenden Grenzverletzungen finden immer dann statt, wenn nicht genug Einschaltpotential zur Verfügung steht. Dies trifft auf den Zeitbereich ca. 300. bis 400. Minute zu, in der das Einschaltpotential bei 0 kW liegt, was somit zur Verletzung der unteren Toleranzgrenze in mehreren Intervallen führt.

6.4.7.3 Auswertung der finalen Validierung

Der Vergleich der Verläufe von Ist-Füllstand der Liegenschaften, thermischer Ist-Last der Liegenschaften, elektrische Ist-Leistung des VK und Verletzungen des Toleranzbandes des Fahrplans zeigen, dass die Regelung sich positiv auf die Fahrplaneinhaltung auswirkt und die Anforderungen aus Kapitel 3 versucht zu erfüllen.

6.4.7.4 Auswertung für eine Woche

Im Folgenden werden nun die Fahrplaneinhaltung, die Anzahl der Grenzverletzungen des Fahrplans, die benötigte Ausgleichsenergie und die Anzahl der Schalthandlungen bei Ab- und Einschaltung der Regelung für eine ganze Woche gegenübergestellt.

6.4.7.4.1 Einhaltung des Fahrplans

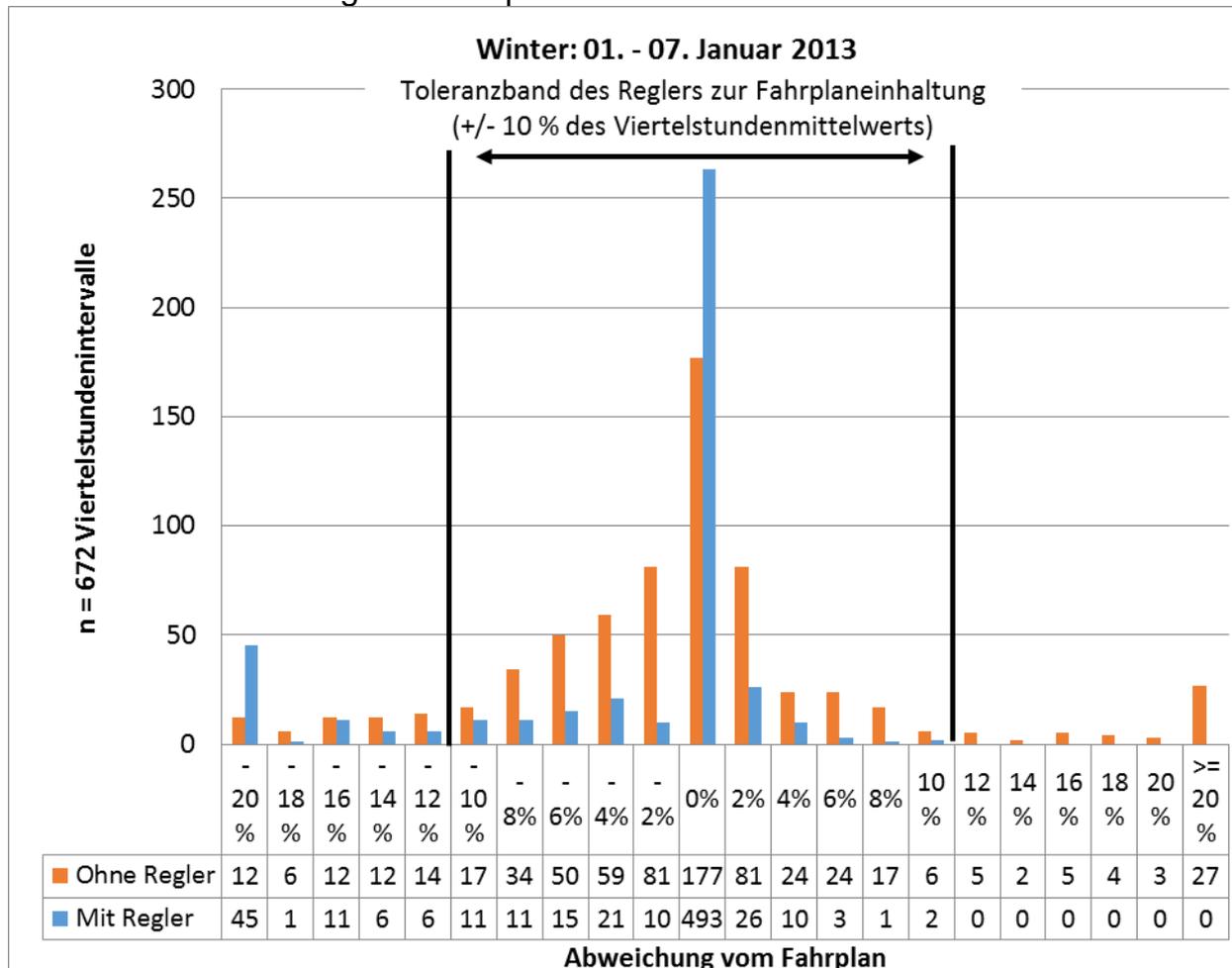


Abbildung 6-36: Histogramm der Fahrplanabweichung bei VK aus drei Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013

Zu sehen ist in Abbildung 6-36, dass besonders positive Abweichungen in 15-Minuten-Intervallen in das Toleranzband verschoben werden durch die Regelung. Allerdings gibt es mit der Regelung am linken Rand eine auffällige Häufung. So steigt die Zahl der Abweichungen die kleiner als – 20 % vom Sollwert sind von 12 auf 45 mit der Regelung.

Die Abweichung wurde mit folgender Formel berechnet (7-2):

$$Abweichung = \frac{Ist-Leistung\ des\ VK - Soll-Leistung\ des\ VK}{Soll-Leistung\ des\ VK}$$

Wenn die Soll-Leistung des VK gleich 0 kW ist, wird eine Abweichung als 100 % bewertet.

Genauere Ausführung der Auswertung finden sich in Kapitel 7.2.

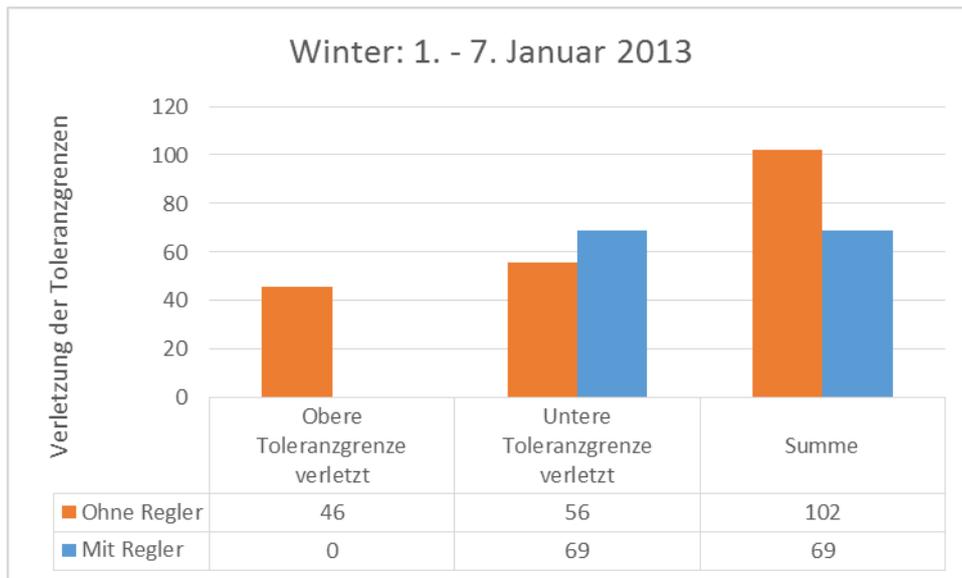


Abbildung 6-37: Vergleich der Toleranzgrenzverletzungen des FP bei VK aus drei Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013

Die Anzahl der 15-Minuten-Intervalle ist mit der Regelung nur ca. halb so groß wie ohne.

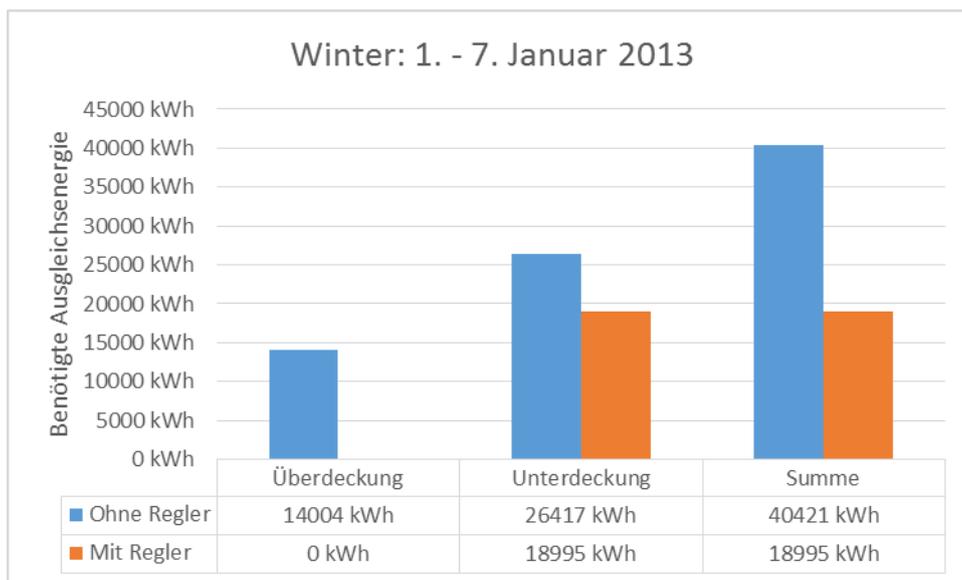


Abbildung 6-38: Vergleich der benötigten Ausgleichsenergie bei VK aus drei Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013

Des Weiteren wird die benötigte Ausgleichsenergie deutlich reduziert. Diese müsste z. B. am Intra-Day-Markt eingekauft werden um den Fahrplan bilanziell auszugleichen (Voraussetzung ist allerdings die Prognosefähigkeit der Fahrplanabweichung, da minimal 45 Minuten vor physischer Lieferung der Energie der eingekauft werden muss).

Hinweis: Die benötigte Ausgleichsenergie wird im Diagramm als Betrag dargestellt. Für eine Überdeckung muss negative Ausgleichsenergie beschafft werden.

6.4.7.4.2 Schalthandlungen

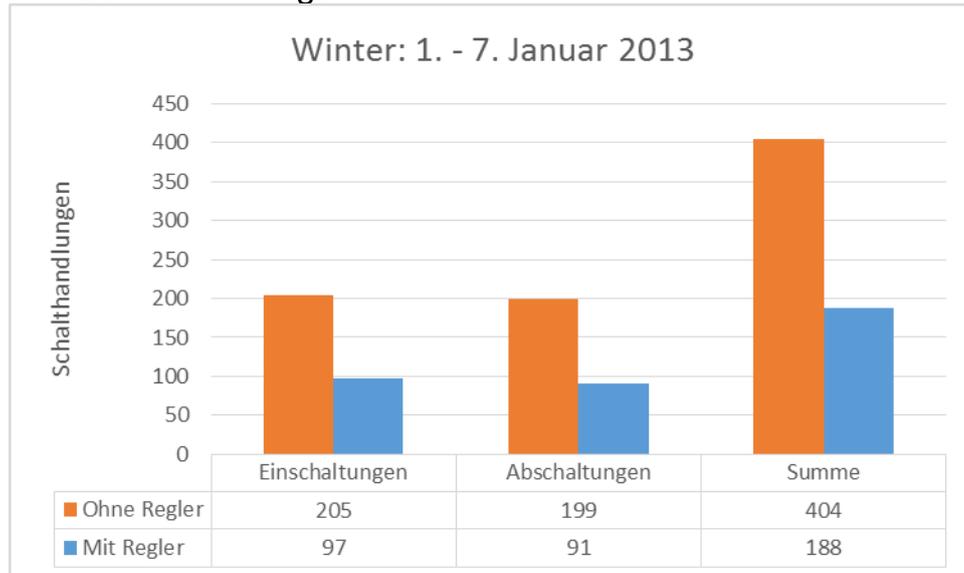


Abbildung 6-39: Vergleich der zusätzlichen Schalthandlungen des VK aus drei Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013

Zu sehen ist in Abbildung 6-39, dass die Anzahl der zusätzlichen Schalthandlungen, also die Schalthandlungen die zusätzlich ausgeführt wurden und nicht nach Fahrplan eingeplant waren, verringert werden mit der Regelung. So ergeben sich mit Regelung weniger als halb so viele zusätzliche Schalthandlungen wie ohne Regelung.

6.4.8 Zusammenfassung der Test-Cases

Die Regelung und der Ist-Last-Generator wurden auf Funktionserfüllung validiert. Es sollten folgende Fragen beantwortet werden:

| Test-Case | Frage | Ergebnis |
|-----------|---|--|
| TC1 | Verhält sich die DLL der Liegenschaft genauso wie das Simulinkmodell? | Die exportierte DLL weist das gleiche Verhalten auf wie das Liegenschaftsmodell in Simulink. Die gemessenen Ausgabewerte sind bei gleichen Eingabewerten und Parametern identisch. |
| TC2 | Kann der Agent den Ist-Füllstand regeln, wenn der Soll-Füllstand unter die SLK-Schwelle fällt? Führungssprungantwort: Wird der Ist-Füllstand auf den Sollfüllstand nachgefahren, wenn der Soll-Füllstand sich ändert? Störsprungantwort: Regelt der Agent den Ist-Füllstand auf den Soll-Füllstand bei nicht prognostizierter Last? | Der Agent regelt den Ist-Füllstand auf den Soll-Füllstand, wenn dieser sich unterhalb der SLK-Schwelle befindet. Ebenfalls wird der Ist-Füllstand auf den Soll-Füllstand geregelt, wenn eine Störung in Form einer nicht prognostizierten Last auftritt. |

| | | |
|-----|---|---|
| TC3 | <p>Arbeitet das Stellglied des Dispatchers korrekt?</p> <p>Wird ein zusätzlicher Leistungsabruf bei vorhandenem Schaltpotential korrekt auf die Liegenschaften verteilt?</p> | <p>Das Stellglied des Dispatchers ruft das Schaltpotential der korrekt ausgewählten Liegenschaften auf um den Zusatzleistungsabruf bedienen.</p> |
| TC4 | <p>Wird das Schaltpotential richtig berechnet?</p> | <p>Sowohl das Einschalt- als auch das Abschaltpotential werden korrekt analysiert.</p> |
| TC5 | <p>Wird auch bei Ausfall von BHKW-Leistung der Fahrplan eingehalten, wenn Einschaltpotential vorhanden ist?</p> <p>Wird auch bei Zwangseinschaltung von BHKWs der Fahrplan bei vorhandenem Abschaltpotential eingehalten?</p> | <p>Es wird bei vorhandenem Schaltpotential die Fahrplanabweichung innerhalb eines 15-Minuten-Intervalls erkannt und der Fahrplan eingehalten.</p> |
| TC6 | <p>Ist die Ist-Last realistisch?</p> | <p>Die Ist-Last entspricht bei steigender Anzahl von Liegenschaften im Mittel der Prognoselast. Somit weicht die Ist-Last von der Prognoselast im gleichen Maße ab, wie eine Ist-Last in der Realität von einem Standardlastprofil. Damit ist die Ist-Last realistisch.</p> |
| TC7 | <p>Führt die Ist-Last zu einer Provokation der Regelung?</p> <p>Führt der Einsatz der Regelung zu einer Verbesserung in Bezug auf die Anforderungen und Ziele der Regelung als der Nichteinsatz?</p> | <p>Die Ist-Last provoziert die Regelung.</p> <p>Fahrplanabweichungen, benötigte Ausgleichsenergie und Schalthandlungen sind bei Einsatz der Regelung weniger häufig als beim Abfahren ohne Fahrplan.</p> |

Tabelle 6-5: Ergebnisse der Test-Cases

Die Test-Cases gelten als erfolgreich absolviert. Somit können im nächsten Kapitel die Use-Cases durchgeführt und ausgewertet werden.

7 Use-Cases und Bewertung

In diesem Kapitel sollen die durchgeführten Szenarien aus Kapitel 3.4 als Use-Cases ausgewertet werden. Alle Liegenschaften sind nach der Konfigurationstabelle in Kapitel 9.1 parametrisiert.

Im ersten Teil dieses Kapitels wird das Schaltpotential für vier einwöchige Zeiträume untersucht, das einem VK aus 40 Liegenschaften zur Verfügung steht.

Anschließend fährt dasselbe VK die gleichen Zeiträume mit und ohne Regelung ab. Hierbei soll festgestellt werden, um wie viel besser der Fahrplan mit Regelung eingehalten werden kann und die Schalthandlungen reduziert werden.

Im letzten Teil wird zusätzliche Leistung von einem VK aus drei Liegenschaften abgerufen sowie eine Leistungsminderung gefordert.

7.1 Use-Case 1: Schaltpotentialanalyse

Hier sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wann gibt es besonders wenig Schaltpotential?
- Wann gibt es besonders viel Schalpotential?

Dabei wird das Schaltpotential untersucht für eine Leistungs-Abrufdauer von 15 Minuten. Da die Abrechnung der Energie in Viertelstundenintervallen erfolgt.

Zum Vergleich des Schaltpotentials wird das maximale Schaltpotential des VK bestimmt. Dieses ist die Summe der Differenz zwischen Maximal- und Mindestleistung aller BHKWs des VK.

$$\text{Maximalschaltpotential} = \sum_{n=1}^{\text{Anzahl BHKWs im VK}} (P_{el,max}(n) - P_{el,min}(n)) \quad (7-1)$$

Unter Berücksichtigung der Konfigurationstabelle in Kapitel 9.1 ergibt sich ein Maximalschaltpotential von 30600 KW für das gesamte VK.

Das tatsächliche Schaltpotential wird bewertet, dabei gilt:

| | |
|-----------------------------|--|
| Sehr großes Schaltpotential | Schaltpotential ≥ 90 % des Maximalschaltpotentials |
| Großes Schaltpotential | 90 % $>$ Schaltpotential ≥ 70 % des Maximalschaltpotentials |
| Mittleres Schaltpotential | 70 % $>$ Schaltpotential ≥ 50 % des Maximalschaltpotentials |
| Kleines Schaltpotential | 50 % $>$ Schaltpotential ≥ 30 % des Maximalschaltpotentials |
| Geringes Einschaltpotential | 30 % $>$ Schaltpotential $>$ des Maximalschaltpotentials |
| Kein Schaltpotential | Schaltpotential = 0 kW |

Tabelle 7-1: Kategorien des Schaltpotentials

Im Folgenden wird das Schaltpotential über die Zeit zusammen mit dem Fahrplan (rot gestrichelt) dargestellt, als erlaubte und technisch realisierbare Abweichung vom

Fahrplan. Zusätzlich wird das Schaltpotential als absolute positive Größe dargestellt. Anschließend erfolgt die Einteilung in die Kategorien des Schaltpotentials. Die Häufigkeit innerhalb dieser Kategorien aus Tabelle 7-1 wird als Tortendiagramm visualisiert. Eine genauere Verteilung des Schaltpotentials findet sich als Histogramm unterhalb des Tortendiagramms.

7.1.1 Winter, 1 Woche, 40 Liegenschaften

Für die Winterwoche ist in Abbildung 7-1 zu erkennen, dass es jeden Tag ein sehr hohes Ein- und Abschaltpotential gibt. Das Abschaltpotential überwiegt dabei.

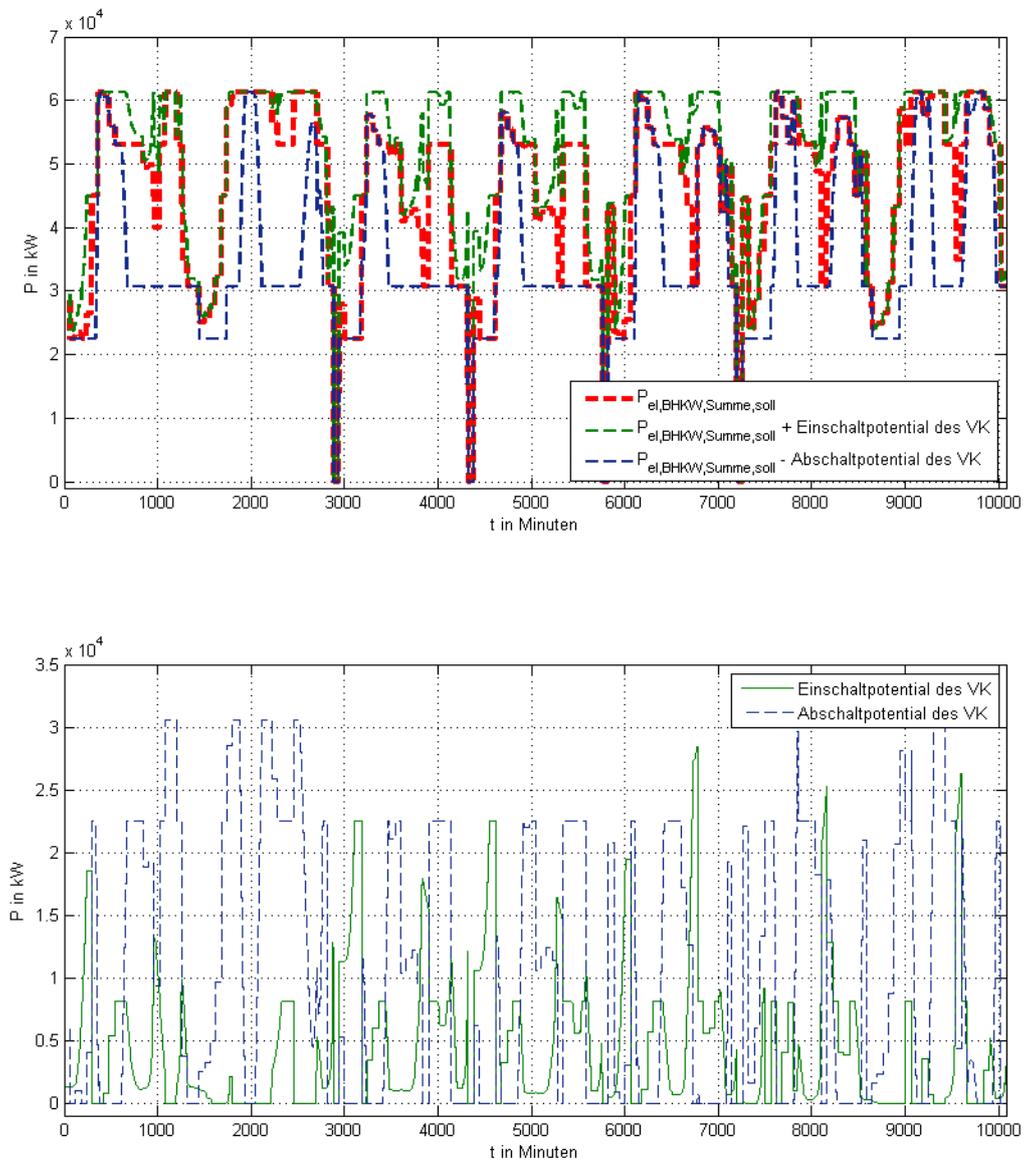


Abbildung 7-1: Schaltpotential in der Winterwoche

Einschaltpotential:

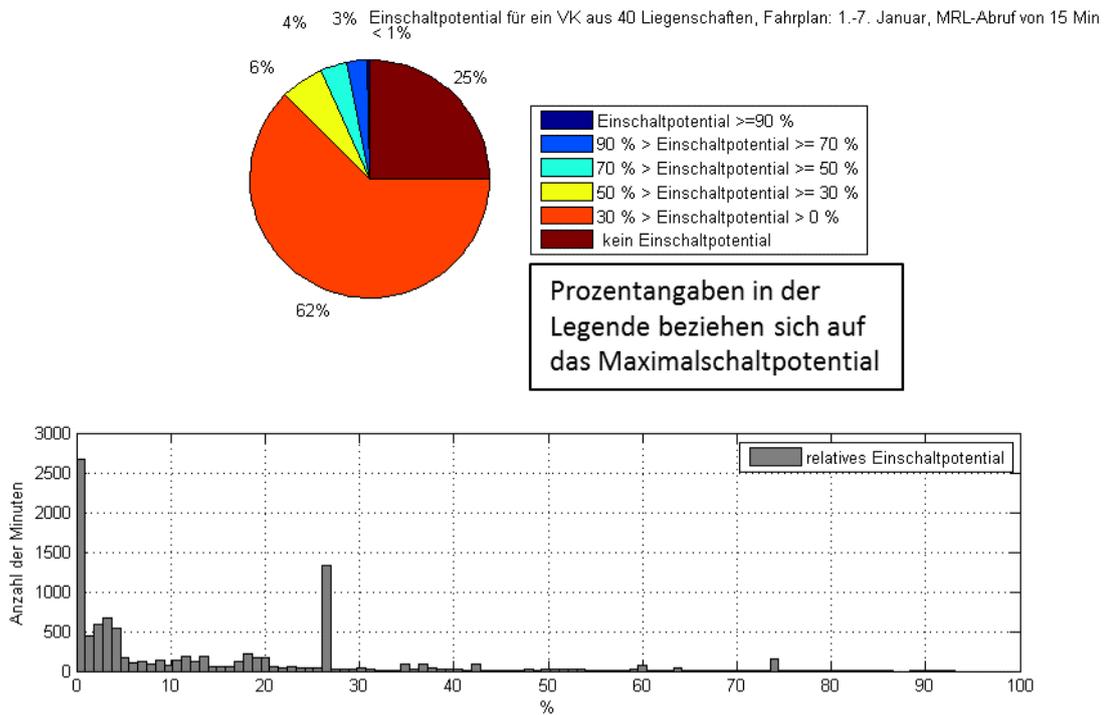


Abbildung 7-2: Relatives Einschaltpotential, 1.-7. Januar 2013

Das Einschaltpotential ist in der Winterwoche größtenteils sehr klein. Ein Viertel der Woche lässt sich überhaupt nicht einschalten in 62 % aller Minuten der Woche ergibt sich nur ein Einschaltpotential, das kleiner als 30 % des Maximalschaltpotentials ist.

Abschaltpotential:

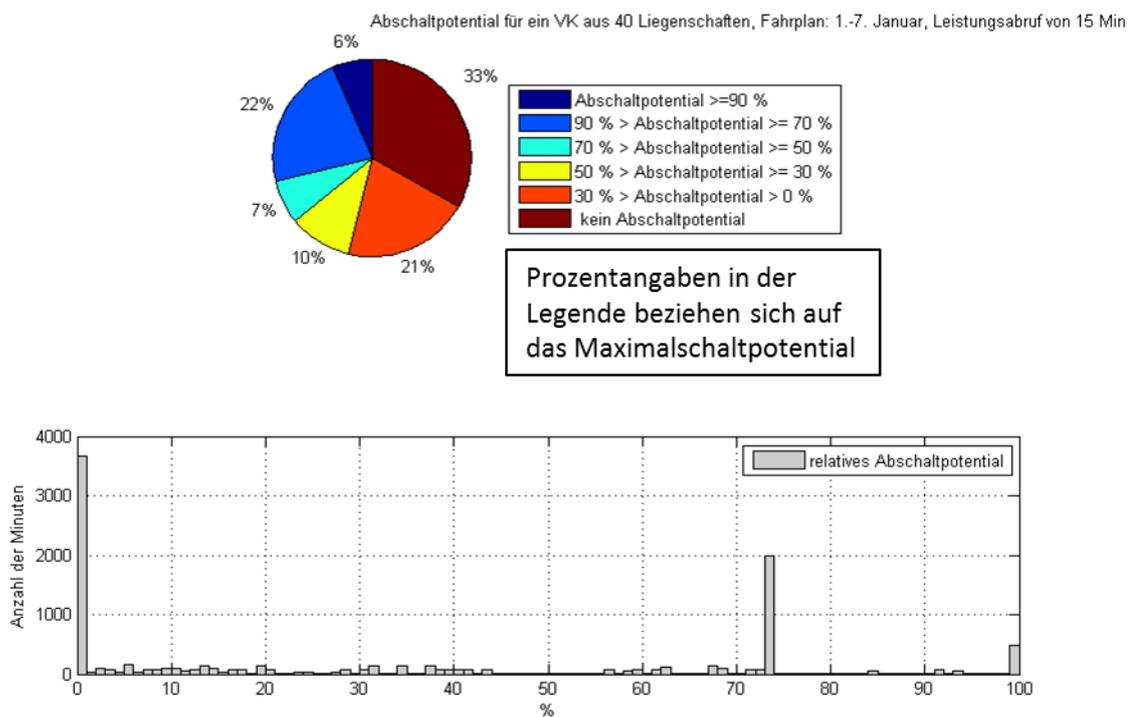


Abbildung 7-3: Relatives Abschaltpotential, 1.-7. Januar 2013

In der Winterwoche lässt sich zu einem Drittel der Zeit nicht einschalten. Mindestens 50 % des maximalen Einschaltpotentials lässt sich in zwei Drittel der Woche einschalten.

7.1.2 Frühling, 1 Woche, 40 Liegenschaften

In Abbildung 7-4 ist zu erkennen, dass die Ist-Leistung des VK häufig stark abgesenkt werden kann. Dagegen lässt sich nur selten einschalten.

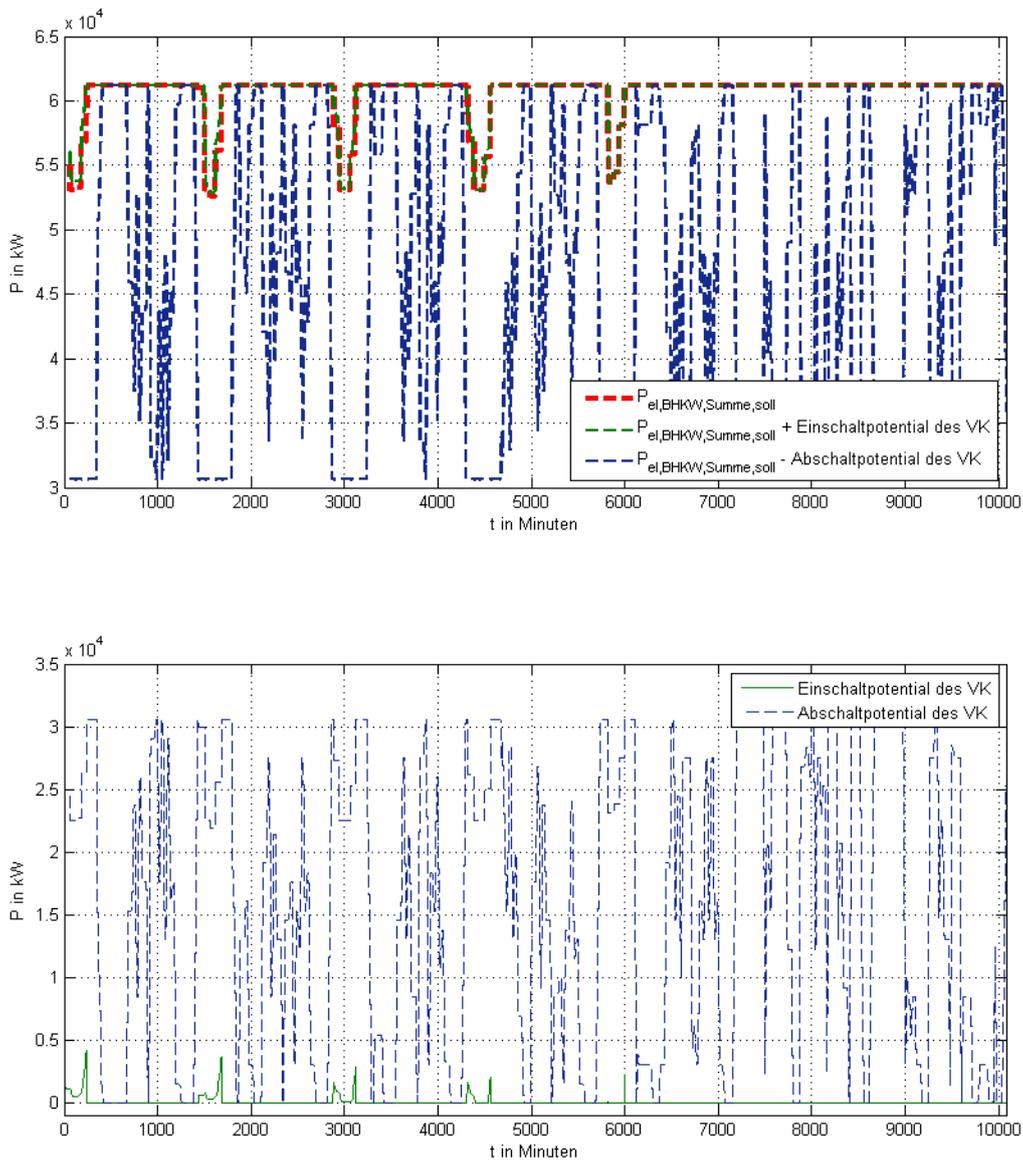


Abbildung 7-4: Schaltpotential in der Frühlings-Woche

Einschaltpotential:

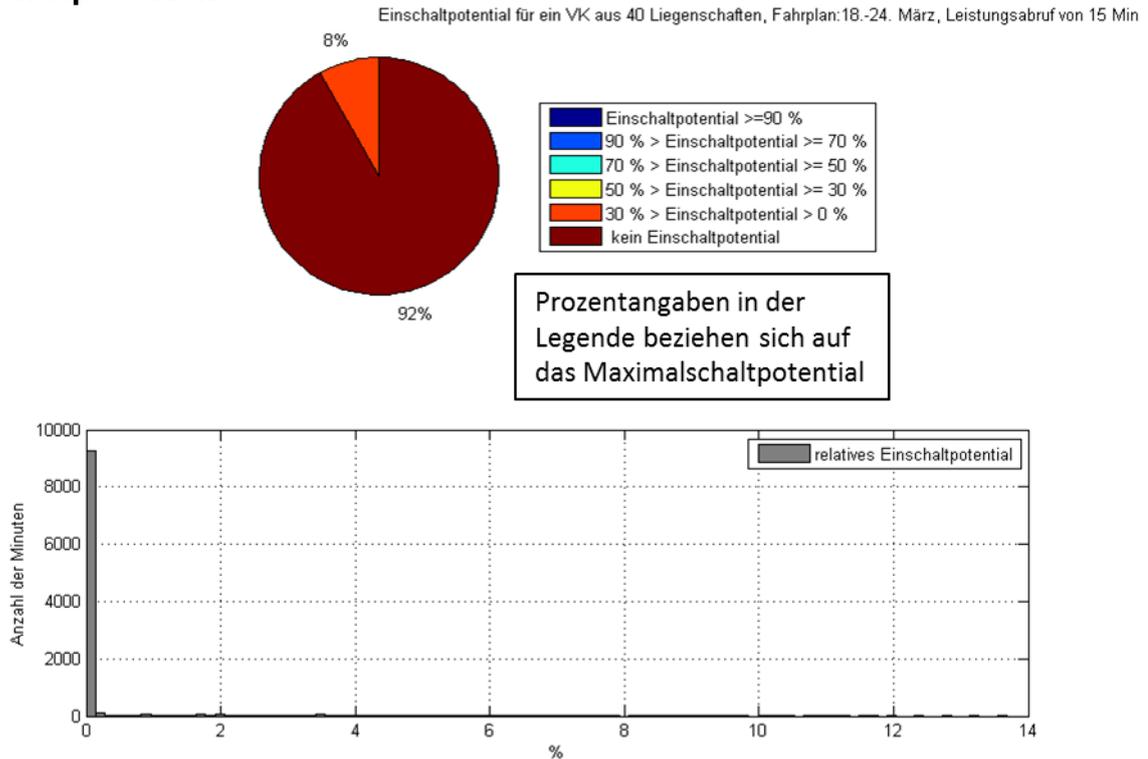


Abbildung 7-5: Relatives Einschaltpotential, 18.-24. März 2013

In der Frühlingswoche lässt sich in lediglich 8 % der Zeit überhaupt einschalten und sonst überhaupt nicht.

Abschaltpotential:

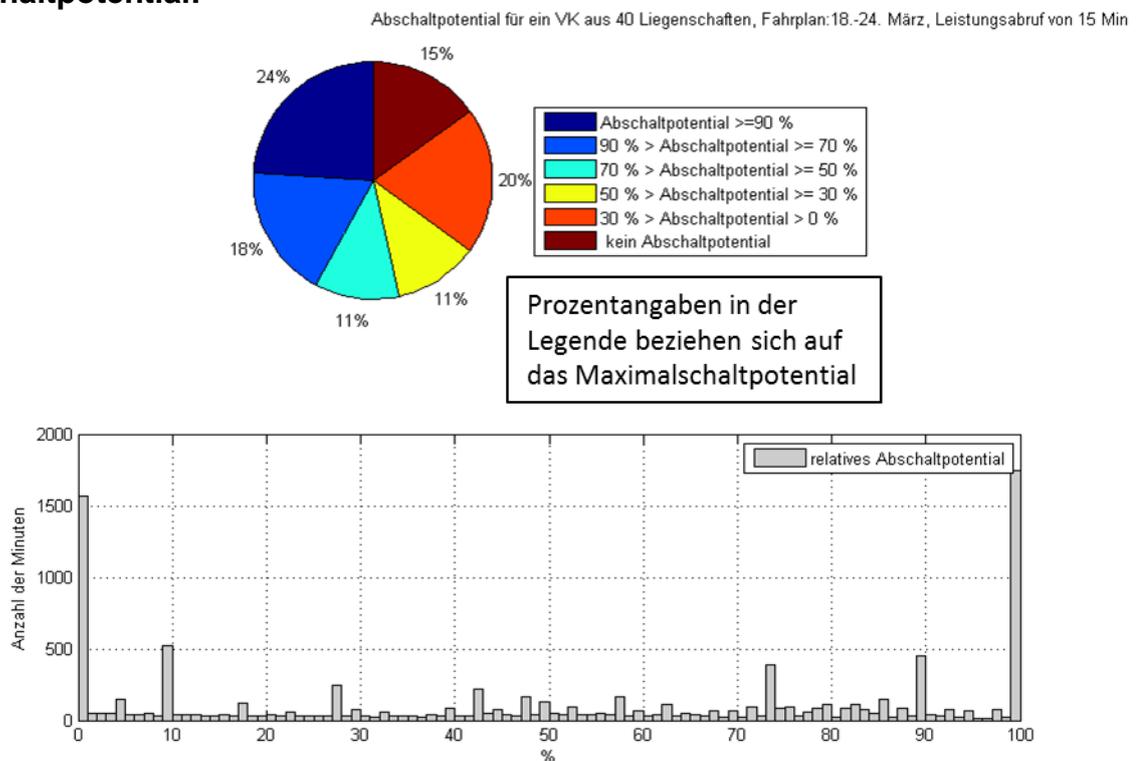


Abbildung 7-6: Relatives Abschaltpotential, 18.-24. März, 2013

Auffällig ist, dass im Histogramm besonders viel Abschaltpotential bei 100 % des Maximalschaltpotentials vorliegt. Dies könnte darauf hinweisen, dass die BHKWs

häufiger auf Maximalleistung fahren. Lediglich in 15 % der Zeit lässt sich nicht abschalten.

7.1.3 Sommer, 1 Woche, 40 Liegenschaften

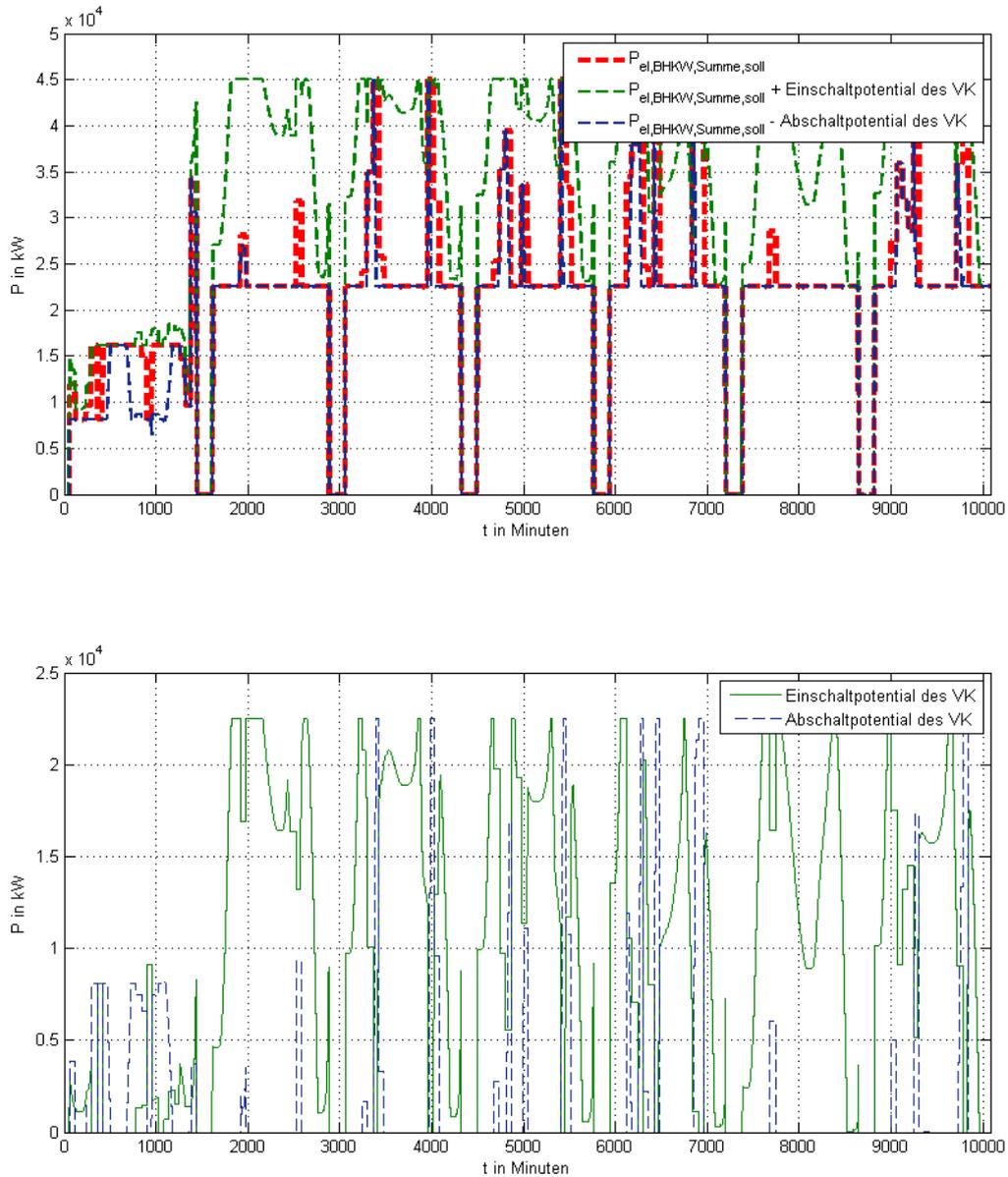


Abbildung 7-7: Schaltpotential in der Sommer-Woche

Einschaltpotential:

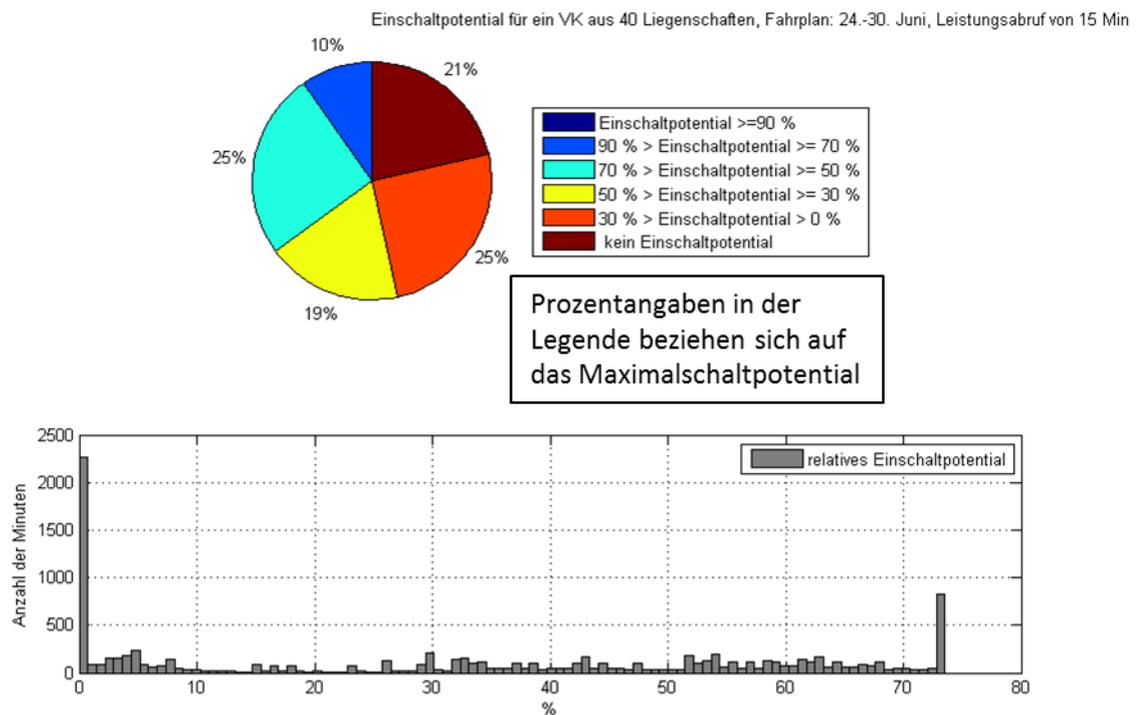


Abbildung 7-8: Relatives Einschaltpotential, 24.-30. Juni 2013

In der Sommerwoche ergibt sich relativ häufig ein großes Einschaltpotential, denn zu 35 % des Zeitraumes lässt sich mindestens 50 % des Maximalschaltpotentials einschalten. Lediglich zu einem fünftel (21 %) der Zeit lässt sich keine Leistung einschalten.

Abschaltpotential:

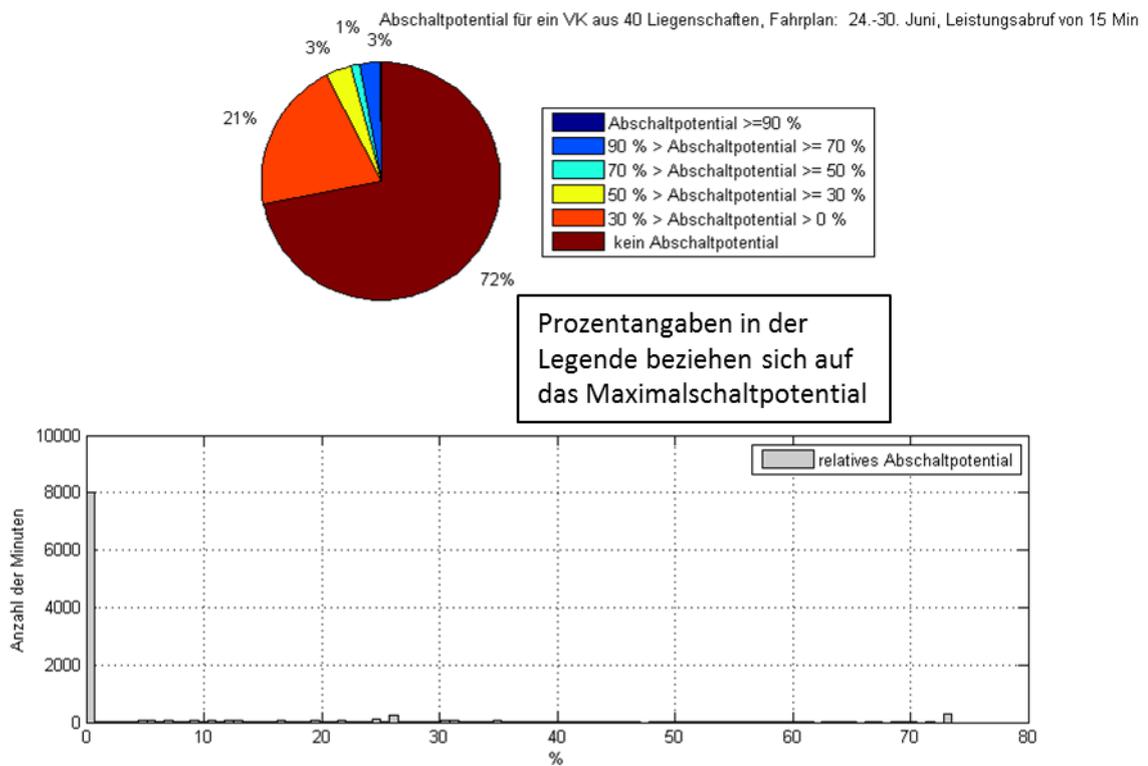


Abbildung 7-9: Relatives Abschaltpotential, 24.-30. Juni 2013

Einschalten lässt sich zu 72 % des Zeitraumes in der Sommerwoche überhaupt nicht. Ein sehr kleines Abschaltpotential ergibt sich für nur ein Fünftel der Zeit.

7.1.4 Herbst, 1 Woche, 40 Liegenschaften

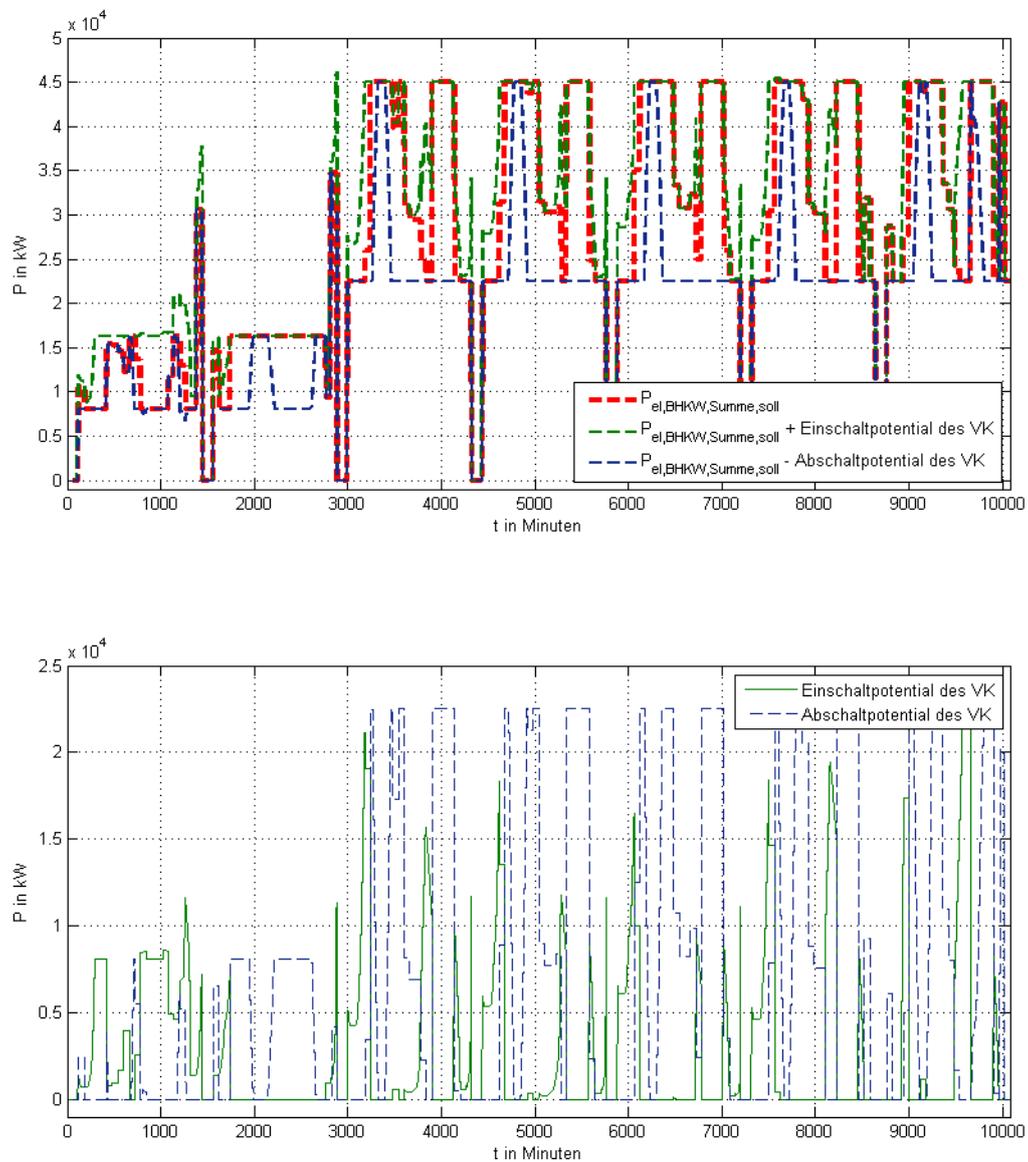


Abbildung 7-10: Schaltpotential im Herbst

Einschaltpotential:

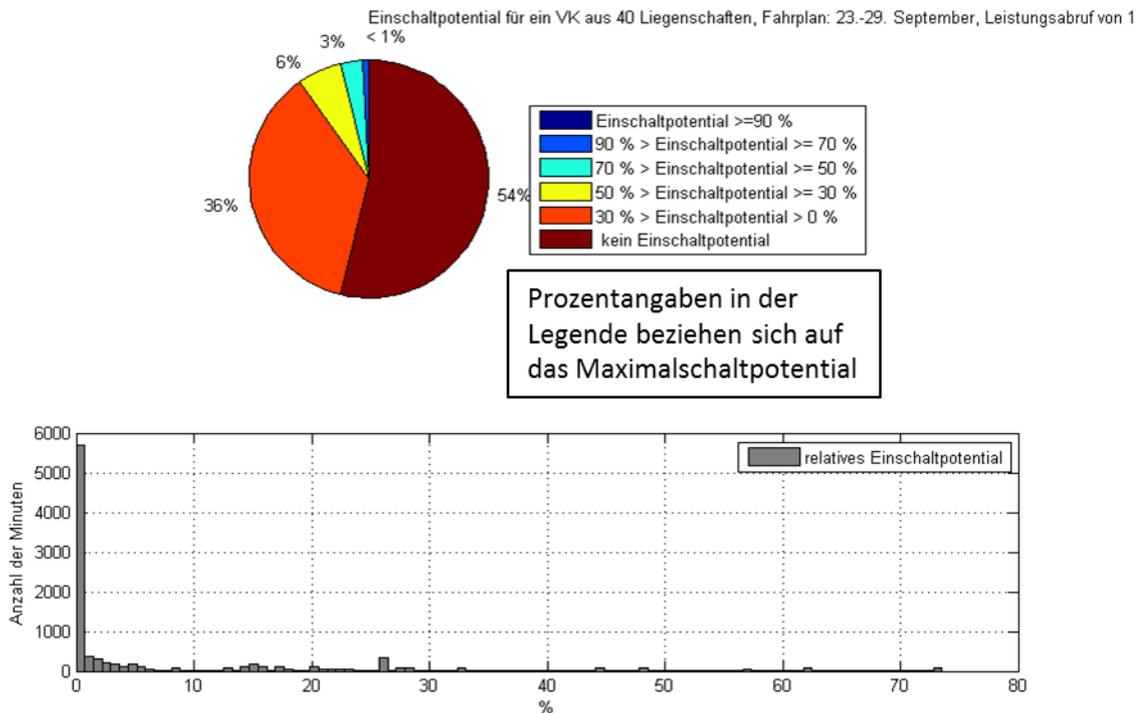


Abbildung 7-11: Relatives Einschaltpotential, 23.-29. September 2013

In der Übergangszeit zwischen Sommer und Winter kann ca. die Hälfte des Zeitraums nicht eingeschaltet werden. Auch sonst ist das Einschaltpotential eher gering.

Abschaltpotential:

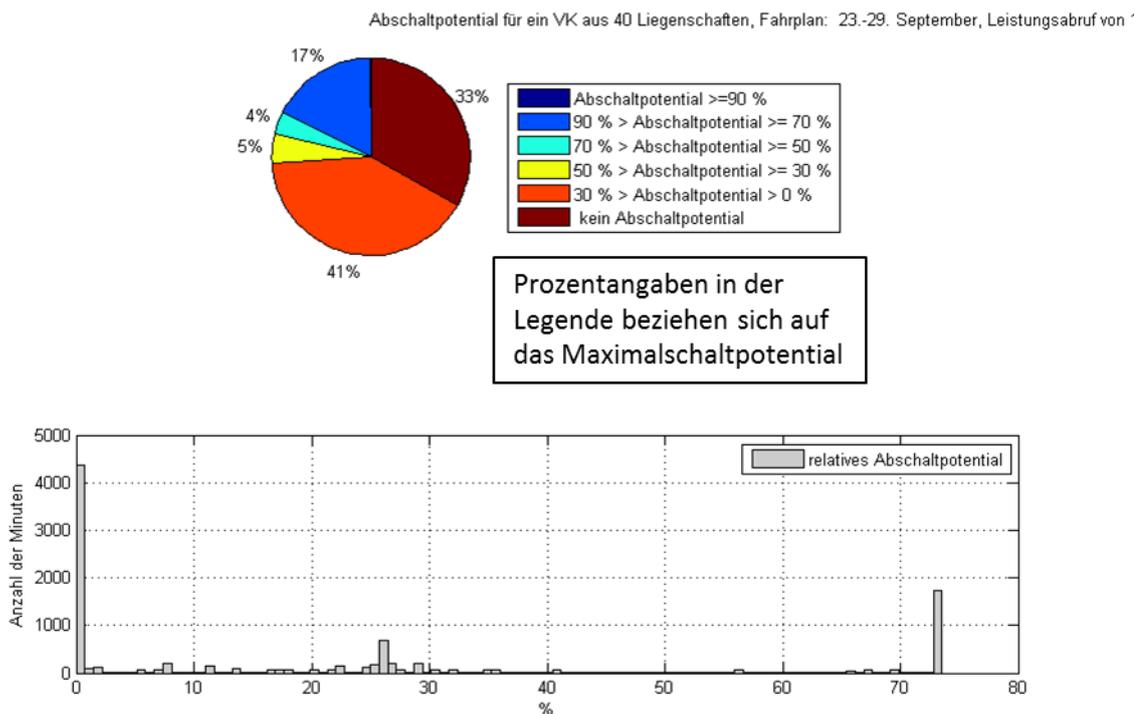


Abbildung 7-12: Relatives Abschaltpotential, 23.-29. September 2013

Ein Drittel des Zeitraums lässt sich in der Herbst-Woche nicht abschalten. Dafür ergibt sich für etwa ein Viertel des Zeitraumes ein mittleres bis großes Einschaltpotential.

7.1.5 Fazit

| Woche | Mind. mittleres Einschaltpotential | Mind. mittleres Abschaltpotential |
|----------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Winterwoche | 13 % | 46 % |
| Frühlingswoche | <u>0 %</u> | 65 % |
| Sommerwoche | 54 % | <u>7 %</u> |
| Herbstwoche | 10 % | 26 % |

Tabelle 7-2: Fazit Schaltpotentialanalyse

Das häufigere Einschaltpotential im Sommer wird damit erklärt, dass die BHKWs aufgrund der geringen thermischen Last wenn sie eingeschaltet sind auf Mindestleistung fahren.

Dies deckt sich mit der Messung, dass im Sommer lediglich zu 7 % der Zeit ein mindestens mittelgroßes Abschaltpotential vorliegt, da bei Mindestleistung der BHKWs nicht weiter abgeschaltet werden kann ohne die BHKWs auszuschalten.

Das nichtvorhandene Einschaltpotential im Frühling welches mindestens mittelgroß ist wird damit erklärt, dass die BHKWs wohl nur in den wenigen Stunden hoher Strompreise auf Vollast laufen. Diese Annahme deckt sich mit der Messung, dass in der Frühlingswoche häufiger ein mindestens mittelgroßes Abschaltpotential vorherrscht.

Eine Besonderheit der Übergangszeit ist, dass in dieser der Wärmebedarf ansteigt oder fällt. Daher können BHKWs in diesen Zeiten nicht durchlaufen und takten mehr.

Kritisch können das nichtvorhandene Einschaltpotential, welches mindestens mittelgroß ist, in der Frühlingswoche und das sehr seltene Abschaltpotential in der Herbstwoche sein. Die Randbedingung der Regelung nur den Teillastbereich der BHKWs auszunutzen, kann zu Problemen der Fahrplaneinhaltung führen. Eine zukünftige Modifizierung der Regelung könnte sein, BHKWs unter bestimmten Umständen auch ein- oder abzuschalten und zusätzliche Schalthandlungen zu akzeptieren.

Des Weiteren wäre interessant, wie hoch der Preis für elektrische Energie im Laufe der Zeit und welches Schaltpotential vorhanden ist. So könnte abgeschätzt werden, ob die Zeiträume mit besonders hohen Strompreisen am Intraday-Markt mit den Zeiten in denen besonders hohes Einschaltpotential vorliegt, zusammenpassen. Dadurch ergäben sich möglicherweise Mehrerlöse, wenn diese Zeiten durch entsprechendes Schaltpotential ausgenutzt werden kann.

7.2 Use-Case 2: Fahrplaneinhaltung

Es wird ein VK aus 40 Liegenschaften aufgebaut. Es wird je eine Woche von jeder Jahreszeit abgefahren. Dabei gelten folgende Einstellungen:

Dispatcher:

Obere Toleranzgrenze des Fahrplans = 110 % der Fahrplanleistung

Untere Toleranzgrenze des Fahrplans = 90 % der Fahrplanleistung

Zeithorizont = 120 Minuten

Agenten:

SLK-Schwelle = 100 kWh

BHKW-Schwelle = 50 kWh

Nun wird der Fahrplan abgefahren ohne Regelung und einmal mit Regelung. Dabei werden folgende Werte aufgenommen:

1. Anzahl der Verletzung der oberen Toleranzgrenze des Fahrplans
2. Anzahl der Verletzung der unteren Toleranzgrenze des Fahrplans
3. Benötigte Ausgleichsenergie um Überdeckung zu kompensieren
4. Benötigte Ausgleichsenergie um Unterdeckung zu kompensieren
5. Anzahl der zusätzlichen Einschaltvorgänge
6. Anzahl der zusätzlichen Ausschaltvorgänge

Die Abweichungen vom Fahrplan werden in % aufgenommen. Dabei gilt folgende Formel:

$$\text{Abweichung} = \frac{\text{Ist-Leistung des VK} - \text{Soll-Leistung des VK}}{\text{Soll-Leistung des VK}} \quad (7-2)$$

Sollte die Soll-Leistung 0 kW betragen, so wird bei Vorhandensein einer positiven Differenz aus Ist- zu Soll-Leistung eine Abweichung von 100 % gewählt.

Es wird für ein VK aus 40 Liegenschaften für eine repräsentative Woche jeder Jahreszeit eine Simulation erstellt. Dabei wird aufgenommen, wie oft und wie stark die Ist-Leistung von der Fahrplan-Leistung abweicht.

Des Weiteren werden die zusätzlichen Schaltheandlungen gezählt.

Für die Winter-Woche wurde zur Veranschaulichung Abbildung 7-13 aufgenommen:

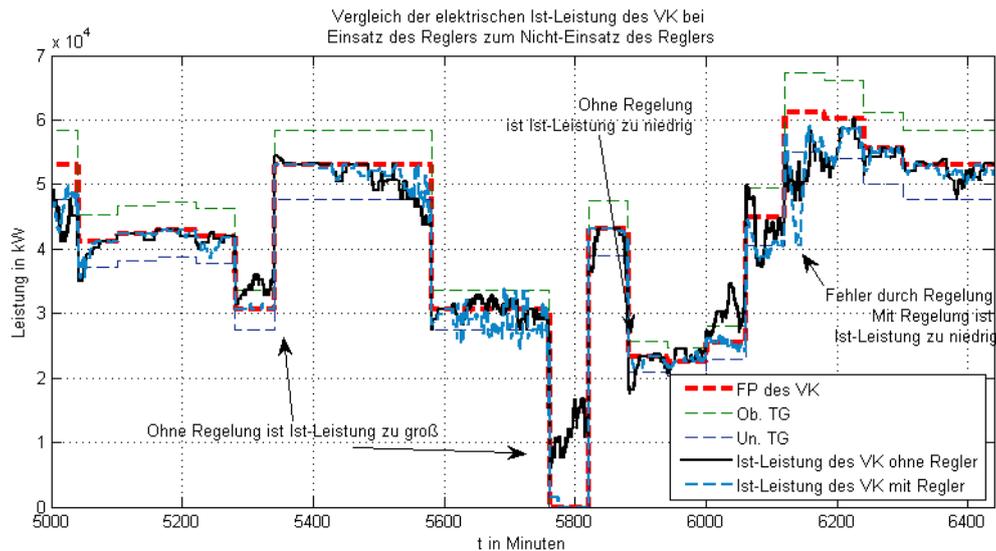


Abbildung 7-13: Vergleich der Ist-Leistung bei Einsatz des Reglers zum Nicht-Einsatz des Reglers in der Winter-Woche

Zu sehen ist, dass ohne die Regelung häufiger Verletzungen der oberen(Ob.) und unteren (Un.) Toleranzgrenzen (TG) stattfinden. Besonders bei Minute 5800 ist zu erkennen, dass ohne Regelung eine starke Überdeckung, also zu viel elektr. Energie erzeugt wird. Allerdings verursacht die Regelung auch Verletzungen der Toleranzgrenze. Zwischen Minute 6000 und 6200 fällt die Ist-Leistung stark ab, während zu selben Zeit ohne die Regelung die Ist-Leistung weniger stark abfällt. Hier wäre eine genauere Untersuchung des Fehlers notwendig um festzustellen, warum bei Einsatz des Reglers die Ist-Leistung stärker vom Sollwert abweicht als ohne Regelung.

Im Folgenden werden nun die Ergebnisse für jede Woche dargelegt.

7.2.1 Winter Einhaltung des Fahrplans

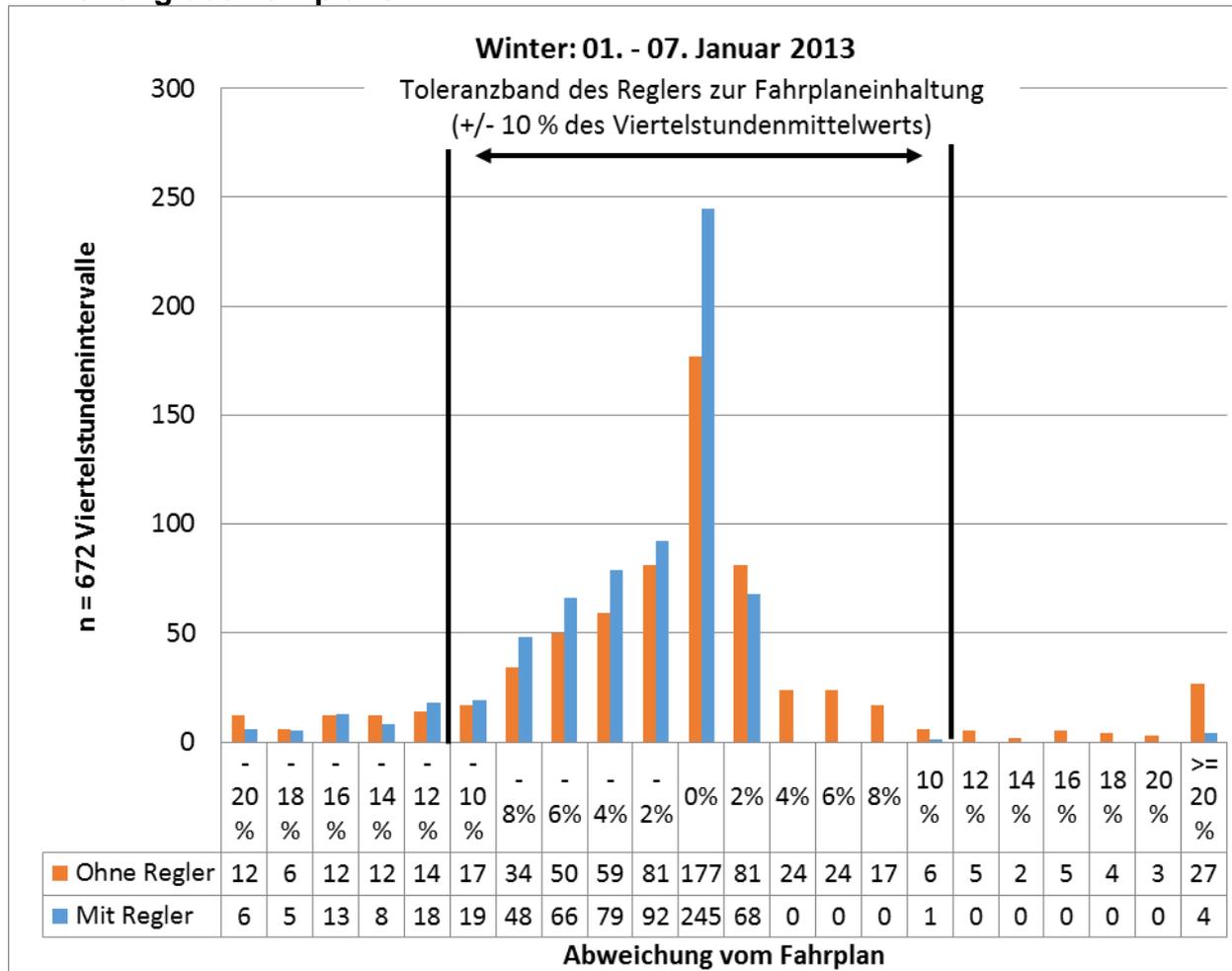


Abbildung 7-14: Histogramm der Fahrplanabweichung bei VK aus 40 Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013

Zu erkennen ist in Abbildung 7-14, dass besonders die Verletzungen der oberen Toleranzgrenze mit der Regelung abnehmen.

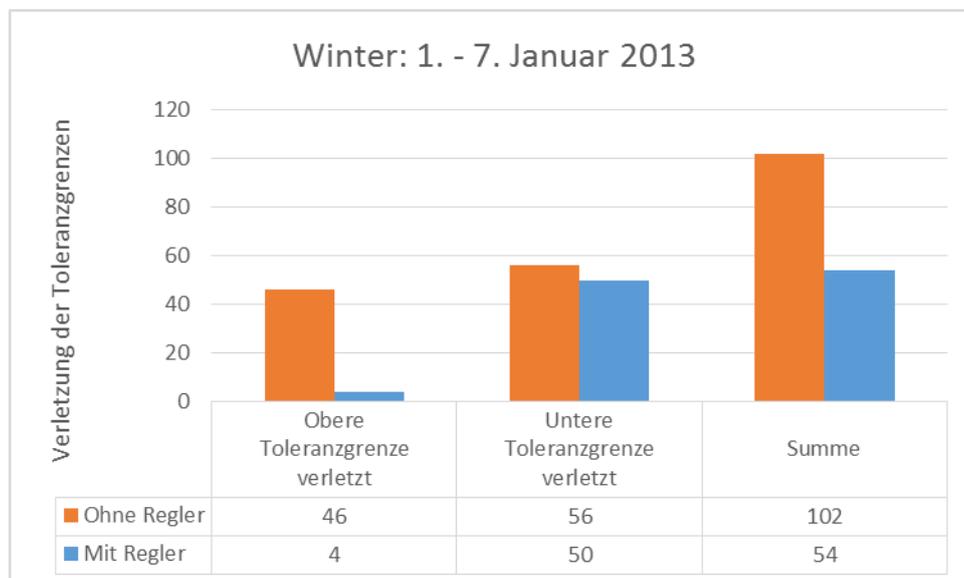


Abbildung 7-15: Vergleich der Toleranzgrenzverletzungen des Fahrplans bei VK aus 40 Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013

Durch die Regelung konnte besonders die Verletzungen der oberen Toleranzgrenze reduziert werden. Die Verletzung der unteren Toleranzgrenze konnte dagegen nur um 6 reduziert werden.

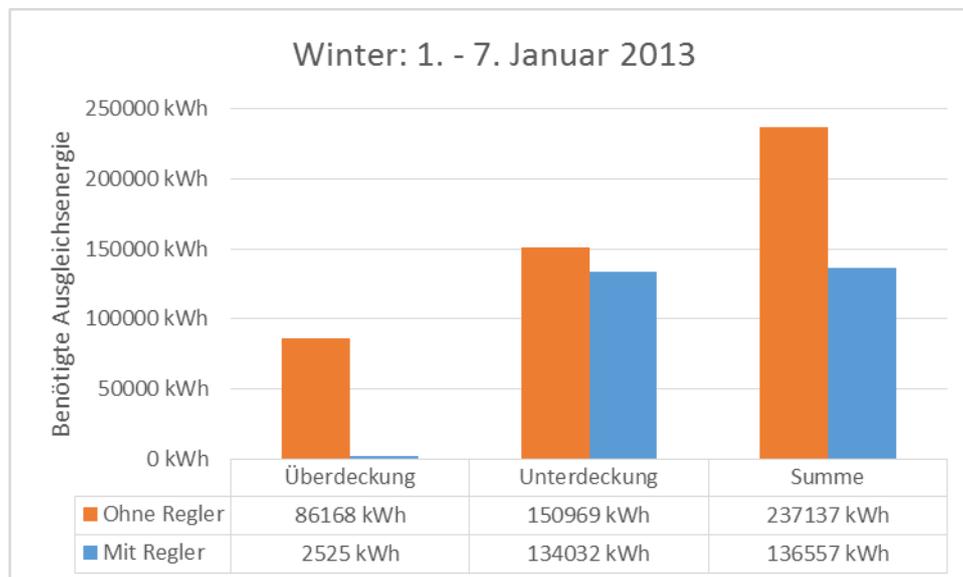


Abbildung 7-16: Vergleich der benötigten Ausgleichsenergie bei VK aus 40 Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013¹³

Damit einhergehend reduziert sich besonders die Ausgleichsenergie um die Überdeckung des Fahrplans zu kompensieren. Die nötige Ausgleichsenergie für Unterdeckung konnte mit der Regelung nur wenig reduziert werden.

¹³ Hinweis: Die benötigte Ausgleichsenergie wird im Diagramm als Betrag dargestellt. Für eine Überdeckung muss negative Ausgleichsenergie beschafft werden

Zusätzliche Schalthandlungen

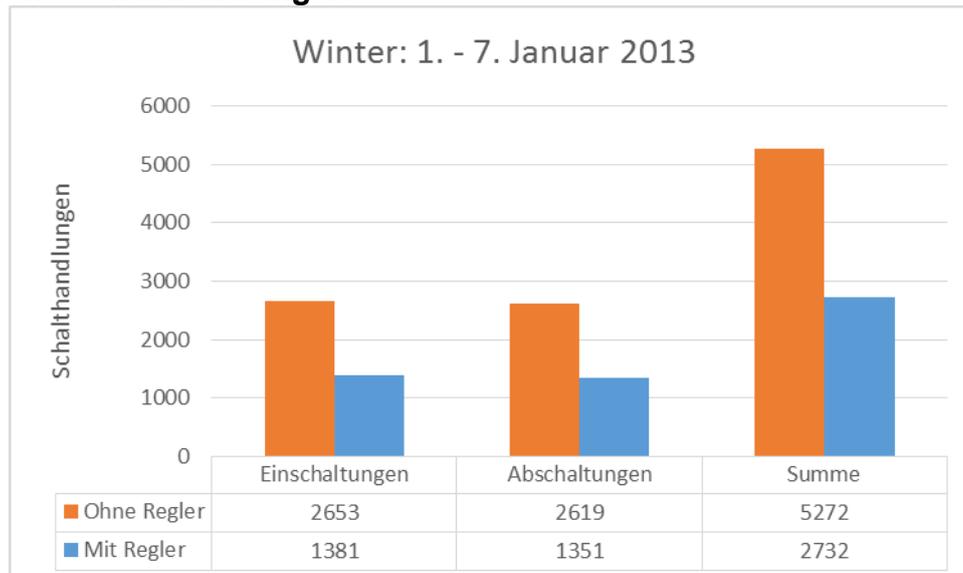


Abbildung 7-17: Vergleich der Schalthandlungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 1.-7. Januar 2013

Zusätzliche Ein- und Abschalthandlungen konnten gleichermaßen gut reduziert werden.

7.2.2 Frühling Einhaltung des Fahrplans

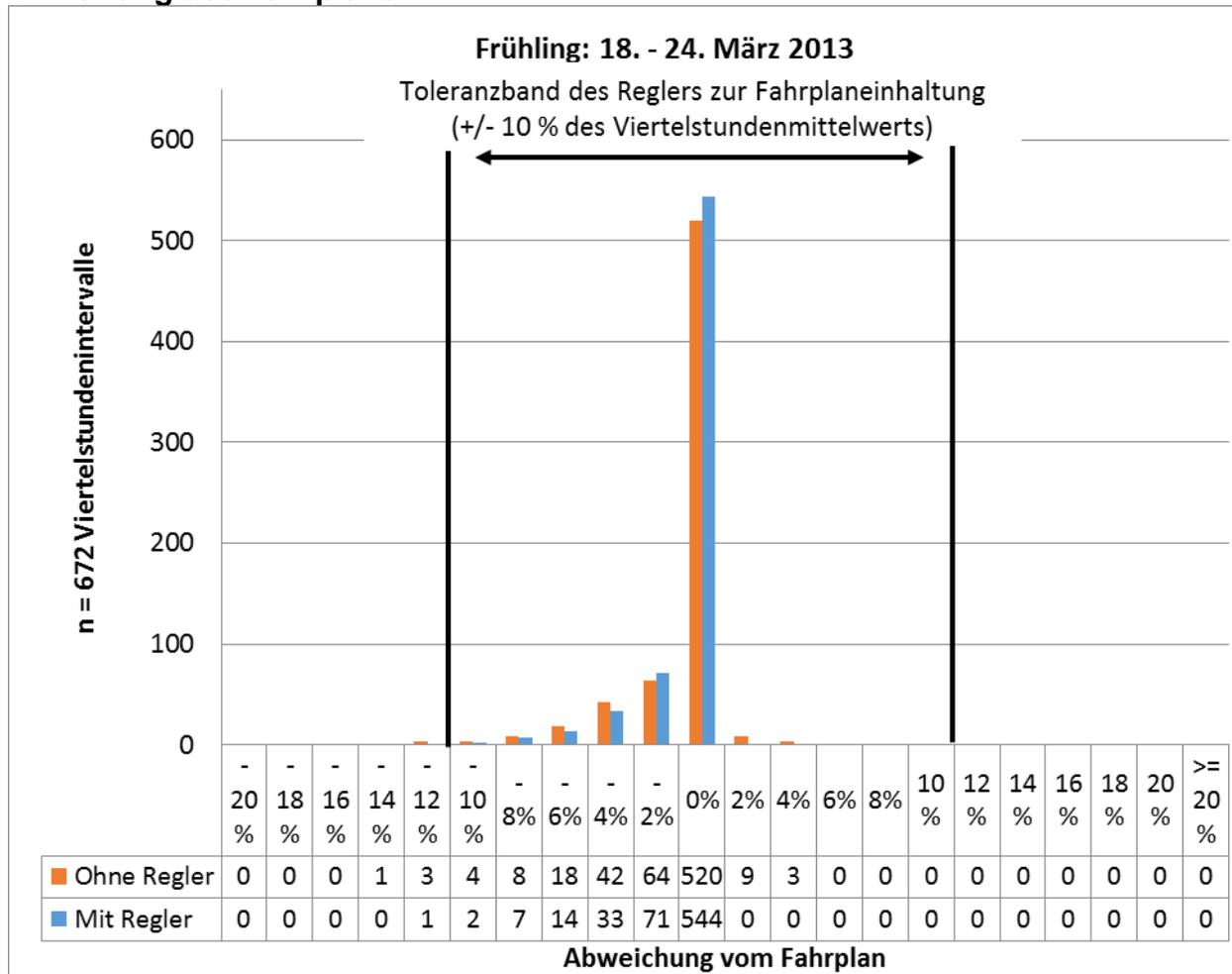


Abbildung 7-18: Histogramm der Fahrplanabweichung, bei VK aus 40 Liegenschaften, 18.-24. März 2013

Generell konnte der Fahrplan im Frühling auch ohne Regelung relativ gut eingehalten werden. Ohne Regelung gab es lediglich 4 Verletzungen der unteren Toleranzgrenze.

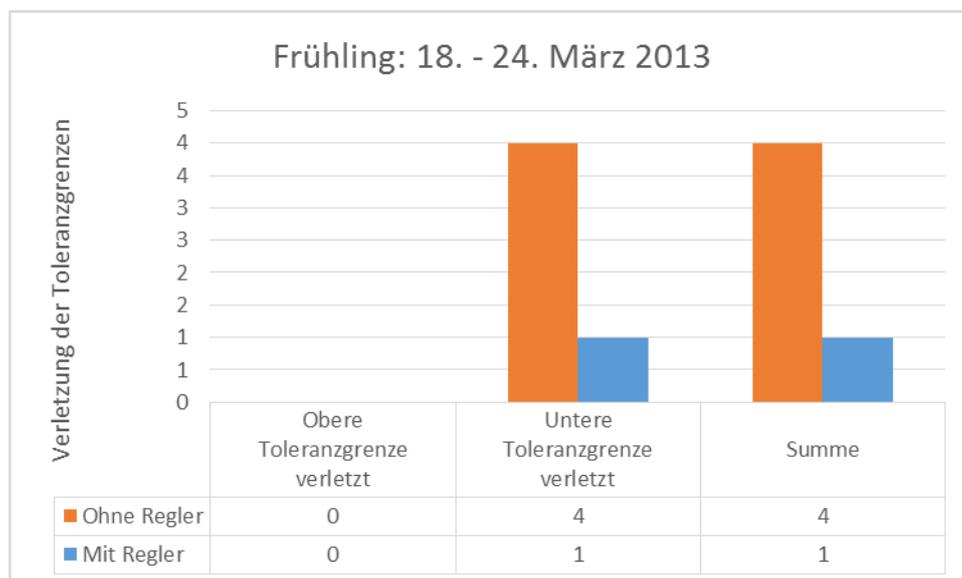


Abbildung 7-19: Vergleich der Toleranzgrenzverletzungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 18.-24. März 2013

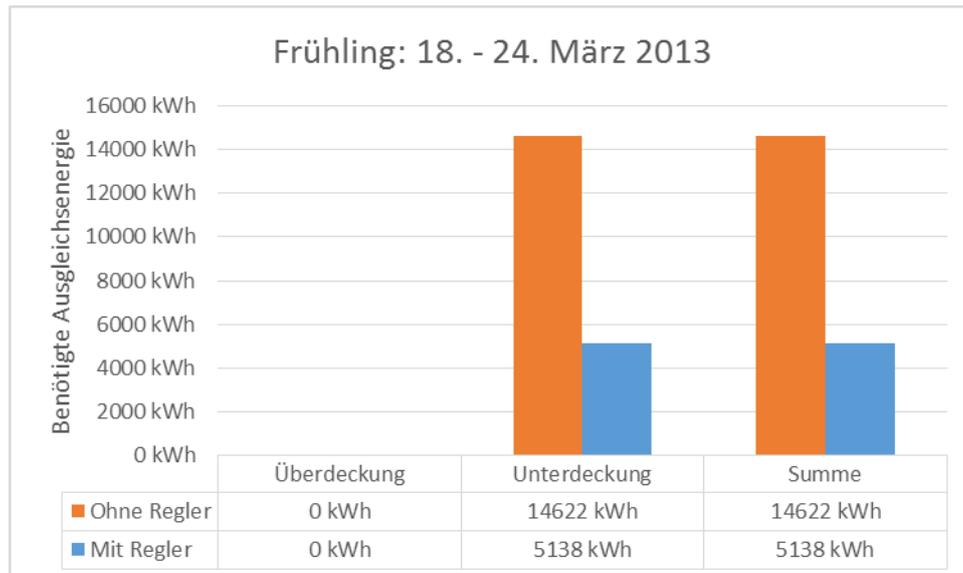


Abbildung 7-20: Vergleich der benötigten Ausgleichsenergie bei VK aus 40 Liegenschaften, 18.-24. März 2013¹⁴

Da es lediglich Unterdeckungen des Fahrplans gab, konnte der Regler auch nur die Ausgleichsenergie für eine Unterdeckung des Fahrplans reduzieren. Die benötigte Ausgleichsenergie ist mit Regelung fast drei Mal kleiner als ohne.

Zusätzliche Schalthandlungen

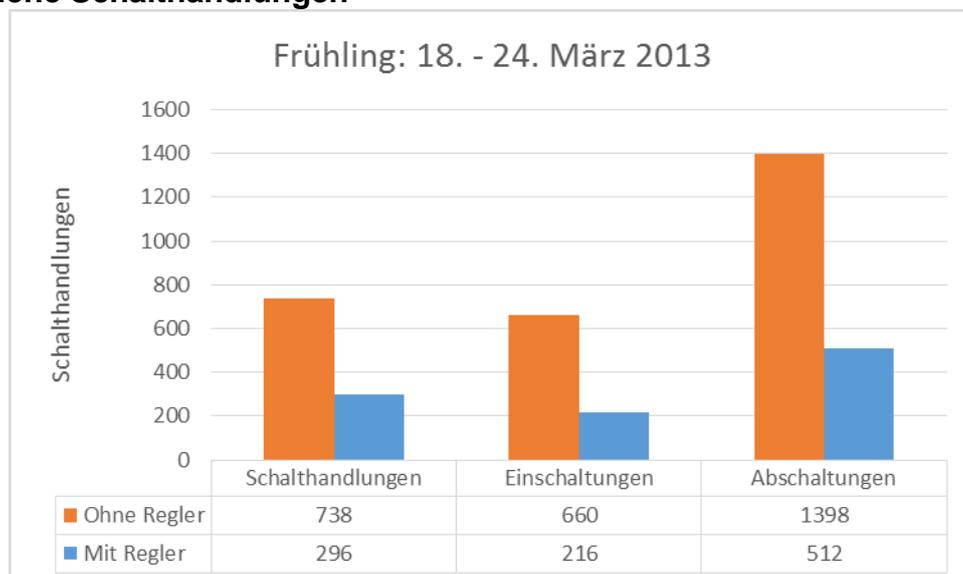


Abbildung 7-21: Vergleich der Schalthandlungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 18.-24. März 2013

Die Anzahl der zusätzlichen Schalthandlungen konnte insgesamt ebenfalls fast um den Faktor 3 reduziert werden.

¹⁴ Hinweis: Die benötigte Ausgleichsenergie wird im Diagramm als Betrag dargestellt. Für eine Überdeckung muss negative Ausgleichsenergie beschafft werden.

7.2.3 Sommer Einhaltung des Fahrplans

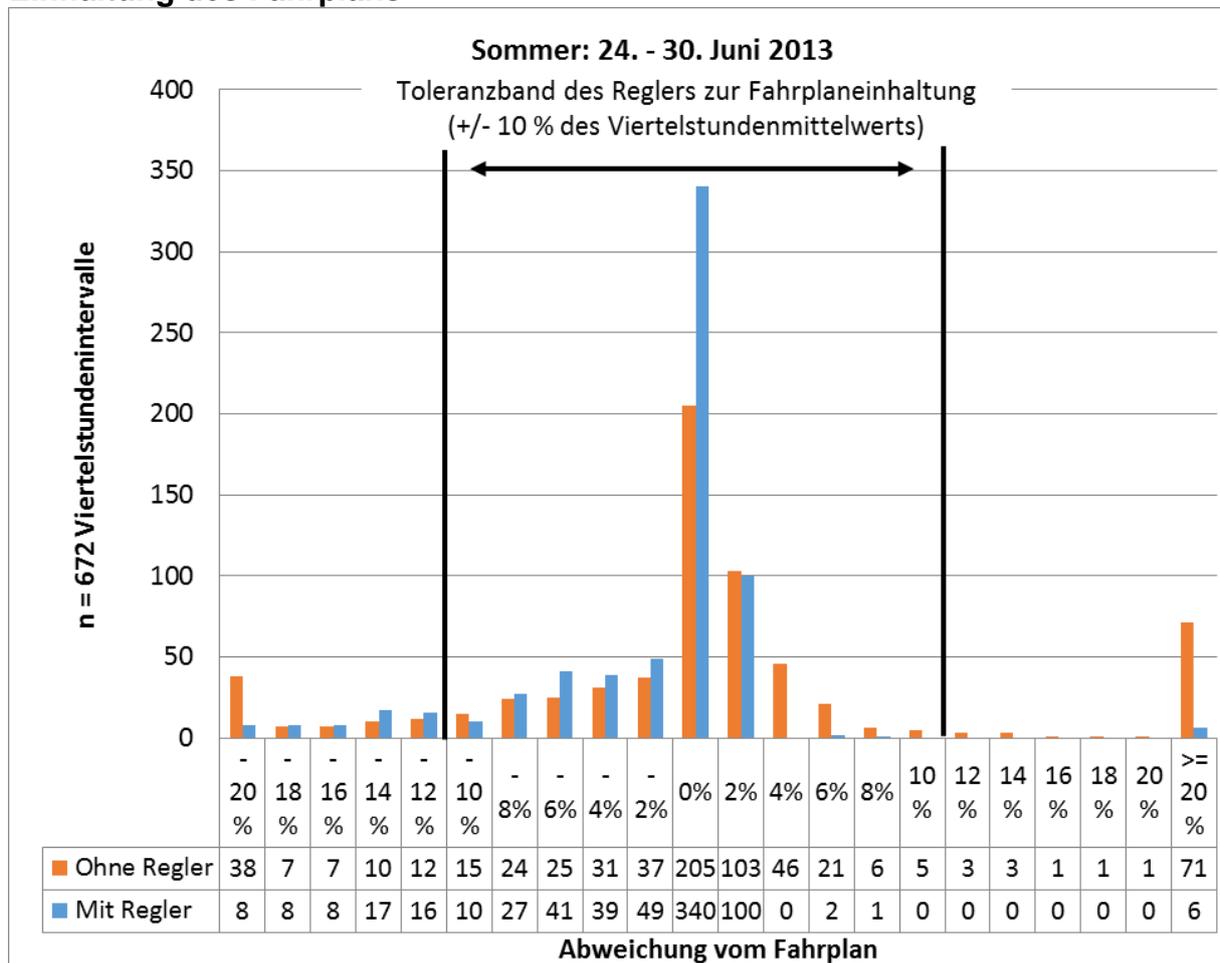


Abbildung 7-22: Histogramm der Fahrplanabweichungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 24.-30. Juni 2013

In der Sommer-Woche konnte die Anzahl der sehr großen Abweichungen merklich reduziert werden. Zu sehen ist in Abbildung 7-22, dass durch den Regler besonders die großen Abweichungen an den Rändern des Diagramms schrumpfen.

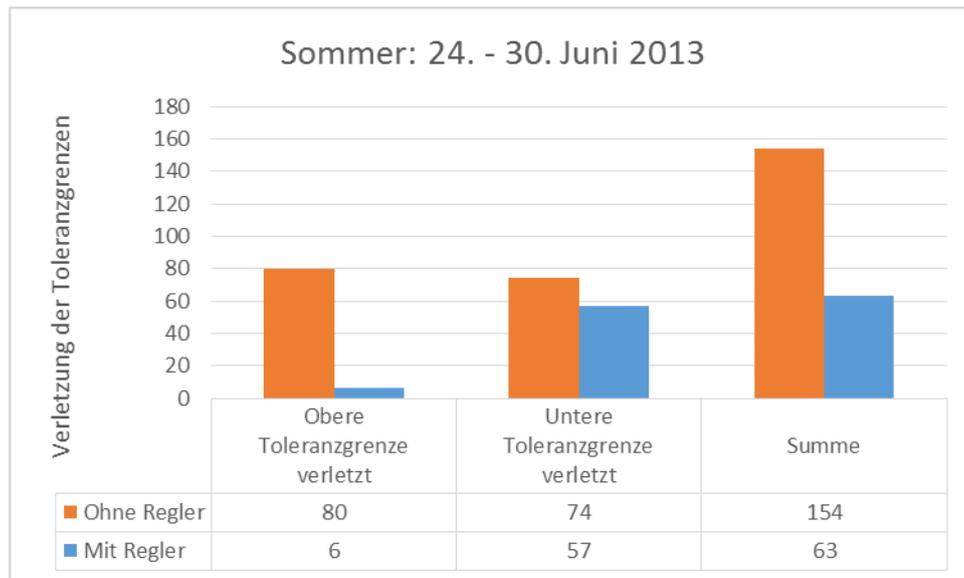


Abbildung 7-23: Vergleich der Toleranzgrenzverletzungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 24.-30. Juni 2013

Am besten konnte der Regler die Verletzungen der oberen Toleranzgrenze verhindern.

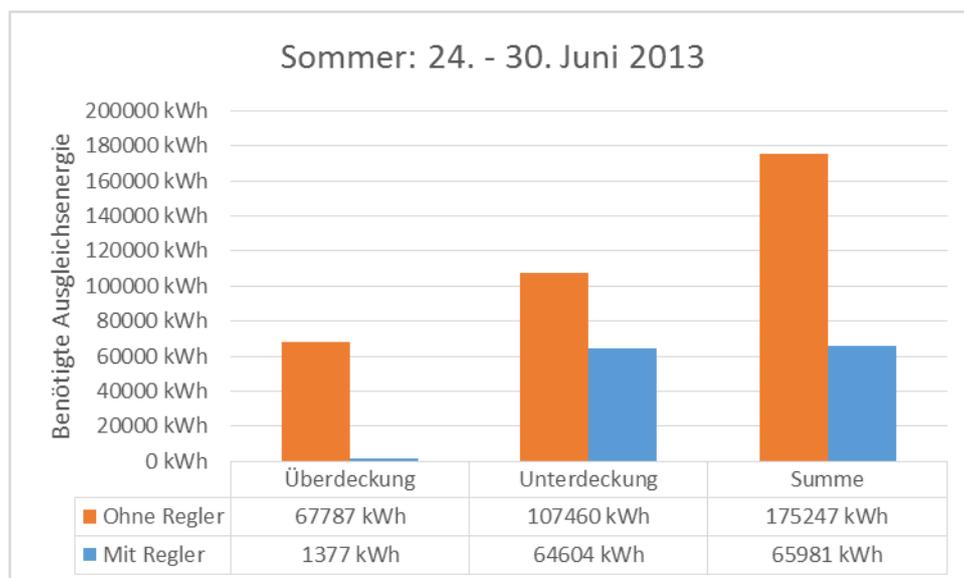


Abbildung 7-24: Vergleich der benötigten Ausgleichsenergie bei VK aus 40 Liegenschaften, 24.-30. Juni 2013

Dies zeigt sich auch in der benötigten Ausgleichsenergie in Abbildung 7-24. Besonders die Ausgleichsenergie um die Überdeckung zu kompensieren konnte von fast 780000 kWh auf 1377 kWh reduziert werden.

Zusätzliche Schalthandlungen

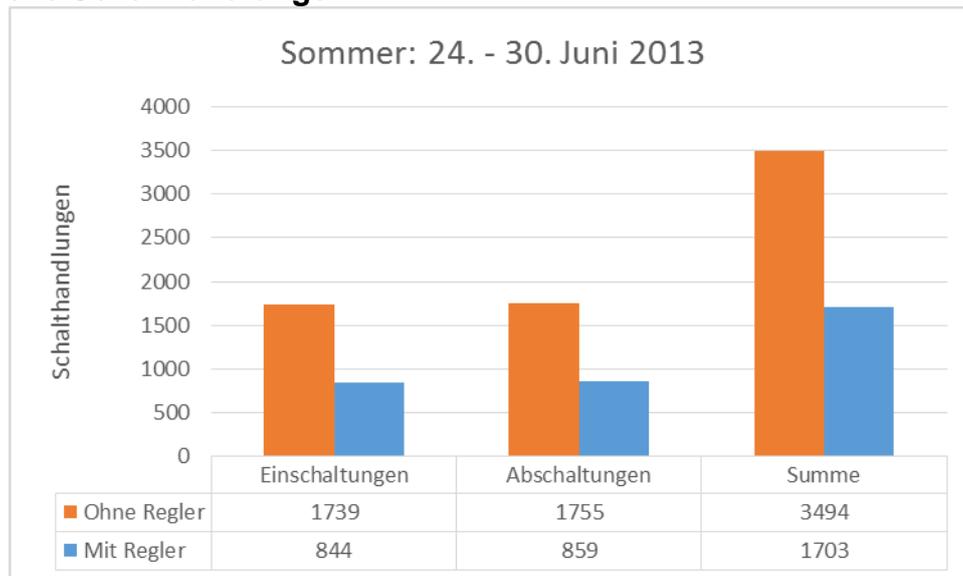


Abbildung 7-25: Vergleich der Schalthandlungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 24.-30. Juni 2013

Die Anzahl der zusätzlichen Schalthandlungen konnte um ca. die Hälfte reduziert werden.

7.2.4 Herbst
Einhaltung des Fahrplans

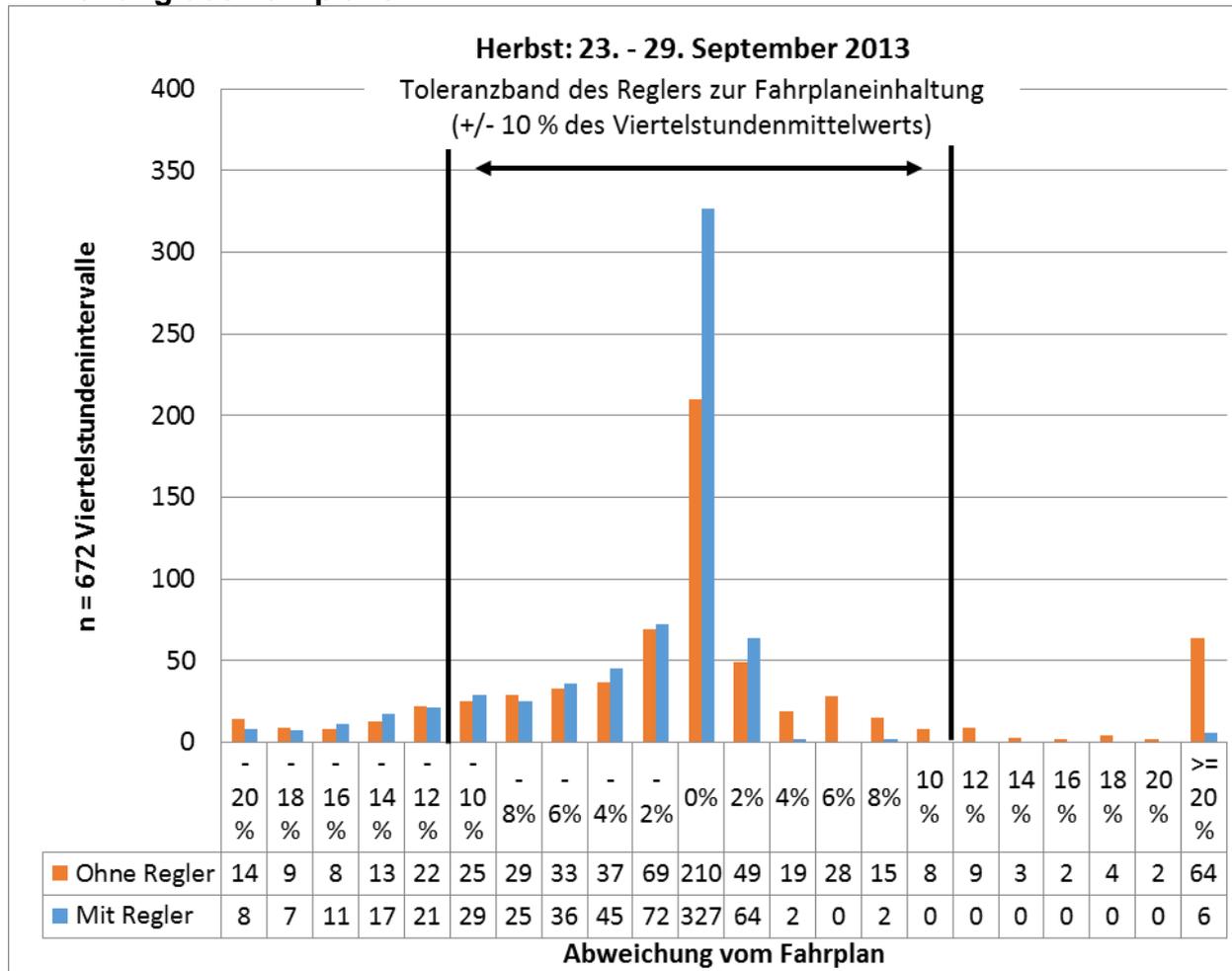


Abbildung 7-26: Histogramm der Fahrplanabweichungen bei 40 Liegenschaften, 23.-29. September 2013

In der Herbstwoche konnte besonders Schaltpotential $\geq 20\%$ reduziert werden. Dagegen schrumpften die negativen Abweichungen nur wenig.

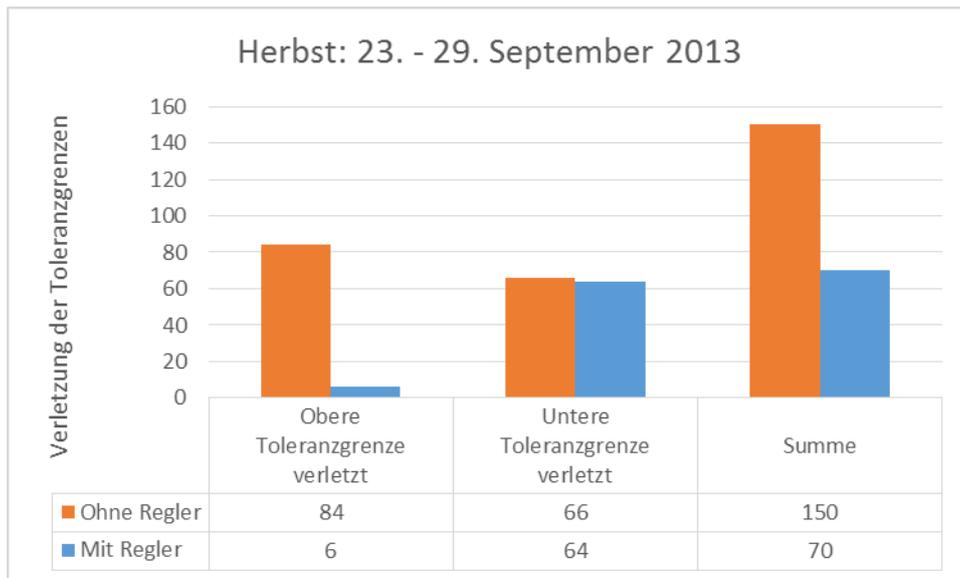


Abbildung 7-27: Vergleich der Toleranzgrenzverletzungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 23.-29. September 2013

Diese Erkenntnis aus dem Histogramm deckt sich mit der Anzahl der Toleranzgrenzverletzungen. Besonders die Verletzung der oberen Toleranzgrenze konnte reduziert werden. Dagegen war es dem Regler kaum möglich, eine Verletzung der unteren Toleranzgrenze zu verhindern.

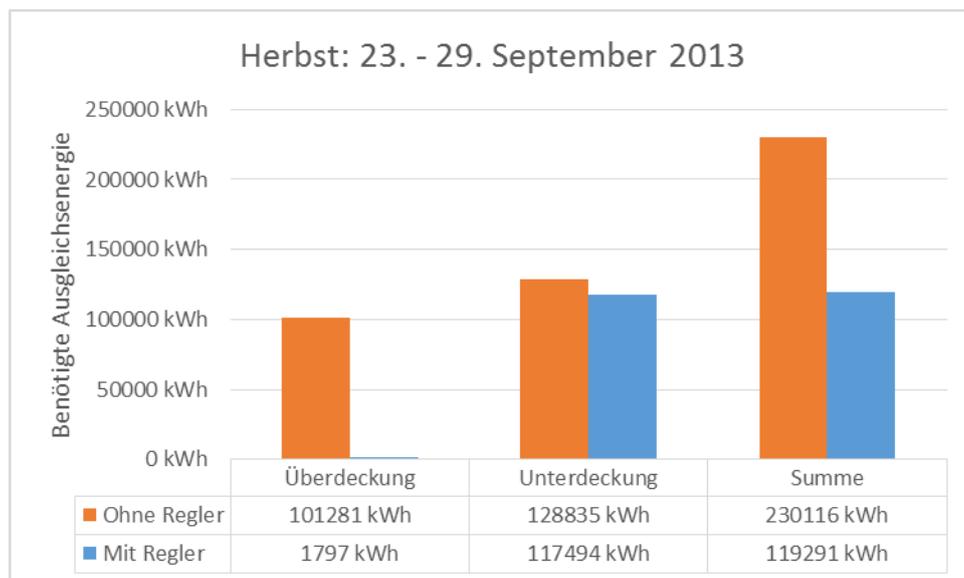


Abbildung 7-28: Vergleich der benötigten Ausgleichsenergie bei VK aus 40 Liegenschaften, 23.-29. September 2013¹⁵

Somit schrumpfte besonders die Ausgleichsenergie um die Überdeckung zu kompensieren.

¹⁵ Hinweis: Die benötigte Ausgleichsenergie wird im Diagramm als Betrag dargestellt. Für eine Überdeckung muss negative Ausgleichsenergie beschafft werden

Zusätzliche Schalthandlungen

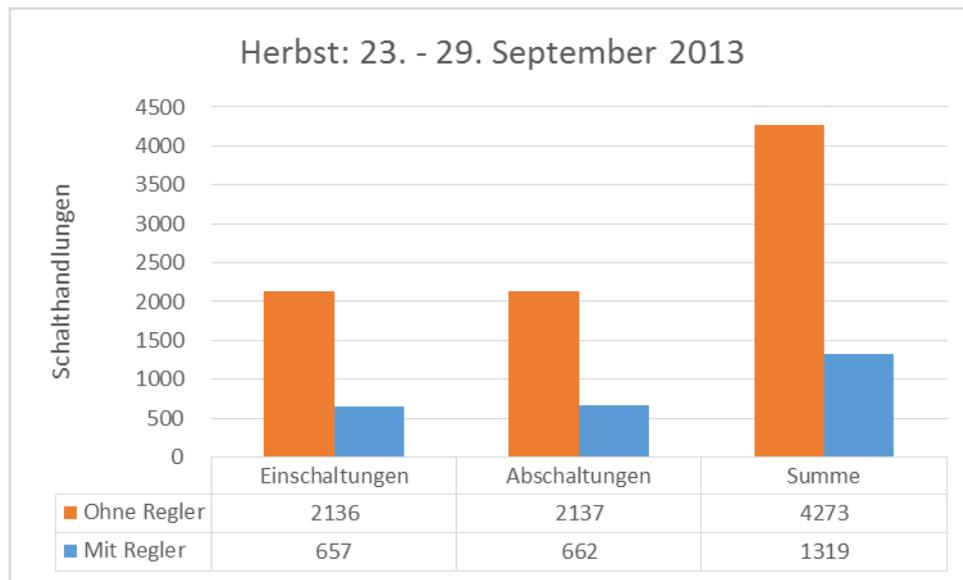


Abbildung 7-29: Vergleich der Schalthandlungen bei VK aus 40 Liegenschaften, 23.-29. September 2013

In der Herbstwoche konnte allerdings sowohl die Zahl der zusätzlichen Ein- als auch die der zusätzlichen Abschaltvorgänge reduziert werden.

7.2.5 Zusammenfassung

Durch den Einsatz des Reglers konnten die Anzahl der Viertelstundenintervalle, in denen eine Grenzverletzung auftrat, die benötigte Summe an Ausgleichsenergie und Summe der Schalthandlungen um ungefähr die Hälfte reduziert werden.

Der verbleibende Anteil der dieser Werte ist in Abbildung 7-30 dargestellt.

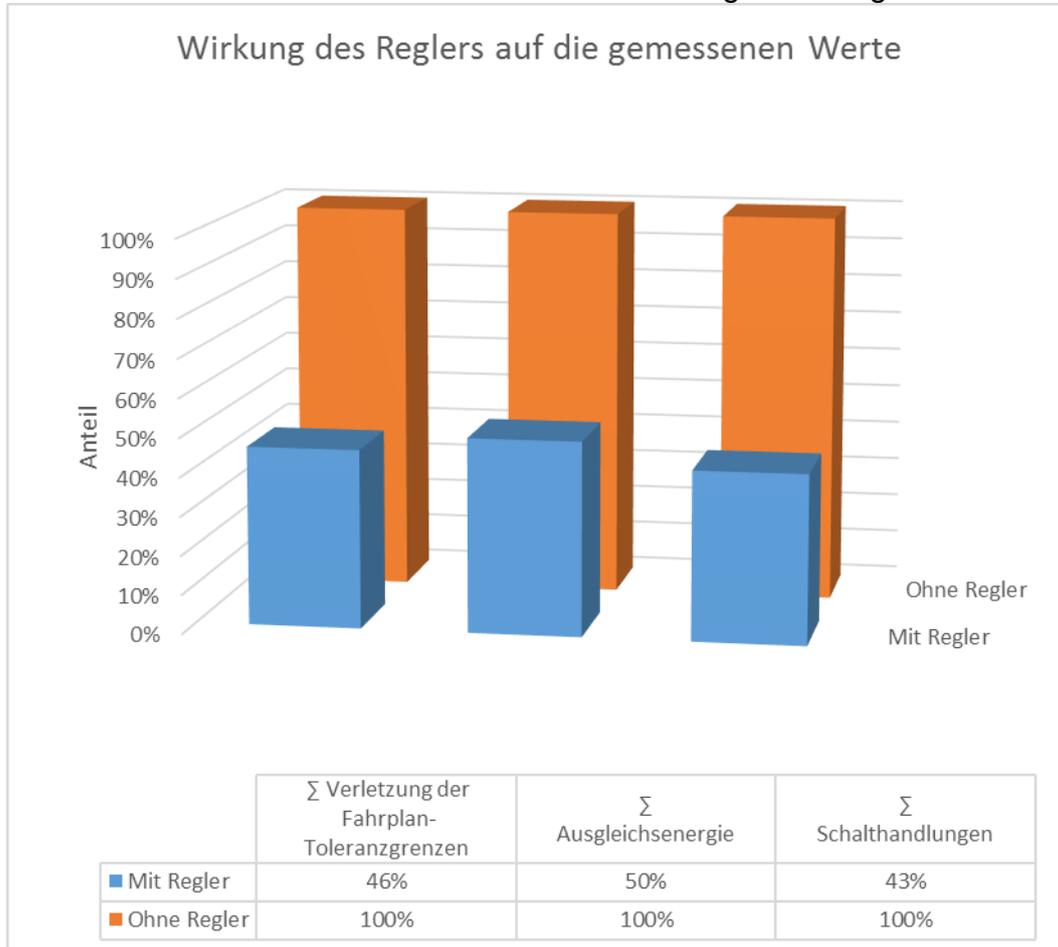


Abbildung 7-30: Verbesserung der gemessenen Werte durch Einsatz des Reglers

Der 100 %-Wert in der Zeile „Ohne Regler“ bezieht sich auf die Gesamtgröße der jeweiligen Kategorie.

| | Ohne Regler | Mit Regler |
|---|-------------|--------------|
| Σ Verletzung der Fahrplan-Toleranzgrenzen | 410 | 188 |
| Σ Ausgleichsenergie | 657122 kWh | 326966,9 kWh |
| Σ Schalthandlungen | 14437 | 6266 |

Tabelle 7-3: Gesamtergebniss von UC 2¹⁶

Die Summe der Ausgleichsenergie ist die Summe der Beträge der benötigten Ausgleichsenergie um den Fahrplan einzuhalten.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass die Fahrplantreue und Wirtschaftlichkeit durch den Einsatz des Reglers erheblich verbessert wird.

¹⁶ Werte sind die Summen der entsprechenden Kategorien aller überprüften Wochen (4 Wochen, eine aus jeder Jahreszeit)

7.3 Use-Case 3: Steuerung der elektrischen Leistung

In diesem Kapitel soll gezeigt werden, dass ein VK nach einem externen Abrufsignal zusätzliche elektrische Leistung liefert oder drosselt.

Folgende Abrufsignale wurden dem VK übergeben:

| Abrufsignal | Startminute | Endminute | Zusätzliche Leistung |
|-------------|-------------|-----------|----------------------|
| 1 | 600 | 660 | 500 kW |
| 2 | 660 | 720 | -500 kW |

Tabelle 7-4: Abrufsignale für ein VK aus drei Liegenschaften

In Abbildung 7-31 ist zu sehen, wie die Leistung des VK ab Minute 600 ansteigt. Jedoch wird keine 500 kW zusätzlich erbracht, sondern im 15-Minuten-Mittel nur ca. 392,5 kW. Dies liegt daran, dass das Einschaltpotential ab Minute 600 ca. bei 390 kW liegt. Dagegen kann problemlos abgeschaltet werden. Im Abrufzeitraum besteht fast durchgehend ein Abschaltpotential von ca. 1700 kW. Daher wird das Abrufsignal 2 vollständig bedient und 500 kW abgeschaltet.

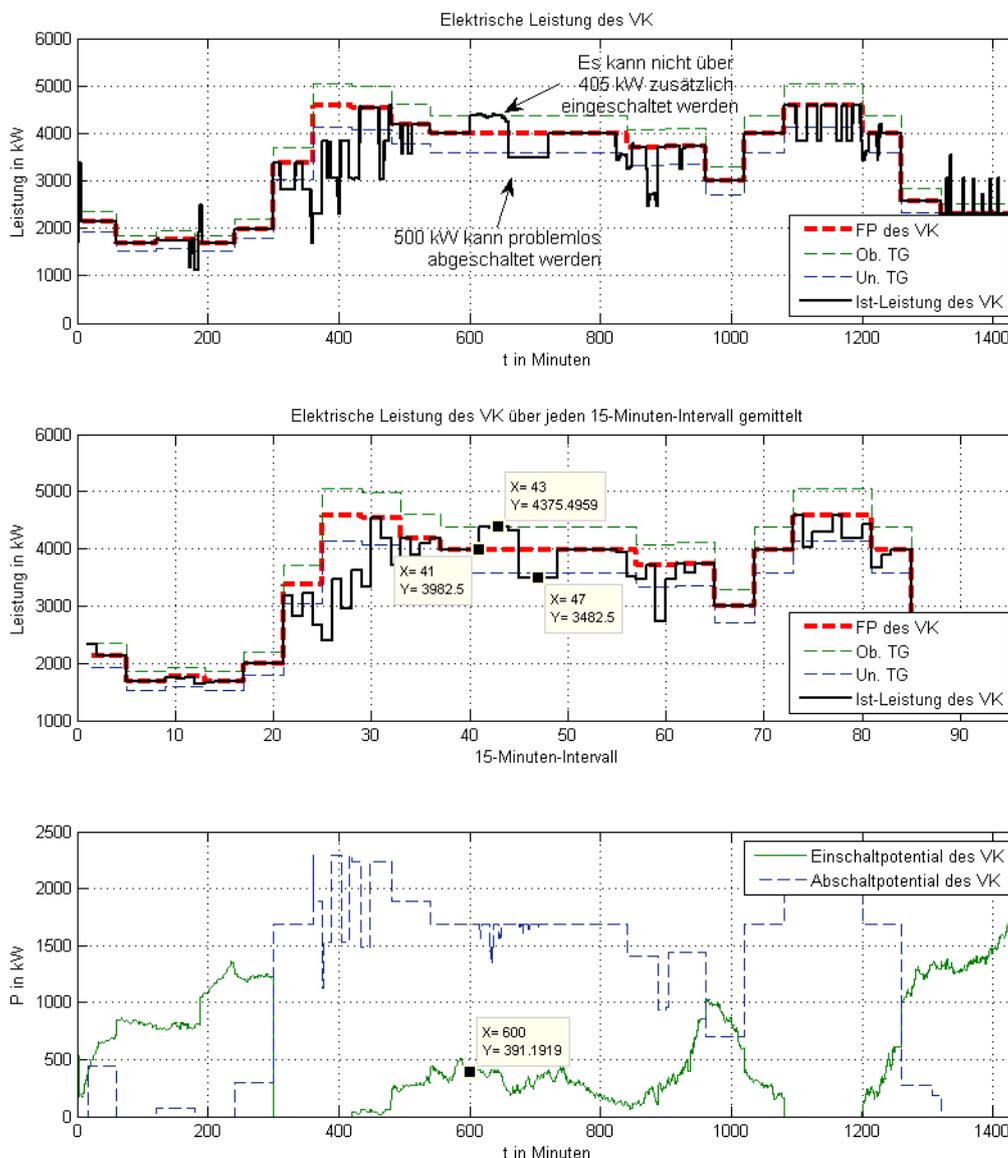


Abbildung 7-31: Abruf von Zusatzleistung

Für ein Erhöhung oder Drosselung der elektrischen Leistung des VK abseits des Fahrplans ist es daher notwendig, vorab das Schaltpotential zu analysieren.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Vor dem Hintergrund der Energiewende werden gut regelbare Kraftwerke benötigt, welche die volatile Stromeinspeisung durch Wind- und Photovoltaikanlagen ergänzen. BHKWs können besonders schnell auf die schwankende Erzeugung und Nachfrage reagieren und somit für ein stabiles Stromnetz sorgen¹⁷.

Daher sind BHKWs Gegenstand des Projektes SPH. In dessen Rahmen sollte untersucht werden, wie die Regelung für ein VK aus BHKWs realisiert werden kann, welches am Day-Ahead-Handel teilnimmt. Die Aufgabe der Regelung ist es, die BHKWs so anzusteuern, dass der initiale Fahrplan des gesamten VK eingehalten wird. Dazu ist eine regelmäßige Abfrage der Ist-Leistungen, Speicherfüllstände und weiterer Eigenschaften der Liegenschaften notwendig und mit den Sollwerten laut Fahrplan zu vergleichen. Denn durch die Kopplung der elektrischen mit der thermischen Energieerzeugung führt individuelles Verbrauchsverhalten der Bewohner zu Fahrplanabweichungen, die regelmäßig ausgeregelt werden müssen.

Im Folgenden wird der Beitrag dieser Bachelorthesis zu dieser Problemstellung zusammengefasst. Anschließend werden mögliche Verbesserungen der Regelung vorgestellt. Darüber hinaus wird aufgezeigt, wie die Anforderung nach Fahrplantreue auch durch andere, mathematische Ansätze erfüllt werden könnte.

8.1 Zusammenfassung

In dieser Bachelor-Arbeit wurde ein Regler entwickelt und in Java implementiert, der fähig ist in einer verteilten Java-Umgebung ein virtuelles Kraftwerk aus BHKWs zu regeln. Dieses VK soll am Day-Ahead-Handel teilnehmen können. Daher muss das VK mit Hilfe der Regelung in der Lage sein, einen abgegebenen Fahrplan einzuhalten.

Dabei galt es folgende Fragen zu beantworten:

1. Wie kann ein Regelungsalgorithmus aussehen, der die Fahrplaneinhaltung gewährleistet und gleichzeitig die nicht prognostizierte Ist-Wärmelast der Liegenschaften deckt?
2. Wie erfüllt dieser Regelungsalgorithmus die betriebswirtschaftliche Anforderung, Schalthandlungen zu minimieren?

Für die Erarbeitung der Regelung wurden die energiewirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen aufgezeigt. So wurden Anforderungen an eine Vermarktung am Day-Ahead-Handel dargelegt und die Möglichkeit mittels Intraday-Handel den eigenen Bilanzkreis auszugleichen erläutert. Des Weiteren wurden die gängigen Betriebsarten von BHKWs vorgestellt und welche Betreiber bereits BHKWs in VK integrieren.

Die Antwort der ersten Frage ergibt sich aus der Hauptforderung, einen abgegebenen Fahrplan durch interne Redispatch-Maßnahmen einzuhalten. Aufgrund der Liegenschaften, welche komplexe Regelstrecken darstellen, muss dieser Algorithmus eine große Anzahl an Nebenbedingungen berücksichtigen.

Anschließend wurde in der Technischen Analyse das regelungstechnische Verhalten des BHKW- und Schichtenspeicher-Modells untersucht.

Auf Basis dieser Untersuchung und der aufgenommenen Anforderungen in Kapitel 3 wurde der Regler als Kaskadenregelung in Java implementiert. Da sowohl die

¹⁷ Siehe dazu die Einleitung in Kapitel 1 und die Grundlagen in Kapitel 2

Wärmedeckung als auch der Fahrplan zu regeln sind, wurde die Regelung als Kaskadenregelung ausgeführt. Diese besteht aus einem Hauptregler, dem sog. Dispatcher und aus einem Hilfsregler, dem Agenten für jede Liegenschaft. Während die Agenten im inneren Regelkreis die Wärmeversorgung der Liegenschaften regeln, verteilt der Dispatcher auf der äußeren Regelschleife die elektrische Leistung des virtuellen Kraftwerkes auf die einzelnen Liegenschaften. Dabei moduliert der Dispatcher die Soll-Leistung der BHKWs in den Liegenschaften um Fahrplanabweichungen zu kompensieren.

Für die Auswahl der Liegenschaften, die Regelvorgänge ausführen wurde ein Algorithmus entwickelt. Um zusätzliche elektrische Leistung zu erzeugen werden vorrangig die Liegenschaften ausgewählt, deren Speicherfüllstände möglichst weit unterhalb des Sollfüllstände sind. Für eine Drosselung der elektrischen Leistung werden Liegenschaften ausgewählt, deren Speicherfüllstände zu hoch sind. Damit wird sichergestellt, dass sich Regelvorgänge nicht aufschwingen. Beispielsweise könnten bei einer ungünstigen Wahl der Liegenschaft zur Kompensation einer Fahrplanunterdeckung ein voller Speicher über die Speichergrenzen hinaus beladen werden. Dies würde die Harte Regelung provozieren und die BHKWs in dieser Liegenschaft für 15 Minuten abschalten. Somit würde sich eventuell eine größere Unterdeckung einstellen als vor dem Regelvorgang.

Die Antwort auf die zweite Frage, wie Schalthandlungen minimiert werden können, eröffnet gleichzeitig ein Weiteres Optimierungspotential, welches in Kapitel 8.2 behandelt wird. Der implementierte Regler führt bei Regelvorgängen keine Schalthandlungen durch. Es wird nur die Leistung der BHKWs im Teillastbereich moduliert.

Der Regler wurde außerdem wie in Kapitel 3 gefordert, modular aufgebaut und kann daher einfach erweitert werden. Dadurch lassen sich auch einzelne Komponenten austauschen, was die Implementierung weiterer und vielleicht auch besserer Algorithmen zulässt.

Im Anschluss an die Implementierung wurde in Kapitel 6.4 die Regelung mit mehreren Test-Cases validiert. Zuerst wurde aufgezeigt, dass das Simulinkmodell der Liegenschaft sich genauso verhält wie die erstellte DLL, die von der Regelung geregelt wird. Anschließend wurde der Agent und der Dispatcher überprüft. Der Agent sollte einen Führungssprung des Füllstandes nachfahren sowie eine Störung durch nicht prognostizierte Last ausgleichen. Anschließend wurden die wichtigsten Funktionalitäten des Dispatchers geprüft. So wurde die Schaltpotentialanalyse erfolgreich validiert und das Stellglied des Dispatchers hat die interne Regelleistung korrekt berechnet sowie nach dem entwickelten Auswahlalgorithmus auf die Liegenschaften verteilt. Ebenfalls wurde die Einschaltung und Abschaltung von Zusatzleistung erfolgreich getestet. Der entwickelte Ist-Last-Generator wurde ebenfalls untersucht. Die erzeugte Ist-Last entspricht dabei der Vorgabe, eine realistische Charakteristik aufzuweisen und die Kaskadenregelung auszulösen. In einer finalen Validation konnte auch für einen kurzen Zeitraum und einem VK mit lediglich 3 Liegenschaften festgestellt werden, dass die Regelung im Vergleich zum unregelmäßigen Betrieb die Schalthandlungen und Fahrplanabweichungen des VK grundsätzlich verringert und sich Regelvorgänge nicht aufschwingen.

Zur Bewertung des implementierten Reglers wurden Use-Cases umgesetzt und ausgewertet. Zum einen wurde das Schaltpotential für vier einwöchige Zeiträume, die die vier Jahreszeiten repräsentieren, mit dem Regler analysiert. Zum anderen wurden für die gleichen Zeiträume Fahrpläne abgefahren. Für beide Anwendungsfälle der Regelung wurde ein VK aus 40 Liegenschaften mit je 2 BHKWs aufgebaut.

Bei der Schaltpotentialanalyse wurde festgestellt, dass Ein- und Abschaltpotentiale über die Jahreszeiten stark variieren. Kritisch ist, dass für die Frühjahrswoche zu keinem Zeitpunkt ein mindestens mittelgroßes Einschaltpotential bestand, während im Sommer kaum abgeschaltet werden durfte. Dies könnte aus der Regelstrategie herrühren, dass lediglich der Teillastbereich der BHKWs für Regeleingriffe verwendet wird.

Trotzdem konnte der Regler über alle Testzeiträume seine Hauptaufgaben, die Fahrpläneinhaltung und Reduktion der Schalthandlungen im Vergleich zum unregulierten Betrieb verbessern:

- die Anzahl der Viertelstundenintervalle, in denen ohne Regelung eine Toleranzgrenze des Fahrplans verletzt wurde konnte um 54 %
- Der Bedarf an Ausgleichsenergie¹⁸ konnte um 50 %
- Die Anzahl an zusätzlichen Schalthandlungen um 57 %

reduziert werden.

Somit konnte die implementierte Regelung die Lücke füllen, die im Gesamtsystem nach Abbildung 4-1 zu schließen war. Ein virtuelles Kraftwerk aus Blockzeitkraftwerken könnte in der Realität nun durch die im Rahmen dieser Bachelorthesis implementierte Regelung wesentlich fahrplantreuer am Day-Ahead-Handel teilnehmen und die Betriebskosten senken.

8.2 Verbesserung des bestehenden Regelungsalgorithmus

Die implementierte Regelung kann aufgrund der modularen Bauweise unkompliziert verbessert werden.

So können Teile der Regelung bei Beibehaltung der Schnittstellen komplett gegen andere ausgetauscht werden. So könnte der Agent nach Kapitel 5.5 alternativ implementiert werden. Innerhalb des Dispatchers können die Algorithmen für die Berechnung der Internen Regelleistung und der Verteilung von Regelleistung nach Kapitel 5.7 geändert werden kann, was möglicherweise vorteilhaft mit sich bringen würde.

Eine tatsächliche Verbesserung der Regelungsergebnisse wird erwartet, wenn BHKWs durch Regelung ein- oder ausgeschaltet werden. Bislang moduliert die Regelung BHKWs nur im Teillastbereich um Schalthandlungen zu minimieren. Eine Voraussetzung, die es erlauben würde, wäre eine Schalthandlung nach Fahrplan im nächsten 15-Minuten-Intervall. Dann ergäbe sich auch keine zusätzliche Schalthandlung, da dieses BHKW ohnehin eingeschaltet werden würde. Dadurch kann dieses auch früher ein- oder abgeschaltet werden, da die Mindestlauf- oder

¹⁸ hier definiert als zu beschaffende Energie um Fahrplan einzuhalten. Für eine Überdeckung wird negative Ausgleichsenergie benötigt, wird aber in Diagrammen als Betrag angegeben. Für die Gesamtmenge an Ausgleichsenergie werden die Beträge von positiver und negativer Ausgleichsenergie summiert.

Mindestausschaltzeit mit dem verfrühten Einschalt- oder Abschaltvorgang beginnt. Dies ist in Abbildung 8-1 dargestellt. In dieser sind die 15-Minuten-Intervalle als Leistungsblöcke dargestellt. Weiß ausgefüllte Blöcke sind Intervalle, in denen nach Fahrplan die Leistung des BHKW aus ist, blau ausgefüllte Blöcke bedeuten, dass das BHKW nach Fahrplan eingeschaltet ist.

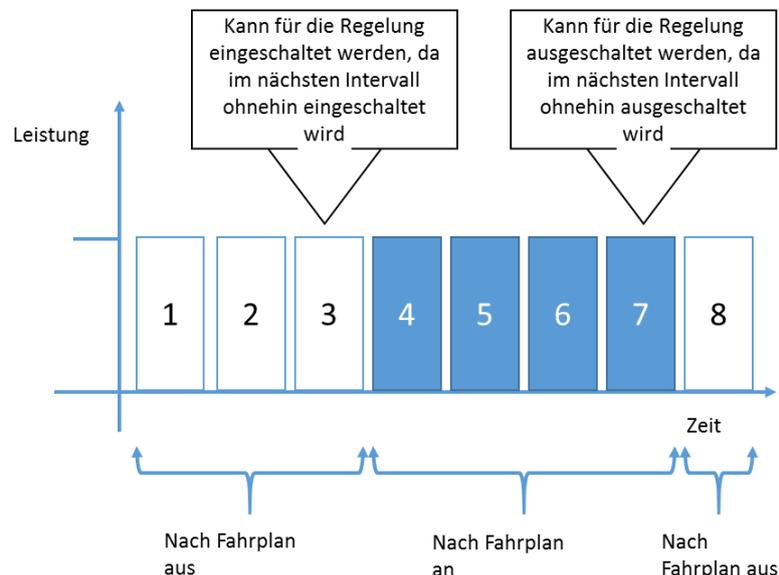


Abbildung 8-1: BHKW ein- oder ausschalten ohne zusätzliche Schalthandlung

Im Beispiel kann Leistungsblock 3 durch die Regelung eingeschaltet werden, ohne dass dabei eine zusätzliche Schalthandlung gezählt wird. Ebenso kann Block 7 ausgeschaltet werden, da Block 8 ohnehin aus ist. Somit ergäbe sich für die Regelung ein zusätzliches betriebskostenneutrales Schaltpotential.

8.3 Einsatz des Optimierers für eine rollierende Resttagsplanung

Grundsätzlich kann in einer weiterführenden Arbeit der Fahrplanoptimierer für interne Redispatch-Maßnahmen erweitert werden. Da dem Optimierer die wesentlichen Randbedingungen bekannt sind, reicht es aus, den bereits abgegebenen Fahrplan sowie die aktuellen Daten aus den Liegenschaften als weitere Randbedingungen und Informationen für den Optimierer einzurichten. Somit wird die optimale Fahrweise für einen fahrplantreuen Betrieb als lineares Optimierungsproblem durch den CPLEX-Solver¹⁹ gelöst. Da der CPLEX-Solver mittels GGLP²⁰-Verfahren den Fahrplan erstellt, könnte bei steigender Anzahl an Erzeugungsanlagen die Rechenzeit zu groß werden. Insbesondere wenn die Anlagen ähnlich sind, kann ein „flachen Lösungsbaum“ zu längeren Berechnungszeiten führen (50 S. 54).

Daher ist es notwendig, die Rechenzeit des Optimierers näher zu untersuchen. Insbesondere, da das aktuelle VK aus gleichen²¹ Liegenschaften besteht.

¹⁹ Der CPLEX-Solver wird vom Optimierer verwendet

²⁰ Gemischt Ganzzahlige Lineare Programmierung

²¹ Das VK welches in dieser Bachelorthesis Gegenstand ist, besteht aus Liegenschaften des gleichen Typs. Die Parameter der Liegenschaften sind in der Konfigurationstabelle im Anhang zu finden in Kapitel 9.1

In Kapitel 2.8 wurde bereits auf die Dissertation von Tröschel und Steck eingegangen, die auf mathematischer Ebene Lösungsansätze VKs behandeln. Insbesondere die Dissertation von Steck sollte bei der Implementation des Optimierers für Interne Redispatch-Maßnahmen beachtet werden, da in dieser auf die kritische Rechenzeit von GGLP-Verfahren eingegangen und schnellere Algorithmen vorgestellt werden.



Abbildung 8-2: Rollierende Resttagsplanung, Quelle: (20 S. 95)

Somit wird regelmäßig gemäß Abbildung 8-2 ein neuer optimierter Fahrplan auf Basis des aktuellen Systemzustandes erzeugt. Dieser wird angewendet und die Prognoselast mit der Ist-Last verglichen. Das Ergebnis dieses Vergleiches führt zu einer Korrektur der Randbedingungen für den Optimierer, der erneut einen Fahrplan erzeugt. Dieser Vorgang wird nach Steck „Rollierende Resttagsplanung“ genannt.

8.4 Bewertung der Verbesserungsansätze

Die Frage, welcher Ansatz nach Kapitel 8.2 und 8.3 weiterverfolgt werden sollte, hängt von zwei Größen ab. Zum einen vom Implementierungsaufwand und zum anderen vom erwarteten Zugewinn an Fahrplantreue und Wirtschaftlichkeit.

Der Aufwand den Regler nach Kapitel 8.2 zu modifizieren, dürfte geringer sein als weitere Randbedingungen mathematisch zu formulieren und dem Optimierer zuzuführen. Außerdem konnte der in dieser Arbeit implementierte Regler bereits gute Ergebnisse liefern. Allerdings hat die Literaturrecherche gezeigt, dass mathematische Ansätze verstärkt Gegenstand aktueller Forschung sind.

Um belastbare Aussagen über die geeignetere Lösung treffen zu können, sollte der Optimierer für eine rollierende Resttagsplanung implementiert werden. Im Anschluss kann dann die Fahrplantreue und Wirtschaftlichkeit des in dieser Arbeit entstandenen Reglers mit der des Optimierers verglichen werden.

9 Anhang

9.1 Konfigurationstabelle

| Nutzungsart | | § | | |
|---|-----------------|-------|------------|------------|
| Nutzungsart [-] | Nutzungsart | 1 | 1 | |
| Waermebedarf [kWh/a] | Waermebedarf | kWh/a | 10000000 | |
| Strombedarf [kWh/a] | Strombedarf | kWh/a | 2222222 | |
| BHKW | | § | | |
| elektrische maximal BHKW-Leistung [kW] | Pel_max_BHKW | kW | 405 | 1125 |
| elektrische minimale BHKW-Leistung [kW] | Pel_min_BHKW | kW | 202,5 | 562,5 |
| thermische maximal BHKW-Leistung [kW] | Pth_max_BHKW | kW | 538 | 1272 |
| maximale Brennstoffleistung [kW] | Pbr_max_BHKW | kW | 1045 | 2743 |
| elektrischen Wirkungsgrad [-] | eta_el | - | 0,388 | 0,41 |
| thermischen Wirkungsgrad [-] | eta_th | - | 0,515 | 0,464 |
| Gesamtwirkungsgrad [-] | eta_ges_BHKW | - | 0,902 | 0,874 |
| Stromkennzahl [-] | sigma | - | 0,7527881 | 0,88443396 |
| minimale Laufzeit [h] | mrt_BHKW | h | 0,25 | 0,25 |
| Minimale Ausschaltzeit [h] | mst_BHKW | h | 0,25 | 0,25 |
| maximale Rampe nach oben [kW] | ramp_up | kW | 405 | 1125 |
| maximale Rampe nach unten [kW] | ramp_down | kW | 405 | 1125 |
| Abkühlkonstante [h] | t_cool | h | 1 | 1 |
| Kaltstartkosten [€] | cost_st_cold | € | 0 | 0 |
| Warmstartkosten [€] | cost_st_warm | € | 0 | 0 |
| Abgastemperatur vor WT [°C] | T_abg | °C | 405 | 485 |
| Abgastemperatur nach WT [°C] | T_abgWT | °C | 120 | 120 |
| Abgasvolumenstrom [m³/h] | Vpinkt_abg | m³/h | 4105 | 7730 |
| RL-Temperatur BHKW-Speicherkreislauf [°C] | T_RL_BHKW | °C | 60 | 60 |
| VL-Temperatur BHKW-Speicherkreislauf [°C] | T_VL_BHKW | °C | 85 | 85 |
| Brennstoff [-] (1=Gas, 2=Biogas) | Brennstoff_BHKW | - | 2 | 2 |
| SLK | | § | | |
| thermische maximal SLKLeistung [kW] | Pth_max_SLK | kW | 2500 | |
| thermische minimal SLK-Leistung [kW] | Pth_min_SLK | kW | 250 | |
| maximale Brennstoffleistung [kW] | Pbr_max_SLK | kW | 2840,90909 | |
| Gesamtwirkungsgrad [-] | eta_ges_SLK | - | 0,88 | |
| minimale Laufzeit [h] | mrt_SLK | h | 0,25 | |
| Minimale Ausschaltzeit [h] | mst_SLK | h | 0,25 | |
| RL-Temperatur SLK-Speicherkreislauf [°C] | T_RL_SLK | °C | 50 | |
| VL-Temperatur SLK-Speicherkreislauf [°C] | T_VL_SLK | °C | 70 | |
| Brennstoff [-] (1=Gas, 2=Biogas) | Brennstoff_SLK | - | 1 | |
| WWSpeicher | | § | | |
| Speichervolumen [m3] | v_sp | m3 | 20 | |
| Querschnitt [m2] | Aq_sp | m2 | 9,24 | |
| Anzahl der Schichten [-] | n_sp | - | 15 | |
| Speicherverluste | qv_sp | kW | 0 | |
| Maximale Speichertemperatur [K] | T_max_sp | K | 362,15 | |
| Spreizung zwischen VL/RL | Spreizung | K | 39 | |
| zulässige Speichertemperaturdifferenz [K] | delta_T | K | 39 | |
| zulässige Speicherkapazität | q_sp | kWh | 0,90566667 | |
| Starttemperatur oben [°C] | T_o_sp | °C | 85 | |
| Starttemperatur mitte [°C] | T_m_sp | °C | 80 | |
| Starttemperatur unten [°C] | T_u_sp | °C | 75 | |

Tabelle 9-1: ConfigFileLiegenschaft einer Liegenschaft mit zwei BHKWs

9.2 Inhalt der des digitalen Datenträgers

Auf einem digitalen Datenträger sind neben dieser Thesis als PDF sowie Quellcode enthalten.

| Datei | Beschreibung |
|-------------------------------------|---|
| Bachelorthesis als PDF | Diese Thesis als PDF |
| Java-Quellcode der Regelung | Alle Bestandteile der Regelung, die in Java implementiert wurden |
| MATLAB-Quellcode für die Simulation | Alle Skripte und Funktionen, die für die Simulation und für den Ist-Last-Generator implementiert wurden |

Tabelle 9-2: Inhalt des digitalen Datenträgers

Der digitale Datenträger ist bei Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Renz einsehbar.

10 Literaturverzeichnis

1. DESTATIS. *DESTATIS*. [Online] 2015. [Zitat vom: 30. Januar 2015.] <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Erzeugung/Tabellen/Bruttostromerzeugung.html>.
2. Bundeskartellamt. *Sektoruntersuchung Stromerzeugung und -großhandel*. 2011. Abschlussbericht.
3. EnEff:Stadt. *EnEff:Stadt*. [Online] 20. Januar 2013-2015. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] <http://www.eneff-stadt.info/de/waerme-und-kaeltenetze/projekt/details/intelligente-vernetzung-von-stadtinfrastrukturen-smart-power-hamburg/>.
4. Dr. Paschotta, Rüdiger. RP-Energie-Lexikon. *RP-Energie-Lexikon*. [Online] 2015. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] <https://www.energielexikon.info/einspeisemanagement.html>.
5. SMART POWER HAMBURG. [Online] 2013-2015. [Zitat vom: 15. Januar 2015.] <http://www.smartpowerhamburg.de/index.php/bhkwh-verbund-13.html>.
6. Strom und Wärme. *Strom und Wärme*. [Online] 28. April 2014. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] http://www.bhkws.de/waermespeicher_pufferspeicher.htm.
7. Deutsche Umwelthilfe. *Deutsche Umwelthilfe*. [Online] 02. Februar 2012. [Zitat vom: 20. Februar 2015.] <http://www.duh.de/2357+M5707585f503.html>.
8. Bundesnetzagentur. *Bundesnetzagentur*. [Online] 1. Februar 2013. [Zitat vom: 15. Januar 2015.] http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Stromnetze/Engpassmanagement/Redispatch/redispatch-node.html.
9. Dr. Paschotta, Rüdiger. Energie-Lexikon. *Energie-Lexikon*. [Online] 2011-2015. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] <https://www.energielexikon.info/warmwasserspeicher.html>.
10. Gaidosch, Lars. *Zyklen bei Kraftwerksinvestitionen in liberalisierten Märkten - Ein Modell des deutschen Stromerzeugungsmarktes*. 2008. Dissertation.
11. Wikipedia. *Wikipedia*. [Online] 20. Januar 2015. [http://de.wikipedia.org/wiki/Regelleistung_\(Stromnetz\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Regelleistung_(Stromnetz)).
12. Konstantin, Panos. *Praxisbuch Energiewirtschaft - Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt*. s.l. : Springer Vieweg, 2012.
13. BMWI, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. *Verordnung über den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen (Stromnetzzugangsverordnung - StromNZV)*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 2005.
14. Im Zentrum des europäischen Energiehandels. *EEX*. [Online] 2014. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] <http://www.eex.com/blob/68252/6b8bc5d9bf880fdf24579696335946fe/d-eex-unternehmen-februar-2014-pdf-data.pdf>.
15. Univ.-Prof. Dr.-Ing Verstege, Johannes. *Vortrag: "Regelenergie"*. Bergische Universität Wuppertal. 2003. Vortrag.
16. Leuschner, Udo. Udo Leuschner. *Udo Leuschner*. [Online] 2015. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] <http://www.udo-leuschner.de/basiswissen/SB124-04.htm>.
17. Sonnenenergie. *Sonnenenergie*. [Online] 2010. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] <http://www.sonnenenergie.de/sonnenenergie-redaktion/digital/SE-2014-05/a-14.html>.
18. Bundesnetzagentur. *Bundesnetzagentur*. [Online] 2015. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] http://www.bundesnetzagentur.de/cIn_1931/DE/Service-

Funktionen/Beschlusskammern/1BK-Geschäftszeichen-Datenbank/BK6-GZ/2013/BK6-13-104/BK6-13-104Positionspapier.html.

19. Bundesnetzagentur. *Positionspapier zur Wahrnehmung der Pflichten nach § 4 Abs. 2 StromNZV und Ziffer 5.2. des Standardbilanzkreisvertrages durch die Bilanzkreisverantwortlichen*. 2015. Positionspapier.
20. Steck, Michael Horst Emil. *Entwicklung und Bewertung von Algorithmen zur Einsatzplanerstellung virtueller Kraftwerke*. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München. München : s.n., 2013. Dissertation.
21. Sudeikat, Jan. *FAHRPLANREGELUNG - Material für die Konzepterstellung*. [Powerpoint-Präsentation] 05. Mai 2014.
22. Dr. Paschotta, Rüdiger. *Energie-Lexikon*. [Online] 2015. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] Schichtladespeicher. <https://www.energielexikon.info/schichtladespeicher.html>.
23. Buderus. Buderus. *Buderus*. [Online] 2015. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] http://www.buderus.de/Produkte/Heizen_mit_Gas/Logano_plus_SB745-4123200.html?mid=2231634&table=techdata&mid=2231634&type=#infotab.
24. Lichtblick. *Lichtblick*. [Online] 2014-2015. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] <http://www.lichtblick.de/geschaeftskunden/schwarm-energie/schwarmdirigent/>.
25. Next-Kraftwerke. *Next-Kraftwerke*. [Online] 2015. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/strommarkt/dispatch-redispatch>.
26. Tröschel, Martin. *Aktive Einsatzplanung in holonischen virtuellen Kraftwerken*. Fakultät II - Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften, Dpeartment für Informatik, Universität Oldenburg. 2010.
27. cces. cces. [Online] 2001-2007. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] <http://www.cces.de/index.php?id=248&type=123>.
28. Wikipedia. *Wikipedia*. [Online] 15. Januar 2015. [Zitat vom: 15. Januar 2015.] http://de.wikipedia.org/wiki/Extensible_Markup_Language.
29. Wikipedia. *Wikipedia*. [Online] 15. Januar 2015. [Zitat vom: 2015. Januar 2015.] http://de.wikipedia.org/wiki/Dynamic_Link_Library.
30. *Wirtschaftslexikon24*. [Online] 20. Februar 2013. <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/deckungsbeitrag/deckungsbeitrag.htm>.
31. Raths, Dipl.-Wirt.-Ing. Stephan. *Handbuch: KWK Einsatzoptimierung*. 11. April 2013.
32. Wikipedia. [Online] 15. Januar 2015. <http://de.wikipedia.org/wiki/CPLEX>.
33. Wooldrige, Michael. *An introduction to multiagent systems*. s.l. : Wiley, 2004.
34. Dethlefs, Tim. *Ein verbraucherorientiertes Energiesystem für Smart Grids - Entwicklung eines Multi-Agenten-Systems zur dezentralen Optimierung*. 22. Mai 2014.
35. Borsutzky, Harald. *Planend vorgehende Agenten Verteiltes Planen und Lösen von Problemen*. 15. Januar 2015.
36. SMART POWER HAMBURG. *SMART POWER HAMBURG*. [Online] 2013-2015. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] <http://www.smartpowerhamburg.de/index.php/modellbildung-und-simulation.html>.
37. Farrenkopf, Sebastian. *Anbindung von Echtzeitsimulationsmodellen auf empedded Systems an die Leitwarte eines virtuellen Kraftwerks durch ein Kommunikationsgateway von Modbus/TCP zu IEC61850*. Department Informations- und Elektrotechnik, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Hamburg : s.n., 2014. S. 14, Bachelorthesis.

38. Wendt, Lutz. *Taschenbuch der Regelungstechnik mit MATLAB und Simulink*. s.l. : Europa-Verlag, 2014. Bd. 9.
39. Heizungsfinder. *Heizungsfinder*. [Online] 2015. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] <http://www.heizungsfinder.de/solarthermie/auslegung/waermespeicher>.
40. Wikipedia. *Wikipedia*. [Online] 2015. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] http://de.wikipedia.org/wiki/Eigenschaften_des_Wassers.
41. Leifiphysik. *Leifiphysik*. [Online] 2015. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/masse-volumen-und-dichte>.
42. Hochschule Bochum. *Hochschule Bochum*. [Online] 2015. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] <http://www.hochschule-bochum.de/fileadmin/media/izk/Mensch%20und%20Technik%2003Berechnungen%20und%20Beispiele.pdf>.
43. Zacher, Reuter. *Regelungstechnik für Ingenieure*. s.l. : VIEWG+Teuber, 2011.
44. Ye, T. Modeling of Load Management Systems for Building using MATLAB/SIMULINK, Masterarbeit. s.l.: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2008.
45. Bohlender, Gerd. *Einstieg in die Informatik mit Java - Zahldarstellung und Rundungsfehler*. 2015. Powerpoint-Präsentation.
46. *Besonderheiten bei Diagrammen*. Hochschulrechenzentrum, Justus-Liebig-Universität. 2015.
47. Hellwig, Mark. Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile. [Hrsg.] Technische Universität München. [PDF]. München : s.n., 15. Januar 2015.
48. *Abwicklung von Standardlastprofilen Gas*. BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V., Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU), GEODE – Groupement Européen des entreprises et Organismes de Distribution d'Énergie, EWIV . 2013. Leitfaden.
49. *Wikipedia*. [Online] 2006-2015. [Zitat vom: 15. Januar 2015.] <http://de.wikipedia.org/wiki/Indifferenzprinzip>.
50. *Vermarktung virtueller Kraftwerke*. Steck, Michael. 2013.
51. Wikipedia. [Online] 15. Januar 2015. [Zitat vom: 15. Januar 2015.] <http://de.wikipedia.org/wiki/Standardlastprofil>.
52. Wikipedia. [Online] 15. Januar 2015. [Zitat vom: 15. Januar 2015.] http://de.wikipedia.org/wiki/Stetige_Gleichverteilung.
53. Haubrich, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen. *Gutachten zur Höhe des Regelenergiebedarfs*. Tulpenfeld : s.n., 2008.
54. HS Mannheim. *HS Mannheim*. [Online] 2012. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] <http://www.hs-mannheim.de/presse/pressemitteilungen/pm-2012/2012-07-04.html>.
55. Kühl, Matthias. *Feldbasierte Simulation mobiler elektrischer Energiespeicher - Last- und Einspeisungspotential eines Batterieschwarms im Smart-Grid*. Hamburg : s.n., 2011. Bachelorthesis.
56. Oekosystem-Eerde. *Oekosystem-Eerde*. [Online] 2006-2014. [Zitat vom: 20. Januar 2015.] <http://www.oekosystem-erde.de/html/energieeinheiten.html>.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Bachelorarbeit

Hiermit versichere ich, Gerald Duckstein, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 02. Februar 2015

Gerald Duckstein