



Energiewirtschaftlich optimierende Batterieeinsatzplanung in geschlossenen Transportsystemen mit Batteriewechseln

Von der Fakultät für Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften
der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
zur Erlangung des Grades und Titels eines

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation

von Serge A. Runge
geboren am 04.05.1984 in Bremen

Gutachter:

Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jürgen Appelrath

Universität Oldenburg

Department für Informatik, Abteilung Informationssysteme

Weiterer Gutachter:

Prof. Dr. Lutz M. Kolbe

Universität Göttingen

Professur für Informationsmanagement

Tag der Disputation: 17.06.2016

DANKSAGUNG

Mein besonderer Dank geht an meinen Doktorvater Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jürgen Appelrath, der mich im Grunde sehr frei hat wirken lassen und mich beharrlich vorangetrieben hat.

Und wenn ich ihm in meiner Promotionszeit das eine oder andere mal beratungsresistent vorgekommen sein mag, dann konnte er sich doch sicher sein, dass ich meine Freiräume nutzen würde, um schließlich seinen Ratschlägen folgen zu können. Mich faszinieren sein Blick für den Menschen, sein unnachahmlicher Lenkergeist und sein innerer Ansporn. Ich danke nicht allein für die fachliche und methodische Unterstützung, sondern auch für die gute Einstellung zum Arbeits- und Lebensalltag, die ich von ihm mitnehmen konnte.

Weiter danke ich Prof. Dr. Lutz M. Kolbe dafür, dass er das zweite Gutachten übernommen hat und mich in meiner Promotionszeit stets sein großes Zutrauen spüren ließ. Ich danke ihm besonders dahingehend für seine Unterstützung, dass ich trotz starker Praxisbezogenheit bis ganz zuletzt das wissenschaftliche Vorgehen nicht habe zu kurz kommen lassen.

Ebenfalls danke ich Prof. Dr. Michael Sonnenschein und Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff für die entscheidenden Anregungen in Bezug auf heuristische Optimierungsverfahren im Allgemeinen und die für mein Problemlösungsverfahren benötigten Suchstrategien.

Außerdem danke ich allen, die zum Gelingen des BESIC-Projekts beigetragen haben, welches Grundlage meiner Arbeit gewesen ist: meinen Kollegen Nico Grundmeier, Claas Meyer-Barlag und Norman Ihle – dem Projektträger DLR und dem BMWi als Förderer in Person von Günter Seher, Peter Wüstnienhaus und Christian Liebich – den Vertretern der Industriepartner, speziell den Teams von Boris Wulff, Armin Wieschemann und Thomas Breitzkreuz.

Zu guter Letzt gelten mein Dank und meine Liebe meiner Ehefrau Claudia, die mich stets bestärkend für meine innere Ruhe und Motivation gesorgt hat.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Containertransport in maritimen Containerterminals wirft einen erheblichen Energiebedarf auf, der durch eine Umstellung von Transportfahrzeugen mit althergebrachtem Verbrennungsmotor (diesel-hydraulischer Antriebsstrang) oder mit Dieselstromgenerator und Elektromotor (diesel-elektrischer Antriebsstrang) auf batterie-betriebene Transportfahrzeuge (batterie-elektrischer Antriebsstrang) in die Stromsparte verlegt werden kann. Gerade für küstennahe Standorte wie einen Containerhafenbetrieb können sich im Zusammenhang mit dem Laden austauschbarer Batteriespeichersysteme für Transportfahrzeuge neue Möglichkeiten ergeben, die naturgemäß unsicheren Stromerträge von Windkraft- und Photovoltaikanlagen stärker als anderenorts zu nutzen und von einem vergünstigten Strombezug sowie die Vorhaltung von Minutenreserveleistung und die Regelenergieerbringung im Bedarfsfall zu profitieren. Eine Energiekostensenkung setzt allerdings eine Planung und Steuerung der Bereitstellung elektrischer Energie an die Fahrzeuge voraus. Zum einen kann der Energiebedarf der Transportfahrzeuge je nach dem Grad der Auslastung des Containerterminals stark variieren. Zum anderen lassen sich die Ladeprozesse der Batteriespeichersysteme durch die Anwendung eines Batteriewechselkonzepts von den Transportprozessen der Fahrzeuge entkoppeln.

Die Planungsproblemstellung dieser Arbeit weist Besonderheiten gegenüber althergebrachter Kraftwerkseinsatzplanung oder dem Management von Transportsystemen auf. Denn die Konditionierung der Batteriespeichersysteme muss als ein integraler Bestandteil der Planung der Energiebereitstellung für das sie umgebende geschlossene Transportsystem aufgegriffen werden. Es gibt eine Vielzahl optionaler Einsatzaktivitäten für die Wechselbatterien, welche die Aufenthaltszeiträume der Wechselbatterien bestimmen sowie den Ladezustand bei der Abgabe an die Station und die Aufnahme von der Station ausmachen. Die elektrische Energie tritt in dieser Planungsproblemstellung als eine nicht-erneuerbare Ressource auf, die von Wechselbatterien lokal bevorratet wird. In diesem Sinne können sowohl die Zeitpunkte der Produktion wie auch des Konsums der elektrischen Energie variiert werden. Die betriebliche Flexibilität bei der Energiebereitstellung für die Fahrzeuge kann zeitlich wie mengenmäßig in differenzierte Bahnen gelenkt werden. Durch die Entscheidung über die Einsatzzeiträume der Wechselbatterien und die Festlegung von Ladeverläufen kann Zuschalt- und Abschaltpotenzial zu unterschiedlicher Zeit und in verschiedener Höhe ausgebildet werden.

In der vorliegenden Arbeit wird ein heuristischer Lösungsansatz vorgestellt, der gleichsam auf die am Vortag handelbaren Produkte des Stromgroßhandels als auch die Tagesausschreibungen für Minutenreserve ausgerichtet ist. Er umfasst insgesamt vier Problemlösungsmodule: Diese werden zur Generierung einer Startlösung und der anschließenden lokale Suche nach einer attraktiven Schlusslösung verwendet. Hervorzuheben ist dabei die Möglichkeit zur Einsatzoptimierung, indem einzelne Stücke von Minutenreserveangeboten gegenüber den möglichen Vergünstigungen im Strombezug abgewogen werden. Es wird rückversichert, dass nicht etwa ein Angebotsstück eine Festlegung von Ladeleistung in einer ungünstigen Zeitscheibe bindet, ohne den Preisnachteil beim Strombezug durch Mehrung der Minutenreserveerlöse zu übertreffen.

Der Lösungsansatz wurde in einer Anwendungsumgebung des Container-Terminal Altenwerder in Hamburg vollständig umgesetzt und mehrmonatig im geschlossenen Transportsystem zwischen Containerbrücken und Blocklagern getestet. Nach entsprechender Erweiterung übernimmt das betriebliche Energie-Management-System jeweils Tags voraus die energiewirtschaftliche Ablaufplanung und stößt die Vermarktung von Minutenreserve gegenüber einem außenstehenden Aggregator an. Am Geltungstag selbst sorgt es für eine planmäßige Durchführung der Ladeprozesse, koordiniert im Falle eines Abruf zur Erbringung von Regelenergie die Schaltaktionen gemäß der reservierten Zuschalt-/Abschaltpotenziale und übermittelt die zum Nachweis erforderlichen Messdaten nach außen.

INHALT

TEIL 1	EINLEITUNG	1
	A. Motivation	1
	B. Forschungskontext	5
	C. Untersuchungs-/Planungsgegenstand	6
	D. Zielsetzung der Arbeit	15
	E. Wissenschaftliches Vorgehen	17
	F. Aufbau der Arbeit	17
TEIL 2	ANWENDUNGSBEZOGENE GRUNDLAGEN	18
	A. Grundlagen der Containerlogistik	18
	B. Grundlagen der Elektrizitätswirtschaft	25
TEIL 3	PLANUNGSMETHODIKEN UND VERWANDTE ARBEITEN .	31
	A. Gängige Planungsmodelle	31
	B. Bekannte Lösungsverfahren	46
	C. Verwandte Arbeiten	49
	D. Eigene Herangehensweise	61
TEIL 4	SPEZIFIKATION DES PLANUNGSPROBLEMS	64
	A. Einteilung des Planungszeitraums und des Marktumfelds	64
	B. Zeitweilige Zuordnungsentscheidung für Ressourcen	69
	C. Einsatzzeitentscheidungen für Wechselbatterien	80
	D. Ladeverlaufsentscheidungen	93
	E. Flexibilisierungsentscheidungen	108
	F. Bewertung von Ablaufplänen	120
	G. Präzedenzgraph.....	121

TEIL 5	HEURISTISCHES LÖSUNGSVERFAHREN	128
A.	Ablaufplankonstruktion.....	129
B.	Ablaufplanmodifikation.....	144
C.	Stückelung von Minutenreserveangeboten	165
D.	Abwägung von Erlösen gegenüber Kosten.....	171
E.	Suche benachbarter Lösungen	190
TEIL 6	EVALUATION	200
TEIL 7	FAZIT UND AUSBLICK.....	213
A.	Fazit	213
B.	Ausblick.....	214
GLOSSAR		215
ABBILDUNGSVERZEICHNIS		219
LITERATURVERZEICHNIS		223
STICHWORTVERZEICHNIS		228

TEIL 1 EINLEITUNG

A. *Motivation*

I. **Wandel der Kraftwerkslandschaft**

Es ist eine besondere Herausforderung im Bereich der elektrischen Energieversorgung, dass im Stromnetz selbst, das heißt in den Netzknoten und Netzleitungen, keine elektrische Energie gespeichert werden kann. Bis dato hat sich mit dem Rückgriff auf fossile Energieträger und im Zusammenhang mit konventionellen Speichertechnologien eine Lastorientierung verankert (vgl. Schwab 2006). Nach wie vor ist das elektrische Energieversorgungssystem so aufgebaut, dass die ins Stromnetz eingespeiste Leistung immer der aktuell benötigten Leistung angepasst wird. Selbst in der heutigen Zusammensetzung des Kraftwerksparks ist die Stromgewinnung und Einspeisung in das Netz auf der einen Seite grundsätzlich auf die Entnahme aus dem Netz und den Stromverbrauch auf der anderen Seite ausgerichtet.

Bei Windkraft- wie auch bei Photovoltaikanlagen kommt es allerdings naturgemäß in unterschiedlicher Häufigkeit und Intensität zu einer fluktuierenden und nicht selten zu einer intermittierenden Einspeiseleistung in das Netz. Mit zunehmender Nutzung erneuerbarer Energiequellen sowie der Möglichkeit zur Stromgewinnung durch Kraft-Wärme-Kopplung verändern sich allmählich die Anforderungen an die Auslegung und den Betrieb des elektrischen Energieversorgungssystems (ETG SmartDistribution 2008). Unvorhergesehene Schwankungen zwischen der Einspeisung von Strom in das Netz und der Entnahme von Strom aus dem Netz müssen innerhalb eines Verbundnetzbetriebs ausgeglichen werden. In Deutschland sollen nun Windkraft- und Photovoltaikanlagen in den kommenden Jahren um ein Vielfaches weiter ausgebaut werden, um im Energiemix der Zukunft die Hauptrolle zu übernehmen (Integration EE 2012). Dazu müsste allerdings das Prinzip „Einspeisung folgt Entnahme“ durch ein Prinzip „Entnahme folgt Einspeisung“ ergänzt werden, um Leistungsschwankungen bei der Stromgewinnung aus erneuerbaren Energiequellen auszugleichen und die Netzstabilität zu erhöhen (Block et al., 2008). Es wird dann erforderlich sein, dass zusätzlich auch die aus dem Stromnetz entnommene Leistung auf die aktuell bereitgestellte Leistung angepasst werden kann.

Bei einer Differenz zwischen Einspeise- und Entnahmeleistung sowie zur Deckung von Verlustleistung bei der Übertragung und Verteilung müssen Regelungseingriffe vorgenommen werden. Die bislang nicht vollends vorhersagbaren Windströmungen und Sonneneinstrahlungen sind dafür ausschlaggebend, dass von Regelzonenverantwortlichen heute und zukünftig mehr Regelleistungen nachgefragt werden und sich häufiger ein Bedarf zur Erbringung von Regelleistung ereignet (Haubrich, 2010). Diesem Trend wird durch immer bessere Prognosen und kurzfristige Kraftwerkseinsatzplanung sowie kürzer befristetem Stromgroßhandel entgegengewirkt. Dennoch wird durch den Zubau von Windkraft- oder Photovoltaikanlagen unter der Annahme gleichbleibender Rahmenbedingungen eine erhöhte Nachfrage an Regelleistung und wachsenden Regellenergiebedarf in unterschiedlichen Qualitätsstufen induziert (ETG Energiespeicher 2008). Zumal es gesetzliche Vorschriften für die Berechnung der Menge an Regelleistung gibt, die für eine bestimmte Regelzone

über Ausschreibung mindestens zu beschaffen ist. Dies richtet sich unter anderem nach der in einer Regelzone installierten Leistung von Windkraft- und Photovoltaikanlagen.

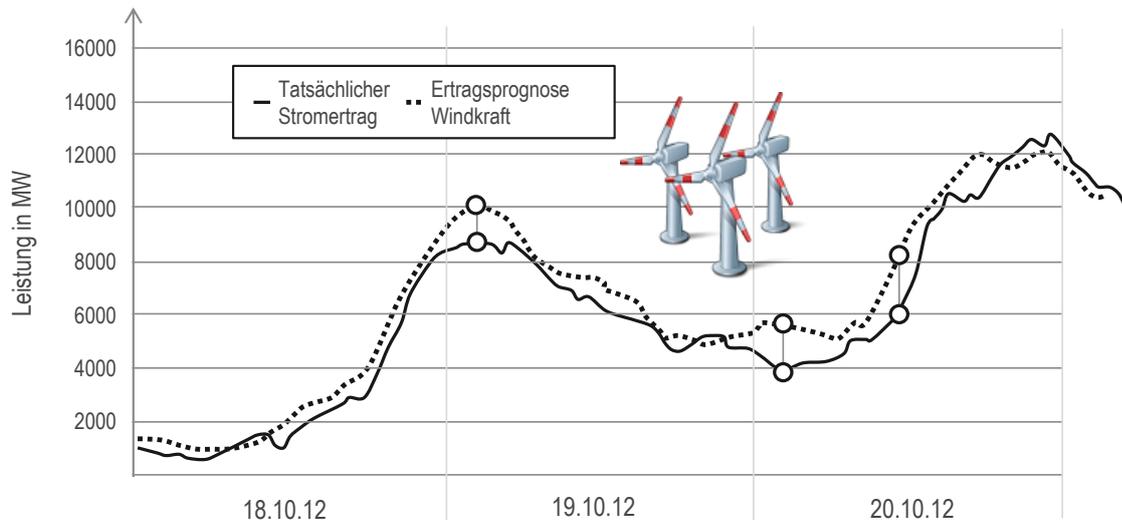


Abbildung 1: Unerwartete Stromerträge aus Windkraftanlagen rufen einen Regelungsbedarf hervor [nach Vortrag von TenneT TSO GmbH, IQPC Tagung 14.11.2012]

In **Abbildung 1** ist beispielhaft eine Kurve mit kurzfristigen Prognosewerten für Windkraftanlagen gegenüber und der Kurve mit den tatsächlichen Stromertragswerten aufgetragen. Darin sind einige Stellen mit erheblichen Prognosefehlern gekennzeichnet, die als ursächlich für einen Regelenergiebedarf anzusehen sind.

II. Preisgefüge an den Strommärkten

Aufgrund der steigenden Güte von Kurzfristprognosen für das Dargebot der erneuerbaren Energiequellen wie Sonne und Wind sind die Rückwirkungen auf den Vortagshandel und den tagaktuellen Handel mit elektrischer Energie mittlerweile gut einzuschätzen. In **Abbildung 2** ist exemplarisch eine Gesamtlastkurve mit der dazugehörigen Residuallastkurve im Verlauf eines Tages dargestellt. Die Residuallast gibt einen Anhaltspunkt für die Entnahme aus dem Netz, die nach Abzug der Einspeisung aus regenerativen Energieanlagen und wärmegeführten Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen durch die Einspeisung konventioneller Kraftwerke ins Netz zu decken sein dürfte. Die prognostizierten Stromerträge von Windkraft- und Photovoltaikanlagen werden im Zuge der Kraftwerkseinsatzplanung berücksichtigt, so dass Fahrpläne zu Stande kommen, die einer preisdämpfenden Angebots-Nachfrage-Situation entgegenwirken. Es kommt somit im Interesse der Betreiber konventioneller Kraftwerke wenig wahrscheinlich im Stromgroßhandel zu stichpunktartigem Preisverfall.

In Abhängigkeit von schwankenden Angebotsmengen aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen kann sich zeitweise ein höheres oder niedrigeres Preisniveau einstellen. Aus dem Ausbau der erneuerbaren Energien folgt daher eine zunehmende Preisvolatilität an den Strommärkten. Hochflexible Anlagen wie Pumpwasserspeicherkraftwerke und Gaskraftwerke profitieren in besonderem Maße von steigender Volatilität. Sie sind in der Lage, die Stromgewinnung bei einem niedrig erwarteten Preisniveau auszusetzen und bei einem höheren Preisniveau mitzuziehen. In den Nachtstunden (im Bild mit **A** markiert) sind die Stromerträge aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen typischerweise wesentlich geringer als in den Tagstunden (im Bild mit **B** markiert). Während die Residuallastkurve in

den Tagstunden zeitweise sogar ein Überangebot anzeigt, bleibt die Residuallast in den Nachtstunden nur leicht hinter der Gesamtlast zurück.

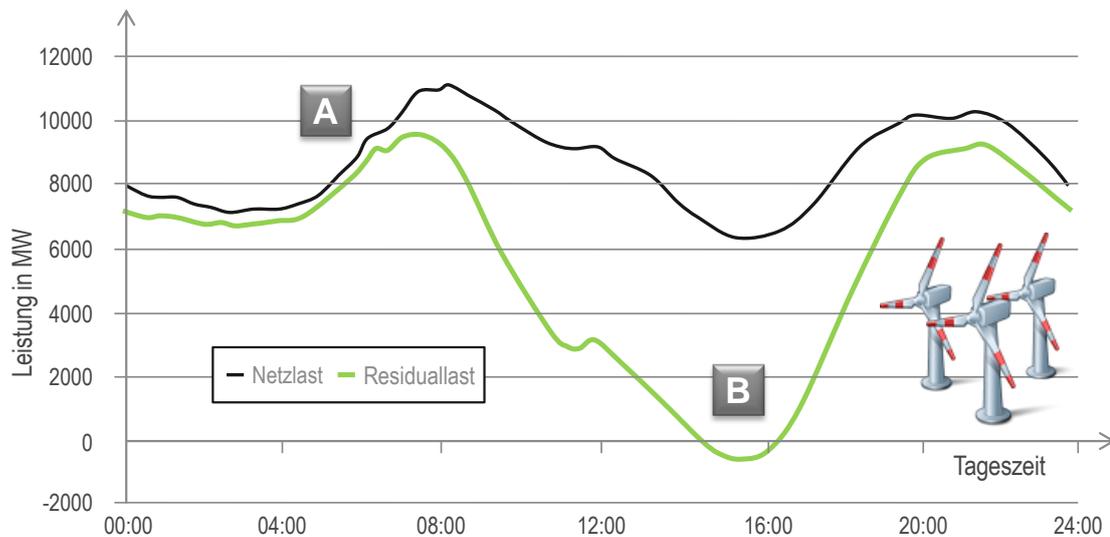


Abbildung 2: Typischer Verlauf der Netzlust und der Residuallast in Deutschland

Es äußert sich im börslichen Stromhandel, dass die Stromgewinnung auf der Grundlage erneuerbarer Energiequellen wie zum Beispiel Sonne und Wind von teilweise erheblichen Schwankungen im Darangebot abhängig ist. Je größer der Anteil von Windkraft- und Photovoltaikanlagen an den Kapazitäten zur Stromgewinnung ausfällt, umso wechselhafter fällt das Stromangebot aus (Graeber, 2014). Bei derzeitigen Marktmechanismen wird Strom insbesondere dann zu niedrigen Preisen gehandelt und folglich kostengünstig zu beziehen sein, wenn er aus erneuerbaren Energiequellen stammt. In **Abbildung 3** wird der preisdämpfende Effekt der Stromerträge aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen veranschaulicht, welche praktisch frei von Gestehungskosten in den Handel an der Strombörse gebracht werden. Der Markträumungspreis beläuft sich auf den Schnittpunkt zwischen der Angebotspreis-Kurve und der Nachfrage-Preis-Kurve. Früher war meist der Angebotspreis eines Gas- und Dampfkraftwerks preisbestimmend (im Bild mit **A** markiert); die nachgefragte Strommenge konnte erst einschließlich der von einem Gas- und Dampfkraftwerk angebotenen Strommenge gedeckt werden. Über die Abnahme- und Vergütungsverpflichtungen hinaus gibt es gesetzliche Regelungen dazu, dass die Stromerträge aus erneuerbaren Energiequellen zunächst an der Strombörse gehandelt werden müssen und eine entsprechende Umlage nur abzüglich der dortigen Erlöse erfolgen darf (Bode & Groscurth, 2006; Neubarth et al., 2006). Bei einem Großangebot kann heute mitunter die Stromnachfrage gedeckt werden, ohne auf bestimmte Kraftwerkstypen wie Gas- und Dampfkraftwerke mit höheren Gestehungskosten zurückgreifen zu müssen. Dadurch kommt es zu entsprechenden Verschiebungen in der Angebotspreis-Kurve und es wird entlang der Einsatzreihenfolge der Kraftwerksbetriebe ein nächstgünstigerer Kraftwerkstyp preisbestimmend (im Bild mit **B** markiert). Im Endeffekt fällt der Markträumungspreis schrittweise in Ablösung gewisser Kraftwerkstypen deutlich niedriger aus und so wird die Erzeugerrente zur Deckung der Vollkosten für alle Marktteilnehmer geschmälert (Andor et al., 2010).

Es wird sogar in Frage gestellt, ob es bei gegenwärtigen Vorschriften für die Preisbildung an der Strombörse nicht zukünftig zu derart niedrigen Strompreisen kommt, dass der Aufbau und der Betrieb konventioneller Kraftwerksanlagen über das Jahr gesehen unwirtschaftlich ist (BDEW, 2013a).

Zwar sind die Nutzungsdauern und Investitionsvorhaben konventioneller Kraftwerksbetriebe stark rückläufig, jedoch wirkt sich eine Teilauslastung bezüglich des börslichen Stromhandels bis dato nicht so aus, dass Kraftwerksbetriebe reihenweise außer Betrieb genommen werden. Noch wird die Wirtschaftlichkeit konventioneller Kraftwerksbetriebe dadurch aufgefangen, dass der Bedarf an sicher verfügbarer Spitzenleistung quasi unverändert hoch ist und der Regelleistungsbedarf stark zunehmend ist.

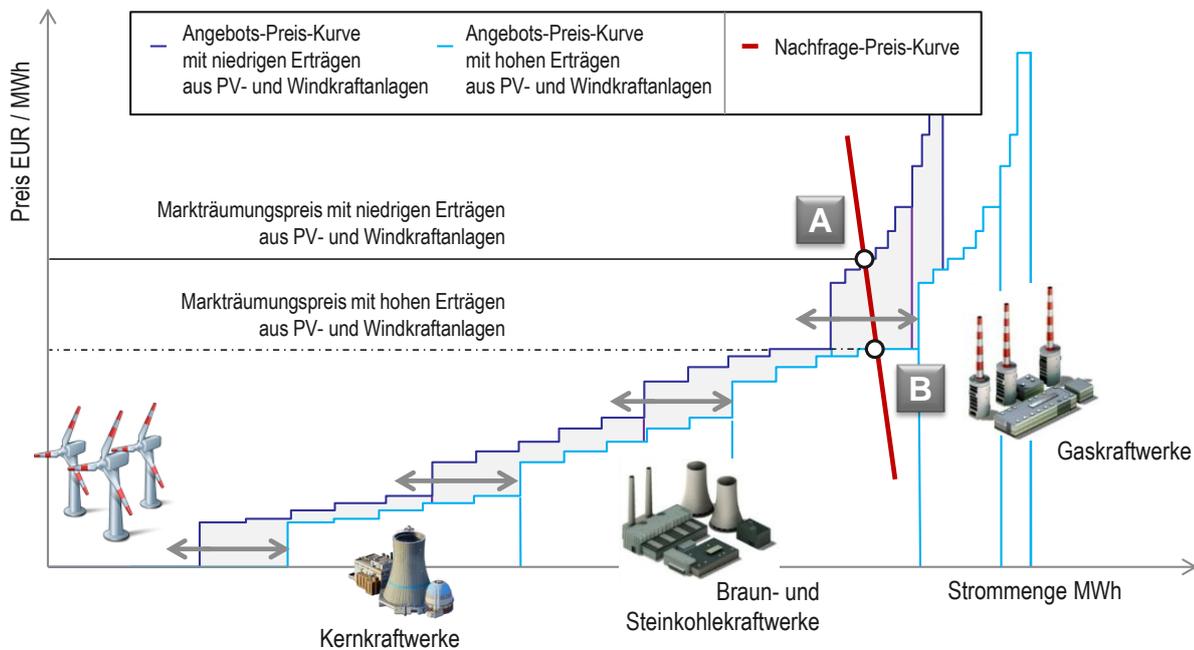


Abbildung 3: Veranschaulichung der Preisdämpfung auf der Strombörse durch die Vermarktung der Stromerträge aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen

Heutzutage geschieht der Energieeinkauf durch große Gewerbebetriebe und energieintensive Industriebetriebe weitestgehend unbeachtet der Schwankungen der Energiepreise, denn der Großhandel und der vertriebsorientierte Handel übernehmen hier eine Mittlerfunktion. Nach der Liberalisierung des deutschen Strommarkts ist in der Vertriebsaufgabe ein deutlicher Margendruck entstanden, weshalb sich vertriebliche Handelshäuser teilweise zu Dienstleistern in der Energiemarktschnittstelle umstrukturieren (Viola, 2014). Bisher werden durch Vertriebsgesellschaften für Industrieunternehmen lediglich solche Stromprodukte angeboten, welche die momentanen Strompreisentwicklungen durch einen festen Strombezugspreis wegglaten. Diese Strompreisfixierung tritt auch bei neuartigen börslich indexierten Stromprodukten ein. Beim Einkauf von Strom zeigt sich dies in besonderem Maße, da der Strompreis im Vergleich zum Dieselkraftstoffpreis im Börsenhandel deutlicheren Schwankungen unterliegt. Bei Erhöhung der Variabilität von Produkten für die Strombelieferung steigt zwar auch der mit dem Produkt verbundene Aufwand. Im liberalisierten Markt nimmt jedoch die Bedeutung des aktiven Managements des Strombezugs zu – neuere Stromprodukte der Vertriebsgesellschaften gehen in Richtung Transparenz der Beschaffungs- bzw. Erzeugungskosten sowie Weitergabe von Chancen und Risiken bezüglich des börslichen Handels. Dies gilt so auch für Betreiber geschlossener Transportsysteme mit batterie-elektrischen Fahrzeugen, die von variabler Bepreisung des Strombezugs profitieren und Erlöse aus dem Angebot von Minutenreserve erzielen können. Eine Energiekostensenkung setzt allerdings eine Planung und Steuerung der Bereitstellung elektrischer Energie an die Fahrzeuge voraus.

B. *Forschungskontext*

I. **Intelligentes Energieversorgungssystem**

Aus dem Förderprogramm „IKT für Smart Grid / E-Energy – Smart Grids made in Germany“ gingen Modellregionsprojekte für die Entwicklung IKT-basierter Energiesysteme der Zukunft hervor. In verschiedenen E-Energy-Modellregionen sowie in Projekten zur Elektromobilität wurden neue Konzepte zur Bewältigung der zukünftigen Herausforderungen entwickelt und im Feld erprobt (Begleitforschung E-Energy 2014). Neuerdings spielt die Einbindung von flexiblen Verbrauchern in Verbände mit Photovoltaik- oder Windkraftanlagen (das Konzept virtueller Kraftwerke) eine immer größere Rolle. Beim Ausbalancieren zwischen Einspeisung und Entnahmen im Stromnetz wurden sowohl Abregelung von dezentralen Erzeugern auf Grundlage erneuerbarer Energiequellen als auch die Möglichkeiten schaltbarer Geräte von Haushalts-, Gewerbe- und Industriekunden untersucht. Im Haushaltskundensegment wurden größere Multiplikationseffekte als im Industriekundensegment vermutet. In der Tat bedarf es vielfach branchen- und anwendungsspezifischer Lösungen für das Energie- und Lastmanagement in Industriebetrieben. Dennoch sind erste kommerzielle Anbieter bzw. Verbundbetreiber am Strommarkt und am Regelleistungsmarkt bereits aktiv. Durch die Aggregation von Anlagen verschaffen sie den äußerst stromintensiven Industriekunden wie auch großgewerblichen Stromkunden die Möglichkeit, zur Stabilisierung der Stromnetze beizutragen und Erlöse aus dem Angebot von Regelleistung und der Erbringung von Regelenergie zu erwirtschaften. Die Betreiber von geschlossenen Transportsystemen zählen in der Regel zu den großgewerblichen Stromkunden.

Um einen zukünftigen Mangel an Planbarkeit und Vorhersagbarkeit der Stromgewinnung und letztlich der Netzeinspeisung aufzufangen, wird es für Stromhändler wie auch Stromlieferanten ein Schlüssel sein, die Strombedarfe ihrer Endkunden (engl. „Demand Side Integration“) stärker einzubinden. Dies umfasst gemäß Begriffsprägung der deutschen Verbände (BDEW 2013b; VDE 2012) alle Maßnahmen, die von Akteuren der Energiewirtschaft im Zusammenspiel mit ihren Endkunden ergriffen werden, um die Bezugsmengen über die Zeit sowie die Höhe und den Zeitpunkt von Stromlasten im Netz zu verändern: Dabei wird beispielsweise versucht, das Abnahmeverhalten von Stromkunden durch direkte Gerätekontrolle oder indirekt durch Übermittlung von Preissignalen zu beeinflussen (vgl. Lastbeeinflussung, engl. „Demand Response“, Albadi & El-Saadany 2007). Eine Beeinflussung kann sich in einer zeitlichen Verschiebung sowie mengenmäßigen Veränderung des Strombedarfs äußern, wobei gewisse Vorziehungs- und Nachholungseffekte auftreten können. In Richtung der Letztverbraucher mögen zeit- und lastabhängige Fixpreistarife oder Tarife mit variabler Bepreisung nötige Anreize bieten (Nabe et al., 2009). Die Reaktionen auf derartige liefervertragliche Signale können von Energieeffizienzmaßnahmen beim Endkunden begleitet sein oder auch frei von Preisreizen durch Energiemanagementkonzepte ergänzt werden (engl. „Demand Side Management“, vgl. Sonnenschein et al. 2010). So lassen sich Stromversorgungsprofile insgesamt besser abstimmen bzw. Vorgaben aus angebotsseitigen Prognosen in günstige Nachfrageverläufe umsetzen. Dies wird bereits in einigen Ländern wie den USA und Frankreich erfolgreich praktiziert – meistens aus der Notwendigkeit heraus, extreme Betriebssituationen in den jeweiligen Netzen zu verhindern. Verschiedenen Studien zufolge könnten auch in Deutschland flexible Lasten in beträchtlichem Umfang genutzt werden: Wie sich zeigt, fehlt es jedoch an Vorschriften zur Verrechnung einer zwecks Erbringung von Regelenergie erhöhten oder abgesenkten Entnahmeleistung. Deshalb können mit dem Überschreiten

bisher erreichter Spitzenlastwerte erhöhte Grundgebühren für die Leistungsbereitstellung und ein erhöhtes Netzentgelt anfallen, gar eine anteilige Netzentgeltbefreiung erlöschen oder ein Nachweis atypischen Netznutzungsverhaltens scheitern. Es erscheint außerdem aufwendig zu sein, die Potenziale bei Haushaltskunden auf der Grundlage einer Vielzahl kleinerer Geräte zu erschließen (Kamper 2010; Zeilinger & Einfalt 2011). Darum werden trotz bestehender Hemmnisse vor allem Industriekunden aus stromintensiven Branchen wie die Aluminium- und Stahlindustrie sowie die Chemie-, Papier- und Zementindustrie in den Blick genommen (Borggrefe & Paulus 2011; Roon & Gobmaier 2010). Die Logistikbranche ist von bisherigen Studienarbeiten nicht betrachtet worden.

II. Nutzung von Elektrofahrzeugen

Die Fragestellungen zu IKT-Systemen für die Elektromobilität wurden später in konsequenter Erweiterung der Modellregionsprojekte im Förderprogramm „IKT für Elektromobilität“ angegangen (Begleitforschung IKT-EM I 2012). Bei regulärer Nutzung im Kontext privater Haushalte wird eine Netzintegration der mobilen Speichersysteme der Elektrofahrzeuge und eine dezentrale Bereitstellung von Systemdienstleistung unter dem Schlagwort „Vehicle-to-Grid“ (Kempton & Tomić 2005) diskutiert. Dabei geht es um das Management von Ladeprozessen der Batteriepacks von privat genutzten Personenfahrzeugen zu Hause, von Privatfahrzeugen im Bereich der öffentlichen Ladeinfrastruktur und von gewerblich genutzten Personenfahrzeugen innerhalb eines Fuhrparks oder im Bereich einer halb-öffentlichen Ladeinfrastruktur. Es befinden sich für Privathaushalte diverse Ansätze in der Diskussion, das Ladeverhalten in der Einzelbetrachtung und der Betrachtung von Schwärmen von Elektrofahrzeugen vorhersehen und planen zu können. Weiterführende Ansätze gehen darauf ein, bis zu welchem Maße in geplante oder laufende Ladeprozesse regelnd eingegriffen werden kann, um Systemdienstleistungen zu erbringen oder Netznutzungsengpässe vermeiden zu helfen. Allerdings müssen Unsicherheiten über die zeitliche und örtliche Verfügbarkeit der Fahrzeuge und ihrer elektrischen Batteriespeichersysteme bei der Planung berücksichtigt werden.

Demgegenüber steht bei Industriebetrieben mit zumeist deutlich intensiverer Nutzung von Elektrofahrzeugen eine Marktintegration der für den Flottenbetrieb notwendigen elektrischen Batteriespeichersysteme im Vordergrund. Die Elektromobilität in einem geschlossenen Transport- und Logistiksystem hat den Vorteil, sich nicht mit Aufenthaltswahrscheinlichkeiten mobiler Speichersysteme auseinandersetzen zu müssen. Ganz im Gegensatz dazu zirkulieren die elektrischen Batteriespeichersysteme in einem stets überschaubaren Werksgelände. Zu jedem Zeitpunkt ist aus dem Pool elektrischer Batteriespeichersysteme ein gewisser Anteil an einer Ladestation kontaktiert und der verbleibende Anteil kann in Ausstattung der Transportfahrzeuge ständig überwacht werden. Mit dieser Arbeit wird das Schlagwort „Battery-to-Market“ dafür verwendet, einen Zweitnutzen für solche Speichervolumen im geschlossenen Transport- und Logistiksystem zu erschließen. Durch die jüngst erfolgte Verkürzung der Erbringungszeiträume und Herabsetzung der Mindestangebotsgröße ist auch eine Bereitstellung von Regelleistung aus den Ladeprozessen heraus deutlich gangbarer geworden.

C. Untersuchungs-/Planungsgegenstand

Laut Bundesnetzagentur lässt es sich zwischen den Herausforderungen eines stabilen Netzbetriebs (Netzsphäre) und denen eines marktbezogenen Energiemengenaustausches auf der Grundlage der zur

Verfügung stehenden Netzkapazität und der daraus abgeleiteten Dienstleistungen (Marktsphäre) differenzieren (siehe dazu Eckpunktepapier aus 2011). In dieser Arbeit wird der Blickwinkel von Industrie- / Großgewerbebetrieben innerhalb der Marktsphäre eingenommen, in welchen bei der Energiebereitstellung für Transportfahrzeuge elektrische Batteriespeichersysteme verwendet werden. Sie setzt sich mit der Planung der Betriebsabläufe zur Bewirtschaftung des Batteriespeichervolumens in einem geschlossenen Transportsystem unter Anwendung eines Batteriewechselkonzepts auseinander.

Abbildung 4: Das geschlossene Transportsystem im seeseitigen Horizontaltransportareal eines Containerterminalbetriebs dient als Anwendungsfallbeispiel



Als Anwendungsfallbeispiel dient in dieser Arbeit ein Containerterminalbetrieb, der neben herkömmlichen Fahrzeugen mit diesel-hydraulischem oder diesel-elektrischem Antriebsstrang über Fahrzeuge mit batterie-elektrischem Antriebsstrang verfügt. Wie in **Abbildung 4** illustriert ist, werden dort Fahrzeuge zum Transport von Containern eingesetzt, die in einem abgeschlossenen Fahrbereich zwischen Kai- und Lagerkränen führerlos operieren können. Bis dato entfällt die Transportlast überwiegend auf diesel-betriebene Fahrzeuge, wobei die Kraftstoffsparte mit der langfristigen Beschaffung von Dieselmotorkraftstoff und der regelmäßigen Betankung als unkritisch für den Containerterminalbetrieb gesehen werden kann. Mit batteriebetriebenen Fahrzeugen und der Anwendung eines Batteriewechselkonzepts gewinnt ein Containerterminalbetrieb in der Stromsparte nennenswert an Flexibilität dafür hinzu, rechtzeitig gewisse Mengen elektrischer Energie in die Batteriesysteme nachzuführen und diese im Tausch frisch geladener Batteriesysteme gegen teilentladene Batteriesysteme an die Transportfahrzeuge zu verteilen. Aufgrund der Diskrepanz zwischen der Dauer eines Ladeteilzyklus gegenüber der Dauer eines Entladeteilzyklus ist es prinzipiell möglich, das Laden bewusst in Zeiträume mit niedrigen Strombezugspreisen/Großhandelspreisen zu legen. Darüber hinaus ist es möglich, im Ladeteilzyklus die Zeiträume auszulassen, in denen in den übrigen Terminalbereichen wie den elektrischen Containerbrücken ein hoher Verbrauch erwartet wird. Der Lastgang eines Containerterminalbetriebs kann insofern netzverträglicher ausgestaltet werden oder sogar Abweichungen vom vor angekündigten/günstigen Lastgang abgemildert werden. Des Weiteren kann Regelleistung angeboten und im Bedarfsfall Regelleistung erbracht werden. Da die Speicherkapazität der Wechselbatterien, die Ladekapazität der Ladestellen und die Kapazität der Tauschspuren in der Station auf eine Volllast ausgelegt sein müssen, eröffnet sich ein gewisses zeitliches Lastverschiebungspotenzial, wann immer ein Containerterminal – wie gewöhnlich – nur zu einem Teil ausgelastet ist. Eine Tauschspur ist ein Fahrzeugstellplatz neben dem Regalbediengerät zur Abgabe und Aufnahme einer Wechselbatterie.

In diesem Abschnitt wird die Planungsproblemstellung dieser Arbeit überblicksartig vorgestellt und die Anforderungen an ein fragliches Planungsverfahren zusammengefasst.

Die Wechselbatterien sind in Abhängigkeit von einer voraussichtlichen Transportlast als ein quasi-stationäres Speicheranlagensystem an einem Tag im Voraus zu subaggregieren, um nach gegenwärtigem Stand der Automatisierung oder der Ausrichtung auf den Stromgroßhandel und/oder den Regelleistungsmarkt eine Senkung der Energiekosten herbeizuführen.

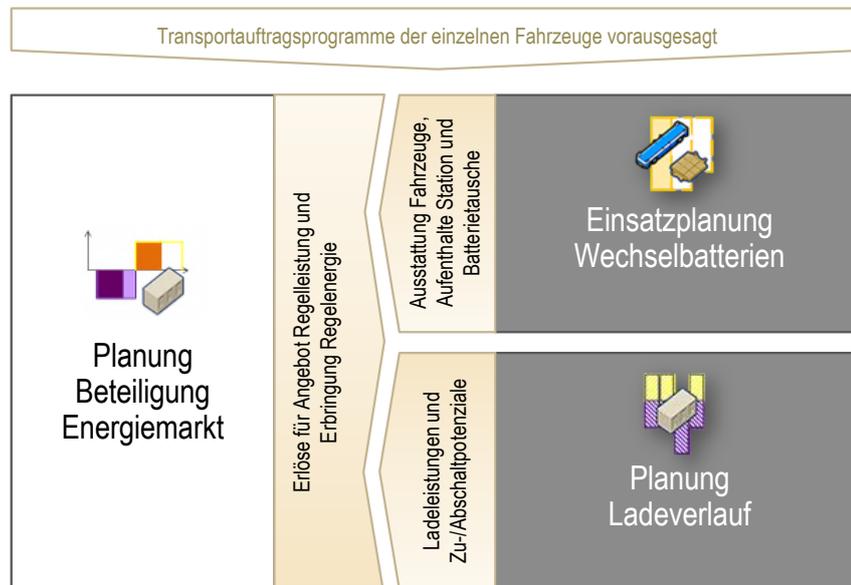


Abbildung 5: Übersicht der Problemteile in der Gesamtproblemstellung einer Bewirtschaftung des Batteriespeichervolumens innerhalb eines geschlossenen Transportsystems mit batteriebetriebenen Fahrzeugen

Die in dieser Arbeit betrachtete Gesamtproblemstellung lässt sich wie in **Abbildung 5** in drei Problemteile gliedern:

- Einsatzplanung Wechselbatterien
Es wird in Kenntnis des Transportauftragskommens geplant, wie viel Transportlast durch den Einsatz von batteriebetriebenen Fahrzeugen erfüllt werden kann und wie viel elektrische Energie dafür durch den Einsatz von Wechselbatterien zur Verfügung gestellt werden muss. Damit wird ein Blick auf die verschiedenen Einsatzzeiträume gewonnen, in denen eine Wechselbatterie als Ausstattung eines Fahrzeugs fungieren, sich bei einer Ladestelle in einer Station aufhalten oder einen Batterietausch durchlaufen kann.
- Planung Ladeverlauf
Es wird für die diversen Stationsaufenthalte der Wechselbatterien geplant, wie die benötigte Menge elektrischer Energie durch die Festlegung von Ladeleistung im Zeitverlauf nachgeführt werden kann. Dadurch wird ein Aufschluss darüber gewonnen, wie ausgehend von den Wechselbatterien an den Ladestellen ein Zuschalt- und Abschaltpotenzial ausgebildet werden kann.
- Planung Beteiligung Energiemarkt
Es wird der Gebrauch von Zuschalt- und Abschaltpotenzial zum Zweck eines Angebots von Regelleistung und zum Zweck der Erbringung von Regelenergie sowie der Kompensation des Ladestands der Wechselbatterien bei Bedarf geplant. Damit wird eine Abschätzung darüber gemacht, in wie weit die Gesamtkosten für das Laden neben der reinen Vergünstigung des

Strombezugs bei einer Beteiligung am Regelleistungsmarkt zusätzlich reduziert werden können.

I. Einsatz von Fahrzeugen und Wechselbatterien

Je nachdem wie stark ein geschlossenes Transportsystem ausgelastet ist, wird darin an eine Flotte von Fahrzeugen über die Zeit eine gewisse Anzahl von Transportaufträgen gerichtet. Der Planungszeitraum besteht aus einer Menge von Zeitscheiben mit einheitlicher Länge. Die Zuweisung von Transportaufträgen an die Fahrzeuge kann mit einer diskreten Zeitachse betrachtet werden. Es fallen gemäß der Auftragsfolge eines Fahrzeugs in einer bestimmten Zeitscheibe die Bearbeitung keines oder auch mehrerer Transportaufträge zusammen. Von der Auftragszuweisung in einer Fahrzeugflotte und der Routenfindung einzelner Fahrzeuge wird in der Problemstellung dieser Arbeit so weit wie möglich abstrahiert. Wie im oberen Bildteil von **Abbildung 6** in einem Beispiel angedeutet ist, muss für jedes batteriebetriebene Fahrzeug ein individuelles Programm vorliegen, in welchem die gestellten Transportanforderungen über den kompletten Planungszeitraum hinweg als bekannt gelten. In der Tat wird die Bearbeitung von Transportaufträgen zu unterbrechen sein, wenn ein Fahrzeug zu einem Batterietausch an eine Station ausfahren muss.

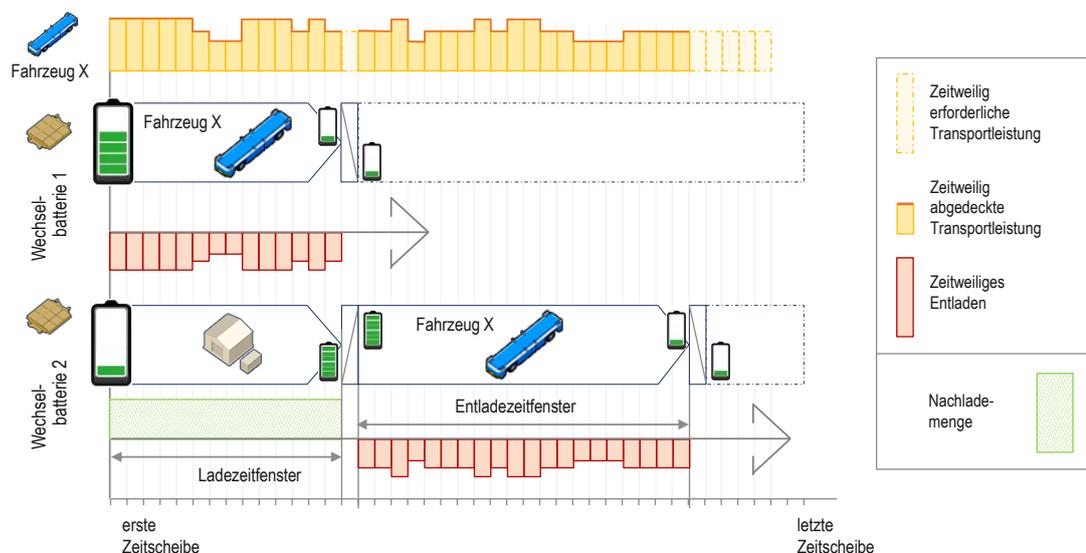


Abbildung 6: Exemplarischer Fahrzeug- und Batterieeinsatz mit einer Fahrzeugnutzungssequenz und zwei Nutzungssequenzen von Wechselbatterien, die in der Zeit als Ausstattung dieses Fahrzeugs fungieren.

Zur Energieversorgung der diesel-betriebenen Fahrzeuge reicht es aus, sie in größeren zeitlichen Abständen zu betanken, die deutlich über einen Planungshorizont von ein bis zwei Tagen hinausragen. Das Betanken der diesel-betriebenen Fahrzeuge mit Kraftstoff wäre mit dem Laden eines batteriebetriebenen Fahrzeugs an einer Säule vergleichbar. Das Besondere in der Problemstellung dieser Arbeit ist die Anwendung eines Batteriewechselkonzepts, wodurch die batteriebetriebenen Fahrzeuge überwiegend im Fahrbetrieb gehalten werden können. Während beim Betanken mit Kraftstoff auf einen größeren Vorrat und bei einer Ladesäule auf den Strom direkt aus der Leitung zurückgegriffen werden kann, müssen die Wechselbatterien an zentraler Stelle geladen werden, ehe elektrische Energie durch Batterietausche an die Fahrzeuge verteilt werden kann. Im unteren und mittleren Bildteil von **Abbildung 6** wird mit den Einsatzsequenzen in einem Beispiel verdeutlicht, dass eine Wechselbatterie dabei auf verschiedene Arten gebraucht werden kann. In einem Gebrauchszyklus wird eine Wechselbatterie in Ausstattung eines Fahrzeugs gebraucht, an die Station abgegeben, beim

Aufenthalt in der Station geladen und dann wieder von einem Fahrzeug aufgenommen. Sie muss nicht zwangsläufig gänzlich entladen sein, bevor sie an die Station abgegeben wird; ebenso kann eine Wechselbatterie teilweise aufgeladen an ein Fahrzeug herausgegeben werden. Durch die lückenlose Planung ergeben sich in den Einsatzsequenzen von einer Aktivität zu einer nächsten Aktivität Übergangsbedingte Ladezustände. Das heißt, die Einsatzaktivitäten erfordern, die Wechselbatterien am vorderen Ende wie auch am hinteren Ende mit einem festgelegten Ladezustand vorzufinden.

In der Problemstellung dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass der Energiebedarf der Fahrzeuge proportional zu den Transportanforderungen ausfällt, die es über die Zeit zu erfüllen hat. Der Voraussicht nach wird beim Fahrbetrieb die durch die Wechselbatterien an Bord der Fahrzeuge bereitgestellte elektrische Energie aufgebraucht. In **Abbildung 6** ist der Energiebedarfsmenge eines Fahrzeugs im Entladezeitfenster beispielhaft die in den Transportprozess einzuführende Energiemenge im Ladezeitfenster gegenübergestellt.

II. Verlauf des Ladens bei Stationsaufenthalt

Wie in den Beispielen in **Abbildung 7** im oberen Bildteil zu sehen ist, kann im Grunde die Ladeleistung in jeder der Zeitscheiben beliebig festgelegt werden, insofern die Ladezustände beim Eintritt in das Ladezeitfenster und beim Austritt aus dem Ladezeitfenster eingehalten werden. Die obere Grenze der Ladeleistung hängt vom Typ des Batteriesystems ab. Lithium-Batteriesysteme lassen sich deutlich schneller laden als Blei-Batteriesysteme. Bei Blei-Batteriesystemen liegt beispielsweise die maximal zulässige Ladeleistung im Bereich etwa sechsständiger Ladevorgänge. In dieser Problemstellung wird vereinfachend angenommen, dass die zu den Batteriesystemen gehörenden Ladegeräte nicht rückspeisefähig sind. Darum entspricht die Nullladerate der unteren Grenze der Ladeleistung.

Die Potenziale für das Zu- und Abschalten bei den betreffenden Ladestellen ergeben sich aufgrund der Begrenzungen der Ladeleistung in direkter Folge zum gewählten Ladeverlauf für eine Wechselbatterie. Im mittleren Bildteil von **Abbildung 7** ist gezeigt, wie sich in den jeweiligen Zeitscheiben innerhalb eines Ladezeitfensters das Zuschalt-/Abschaltpotenzial ausprägt. Zum einen besteht das Potenzial, von der gewählten Ladeleistung bis zu einer maximal zulässigen Ladeleistung zu erhöhen/zuzuschalten. Zum anderen besteht das Potenzial, von der gewählten Ladeleistung bis auf eine Ladeleistung von null zurückzufahren/abzuschalten.

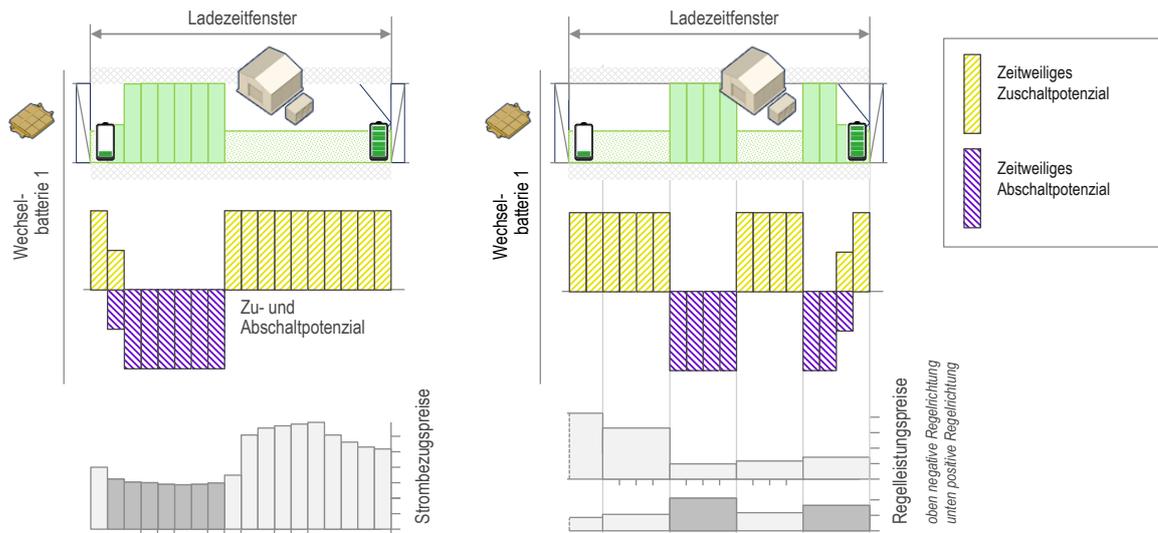


Abbildung 7: Exemplarische Ladeverläufe für eine Wechselbatterie bei einem Aufenthalt in der Station.

In **Abbildung 7** wird demonstriert, wie das Laden von Wechselbatterien in Ausrichtung auf den Stromgroßhandel und/oder den Regelleistungsmarkt verlaufen mag. Dazu sind im unteren Bildteil die prognostizierten Preise für den Strombezug und die prognostizierten Preise für positive Regelleistung sowie negative Regelleistung dargestellt. In der linken Bildhälfte ist beispielsweise ein Ladeverlauf abgebildet, in welchem sich möglichst viel Ladeleistung in den Zeitscheiben mit vergleichsweise niedrigen Strombezugspreisen wiederfindet. Dementsprechend prägt sich das Abschaltpotenzial geballt im Niedrigpreisabschnitt aus und in den übrigen Hochpreisabschnitten besteht Zuschaltpotenzial. In der rechten Bildhälfte ist zum Beispiel ein Ladeverlauf abgebildet, in welchem sich möglichst viel Ladeleistung in den Zeitscheiben mit hohen Preisen für positive Regelleistung wiederfindet. Das bringt in den Abschnitten mit hohen Preisen für positive Regelleistung ein Abschaltpotenzial und in den Abschnitten mit niedrigen Preisen ein Zuschaltpotenzial mit sich.

III. Verwertung von Lastverschiebungspotenzial

Ein Zuschaltpotenzial einer bestimmten Zeitscheibe kann mit dem Abschaltpotenzial einer nachfolgenden Zeitscheibe innerhalb eines Ladezeitfensters zu einem zeitlichen Lastverschiebepotenzial verknüpft werden. Anders herum kann auch ein Abschaltpotenzial einer bestimmten Zeitscheibe mit dem Zuschaltpotenzial einer nachfolgenden Zeitscheibe zusammengetan werden. Durch diese Verknüpfung ist sichergestellt, dass der betreffende Teil eines Ladevorgangs später nachgeholt werden kann, sollte zwecks Erbringung von Regelenergie die Ladeleistung über die im Plan gewählte Leistung erhöht bzw. unter die geplante Leistung abgesenkt werden müssen.

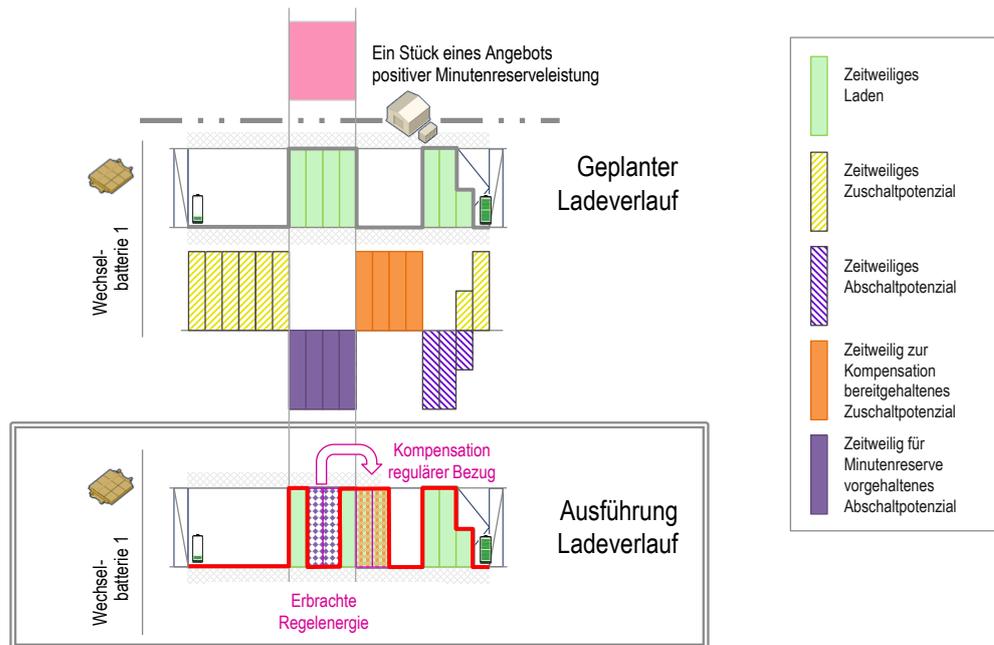


Abbildung 8: Das Prinzip der zeitlichen Verschiebung von Stromverbrauch/-nachfrage

In **Abbildung 8** wird zum Beispiel verdeutlicht, wie einem Gebrauch von Abschaltpotenzial zum Angebots-/Erbringungszweck ein Gebrauch von Zuschaltpotenzial zum Kompensationszweck in einem Angebot positiver Regelleistung entgegen gestellt werden kann. Es wird zum Beispiel ein Angebot positiver Regelleistung gezeigt, welches komplett auf eine Wechselbatterie zurückgeht. Während eine Wechselbatterie in der betreffenden Produktperiode plangemäß geladen wird, kommt es bei der Ausführung des Ladeverlaufs zu einem Abruf zur Erbringung von positiver Regelleistung. Dazu wird das zum Erbringungszweck reservierte Abschaltpotenzial ausgenutzt und das Laden der Wechselbatterie entgegen des geplanten Ladeverlaufs unterbrochen. Nachdem der Abruf erloschen ist, muss die aus der Unterbrechung herrührende Menge elektrischer Energie nachträglich geladen werden. Dazu wird das zu Kompensationszwecken reservierte Zuschaltpotenzial ausgenutzt und entgegen des geplanten Ladeverlaufs das Laden wieder aufgenommen.

In **Abbildung 9** wird gezeigt, wie sich beispielsweise der Gebrauch von Zuschaltpotenzial zum Zweck eines Angebots von negativer Regelleistung sowie einer Erbringung von Regelleistung mit dem Gebrauch von Abschaltpotenzial zum Zweck der Kompensation des Ladezustands bei einer Wechselbatterie gegenüberstellen lässt. Aus zeitlichem Lastverschiebungspotenzial können Elementarbausteine für Minutenreserveangebote generiert werden, welche innerhalb der Ladezeitfenster zu einem Schnipsel gefügt werden. Aus den Schnipseln eines oder mehrerer Stationsaufenthalte von Wechselbatterien können Minutenreserveangebote zusammengestellt werden. Auf dem Minutenreserveleistungsmarkt werden Produkte gehandelt, bei denen ein Anbieter die Regelleistung über einen jeweiligen vierstündigen Zeitraum vorhalten und bei Bedarf Regelleistung erbringen muss. Dies kann bei der Verwendung von Blei-Batteriesystemen in der Regel mit dem Lastverschiebungspotenzial aus Ladezeitfenstern bzw. den Stationsaufenthalten zweier (oder mehr) Wechselbatterien zu Stande gebracht werden.

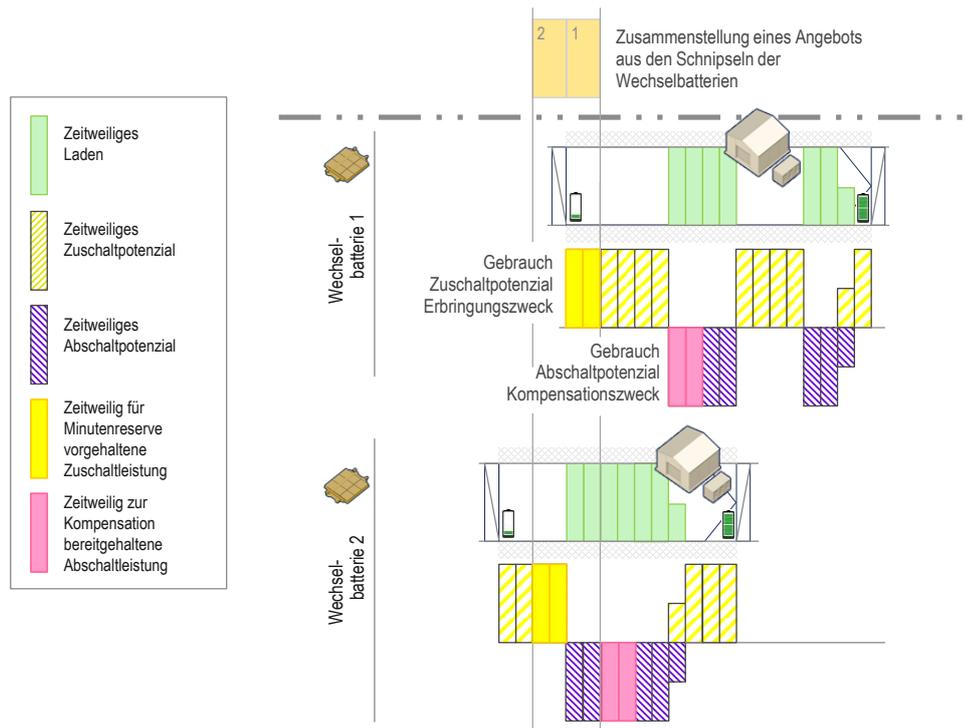


Abbildung 9: Exemplarische Zusammenstellung eines Angebots negativer Regelleistung über die Ladezeitfenster zweier Wechselbatterien

Für gewöhnlich umfasst ein Ladezeitfenster mehrere solcher Produktperioden, wobei neben negativer Regelleistung grundsätzlich auch positive Regelleistung gehandelt werden kann. In **Abbildung 9** wird beispielhaft gezeigt, wie ein Angebot negativer Regelleistung durch Schnipsel aus zwei unterschiedlichen Stationsaufenthalten von Wechselbatterien zusammengestellt werden kann. Das Zuschaltpotenzial der einen Wechselbatterie am vorderen Ende und das Abschaltpotenzial zum hinteren Ende des Ladezeitfensters wären ohne das ergänzende Zuschaltpotenzial nebst dem entgegengesetzten Abschaltpotenzial der anderen Wechselbatterie nicht zu gebrauchen.

Im Verbund sämtlicher Wechselbatterien, die sich vorübergehend an Ladestellen einer Station aufhalten, sind diejenigen Angebotsmöglichkeiten wahrzunehmen, die in Abwägung der Strombezugskosten im festgelegten Ladeverlauf zu den größtmöglichen Leistungspreiserlösen führen. Dabei können sich die Ladezeitfenster mehrerer Wechselbatterien einander teilweise oder ganz überlappen und die Intensität der Ladeprozesse unter Beachtung der fixierten Ladezustände beim Eintritt in das Ladezeitfenster sowie beim Austritt aus dem Ladezeitfenster beliebig gewählt werden, so dass sich das Zuschalt- und Abschaltpotenzial bestmöglich zu zeitlichem Lastverschiebungspotenzial verknüpfen und darüber hinaus zu einem Minutenreserveangebot verwerten lässt.

IV. Optimierungsgesichtspunkte

Insofern im Anwendungsfallbeispiel eines Containerterminalbetriebs der Stromgroßhandel und/oder der Regelleistungsmarkt einbezogen werden können, sind in dieser Arbeit folgende vier Optimierungsgesichtspunkte zu untersuchen:

- Gegenwärtiger Automatisierungsstand
Bei einem ersten Gesichtspunkt („sofortig“) wird das Laden der Wechselbatterien derart geplant, wie es sich nach dem jetzigen Stand der Automatisierung im Feld ergeben würde. Es wird sofortig bei Kontaktierung einer Wechselbatterie in der Station das Laden begonnen und so rasch wie möglich vollständig geladen. Insofern es mit einem Ablaufplan überschaut wird, ist es selbst bei sofortigem Laden möglich, Minutenreserve anzubieten („sofortig+“). Dazu müssten die Wechselbatterien beispielsweise zeitlich so gestaffelt an die Station abgegeben werden, dass sich die nach dem Automatismus geplanten Ladeprozesse aneinander reihen und sich ihr zeitweises Potenzial einer Abschaltung ergänzt. Die Ladeleistung wird zusammenhängend am Beginn des Stationsaufenthaltszeitraums platziert.
- einfältige Ausrichtung auf den Stromgroßhandel
Bei einem zweiten Gesichtspunkt richtet sich die Ablaufplanung allein auf den Handel an der Strombörse aus. Dabei wird die Ladeleistung in den Zeitscheiben festgelegt, für welche die Strombezugspreise auf Basis von Markträumungsergebnissen am niedrigsten einzuschätzen sind („bezugskostenoptimiert“). Es ist zu erwarten, dass die Ladeprozesse laut Plan bis zu zwei oder drei Mal unterbrochen werden. Die Ladeleistung liegt zwar jeweils innerhalb des Stationsaufenthaltszeitraums verteilt vor, ist jedoch in ganzen Stunden zusammenhängend. Unter diesem Gesichtspunkt sind insgesamt die niedrigsten Strombezugspreise zu erwarten. Auch beim bezugskostenoptimierten Laden ist es prinzipiell möglich, Minutenreserve anzubieten („bezugskostenoptimiert+“).
- einfältige Ausrichtung auf den Regelleistungsmarkt
Bei einem dritten Gesichtspunkt richtet sich die Ablaufplanung allein auf den Regelleistungsmarkt aus. Dabei wird die Ladeleistung in den Zeitscheiben platziert, für welche der höchste Regelleistungspreis für positive Minutenreserve respektive der niedrigste Regelleistungspreis für negative Minutenreserve prognostiziert worden sind („erlösoptimiert“). Es ist zu erwarten, dass die Ladeprozesse laut Plan etwa ein oder zwei Mal unterbrochen werden. Die Ladeleistung wird überwiegend zusammenhängend in die vierstündigen Produktperioden für Minutenreserve platziert.
- zweifältige Ausrichtung auf den Stromgroßhandel und den Regelleistungsmarkt
Bei einem vierten Gesichtspunkt wird zwischen den Erlösen durch Minutenreserve und den Kosten des Strombezugs abgewogen. Es wird nur dann Minutenreserve angeboten, sollte dadurch nicht etwa ein Kostennachteil beim Strombezug entstehen („kombiniert“).

D. Zielsetzung der Arbeit

Früher galt es für die Betriebsführung der Stromnetze als wünschenswert, dass Industriebetriebe zu einer atypischen Netznutzung gelangen. Bei den meisten Sondervertragskunden wurde es prämiert, sich in bekannten Spitzenlastzeiträumen zurückzunehmen und stattdessen in Schwachlastzeiträumen zu entfalten. Zudem war es für die Betriebsführung eines konventionellen Kraftwerksparks wünschenswert, dass sich die Abnahmeprofile von Industriebetrieben mit den Abnahmeprofilen privater Haushalte gegenseitig ergänzen. Überwiegend wurden mit Sondervertragskunden für die Nachtstunden günstigere Bezugspreise vereinbart als für die Stunden am Tage.

Infolge des beschriebenen Wandels in der Kraftwerkslandschaft und einem veränderten Preisgefüge an den Strommärkten mag es allerdings zukünftig nicht mehr vorteilhaft sein, einen Industriebetrieb bloß in der nach heutigen Sondervertragskonditionen bewährten Zweiteilung auf Haupt- und Nebentarifzeitraum zu führen. Und es dürfte energiewirtschaftlich unzureichend sein, die Betriebsabläufe allein mit Hilfe einfacher Einsatzentscheidungsgrundsätze für eine Ganzjahresperspektive zu organisieren. Vielmehr mag es angesichts der Fristigkeiten der Elektrizitätsmärkte darauf ankommen, betriebliche Flexibilität von einem Tag zum nächsten Tag zu erkennen und sie in Vorahnung von Handelspreisen zu einer günstigen Abnahmestruktur und disponiblen Lasten umzusetzen. Mit Blick auf Industriebetriebe mit geschlossenen Transportsystemen ergibt sich daraus für die vorliegende Arbeit die folgende Forschungsfrage.

Wie kann der Einsatz von Transportfahrzeugen zur Erfüllung der gestellten Transportanforderungen über einen Tag integriert mit dem Einsatz von Wechselbatterien zur Energiebereitstellung für diese Transportfahrzeuge und der quasi-stationären Bewirtschaftung der elektrischen Batteriespeichersysteme im energiewirtschaftlichen Sinne optimierend geplant werden?

Währendem etwa der Strombezug vergünstigt, Regelleistung angeboten und bei Bedarf Regelenergie erbracht werden soll, muss die Transportleistungsfähigkeit über die ganze Zeit planerisch sichergestellt werden. Es stellt sich für diese Arbeit also ein erster Anforderungskomplex um die Berücksichtigung der gestellten Transportanforderungen und des Energiebedarfs der Fahrzeuge bei Anwendung eines Batteriewechselkonzepts. Die Ablaufpläne sind unter anderem danach zu beurteilen, ob die Transportanforderungen zu einem hohen Grad abgedeckt sind.

Anforderungskomplex 1	Management des Transportsystems
<i>Bewusstsein über die/das ...</i>	Es muss in der Ablaufplanung behandelt werden, dass ...
<i>... Erfüllung vorgesehener Transportauftragsprogramme</i>	<i>... die gestellten Transportanforderungen wie vorherzusehen durch die Fahrzeugflotte abgedeckt sind. (Anforderung 1.1)</i>
<i>... Entwicklung des Ladezustands der Batteriespeichersysteme</i>	<i>... die Fahrzeuge beim Fahren gewisse Energiemengen verbrauchen und ohne elektrische Energie keine Transportanforderungen erfüllen können. (Anforderung 1.2)</i>
<i>... Vornahme von Batterietauschen</i>	<i>... den Fahrzeugen durch Abgabe einer Wechselbatterie elektrische Energie entzogen und durch Aufnahme einer Wechselbatterie zugeführt werden kann. (Anforderung 1.3)</i>
<i>... Nebeneinander von Laden und Entladen</i>	<i>... die Transportprozesse der Fahrzeuge von den Prozessen an den Ladestationen entkoppelt sind. (Anforderung 1.4)</i>

Trotz ihrer Verwendung in den Transportprozessen soll anhand der elektrischen Batteriespeichersysteme eine Beteiligung auf den Elektrizitätsmärkten ermöglicht werden. Daraus ergibt sich für diese Arbeit ein zweiter Anforderungskomplex zur Berücksichtigung der Subaggregationsaufgabe des Containerterminalbetreibers. Die Bewertung von Ablaufplänen sollte sich nach der Höhe der Strombezugskosten und der Erlöse durch das Angebot von Minutenreserveleistung richten.

Anforderungskomplex 2	Management eines Verbunds mit Speichersystemen
<i>Bewusstsein über die/den ...</i>	Es muss in der Ablaufplanung behandelt werden, ...
... <i>Leistungsgrenzen der Anlagen</i>	... dass es eine obere und untere Grenze für die Ladeleistung bei den Wechselbatterien gibt. (Anforderung 2.1)
... <i>Kapazitätsgrenzen von Speichersystemen</i>	... dass die Wechselbatterien nicht überladen werden dürfen. (Anforderung 2.2)
... <i>Nachführung der verbrauchten elektrischen Energie</i>	... dass der Transportprozess einen Energiebedarf hervorruft, welchem durch das Laden von Wechselbatterien und die Vornahme von Batterietauschen entsprochen werden muss. (Anforderung 2.3)
... <i>Verfügbarkeitsrestriktionen</i>	... dass Wechselbatterien nur in der Zeit eines Stationsaufenthalts geladen werden können. (Anforderung 2.4)
... <i>Eingangs-/Ausgangsrestriktionen</i>	... dass Wechselbatterien mit einem bestimmten Eintrittsladezustand an die Station abgegeben werden und mit einem bestimmten Austrittsladezustand von der Station aufgenommen werden. (Anforderung 2.5)
... <i>Stromgroßhandel</i>	... zu welchen Preisen elektrische Energie zu einer Zeit bezogen werden kann. (Anforderung 2.6)
... <i>Regelleistungsmarkt</i>	... in welchen Produkten und zu welchen Preisen Regelleistung angeboten und im Bedarfsfall Regelenergie erbracht werden kann. (Anforderung 2.7)
... <i>Kompensation der Regelenergieerbringung</i>	... dass zeitverzögertes Laden oder das Laden unter Umschalt-eingriffen die Nachführung elektrischer Energie an die Fahrzeuge nicht beeinträchtigt. (Anforderung 2.8)

Die elektrischen Batteriespeichersysteme werden primär für die Energiebereitstellung an die Transportfahrzeuge gebraucht. Je nach Auslastungsgrad des Containerterminals kann deren Energiebedarf stark variieren. Die betriebliche Flexibilität bei der Energiebereitstellung für die Fahrzeuge kann zeitlich wie mengenmäßig in differenzierte Bahnen gelenkt werden. Durch die Entscheidung über die Einsatzzeiträume der Wechselbatterien und die Festlegung von Ladeverläufen kann Umschalt-potenzial zu unterschiedlicher Zeit und in verschiedener Höhe ausgebildet werden. Die Bezugspreise für elektrische Energie sowie die Regelleistungspreise können von einem Tag auf den nächsten Tag sehr wechselhaft sein. Daher ergibt sich bezüglich des energiewirtschaftlichen Gesamtergebnisses folgende Arbeitshypothese.

Eine größtmögliche Reduktion der Gesamtkosten für das Laden der Wechselbatterien ist nur mit ganzheitlicher Berücksichtigung des Energiebedarfs sowie des Batteriewechselkonzepts und der Subaggregationsaufgabe zu erreichen. Planvolle Betriebsabläufe dürften hier signifikant besser abschneiden als die aus dem herkömmlichen Stand der Automatisierung resultierenden Betriebsabläufe.

E. *Wissenschaftliches Vorgehen*

Mit dieser Arbeit wird grundsätzlich ein problemlösungsorientierter Forschungsansatz (Design Science Research Process, siehe Peffers et al. 2006) verfolgt. Sie setzt sich mit der Umstellung eines Containerterminalbetriebs auf den Einsatz batteriebetriebener fahrerloser Transportfahrzeuge und der Anwendung eines Batteriewechselkonzepts auseinander. In der Praxis gibt es derzeit keine Möglichkeit, den Energiebereitstellungsprozess für die Fahrzeuge in Verbindung mit vorhergesagten Transportbedarfen und in Ausrichtung auf die Elektrizitätsmärkte zu planen und zu steuern. In dieser Arbeit werden neuartige Planungs- und Steuerungswerkzeuge entworfen und entwickelt, um die quasi-stationären Batteriespeichersysteme auf die energiewirtschaftlichen Gesamtkosten bezogen bestmöglich einzusetzen. Gemäß der Forschungsfrage werden dabei erst exakte Lösungsansätze ausprobiert und danach näherungsweise Lösungsansätze in Angriff genommen. Der praktische Nutzen dieser Artefakte wird im Rahmen eines mehrtägigen Feldversuchs am Container-Terminal Altenwerder in Hamburg demonstriert. In wie weit die mit den Werkzeugen erstellten Ablaufpläne kostenoptimal sind, wird anhand von abgespeckten Probleminstanzen mit praxisnahen Logistikanforderungen und Elektrizitätsmarktpreisen überprüft, von denen die optimalen Gesamtkosten für die Energiebereitstellung im Überblick des gesamten Lösungsraums bekannt sind.

F. *Aufbau der Arbeit*

In **Teil 2** werden die für das weitere Verständnis notwendigen Grundlagen der Containerlogistik und der Elektrizitätswirtschaft gegeben. Zum einen werden der Aufbau fahrerloser Transportsysteme und die wichtigsten Optionen für die Energiebereitstellung in einem Containerterminal beschrieben. Zum anderen werden die Grundzüge des Bilanzkreissystems für den Stromgroßhandel sowie der Regelleistungsmarkt in Deutschland erklärt. Daran schließt im **Teil 3** eine Einführung in die Ablaufplanung und Ressourcenallokation an. Es werden Formulierungen einschlägiger Planungsproblemstellungen aus Produktion und Logistik vorgestellt, insoweit eine Analogie zu der in dieser Arbeit betrachteten Planungsproblemstellung zu sehen ist. Dies dient teilweise auch zur Klassifikation der Planungsproblemstellung aus dieser Arbeit. Zudem wird auf ausgewählte Lösungsverfahren aus dem Bereich der Unternehmensforschung näher eingegangen. Im **Teil 3** wird zudem ein Überblick verwandter Arbeiten gegeben, die sich entweder mit dem Einsatz von Transportfahrzeugen in einem Containerterminal, dem Einsatz von Batteriespeichersystemen beim Energiemanagement oder dem Einsatz von Kraftwerksanlagen befassen. Im **Teil 4** wird die integrierte Planungsproblemstellung um den Einsatz der Wechselbatterien, der Festlegung von Ladeverläufen und der Vermarktung von Lastverschiebungspotenzialen formal aufbereitet. Im **Teil 5** wird das eigene heuristische Lösungsverfahren **B2M** (kurz für Battery-to-Market) mit seinen vier Problemlösungsmodulen vorgestellt. Es basiert im Wesentlichen auf der Generierung einer Startlösung unter verschiedenen Optimierungsgesichtspunkten und einer Nachbarschaftssuche nach besseren Lösungen. Darum schließt der **Teil 5** mit einer Zwischenuntersuchung zu der Beschaffenheit des Lösungsraums ab und vermittelt einen Eindruck vom Werteverlauf der Zielfunktion. Die Evaluation der Planungsergebnisse und die Überprüfung der gestellten Hypothese werden im **Teil 6** präsentiert. Evaluationsergebnisse präsentiert. Im **Teil 7** wird ein Fazit für die vorliegende Arbeit gezogen und Anregungen für weitere Untersuchungen gegeben.

TEIL 2 ANWENDUNGSBEZOGENE GRUNDLAGEN

A. Grundlagen der Containerlogistik

In diesem Abschnitt werden Grundlagen fahrerloser Transportsysteme, des Transportbereichs eines Containerterminals sowie der Elektrifizierung entsprechender Fahrzeuge und der Ladeinfrastruktur beschrieben.

In den letzten Jahrzehnten sind an deutschen Containerhäfen die Kennzahlen zu Umschlag und Transporten insgesamt deutlich gestiegen, weshalb zunächst die Puffer- und Lagerflächen knapper geworden sind (nachzuschlagen in OECD 2012). Darum wurden gleichzeitig nationale wie auch internationale Containerhäfen neu gebaut oder ausgebaut, so dass sich allmählich ein erheblicher Konkurrenzdruck ergeben hat. Jüngst gab es in Deutschland vielerorts Stagnation oder sogar Rückgang bei den logistischen Kennzahlen, infolgedessen immer neue und effizientere Werkzeuge für Umschlag und Transport der Container benötigt werden, um weiterhin wirtschaftlich nachhaltig arbeiten zu können (siehe dazu ISL 2010; ISL 2013). Bei einem Mangel an Flächen oder hohen Lohnkosten wird meist versucht, einen hohen Automatisierungsgrad beim Umschlag und den Transporten auf der Seeseite oder bei der Lagerung der Container zu erreichen. Mittelfristig müssen die Umschlags- und Transportkapazität eines Containerterminals an die globale wie auch lokale Wettbewerbssituation, das weltweite Handelsvolumen und insbesondere die Entwicklung der Schiffsgrößen angepasst werden. Haasis & Kramer (2010) greifen einige Ansätze für die Terminalentwicklung auf, mit denen sich auf der Managementebene dazu beitragen lässt, den Betrieb wettbewerbsfähig zu halten und insbesondere Energiekosten zu senken. Davon sind die Erneuerung eines Teils der Fahrzeugflotte, die Umstellung auf ein neues Antriebsstrangkonzzept und die damit verbundene Veränderung bei der Energieversorgung für die Fahrzeuge eingeschlossen.

Heutzutage sind maritime Containerterminals darauf ausgerichtet, wachsende Umschlagszahlen bewältigen und immer größere Containerschiffe bedienen zu können. Im internationalen Wettbewerb gilt es, an einer einzelnen Containerbrücke zwischen 40 und 50 Containerbewegungen pro Stunde zu schaffen. Derartige Spitzen der Umschlags- und Transportleistung erfordern in der Zeit der Abfertigung großer Seeschiffe eine hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Transportfahrzeugen. Des Weiteren erwarten insbesondere die Betreiber maritimer Containerterminal, dass in naher Zukunft die Energie- und Rohstoffpreise steigen und die Richtlinien für Schadstoff- und Lärmemissionen in Hafengebieten verschärft werden. Lazic (2006) hinterfragt mit Blick auf ausgesuchte Praxisbeispiele die Umweltwirkungen bei der Verwendung automatisierter Portallagerkrane. Führende internationale Seehafen-Terminals streben an, ihre Umweltverträglichkeit vor Ort durch weitere Elektrifizierung zu verbessern.

I. Fahrerlose Transportsysteme

Fahrerlose Transportfahrzeuge (engl. Automated Guided Vehicle, AGV) sind flurgebundene Fördermittel mit eigenem Fahrtrieb, die zwischen zwei Orten im Fahrkurs selbsttätig geführt oder gesteuert werden. Um sie auf festen Routenzügen oder vorgegebenen Wegstrecken zu halten, werden

verschiedene Führungshilfen verwendet. In den Anfängen wurden Fahrzeuge per Kabel in Führungslinien eingehängt oder aber optisch entlang einer farbig markierten Wegstrecke geleitet. Neuerdings werden Fahrzeuge eingesetzt, die ihre Position selbst bestimmen und auf eine vorgegebene Fahrtstrecke im Wegenetz zurückfinden können. Zur Positionsbestimmung kann zum Beispiel mit Hilfe von Lasern trianguliert werden oder es werden Referenzpunkte durch Transpondersignale erkannt. Die Genauigkeit bei der Positionsbestimmung kann etwa durch Radstandmessungen oder Verrechnung mit gemessenen Beschleunigungswerten, etc. erhöht werden. Dadurch sind weniger Eingriffe in den Fahrbereich wie beispielsweise durch das Aufbringen von Fahrspurmarkierungen oder das Einlassen von Signalgebern erforderlich.

Zu einem fahrerlosen Transportsystem gehören eine Flotte von zumeist dutzenden Transportfahrzeugen, eine flurgebundene Anlage mit fest vorgegebenem Fahrkurs oder Führungshilfen und ein den Fahrzeugen übergeordnetes Steuerungssystem. Schrecker (2000) liefert einen umfangreichen Überblick zu den Gestaltungsmöglichkeiten bei fahrerlosen Transportsystemen. Im Bereich produzierender Unternehmen sind sie bereits seit Längerem zu finden. Es sind bereits einige eng zugeschnittene Lösungen für das Management von Transportfahrzeugen in Fabrikhallen und darüber hinaus entstanden. Ullrich (2014) gibt einen umfassenden Überblick zu den relevanten Komponenten und Funktionen fahrerloser Transportsysteme einschließlich der Energiebereitstellungsoptionen und technologischer Standards bei der Transportauftragsabwicklung in unterschiedlichen Einsatzgebieten. Die dort verwendeten Strategien für den Fahrzeugabruf und die Verkehrskontrolle können jedoch nicht ohne Weiteres auf das Einsatzgebiet eines Containerterminals übertragen werden; Günther & Kim (2005) gehen verstärkt auf die Herausforderungen bei der operativen Planung für Containerterminals mit fahrerlosen Transportsystemen ein.

Anders als in Produktionsumgebungen besteht der Fahrkurs in einem Containerterminal nicht nur aus festen Bahnen oder Zirkeln. Vielmehr enthält er eine Vielzahl von gerichteten Spuren, Knotenpunkten und Wartebereichen, sodass sich Fahrzeuge begegnen sowie einander überholen können. Während die Fahrzeuge in Produktionsumgebungen nicht selten bestimmten Transportwegen starr zugeordnet sind, ergeben sich die Fahrtwege der Containertransporter aus Ursprungs- und Zielort zugewiesener Transportaufträge und/oder der Disposition von Fahrzeugen. In einem Überblick von Stahlbock & Voß (2007) wird deutlich, dass der alltägliche Betrieb eines fahrerlosen Transportsystems in einem Containerterminal vielschichtig zu lösen ist. Es gilt, eine möglichst günstige Zuordnung von Transportmitteln zu Transportaufträgen vorzunehmen, für jedes Transportmittel eine optimale Reihenfolge der zu bedienenden Abhol- und Zustellstationen zu bilden und schließlich konfliktfreie Wege zwischen diesen Stationen zu finden.

Bei Produktionsumgebungen kann häufig von einer statischen Folge von Verarbeitungsaufträgen ausgegangen werden. Die Einsatzplanung der Containertransporter im Fahrbereich auf der Seeseite wird hingegen stark von angrenzenden Umschlagsbereichen beeinflusst. Meier (2008) geht in einem Überblick zu den operativen Planungsaufgaben in einem Containerterminal speziell auf die Interdependenzen zwischen den verschiedenen Terminalbereichen ein. In Importrichtung geht beispielsweise mit einer Umschlagsoperation am Kai immer auch die Vergabe eines Transportauftrags einher. Die Ankunftsrate der Container am Kai und ihre genaue Reihenfolge beim Be- und Entladen der Schiffe kann allerdings vorher nicht genau ausgesagt werden.

II. Containertransport in maritimen Containerterminals

Globale Transportwege erstrecken sich in aller Regel sowohl über Straßen- und Schienennetze als auch über Binnenschiffs- und Seeverkehrsnetze. An den Berührungspunkten dieser Verkehrsnetze bilden sich Containerterminals heraus, an denen zwischen verschiedenen Transportmitteln wie Lastkraftwagen, Bahn und Schiffen umgeschlagen werden kann. In maritimen Containerterminals kann der An- und Abtransport über den See- oder Landweg erfolgen (Brinkmann 2005). Es werden dort Brückenkräne eingesetzt, um Container von Schiffen zu löschen oder diese mit Containern zu beladen. Zur Abfertigung neuerer, größerer Seeschiffe werden oftmals manuelle oder halb-automatische Containerbrücken verwendet, welche über zwei Krankatzen verfügen, so dass ihr vorderer Kranteil durch eine Laschplattform losgelöst vom hinteren Kranteil operieren kann. Beim Siegeszug standardisierter Containerboxen haben sich auch die Betriebsmittel immer weiter verbreitet, mit denen Container auf- und abgeladen, ein- und ausgelagert sowie weiter befördert werden können.

Für den Transport zwischen der Kaimauer und den Stellplätzen der Container werden einfache Zugmaschinen mit Auflieger, bemannte sowie unbemannte Portalhubwagen oder fahrerlose Transportfahrzeuge eingesetzt. An repräsentativen Containerterminals in Europa sind im sogenannten Horizontaltransport jeweils zwischen 80 und 150 Fahrzeuge im Einsatz. Die Fahrzeugflotten sind zahlenmäßig darauf ausgelegt, auch bei gleichzeitigem Eintreffen mehrerer großer Containerschiffe eine schnelle logistische Abwicklung zu ermöglichen. Die Lagerung der Container kann entweder in Form einfach angeordneter Stapel oder zusammenhängender Blöcke erfolgen. Während fahrerlose Transportfahrzeuge fast ausschließlich auf der Seeseite eingesetzt werden, sind einfache Zugmaschinen oder bemannte Portalhubwagen auch zwischen den Stellplätzen und der Hinterlandanbindung zu finden. Auf der Landseite werden heutzutage immer noch die meisten Container mit Lastkraftwagen angeliefert und abtransportiert. Dagegen bietet sich auf der Seeseite der Einsatz von automatisierten Transportfahrzeugen an, um größere Mengen von Standardcontainern effizient umschlagen und Containerschiffe möglichst schnell abfertigen zu können (vgl. Scott 2012; Kemme 2013; Kasiske 2013).



Das Horizontaltransportareal auf der Seeseite eines Containerterminalbetriebs zwischen Containerbrücken und Blocklagern

Ende der 1980er Jahre wurde damit begonnen, fahrerlose Transportfahrzeuge für den Betrieb in einem Seehafen-Terminal zu entwickeln. Zwischen 1987 und 1992 wurden im ECT Delta/Sealand Containerterminal, Rotterdam fahrerlose Transportfahrzeuge in der heute geläufigen Form lasttragender Wagen getestet. Sie sind in der Lage, einzelne Container mit einer Länge von bis zu 45 Fuß oder zwei 20-Fuß-Container aufzunehmen. Innerhalb eines für den Menschen nicht zugänglichen Fahrbereichs

dürfen maximal 20 km/h auf der Geraden und etwa 11 km/h in der Kurve gefahren werden. Aufgrund dieser niedrigen Endgeschwindigkeiten muss eine relativ hohe Anzahl von Fahrzeugen vorgehalten werden, um Wartezeiten der Containerbrücken zu vermeiden. In 1993 wurde erstmals zwischen Blocklagern und Containerbrücken ein vollautomatisierter Transport durchgeführt, wobei die Containertransporter in einem sehr einfachen Ringverkehr betrieben wurden. Sie können sich dank Navigationshilfen und Koppelnavigation auf etwa 3 cm genau positionieren und ermöglichen somit ein zügiges Be- und Entladen unter Kai- oder Lagerkränen. In ihrer Standardausführung für den Terminalbetrieb besitzen automatisierte Containertransporter meist keine eigene Hubvorrichtung; den Transportfahrzeugen werden Container an einem Ort von einem Kran aufgeladen und sie bekommen diese an einem anderen Ort wieder von einem Kran abgeladen. Meist werden fahrerlose Transportfahrzeuge innerhalb eines Flottenverbands betrieben und innerhalb eines geschlossenen Fahrbereichs von einer Software gesteuert. Seit 2007 existieren auch automatisierte Transportfahrzeuge mit eigener Hubvorrichtung (engl. Lift-AGV), die Container von einem Gestell aufnehmen und wieder auf ein Gestell abgeben können. Derartige Gestelle werden in Containerterminals eingesetzt, um Wartezeiten der Transportfahrzeuge bei der Zuführung von Containern an automatisierte oder teilautomatisierte Blocklager bzw. bei der Bereitstellung von Containern aus diesen zu reduzieren (siehe VDL 2012; TEREX 2014).

III. Elektrifizierung von Schwerlastfahrzeugen

Viele Nutzfahrzeuge weisen Fahrprofile auf, bei denen eine Elektrifizierung des Antriebs erwogen werden kann. Bei der Müllentsorgung oder bei Kurierdiensten müssen die Fahrzeuge wiederkehrend bremsen und anfahren. Die Leistungsaufnahme eines Elektromotors kann beim Stillstand des Fahrzeugs ganz zurückgenommen werden, ohne die Fahrbereitschaft einzubüßen. Ein Verbrennungsmotor verursacht selbst im Stillstand geringe Leerlaufverbräuche, um das Fahrzeug fahrbereit zu halten. Es kommt hinzu, dass beispielsweise Müllfahrzeuge wie die meisten anderen Nutzfahrzeuge lediglich mit geringer Endgeschwindigkeit fahren. Gerade in Bezug auf einen niedrigen Drehzahlbereich eröffnen sich bei Elektromotoren im Kennlinienvergleich zu Verbrennungsmotoren gute Möglichkeiten zur Abstimmung der Fahrdynamik. Außerdem können Elektromotoren eher als Verbrennungsmotoren in der Weise gesteuert werden, dass das Fahrzeug lastangepasst anfährt und somit ein geringeres Übel aus dem schlechten Wirkungsgrad im Anfahrbereich gezogen werden kann. Obwohl Elektromotoren direkt ein hohes Drehmoment entfalten können, sollte in der Regel auch bei ihnen der Anfahrbereich rasch durchlaufen werden.

Zusätzlich sind Bemühungen um eine Elektrifizierung des Antriebs dadurch motiviert, dass viele Nutzfahrzeuge aufgeladene Lasten nicht nur horizontal befördern, sondern wie zum Beispiel die Müllfahrzeuge Tonnen anheben und senken und so weiter. Auch bei fahrerlosen Transportfahrzeugen im Containerterminal gibt es eine Ausstattungsvariante mit Hubvorrichtung (siehe Lift-AGV oben). In der Regel sind derartige Zusatzausstattungen aus dem Bordnetz mit zu versorgen und können durchaus eine beträchtliche elektrische Leistungsaufnahme bedeuten.

Flurförderzeuge aus der Lagerhauslogistik zählen im Nutzfahrzeugsegment zu den bislang am weitesten in der Praxis erprobten rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen. Mit ihren Elektromotoren können sie sehr geräuscharm arbeiten und im abgeschlossenen Raum eines Lagerhauses dürfen keine Abgase in die Luft abgegeben werden. Die für den Betrieb der Flurförderzeuge notwendige Energie ist in einem mitgeführten Batteriepack gespeichert, der aus standardisierten Batteriemodulen

zusammengesetzt ist. Für kleine Lasten, die nicht mehr als etwa 1 t wiegen, können dreirädrige Staplerfahrzeuge mit 24 V Nennspannung betrieben werden. Normalerweise werden für Lasten bis zu 2 t vierrädrige Staplerfahrzeuge mit 48 V Nennspannung eingesetzt. Für schwere Lasten bis zu 8,5 t werden die Flurförderzeuge typischerweise mit Antriebssystemen ausgestattet, die Batteriemodule mit 80 V Nennspannung erfordern. In den meisten konkreten Einsatzumgebungen werden die Batteriepacks für Flurförderzeuge auf einen hohen Energieinhalt von 750 Ah Nennladungsträgerkapazität oder mehr pro Batteriemodul ausgelegt. In Relation zur Speicherkapazität des Batteriepacks ergibt sich dann dauerhaft eine moderate Entladeleistung für den Antrieb der Flurförderzeuge. Ähnlich verhält es sich auch bei Fahrzeugen, die Container mit einer Masse von bis zu 60 t zwischen den Containerbrücken am Kai und den Containerlagern im Inneren des Containerterminals transportieren. Die Batteriesysteme für die Fahrzeuge im Containerterminal müssen jedoch deutlich leistungstärker und energiereicher dimensioniert werden als die gängigen Fahrzeugbatterien für Staplerfahrzeuge. Die Betriebsspannung der Batteriesysteme im Containerterminal beträgt 720 V und es kommen Stromstärken von bis zu 300 A zwischen Batteriesystem und Antriebssystem zustande.

Die ersten fahrerlosen Transportfahrzeuge für Containerterminals, die Anfang der 1990er Jahre auf den Markt kamen, besaßen einen diesel-hydraulischen Fahrtrieb. Insofern ein Dieselmotor nicht unter Last angefahren werden kann, wird die von ihm abgegebene Bewegungsenergie mit Hilfe einer Hydraulik auf die Radachsen übertragen. Für einen diesel-mechanischen Antrieb müssten sie ansonsten über eine große und kostspielige Kupplung verfügen, da die Fahrzeuge im Terminal ein hohes Eigengewicht besitzen und ihnen mit den Containern viel Gewicht zugeladen wird. Der Gesamtwirkungsgrad diesel-hydraulischer Containertransporter liegt aufgrund niedriger Wirkungsgrade des Verbrennungsmotors und der Hydraulik bei etwa 20 %. Im Hinblick auf Effizienzvorteile beim lastabhängigen Anfahren, etc. wurde in der Zeit von 2004 bis 2007 ein diesel-elektrischer Antrieb für die fahrerlosen Transportfahrzeuge im Terminal entwickelt. Dabei wird die vom Dieselmotor erzeugte Bewegungsenergie von einem Stromgenerator gewandelt und in einen Stromkreis mit Superkondensator geleitet, aus dem je ein Elektromotor pro Antriebsachse mit elektrischer Energie gespeist wird. Trotzdem weiterhin die größten Wandlungsverluste beim Dieselmotor auftreten, konnte der Gesamtwirkungsgrad bei Fahrzeugen mit diesel-elektrischem Antrieb auf etwa 26 % angehoben werden. Ab 2011 wurde im Containerterminal Altenwerder, Hamburg (CTA) als erstem Terminalstandort ein Prototyp eines batteriebetriebenen fahrerlosen Transportfahrzeugs eingesetzt (HHLA CTA 2011). Es zeigte sich, dass die Energiekosten im laufenden Betrieb und letztlich auch die Gesamtbetriebskosten bei batteriebetriebenen Fahrzeugen geringer sind als beim Einsatz diesel-elektrischer oder diesel-hydraulischer Fahrzeuge (Wieschemann & Wulff 2011). Gerade bei vielen kurzen Fahrzyklen, das heißt vielen Start-Stopp-Manövern, bieten Elektrofahrzeuge einen Effizienzvorteil gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Bei den Transportwegen im Containerterminal treten derartige Fahrprofile auf (Lalik 2011).

IV. Ladeinfrastruktur batteriebetriebener Fahrzeuge

Batterieladeanlagen umfassen Batterieladeräume oder Batterieladestationen, Einzelladeplätze (Ladestellen) und die zum Laden erforderlichen Ladegeräteeinheiten sowie weitere elektrische Einrichtungen. Die elektrischen Batteriespeichersysteme müssen regelmäßig geladen werden, um die Einsatzbereitschaft der Fahrzeuge sicherzustellen. Je nach Batteriespeicherkapazität muss nach kürzerer oder längerer Zeit eine Batterieladeanlage angefahren werden. Wann genau ein Aufenthalt an ei-

ner Batterieladeanlage möglich ist, richtet sich in konkreten Einsatzgebieten unter anderem nach der Beendigung vorangehender Transporte oder festen Routenzügen. Außerdem spielt es eine Rolle, wie viele Einzelladeplätze verfügbar sein werden oder wie viele Wechselbatterien ausreichend geladen wurden. Dies gilt gleichermaßen für die Batteriepacks in einem Flurförderzeug wie für die Batteriesysteme in einem Containertransporter.

Der Tankfüllstand eines diesel-betriebenen Fahrzeugs bzw. der Ladezustand eines batteriebetriebenen Fahrzeugs werden von einem Fahrzeugsteuerungssystem fortlaufend überwacht. Nach Herstellerangaben verfügen diesel-betriebene Fahrzeuge über einen etwa 1200 Liter großen Tank. Bei einem Kraftstoffverbrauch von 8 Liter pro durchschnittliche Betriebsstunde reicht eine Tankfüllung ca. eine Woche im Betrieb rund um die Uhr. Sobald das Fahrzeugsteuerungssystem einen niedrigen Füllstand bemerkt, wird das diesel-betriebene Fahrzeug an eine Tankstelle ausfahren, wo es binnen Minuten von einem Tankroboter betankt wird. Die Nutzspeicherkapazität eines batteriebetriebenen Containertransporters beträgt nach aktuellem Entwicklungsstand etwa 288 kWh. Bei einem Stromverbrauch von rund 15 kWh in einer durchschnittlichen Betriebsstunde reicht eine volle Ladung somit ca. 16 bis 18 Betriebsstunden.

Die elektrische Energie für das Fahren kann auf unterschiedliche Weise bereitgestellt bzw. an die Fahrzeuge in die Transportprozesse abgegeben werden:

- *Einzelladeplätze – zentrales Laden mit Auszeiten*

Bei Bedarf werden die Fahrzeuge an einen von mehreren zentralen Einzelladeplätzen gefahren, so dass dort die Fahrzeugbatterie entweder kabelgebunden oder ggf. auch kontaktlos/induktiv geladen werden kann. Für eine Schwerlastfahrzeugbatterie auf Basis von Blei-Säure-Akkumulatoren ist eine Komplettladezeit innerhalb von etwa sechs bis sieben Stunden verträglich. Erst nach dieser Ladezeit kann das Fahrzeug wieder Transportaufträge übernehmen. Um bei hoher Terminalauslastung die Containerschiffe termingerecht abfertigen zu können, müsste die Flotte der Fahrzeuge praktisch um etwa ein Drittel (also im Verhältnis von Einsatzdauer und Ladedauer) ausgeweitet werden. Dies führt sowohl zu immensen Anschaffungskosten als auch zu einem großen Flächenbedarf. Werden anstelle Fahrzeugbatterien auf Basis von Lithium-Ionen-Akkumulatoren verbaut, so können diese in etwa einer bis anderthalb Stunden an einem Einzelladeplatz geladen werden. Demzufolge müsste die Fahrzeugflotte lediglich um rund ein Zwölftel ausgeweitet werden, wobei letztlich in sämtlichen Fahrzeugen kostspieligere Lithium-Batteriesysteme installiert sein müssten.

- *Gelegenheitsladepunkte – dezentrales Laden mit/ohne Auszeiten*

Wo die Fahrzeuge häufig für einige Zeit zum Stillstand kommen, befinden sich dedizierte Ladepunkte, an denen die Fahrzeugbatterie entweder kabelgebunden oder kontaktlos/induktiv geladen wird. An diesen Stellen wird eine Gelegenheitsladung durchgeführt, um den Ladezustand einer teilentladenen Fahrzeugbatterie signifikant anzuheben. Obwohl bei betriebsbedingten Stillstandzeiten der Vollladezustand eventuell nicht erreicht wird, kann gelegentlich so viel elektrische Energie rückgeführt werden, wie in der bisherigen Einsatzzeit verbraucht wurde. Wenn Containertransporter an einen Wartebereich in der Nähe eines Brückenkrans disponiert werden, ergibt sich dort meist eine zur Gelegenheitsladung ausreichende Stillstandzeit. Bei Teilauslastung des Containerterminals übersteigt die Stillstandzeit beim Einsatz der Fahrzeuge ohnehin häufig die Fahrtzeit. Für das Laden in der Größenordnung einer Schwerlastfahrzeugbatterie ist induktives Laden mit Hochleistungs-Übertragung bis dato wenig er-

probt. Unabhängig davon wären induktive Ladepunkte vermeintlich nur von Containertransportern ohne Last befahrbar, da sich ansonsten mit dem größeren Gesamtgewicht in der Fahrbahn leicht Furchen bilden, wodurch die dicht unter der Oberfläche liegenden Induktionsspulen beschädigt werden könnten.

- Batteriewechsel – zentrales Laden ohne Auszeiten

Die während eines Einsatzes entladenen Batteriesysteme werden an einer oder mehreren zentralen Batterieladestellen gegen frisch geladene Batteriesysteme getauscht. Sämtliche Batteriesysteme sind in Wechselrahmen einzubringen, so dass sie den Fahrzeugen automatisch abgenommen und ihnen aufgegeben werden können. Mit der Einrichtung eines Pools von Wechselbatterien ist es dann prinzipiell möglich, das stationäre Laden fast vollständig vom Fahrbetrieb der Fahrzeuge zu entkoppeln. Bei jeder Ausfahrt eines Fahrzeugs zur Station muss zumindest eine Wechselbatterie genügend geladen sein, so dass keine Einbußen bei der Transportleistung daraus hervorgehen. Der Flächenbedarf ist selbst bei der Verwendung von Blei-Batteriesystemen gering, da die Wechselbatterien in der Station hochgelagert werden können.



Die Wechselbatterien der autonom fahrenden Schwerlastfahrzeuge werden in einer zentralen Station mit Hochregallager geladen

Auf den ersten Blick erscheint die Anwendung eines Batteriewechselkonzepts im Betriebs- und Investitionskostenvergleich besser abzuschneiden als andere Energiebereitstellungsoptionen für die Fahrzeuge. Es kommt hinzu, dass durch überzählige Wechselbatterien eher als bei fest eingebauten Fahrzeugbatterien eine gewisse kurzfristige Ausfallsicherheit gewährleistet werden kann.

Es gibt heutzutage verschiedene Konzepte zum Batteriewechsel. In der Warenhauslogistik und ähnlichen Anwendungsgebieten werden überwiegend teilautomatisierte Systeme eingesetzt. Die Wechselbatterie wird dem Fahrzeug über ein manuell gesteuertes Gerät entnommen/zugeführt und anschließend vom Bediener per Hand kontaktiert. Sie sind zur Handhabung von standardisierten Traktionsbatterien wie etwa den sogenannten Gabelstaplerbatterien ausgelegt. Das für batterieelektrische Transportfahrzeuge im Containerterminal benötigte Blei-Batteriesystem wiegt jedoch etwa 10 t, was der fünf- bis zehnfachen Masse einer gängigen Gabelstaplerbatterie entspricht. Es gibt Batteriewechselstationen mit bis zu zwei Regalbediengeräten an einem Hochregallager und den darin eingerichteten Ladestellen. Der Batteriewechsel kann dort vollautomatisiert vollzogen werden.

B. **Grundlagen der Elektrizitätswirtschaft**

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen des Bilanzkreisabrechnungssystems der Marktsphäre in Deutschland und ausgewählte handelbare Produkte des Strommarkts und des Regelleistungsmarkts beschrieben.

Das derzeitige Marktmodell bewirkt, dass Stromhändler wie auch Stromlieferanten durch die Bilanzierung von Strommengen dazu beitragen, einem Ungleichgewicht zwischen der Einspeise- und Entnahmeleistung vorzubeugen. Für die Abwicklung eines Handelsgeschäfts reicht eine bloße Mengenangabe nicht aus; vielmehr werden stets Angaben im Fahrplanformat gehandelt (siehe Crastan 2012). Ein Fahrplan ist eine Zeitreihe mit Leistungsmittelwerten in einem Zeitraster von Viertelstunden, die von einem Bilanzkreis abgegeben und von einem anderen Bilanzkreis aufgenommen wird. Dabei kann der Handel mit Fahrplanenergie unabhängig von Stabilisierungsaufgaben verstanden werden (Ströbele, Pfaffenberger & Heuterkes 2012); durch die Einführung des Bilanzkreissystems kann elektrische Energie grundsätzlich „frei im Netz“ gehandelt werden. Nichtsdestotrotz ist gegenüber dem Übertragungsnetzbetreiber ein Bilanzkreisverantwortlicher zu benennen, welcher die Verantwortung für die wirtschaftlichen Auswirkungen von Abweichungen zwischen Einspeisung/Beschaffung und Lieferung/Entnahme im Bilanzkreis trägt.

In der Bilanzkreisführung von Stromhändlern und Stromlieferanten treffen Beschaffung und Lieferung aus der Fahrplanwelt sowie Einspeisung und Entnahmen der Realwelt zusammen (Horstmann & Cieslarczyk 2006). Bis zu einer Vorlaufzeit von derzeit knapp einem Tag versucht ein Stromlieferant für jeden Bilanzkreis und jede Viertelstunde die Leistungsmittelwerte der beschafften Fahrplanenergie und der prognostizierten Einspeisung mit der zu liefernden Fahrplanenergie und den voraussichtlichen Entnahmen seiner Endkunden abzugleichen. Die Kosten der Netzstabilisierung, insbesondere der Erbringung von Regelenergie, werden vom Regelzonenbetreiber über den Bilanzkreissaldo in einem Umlageverfahren mit den Bilanzkreisverantwortlichen auf Viertelstundenbasis abgerechnet. Bei einem Leistungsdefizit bzw. Leistungsüberschuss im Saldo der Leistungsmittelwerte von tatsächlicher Einspeisung und Entnahme mit den aus anderen Bilanzkreisen aufgenommenen sowie in andere Bilanzkreise abgegebenen Energiemengen wird dem Stromlieferant vom Bilanzkreisverantwortlichen positive bzw. negative Ausgleichsenergie in Rechnung gestellt.

I. **Bilanzkreisabrechnung**

Elektrische Energie unterscheidet sich von anderen Waren insbesondere dadurch, dass sie als solches nicht gelagert werden kann und ihr Austausch nur netzgebunden stattfinden kann. Im gesamten Stromnetz muss jederzeit die Summe der Netzeinspeisungen mit der Summe der Netzausspeisungen übereinstimmen, um einen sicheren Betrieb des Netzes bei einer stabilen Frequenz und Spannung zu gewährleisten (Servatius, Schneidewind & Rohlfing 2011). Streng genommen, wird elektrische Energie nicht gegenständlich als Ware gehandelt, sondern vielmehr als eine Leistung, die sowohl physisch als auch rein finanziell zu erfüllen ist.

Gemäß Beschluss der Bundesnetzagentur gelten in der Elektrizitätswirtschaft die Marktregeln für die Durchführung der Bilanzkreisabrechnung Strom (MaBiS) (Bundesnetzagentur 2012). Wer auch immer eigens elektrische Energie abgibt oder beschafft, hat nach den geltenden Anforderungen der Elektrizitätsmärkte zumindest einen Bilanzkreis zu führen. Somit müssen Stromhändler und

Stromlieferanten in die Verantwortung für einzelne Bilanzkreise treten, in denen sie eigene Erzeugungsanlagen sowie Letztverbraucher zusammenfassen und ihre Handelsgeschäfte abwickeln. Wie in **Abbildung 10** veranschaulicht, muss für einen Bilanzkreis über alle Ein- und Ausspeisepunkte ein virtuelles Energiemengenkonto als Bestandskonto geführt werden. Darin soll ein Gleichgewicht zwischen den Einspeiseleistungen aus den zugeordneten Erzeugungsstellen und den Fahrplanlieferungen von anderen Bilanzkreisen einerseits (Beschaffung) mit den Ausspeiseleistungen der zugeordneten Entnahmestellen und den Fahrplanlieferungen zu anderen Bilanzkreisen andererseits (Abgabe) gegeben sein. In einem Zeitraster von Viertelstunden werden die Salden dieser virtuellen Energiemengenkontoen gezogen.

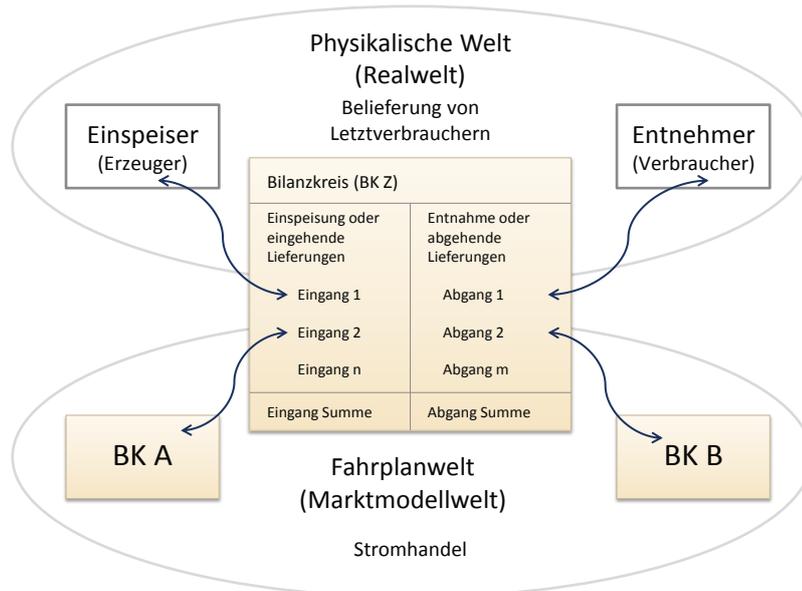


Abbildung 10 Bilanzieller Zusammenhang zwischen der Belieferung von Letztverbrauchern in der Realwelt und den Fahrplanlieferungen in der Marktmodellwelt

Je nachdem wie verlässlich die Erzeugungs- und Verbrauchsprognose sind, wird am Strommarkt sowohl langfristig als auch kurzfristig gehandelt. Natürlich kann dabei gleichwohl rein spekulativ wie auch für vertriebliche Zwecke oder den eigenen Bedarf am Markt teilgenommen werden. Wie in **Abbildung 10** angedeutet ist, kann ein Bilanzkreis mehrere, einen oder keinen Netznutzer wie zum Beispiel Kraftwerke oder Letztverbraucher umfassen. Bei Bilanzkreisen ohne Netznutzer wird auch von einem Handelsbilanzkreis gesprochen.

In jeder der Regelzonen im deutschen Netzregelverbund kann es beliebig viele Bilanzkreise geben, die miteinander Geschäfte tätigen können. Aus den Handelsgeschäften gehen verbindliche Fahrplanvereinbarungen hervor, wobei der eigentliche Zeitraum der Belieferung mehrere Jahre, Tage oder bloß einige Stunden später liegen kann. Entsprechend der ausgehandelten Fahrpläne werden schließlich innerhalb des Belieferungszeitraums Einspeisungen in das Netz bzw. Entnahmen aus dem Netz vorgenommen. Das auf dem Strommarkt gehandelte Volumen kann ein Vielfaches der tatsächlichen Bedarfsmengen zwischen Quellen und Senken des Stromversorgungssystems betragen.

Zum kurzfristigen Ausgleich unvorhergesehener Störungen des Leistungsgleichgewichts, zum Beispiel infolge von Kraftwerksausfällen und drastischer unerwarteter Verbrauchsänderungen kontrahieren die Übertragungsnetzbetreiber Regelleistung. Wie in **Abbildung 11** ersichtlich, übernehmen sie in ihren Netzgebieten die Verantwortung für bestimmte räumliche Regelzonen. Wenn sich tat-

sächlich ein Leistungsungleichgewicht ereignet, was sich in der Anhebung oder dem Absinken der Netzfrequenz bemerkbar macht, wird von den Regelzonenverantwortlichen innerhalb des Netzregelverbunds Regelenenergie abgefordert.

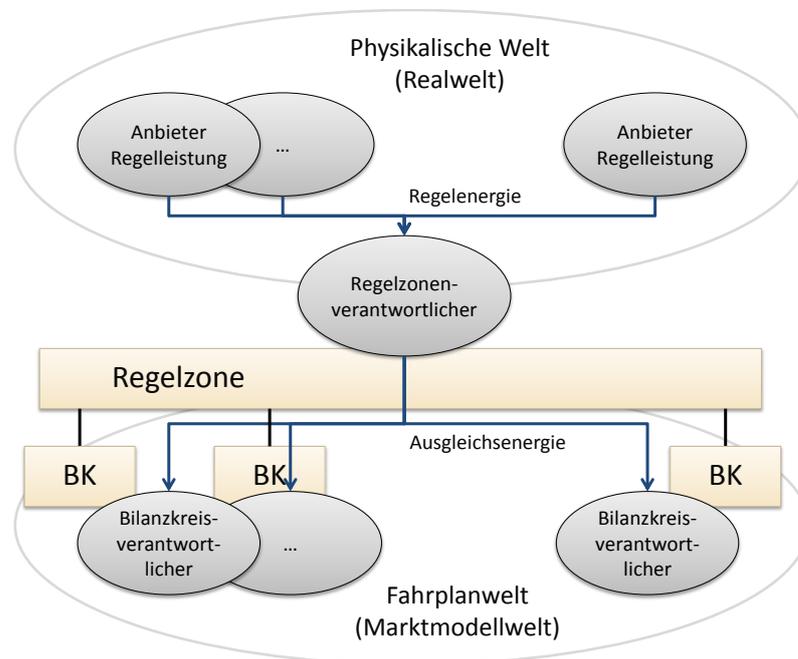


Abbildung 11 In der Fahrplanwelt wird Ausgleichsenergie abgerechnet/verrechnet, wenn Fahrplanabweichungen eingetreten sind, das heißt Abweichungen in der Leistungsbilanz bestehen.

Alle Regelzonenverantwortlichen sind darauf angewiesen, dass entlang aller Ein- und Ausspeisepunkte abrechnungsrelevante Energiedaten erfasst werden. Dazu werden innerhalb der Regelzone die Lastgänge an entsprechenden Zählpunkten gemessen bzw. durch standardisierte Lastprofile rechnerisch ermittelt. Wie in **Abbildung 11** dargestellt, kann ein Regelzonenverantwortlicher nachträglich auf Viertelstundenbasis aus den Bilanzkreissalden ermitteln, welche Kosten für Ausgleichsenergie den Bilanzkreisverantwortlichen anteilig zu berechnen sind. Diese Abrechnung hat gegenüber dem Bilanzkreisverantwortlichen spätestens zwei Monate nach dem jeweiligen Liefermonat zu erfolgen.

II. Stromgroßhandel

Beim Handel mit elektrischer Energie ist generell vorgesehen, dass über gewisse Zeiträume hinweg eine mittlere elektrische Leistung geliefert werden muss. Grundsätzlich können zwei Marktteilnehmer außerbörslich einen beliebigen Lieferzeitraum vereinbaren. Damit es jedoch zu einem liquiden Marktplatz kommt, muss sich eine ausreichend große Zahl von Marktteilnehmern auf die Einteilung der Lieferzeiträume verständigen. Ist eine Zeiteinteilung bei bilateralen Absprachen sehr gängig, kann sich daraus ein standardisiertes Produkt für den Börsenhandel entwickeln.

- Im langfristigen Handel wird versucht, die Liquidität hoch zu halten, indem nur wenige Produkte gehandelt werden können. An der Strombörse für Deutschland wird für Lieferungen auf Termin eine einfache Zweiteilung vorgesehen.
 - Beim Grundlastprodukt muss von der Stunde 1 bis zur Stunde 24 eines Tages, also für einen Tag rund um die Uhr, geliefert werden.

- Beim Spitzenlastprodukt erfolgt die Belieferung von der Stunde 9 bis zur Stunde 20 eines Tages.
- Im kurzfristigen Handel wird mit Produkten einzelner Viertelstunden, ganzer Stunden und Blöcken mehrerer Stunden gehandelt.
 - Im Vortagshandel wird für einzelne Stunden ein Auktionshandel vorgenommen. Die Liquidität wird dadurch gefördert, dass nur zu einem bestimmten Handelszeitpunkt ein Markträumungspreis bestimmt wird. Für Deutschland können bis 12:00 Uhr eines Handelstages Gebote für die Belieferung in einer bestimmten Stunde des Folgetages abgegeben werden. Die Ergebnisse der sogenannten Stundenauktionen werden um 12:40 Uhr veröffentlicht. Aufgrund des konzentrierten Handelsvolumens sind sie eine wesentliche Referenz für die Bepreisung von Stromprodukten im Stundenraster.
 - Im tagaktuellen Handel wird dagegen für jeden Viertelstunden- und Stundenblock des Tages fortlaufend ein Marktpreis festgestellt und es können permanent Handelsgeschäfte abgeschlossen werden. Dieser kontinuierliche Handel eröffnet um 15:00 Uhr des Vortags und reicht jeweils bis zu 45 Minuten vor Lieferbeginn.

Im Vortagshandel werden deutlich höhere Handelsumsätze gemacht als im tagaktuellen Handel. Dies liegt darin begründet, dass jeder vertriebsorientierte Händler zur Belieferung von Letztverbrauchern Bilanzkreise führen muss. Der Vertriebshändler tritt somit auch als ein Bilanzkreisverantwortlicher auf, der verpflichtet ist, um 14:30 Uhr des Vortags einen Fahrplan im Viertelstundenraster an den Regelzonenverantwortlichen zu melden. Das heißt für jede Viertelstunde müssen entsprechend der Lieferverpflichtungen des Vertriebshändlers die in Bilanzkreisverantwortung nominierten Strommengen durch beschaffte Mengen oder eigens erzeugte Mengen gedeckt sein. Der nominierte Fahrplan bildet die Bezugswerte gegenüber der tatsächlichen Belieferung von Letztverbrauchern, also den Stromkunden des Vertriebshändlers. Weicht die tatsächliche Belieferungsmenge im Viertelstundenraster von der nominierten Strommenge ab, so wird dem Vertriebshändler als Bilanzkreisverantwortlichen vom Regelzonenbetreiber in der Differenz der Strommengen Ausgleichsenergie berechnet.

III. Regelleistungsmarkt

Um die Systemstabilität zu erreichen, erfolgt permanent eine Primär-, Sekundär- und Tertiärregelung, die bei einer Sollfrequenzabweichung einander zeitlich ablösen. Die verbundnetzweite Regelung auf eine Sollfrequenz von 50 Hz sieht zwei Regelrichtungen vor. Wenn die Netzfrequenz bedeutend unterhalb der Sollfrequenz liegt, muss positive Regelenergie erbracht werden. Umgekehrt muss negative Regelenergie erbracht werden, wenn die Netzfrequenz oberhalb der Sollfrequenz liegt.

Die Regelleistungen werden von den Übertragungsnetzbetreibern in der Regelzonenverantwortung in öffentlichen Ausschreibungsverfahren beschafft. Anbieter von Regelleistung nehmen an einer solchen Ausschreibung durch ein Gebot mit Leistungs- und Arbeitspreis teil. Die Vorhaltung einer Regelleistung wird vom Regelzonenbetreiber durch Zahlung eines Leistungspreises pauschal vergütet. Wird diese Regelleistung dann tatsächlich abgerufen, wird die Erbringung der Regelenergie vom Regelzonenbetreiber Zahlung eines Arbeitspreises mengenmäßig vergütet. Interessanterweise können der gebotene Leistungs- und Arbeitspreis auch negativ sein, das heißt der Regelleistungsanbieter kehrt die Zahlungsrichtung um. Dies kann insbesondere beim Angebot negativer Regelleistung sinn-

voll sein, weil negative Regelenergie erbracht werden kann, anstatt regulär Strom von einem Lieferanten zu beziehen.

Um zu gewährleisten, dass schnell und bedarfsgerecht reagiert/geliefert werden kann, stellen Regelzonenverantwortliche Anforderungen an ihren Anbieterkreis wie beispielsweise zum Grad der Abrufautomatisierung, der Aktivierungsgeschwindigkeiten, der maximalen Dauer einer Schalthandlung bis hin zu Mindestangebotsmengen, etc.

- Die Sekundärreserve muss von den Übertragungsnetzbetreibern bereitgestellt werden, um die Primärreserve bei fortbestehenden Frequenzabweichungen nach spätestens fünf Minuten komplett abzulösen. Wie bei der Primärreserve sind alle Regelleistungsanbieter mit der Leitwarte des jeweiligen Regelzonenverantwortlichen verbunden und tauschen Verfügbarkeitsdaten aus. Der Abruf von Regelenergie erfolgt hier vollautomatisiert unter den bezuschlagten Anbietern. Bei Sekundärreserve muss bereits 30 Sekunden nach Aktivierung eine Reaktion durch eine Leistungsanpassung in Höhe von 1 MW erkennbar sein. Sekundärreserve wird wie auch die Primärreserve wöchentlich ausgeschrieben. In einer solchen Wochenausschreibung gibt es eine Einteilung in die Hauptzeit von 08:00 Uhr bis 20:00 Uhr und die Nebenzeit von 00:00 Uhr bis 08:00 Uhr und von 20:00 Uhr bis 24:00 Uhr. Es stehen also insgesamt vier Regelleistungsprodukte für Sekundärreserve zur Verfügung.
- Die Minutenreserve wird von Übertragungsnetzbetreibern bereitgestellt, um die Sekundärreserve bei langwierigen Frequenzabweichungen nach fünf bis fünfzehn Minuten teilweise abzulösen. Der Abruf von Regelenergie erfolgt hier teilautomatisiert. Minutenreserve wird täglich ausgeschrieben. Es gibt eine zeitliche Einteilung in sechs vierstündige Blöcke in der Zeit von 00:00 Uhr bis 04:00 Uhr, 04:00 Uhr bis 08:00 Uhr und so weiter.

In der Ausschreibung wird der Regelzonenverantwortliche bis zu einer gewissen Menge Zuschläge an die Anbieter von Regelleistung erteilen. Die Angebotsreihenfolge für die Zuschlagserteilung richtet sich allein nach dem gebotenen Leistungspreis. Bei der Feststellung der Ausschreibungsmengen für Regelleistung einer Regelzone wird auch die dort installierte Leistung von Windkraft- und Photovoltaikanlagen berücksichtigt. Denn diese verfügen im Unterschied zu konventionellen Kraftwerksbetrieben nicht über eine gesicherte Erzeugungs- und Einspeiseleistung.

Die Aktivierung/Deaktivierung zur Erbringung von Regelenergie geht von Leitwarten der Regelzonenverantwortlichen aus. Beim Abruf richtet sich die Angebotsreihenfolge nach dem gebotenen Arbeitspreis.

IV. Virtuelle Kraftwerke

Die von einem Dargebot von Sonne und Wind abhängigen Anlagen sind bezüglich ihrer Stromerträge und letztlich der Einspeisung ins Stromnetz weniger planbar als solche Anlagen, die im Rückgriff auf fossile Energieträger Strom erzeugen. Anders als bei der Aushandlung von Fahrplänen zwischen konventionellen Kraftwerksbetrieben und Großhändlern kann der Betreiber einer Windkraft- oder Photovoltaikanlage keine fahrplanmäßigen Erträge garantieren – bei einer Mehrzahl von Anlagen im besten Fall eine zutreffende Ertragsprognose liefern. Darum hat sich auch in der Ausrichtung auf die Strommärkte das Konzept virtueller Kraftwerke etabliert, um mit einer Durchmischung von planbaren Kraftwerksbetrieben und prognostizierbaren Windkraft- und Photovoltaikanlagen die Fahrpläneinhaltung gewährleisten zu können (Arndt, von Roon & Wagner, 2010; Mackensen, Rohrig &

Emanuel, 2008). Ein virtuelles Kraftwerk ist eine Zusammenschaltung von dezentralen, selbständigen Kraftwerken (z.B. Blockheizkraftwerke) kleinerer Leistung zu einem Verbund – oft auch in Verbindung mit Speicher- und Lastmanagement – der durch ein geeignetes Kommunikationsnetz gesteuert wird. Die Verbundbildung zielt darauf ab, die Bereitstellung von Fahrplanenergie und die Bereitstellung von Systemdienstleistungen in gleicher Qualität wie konventionelle Kraftwerke auf den entsprechenden Märkten anbieten zu können. Durch die Kombination von gut steuer- und vorher-sagbaren Anlagen mit dargebotsabhängigen Anlagen lassen sich so auch die weniger gut zur Einzel-vermarktung geeigneten Anlagen in den Stromgroßhandel und den Regelleistungsmarkt integrieren. Nikonowicz & Milewski (2012) liefern eine Übersicht über verschiedene Projekte mit dem Konzept virtueller Kraftwerke und die verschiedenen Verbundbildungsstrategien.

TEIL 3 PLANUNGSMETHODIKEN UND VERWANDTE ARBEITEN

A. *Gängige Planungsmodelle*

Diese Arbeit setzt sich bezüglich der Energiebereitstellung für Transportfahrzeuge mit einer Mischform von deterministischer Ablaufplanung und Ressourcenallokation auseinander.

Mit gewissen Freiheitsgraden ist darüber zu entscheiden, von welcher Art und zu welcher Zeit eine Aktivität durchgeführt werden soll und welche Ressourcen auf sie abgestellt werden.

Es wird sozusagen zukünftiges Handeln durch Abwägen der verschiedenen Handlungsalternativen gedanklich vorweggenommen und sich für die günstigste Handlungsweise entschieden. In diesem Abschnitt wird eine Einführung in gängige Planungsmodelle gegeben.

In der Ablaufplanung werden im Allgemeinen die Auslastung und/oder die Belegung einer Menge limitierter Ressourcen durch eine Menge von Aktivitäten betrachtet, wobei unterschiedliche Nebenbedingungen zu berücksichtigen sind und bestimmte Optimierungsgesichtspunkte verfolgt werden können (engl. Resource Scheduling, siehe Sauer 2004). Durch die Festlegung von konkreten Start- und Endzeitpunkten für sämtliche Aktivitäten wird ein Ablaufplan erstellt.

Demgegenüber sind bei der Allokationsplanung im Allgemeinen lediglich Bedürfnisse bekannt, die in bestimmten Zeitabschnitten auftreten und durch Zuteilung von Ressourcen zu befriedigen sind (engl. Resource Allocation, siehe Ibaraki & Katoh 1989). Es ist darauf zu achten, dass die festgelegte Ressourcenzuteilung zu jeder Zeit immer gleich oder größer dem vorgegebenen Ressourcenbedarf ausgehen muss. Häufig sind Mischformen der Ablaufplanung und der Ressourcenallokation vorzufinden, so dass die Bedürfnisse durch bestimmte Typen von Aktivitäten befriedigt werden, aus denen sich über die Zeit bestimmte Ressourcenanforderungen ergeben (engl. Mixed Scheduling and Resource Allocation, Huguet & Lopez 2000). Es ist darüber zu entscheiden, welche Ressourcen zu welcher Zeit eingesetzt und gegebenenfalls miteinander verknüpft werden, um die sich abzeichnenden Ressourcenanforderungen zu erfüllen und typgerecht Aktivitäten darauf begründen / einplanen zu können. Wie auch in dieser Arbeit wird oftmals davon ausgegangen, dass sich sämtliche Aktivitäten deterministisch einplanen lassen. Das bedeutet, es dürften bei der Realisierung eines Ablaufplans und der festgelegten Ressourcenallokation keine unvorhergesehenen Ereignisse eintreten.

Die Projektablaufplanung mit Ressourcenzuteilungen wird zumeist als eine verallgemeinerte Planungsproblemstellung hergenommen (engl. Resource-Constrained Project Scheduling). Sie steht seit Jahrzehnten im Mittelpunkt des Interesses vieler Forscher und es gibt zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis. Von Chen, Potts & Woeginger (1998) wird gezeigt, dass der Berechnungsaufwand mit der Anzahl der betrachteten Ressourcen und der Anzahl einzelner Zeitscheiben überproportional zunimmt. Ebenso wie zahllose weitere Forscher zählen Blazewicz et al. (2007) diese Problemstellung allgemein hin zu der Klasse der NP-schweren Probleme.

Bei der Ablaufplanung in Produktion und Logistik wird grob gefasst wie bei der Planung eines Projektablaufs vorgegangen: In der Projektplanung werden Teilprojekte bis hin zu einzelnen Vorgängen zeitlich angeordnet und ihnen Ressourcen des Projekts zugewiesen (engl. Project Scheduling, siehe Artigues, Demassey & Néron 2010); in der Produktions- und Logistikplanung wird hingegen über

Aufträge und Operationen gesprochen (engl. Production Scheduling, siehe Herrmann 2006). Im Bereich der Produktion wird schwerpunktmäßig der Einsatz von Maschinen, Werkern und weiteren Betriebsmitteln geplant. Während in der Projektplanung zumeist lediglich Personalressourcen zur Bearbeitung von Vorgängen zugeordnet werden, werden im Bereich der Produktionsplanung durchaus Ressourcen unterschiedlichen Typs behandelt. Auch die erforderlichen Transportzeiten oder die Transferzeiten von Werkern oder Auftragsteilen zwischen den einzelnen Maschinen müssen dabei in der Regel explizit berücksichtigt werden (Pinedo 2012 oder Domschke et al. 2013).

I. Ressourcenbeschränkte Projektplanung

Dieser Unterabschnitt führt in die ressourcenbeschränkte Projektplanung ein und lässt die in dieser Arbeit betrachtete Planungsproblemstellung nach der Beschaffenheit der Ressourcen und Aktivitäten oberflächlich einordnen.

Einführung 1: Ressourcenbeschränkte Projektplanung

Eine Planung eines Projektablaufs und die Zuteilung von Ressourcen werden in einem diskreten Planungszeitraum $\mathcal{T} = \langle t_1, t_2, \dots, t_h \rangle, t_i \in \mathbb{N}, 1 \leq i \leq h$ vorgenommen.

Es seien eine Menge $\mathcal{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}, m \in \mathbb{N}$ von Ressourcen sowie eine Aktivitätenmenge $\mathcal{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}, n \in \mathbb{N}$ gegeben.

Mit einem Vektor $\mathcal{B} = (B_1, B_2, \dots, B_m)$ und der Abbildung $\mathcal{B} := \{(R_k, B_k) | 1 \leq k \leq m\}$ seien die Anfangskapazität bzw. der Anfangsvorrat der Ressourcen gegeben.

Mit einer Matrix $\mathcal{b} = ((b_1^1, \dots, b_n^1), \dots, (b_1^m, \dots, b_n^m))$ und der Abbildung $\mathcal{b} := \{((A_x, R_y), b_x^y) | 1 \leq x \leq n, 1 \leq y \leq m\}$ seien die Ressourcenanforderung der Aktivitäten gegeben. Es bezeichnet somit b_x^y die Anforderung von der x -ten Aktivität für die y -te Ressource.

Ein Projektplan enthält für jede Aktivität eine Zuordnung zu einem Zeitintervall und zu den benötigten Ressourcen. Dabei wird durch $s, e: \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{T}$ der Start- bzw. Endzeitpunkt für eine Aktivität festgelegt.

Die Zuordnung von Ressourcen wird durch $assgn: \mathcal{A} \times \mathcal{R} \rightarrow \mathbb{B}$ entschieden.

Ressourcennutzung

Eine grundsätzliche Einschränkung liegt darin, dass mit geplanten Aktivitäten zu keiner Zeit die Verfügbarkeit von Ressourcen verletzt werden darf. Nach Herroelen (2005) werden in der Projektplanung bis dato drei Nutzungsarten von Ressourcen unterschieden:

- Erneuerbare Ressourcen stehen nach der Bearbeitung eines Vorgangs zur Bearbeitung anderer Vorgänge zur Verfügung. Werden erneuerbare Ressourcen in einer Zeitscheibe voll ausgelastet bzw. ist ihre Anzahl/Quantität verplant/belegt, so mögen sie losgelöst davon in einer anderen Zeitscheibe im Planungszeitraum weiterhin noch verfügbar sein. Neumann & Schwindt (2003) sehen beispielsweise verschleißfreie Werkzeuge im Sinne der Projektplanung als erneuerbare Ressourcen an.

- Partiell erneuerbare Ressourcen unterliegen zusätzlichen zeitlichen Beschränkungen. In vorgegebenen Zeitabschnitten kann ihre Kapazität vorübergehend komplett erlöschen. Böttcher & Drexl (1999) halten Schicht- oder Wochenendarbeiter für ein gutes Beispiel für partiell erneuerbare Ressourcen im Sinne der Projektplanung.

Die Belegung/Auslastung einer erneuerbaren Ressource durch eine bestimmte Aktivität kann mit einem Ausschnitt einer Pulsfunktion ausgedrückt, der beim Startzeitpunkt der Aktivität beginnt und beim Endzeitpunkt endet (siehe dazu Chaleshtarti & Shadrokh, 2011). Der Summenwert dieser Funktionsausschnitte – die für eine jeweilige Zeitscheibe gelten –, darf eine obere Begrenzung nicht überschreiten, wodurch die Anzahl der insgesamt verfügbaren erneuerbaren Ressourcen abgebildet wird.

Einführung 1.a: Kapazitätsbeschränkung

Gebe die Funktion $util: \mathcal{R} \times \mathcal{A} \times \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{N}$ an, wie viele Ressourcen $r \in \mathcal{R}$ zu einer Zeitscheibe $t \in \mathcal{T}$ von einer Aktivität $a \in \mathcal{A}$ belegt/ausgelastet sind.

$$util(r, a, t) = \begin{cases} \delta(a, r), & \text{assign}(a, r) = \top \wedge s(a) \leq t \leq e(a) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\forall r \in \mathcal{R} \forall t \in \mathcal{T} \sum_{a \in \mathcal{A}} util(r, a, t) \leq \vartheta(r)$$

- Nicht-erneuerbare Ressourcen stehen insgesamt für einen Zeitabschnitt nur in einem bestimmten Vorrat/Quantität zur Verfügung. Die Planung dreht sich um die Produktion und zumeist alleinig um den Konsum solcher Ressourcen. Im Sinne der Projektplanung sind für Sprecher, Hartmann & Drexl (1997) Rohmaterialien und nicht selten auch Finanzmittel gute Beispiele für nicht-erneuerbare Ressourcen.

Die Erzeugung und der Konsum nicht-erneuerbaren Ressourcen durch Aktivitäten kann mit Ausschnitten einer Treppenfunktion ausgedrückt werden. Beim Start einer Konsumentenaktivität wird in dem Funktionsausschnitt dieser Aktivität ein Schritt nach oben gemacht; beim Ende einer Erzeugeraktivität wird entsprechend ein Schritt nach unten gemacht. Der Summenwert dieser Funktionsausschnitte – die für eine jeweilige Zeitscheibe gelten –, darf eine obere Begrenzung nicht überschreiten und eine untere Begrenzung nicht unterschreiten. Durch die Grenzwerte werden die Bevorratungsgrenzen abgebildet.

Einführung 1.b: Vorratsbeschränkung

Gebe die Funktion $prod: \mathcal{R} \times \mathcal{A} \times \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{N}$ an, wie viele Ressourcen $r \in \mathcal{R}$ zu einer Zeitscheibe $t \in \mathcal{T}$ von einer Aktivität $a \in \mathcal{A}$ erzeugt werden.

$$prod(r, a, t) = \begin{cases} \delta(a, r), & \text{assign}(a, r) = \top \wedge e(a) \leq t \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Gebe die Funktion $csmpr: \mathcal{R} \times \mathcal{A} \times \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{N}$ an, wie viele Ressourcen $r \in \mathcal{R}$ zu einer Zeitscheibe $t \in \mathcal{T}$ von einer Aktivität $a \in \mathcal{A}$ konsumiert werden.

$$csmpr(r, a, t) = \begin{cases} \delta(a, r), & \text{assign}(a, r) = \top \wedge s(a) \leq t \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\forall r \in \mathcal{R} \forall t \in \mathcal{T} \vartheta(r) + \sum_{a \in \mathcal{A}} prod(r, a, t) - \sum_{a \in \mathcal{A}} csmpr(r, a, t) \geq 0$$

Die Ressourcennutzung kann in zweierlei Hinsicht $\mathcal{R} = \mathcal{R}_{unary} \cup \mathcal{R}_{cumul}$ eingeschränkt sein:

- Unäre Ressourcennutzung $\mathcal{R}_{unary} = \{r \in \mathcal{R} \mid \mathfrak{G}(r) = 1\}$

Selten ist genau zu entscheiden, welches Exemplar einer Ressource für welche Aktivität eingesetzt wird. Ist jedes Ressourcenexemplar für sich zu betrachten, können diese durch mehrere Einzelstückressourcen aufgeführt werden. Eine Einzelstückressource ist zu jeder Zeit nur einmalig verfügbar. Die Ressourcennutzung ist dann folglich in der Weise beschränkt, dass jede der distinkten Ressourcen höchstens einmal gleichzeitig zu verwenden ist.

- Kumulative Ressourcennutzung $\mathcal{R}_{cumul} = \{r \in \mathcal{R} \mid \mathfrak{G}(r) > 1\}$

Oftmals können mehrere Ressourcen in gleicher Weise zur Durchführung einer Aktivität hergenommen werden. Sie können dann als eine Sammelressource zusammengefasst werden, da es nicht darauf ankommt, die eine oder die andere Ressource für eine Aktivität einzuplanen. Die Nutzung solcher Ressourcen ist kapazitativ beschränkt, so dass nicht mehr als die insgesamt verfügbaren Ressourcen gleichzeitig zu verwenden sind.

In **Tabelle 1** wird gezeigt, wie die Planungsproblemstellung dieser Arbeit in Bezug auf die zu verzeichnenden Aktivitäten und die verwendeten Ressourcen einzuordnen ist.

Tabelle 1: Klassifizierungsmerkmale der Planungsproblemstellung bezüglich ressourcenbeschränkter Projektplanung

Charakteristik der Aktivitäten			
	Statischer Ablauf	Dynamischer Ablauf	
	Es können in der Planungsproblemstellung dieser Arbeit im Zuge der Ablaufplanung keine Ereignisse eintreten, welche die Menge von Einsatzaktivitäten mit Fahrzeugen, Wechselbatterien und/oder anderen Ressourcen verändern.		
	Optionale Aktivitäten		
	Jede Wechselbatterie kann sich in jedmöglicher Zeitperiode des Planungszeitraums in der Station befinden. Es sind ebenso viele Aufenthaltsmöglichkeiten für eine Wechselbatterie in einer Station zu sehen wie es verschiedene Zeitperioden in einem Planungszeitraum gibt.		
Ressourcencharakteristik			
	Erneuerbare Ressourcen	Partiell erneuerbare Ressourcen	Nicht-erneuerbare Ressourcen
	Es werden neben erneuerbaren Ressourcen auch nicht-erneuerbare Ressourcen betrachtet. Die Transportfahrzeuge, Wechselbatterien, Ladestellen, etc. tauchen als erneuerbare Ressourcen auf. Elektrische Energie tritt als eine nicht-erneuerbare Ressource auf.		
	Unäre Ressourcennutzung	Kumulative Ressourcennutzung	
	In der Problemstellung dieser Arbeit kommt es neben einer unären Ressourcennutzung auch zu einer kumulativen Ressourcennutzung. Jede der Wechselbatterie wird in Betrachtung als Einzelstückressource zur Zwischenspeicherung elektrischer Energie genutzt. Dabei können sich einzelne Wechselbatterien im Verlauf des Planungszeitraums durch ihren Batterieladezustand unterscheiden.		

Grundsätzlich kann der Fahrbetrieb nur dann durchgehend aufrechterhalten werden, wenn das betreffende Fahrzeug in jeder der Zeitscheiben betriebsbereit ist. Die Fahrbereitschaft eines Transportfahrzeugs besteht solange es mit einer Wechselbatterie unterwegs ist, die ausreichend geladen ist. Da jedes der Fahrzeuge ein individuelles Transportauftragsprogramm zu erfüllen hat und sich die Ladezustände der Wechselbatterien unterscheiden können, werden Fahrzeuge und Wechselbatterien in der Problemstellung dieser Arbeit als Einzelstückressourcen angesehen.

II. Generelle Maschinenbelegungsplanung

Dieser Unterabschnitt führt in die generelle Maschinenbelegungsplanung ein und lässt die in dieser Arbeit betrachtete Planungsproblemstellung nach einem dafür üblichen Schema einordnen.

Vor Jahrzehnten wurde im Bereich der Logistik- und Produktionsplanung damit begonnen, Maschinenbelegungsprobleme zu untersuchen. Dabei soll geplant werden, welche der vorgegebenen Fertigungsaufträge auf welchen der vorhandenen Maschinen in welcher Reihenfolge und in welchen Zeiträumen zu bearbeiten sind. Ein Fertigungsauftrag kann aus einem oder mehreren Verarbeitungsoperationen bestehen.

Einführung 2: Maschinenbelegungsplanung

Eine Maschinenbelegung findet in einem diskreten Planungszeitraum $\mathcal{T} = \langle T_1, T_2, \dots, T_h \rangle$ mit $T_a \in \mathbb{N}$ für $1 \leq a \leq h$ statt.

Es seien eine Menge $\mathcal{M} = \{M_1, M_2, \dots\}$ von Maschinen sowie eine Menge von Fertigungsaufträgen $\mathcal{J} = \{J_1, J_2, \dots\}$ mit $n = |\mathcal{J}|$ gegeben.

Des Weiteren sei jeweils die Menge der Verarbeitungsoperationen $\mathcal{O}_j = \{O_{j,1}, O_{j,2}, \dots\}$ der Fertigungsaufträge $1 \leq j \leq n$ gegeben. Es bezeichnet $O_{j,i}$ die i -te Verarbeitungsoperation vom j -ten Fertigungsauftrag. Damit ist die Menge sämtlicher Verarbeitungsoperationen $\mathcal{O} = \bigcup_{j=1}^n \mathcal{O}_j$ klargelegt.

Ein Belegungsplan enthält für jede Verarbeitungsoperation eine Zuordnung zu einem Zeitintervall und zu einer Maschine. Dabei wird durch $s, e: \mathcal{O} \rightarrow \mathcal{T}$ der Start- bzw. Endzeitpunkt für eine Operation festgelegt.

Die Ausführung einer Operation auf einer Maschine wird durch eine Zuordnung $opassgn: \mathcal{O} \times \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{B}$ entschieden.

Einführung 2.a: sequenzieller Einsatz maschineller Ressourcen

Jede Maschine kann zu einer Zeit nur eine Operation ausführen. Aus dem Verarbeitungszeitraum zweier unterschiedlicher Operationen dürfen sich auf einer Maschine keine zwei Zeitscheiben überlappen.

$$\forall o \in \mathcal{O} \left(\exists! m \in \mathcal{M} \text{ } opassgn(o, m) = \top \right)$$

$$\forall m \in \mathcal{M} \left(\exists! o \in \mathcal{O} \text{ } opassgn(o, m) = \top \right)$$

Einführung 2.b: dedizierter Einsatz von Maschinen

Für jeden Fertigungsauftrag ist genau eine Maschine vorhanden, auf welcher sämtliche Elementaroperationen aus der Verarbeitungssequenz ausgeführt werden. Eine Maschine kann zu jeder Zeit nur eine Elementaroperation ausführen und sie kann darum nur eine einzige Verarbeitungssequenz übernehmen.

$$\forall j \in \mathcal{J} \left(\exists! m \in \mathcal{M} \left(\forall o \in \mathcal{O}_j \text{ } opassgn(o, m) = \top \right) \right)$$

So vielfältig wie die produzierenden Unternehmen und auch Logistikunternehmen sind auch die Problemstellungen der Maschinenbelegungsplanung. Nach Graham et al. (1979) werden Maschinenbelegungsprobleme in der sogenannten Dreifeldnotation „ $\alpha|\beta|\gamma$ “ nach der Maschinencharakteristik α , der Auftragscharakteristik β und der Zielsetzung für die Optimierung γ klassifiziert. In Anlehnung an Brucker et al. (1999) finden sich heute mit Bezug zur Projektablaufplanung im Allgemeinen weitere Klassifikationsparameter in der Dreifeldnotation wieder.

Maschinencharakteristik

Eine Planungsproblemstellung kann eine oder mehrere Maschinen umfassen.

Werden mehrere Maschinen betrachtet, so können diese grundsätzlich parallel eingesetzt werden.

Bei einer einstufigen Fertigung gebraucht ein Auftrag mit sämtlichen seiner Operationen nur auf einer einzigen Maschine ausgeführt zu werden:

- *Eine Maschine, einstufige Fertigung*

(Ein-Maschinen-Problem, Single-Machine-Problem, $\alpha = „m“, m = 1$)

Es wird nur eine einzige Maschine betrachtet. Auf den ersten Blick mag dies für die Praxis irrelevant sein. Doch tatsächlich bietet es mitunter die Grundlage für gezielte Plananpassungen bei komplexeren Problemstellungen.¹

- *Mehrere Maschinen, einstufige Fertigung*

(Mehr-Maschinen-Problem, Parallel-Machine-Problem, $\alpha = „Pm“, m \in \mathbb{N}$)

Es werden mehrere gleichartige Maschinen betrachtet. Ein solcher Maschinenpark ist häufig in Druckereien anzutreffen.

Bei einer mehrstufigen Fertigung besteht ein Auftrag aus mehreren Verarbeitungsoperationen.

Ist ein Auftrag auf mehreren Maschinen auszuführen, können unterschiedliche Fertigungsarten auftreten:

- *Mehrere Maschinen, mehrstufige Fertigung, fließende Arbeitsgänge*

(Fließbandfertigungsproblem, Flow-Shop-Problem, $\alpha = „Fm“, m \in \mathbb{N}$)

Für jeden Auftrag ist eine fest vorgegebene technologische Reihenfolge der Verarbeitungsoperationen gegeben. Für jeden der Fertigungsaufträge gilt die gleiche Operationsreihenfolge. Bei fast allen Automobilherstellern ist heutzutage eine Fließbandfertigung anzutreffen. Die Verarbeitungsoperationen sind meist auf wenige Handgriffe reduziert und werden entlang eines verketteten Fördersystems durchgeführt. Es wird stets mit der Losgröße eins gearbeitet und die Fertigungsaufträge haben sich praktisch nach der Maschinenanordnung am Fördersystem zu richten.

- *Mehrere Maschinen, mehrstufige Fertigung, werkstattmäßige Arbeitsgänge*

(Werkstattfertigungsproblem, Job-Shop-Problem, $\alpha = „Jm“, m \in \mathbb{N}$)

Für jeden Auftrag ist eine fest vorgegebene technologische Reihenfolge der Verarbeitungsoperationen gegeben. Die Operationsreihenfolge eines Fertigungsauftrags kann sich von der eines

¹ Ist beim Lösen eines Mehr-Maschinen-Problems vorläufig ein Engpass ersichtlich, so kann versucht werden, die auf der betroffenen Maschine bisher geplanten Verarbeitungsoperationen zu isolieren und in einem Ein-Maschinen-Problem einen günstigeren Teilbelegungsplan zu finden. Dadurch kann möglicherweise der Engpass auf dieser Maschine aufgehoben werden und der Belegungsplan für das Mehr-Maschinen-Problem insgesamt verbessert werden.

anderen Fertigungsauftrags unterscheiden. Viele Maschinenbauer sind so organisiert, dass die Maschinen nach dem Verrichtungsprinzip gegliedert sind. Dabei werden Maschinen mit ähnlicher oder gleicher Verarbeitungsfunktionalität räumlich zusammengefasst. Die Fertigung kann in unterschiedlich großen Losen örtlich konzentriert in Werkstätten vorgenommen werden.

- Mehrere Maschinen, mehrstufige Fertigung, beliebige Arbeitsgänge
(Problem mit ungebundener Fertigung, $\alpha = „Om“, m \in \mathbb{N}$)

Die Reihenfolge der Verarbeitungsoperationen ist beliebig. Die Fertigungsart hängt letztlich von der Zusammensetzung des Maschinenparks ab – ob mit den Maschinen eine differenzierende Verarbeitung möglich ist oder für eine bestimmte Verarbeitung ganz einfach mehrfach Maschinen vorhanden sind.

Auftragscharakteristik

Durch die Auftragscharakteristik können sich in speziellen Problemstellungen auf vielfältige Weise zeitliche und ressourcenbezogene Nebenbedingungen ergeben:

- Auftragszahl (β_1) Es wird danach unterschieden, ob ein („ $n = 1$ “), zwei („ $n = 2$ “) oder mehr Fertigungsaufträge zu planen sind.
- Unterbrechbarkeit (β_2) Mit („pmtn“) wird angegeben, ob Verarbeitungsoperationen unterbrochen und später weitergeführt werden können – möglicherweise sogar auf einer anderen Maschine. Zusätzlich gibt („nowait“) an, ob eine Verzögerung zwischen zwei zugehörigen Verarbeitungsoperationen eintreten darf oder nicht.
- Reihenfolgebeziehung (β_3) Gegebenenfalls sind Reihenfolgebeziehungen der Aufträge oder Verarbeitungsoperationen einzuhalten. Es wird beispielsweise differenziert, ob die Reihenfolgebeziehungen in einer Graphstruktur („prec“) oder Baumstruktur („tree“) vorliegen; sie müssen selbstverständlich zur Konfiguration des Maschinenparks passen. Während bei Fließfertigung eine für alle Aufträge identische Maschinenfolge vorliegt, treten bei Werkstattfertigung bei den einzelnen Aufträgen unterschiedliche Maschinenfolgen auf. Eine Maschinenfolgebedingung sagt aus, dass ein Auftrag erst auf einer bestimmten Maschine bearbeitet werden kann, nachdem er auf einer Vorgängermaschine fertig bearbeitet wurde. Der Startzeitpunkt der Bearbeitung des Auftrags auf der betrachteten Maschine muss nach dem Startzeitpunkt der Bearbeitung des Auftrags auf der Vorgängermaschine zuzüglich der Bearbeitungsdauer des Auftrags auf der Vorgängermaschine liegen. Unabhängig von der Bearbeitungskapazität der Maschine drückt eine Auftragsfolgebedingung aus, dass ein Auftrag erst nach einem anderen Auftrag auf einer Maschine bearbeitet werden kann. Der Startzeitpunkt der Bearbeitung des einen Auftrags muss nach dem Startzeitpunkt der Bearbeitung des anderen Auftrags zuzüglich dessen Bearbeitungsdauer auf dieser Maschine liegen.
- Auftragsfreigabe, Auftragsfertigstellung und Nachlaufverhalten (β_4, β_8) Mit Hilfe von Freigabe- und Fertigstellungszeitpunkten können Zeitfenster für die Fertigungsaufträge und Verarbeitungsoperationen angegeben werden. Ein („ r_i “) deutet darauf hin, dass für einige Fertigungsaufträge ein Freigabezeitpunkt festgelegt ist; ein Freigabezeitpunkt ist der frühestmögliche Startzeitpunkt für den Auftrag. Ansonsten sind alle Aufträge zu Beginn des Planungszeitraums freigegeben. Ein („ r_i “) deutet darauf hin, dass für einige Fertigungsaufträge ein Fertigstellungszeitpunkt festgelegt ist; ein Fertigstellungszeitpunkt ist der spätestmögliche Endzeitpunkt für den Auftrag. Ansonsten können sich alle Aufträge zum Ende des Planungszeitraums hinziehen.

Daneben können Nachlaufzeiten der Verarbeitungsoperationen zu beachten sein. Ein („ n_j “) bedeutet, dass ein Auftrag nach Beendigung einer Verarbeitungsoperation noch eine bestimmte Zeit warten muss, bevor er weiterbearbeitet werden kann.

- Bearbeitungszeit (β_5) Die generelle Maschinenbelegung nimmt an, dass eine Aktivität nur in einem einzigen Weg ausgeführt werden kann, der durch eine feste Dauer und feste Ressourcenanforderungen bestimmt ist. Mit („ $p_{ij} = p_i$ “) wird ausgedrückt, dass jede Maschine j die gleiche Zeit für eine Verarbeitungsoperation i aufweist. Tatsächlich sind Maschinen vielleicht dazu in der Lage, eines oder mehrere Stücke gleichzeitig zu verarbeiten und somit eine Aktivität im Zeitverlauf in variabler Intensität auszuführen. Außerdem sind verschiedene Betriebsmodi von Maschinen vorstellbar, die dafür ausschlaggebend sind, wie viele Stücke eine Maschine gleichzeitig verarbeiten kann oder wie lange eine Verarbeitung in Anspruch nimmt. In Abhängigkeit vom Betriebsmodus einer zugeordneten Maschine oder von ihrem Ausführungsmodus an sich kann eine Aktivität demnach von variabler Dauer sein. Mit („ $p_{ij} = p_i/s_j$ “) wird ausgesagt, dass es abhängig von der Verarbeitungsgeschwindigkeit der Maschine bzw. des Maschinenmodus ist, wie viel Zeit für eine Verarbeitungsoperation i auf der Maschine j benötigt wird.
- Reihenfolgeabhängige Rüstzeiten (β_6) Mit („ ST_{si} “) kann die Rüstzeit einer Maschine i beispielsweise von der Reihenfolge der Verarbeitungsoperationen s abhängig sein. Bei Raffinerien muss beispielsweise sortenrein produziert werden. Je nachdem welche Sorte Öl zuvor mit einem Auftrag raffiniert wurde, kann eine Reinigung erforderlich sein, um die Maschine für den nächsten Auftrag zu rüsten.
- Ressourcenbeschränkungen (β_7) Diese Charakterisierung sagt etwas über die Anzahl der Ressourcen, die Art der Beschränkung (kumulative oder dedizierte Ressourcennutzung) und den Ressourcenbedarf aus.
- Arbeitsgangzahl (β_9) Dies gibt an, aus wie vielen Verarbeitungsoperationen ein Fertigungsauftrag maximal aufgebaut sein darf. Normalerweise ist die Anzahl von Verarbeitungsoperationen in einem Auftrag beliebig.
- Lagerbeschränkungen (β_{10}) An den Maschinen existieren Zwischenlager für die ein- und abgehenden Teile. Normalerweise haben diese Zwischenlager eine unerschöpfliche Kapazität.

Zielsetzungen

Bei der Lösung eines Maschinenbelegungsproblems kommen in der Praxis bislang überwiegend terminorientierte Zielsetzungen in Betracht:

- Minimierung der Gesamtbearbeitungsdauer (Make-Span, Completion Time, $\gamma = „C“$)
- Minimierung der Terminabweichung (Tardiness, $\gamma = „T“$)
- Minimierung der Verspätung (Lateness, $\gamma = „L“$)
- Minimierung der Durchlaufzeiten (Cycle Time)
- Minimierung der Leerlaufzeit (Idle Time)

Es wird in dieser Arbeit vorausgesetzt, dass die zukünftige Transportlast individuell für Fahrzeuge vollständig bekannt ist. Das Transportprogramm eines Fahrzeugs wird derart in Einzeloperationen gegliedert, dass jede von ihnen die Dauer genau einer Zeitscheibe hat. Da für jedes Fahrzeug ein indi-

viduelles Transportprogramm vorgesehen ist, sind die Ressourcenanforderungen der Einzeloperation bezüglich der Fahrzeugflotte sehr genau zugeschnitten. Eine solche Einzeloperation erfordert es, genau diejenige Fahrzeugressource zuzuordnen, für welche das Transportprogramm aufgestellt ist. In Bezug auf die Fahrzeugaktivitäten handelt es sich um dediziert genutzte Transportfahrzeuge.

Tabelle 2: Klassifizierungsmerkmale der Planungsproblemstellung bezüglich des generellen Maschinenbelegungsproblems

Maschinencharakteristik				
$(\alpha = \underline{Pm})$	Mehrere gleichartige Maschinen	Fließfertigung (Flow-Shop)	Werkstattfertigung (Job-Shop)	Ungebundene Fertigung (Open-Shop)
	In den einzelnen Zeitscheiben werden durch die Fahrzeuge Transportanforderungen erfüllt. Diese Transportaktivitäten stellen einstufige Produktionsprozesse dar. Jedes der Fahrzeuge in der Flotte erledigt die Transportaktivitäten auf gleiche Weise.			
Auftragscharakteristik				
$(\beta_1 = \alpha, \beta_2 = \alpha, \beta_3 = \dots)$	Aufträge/Verarbeitungsoperationen sind nicht unterbrechbar		Aufträge/Verarbeitungsoperationen sind unterbrechbar	
	Reihenfolge in Baumstruktur		Reihenfolge in Graphstruktur	
	Für jedes Fahrzeug ist genau ein Transportauftragsprogramm vorgesehen. Darum erledigt jedes der Fahrzeuge einen dedizierten Fertigungsauftrag. Der Fertigungsauftrag setzt sich aus mehreren Verarbeitungsoperationen zusammen. Für jede Zeitscheibe im Transportauftragsprogramm wird eine Verarbeitungsoperation vorgegeben. Diese Verarbeitungsoperationen sind elementar in der Zeit; sie können an sich nicht unterbrochen werden. Ein Batterietausch eines Fahrzeugs führt nicht zu einer Unterbrechung bei der Bearbeitung seines Transportauftragsprogramms; es wurde lediglich mit dem Programm ausgesetzt und die Transportanforderungen sind zwischenzeitlich unerfüllt geblieben.			
Zielsetzung				
Insofern Strafpunkte für die unerfüllten Transportanforderungen anfallen und den Ablaufplan ab einem gewissen Punktestand ungültig werden lassen, wird in dieser Arbeit eine profitbasierte Zielsetzung verfolgt.				

Wie in **Tabelle 2** ersichtlich ist, kann die integrierte Planungsproblemstellung der Energiebereitstellung für Transportfahrzeuge im Containerterminalbetrieb und die betrachtete Vermarktung der Flexibilität unzureichend als ein generelles Maschinenbelegungsproblem repräsentiert werden. Dies liegt unter anderem darin begründet, dass nicht etwa auf eine gewöhnliche terminorientierte Zielsetzung, sondern auf das energiewirtschaftliche Gesamtergebnis hin optimierend geplant wird. Dieses ergibt sich allerdings hauptsächlich durch die Ladeprozesse der Wechselbatterien in der Station und nicht über das Erfüllen von Transportanforderungen. Die Arbeit der Fahrzeuge als solches trägt mit den Strafpunkten für unerfüllte Transportanforderungen nur insoweit zum Gesamtergebnis bei, dass die energiewirtschaftliche Optimierung nicht zur Vernachlässigung des Logistikgeschehens führt.

III. Spezielle Betriebsmittelplanung

Dieser Unterabschnitt führt in einige spezielle Problemstellungen der Maschinenbelegungsplanung mit Betriebsmittelfläüssen ein und stellt diese der in dieser Arbeit betrachteten Planungsproblemstellung gegenüber.

Infolge verkürzter Produktlebenszyklen und zunehmender Produktvariation stellen sich mehr und mehr produzierende Unternehmen von einer Massenfertigung früherer Tage zu einer Fertigung kleinerer Serien um. Mitte der sechziger Jahre begann die technologische Entwicklung flexibler Fertigungssysteme (Flexible Manufacturing Systems, kurz FMS), um zügiger auf veränderte Kundenwünsche eingehen und stärker individualisierbare Produkte herstellen zu können.

Es ist kennzeichnend für ein solches flexibilisiertes Produktionsumfeld, dass es neben dem Verarbeitungssystem (Maschinenpark) verschiedene Umsysteme zur Versorgung mit Werkern, Werkzeugen, Werkstücken und so weiter gibt. Es setzt voraus, dass die beteiligten Ressourcen in der Planung im Vergleich zur generellen Maschinenbelegungsplanung differenzierter betrachtet werden. Dies führt zu Problemstellungen, in denen die Belegung/Auslastung mehrerer unterschiedlicher Ressourcen durch eine Aktivität möglich ist (engl. Multiple Resource-Constrained Scheduling, Dauzère-Pérès et al. 1998). Besondere Aufmerksamkeit haben dabei Problemstellungen um eine duale Zuordnung von Maschinen und Werkern bzw. Maschinen und Werkzeugen an die Verarbeitungsoperationen (engl. Dual Resource-Constrained Scheduling, siehe Xu et al. 2011). Unter Beachtung des Rüst- und Betriebszustands der Maschinen und der Verfügbarkeit weiterer Ressourcen wie zum Beispiel Werkzeugen und Materialien usw. erfolgt die Planung der Maschinenbelegung durch die einzelnen Aufträge meist bei einer mehrminütigen Zeiteinteilung.

Werkzeugeigenschaften

Der Einsatz universeller Werkzeugmaschinen mit automatisiertem Werkzeugwechsel ermöglicht eine weitgehende Bearbeitung von Werkstücken in einer abgeschlossenen Verarbeitungsstation. Die Werkzeugmaschinen sind Verarbeitungsstationen, die in der Produktionshalle fest positioniert sind. Werkzeuge sind bewegliche Betriebsmittel, die an diese Verarbeitungsstationen gebracht oder von diesen abgezogen werden können. Es gibt ein zentrales Werkzeugmagazin, von dem aus sämtliche Verarbeitungsstationen bedient/ausgerüstet werden. Jede der Werkzeugmaschinen verfügt über ein maschinennahes Werkzeugmagazin, so dass ein Werkzeugwechsel automatisiert vorgenommen werden kann.

Einführung 3: Maschinenbelegungsplanung mit Werkzeugzuteilung

Die Maschinen \mathcal{M} müssen zur Bearbeitung der Fertigungsaufträge \mathcal{J} und der Durchführung von Verarbeitungsoperationen \mathcal{D} mit Werkzeugen ausgerüstet werden.

Es gibt ein Magazin mit einer Menge distinkter Werkzeuge $\mathcal{W} = \{W_1, W_2, \dots\}$.

Die Ausführung einer Operation unter Zuteilung eines Werkzeug w wird durch eine Zuordnung $\mathit{talloc}: \mathcal{D} \times \mathcal{W} \rightarrow \mathbb{B}$ entschieden.

Bei jeder auftragsverarbeitenden Maschine muss sich zu der Zeit ein Werkzeug befinden.

$$\forall o \in \mathcal{D} \quad (\exists! w \in \mathcal{W} \quad \mathit{talloc}(o, w) = \top)$$

$$\forall o \in \mathcal{O} (\exists m \in \mathcal{M} \text{ opassgn}(o, m) = \top \Rightarrow \exists w \in \mathcal{W} \text{ talloc}(o, w) = \top)$$

Ein Werkzeug kann zu jeder Zeit nur eine Elementaroperation unterstützen.

$$\forall w \in \mathcal{W} (\exists! o \in \mathcal{O} \text{ talloc}(o, w) = \top)$$

In der generellen Maschinenbelegungsplanung werden den Verarbeitungsoperationen Maschinen zugeordnet, auf denen sie ausgeführt werden sollen. Für jede Verarbeitungsoperation wird zudem der Start- und Endzeitpunkt innerhalb des Planungszeitraums festgelegt. Diese Planung kann entsprechend für Werkzeugmaschinen vorgenommen werden. Ohne die Zuteilung eines Werkzeugs kann aber die Werkzeugmaschine die Werkstücke nicht verarbeiten. Die Verarbeitungsaktivitäten erfordern sowohl eine Maschine als auch das passende Werkzeug.

Materialflusseigenschaften

Eine Unterscheidung zwischen immobilen und mobilen Ressourcen zieht es nach sich, dass die erforderliche Zeit für den Transport von Werkzeugen und Material an die Maschinengruppen heran sowie für den Transfer von Fertigungsteilen zwischen den einzelnen Verarbeitungsstationen zu berücksichtigen ist. In vielen Produktionsstätten werden teilgefertigte Werkstücke mit Hilfe automatisierter Fördermittel von einer Verarbeitungsstation aufgeladen, zu einer nächsten gebracht und dort abgeladen. Bei der Planung der Abläufe in einem Produktions- oder Logistiksystem wird darum mitunter die Bearbeitung von Transportaufträgen einbezogen. An den Verarbeitungsstationen gibt es Zeitfenster für die Abholung von Ladungen und die Zustellung von Ladungen. Zu einer vorgegebenen Verarbeitungsaktivität gibt es eine Menge von Transportaktivitäten. In einem Ablaufplan muss der Endzeitpunkt sämtlicher zugehöriger Transportaktivitäten vor dem jeweiligen Startzeitpunkt der Verarbeitungsaktivität liegen. Materialien müssen ebenfalls an die Stationen herangetragen werden und werden bei einer Verarbeitung verbraucht.

Einführung 4: Maschinenbelegungsplanung mit Materialfluss

Es ist eine Menge von Fertigungsaufträgen \mathcal{J} mit einer Verarbeitungssequenz von Elementaroperationen \mathcal{O}_j mit $\dot{n}_j = |\mathcal{O}_j|$ für $1 \leq j \leq n$ gegeben, durch die jeweils eine bestimmte Menge einer Materialressource E verbraucht wird.

Mit den Vektoren $D_1^E = (D_{1,1}^E, \dots, D_{1,\dot{n}_1}^E)$, $D_2^E = (D_{2,1}^E, \dots, D_{2,\dot{n}_2}^E)$, ..., $D_j^E = (D_{j,1}^E, \dots, D_{j,\dot{n}_j}^E)$ für $1 \leq j \leq n$ sind die Materialbedarfe $\delta_E := \left\{ (O_{j,i}, D_{j,i}^E) \mid \begin{matrix} 1 \leq j \leq n \\ 1 \leq i \leq \dot{n}_j \end{matrix} \right\}$ an einer Maschine zur Ausführung einer Verarbeitungsoperation bekannt. Es bezeichnet $D_{j,i}^E$ den Bedarf an der Materialressource E durch die i -te Verarbeitungsoperation vom j -ten Fertigungsauftrag.

Es ist für jede Verarbeitungsoperation zusätzlich eine Menge von Zustelloperationen $\tilde{\mathcal{O}}_{j,i}^E = \{\tilde{\mathcal{O}}_{j,i}^1, \tilde{\mathcal{O}}_{j,i}^2, \dots\}$ für die Materialressource E gegeben. Es bezeichnet $\tilde{\mathcal{O}}_{j,i}^x$ die x -te Zustelloperation in Bezug zur i -ten Verarbeitungsoperation vom j -ten Fertigungsauftrag. Mit der Abbildung $\theta := \left\{ (O_{j,i}, \tilde{\mathcal{O}}_{j,i}^x) \mid \begin{matrix} 1 \leq j \leq n \\ 1 \leq i \leq \dot{n}_j \end{matrix} \right\}$ ist klargestellt, welche Zustelloperationen zu welcher Verarbeitungsoperation gehören. Die Menge sämtlicher Zustelloperationen zu einem Fertigungsauftrag ist $\tilde{\mathcal{O}}_j^E = \bigcup_{i=1}^{\dot{n}_j} \tilde{\mathcal{O}}_{j,i}^E$. Und wiederum ist $\tilde{\mathcal{O}}^E = \bigcup_{j=1}^n \tilde{\mathcal{O}}_j^E$ die Menge sämtlicher Zustelloperationen.

Die Maschinen können durch eine Menge von Fördermitteln $\mathcal{V} = \{V_1, V_2, \dots\}$ mit Material versorgt werden. Die Fördermittel nehmen Material von einem zentralen unerschöpflichen Lager entgegen und befördern es zu den Maschinen. Durch eine Zuordnung $\mathbf{vq}: \mathcal{D}^E \rightarrow \mathbb{N}$ wird entschieden, wie viel Material durch eine Zustelloperation befördert wird. Die Ausführung einer Transportoperation unter Zuteilung eines Fördermittels wird durch eine Zuordnung $\mathbf{valloc}: \mathcal{D}^E \times \mathcal{V} \rightarrow \mathbb{B}$ entschieden.

Ein Belegungsplan enthält nun zusätzlich für jede Transportoperation eine Zuordnung zu einem Zeitintervall und zu einem Fördermittel. Dabei wird durch $\tilde{s}, \tilde{e}: \mathcal{D}^E \rightarrow \mathcal{T}$ der Start- bzw. Endzeitpunkt für eine Transportoperation festgelegt.

Sei durch die Menge $\mathcal{Q}^n = \{o \mid \mathbf{opassign}(o, m) = \top\}$ zu ermitteln, mit welchen Verarbeitungsoperationen eine Maschine $m \in \mathcal{M}$ laut Belegungsplan eingelastet ist.

Sei durch die Funktion $\mathbf{csmp}: \mathcal{D} \times \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{N}$ zu ermitteln, wie viele Materialressourcen E an durch eine Verarbeitungsoperation $o \in \mathcal{D}$ zu einer Zeitscheibe $t \in \mathcal{T}$ konsumiert werden.

$$\mathbf{csmp}^E(o, t) = \begin{cases} \delta^E(o), & \exists_{m \in M} (\mathbf{opassign}(o, m) = \top \wedge \mathbf{s}(o) \leq t) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Sei durch die Funktion $\mathbf{deli}: \mathcal{D}^E \times \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{N}$ zu ermitteln, wie viele Materialressourcen E zu einer Zeitscheibe $t \in \mathcal{T}$ von einer Zustelloperation $\delta \in \mathcal{D}^E$ geliefert/abgeladen werden.

$$\mathbf{deli}^E(\delta, t) = \begin{cases} \mathbf{vq}(\delta), & \exists_{v \in V} (\mathbf{valloc}(\delta, v) = \top \wedge \tilde{e}(\delta) \leq t) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Sei durch die Funktion $\sigma^E: \mathcal{M} \times \mathcal{T}$ zu verfolgen, welchen Füllstand der Puffer an Maschine $m \in \mathcal{M}$ für Materialressource E zu einer Zeitscheibe $t \in \mathcal{T}$ hat.

$$\sigma^E(m, t) = \underbrace{0}_{\substack{\text{Anfangsvorrat} \\ \text{Maschinenlager}}} + \overbrace{\left(\sum_{o \in Q^m} \sum_{\delta \in \theta(o)} \mathbf{deli}^E(\delta, t) \right)}^{\text{Zugänge Material}} - \underbrace{0}_{\substack{\text{Abgänge} \\ \text{Material}}} + \underbrace{0}_{\substack{\text{Erzeugung} \\ \text{Material}}} - \underbrace{\sum_{o \in Q^m} \mathbf{csmp}^E(o, t)}_{\text{Verbrauch Material}}$$

$$\forall_{m \in \mathcal{M}} \forall_{t \in \mathcal{T}} \sigma^E(m, t) \geq 0$$

Die Einzeloperationen aus dem Transportprogramm müssen innerhalb des Plans in einem zeitlichen Zusammenhang mit anderen Einzeloperationen gesehen werden. Mehrere geplante Einzeloperationen ergeben über mehrere Zeitscheiben hinweg eine Fahrzeugaktivität, welche mit einem durchgehenden Fahrbetrieb einer Wechselbatterie mit selbigem Transportfahrzeug korrespondiert. Es kommt in der Problemstellung dieser Arbeit nicht darauf an, welche Wechselbatterie in dem Fahrzeug steckt, das einer Einzeloperation aus dem Transportprogramm zugeordnet ist; das Fahrzeug muss bloß durch eine mobile Batterieeinsatzaktivität eine Wechselbatterie zugeteilt bekommen haben, so dass das Fahrzeug in einer oder mehreren aufeinanderfolgenden Zeitscheiben betriebsbereit ist. Es hängt letztlich vom Ladezustand der Wechselbatterie ab, wie lange eine mobile Batterieeinsatzaktivität und die damit korrespondierende Fahrzeugaktivität dauern können.

Weil die Wechselbatterien im Verlauf der Zeit unterschiedliche Ladezustände aufweisen können, sind den möglichen Batterieeinsatzaktivitäten die Wechselbatterien als distinkte Ressourcen zuzu-

ordnen. Der Ladezustand einer Wechselbatterie in einer bestimmten Zeitscheibe ergibt sich in Abhängigkeit zu weiteren planerischen Entscheidungen. Unter anderem muss entschieden werden, wann die Aufnahme eines Batteriesystems durch ein Fahrzeug geschieht und wann dieses durch ein Fahrzeug wieder an die Station abgegeben wird. Es kann a priori nicht ausgesagt werden, wie lange der Fahrbetrieb mit der Batterieladung einer Wechselbatterie sein wird.

Aufgrund veränderlicher Zuordnungen können sich offenbar von einer Zeitscheibe zur nächsten Zeitscheibe vollkommen neue Umstände ergeben. Je nachdem wie viel elektrische Energie mit einer Wechselbatterie an ein Fahrzeug verteilt wird, kann dieses nämlich von kurzer Dauer oder von langer Dauer im Fahrbetrieb unterwegs sein. Bemerkenswerterweise sind jedoch die bezüglich der Elektrizitätsbereitstellung zu planenden Abläufe statisch/deterministisch; die Menge der ursprünglich für die Planung vorgegebenen Fahrzeugeinsatzaktivitäten bleibt unverändert – selbst die der möglichen Batterieeinsatzaktivitäten, wenn man es so sehen möchte.

Die Ressourcenzuteilungen der durchgängigen Einsatzaktivitäten und der Einzeloperationen müssen zueinander passen. Simultan zu einer Fahrzeugaktivität eines Transportfahrzeugs muss genau eine mobile Batterieeinsatzaktivität mit eben diesem Fahrzeug ablaufen; den Einzeloperationen innerhalb des Zeitraums der Fahrzeugaktivität zum Erfüllen der Transportanforderungen wird durch einzelne Entladeoperationen im Einsatzzeitraum der Wechselbatterie entsprochen. Es sind also in erster Linie die Wechselbatterien und mit ihnen elektrische Energie an die Fahrzeuge zu verteilen, so dass diese im Fahrbetrieb bleiben und Transportanforderungen erfüllen können. Für das Fahren kann nur die elektrische Energie eingesetzt werden, die als Ladungsmenge in der Wechselbatterie gespeichert ist. Das Erfüllen der Transportanforderungen durch Fahrzeugaktivitäten entspricht im Sinne der Produktionsplanung den Verarbeitungsaktivitäten an Werkstationen / Maschinen. Folglich gilt es in dieser Arbeit mit Hilfe der Wechselbatterien von den Ladestationen elektrische Energie in die Fahrzeuge hinein zu transportieren. Für gewöhnlich kann bei Problemstellungen mit Materialflussbetrachtung die An-/Abförderung von zu verarbeitenden Materialien separat zu der Verarbeitung an den Werkstationen/Maschinen und deren Ausrüstung mit Werkzeugen vorgenommen werden. Der Materialfluss und die Werkzeugversorgung sind als Umsysteme zur maschinellen Verarbeitung organisiert. In der Problemstellung dieser Arbeit müssen sich die Transportfahrzeuge auf der Ebene der Elektrizitätsbereitstellung im übertragenen Sinne selbst ausrüsten, indem sie sich zu einer Station begeben und somit ein Batterietausch vorgenommen werden kann. Es gibt keinen selbsttätigen Materialfluss für elektrische Energie zwischen der Batterieladestation und den Transportfahrzeugen. Die Ladestellen an einer oder mehrerer Stationen wirken in der Problemstellung dieser Arbeit als ein zentrales Materiallager. Die Wechselbatterien nehmen dort während des Stationsaufenthalts eine gewisse Menge elektrischer Energie auf und geben sie bei der Ausstattung eines Fahrzeugs wieder ab.

Tabelle 3: Klassifizierungsmerkmale der Planungsproblemstellung dieser Arbeit bezüglich der Werkzeugallokationsplanung

	Duale Zuordnung	Multiple Zuordnung
	<p>Bei der Planung der Fahrzeugaktivitäten gibt es eine singuläre Zuordnung. Ein Transportprogramm erfordert nicht mehr als die Zuordnung eines Fahrzeugs (Maschine). Die Fahrzeugaktivität ist allerdings nur in Korrespondenz mit einer mobilen Batterieeinsatzaktivität durchführbar.</p> <p>Auf der einen Seite erfolgt bei der Planung dieses Fahrbetriebs eine duale Zuordnung von Fahrzeug (Maschine) und Wechselbatterie (Werkzeug). Indirekt wird dem Fahrbetrieb auch die in der Wechselbatterie gespeicherte elektrische Energie (Material) zugeordnet. Auf der anderen Seite findet bei der Planung von Stationsaufenthalten ebenfalls eine duale Zuordnung zwischen Wechselbatterie (Ladungsträger, Werkzeug) und den Ladestellen einer Station (Materiallager, Werkzeugmagazin) statt.</p> <p>Dazwischen ist es für die Batterietausche eine allumfassende, multiple Zuordnung zwischen Wechselbatterie (Ladungsträger, Werkzeug), Ladestellen einer Station (Materiallager, Werkzeugmagazin), Regalbediengeräten/Tauschspuren derselben Station (Fördermittel), Transportfahrzeugen (Maschinen) notwendig.</p>	
Werkzeugeigenschaften		
	Homogene Ressourcenzuteilung	Heterogene Ressourcenzuteilung
	<p>Bei der Zuteilung eines Fahrzeugs und einer Wechselbatterie an eine mobile Batterieeinsatzaktivität verhalten sich diese als homogene Ressourcen. Die Aktivität läuft in einer vordefinierten Intensität/Geschwindigkeit ab – egal welche Wechselbatterie für diesen Zeitraum mit welchem Ladezustand zugeteilt wird.</p>	
Materialflusseigenschaften		
	Ohne Reservoirs	Mit Reservoirs
	<p>Der Ladezustand ist ausschlaggebend dafür, wie lange ein Transportfahrzeug unterwegs sein kann, um Transportanforderungen zu erfüllen.</p>	

Wie **Tabelle 3** verdeutlicht, sind die Wechselbatterien in der Problemstellung dieser Arbeit zweideutig zu handhaben. Zum einen haben sie den Charakter eines Ladungsträgers, der zwischen dem Materiallager und den Maschinen hin und her transportiert wird. Zum anderen ist die elektrische Energie an Bord des Transportfahrzeugs nur nutzbar, wenn die Wechselbatterien im Charakter eines Werkzeugs an der Maschine verbleiben.

B. **Bekannte Lösungsverfahren**

In diesem Abschnitt wird eine knappe Erläuterung zu bekannten Lösungsverfahren aus den Bereichen der exakten Optimierung und der heuristischen Optimierung gegeben. Darin können die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Planungsmodelle aufgegriffen werden. Auf der einen Seite können sie in der mathematischen Programmierung als Basis für die Formulierung von Nebenbedingungen dienen, welche ein gültiger Ablaufplan zu erfüllen hat. Auf der anderen Seite mögen sie in der objektorientierten Programmierung als eine Blaupause für ein Datenmodell verwandt werden, auf dessen Grundlage mit Heuristiken ein gültiger Ablaufplan erstellt werden kann.

Die meisten Herausforderungen aus der Praxis lassen sich auf formalisierte Problemstellungen abbilden, die seit vielen Jahren Gegenstand intensiver Forschung im Bereich der Unternehmensforschung (engl. Operations Research) sind. Es werden Entscheidungsträgern Werkzeuge und Verfahren zur Lösung von berechenbaren Planungs- und Koordinierungsproblemen zur Verfügung gestellt, die einerseits in dem Bereich der Informatik wie auch andererseits im Bereich der angewandten Mathematik verwurzelt sind (vgl. Domschke & Drexl, 1990 oder Zimmermann & Stache, 2001). Aufgrund der hohen Entscheidungskomplexität und des hohen Berechnungsaufwands haben sich verschiedene Lösungsverfahren etabliert, darunter exakte Verfahren sowie problemspezifische heuristische Verfahren aus dem Bereich der Unternehmensforschung und meta-heuristische Verfahren aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz (Evers, 2002, S.25f).

I. **Exakte Optimierung**

Viele Basisproblemstellungen der Maschinenbelegungsplanung und ähnliche Problemstellungen aus dem Bereich Produktion und Logistik lassen sich heutzutage mit Sprachen der mathematischen Programmierung einfach ausdrücken/formulieren. Eine solche Formulierung umfasst Zielfunktionsausdrücke, Eingabedatenvariablen und Entscheidungsvariablen. Überwiegend werden Gleichungen und Ungleichungen zur direkten Einschränkung von Wertzuweisungen an die Entscheidungsvariablen verwendet. Darüber hinaus können Nebenbedingungen aufgestellt werden, welche die Menge zulässiger Wertzuweisungen an die Entscheidungsvariablen weiter einschränken. Sind die Zielfunktion und die Bereichsgrenzen der sogenannten zulässigen Menge ausschließlich linear beschaffen, so wird von linearen Programmen gesprochen. Ist dagegen entweder die Zielfunktion oder eine der Bereichsgrenzen der zulässigen Menge nicht-linear, so wird von einem nicht-linearen Programm gesprochen. Durch universelle Problemlösungstechniken wie zum Beispiel mit Hilfe des Verzweigen-Begrenzen-Verfahrens lassen sich sowohl lineare als auch nicht-lineare Programme exakt behandeln (siehe dazu Christofides et al. 1987 oder Brucker et al. 1998). Ist für eine Planungsproblemstellung nur eine Formulierung als ein nicht-lineares Programm vorzufinden, ist sie ziemlich herausfordernd zu lösen. Das kann bedeuten, dass zum Beispiel nur für Probleminstanzen mit kurzem Planungszeitraum oder für äußerst ressourcenarme Instanzen des Problems in angemessener Zeit eine optimale Lösung gefunden wird (deren Optimalität mathematisch nachweislich feststeht). Eine Maschinenbelegungsplanung mit Materialflussbetrachtungen hat sich in den vergangenen Jahrzehnten als eine herausfordernde Planungsproblemstellung gezeigt. Beispielsweise betrachten Maggu und Das (1980) eine Problemstellung mit einem Fließfertigungssystem in einer Probleminstanz mit bloß zwei Maschinen. Es gibt eine ausreichende Anzahl von Transportmitteln, so dass teilgefertigte Werkstücke

von der ersten Maschine verzögerungsfrei zur zweiten Maschine befördert werden können. Weiter nehmen sie bei den Maschinen unbegrenzte Teilepuffer an. Stern und Vitner (1990) untersuchen ebenfalls ein Fließfertigungssystem aus zwei Maschinen. Zwischen den zwei Maschinen operiert in ihrer Problemstellung allerdings lediglich ein Transportmittel.

Bei terminorientierter Zielsetzung werden Verzweigen-Begrenzen-Verfahren zur Lösung von Ablaufplanungsproblemen nicht selten dadurch unterstützt, dass für Teillösungen mit geringem Rechenaufwand über die zeitliche Abfolge von Aktivitäten auf den bestmöglich zu erzielenden Zielfunktionswert geschlossen werden kann (siehe dazu Focacci, Nuijten & Laborie 2000). Beispielsweise formuliert Stecke (1983) ein nicht-lineares Programm für die Problemstellung der Werkzeugzuweisung in flexiblen Fertigungssystemen. Sie löst die Problemstellung in Verbindung mit dem Transfer von Fertigungsteilen mit einer mehrkriteriellen Zielsetzung. Ihr Fokus liegt auf einer Maximierung der fortlaufenden Verarbeitungsoperationen für ein Werkstück sowie der Maximierung der Werkzeugdichte in den maschinennahen Magazinen bei einer gleichmäßigen Verteilung der Arbeitslast auf die Werkzeugmaschinen.

Bei größeren Probleminstanzen kann probiert werden, abschnittsweise Linearisierungen einzuführen oder sich auf einen Ausschnitt der Zielfunktion oder Segment der zulässigen Menge einzuschränken. Dies setzt jedoch meist ein entsprechendes Problemverständnis aus der Praxis und nicht selten ein starres Optimierungsumfeld voraus. Bei Kuhn (1990) und Tempelmeier & Kuhn (1992) wird betont, dass die Einlastungsplanung von Werkzeugmaschinen gemeinsam mit der Bestückung der maschinennahen Werkzeugmagazine derart komplex ist, dass es für praktisch relevante Problemgrößen nicht mehr exakt lösbar ist. Es wird vorgeschlagen, die Problemstellung in eine Serienbildung und anschließende Systemrüstung aufzubrechen. Die Serienbildung befasst sich damit, zu welcher Zeit und auf welcher Werkzeugmaschine eine Verarbeitungsoperation ausgeführt werden soll. Bei der Systemrüstung werden den Werkzeugmaschinen für alle in der Serie zusammengefassten Fertigungsaufträge, die erforderlichen Werkzeuge zugeteilt. Möglicherweise kann ein bestimmter Satz von Werkzeugen von mehreren Werkzeugmaschinen angesichts der Serien von Verarbeitungsoperationen geteilt werden. Atan und Pandit (1996) beschäftigen sich mit der Werkzeugzuteilung im Rahmen der Systemrüstung, wobei Werkzeuge zwischen den maschinennahen Magazinen der Werkzeugmaschinen hin und her getauscht werden können. Die Werkzeuganforderungen der Werkzeugmaschinen sind über die Zeit fest vorgegeben und die Transportzeit für ein Werkzeug von einer bestimmten Maschine zu einer anderen Maschine ist bekannt. Mohamed und Bernardo (1997) legen es darauf an, die geringstmögliche Anzahl von Werkzeugen zu bestimmen, so dass das vorgegebene Verarbeitungspensum der Maschinen in möglichst kurzer Gesamtbearbeitungsdauer bewältigt werden kann. Dabei lassen sie die Reihenfolge der Verarbeitungsoperationen ebenso wie die Verarbeitungszeiträume außer Acht. Atmani und Lashkari (1998) zielen bei der Werkzeugbestückung darauf ab, die Summe der Verarbeitungs-, Werkzeugtransport- und Rüstkosten so gering wie möglich zu halten. Eine Menge von Verarbeitungsoperationen wird bei ihnen wahlfrei auf mögliche Kombinationen von Werkzeugmaschinen und Sätzen von Werkzeugen verteilt. Somit werden das Verarbeitungspensum der einzelnen Maschinen bzw. das Einsatzpensum der benötigten Werkzeuge im Zuge der Planung ausgebildet. Es wird davon ausgegangen, dass innerhalb des Planungshorizonts für jede der Maschinen eine begrenzte Verarbeitungszeit und für jedes Werkzeug eine begrenzte Lebenszeit besteht.

Bei kostenorientierter Zielsetzung gibt es hingegen mit Verzweigen-Begrenzen-Verfahren kaum Erfolgsaussichten, in angemessener Berechnungszeit zu einem optimalen Ablaufplan zu kommen. Dies liegt hauptsächlich daran, dass eine auf den Gesamtkosten aufgebaute Zielfunktion praktisch immer Nichtlinearität aufweist und eine abschnittsweise Linearisierung für die aus dem Ablauf herrührenden Gesamtkosten impraktikabel ist. Demnach kann der Suchraum im Zuge von Verzweigen-Begrenzen-Verfahren angesichts von Teillösungen nur in unzureichender Weise beschnitten werden – sie verkommen mehr oder weniger zu vollständig enumerativen Verfahren. Dies soll sagen, es muss beinahe jede Lösung betrachtet werden, ehe zu erkennen ist – oder besser mathematisch bewiesen ist –, welche davon die kostenoptimale Lösung darstellt. Auch kleinere Instanzen von Ablaufplanungsproblemen sind aufgrund des konkreten Zeitbezugs oftmals nur exakt zu lösen, indem die Wertebereiche für die Entscheidungsvariablen wie zum Beispiel die Start- und Endzeitpunkte von Aktivitäten sehr stark verengt werden. Kennzeichnend für optimierende Ablaufplanung mit kostenorientierter Zielsetzung ist daher die statische Betrachtungsweise mit Suchraumeinschränkungen, bei welcher die Dauer, der frühestmögliche Start- und der späteste Endzeitpunkt sowie die Ressourcenanforderungen einzelner Aktivitäten bis hin zu Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen den Aktivitäten vorgegeben sein müssen. Sollte für vorgegebene Aktivitäten aus einer Menge von Ausführungszeitalternativen oder einer Menge alternativer Ressourcenanforderungen gewählt werden können, sind häufig problemspezifischere Lösungsverfahren erforderlich. Es kann zum Beispiel eine Gesamtproblem Instanz in mehrere gleichartige Teilproblem Instanzen zerlegt werden und die optimalen Lösungen der Teilproblem Instanzen zu einer Gesamtlösung zusammengesetzt werden.

II. Heuristische Optimierung

Heuristische Optimierungsverfahren sind universell einsetzbare Verfahren, welche mit einem in der Praxis vertretbarem Rechenaufwand hochwertige Lösungen ermitteln und damit zur effektiven Bewältigung realer Entscheidungsprobleme beitragen können.

In der Unternehmenspraxis werden zumeist einfach geartete Problemlösungstechniken wie zum Beispiel die Netzplantechnik eingesetzt oder es werden Prioritätsregeln verwandt, mit denen die Problemstellungen näherungsweise behandelt werden können (siehe unter anderen Sauer 2004). Daneben werden auch lokale Suchverfahren wie zum Beispiel mit einem Algorithmus für simulierte Abkühlung oder mit genetischen Algorithmen angewandt, in denen dann häufig problemspezifischen Heuristiken zum Tragen kommen (Kolisch & Hartmann 2006).

Die genetischen Algorithmen sind der natürlichen Auslese und Fortpflanzung nachempfunden (siehe unter Genetic Algorithms bei Gendreau & Potvin 2010). Bei ihnen werden Ablaufpläne als Individuen angesehen, welche für gewöhnlich durch Abfolgen von Einsatzaktivitäten mit Ressourcenzuteilung codiert sind. Aus einer bestehenden Population von Individuen wird durch Selektion und Variation von Ablaufplanausschnitten eine neue Generation von Individuen erzeugt. Damit eine nachkommende Generation nach Möglichkeit bessere Ablaufpläne enthält als die Elterngeneration, werden Ausschnitte aus höherwertigen Ablaufplänen bevorzugt und solche aus minderwertigen Ablaufplänen gemieden. Um einem Verlust der Vielfalt in der Population zu vermeiden, werden mit Hilfe von Rekombinations- und Mutationsoperationen künstlich neue Ablaufpläne hergestellt. Genetische Algorithmen funktionieren gut bei der Suche nach einem globalen Optimum, da Ablaufpläne über den ganzen Lösungsraum hinweg evolviert werden. Jedoch verhalten sie sich gleichgültig gegenüber speziellen Eigenschaften der jeweiligen Planungsproblemstellung; so ist durch Rekombinations- und

Mutationsoperationen in aller Regel nicht zu gewährleisten, dass jedes Individuum einen gültigen Ablaufplan repräsentiert, also eine Lösung der Planungsproblemstellung darstellt.

Unter lokaler Suche werden allgemein hin Verfahren verstanden, bei denen der Lösungsraum in einem meist zusammenhängenden Bereich gültiger Lösungen durchsucht wird. Zumeist wird mit der Suche bei einer einfach zu konstruierenden Startlösung begonnen und dann wiederholt in der Nachbarschaft der vorliegenden Lösung nach neuen Lösungskandidaten ausgeschaut. Durch die Nachbarschaftsstruktur wird in der Regel sichergestellt, dass die Suche nur bei gültigen Lösungen entlang kommt. Um entscheiden zu können, ob ein Lösungskandidat besser oder schlechter ist als die vorliegende Lösung ist, wird eine sogenannte Zielfunktion verwendet. Generell kann es passieren, dass aufgrund der Schrittweite, eine beste Lösung ausgelassen wird oder außerhalb der jeweiligen Nachbarschaften liegt.

Der Bergsteigeralgorithmus ist ein lokales Suchverfahren, bei welchem in jedem Suchschritt eine Verbesserung erreicht werden muss. Das heißt, es wird nur dann zu einem Lösungskandidaten übergegangen, falls dieser eine bessere Bewertung erzielt als zu zuletzt vorliegende Lösung. Durch den Bergsteigeralgorithmus werden lediglich lokale Extrempunkte im Werteverlauf der Zielfunktion gefunden. Das bedeutet, dass die Schlusslösung liegt bei einem bergauf oder bergab nächstgelegenen Extrempunkt im Werteverlauf der Zielfunktion. Zudem kann es bei stagnierendem Werteverlauf dazu kommen, dass beim Bergsteigeralgorithmus die Suche vorzeitig beendet wird, da in der direkten Nachbarschaft keine geeigneten Lösungskandidaten entdeckt werden können.

Bei der sogenannten Tabu-Suche ist es möglich, aus der Nachbarschaft auch zu einem Lösungskandidaten überzugehen, welcher der aktuell vorliegenden Lösung gleichwertig ist (siehe z. B. unter Tabu Search bei Gendreau & Potvin 2010). Der reine Bergsteigeralgorithmus liefe Gefahr, zwischen zwei gleichwertigen Lösungen unaufhörlich hin und her zu wechseln. Hingegen wird bei der Tabu-Suche eine Liste mit Lösungen geführt, die als Lösungskandidaten aus der Nachbarschaft ausgeschlossen werden. Somit ist es möglich, alle bisher erreichten Lösungen bei der Fortsetzung der Suche zu tabuisieren.

In einem auf Trajektorien basierenden Suchverfahren wird nicht bloß ein Suchpfad genommen, sondern es kann bei einem beliebigen Suchschritt oder einem bestimmten Suchkriterium in Nebenpfade verzweigt werden. Bei der Tabu-Suche gibt es in der Regel einen Hauptpfad; das Suchverfahren kann aber grundsätzlich zu einem trajektionsbasierten Suchverfahren erweitert werden.

C. *Verwandte Arbeiten*

In diesem Abschnitt wird eine Gesamtübersicht zu verwandten Arbeiten aus den Bereichen der Einsatzplanung für Werkzeugmaschinen und Transportfahrzeuge (eng. FMS/AGV Scheduling), der Kraftwerkseinsatzplanung (engl. Unit Commitment) und dem lokalen Energiemanagement (engl. Local Energy Management) gegeben.

In **Tabelle 4** ist kenntlich gemacht, dass sich für die Planungsproblemstellung dieser Arbeit keiner der Entscheidungsunterstützungsansätze aus den recherchierten Arbeiten sinnvoll aufgreifen lässt.

Tabelle 4: Gesamtübersicht verwandter Arbeiten

	Novas & Henning (2014) Bian et al. (2015)	Gollmer et al. (1997) Woldt (2008) Giuntoli & Poli (2013) Steck (2013)	Nottrott et al. (2013) Yoon & Kim (2014)	B2M
Basisanforderungen <i>Management Transportsysteme</i>				
Entkopplung				
Basisanforderungen <i>Management Anlagenverbund</i>				
Speicherstände				
Kompensation				
	FMS/AGV Scheduling	Unit Commitment	Local Energy Management	

Auf der einen Seite ist es für die vorliegende Arbeit maßgeblich, dass die Ablaufentscheidungen von Tag zu Tag auf der Ebene der Energiebereitstellung für die Fahrzeuge in ihrer Einbettung in die Abläufe auf der Ebene des Logistiksystemgeschehens getroffen werden. Es gibt mehrere Arbeiten aus dem Bereich der Ablaufplanung für Produktions- und Logistiksysteme, die Verarbeitungsaktivitäten integriert mit den Aktivitäten zum Transport von Werkzeugen, Materialien, etc. betrachten. Die Arbeit von Novas & Henning (2014) kann hier stellvertretend aufgeführt werden. Doch wie in **Tabelle 5** herausgestellt wird, setzt sich keine diese Arbeiten hinsichtlich der Ablaufplanung mit der Energiebereitstellung für Transportfahrzeuge über ein Batteriewechselkonzept auseinander oder ließe sich mit der Subaggregationsaufgabe der Wechselbatterien an den Ladestellen in Verbindung bringen.

Auf der anderen Seite gibt es eine Fülle von Arbeiten aus dem Bereich der Kraftwerkseinsatzplanung. Es wird in diesem Bereich darauf eingegangen, die Erzeugungsleistung der Anlagen respektive die Verbrauchsleistung über die Zeit günstig auf ein Elektrizitätsmarktumfeld einzustellen. Wie zum Beispiel bei Steck (2013) kann neben dem Stromgroßhandel auch der Regelleistungsmarkt in den Blick genommen werden. Doch wie **Tabelle 6** aufdeckt, bezieht keine der Arbeiten eine Energiebereitstellung für Transportfahrzeuge über ein Batteriewechselkonzept mit ein. Den Lösungsansätzen dieser Arbeiten ist gemein, dass die Anlagen ausschließlich auf Stammdatenbasis betrachtet werden. Somit bleiben besondere Verfügbarkeitsrestriktionen sowie zustandsbezogene Restriktionen beim Eintritt/Austritt in einen Verfügbarkeitszeitraum unreflektiert. Außerdem wird in keiner der Arbeiten eine Kompensation/Rückführung des Anlagenzustands angesichts einer möglichen Erbringung von Regelenergie beleuchtet.

I. Management von Transportsystemen

In einem automatisierten Seehafencontainerterminal mit fahrerlosem Transportsystem wird häufig online mit einfachen Strategien zur Auftragsvergabe gearbeitet. Dabei wird von einem Fahrzeug immer nur eine Folge von ein oder zwei Transportaufträgen verfolgt und die Transportlast auf gewünschte Weise innerhalb der Fahrzeugflotte verteilt (engl. Vehicle Dispatching, siehe Wook & Hwan 2000). Meist ist die Entfernung eines Transportfahrzeugs zum Ursprungsort ausschlaggebend dafür, dass es einen Transportauftrag übernimmt/zugewiesen bekommt. Wenn ein Fahrzeug keine Transportaufträge mehr anstehen hat, wird es in die Nähe einer aktiver Containerbrücke disponiert, um sich für eine Vergabe kommender Transportaufträge günstig zu stellen. Alternativ wird offline für

jedes der Fahrzeuge vorausschauend eine Folge von Transportaufträgen gebildet, die sich in einem kurzzeitigen Planungshorizont ergeben und sich dem Fahrzeug in günstiger Weise zuteilen lassen. In der Regel sind die Abholungs- und Zustellungszeitfenster erst kurzzeitig im Voraus bekannt, so dass eine Planung der Abläufe häufig rollierend in kurzfristiger Perspektive vorgenommen wird (engl. Look-Ahead Vehicle Dispatching, siehe Kim & Bae 2004). Die Planungshorizonte sind dann weitaus kürzer als ein Transportfahrzeug mit einer vollständigen Batterieladung unterwegs sein kann. Darum wird meist darauf verzichtet, Lade-/Entladeprozesse batterie-elektrisch angetriebener Fahrzeuge einzuplanen. Stattdessen werden Ausfahrten zu einer Batterieladestation ad hoc einer Auftragssteuerung oder auch der Fahrsteuerung überlassen.

Carlo et al. (2014) und Stahlbock & Voß (2007) liefern den Überblick zu einer Vielzahl von Arbeiten über Auftragsvergabe & Fahrzeugdisposition in Containerterminals. Diese reichen von exakten mathematischen Lösungsansätzen für die statische Planung von Einzellastransporten bis hin zu heuristischen Lösungsansätzen darüber hinaus. Ein Überblick zu Arbeiten über Transportsysteme in flexiblen Fertigungsumgebungen von Udhayakumar & Kumanan (2010) fällt übereinstimmend aus. Bis dato wird die Energiebereitstellung für Transportfahrzeuge weder für Containerterminals im Besonderen noch für Fertigungsumgebungen im Allgemeinen bei der optimierenden Planung in den Blick genommen. Dies liegt mag darauf zurückzuführen sein, dass Energiebereitstellungskosten bislang im Hinblick auf Betriebskosten eines Containerterminals (oder auf Fertigungskosten im Allgemeinen) als unbedeutend angesehen worden sind. Es kommt hinzu, dass im konventionellen Fuhrpark eines Containerterminals mit dieselbetriebenen Fahrzeugen keinerlei Flexibilität bei der Energiebereitstellung für Transportfahrzeuge vorzufinden gewesen ist.

McHaney (1995) setzt sich mit unterschiedlichen Ladestrategien für batterie-elektrisch betriebene Transportfahrzeuge auseinander. Er vergleicht die Auswirkungen des gelegentlichen Ladens der Fahrzeuge mit den Auswirkungen einer streng reglementierten Ladeautomatik. Eine Möglichkeit ist es, die auftragsfreie Zeit für die Fahrzeuge zu nutzen, um die fest installierten Batteriesysteme zu laden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Fahrzeuge so lange fahren zu lassen, bis ein bestimmter Ladezustand erreicht. Dieser Ladezustand deutet dann darauf hin, dass der normale Fahrbetrieb mit dem Batteriesystem nicht fortgesetzt werden kann, ehe es per Ladeautomatik ganz nachgeladen wurde. In seinen Untersuchungen stellt er fest, dass die Transportleistung durch Batteriespeichersysteme kaum beeinflusst wird, falls es feste Schichtwechsel- oder Pausenzeiten gibt, in denen bei Bedarf Batteriewechsel vorgenommen oder eine Fahrzeugbatterie geladen werden kann. Anderenfalls es die Auslegung des Transportsystems bzw. es die Auftragsbearbeitung gewöhnlich zulässt, dass zwischendurch geladen werden kann, sei der Einfluss auf die Transportleistung gering einzuschätzen.

Van Harten, Van der Heijden & Ebben (1999) beschäftigen sich in einem Anwendungsfallbeispiel mit der Energiebereitstellung für batterie-elektrisch betriebene Frachttransportfahrzeuge, die unterirdisch zwischen dem Frachtterminal des Flughafens in Schiphol und dem Blumengroßmarkt in Aalsmeer verkehren. Sie stellen einfache Überlegungen zum Betrieb mit fest installierten Fahrzeugbatterien, einem Betrieb mit Wechselbatterien und einem Betrieb mit Ladeschienen an. Neben Nickel-Cadmium-Batteriesystemen betrachten sie auch Blei-Batteriesysteme für die Transportfahrzeuge. Da sie in ihrem Anwendungsfallbeispiel von einer relativ geringen Batteriespeicherkapazität ausgehen, ist bei Blei-Batteriesystemen die Ladedauer ähnlich lang wie die Dauer des Fahrbetriebs mit einer vollständigen Batterieladung. Eine Verwendung von Fahrzeugbatterien erscheint darum für sie keine sinnvolle Energiebe-

reitstellungsoption zu sein. Zu einem Batteriewechselkonzept und den Ladeschienen machen sie sich weitere Gedanken. Es bleibt allerdings zunächst bei Kostenvergleichsrechnungen für das spezielle Anwendungsfallbeispiel. **Ebben** (2001) befasst sich näher mit der Auslegung und der Nutzung der Ladeinfrastruktur für das Anwendungsfallbeispiel. Er schlägt verschiedene Strategien für die Stationsauswahl durch die Transportfahrzeuge vor, bei denen weitere elektrische Energie nachgeführt werden muss. Zu den einfachen Auswahlstrategien gehört es, die Fahrzeuge an die nächstgelegene Batteriestation, die entfernteste noch erreichbare Batteriestation oder die nächste Batteriestation auf der aktuellen Route zu senden. Daneben schlagen sie vor, die Fahrzeuge an eine Station zu senden, die am nächsten zum Fahrtziel des Fahrzeugs liegt, bei der voraussichtlich die geringe Wartezeit/Verzögerung eintritt oder bei der noch die meiste Ladekapazität verfügbar ist.

In einigen wenigen Arbeiten, die batterie-elektrisch angetriebene Fahrzeuge behandeln, kommt der Energiebereitstellung allmählich mehr Beachtung zu. In der Arbeit von **Ebben** (2001) wurde sogar ein Batteriewechselkonzept thematisiert. Bei derartigen Überlegungen zur Aufbauplanung eines Containerterminals bleiben aber die alltäglichen Betriebsabläufe grundsätzlich im Verborgenen.

Kawakami & Takata (2012) diskutieren Strategien für das Management von Transportfahrzeugen mit Blei-Säure-Batteriesystemen. Auf der einen Seite betonen sie, dass Blei-Säure-Batteriesysteme mit einer vergleichsweise niedrigen Stromrate und innerhalb eines passablen Spannungsfensters geladen werden sollten, um eine größtmögliche Lebensdauer zu erreichen. Auf der anderen Seite stellen sie heraus, dass die Transportleistung der Fahrzeuge gemindert wird, wenn die Fahrzeugbatterien öfters und länger geladen werden. Sie entwickelten ein Simulationsmodell für kleinere Transportsysteme, um die Auswirkungen unterschiedlicher Betriebsweisen auf die Gesamtkosten für das Laden der Fahrzeugbatterien und die Transportleistung der Fahrzeuge insgesamt zu beurteilen. In ihren Simulationsexperimenten untersuchten sie verschiedene Anzahlen von Ladeplätzen und Batteriesystemen. Sie unterscheiden zwischen dem Einsatz fest eingebauter Fahrzeugbatterien und dem Einsatz von Wechselbatterien. Insgesamt gehen sie wohl von einem niedrigen Automatisierungsgrad aus, da sie den Personalaufwand für das Laden im Allgemeinen und etwa die Durchführung von Batteriewechsels mit einbeziehen. Letztlich versuchen sie für ein Transportsystem eine günstige Ausstattung mit Ladetechnik und Batteriesystemen zu bestimmen und die passenden Ladestrategien zu identifizieren. Damit liefern sie eine Entscheidungsunterstützung für die Ebene der kaufmännischen Planung, in welcher die Kapazität des Transportsystems, die Größe der Fahrzeugflotte sowie die Anzahlen von Ladeplätzen und Batteriesystemen festgelegt werden müssen. Sie setzen Simulationswerkzeuge ein, um unter den Ausstattungsmöglichkeiten in Kombination mit einer Auswahl von Ladestrategien die Variante mit den niedrigsten Gesamtkosten zu ermitteln.

Tabelle 5: Teilübersicht verwandter Arbeiten zum Management von Transportsystemen

		AGV System Design				FMS/AGV Scheduling		
		McHaney (1995)	Van Harten, Van der Heijden & Ebben	Ebben (2001)	Kawakami & Takata (2012)	Novas & Henning (2014)	Bian et al. (2015)	Eigene Arbeit
Managementebene Auslegungsfragen		Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
	Batterieelektrische Transportfahrzeuge	Ja	Ja	Ja	Ja	-	-	-
	Ladeinfrastruktur für Batteriesysteme	Nein	Ja	Ja	Nein	-	-	-
Managementebene Einsatzstrategien		Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
	Batteriewechselkonzept	-	-	Ja	Nein	-	-	-
	Lebenszyklus Batteriesysteme	-	-	Nein	Ja	-	-	-
Operative Ebene Fahrzeugeinsatzplanung		Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja
	Transportauftragszuweisung	-	-	-	-	Ja	Ja	Nein
Anf. 1.1	Erfüllung der Transportlast	-	-	-	-	(Ja)	(Ja)	Ja
Anf. 1.2	Entwicklung des Ladezustands	-	-	-	-	Nein	Ja	Ja
Anf. 1.3	Vornahme von Batterietauschen	-	-	-	-	Nein	Nein	Ja
Anf. 1.4	Nebeneinander von Laden und Entladen	-	-	-	-	Nein	Nein	Ja

Novas & Henning (2014) stellen ein Nebenbedingungsprogramm für eine flexible Fertigungs-umgebung mit einem autonomen Transportfahrzeug vor. Es behandelt das Ausrüsten von mehreren Ma-schinen, die Verarbeitung an den Maschinen sowie den Transfer von Fertigteilen aus maschinennahen Lagern, nicht aber die Energieversorgung des Transportfahrzeugs. Mit Präzedenzbeschränkungen wird dafür gesorgt, dass bestimmte Wegekettens für die Transportaufgaben des Fahrzeugs eingehalten werden, die sich durch eine zentrale Teilestation ergeben. Wenn dem Abtransport eines Teils von der Teilestation ein Antransport eines Teils zu der Teilestation folgt, muss eine Leerfahrt ausgeführt werden. An den Ma-schinen gibt es Teilepuffer, so dass Teile an eine Maschine gebracht werden können, ehe sie eine Ver-arbeitung des vorangegangenen Teils abgeschlossen hat. Erfordert ein Teil an einer Maschine mehrere Ver-arbeitungsschritte nach einander, so muss es ebenfalls in den Teilepuffer vom Maschinenausgang an den -eingang zurückgegeben werden.

Bian et al. (2015) präsentieren einen Lösungsansatz mit einem Nebenbedingungsprogramm für die Fahrzeugdisposition in automatisierten Containerterminals mit batterieelektrischen Transportfahrzeugen. Sie behandeln die Fahrzeugdisposition als ein Zuordnungsproblem und beziehen den Ladezustand der Fahrzeugbatterien in Nebenbedingungen mit ein.

Nach bisherigen Arbeiten kann durch Auslegungsstrategien eine Entscheidungsunterstützung für die Einrichtung von Transportsystemen gegeben werden. Neben den Transportkapazitäten batterieelektrisch angetriebener Fahrzeuge werden durchaus bereits die Kapazitäten der Ladeinfrastruktur betrachtet. Unterschiedliche Energiebereitstellungsoptionen können heute in der Kostenrechnung für den Aufbau und den Betrieb von Transportsystemen beurteilt werden. Für unterschiedliche Einsatzgebiete gibt es bereits spezielle Simulationssysteme, mit denen Kapazitätzusammenhänge überprüft werden können. Außerdem lassen sich die Auswirkungen verschiedener Betriebsweisen, einschließlich der anzuwendenden Batteriewechsel- und Ladestrategien, realistisch vor Augen führen. Doch wie **Tabelle 5** offenbart, fehlt es schlichtweg an Arbeiten über das Management von Transportsystemen mit einer Ablaufplanung, in welcher Lade-/Entladeprozessen der Batteriesysteme und Batterietausche berücksichtigt werden.

II. Management virtueller Kraftwerke

In den vergangenen Jahren wurden unterschiedliche Verfahren zur Optimierung des Einsatzes eines Verbunds von Kraftwerken entwickelt (Padhy 2004). Bei der Kraftwerkseinsatzplanung geht es darum, eine betriebswirtschaftlich optimale Fahrweise für ein Einzelkraftwerk oder mehrere zu einem Verbund zusammengeschlossene Kraftwerksanlagen zu finden.

Die fundamentale Planungsproblemstellung wurde angesichts einer kleinen Anzahl von thermischen Kraftwerksblöcken eingeführt, bei denen die Kraftwerksleistung über die Zeit in einer Erzeugungskurve allokiert und ein Kraftwerksfahrplan erstellt werden muss (engl. General Unit Commitment, UC, Ayoub & Patton 1971). Dabei werden typischerweise zumindest Brennstoffkosten, die Kosten für das An- und Abfahren und andere variable Betriebskosten berücksichtigt. Es gibt generell für das Anfahren wie auch für das Abfahren maximal zulässige Leistungsgradienten. Zudem sind meist noch technische Restriktionen für das An- und Abfahren innerhalb der Mindest- und Höchstleistung eines bestimmten Kraftwerks zu beachten. Zusätzlich können auch eine Mindeststillstandszeit, eine Mindestlaufzeit oder andere Verfügbarkeitsrestriktionen gegeben sein. Für kleinere Optimierungsaufgaben wie zum Beispiel die Tageseinsatzplanung für wenige Dutzend Kraftwerke erweist sich insbesondere die Formulierung als gemischt-ganzzahliges nicht-lineares Programm seit jeher als geeignet. In dieser Arbeit ist die Verfügbarkeit der Wechselbatterien auf ihre Kontaktierung in der Batterieladestation beschränkt. Wären die Stationsaufenthaltszeiträume bekannt, ließe sich die Verfügbarkeit der Batteriespeichersysteme im Sinne der Kraftwerkseinsatzplanung vorgeben. In der Planungsproblemstellung dieser Arbeit gibt es außerdem eine weiterreichende Nebenbedingung, dass die Wechselbatterien im übertragenen Sinne am Anfang und besonders am Ende eines Verfügbarkeitszeitraums bestimmte Speicherfüllstände aufweisen müssen. Die Anfahrkosten werden bei der Kraftwerkseinsatzplanung in Abhängigkeit zu dem aktuellen und den vorangegangenen Schaltzuständen betrachtet. Bei den Ladeprozessen von Wechselbatterien wäre für einen Ladevorgang genau genommen der Verlauf der Konstantstromphase und einer abschließenden Konstantspannungsphase zu behandeln. Bei der Aufteilung eines Ladeprozesses in mehrere Vorgänge wird dieser etwas zeitraubender, da jeder Ladevorgang einer Ladegeräteeinheit mit der Ladezustandserkennung beginnt.

Für konventionelle Kraftwerke wird berücksichtigt, dass sich in Abhängigkeit von der Erzeugungsleistung ein anderer Wirkungsgrad ergeben kann. Bei der Planung der Ladeverläufe wird in dieser Arbeit hingegen vereinfachend von verlustfreien, wirkungsgradunabhängigen Ladevorgängen ausgegangen. Beim Laden/Entladen von Blei- oder Lithium-Batteriesystemen in den jeweils technisch vertretbaren Leistungsbereichen tritt eine vernachlässigbar geringe Verlustleistung auf. Zudem kann der Speicherwirkungsgrad bei den verschiedenen Batterietypen als unabhängig von der Lade-/Entladeleistung verstanden werden.

Die optimierende Planung des Ladeverlaufs einer einzelnen Wechselbatterie ähnelt der Tageseinsatzplanung für ein Pumpwasserspeicherkraftwerk. Die Turbinen- bzw. Pumpleistung beim Pumpwasserspeicherkraftwerk ist gleichbedeutend mit der Lade-/Entladeleistung im Ladeprozess einer Wechselbatterie. Die durch Wasser im Oberbecken gespeicherte Energiemenge entspricht dem Ladezustand einer Wechselbatterie. Das Arbeitsvermögen der Turbinen und Pumpen ist durch den Füllstand des Unter- und Oberbeckens begrenzt. Der Einsatz thermischer Kraftwerke kann kurzzeitig gemeinsam mit Pumpwasserspeicherkraftwerken geplant werden (engl. Short-Term Hydrothermal Scheduling, STHS, siehe Shaw, Gendron, & Bertsekas 1985). Dabei geht es um die optimale Auswahl der Kraftwerksblöcke und die Festlegung der Turbinenleistung für thermische Kraftwerke sowie Pumpwasserspeicherkraftwerke zur Minimierung der Anfahr- und Brennstoffkosten. Für die Pumpwasserspeicherkraftwerke muss außerdem die Pumpenleistung über die Zeit festgelegt werden. Die Festlegungen zur Erzeugungskurve der thermischen Kraftwerksblöcke wie auch des Pumpwasserspeicherkraftwerks ranken sich darum, einen vorgegebenen Strombedarf über die Zeit zu decken. Der Grundgedanke der Einsatzplanung liegt darin, den Pumpwasserspeicher zur Steigerung des durchschnittlichen Wirkungsgrads der thermischen Kraftwerksblöcke einzusetzen. Die Fokussierung auf die Betriebskosten ist erklärlich, insofern die Kraftwerksbetriebe früher überwiegend vollintegrierten Energieversorgungsunternehmen zugehörten und somit für die Erzeuger-/Angebotsseite abgesehen vom größtenteils bilateralen Stromgroßhandel kurzzeitig kaum Strompreisschwankungen auftraten.

Die Möglichkeit zur Bereitstellung von Regelleistung durch konventionelle Kraftwerke geht streng genommen auf die gespeicherte Energie zurück, welche dem Kraftwerk durch die fossilen Energieträger zugeführt werden kann. Durch einen regelbaren Kraftwerksbetrieb kann wie zum Beispiel im Falle von Kohle- und Erdgaskraftwerken chemische Energie nachfrageorientiert und bedarfsgerecht in elektrische Energie gewandelt werden. Ein gedrosselter thermischer Kraftwerksprozess weist eine reservierte Leistung auf, das heißt die Erzeugungsleistung kann bei Bedarf auf die Mindestleistung herunter- oder auf die Höchstleistung hochgefahren werden. Bei einem Speicherkraftwerksbetrieb wie zum Beispiel einem Pumpwasserspeicherkraftwerk besteht ebenfalls die Möglichkeit, Erzeugungsleistung nach oben wie nach unten anzupassen. Hierbei gelten allerdings Restriktionen bezüglich des Speicherfüllstands, das heißt wie viel Wasser sich im oberen und unteren Becken befindet; es kann beispielsweise nur insoweit Regelleistung bereitgestellt werden, als dass zwischen dem Ober- und Unterbecken ein-/ausgespeichert und dabei die Pumpen- und Turbinenleistung angepasst werden kann. Im Äquivalent zur Seite der Erzeuger/Speicher kann auch von der Verbrauchsseite sowohl positive als auch negative Regelleistung bereitgestellt werden. Während bei einem Kraftwerksprozess die Erzeugungsleistung zur Erbringung positiver Regelleistung erhöht wird, muss bei einer Verbrauchsstelle die Leistungsaufnahme reduziert werden. Umgekehrt müsste zur Erbringung negativer Regelleistung die Erzeugungsleistung im Kraftwerksprozess reduziert und bei der Verbrauchsstelle

die Leistungsaufnahme erhöht werden. In erweiterten Planungsproblemstellungen wird die Kraftwerksleistung nicht mehr allein für eine Veräußerung im Stromgroßhandel allokiert, sondern es wird Reserveleistung zur Gewährleistung eines stabilen Netzbetriebs vorgesehen (engl. Security-Constrained UC, siehe Baldick 1995 und Gollmer et al. 1997). Es wird zum Beispiel darüber entschieden, erhöhte Turbinenleistung und verminderte Pumpenleistung als Reserve zu verwenden. Unter Berücksichtigung des Wasserfüllstands des Oberbeckens bei einem Pumpwasserspeicherkraftwerk wird so die Bereitstellung von positiver Regelleistung einbezogen. Es wird in der Problemformulierung gefordert, dass das Oberbecken im Laufe eines Tages trotz einer Erbringung von Regelenenergie nicht leer wird. Wie der Füllstand des Oberbeckens im Bedarfsfall auf ein Basisniveau zurückgeführt werden kann und welche Kosten mit einer solchen Konditionierung verbunden sind, wird dagegen nicht betrachtet.

Im Gegensatz zur Erzeuger-/Angebotsseite nehmen Privathaushalte sowie Gewerbe- und Industriebetriebe auf der Verbrauchs-/Nachfrageseite bis auf wenige Ausnahmen nicht direkt an den Elektrizitätsmärkten teil; die Stromhändler und die Stromlieferanten üben hier eine Mittlerfunktion aus und tragen die Energiemengen- sowie Preisrisiken. Innerhalb der gegenwärtigen Tarifgebilde hat es nur begrenzten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit, die optimale Fahrweise von Verbrauchsanlagen hinsichtlich der Strombezugspreise oder einer Vergütung für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen zu bestimmen. Dennoch gibt es schon heute vereinzelt tarifliche Anreize für Verbrauchsstellen, sich bei einem Stromhändler oder Stromlieferanten in einem Verbund mit Kraftwerken zu beteiligen und schaltbare Geräte zur Verfügung zu stellen. In neueren Planungsproblemstellungen wurden Möglichkeiten einbezogen, den zu deckenden Strombedarf durch geplante Schalthandlungen auf der Verbrauchsseite zu kappen (engl. Security-Constrained UC With Load Curtailment, siehe Zhang et al. 2005). In dieser Arbeit spielen Möglichkeiten zum Kappen des Strombedarfs und die auf eine Netzstabilität bezogene Kraftwerkseinsatzplanung keine Rolle. Ausblickend wird auf Geräte/Anlagen im Containerterminalbetrieb eingegangen, die bei Bedarf intern abgeschaltet werden können, um überhöhte Verbrauchswerte zu vermeiden.

Heutzutage ist die Fahrweise thermischer Kraftwerke und Speicherkraftwerke sehr stark ausschlaggebend für deren Wirtschaftlichkeit; es ist ein gänzlich restrukturiertes, dereguliertes Marktumfeld vorzufinden. Dies führt zu einer veränderten Planungsproblemstellung, in welcher sich Preisprognosen für die Elektrizitätsmärkte niederschlagen und es auf eine Maximierung des Ergebnisses im Stromgroßhandel angelegt wird (engl. Price-Based UC, siehe Arroyo & Conejo 2000; Pokharel et al. 2005). Die Festlegungen der Erzeugungskurve richten sich nicht mehr danach, den voraussichtlichen Strombedarf passgenau abzudecken. Es gibt in diesen Planungsproblemstellungen keine Beschränkung auf eine gewisse Strombedarfsmenge mehr. Zur Steigerung des Gesamtergebnisses kann es sinnvoll sein, eine größere Strommenge zu veräußern als alternativ zur Deckung des Strombedarfs entschieden worden wäre. Bereits getätigte Terminmarktgeschäfte oder Geschäfte aus dem Vortagshandel engen den Spielraum für die Erzeugungs- bzw. Verbrauchsleistung ein. Häufig müssen bei der Bestimmung der optimalen Anlagenfahrweise auf der Erzeuger-/Angebotsseite als auch auf der Verbrauchs-/Nachfrageseite bereits fixierte fahrplanmäßige Stromlieferungen beachtet werden. Bei einem herkömmlichen Kraftwerksbetrieb bedeutet dies in der Regel, dass über entsprechende Grundlast- oder Spitzenlastproduktzeiträume bereits Energiemengen abzugeben sind. Damit wäre in diesen Zeitabschnitten innerhalb der Kapazitätsgrenzen ein Teil der Erzeugungsleistung bereits festgelegt/verplant. Bei einem Containerterminalbetrieb ist es umgekehrt denkbar, dass über Grundlast-

oder Spitzenlastproduktzeiträume bereits gewisse Energiemengen aufzunehmen sind. Solche Vorgaben können aus Sondervertragsbedingungen mit einer oberen und unteren Limitierung der Verbrauchs-/Entnahmeleistung oder durch eine vorangegangene strukturierte eigene Beschaffung eines Containerterminalbetriebs hervorgerufen werden. Damit ist dann ein Teil der Verbrauchsleistung für die Batterieladestation insgesamt bereits festgelegt. Aufgrund der Tatsache, dass in der Batterieladestation mehrere Ladegeräteeinheiten zusammengefasst sind, ist im Rahmen der Ablaufplanung noch offen, auf welche Ladegeräteeinheiten und schließlich welche Ladeprozesse von Wechselbatterien sich die vorgegebene Verbrauchsleistung verteilt.

Schnell regelbare Kraftwerke mit niedrigen An-/Abfahrkosten sollten sich neben dem Stromgroßhandel auch auf den Regelleistungsmarkt orientieren, um ihr betriebliches Gesamtergebnis zu maximieren. Zwar ist der Regelleistungsmarkt hierzulande anders strukturiert als die Märkte für vergleichbare Systemdienstleistungen in der übrigen Welt, jedoch erscheinen die Planungsproblemstellungen übertragbar. Es kann also grundsätzlich eine Einsatzplanung für eine einzelne Anlage oder für einen Verbund von Anlagen vorgenommen werden, so dass das Ergebnis in Anbetracht der Vermarktungsoptionen optimal ist (engl. Profit-Based Unit Commitment, Shahidehpour, Yamin & Li, 2008).

Laut Wood, Wollenberg & Sheblé (2013) müssen bei größeren Optimierungsaufgaben spezialisierte Zerlegungen im Zeitbereich vorgenommen werden oder Kraftwerke in Unterverbänden organisiert werden.

Woldt (2008) beschäftigte sich mit der marktorientierten Betriebsführung von kleineren Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) für Privathaushalte. Er stellt heraus, dass KWK-Anlagen sowohl den lokalen Versorgungsbedürfnissen des jeweiligen Anlagenbetreibers gerecht werden können als auch bestehende Energieeffizienzpotenziale im kommunalen Versorgungsbereich erschließen lassen. Er beschreibt einen Optimierungsansatz für die Einsatzplanung von Einzelanlagen und setzte diesen in einem Offline-Planungswerkzeug um. Weiter eruiert er mit einer Szenarientechnik die Integrationsmöglichkeiten von KWK-Anlagen innerhalb eines Versorgungsgebiets und beleuchtet ökonomische Effekte für Anlagenbetreiber und kommunale Versorgungsunternehmen.

Giuntoli & Poli (2013) gehen auf die Einsatzplanung für einen Verbund mit konventionellen Kraftwerksanlagen, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, Heizungskesseln sowie Strom- und Wärmespeichern ein. Mit Hilfe eines gemischt-ganzzahligen nicht-linearen Programms lässt sich die elektrische und thermische Erzeugungsleistung einschließlich der Ein-/Auspeicherung bei den Strom- und Wärmespeichern optimierend planen. Dabei sind die Verbrauchsleistung von kleinen und mittelgroßen Gewerbebetrieben sowie die Erzeugungsleistung von regenerativen Energieanlagen vorgegeben. Im Endeffekt wird also der Energiefluss innerhalb der miteinander verbundenen Anlagen, die Deckung des Wärmebedarfs und der Residuallastkurve des Anlagenverbundsystems sowie der zugekaufte und abverkaufte Strom behandelt.

Steck (2013) stellt verschiedene zentralistische Ansätze für die Einsatzplanung eines Verbunds von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen vor. Er unterscheidet zwischen der Einsatzplanung vor dem Abschluss von Handelsgeschäften am Vortag und der Resttagsplanung mit einigen vorvereinbarten Handelsgeschäften. Eine Resttagsplanung kann durchgeführt werden, wenn unvorhergesehene Ereignisse wie zum Beispiel ein Anlagenausfall oder Ähnliches eingetreten sind. Er stellt heraus, dass das Einsatz-

planungsproblem mit Hilfe eines gemischt-ganzzahligen nicht-linearen Programms in einer für die Vortagsplanung angemessenen Zeit exakt lösbar ist. Für die Resttagsplanung sei selbst ein Rechenzeitaufwand von wenigen Minuten hingegen nicht tolerierbar. Daher schlägt er sowohl für den stromgeführten Betrieb als auch für den wärmegeführten Betrieb einige Heuristiken zur Lösung des Einsatzplanungsproblems vor.

Tabelle 6: Teilübersicht verwandter Arbeiten zum Management virtueller Kraftwerke

		Unit Commitment				Eigene Arbeit
		Gollmer et al. (1997)	Woldt (2008)	Giuntoli & Poli (2013)	Steck (2013)	
Operative Ebene Anlageneinsatzplanung		Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Anf. 2.1	Bewusstsein über Leistungsgrenzen der Anlagen	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Anf. 2.2	Bewusstsein über Speicherkapazitätsgrenzen	Ja	(Ja)	Ja	Ja	Ja
	Elektrischer Anlagenwirkungsgrad	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein
Anf. 2.3	Bewusstsein über die Energienachführung	(Nein)	(Nein)	(Nein)	(Nein)	Ja
	Elektrische Lastdeckung	Ja	Ja	Ja	Ja	(Nein)
	Thermische Lastdeckung	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein
	An-/Abfahrkosten und Laständerungskosten	Ja	(Nein)	Nein	Ja	Nein
Anf. 2.4	Bewusstsein über Verfügbarkeitsrestriktionen	Nein	(Nein)	Nein	Ja	Ja
Anf. 2.5	Bewusstsein über Eingangs-/Ausgangsrestriktionen	Nein	(Nein)	(Nein)	Nein	Ja
Anf. 2.6	Bewusstsein über den Stromgroßhandel	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Anf. 2.7	Bewusstsein über den Regelleistungsmarkt	(Nein)	(Nein)	Nein	Ja	Ja
Anf. 2.8	Kompensation bei Regelenergieerbringung	Nein	(Nein)	(Nein)	Nein	Ja

Im Rahmen einer Bilanzkreisführung kann der Strombedarf auf der Verbrauchsseite durch gezielte Schalthandlungen in andere Zeitbereiche verlegt werden, insofern man sich der Vorziehungs- und Nachholungseffekte bewusst ist. Derartige Verschiebepotenziale können in einer erweiterten Planungsproblemstellung in der Regel nur vage vorgegeben werden, weshalb hier überwiegend stochastische Planungsansätze verwendet werden (engl. Demand Side Resource Scheduling, Schneider, Klabjan & Thonemann 2013). Außerdem sind die für eine Tageseinsatzplanung verwendeten Prognosekurven für den Stromertrag von Windkraft- und Photovoltaikanlagen und des zu deckenden Be-

darfs mit einer Unsicherheit behaftet. Daher mögen insgesamt bei der Ausführung und Kontrolle eines Einsatzplans am Erfüllungstag positive bzw. negative Abweichungen von den am Vortag generierten Fahrplänen einzelner Anlagen auftreten.

III. Lokales Energiemanagement

Es gibt vielfältige Arbeiten über die Auslegung stationärer Batteriespeichersysteme sowie über die operative Planung und Steuerung solcher Systeme (Batterie-Energiespeichersystem, kurz BESS) im Großen wie im Kleinen.

Die Einbindung eines Batteriespeichersystems in ein Arealnetz mit Windkraft- oder auch Photovoltaikanlagen kann dazu dienen, die nicht selten stark schwankende Einspeiseleistung zu vergleichmäßigen und die prognostizierte Erzeugungskurve im Verlaufe eines Tages einhalten zu können (engl. Wind Power Dispatching). Um die Stromerträge von Windkraft- und Photovoltaikanlagen direkt vermarkten zu können, müssen diese in dem Sinne vertragsfähig sein, dass sich die zu veräußernden Energiemengen nach Fahrplan bereitstellen lassen. Abgeschwächt wird dies häufig auch für eine Beteiligung in einem Verbund mit konventionellen Kraftwerksbetrieben vorausgesetzt.

Für einen Windpark entwickelten Teleke et al. (2009) eine Regelungsstrategie auf die Ein-/Auspeicherleistung eines Batteriespeichersystems, welche dessen Ladezustandsgrenzen, Beschränkungen der Lade-/Entladerate sowie die Alterungsumstände berücksichtigt. Ihr Regelungsansatz zielt darauf ab, den Windpark auf der Grundlage der vorhergesagten Windbedingungen auf Stundenbasis verlässlich in die Kraftwerkseinsatzplanung hinzuziehen zu können. Nach Li et al. (2011) lässt sich außerdem bestimmen, welchen Energieinhalt ein Batteriespeichersystem aufweisen muss, damit der Windpark als eine ausreichend verlässliche Anlage eingeplant und der Energieertrag bestmöglich veräußert werden kann.

Bisherige Arbeiten beziehen sich hier auf die Ein-/Auspeicherleistung eines Batteriespeichersystems gegenüber dem kurzfristig erkannten Prognosefehler in einem rollierenden Zeithorizont weniger halber Stunden mit Rückkopplung des Batterieladezustands. In dieser Arbeit wird dagegen eine Planungsproblemstellung mit einem Horizont von mehreren Stunden behandelt, bei der es primär um die in einem Transportfahrzeug konsumierte bzw. aus einem Batteriesystem ausgespeicherte Energie sowie die stationär nachzuführende Energie geht. Anders als bei der Erzeugungskurve bestenfalls prognostizierbarer Windkraftanlagen wird für den Containerterminalbetrieb unter den Gesichtspunkten der Strombezugskosten und Erlösen aus dem Angebot von Minutenreserve eine Verbrauchskurve festgelegt/geplant. Die mitunter planvoll vorausschauende Regelegung der Ein-/Auspeicherleistung eines Batteriespeichersystems an einem Windpark ist auf die Fahrplaneinhaltung ausgerichtet und findet tagaktuell statt. Im Gegensatz dazu erfolgt die Planung der Batterieeinsatzaktivitäten im Containerterminalbetrieb an einem Tag im Voraus nach den Gesamtkosten für das Laden/Entladen. In dieser Arbeit wird nicht betrachtet, wie ein Containerterminalbetrieb zu einer zutreffenden Verbrauchsprognosekurve kommen und tatsächlich einen Stromverbrauch nach Fahrplan erfüllen kann.

Beim Einsatz von Batteriespeichersystem in Privathaushalten und kleineren Gewerbebetrieben kommt der Planungsaspekt mit entsprechenden Kostengesichtspunkten eher zur Geltung. Denn es dürfte in einem solchen Umfeld zum Beispiel mit einzelnen Windrädern oder Photovoltaik-Dach-

Anlagen nicht so viel Strom gewonnen werden, dass ein Aufwand für eine Vermarktung zu rechtfertigen wäre und folglich auf Fahrpläneinhaltung zu achten wäre. Allerdings mag es hier im Rahmen eines Vollversorgungsvertrags die Möglichkeit zur überwiegenden Eigennutzung der Stromerträge und Vergütung für den ins öffentliche Verteilungsnetz rückgespeisten Strom geben. Mit einem Batteriespeichersystem kann es gelingen, den in Abhängigkeit des Dargebots von Wind und Sonne gewonnenen Strom für den Bedarf vor Ort zu puffern und den Anteil der Eigennutzung zu erhöhen.

Nottrott et al. (2013) betrachten ein Batteriespeichersystem im kleineren Maßstab in der Kombination mit einem Photovoltaik-Anlagen-System (PV-Anlage) und der Anbindung an ein öffentliches Versorgungsnetz. Sie entwickelten ein lineares Programm, um einen Ein-/Auspeicherungsverlauf für das Batteriespeichersystem ermitteln zu können, bei welchem die Residuallastspitze unter gewissen technischen Restriktionen des Batteriespeichersystems minimal ist. Dabei greifen sie auf Vorhersagekurven für die Stromgewinnung der PV-Anlage sowie für den Strombedarf vor Ort zurück. Die geplanten Lade-/Entladeverläufe werden nach den Kosten für den Strombezug bei einem zeitabhängigen Tarif und den Kosten der Restwertminderung des Batteriespeichersystems bewertet. Verständlicherweise kommen sie mit einem vorausschauend geplanten Lade-/Entladeverlauf in der Summe zu niedrigeren Kosten als bei einem unwillkürlich auf Haupt- und Nebentarifzeitraum abgestimmten Lade-/Entladeverlauf.

Typischerweise wird im Rahmen von Spitzenlastmanagement angestrebt, hinsichtlich stromtariflicher Arbeits- und Leistungspreise in einer Abrechnungsperiode eine hohe Nutzungsdauer der Anlagen und möglichst niedrige Leistungsspitzen aufzuwerfen. Es sind darum unlängst Beschränkungen der Leistungsaufnahme von Anlagenteilen und/oder Maschinen (engl. *Energetic Reasoning*, Erschler & Lopez 1990) bei der Maschinenbelegungsplanung vorzufinden. Mitunter wird die Leistungsaufnahme von Maschinen sogar in Differenzierung der Werkzeugausstattung oder in Abhängigkeit vom verarbeiteten Auftrag betrachtet. Die Beanspruchung elektrischer Leistung/elektrischer Energie muss hierbei über die Zeit innerhalb gewisser Kapazitätsgrenzen liegen (engl. *Energy Scheduling*, Artigues, Lopez & Haït 2009). In der Praxis sind diesbezüglich bei industriellen Anlagensystemen Lastabwurfverfahren für Druckluftsysteme, Antriebssysteme, etc. gängig. Dazu wird die Entwicklung des Stromverbrauches bzw. der Stromentnahme am Netzanschlusspunkt intraviertelstündlich überwacht. Überschreitet der voraussichtliche Gesamtverbrauchswert der laufenden Viertelstunde den eingestellten Höchstwert, so werden eingebundene elektrische Geräte, welche zurzeit einer Lastspitze im Betrieb sind und nicht gerade für die Produktion notwendig sind, ausgeschaltet, ohne dass der Prozess in irgendeiner Weise gestört oder beeinträchtigt wird (engl. *Load Shedding*).

Yoon & Kim (2014) untersuchen den Einsatz eines großangelegten Batteriespeichersystems bei einem Gewerbebetrieb, der über Windkraft- bzw. Photovoltaikanlagen verfügt. Sie entwickelten einen genetischen Algorithmus zur Bestimmung eines kostengünstigen Ein-/Auspeicherungsverlaufs, um bei einem zeitabhängigen Tarif sowohl die Strombezugskosten als auch die Grund-/Leistungspreisentgelte zu minimieren.

Bisherige Arbeiten liefern genügende Ansätze dafür, mit Hilfe des Einsatzes stationärer Batteriespeichersysteme bei Privathaushalten und Gewerbebetrieben die Kosten für den Strombezug aus dem öffentlichen Netz zu reduzieren. Es wurde dabei auf unterschiedliche Tarifgebilde, die Möglichkeit zur Eigenerzeugung sowie zur Steuerung der Energienachfrage eingegangen. Sicherlich gibt es in einem Privathaushalt beispielsweise mit dem Geschirrspüler andere Gerätetypen und Nutzungsprofile als in einem Gewerbebetrieb. Prinzipiell lässt sich jedoch gleichermaßen eine zeitliche Verschiebung

des Stromverbrauchs erreichen, wodurch eine Vergünstigung beim Strombezug hervorgerufen werden kann. Während es für Privathaushalte und Gewerbebetriebe allein auf eine Minimierung der Strombezugskosten ankommt, sind stromintensivere Industriebetriebe zu nennenswerten Angeboten von Regelleistung in der Lage. Diese Arbeit befasst sich darum sowohl mit dem Stromgroßhandel als auch mit dem Regelleistungsmarkt; die Ablaufpläne werden nach den Strombezugskosten abzüglich der Erlöse aus dem Angebot von Minutenreserve bewertet. Es kommt hinzu, dass die Batteriesysteme im Containerterminalbetrieb nicht ständig in der Ladestation kontaktiert sind, sondern wechselweise auch als Ausstattung der Fahrzeuge fungieren. Ein Angebot von Minutenreserve kann sich auf Stationsaufhalten mehrerer Wechselbatterien begründen lassen, ohne dass die Aufenthaltszeiträume vollständig deckungsgleich sein müssen. Es wird also im Unterschied zu bisherigen Arbeiten vom Einsatz quasi-stationärer Batteriespeichersysteme ausgegangen.

D. *Eigene Herangehensweise*

In diesem Abschnitt wird zunächst darauf plädiert, dass die Planungsproblemstellung dieser Arbeit sehr komplex aufgebaut ist und inwieweit sich gängige Planungsmodelle dafür aufgreifen lassen. Anschließend wird diskutiert, welches der bekannten Lösungsverfahren vielversprechend für die Planungsproblemstellung dieser Arbeit umzusetzen ist.

Normalerweise funktionieren der Materialtransport und der Teiletransfer losgelöst von den Verarbeitungsoperationen an den Maschinen/Werkern. Diese verfügen über einen Material- und Teilepuffer, so dass sie schon eine nächste Verarbeitungsoperation durchführen können, während die zuletzt gefertigten Teile abgeholt sowie neues Material und vorverarbeitete Teile gebracht werden. Wie **Abbildung 12** illustriert, trifft dies innerhalb des Logistikgeschehens auch für die Transportfahrzeuge zu. Im Anwendungsfallbeispiel eines Containerterminals können die Fahrzeuge an einem Kranteil am Kai einen Container von einer Laschplattform aufgegeben bekommen, während ein anderer Kranteil der Containerbrücke weiterhin Container auf das Schiff lädt oder Container von diesem entlädt. Mit Blick auf das Logistikgeschehen verhalten sich die Kai- und Lagerkräne wie Verarbeitungsstationen und die Containertransporter wie Transportmittel für die Container. Wegen der gewählten Abstraktion vom Logistikgeschehen bzw. einzelnen Transportaufträgen spielt allerdings die Ortsveränderungen der Fahrzeuge beim Erfüllen der Transportanforderungen in der Problemstellung dieser Arbeit keine Rolle. Eine zutreffende Vorhersage der individuellen Transportprogramme vorausgesetzt, können sie beim Energiebereitstellungsgeschehen vielmehr als Werker verstanden werden.

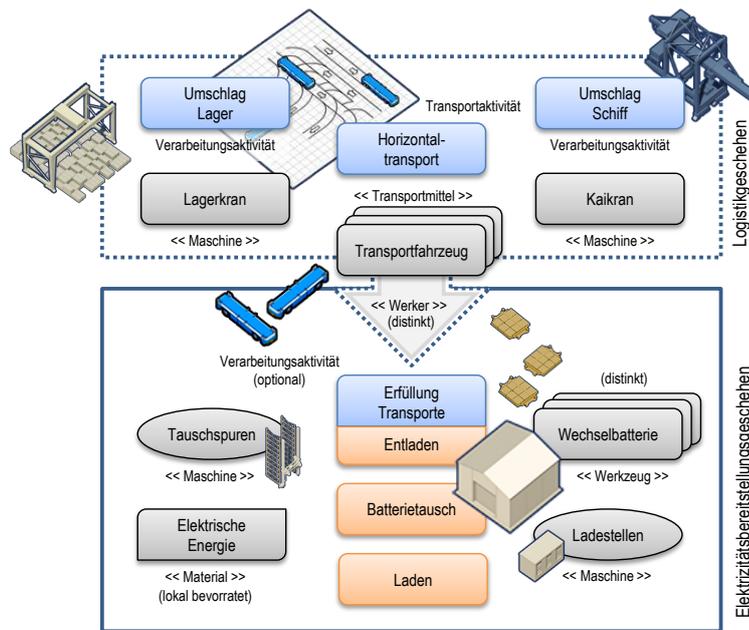


Abbildung 12: Illustration der Einbettung des Geschehens der Energiebereitstellung in das Logistikgeschehen und die Rollen der Ressourcen in der Planungsproblemstellung

Was das Geschehen der Elektrizitätsbereitstellung angeht, ist aus einer Fülle optionaler Einsatzaktivitäten mit den Einzelstückressourcen wie Fahrzeugen und Wechselbatterien sowie den Sammelressourcen wie Tauschspuren und Ladestellen zu entscheiden (vgl. dazu Kellenbrink, 2014). Nur so kann gewährleistet werden, dass für die Teilzyklen des Ladens und Entladens sowie den Batterietausch alle zulässigen Einsatzzeitalternativen und alternative Ressourcenzuweisungen auch betrachtet werden. Die Aktivitätenmenge wird so bestückt, dass in Abhängigkeit von der Einsatzweise einer Wechselbatterie wie zum Beispiel dem Laden in der Station oder dem Fahren an Bord des Fahrzeugs sämtliche Ressourcenzuweisungen vorgesehen werden. Alle Einsatzaktivitäten werden als optional eingeführt, das heißt in einem vollständigen Ablaufplan kommt lediglich eine Teilmenge von Einsatzaktivitäten zum Tragen. Durch die in einem Ablaufplan präsenten Einsatzaktivitäten ergeben sich die vordefinierten Ressourcenanforderungen. Dabei können sowohl bestimmte Wechselbatterien als eine distinkte Ressource oder eine gewisse Menge elektrischer Energie angefordert sein.

Da in der Planungsproblemstellung dieser Arbeit eine kostenorientierte Zielsetzung verfolgt wird, zeigt sich ein nicht-linearer Verlauf der Zielfunktionswerte. Eine Wechselbatterie tritt als Reservoir für elektrische Energie auf – in der Folge können sowohl die Zeitpunkte der Produktion wie auch des Konsums elektrischer Energie als nicht-erneuerbare Ressource variiert werden. Die Planungsproblemstellung wurde wie unten spezifiziert als ein nicht-lineares Programm in IBM Optimization Studio umgesetzt. Sämtliche Lösungsversuche für Probleminstanzen mit mehr als acht Zeitscheiben, vier Fahrzeugen und zugehörigen Wechselbatterien stellten sich mit der CPLEX Engine als vergeblich heraus. Während des Problemlösens können die Wertebereiche der Entscheidungsvariablen kaum eingeschränkt werden. Auf der einen Seite sollte damit für die Planungsproblemstellung dieser Arbeit nachgewiesen sein, dass eine exakte Optimierung nicht in angemessener Berechnungszeit machbar ist.

Doch mit einfach gearteten Auswahlstrategien aus der Praxis konnte im Groben ein Ablaufplan zusammengestellt werden. Demnach erscheint es auf der anderen Seite gut möglich, für realistische Probleminstanzen nach ziemlich kurzer Berechnungszeit eine heuristische Optimierung zu bewerkstelligen. Wie unten konzipiert, lässt sich unter verschiedenen Optimierungsgesichtspunkten eine Startlösung generieren und frühzeitiger Batterietausch stellt auf der Suche nach Schlusslösungen eine sinnvolle Verbesserungsoption dar. Bei genetischen Algorithmen werden in der Ablaufplanung für gewöhnlich solche Mutations- und Kreuzungsoperationen eingesetzt, bei denen die Abfolge von Einsatzaktivitäten und die ihnen zugeteilten Ressourcen verändert werden (vgl. S.80ff in Sauer 2004). Weil sie die Synchronitätsbeziehungen und Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen den Einsatzaktivitäten nicht bewahren, sind sie bei komplexen Planungsproblemstellungen mit alternativ einsetzbaren, zustandsveränderlichen Ressourcen oftmals problematisch. Auf die Planungsproblemstellung dieser Arbeit übertragen, würde beispielsweise bei einer sogenannten Tausch-Mutation innerhalb einer Batterieeinsatzsequenz nicht unbedingt ein gültiger Ablaufplan entstehen. Im Gegensatz dazu kann ein vorliegender Ablaufplan durch Verrücken eines Batterietausches so modifiziert werden, dass er vollständig und gültig bleibt.

Tabelle 7: Vor- und Nachteile der diskutierten Optimierungsansätze

Exakte Optimierung <u>Nicht-Lineare Programmierung</u>	Heuristische Optimierung <u>Genetischer Algorithmus</u> <u>Trajektionsbasiertes Suchverfahren</u>	
Informationen aus dem Werteverlauf der Zielfunktion können nicht genutzt werden	Informationen aus dem Werteverlauf der Zielfunktion bleiben ungenutzt	Informationen aus dem Werteverlauf der Zielfunktion können genutzt werden
es sind sehr viele mögliche Wertzuweisungen zu betrachten	es muss eine Vielzahl von Permutationen behandelt werden	es wird der kombinatorischen Vielfalt mit zielgerichtetem Navigieren durch den Lösungsraum entgangen
ein Ablaufplan wird durch eine Vielzahl von Entscheidungsvariablen bestimmt, deren Wertebereiche kaum einzuschränken sind	ein Ablaufplan kann nur auf komplexe Weise durch ein Individuum repräsentiert werden	ein Ablaufplan lässt sich mit einfach gearteten Strategien konstruieren und in naheliegender Weise modifizieren
liefert globales Optimum	verfällt nicht in ein lokales Optimum	anfällig für ein lokales Optimum
		

In **Tabelle 7** sind die Vor- und Nachteile der Optimierungsansätze nochmals zusammengefasst. Damit lässt sich die Vorauswahl begründen, es für die Planungsproblemstellung dieser Arbeit mit dem Optimierungsansatz eines trajektionsbasierten Suchverfahrens zu probieren.

Die Ablaufplanmodifikation ist fundamental verschieden von einer Mutationsoperation zu sehen, bei der zwei Aktivitäten gegeneinander zeitlich bzw. in ihrer Abfolge getauscht werden. Insbesondere bezüglich des Einsatzes der Wechselbatterien mit ihrer Eigenheit als Reservoir sieht es vielversprechend aus, wohldefinierte Modifikationen an den Ablaufplänen durchzuführen, das heißt innerhalb einer Nachbarschaft vollständiger, gültiger Lösungen zu suchen.

TEIL 4 SPEZIFIKATION DES PLANUNGSPROBLEMS

In diesem Kapitel wird die Problemstellung der integrierten Planung des Batterieeinsatzes, der Ladeverläufe und der Vermarktung von Lastverschiebungspotenzial beschrieben. Dabei wird auf eine geeignete Repräsentation von Planungsentscheidungen wie der verschiedenartigen Batterieeinsatzaktivitäten und deren untergeordnete Aktivitäten wie zum Beispiel die Lade-/Entladevorgänge hingearbeitet. Außerdem werden die Möglichkeiten zur Analyse der Ladezustandsentwicklung einer Wechselbatterie oder des Potenzials zur Zu- und Abschaltung von Ladeleistung an einer Ladestelle beschrieben. Darüber hinaus wird die Zusammensetzung der Bewertungsfunktion erläutert, welche die Bezugskosten für das Laden der Wechselbatterien anhand von sogenannten Stundenauktionspreisen und den möglichen Erlösen aus Regelleistungsangeboten berechnen lässt.

A. Einteilung des Planungszeitraums und des Marktumfelds

Der Planungszeitraum umfasst eine feste Anzahl von Stunden $nbHrs = \text{z.B. } 24$ (Realzeit) und ist in eine geordnete Menge von Zeitscheiben *TimeSlots* (Modellzeit) eingeteilt. Die Dauer einer Zeitscheibe wird durch $lenTs = 1 / tsph$ bestimmt, wobei $tsph = \text{z.B. } 6$ oder 4 die Anzahl der Zeitscheiben einer Stunde angibt. Auf diese Weise ergibt sich eine Feinteilung in Zeitscheiben zu zehn bis fünfzehn Minuten. Denn es wird angenommen, dass die Abgabe einer Wechselbatterie an die Station oder die Aufnahme einer Wechselbatterie von der Station in exakt einer solchen Zeitscheibe erledigt werden kann. Zudem soll es möglich sein, von einer solchen Zeitscheibe zu einer nächsten Zeitscheibe die Ladeleistung anzupassen, indes sich die Wechselbatterie in der Station aufhält. Über das Umrechnungsverhältnis zwischen Zeitscheiben in der Modellzeit und den Stunden der Realzeit können die relevanten zeitlichen Ausschnitte für den Handel mit Produkten des Strommarkts und des Regelleistungsmarkts auf das Modellzeitraster abgebildet werden.

Nummernvorrat der Stunden im Planungszeitraum

$$Hours = \{ 1, 2, \dots, nbHrs \} \text{ mit } nbHrs \in \mathbb{N} \dots \text{ z.B. } nbHrs = 24 \quad (1)$$

Nummernvorrat der Zeitscheiben im Planungszeitraum

$$TimeSlots = \{ 1, 2, \dots, nbTs \} \text{ mit } nbTs = \left\lceil \frac{nbHrs}{lenTs} \right\rceil, lenTs = \frac{1}{tsph}, tsph = 4 \quad (2)$$

DEFINITION: zeitliche Periode (syn. Zeitabschnitt oder Zeitperiode)

Es ist je ein Nummernvorrat für die Stunden und die Zeitscheiben innerhalb des Planungszeitraums vorgegeben. Mit Ausschnitten von aufeinanderfolgenden Nummern aus jeweiligen Vorräten können zeitliche Perioden gebildet werden. Eine *Zeitperiode* ist selbst eine geordnete Menge von Nummern der Zeitscheiben aus dem Planungszeitraum. Sie kann aus einer oder mehreren Stunden bzw. Zeitscheiben bestehen.

Das geschlossene Intervall $[a, b] = \{ ts \in TimeSlots \mid a \leq ts \leq b \}$ bzw.

$[a, b] = \{ hr \in Hours \mid a \leq hr \leq b \}$ steht allgemein für eine Periode

Die größtmögliche Zeitperiode umfasst den gesamten Planungszeitraum.

Menge von Zeitperioden im Planungszeitraum

$$TimePeriods = \{ [bgn, end] \mid bgn, end \in TimeSlots, bgn \leq end \} \quad (3)$$

Üblicherweise dauern Einsatzaktivitäten der Wechselbatterie wie beispielsweise ein Stationsaufenthalt mehrere Stunden; sie decken einen größeren Ausschnitt von Zeitscheiben aus dem Planungszeitraum ab. Um eine realitätsnahe Dauer von Aktivitäten wiederzugeben, können jeweils vier Zeitscheiben zu einem Block von Zeitscheiben gerafft werden. Vier Zeitscheiben mit der Länge einer Viertelstunde entsprechen beispielsweise genau einer Stunde in der Realität.

I. Berücksichtigung des Minutenreservemarkts

Minutenreserve wird wiederkehrend in Tagesausschreibungen kontrahiert. Wie in **Abbildung 13** gezeigt, betrifft eine Ausschreibungsrunde grundsätzlich sämtliche Stunden eines Tages $MrlBiddingHods = (1, 2, \dots, 24)$. Allerdings kann von Anbietern im Rahmen einer Ausschreibungsrunde für die verschiedenen Minutenreserveprodukte $MrlProducts$ einzeln geboten werden; ein Regelzonenverantwortlicher kann für ein Gebot zu einem Minutenreserveprodukt unabhängig von Geboten zu weiteren Minutenreserveprodukten einen Zuschlag erteilen. In **Abbildung 13** sind sechs verschiedene vierstündige Produktblöcke dargestellt; sie decken jeweils vier aufeinanderfolgende Stunden des Tages $MrlProductHods$ ab. Die mit 'POS_00_04' und 'NEG_00_04' bezeichneten Minutenreserveprodukte sind zum Beispiel auf die Tageszeit von der ersten bis einschließlich der vierten Stunde eines Tages abgebildet. In Abhängigkeit davon, wie viele Zeitscheiben für den Planungszeitraum festgelegt wurden und wie das Verhältnis zwischen Modell- und Realzeit gewählt wurde, kann der Planungszeitraum eine oder mehrere Ausschreibungsrunden $nbBiddings$ zeitlich überlappen.

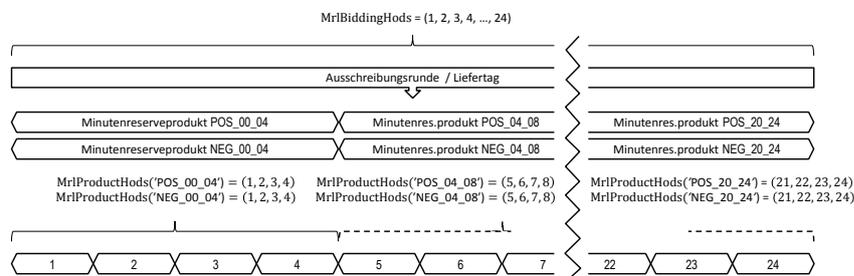


Abbildung 13 Übersicht der Produktblöcke bei der Ausschreibung von Minutenreserve gegenüber den Stunden eines Tages

BEGRIFFSKLÄRUNG: **Ausschreibungsrunde / Liefertag** für Minutenreserve

Eine Ausschreibung von Minutenreserve wird am zweiten Tag vorab eröffnet und sie endet mit einer Angebotsfrist am ersten Tag im Voraus (Ausschreibungstag). Kurz darauf werden noch am Tag der Ausschreibung vom Regelzonenverantwortlichen Zuschläge erteilt. Im Falle eines Zuschlags ist ein Anbieter von Minutenreserve verpflichtet, die Minutenreserve ab dem darauffolgenden Tag (Liefertag) und in den entsprechenden Produktblöcken zu leisten.

Die Erfüllung von Minutenreserve umfasst sowohl das Vorhalten von elektrischer Leistung für Regelzwecke (Regelleistung) als auch die aus dieser vorgehaltenen Leistung eingespeiste oder aufgenommene Energie (positive oder negative Regelenergie). Ist der Anbieter eine Verbrauchsstelle, wird er zur Erbringung positiver Regelenergie die Leistungsaufnahme verringern bzw. zur Erbringung negativer Regelenergie erhöhen. Das mit 'POS_20_24' bezeichnete Minutenreserveprodukt steht zum Bei-

spiel für das Angebot positive Regelleistung und die Erbringung positiver Regelleistung bei Bedarf. Obwohl es bereits in der Produktbezeichnung ersichtlich sein mag, werden sämtliche Produktbezeichner ausdrücklich auf eine Regelrichtung abgebildet.

Menge von Nummern der zu betrachtenden Ausschreibungsrunden

$$\begin{aligned} MrlBiddings &= \{ 1, \dots, nbBiddings \} \\ \text{mit } nbBiddings &= \left\lceil \frac{nbHrs}{nbBHods} \right\rceil \text{ und } nbBHods = \dim MrlBiddingHods \end{aligned} \quad (4)$$

Menge von Bezeichnern für die Minutenreserveprodukte

$$MrlProducts = \{ 'NEG_00_04', 'NEG_04_08', \dots, 'POS_00_04', \dots, 'POS_20_24' \} \quad (5)$$

Geordnete Menge von Nummern der Stunden eines Liefertags

$$MrlBiddingHods = \langle 1, 2, \dots, 24 \rangle \quad (6)$$

Abbildung der Produktbezeichner auf geordnete Mengen von Nummern der Stunden eines Liefertags

$$\begin{aligned} MrlProductHods('NEG_00_04') &= \langle 1, 2, 3, 4 \rangle \\ &\dots \\ MrlProductHods('POS_20_24') &= \langle 21, 22, 23, 24 \rangle \end{aligned} \quad (7)$$

Abbildung der Produktbezeichner auf eine Regelrichtung

$$\begin{aligned} \text{PosNeg: } MrlProducts &\rightarrow \{ 'Positive', 'Negative' \} \\ \text{PosNeg}('NEG_00_04') &= 'Negative', \dots, \text{PosNeg}('POS_20_24') = 'Positive' \end{aligned} \quad (8)$$

Abbildung der Paare aus Ausschreibungsrunde und Produktbezeichner auf einen prognostizierten Leistungspreis im Minutenreservemarkt

$$\begin{aligned} MrlCapacityPrices: MrlBiddings \times MrlProducts &\rightarrow \mathbb{R} \\ \dots \text{ z.B. } (1, 'NEG_04_08') &\mapsto 47.49 \end{aligned} \quad (9)$$

BEGRIFFSKLÄRUNG: Vorhalteperiode und Produktperiode für Minutenreserve

Ein Zeitabschnitt von 24 Stunden eines Liefertags, in dem ein Anbieter seine Kontrakte für Minutenreserve zu erfüllen hat, wird als Vorhalteperiode bezeichnet. Bei der Minutenreserve beginnt sie stets mit der ersten Stunde des Tages, der direkt auf den Tag mit der Angebotsfrist und der Erteilung der Zuschläge folgt. Eine Vorhalteperiode ist entsprechend der Produktblöcke bei der Minutenreserve nochmals in vierstündige Zeitabschnitte unterteilt, die Produktperioden heißen.

Wie in **Abbildung 14** angedeutet wird, folgt bei der Planung einer Bereitstellung von Minutenreserve auf eine Vorhalteperiode direkt eine weitere Vorhalteperiode. Das liegt darin begründet, dass die Ausschreibungsrunden zeitlich nahtlos an einander anschließen, so dass für einen Liefertag tags darauf ein nächster Liefertag ansteht. Für jede Ausschreibungsrunde steht der Liefertag innerhalb des Planungszeitraums fest. Insofern ist es auch klar vorgegeben, welche seiner Stunden *MrlServicePeriodHrs* zu einer entsprechenden Vorhalteperiode zu zählen sind. In der Regel dürfte es von der Planung her darauf hinauslaufen, dass sich ein Anbieter nicht über die gesamte Vorhalteperiode zum Abruf durchgehend bereithalten muss. Denn auf der Grundlage der unterschiedlichen Minutenreserveprodukte ergeben sich in einer Vorhalteperiode sechs voneinander unabhängige Produktperioden. Es kann geplant werden, in ihnen sowohl positive wie auch negative Minutenreserve anzubieten/bereitzustellen. Ebenso wie für die Vorhalteperioden lässt sich auch für die jeweiligen Produktperioden feststellen, welche Stunden aus dem Planungszeitraum *MrlProductPeriodHrs* ihnen

zugehören. In **Abbildung 14** ist veranschaulicht, wie sich die Vorhalteperioden mit der einfachen Tageszeit eines Liefertags und die ihnen zugrundeliegenden Produktperioden mit der Tageszeit der Produktblöcke ausprägen. In dieser Ausprägung der unterschiedlichen Tageszeiträume decken sie innerhalb eines Planungszeitraums bestimmte Zeitscheiben ab. Es wird davon ausgegangen, dass dieser immer mit der ersten Stunde eines Tages beginnt. Die den Minutenreserveprodukten zugeordneten Stunden des Tages werden folglich ihrer Nummerierung zunächst auf Stunden innerhalb des Planungszeitraums und schließlich auf bestimmte Zeitscheiben abgebildet. Für die Planung der Bereitstellung von Minutenreserve ist relevant, welche Zeitscheiben in einer bestimmten Produktperiode enthalten sind $MrlOfferPPTs$ (in diesen Zeitscheiben muss geplant werden, Leistung für Minutenreserve vorzuhalten) und welche Zeitscheiben bis zum Ende des Planungszeitraums noch dahinter liegen $MrlCmpstPPTs$ (in diesen Zeitscheiben muss geplant werden, bei Bedarf erbrachte Regelenergie bezüglich des Ladezustands einer Wechselbatterie kompensieren zu können).

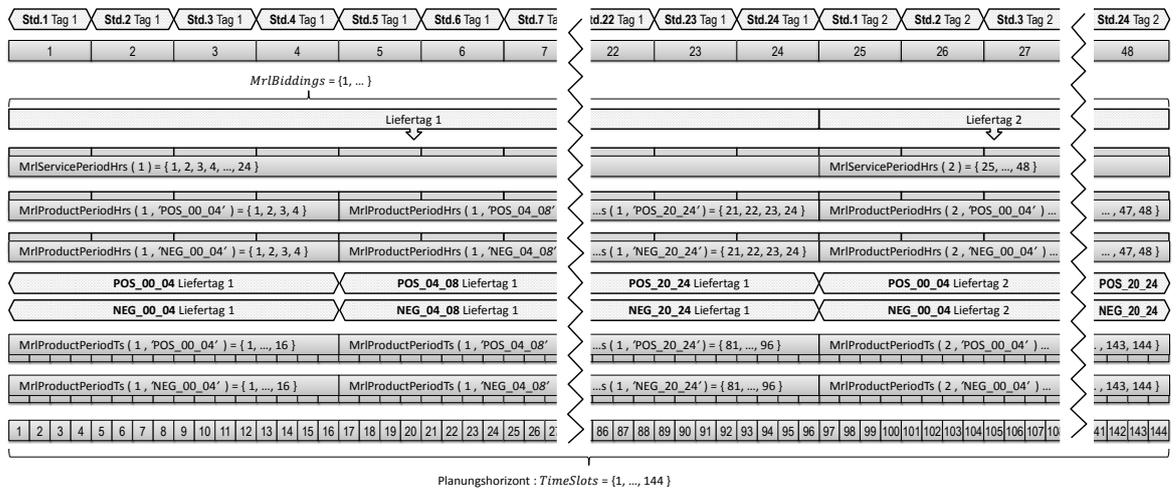


Abbildung 14 Infolge der Ausschreibungsrunden können sich mehrere Vorhalteperioden ergeben. Durch die verschiedenen Minutenreserveprodukte prägen sich darin voneinander unabhängige Produktperioden aus

Abbildung der Ausschreibungsrunden auf Stunden des Planungszeitraums

$$MrlServicePeriodHrs(bdd \in MrlBiddings) = \langle hr \in Hours \mid ((bdd - 1) * nbBHods) + fbh \leq hr \leq ((bdd - 1) * nbBHods) + lbh \rangle$$

für $\langle fbh, \dots, lbh \rangle = MrlBiddingHods$ (10)

Abbildung der Paare aus Ausschreibungsrunden und Produktblöcken auf Stunden des Planungszeitraums

$$MrlProductPeriodHrs(bdd \in MrlBiddings, prd \in MrlProducts) = \langle hr \in Hours \mid ((bdd - 1) * nbBHods) + fph \leq hr \leq ((bdd - 1) * nbBHods) + lph \rangle$$

für $\langle fph, \dots, lph \rangle = MrlProductHods(prd)$ (11)

Abbildung der Paare aus Ausschreibungsrunden und Produktblöcken auf Zeitscheiben des Planungszeitraums in der betreffenden Produktperiode

$$MrlOfferPPTs(bdd \in MrlBiddings, prd \in MrlProducts) = \left\langle ts \in TimeSlots \mid \frac{fp-ph-1}{lenTs} + 1 \leq ts \leq \frac{lp-ph}{lenTs} \right\rangle$$

für $\left\{ \langle fp-ph, \dots, lp-ph \rangle = MrlPro...Hrs(bdd, prd), MrlPro...Hrs(bdd, prd) \neq \emptyset \right.$
 $\left. fp-ph = 0, lp-ph = 0, \text{sonst} \right.$ (12)

Abbildung der Paare aus Ausschreibungsrunden und Produktblöcken auf Zeitscheiben des Planungszeitraums hinter der betreffenden Produktperiode

$$\begin{aligned} & \text{MrlCmpstPPTs}(bdd \in \text{MrlBiddings}, prd \in \text{MrlProducts}) = \\ & \left\{ ts \in \text{TimeSlots} \mid \frac{lpph}{lenTs} + 1 \leq ts \leq nbTs \right\} \\ \text{für } & \left\{ \begin{array}{l} \langle fpph, \dots, lpph \rangle = \text{MrlPro...Hrs}(bdd, prd), \text{MrlPro...Hrs}(bdd, prd) \neq \emptyset \\ fpph = 0, lpph = 0, \text{sonst} \end{array} \right. \end{aligned} \quad (13)$$

Für das Vorhalten einer Leistung als Minutenreserve wird der Anbieter mit einem Leistungspreis vergütet MrlCapacityPrices . In **Abbildung 15** sind Leistungspreise dargestellt, so wie sie beispielsweise vor ihrer Eingabe in die Planungsproblemstellung zu prognostizieren wären. Es gilt zu beachten, dass sich die tatsächlichen Leistungspreise aufgrund des Ausschreibungsmodus erst im Rahmen der Zuschlagserteilung ergeben. Zur Prognose der Leistungspreise für eine zu berücksichtigende Ausschreibungsrunde kann zum Beispiel der durchschnittlich Leistungspreis der mit Zuschlag versehenen Gebote aus der Vorwoche herangezogen werden. Zumeist sind die Produkte für die Bereitstellung negativer Regelleistung höher bewertet als die Produkte für die Bereitstellung positiver Regelleistung.

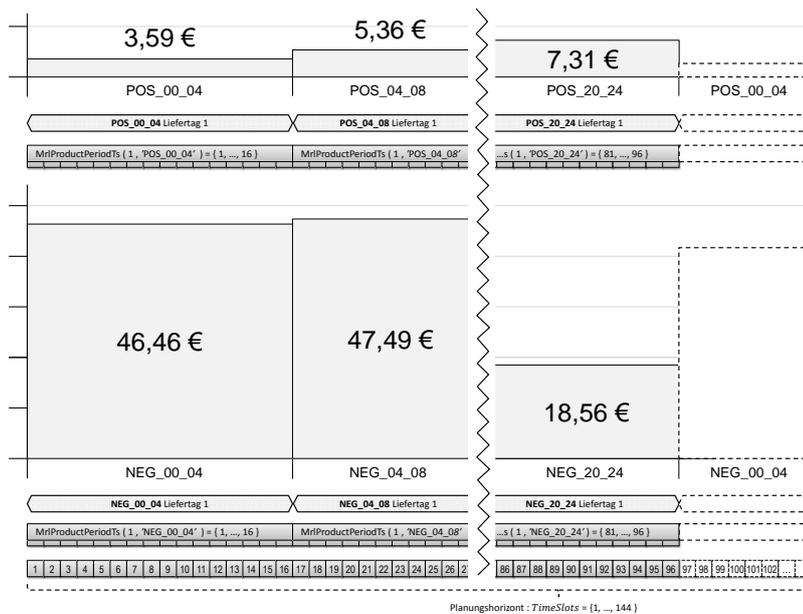


Abbildung 15 Übersicht beispielhaft prognostizierter Leistungspreise für Minutenreserve

Menge sämtlicher Produktperioden mit positiver Regelrichtung

$$\text{AllPosPPs} = \left\{ \begin{array}{l} (bdd, prd) \in \\ \text{MrlBiddings} \times \text{MrlProducts} \end{array} \mid \text{PosNeg}(prd) = \text{'Positive'} \right\} \quad (14)$$

Menge sämtlicher Produktperioden mit negativer Regelrichtung

$$\text{AllNegPPs} = \left\{ \begin{array}{l} (bdd, prd) \in \\ \text{MrlBiddings} \times \text{MrlProducts} \end{array} \mid \text{PosNeg}(prd) = \text{'Negative'} \right\} \quad (15)$$

II. Berücksichtigung des Vortagshandels für Strom

Bei der Planung des Ladeverlaufs von Wechselbatterien soll auf besonders günstige Konditionen für den Strombezug Rücksicht genommen werden. Es wird davon ausgegangen, dass der Betreiber des

Containerterminals mit einem Stromlieferanten eine variable Bepreisung vereinbart hat, so dass sich der Preis für den Strombezug in einer Stunde des Tages von dem Preis in einer anderen Stunde des Tages unterscheiden kann. Zur Prognose der Preise am Bezugstag können die Markträumungspreise für die Stundenkontrakte aus dem Vortagshandel dienen. In **Abbildung 16** sind Strombezugspreise dargestellt, so wie sie beispielsweise vor ihrer Eingabe in die Planungsproblemstellung zu prognostizieren wären.

Abbildung der Stunden im Planungszeitraum auf Bezugspreiskonditionen, die sich an den sogenannten Stundenkontrakten orientieren

$$\text{HourlyContracts: Hours} \rightarrow \mathbb{R}$$

$$\dots \text{ z.B. } 1 \mapsto 31,55, 2 \mapsto 28,07, 3 \mapsto 22,09, 4 \mapsto 22,13 \quad (16)$$

Abbildung der Zeitscheiben auf einen prognostizierten Strombezugspreis

$$\text{PurchasePrices: TimeSlots} \rightarrow \mathbb{R}$$

$$\text{PurchasePrices}(ts \in \text{TimeSlots}) = \text{HourlyContracts}([ts * \text{lenTs}] + 1) \quad (17)$$

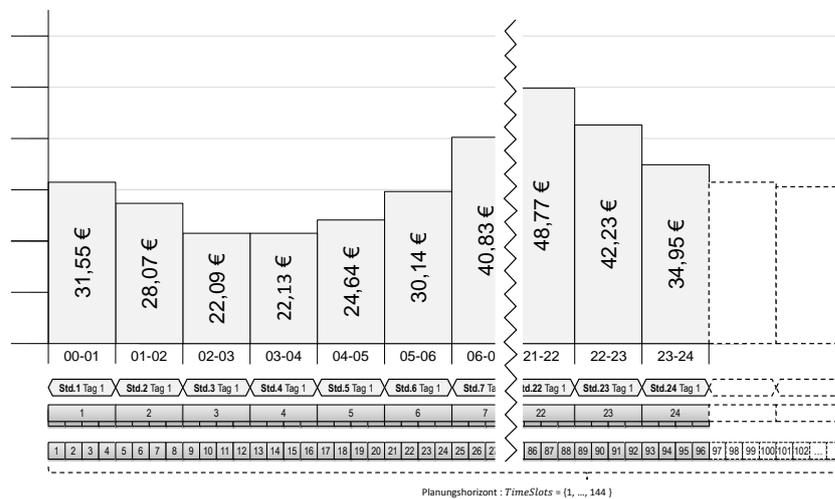


Abbildung 16 Übersicht beispielhaft prognostizierter Strombezugspreise

B. Zeitweilige Zuordnungsentscheidung für Ressourcen

I. Betrachtete Ressourcen

In diesem Planungsproblem stehen Batteriesysteme im Fokus, die in Wechselrahmen untergebracht sind, so dass sie als eine Wechselbatterie voll automatisiert getauscht werden können. Es behandelt endliche Mengen von solchen Wechselbatterien *Batteries*, batteriebetriebenen Fahrzeugen *Vehicles*, Ladestationen *ChargingStations* sowie von darin befindlichen Regalplätzen *ChargingSpaces* und Tauschspuren *ExchangeTracks*. All diese Ressourcen tragen einen eindeutigen Bezeichner und sind eingangs in die Problemstellung fest vorzugegeben.

Menge von Bezeichnern der Wechselbatterien

$$\text{Batteries} = \dots \text{ z.B. } \{ \text{'BAT1'}, \text{'BAT2'}, \text{'BAT3'}, \text{'BAT4'}, \dots \} \quad (18)$$

Menge von Bezeichnern der Transportfahrzeuge

$$\text{Vehicles} = \dots \text{ z.B. } \{ \text{'AGV57'}, \text{'AGV58'}, \dots \} \quad (19)$$

Menge von Bezeichnern der Ladestationen

$$\text{Stations} = \dots \text{ z.B. } \{ 'STTA', \dots \} \quad (20)$$

Menge von Bezeichnern der Tauschspuren

$$\text{ExchangeTracks} = \dots \text{ z.B. } \{ 'EXT1' \} \quad (21)$$

Menge von Bezeichnern der Ladestellen/Regallagerplätze mit Ladegeräteinheit

$$\text{ChargingSpaces} = \dots \text{ z.B. } \{ 'CSP1', 'CSP2', 'CSP3', \dots \} \quad (22)$$

Zudem gibt es eine Menge unterschiedlicher Batterietypen *BatteryTypes*, nach denen sich die Lade-/Entladekapazität der Wechselbatterien richten. Der Batterietyp wird den Wechselbatterien fest vorgeschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass alle Wechselbatterien den gleichen Ladezustandsgrenzen unterliegen. Sie verfügen über einen vorgeschriebenen Anfangsladezustand innerhalb der Ladezustandsgrenzen.

Menge von unterschiedlichen Batterietypen

$$\text{BatteryTypes} = \dots \text{ z.B. } \{ 'PbLeadAcid', 'LilonPolymer', 'LiMethalPolymer' \} \quad (23)$$

Abbildung der Batterietypen auf Lade-/Entladekapazität

$$\begin{aligned} &\text{ChargingCapacity, DischargingCapacity:} \\ &\text{BatteryTypes} \rightarrow \{ \text{maxDischargePower}, \dots, \text{maxChargePower} \} \\ &\text{mit } \text{maxDischargePower} \in \mathbb{Z} \dots \text{ z.B. } -120, \text{maxChargePower} \in \mathbb{Z} \dots \text{ z.B. } 120 \end{aligned} \quad (24)$$

Abbildung der Wechselbatterien auf Batterietypen

$$\text{BatteryType: Batteries} \rightarrow \text{BatteryTypes} \quad (25)$$

Abbildung der Wechselbatterien auf Anfangsladezustände

$$\begin{aligned} &\text{InitialStateOfCharge: Batteries} \rightarrow \{ \text{socLowerBound}, \dots, \text{socUpperBound} \} \\ &\text{mit } \text{socLowerBound} \in \mathbb{N} \dots \text{ z.B. } 0, \text{socUpperBound} \in \mathbb{N} \dots \text{ z.B. } 288 \end{aligned} \quad (26)$$

Die Wechselbatterien werden in den Stationen in Hochregallagern untergebracht. In jeder Station befindet sich eine gewisse Anzahl von Regallagerplätzen, an denen letztendlich Wechselbatterien geladen werden können. Für jedes Paar von Ladestation und Batterietyp wird eine Anzahl der verfügbaren Ladestellen vorgegeben. Des Weiteren verfügt jede Station über eine gewisse Anzahl von Tauschspuren, auf welchen Transportfahrzeuge in die Station einfahren und sich in den Zugriffsbereich eines Regalbediengerät stellen können. In der Planungsproblemstellung werden alle Tauschspuren innerhalb einer Ladestation gleichbehandelt. Es wird davon ausgegangen, dass von einer Tauschspur/einem Regalbediengerät in einer Station jedwede Ladestelle derselben zugegriffen werden kann.

Abbildung der Ladestationen auf die darin befindlichen Ladestellen/Regallagerplätze mit Ladegeräteinheit

$$\begin{aligned} &\text{BatteryChargers: Stations} \times \text{BatteryTypes} \rightarrow \mathcal{P}(\text{ChargingSpaces}) \\ &\dots \text{ z.B. } 'STTA' \mapsto \{ 'CSP1', \dots, 'CSP10' \} \end{aligned} \quad (27)$$

Abbildung der Ladestationen auf die darin befindlichen Tauschspuren bzw. Regalbediengeräte

$$\begin{aligned} &\text{BatteryRetrievalSystems: Stations} \rightarrow \mathcal{P}(\text{ExchangeTracks}) \\ &\dots \text{ z.B. } 'STTA' \mapsto \{ 'EXT1' \} \end{aligned} \quad (28)$$

Mit Ausnahme von Wartungsaktivitäten, belegt jedes Transportfahrzeug zu jeder Zeit zumindest eine Wechselbatterie. Bei dieser Planungsproblemstellung werden Wartungsaktivitäten bewusst ausgeblendet. Daher finden sich sämtliche Fahrzeuge rund um die Uhr in Transportaktivitäten wieder, bei denen gemäß den Vorgaben eines individuellen Transportprogramms gewisse Transportanforderungen abzudecken sind.

Abbildung der Paare aus Fahrzeugbezeichner und Nummer einer Zeitscheibe auf die gestellten Transportanforderungen (z. B. Anzahl der Transportaufträge pro Stunde)

$$\begin{aligned} \text{TransportReqs: } & \text{Vehicles} \times \text{TimeSlots} \rightarrow \mathbb{N} \\ \dots \text{ z.B. ('AGV57', 1)} & \mapsto 6 \end{aligned} \tag{29}$$

II. Ausstattung eines Fahrzeugs mit einer Wechselbatterie

Für diese Planungsproblemstellung ist es im Zusammenhang mit dem Entladen der Wechselbatterien ausschlaggebend, welches Fahrzeug zu welcher Zeit mit einer Wechselbatterie belegt ist. Denn für die Fahrzeuge sind individuelle Transportauftragsprogramme vorgesehen, so dass sie zeitweise verschiedene Transportanforderungen abzudecken haben und somit beim Fahren über die Zeit unterschiedlich viel elektrische Energie verbrauchen. Folglich werden die Wechselbatterien in Abhängigkeit von der Belegung eines Fahrzeugs unterschiedlich entladen: Einerseits kann das ausgestattete Fahrzeug je nach Ladezustand der Wechselbatterie kürzer oder länger Transportaufträge erfüllen. Andererseits muss eine Wechselbatterie je nach Transportauftragsprogramm des Fahrzeugs früher oder später an die Station zurückgebracht werden. Daher ist es für die Planung des Batterieeinsatzes unzureichend, hierbei von einer Auslastung der Fahrzeugflotte als eine Ressourcengruppe auszugehen.

DEFINITION: *zeitweilige Ausstattungsmöglichkeit*

Innerhalb des Planungszeitraums können die Wechselbatterien in der Fahrzeugflotte beliebig oft getauscht werden. Unabhängig von der Planung für vorausgehende Zeitscheiben könnte ein Transportfahrzeug in einer bestimmten Zeitscheibe grundsätzlich mit jedweder vorhandenen Wechselbatterie ausgestattet werden $\mathbf{VBA} = \text{Vehicles} \times \text{Batteries} \times \text{TimeSlots}$. Das Tripel $(veh, bat, ts) \in \mathbf{VBA}$ aus einem Fahrzeugbezeichner $veh \in \text{Vehicles}$, einem Wechselbatteriebezeichner $bat \in \text{Batteries}$ und einer Nummer einer Zeitscheibe $ts \in \text{TimeSlots}$ heißt zeitweilige Ausstattungsmöglichkeit dieses Fahrzeugs mit dieser Wechselbatterie. Es kann für ein Fahrzeug veh festgelegt/entschieden werden, ob es in einer Zeitscheibe ts mit einer Wechselbatterie bat ausgestattet ist oder nicht. Es handelt sich um eine Möglichkeit für die Ausstattung eines Fahrzeugs mit einer Wechselbatterie, die zeitlich nicht weiter unterteilt werden kann.

Es ist also für jede der Zeitscheiben über die Belegung einer Wechselbatterie durch ein Fahrzeug zu entscheiden. In **Abbildung 17** werden die zeitweiligen Ausstattungsmöglichkeiten für das Transportfahrzeug 'AGV58' mit den Wechselbatterien 'BAT1', 'BAT2', usw. in den einzelnen Zeitscheiben musterhaft gezeigt. Dazu finden sich links im Bild ein Entscheidungswürfel und rechts im Bild die entsprechenden Zeitstrahle. Es ist im Würfel kenntlich gemacht, welche Auszüge durch die Zeitstrahle wiederspiegelt werden.

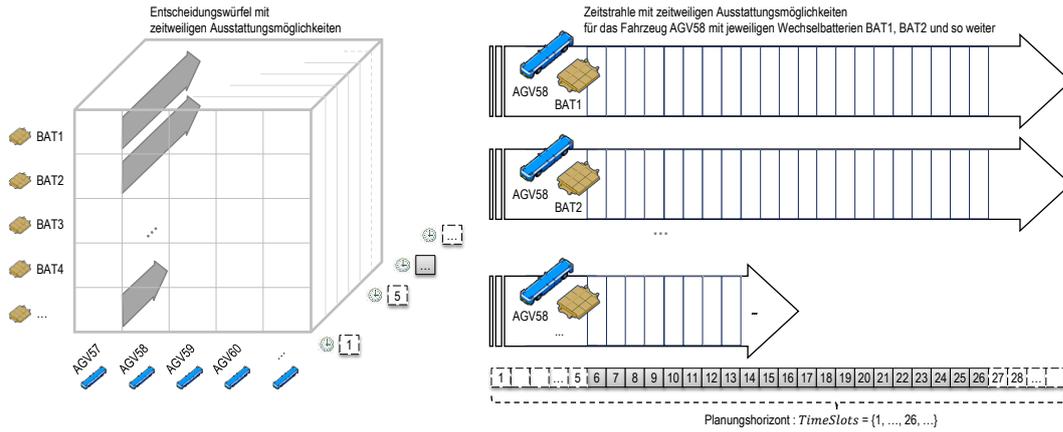


Abbildung 17 Übersicht der Ausstattungsmöglichkeiten für die Transportfahrzeuge mit Wechselbatterien über die Zeit

DEFINITION: zeitweilige Fahrzeugbelegung

Die zeitweilige Fahrzeugbelegung ist eine dreistellige Relation auf den Mengen der Fahrzeugbezeichner, der Bezeichner von Wechselbatterien und Zeitscheibennummern $R_{VBA} \subseteq VBA$. Die Beziehung zwischen Fahrzeugbezeichnern und Zeitscheibennummern ist gegenüber den Bezeichnern von Wechselbatterien eineindeutig. Die Entscheidungen zur zeitweiligen Fahrzeugbelegung **VehBatAllocations**: $VBA \rightarrow B$ können mit Hilfe einer Indikatorfunktion repräsentiert werden. Diese bildet zeitweilige Ausstattungsmöglichkeiten auf einen Wahrheitswert ab, der anzeigt, ob es so entschieden ist, das betreffende Fahrzeug mit der Wechselbatterie zu der entsprechenden Zeitscheibe zu belegen oder nicht. Falls eine zeitweilige Ausstattungsmöglichkeit **VehBatAllocations**(veh, bat, ts) = T wahrgenommen wird, so ist dadurch entschieden, das Transportfahrzeug *veh* mit der Wechselbatterie *bat* in der einzelnen Zeitscheibe *ts* zu belegen. Es ist dann über der Zeitscheibe *ts* ein Ausstattungsvorgang der Wechselbatterie *bat* mit dem Fahrzeug *veh* geplant. Andernfalls **VehBatAllocations**(veh, bat, ts) = ⊥ ist es planerisch so entschieden, dieses Fahrzeug mit der Wechselbatterie in der einzelnen Zeitscheibe nicht zu belegen.

zu entscheidende Relation und Funktionsgleichung für die zeitweilige Fahrzeugbelegung

$$R_{VBA} \subseteq VBA = Vehicles \times Batteries \times TimeSlots$$

$$VehBatAllocations(veh, bat, ts) = \begin{cases} T, & (veh, bat, ts) \in R_{VBA} \\ \perp, & \text{sonst} \end{cases}$$

für $bat \in Batteries, veh \in Vehicles, ts \in TimeSlots$ (30)

Jedes Fahrzeug ist in jeder Zeitscheibe mit genau einer Wechselbatterie auszustatten

$$\forall_{veh \in Vehicles} \forall_{ts \in TimeSlots} \exists!_{bat \in Batteries} VehBatAllocations(veh, bat, ts) = T$$
 (31)

Für jedes Fahrzeug und jede Wechselbatterie wie zum Beispiel ('AGV58','BAT1') und ('AGV58','BAT2') lassen sich an einem Zeitstrahl die geplanten zeitweiligen Fahrzeugbelegungen oder die jeweilige Nichtbelegungen darstellen. In **Abbildung 18** wird exemplarisch die zeitweilige Belegungen für das Transportfahrzeug 'AGV58' mit der Wechselbatterie 'BAT1' in den Zeitscheiben Nr. 9 bis einschließlich Nr. 22 und auch deren Nichtbelegungen für die Zeitscheiben Nr. 23 und Nr. 24 und so weiter hervorgehoben.

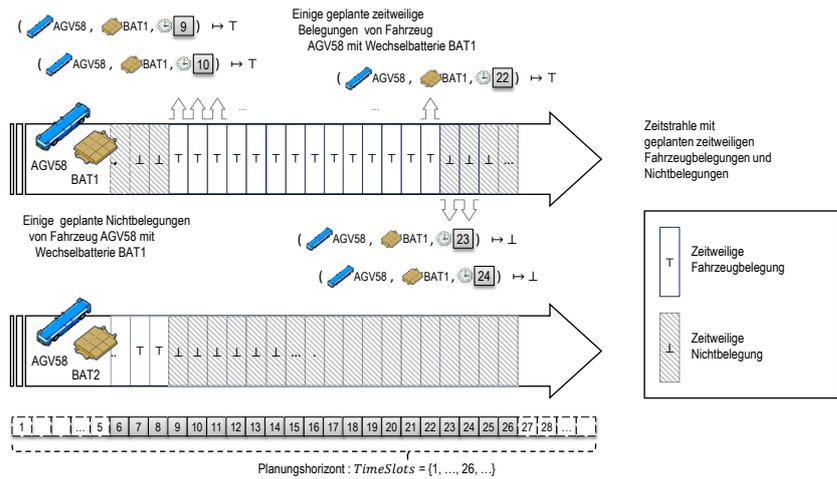


Abbildung 18 Festlegung der Belegung der Transportfahrzeuge mit Wechselbatterien über die Zeit

III. Aufenthalt einer Wechselbatterie in der Station

Ladestellen können sehr wohl in eine Ressourcengruppe zusammengefasst werden, insofern gleichartige Batteriesysteme daran angeschlossen werden können und sie die gleiche Leistungskapazität besitzen. Es kann allerdings vorausgesetzt werden, dass die Leistungskapazität jeder Ladestelle zumindest so hoch ist wie die Ladekapazität des Batterietyps, für den sie eingerichtet/konfiguriert wurde. Deshalb muss die Leistungskapazität einer Ladestelle in dieser Planungsproblemstellung nicht weiter betrachtet werden.

DEFINITION: zeitweilige Aufenthaltsmöglichkeit

Innerhalb des Planungszeitraums können die Wechselbatterien zwischen den Fahrzeugen und den Ladestationen beliebig oft hin und her getauscht werden. Unabhängig von der Planung für vorausgehende Zeitscheiben könnte eine Ladestation in einer bestimmten Zeitscheibe grundsätzlich durch jedwede vorhandene Wechselbatterie ausgelastet werden $CBA = Stations \times Batteries \times TimeSlots$. Das Tripel $(cst, bat, ts) \in CBA$ aus einem Bezeichner einer Ladestation $cst \in Stations$, einem Wechselbatteriebezeichner $bat \in Batteries$ und einer Nummer einer Zeitscheibe $ts \in TimeSlots$ heißt zeitweilige Aufenthaltsmöglichkeit dieser Wechselbatterie in dieser Station. Es kann für die Ladestellen einer Station cst festgelegt/entschieden werden, ob sich eine Wechselbatterie bat in einer Zeitscheibe ts an ihnen aufhält oder nicht. Es handelt sich um eine Möglichkeit für den Aufenthalt einer Wechselbatterie bat in einer Station csp , der zeitlich nicht weiter unterteilt werden kann.

Es ist also für jede der Zeitscheiben über die Auslastung einer Ladestation durch eine Wechselbatterie zu entscheiden. In **Abbildung 19** werden die zeitweiligen Aufenthaltsmöglichkeiten für die Ladestation 'STTA' mit den Wechselbatterien 'BAT1', 'BAT2', usw. in den einzelnen Zeitscheiben musterhaft gezeigt. Dazu finden sich links im Bild die Entscheidungsmatrix und rechts im Bild die entsprechenden Zeitstrahle. Es ist in der Entscheidungsmatrix kenntlich gemacht, welche Auszüge durch die Zeitstrahle wiedergespiegelt werden.

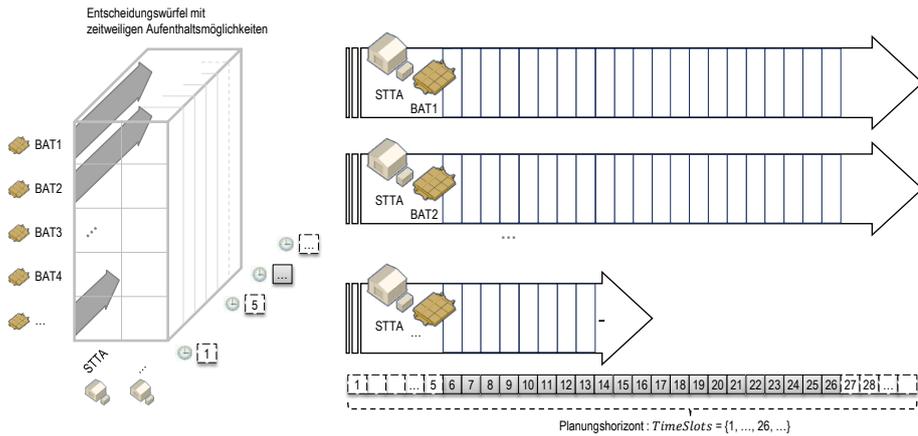


Abbildung 19 Übersicht der Aufenthaltsmöglichkeiten für Wechselbatterien in den Ladestationen über die Zeit

DEFINITION: zeitweilige Auslastung der Ladestellen einer Station

Die zeitweilige Auslastung einer Ladestelle durch eine Wechselbatterie ist eine dreistellige Relation auf den Mengen der Stationsbezeichner, der Bezeichner von Wechselbatterien und Zeitscheibennummern $R_{CBA} \subseteq CBA$. Die Entscheidungen zur zeitweiligen Ladestellenauslastung können mit Hilfe einer Indikatorfunktion **CspBatUtilizations**: $CBA \rightarrow B$ repräsentiert werden. Diese bildet zeitweilige Aufenthaltsmöglichkeiten auf einen Wahrheitswert ab, der anzeigt, ob es so entschieden ist, die Ladestellen der betreffenden Station mit der Wechselbatterie zu der entsprechenden Zeitscheibe auszulasten oder nicht. Falls sich eine zeitweilige Aufenthaltsmöglichkeit $\text{CspBatUtilizations}(cst, bat, ts) = \top$ bewahrheiten sollte, so wird dadurch entschieden, geeignete Ladestellen in der Station cst mit der Wechselbatterie bat in der einzelnen Zeitscheibe ts auszulasten. Es ist dann über der Zeitscheibe ts ein Aufenthaltsvorgang mit den Ladestellen der Station cst mit der Wechselbatterie bat geplant. Anderenfalls sie nicht wahrgenommen wird $\text{CspBatUtilizations}(cst, bat, ts) = \perp$, ist es so entschieden, die Ladestellen in dieser Station durch diese Wechselbatterie in dieser Zeitscheibe nicht auszulasten.

zu entscheidende Relation und Funktionsgleichung für die zeitweilige Auslastung von Ladestellen

$$R_{CBA} \subseteq CBA = Stations \times Batteries \times TimeSlots$$

$$\text{CspBatUtilizations}(cst, bat, ts) = \begin{cases} \top, & (cst, bat, ts) \in R_{CBA} \\ \perp, & \text{sonst} \end{cases}$$

für $cst \in Stations, bat \in Batteries, ts \in TimeSlots$ (32)

Für jede Ladestation mit ihren geeigneten Ladestellen und jede Wechselbatterie wie zum Beispiel ('STTA', 'BAT1') und ('STTA', 'BAT2') lassen sich an einem Zeitstrahl die geplanten zeitweiligen Ladestellenauslastungen oder die jeweilige Nichtauslastung darstellen. In **Abbildung 20** wird exemplarisch die zeitweilige Auslastung der Ladestellen in Station 'STTA' durch die Wechselbatterie 'BAT1' in den Zeitscheiben Nr. 23 bis Nr. 26 und nachfolgenden Zeitscheiben gezeigt. In den Zeitscheiben Nr. 9 bis einschließlich Nr. 22 werden die Ladestellen der Station 'STTA' durch die Wechselbatterie 'BAT1' nicht ausgelastet. In den Zeitscheiben Nr. 9 bis Nr. 26 ist zum Beispiel zudem geplant, die Ladestellen der Station 'STTA' durch die Wechselbatterie 'BAT2' auszulasten.

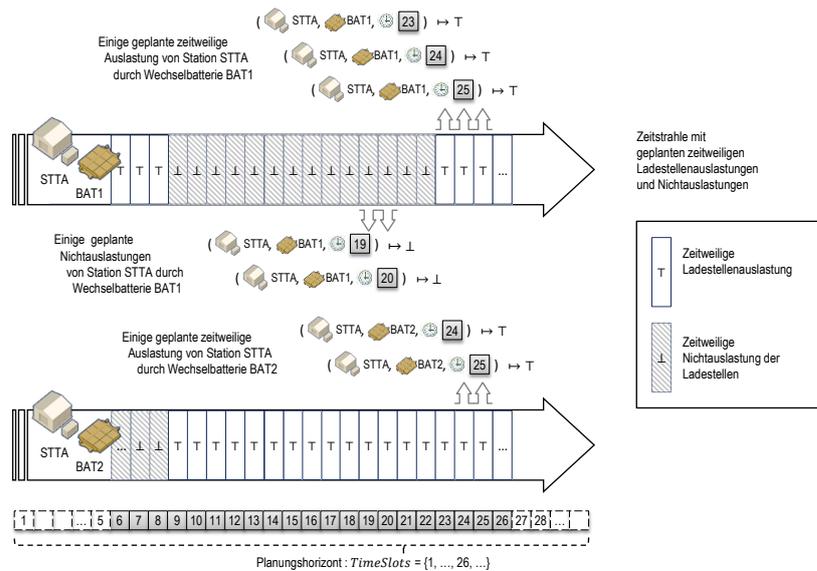


Abbildung 20 Festlegung der Auslastung der Ladestellen durch Wechselbatterien über die Zeit

Funktionsgleichung für die kumulierte zeitweilige Ladestellenauslastung

$$\text{ChargerUtilizations}(cst, t, ts) = \sum_{bat \in \text{Batteries}}^{\text{BatteryType}(bat)=t} \begin{cases} 1, & \text{CspBatUtilizations}(cst, bat, ts) = T \\ 0, & \text{CspBatUtilizations}(cst, bat, ts) = \perp \end{cases}$$

für $cst \in \text{Stations}, t \in \text{BatteryTypes}, ts \in \text{TimeSlots}$ (33)

Wie in **Abbildung 21** zu sehen ist, lässt sich auf der Grundlage der Einzelentscheidungen über die zeitweilige Ladestellenauslastung für jedes Paar von Ladestation und Batterietyp eine kumulierte Auslastung der geeigneten Ladestellen in der Station berechnen. Die kumulierte Auslastung der Regallagerplätze für Blei-Batteriesysteme der Station 'STTA' in der Zeitscheibe Nr. 25 beträgt beispielsweise zwei Punkte über einer Basisauslastung. Sie wird nämlich in dieser Zeitscheibe durch die Wechselbatterien 'BAT1' und 'BAT2' ausgelastet.

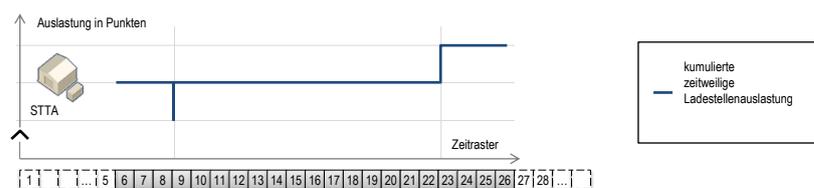


Abbildung 21 Kumulierte Auslastung der Ladestellen einer Station

In jeder Zeitscheibe können sich nie mehr Wechselbatterien in einer Station aufhalten als es dort Regallagerplätze für den Batterietyp gibt. (vgl. Einführung 1.a Kapazitätsbeschränkung)

$$\forall cst \in \text{Stations} \forall ts \in \text{TimeSlots} \forall t \in \text{BatteryTypes}$$

$$\text{ChargerUtilizations}(cst, t, ts) \leq \text{card BatteryChargers}(cst, t)$$

(34)

IV. Begebenheit eines Fahrzeugs bei der Station

So wie die Ladestellen können auch die Tauschspuren einer Station in eine Ressourcengruppe zusammengefasst werden.

DEFINITION: zeitweilige Ausfahrsmöglichkeit

Innerhalb des Planungszeitraums können sich die Fahrzeuge beliebig oft zu einem Batterietausch an einer Ladestation einfinden. Unabhängig von der Planung für vorausgehende Zeitscheiben könnte sich ein Transportfahrzeug in einer bestimmten Zeitscheibe zu einer Station begeben $CVA = Stations \times Vehicles \times TimeSlots$. Das Tripel $(est, veh, ts) \in CVA$ aus einem Bezeichner einer Wechselstation $est \in Stations$, einem Fahrzeugbezeichner $veh \in Vehicles$ und einer Nummer einer Zeitscheibe $ts \in TimeSlots$ heißt zeitweilige Ausfahrsmöglichkeit dieses Fahrzeugs in dieser Station. Es kann für die Tauschspuren einer Station est festgelegt/entschieden werden, ob sich ein Fahrzeug veh in einer Zeitscheibe ts zu ihnen begeben/begeben hat oder nicht. Es handelt sich um eine Möglichkeit für die Ausfahrt eines Fahrzeugs veh an die Station ext bzw. die Begebenheit eines Fahrzeugs veh bei der Station ext , die zeitlich nicht weiter unterteilt werden kann.

Es ist also für jede der Zeitscheiben über die Begebenheit eines Fahrzeugs an einer Ladestation bzw. die Auslastung ihrer Tauschspuren durch das Fahrzeug zu entscheiden. In **Abbildung 22** werden die zeitweiligen Ausfahrsmöglichkeiten für die Ladestation 'STTA' mit den Fahrzeugen 'AGV57', 'AGV58', usw. in den einzelnen Zeitscheiben musterhaft gezeigt. Dazu finden sich links im Bild die Entscheidungsmatrix und rechts im Bild die entsprechenden Zeitstrahle. Es ist in der Entscheidungsmatrix kenntlich gemacht, welche Auszüge durch die Zeitstrahle wiedergespiegelt werden.

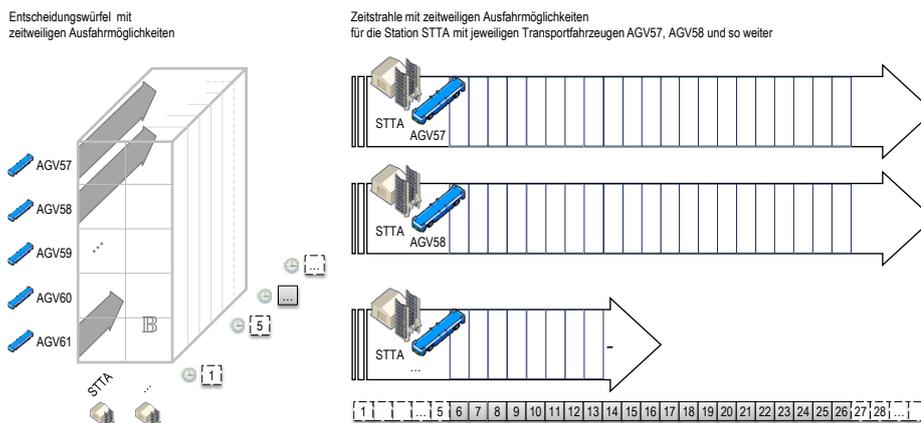


Abbildung 22 Übersicht der Ausfahrsmöglichkeiten für Transportfahrzeuge in den Ladestationen über die Zeit

DEFINITION: zeitweilige Auslastung der Tauschspuren einer Station

Die zeitweilige Ausfahrt eines Fahrzeugs zu einer Wechselstation ist eine dreistellige Relation auf den Mengen der Stationsbezeichner, der Fahrzeugbezeichner und Zeitscheibennummern $R_{CVA} \subseteq CVA$.

Die Entscheidungen zur zeitweiligen Stationsausfahrt können mit Hilfe einer Indikatorfunktion **ExtVehUtilizations: CVA** $\rightarrow \mathbb{B}$ repräsentiert werden. Diese bildet zeitweilige Ausfahrsmöglichkeiten auf einen Wahrheitswert ab, der anzeigt, ob es so entschieden ist, die Tauschspur(en) der betreffenden Station von den Fahrzeug zu der entsprechenden Zeitscheibe auszulasten oder nicht. Falls sich eine zeitweilige Ausfahrsmöglichkeit $ExtVehUtilizations(est, veh, ts) = T$ bewahrheiten sollte, so ist dadurch entschieden, die Tauschspuren in der Station est durch das Transportfahrzeug veh für die Zeitscheibe ts zeitweilig auszulasten. Anderenfalls $ExtVehUtilizations(est, veh, ts) = \perp$ ist entschieden, die Tauschspuren dieser $on est$ durch das Fahrzeug veh in dieser Zeitscheibe ts nicht auszulasten.

zu entscheidende Relation und Funktionsgleichung für die zeitweilige Auslastung von Tauschspuren

$$R_{CVA} \subseteq CVA = \text{Stations} \times \text{Vehicles} \times \text{TimeSlots}$$

$$\text{ExtVehUtilizations}(est, veh, ts) = \begin{cases} T, & (est, veh, ts) \in R_{CVA} \\ \perp, & \text{sonst} \end{cases}$$

für $est \in \text{Stations}, veh \in \text{Vehicles}, ts \in \text{TimeSlots}$

(35)

Für jede Ladestation mit ihren Tauschspuren und jedes Transportfahrzeug wie zum Beispiel ('STTA', 'AGV57') und ('STTA', 'AGV58') lassen sich an einem Zeitstrahl die geplanten zeitweiligen Tauschspurauslastungen oder die jeweilige Nichtauslastung darstellen. In **Abbildung 23** wird exemplarisch die zeitweilige Auslastung der Tauschspuren in Station 'STTA' durch das Fahrzeug 'AGV57' in den Zeitscheiben Nr. 12 bis Nr. 13 gezeigt. Passend zum obigen Beispiel ist geplant, dass sich das Fahrzeug 'AGV58' in der Zeitscheibe Nr. 8 zu einem Batterietausch in der Station 'STTA' befindet. Wie bereits dargestellt, verlässt die Wechselbatterie 'BAT1' in dieser Zeitscheibe die Ladestation und wird durch 'AGV58' aufgenommen. Gleichzeitig gelangt im obigen Beispiel die Wechselbatterie 'BAT2' an die Station 'STTA'. Diese wurde beispielsweise in der Zeitscheibe Nr. 8 vom Fahrzeug 'AGV58' hat an die Station abgegeben. Folglich des Beispiels werden die Ladestellen der Station 'STTA' in den Zeitscheiben Nr. 23, Nr. 24 und nachfolgenden erneut durch die Wechselbatterie 'BAT1' ausgelastet. Laut obigem Beispielplan ist zuvor in den Zeitscheiben Nr. 9 bis Nr. 22 Fahrzeug 'AGV58' mit ihr belegt. In **Abbildung 23** ist zu sehen, dass sich das Fahrzeug 'AGV58' in den Zeitscheiben Nr. 20, Nr. 21 und Nr. 22 an die Station 'STTA' begibt, um die Wechselbatterie 'BAT1' abzugeben.

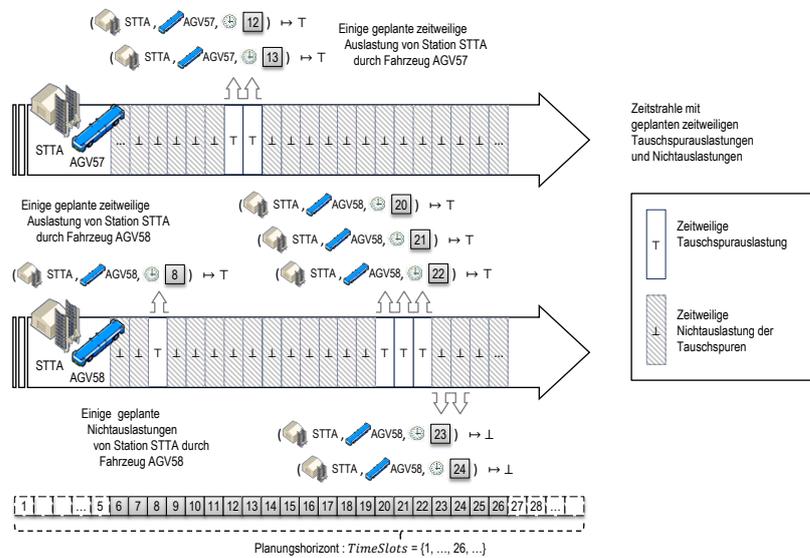


Abbildung 23 Festlegung der Auslastung der Tauschspuren durch Transportfahrzeuge über die Zeit

Funktionsgleichung für die kumulierte zeitweilige Tauschspurauslastung

$$\text{ExchangeTrackUtilizations}(est, ts) = \sum_{veh \in \text{Vehicles}} \begin{cases} 1, & \text{ExtVehUtilizations}(est, veh, ts) = T \\ 0, & \text{ExtVehUtilizations}(est, veh, ts) = \perp \end{cases}$$

für $est \in \text{Stations}, ts \in \text{TimeSlots}$

(36)

Auf der Grundlage der Einzelentscheidungen über die zeitweilige Tauschspurauslastung lässt sich für jede Ladestation eine kumulierte Auslastung ihrer Tauschspuren berechnen. In **Abbildung 24** ist zum Beispiel die kumulierte Auslastung der Regalbediengeräte/Tauschspuren der Station 'STTA' ge-

zeigt. Wie abgebildet liegt diese bedingt durch das Fahrzeug 'AGV58' in den Zeitscheibe Nr. 8, Nr. 20 und so weiter und das Fahrzeug 'AGV57' in den Zeitscheiben Nr. 12 und Nr. 13 jeweils einen Punkt über einer entsprechenden Basisauslastung durch andere Fahrzeuge.

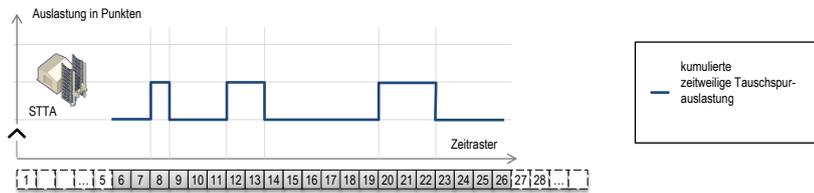


Abbildung 24 Kumulierte Auslastung der Tauschspuren einer Station

In jeder Zeitscheibe können sich nie mehr Fahrzeuge in eine Station begeben haben als es dort Tauschspuren gibt.

$$\forall_{est \in Stations} \forall_{ts \in TimeSlots} \text{ExchangeTrackUtilizations}(est, ts) \leq \text{card BatteryRetrievalSystems}(est) \quad (37)$$

Wenn ein Fahrzeug den Transportbereich zu einer Station und dessen Tauschspuren verlassen hat, so wird es inaktiv. Demgegenüber ist es als aktiv anzusehen, wenn es nicht die Tauschspuren irgendeiner Station auslastet. In **Abbildung 25** sind oben im Bild mehrere Zeitstrahle mit Tauschspurauslastung für das Fahrzeug 'AGV58' mit verschiedenen Stationen gezeigt. Es ist logisch mit der Tauschspurauslastung verknüpft, ob sich das Fahrzeug zu irgendeiner Station begeben hat. Im Zeitstrahl unten im Bild sind etwaige Ausfahrten des Fahrzeugs 'AGV58' an die Stationen aufgetragen.

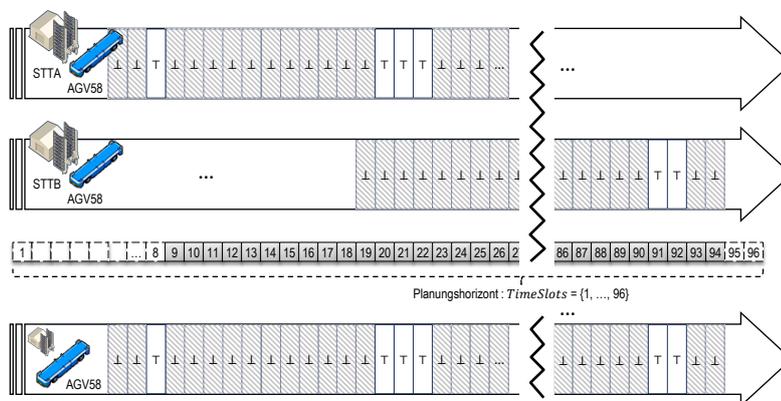


Abbildung 25 Planung der Begebenheit eines Fahrzeug an irgendeiner Station über die Zeit

Funktionsgleichung für die Begebenheit eines Fahrzeugs an irgendeiner Station

$$\text{VehicleAtStation}(veh, ts) = \bigvee_{est \in Stations} \text{ExtVehUtilizations}(est, veh, ts) \quad \text{für } veh \in \text{Vehicles}, ts \in \text{TimeSlots} \quad (38)$$

V. Vornahme eines Batterietausches

Über die verschiedenen Ressourcenzuordnungen hinaus, ist in jeder Zeitscheibe für jede der Wechselbatterien darüber zu entscheiden, ob ein Batterietausch stattfinden soll oder nicht.

DEFINITION: zeitweilige Tauschmöglichkeit

Innerhalb des Planungszeitraums kann eine Wechselbatterie beliebig oft getauscht werden. Unabhängig von der Planung für vorausgehende Zeitscheiben könnte in einer bestimmten Zeitscheibe ein Batterietausch stattfinden $\mathbf{BE} = \text{Batteries} \times \text{TimeSlots}$. Das Paar $(bat, ts) \in \mathbf{BE}$ aus einem Bezeichner einer Wechselbatterie $bat \in \text{Batteries}$ und einer Nummer einer Zeitscheibe $ts \in \text{TimeSlots}$ heißt zeitweilige Tauschmöglichkeit dieser Wechselbatterie bat in der Zeitscheibe ts . Es kann für die Wechselbatterie bat festgelegt/entschieden werden, ob sie Gegenstand eines Batterietausches ist oder nicht. Es handelt sich um eine Möglichkeit für den Tausch mit einer Wechselbatterie bat , die zeitlich nicht weiter unterteilt werden kann.

In **Abbildung 26** werden exemplarisch die zeitweiligen Tauschmöglichkeiten für die Wechselbatterien 'BAT1', 'BAT2', usw. in den einzelnen Zeitscheiben gezeigt. Dazu finden sich links im Bild die Entscheidungstabelle und rechts im Bild die entsprechenden Zeitstrahle. Es ist in der Tabelle kenntlich gemacht, welche Auszüge durch die Zeitstrahle wiedergespiegelt werden.

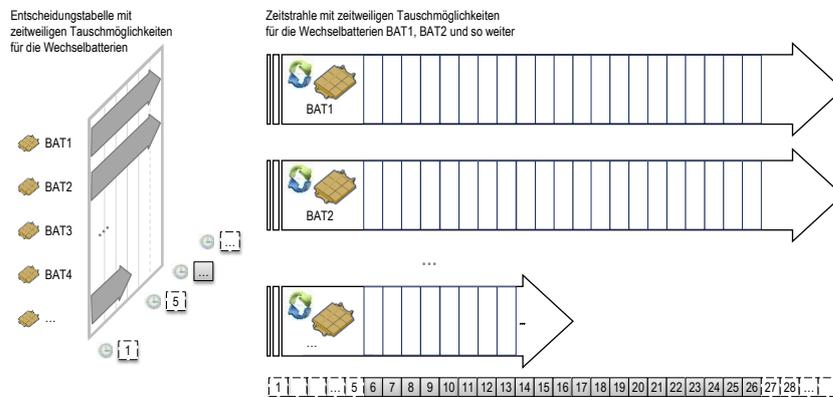


Abbildung 26 Übersicht der Tauschmöglichkeiten für Wechselbatterien über die Zeit

DEFINITION: zeitweiliges Tauschen der Wechselbatterien

Das zeitweilige Tauschen einer Wechselbatterie ist eine zweistellige Relation auf den Mengen der Wechselbatteriebezeichner und Zeitscheibennummern $R_{\mathbf{BE}} \subseteq \mathbf{BE}$. Die Entscheidungen zum zeitweiligen Batterietausch können mit Hilfe einer Indikatorfunktion **BatteryExchanges**: $\mathbf{BE} \rightarrow \mathbb{B}$ repräsentiert werden. Diese bildet zeitweilige Tauschmöglichkeiten auf einen Wahrheitswert ab, der anzeigt, ob es so entschieden ist, dass die betreffende Wechselbatterie zu der entsprechenden Zeitscheibe Gegenstand eines Batterietausches ist oder nicht.

zu entscheidende Relation und Funktionsgleichung für den zeitweiligen Batterietausch

$$R_{\mathbf{BE}} \subseteq \mathbf{BE} = \text{Batteries} \times \text{TimeSlots}$$

$$\mathbf{BatteryExchanges}(bat, ts) = \begin{cases} \top, & (bat, ts) \in R_{\mathbf{BE}} \\ \perp, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\text{für } bat \in \text{Stations}, ts \in \text{TimeSlots}$$

(39)

Für jede Wechselbatterie wie zum Beispiel 'BAT1' und 'BAT2' lässt sich an einem Zeitstrahl darstellen, dass zeitweilig ein Tausch tatsächlich vorgenommen wird oder ein solcher ausbleibt. In **Abbildung 27** wird exemplarisch die geplante Durchführung eines Batterietausches mit der Wechselbat-

terie 'BAT1' in den Zeitscheiben Nr. 21 und Nr. 22 gezeigt. In den Zeitscheiben Nr. 19 und Nr. 20 werden mit der Wechselbatterie 'BAT1' beispielsweise keine Batterietausche vorgenommen.

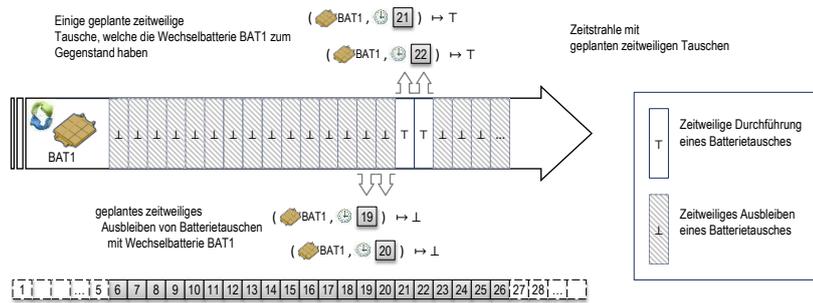


Abbildung 27 Festlegung des Tauschens der Wechselbatterien über die Zeit

C. Einsatzzeitentscheidungen für Wechselbatterien

Bei der Planung des Batterieeinsatzes sind die Ressourcen wie die Ladestellen und Tauschspuren einer Station, Transportfahrzeuge sowie Wechselbatterien nicht bloß für einzelne Zeitscheiben miteinander in Beziehung zu setzen. Vielmehr gilt es, für jede Wechselbatterie eine oder mehrere durchgängige Einsatzaktivitäten in einem Plan zeitlich zusammenzustellen und somit unterschiedliche Zuordnungen von Ressourcen über bestimmte Zeitabschnitte zu beschließen.

I. Stationärer Einsatz einer Wechselbatterie

Ebenso wie es sich mit den Zeitscheiben verhält, können die Wechselbatterien und die Ladestellen einer Station unter allen möglichen Zeitperioden im Planungszeitraum einander unterschiedlich zugeordnet werden.

DEFINITION: durchgängige stationäre Einsatzmöglichkeit

Das Tripel $(bat, cst, tss) \in SBU$ aus einem Bezeichner einer Wechselbatterie $bat \in Batteries$, einem Stationsbezeichner $cst \in Stations$ und einer Zeitperiode $tss \in TimePeriods$ wird in diesem Zeitabschnitt durchgängige stationäre Einsatzmöglichkeit dieser Wechselbatterie an den Ladestellen der Station genannt.

In **Abbildung 28** werden exemplarisch der durchgängige stationäre Gebrauch der Wechselbatterie 'BAT1' an den Ladestellen der Station 'STTA' (unten im Bild) sowie die entsprechende zeitweilige Ladestellenauslastung der Station 'STTA' durch die Wechselbatterie 'BAT1' und die zeitweiligen Tausche mit Wechselbatterie 'BAT1' (oben im Bild) gezeigt. Da es etliche verschiedene durchgängige stationäre Gebrauchsmöglichkeiten gibt und sich in einem Plan dementsprechend viele als stationäre Einsatzaktivitäten bewahrheiten können, wurden diese als ein Bündel dargestellt.

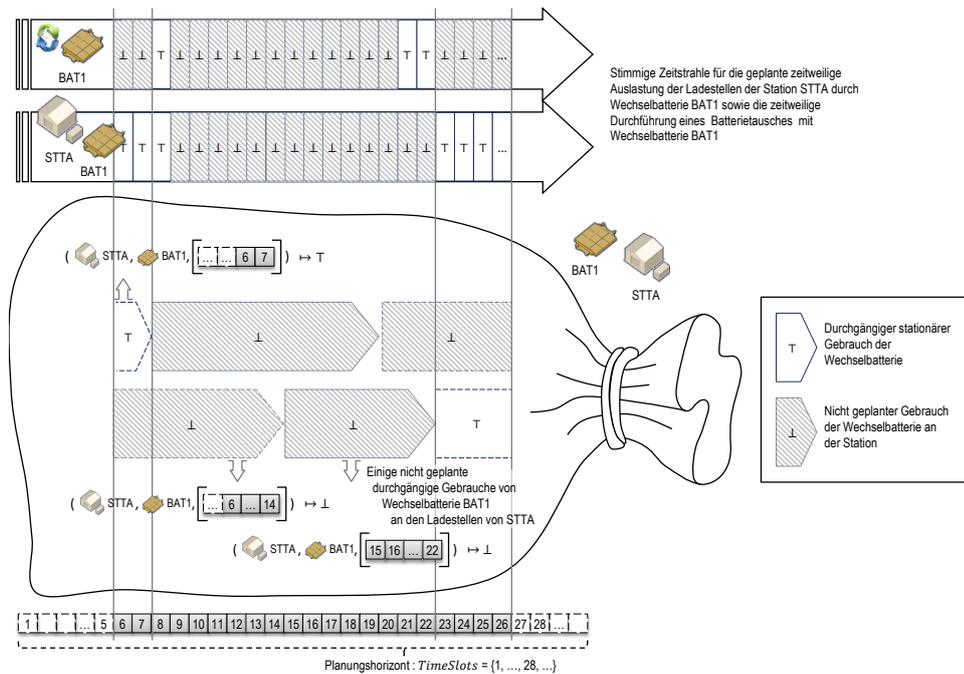


Abbildung 28 Planung des stationären Gebrauchs von Wechselbatterien über die Zeit

Die Pfeile in dem Bündel stehen im Einzelnen für die geplanten oder eben nicht geplanten stationären Einsatzaktivitäten der Wechselbatterie 'BAT1' mit den Ladestellen der Station 'STTA'. Eine geplante durchgängige stationäre Einsatzaktivität beginnt beispielsweise vor dem gezeigten Zeitausschnitt und endet mit der Pfeilspitze bei der Zeitscheibe Nr. 7. Bei der Zeitperiode mit den Zeitscheiben Nr. 15 bis Nr. 22 wird angezeigt, dass es nicht geplant ist, die Wechselbatterie 'BAT1' stationär an den Ladestellen der Station 'STTA' zu gebrauchen.

An den Markierungslinien in **Abbildung 28** ist zu erkennen, dass sowohl die Zeitstrahle als auch das Bündel auf das Zeitraster am unteren Bildrand ausgerichtet sind. Die markierten Abschnitte des Zeitrasters heben in diesem Beispiel die Einsatzzeitperioden der geplanten durchgängigen stationären Gebrauche hervor. Damit soll deutlich werden, wie der stationäre Gebrauch einer Wechselbatterie auf der Basis von Einzelentscheidungen über die zeitweilige Ladestellenauslastung und der zeitweiligen Tausche innerhalb der Stationseinsatzperiode codiert ist.

DEFINITION: durchgängiger stationärer Einsatz einer Wechselbatterie

Sei $tss \in TimePeriods$ eine Zeitperiode. Seien die Ladestellen der Station $cst \in Stations$ innerhalb der Einsatzzeitperiode in jeder ihrer Zeitscheiben zeitweilig durch die Wechselbatterie bat ausgelastet. Sei die Wechselbatterie bat in jeder dieser Zeitscheiben nicht Gegenstand eines Batterietausches. Dann lässt sich daraus **StationaryUsages**(bat, cst, tss) = T für den Plan eine durchgängige stationäre Einsatzaktivität der Wechselbatterie bat mit den Ladestellen der Station cst für die Zeitperiode tss herleiten.

Funktionsgleichung für den stationären Einsatz gemäß Ladestellenauslastung, etc.

$$\begin{aligned} \text{StationaryUsages}(bat, cst, tss) = & \\ & \bigwedge_{ts \in tss} \text{CspBatUtilizations}(cst, bat, ts) \wedge \\ & \neg \bigvee_{ts \in tss} \text{BatteryExchanges}(bat, ts) \\ & \text{für } bat \in \text{Batteries}, cst \in \text{Stations}, tss \in \text{TimePeriods} \end{aligned} \quad (40)$$

Funktionsgleichung für sämtliche stationären Einsätze einer Wechselbatterie in einer bestimmten Zeitscheibe

$$\begin{aligned} TsSBU_{bat,ts} = & \\ \left\{ \begin{array}{l} (sbubat, sbucst, sbutss) \\ \in SBU \end{array} \mid \begin{array}{l} sbubat = bat \wedge ts \in sbutss \wedge \\ \text{StationaryUsages}(sbubat, sbucst, sbutss) = \top \end{array} \right\} & \\ \text{für } bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots} & \end{aligned} \quad (41)$$

Funktionsgleichung der maximalen Länge eines durchgängigen stationären Einsatzes einer Wechselbatterie für eine bestimmte Zeitscheibe

$$\begin{aligned} TsSBUMax_{bat,ts} = & \max_{\substack{(sbubat, sbucst, sbutss) \\ \in TsSBU_{bat,ts}}} \text{len } sbutss \\ \text{für } bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots} & \end{aligned} \quad (42)$$

Funktionsgleichung für sämtliche längste durchgängige Stationsaufenthalte einer Wechselbatterie

$$\begin{aligned} AllSBU_{bat} = & \bigcup_{ts \in \text{TimeSlots}} \left\{ \begin{array}{l} (sbubat, sbucst, sbutss) \\ \in TsSBU_{bat,ts} \end{array} \mid \text{len } sbutss \geq TsSBUMax_{bat,ts} \right\} \\ \text{für } bat \in \text{Batteries} & \end{aligned} \quad (43)$$

II. Aufnahme einer Wechselbatterie

DEFINITION: *durchgängige Einsatzmöglichkeit zu einer Aufnahme*

Das Quintupel $(bat, est, cstfrom, vehto, tss) \in PEBU$ aus einem Bezeichner einer Wechselbatterie $bat \in \text{Batteries}$, einem Stationsbezeichner $est \in \text{Stations}$ für die Tauschspuren, einem Stationsbezeichner $cstfrom \in \text{Stations}$ für die Ladestellen, einem Fahrzeugbezeichner $vehto \in \text{Vehicles}$ und einer Zeitperiode $tss \in \text{TimePeriods}$ heißt durchgängige Einsatzmöglichkeit zur Aufnahme der Wechselbatterie mit Hilfe der Tauschspuren von den Ladestellen der bezeichneten Station durch das Fahrzeug in diesem Zeitabschnitt.

In **Abbildung 29** werden exemplarisch der durchgängige Gebrauch der Wechselbatterie 'BAT1' zur Aufnahme durch das Fahrzeug 'AGV58' von den Ladestellen der Station 'STTA' über die dortigen Tauschspuren (unten im Bild) sowie die zeitweilige Ladestellenauslastung bei der Station 'STTA' durch die Wechselbatterie 'BAT1', die zeitweilige Begebenheit des Fahrzeugs 'AGV58' bei den Tauschspuren der Station 'STTA' und die zeitweiligen Tausche mit Wechselbatterie 'BAT1' (oben im Bild) gezeigt. Ein geplanter durchgängiger Gebrauch zur Aufnahme der Wechselbatterie 'BAT1' durch das Fahrzeug 'AGV58' etc. beginnt und endet beispielsweise bei der Zeitscheibe Nr. 8. Es ist in Ordnung, dass eine Einsatzzeitperiode wie in diesem Beispiel nur eine einzige Zeitscheibe umfasst. Bei den Zeitscheiben Nr. 18 bis Nr. 22 wird angezeigt, dass nicht geplant ist, die Wechselbatterie 'BAT1' für die Aufnahme durch das Fahrzeug 'AGV58' etc. zu gebrauchen.

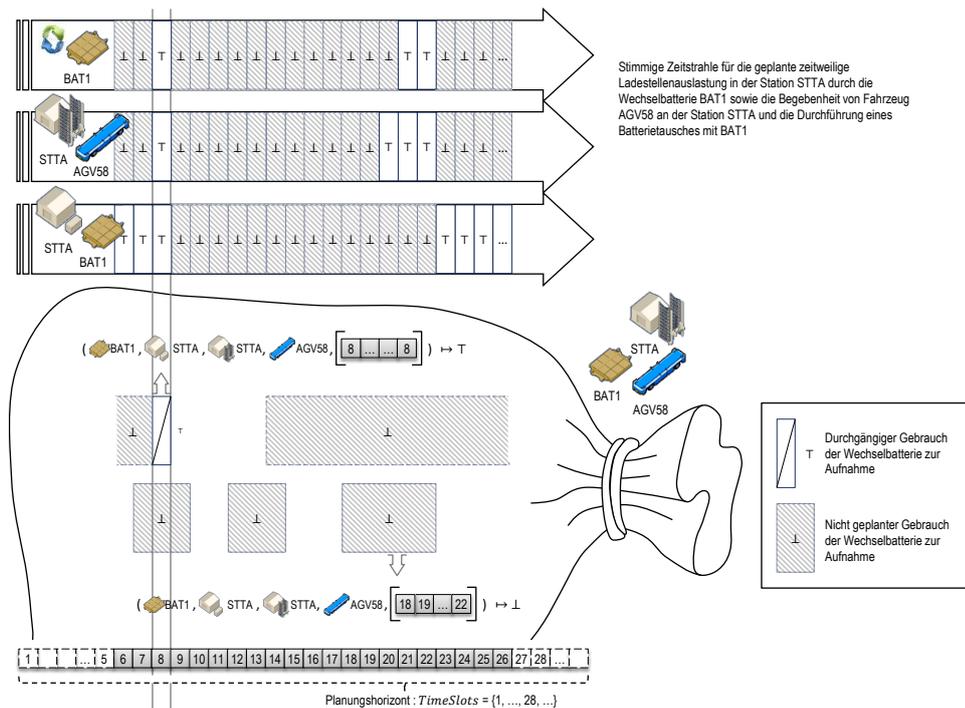


Abbildung 29 Planung des Gebrauchs zur Aufnahme von Wechselbatterien über die Zeit

Der in **Abbildung 29** markierte Abschnitt des Zeitrasters hebt die Einsatzzeitperiode eines durchgängigen Gebrauchs zur Aufnahme der Wechselbatterie 'BAT1' hervor. Damit soll deutlich werden, wie ein solcher auf der Basis von Einzelentscheidungen über die zeitweilige Ladestellenauslastung, die zeitweilige Begebenheit eines Fahrzeugs an einer Station und die zeitweiligen Tausche innerhalb der Aufnahmezeitperiode codiert ist.

DEFINITION: durchgängiger Einsatz einer Wechselbatterie zur Aufnahme

Sei $tss \in TimePeriods$ eine Zeitperiode. Sei innerhalb der Einsatzzeitperiode die Ladestellen der Station $cstfrom \in Stations$ in jeder Zeitscheibe entschieden, sie durch die Wechselbatterie bat auszulasten. Sei in jeder Zeitscheibe dieser Einsatzzeitperiode zudem entschieden, die Tauschspuren selbiger Station $est \in Stations = cstfrom$ durch das Fahrzeug $veheto \in Vehicles$ auszulasten. Sei obendrein die Wechselbatterie bat in jeder dieser Zeitscheiben Gegenstand eines Batterietausches. Dann lässt sich daraus **PickupUsages**($bat, est, cstfrom, veheto, tss$) = T für den Plan in dieser Zeitperiode ein durchgängiger Einsatz dieser Wechselbatterie bei ihrer Aufnahme von dieser Station durch dieses Fahrzeug herleiten.

Funktionsgleichung für den Einsatz einer Wechselbatterie zur Aufnahme gemäß Ladestellenauslastung, Begebenheit eines Fahrzeugs, etc.

$$\begin{aligned}
 \text{PickupUsages}(\text{bat}, \text{est}, \text{cstfrom}, \text{veh}, \text{tss}) = & \\
 & \bigwedge_{\text{ts} \in \text{tss}} \text{CspBatUtilizations}(\text{cstfrom}, \text{bat}, \text{ts}) \wedge \\
 & \bigwedge_{\text{ts} \in \text{tss}} \text{ExtVehUtilizations}(\text{est}, \text{veh}, \text{ts}) \wedge \\
 & \bigwedge_{\text{ts} \in \text{tss}} \text{BatteryExchanges}(\text{bat}, \text{ts}) \\
 \text{für } \text{bat} \in \text{Batteries}, \text{est} \in \text{Stations}, \text{cstfrom} \in \text{Stations}, \text{est} = \text{cstfrom}, & \\
 \text{veh} \in \text{Vehicles}, \text{tss} \in \text{TimePeriods} & \tag{44}
 \end{aligned}$$

Erstens müssen die Ladestellen der Station 'STTA' in jeder der Zeitscheiben zeitweilig durch die Wechselbatterie 'BAT1' ausgelastet sein. Zweitens muss das Fahrzeug 'AGV58' zeitweilig die Tauschspuren derselben Station 'STTA' auslasten. Drittens muss die Wechselbatterie 'BAT1' zeitweilig Gegenstand eines Batterietausches sein.

Funktionsgleichung für sämtliche Aufnahmeeinsätze einer Wechselbatterie in einer bestimmten Zeitscheibe

$$\begin{aligned}
 \text{TsPEBUS}_{\text{bat}, \text{ts}} = & \\
 \left\{ \left(\begin{array}{l} \text{ebubat}, \text{ebuest}, \\ \text{ebucst}, \text{ebuveh}, \text{ebutss} \end{array} \right) \middle| \begin{array}{l} \text{ebubat} = \text{bat} \wedge \text{ts} \in \text{ebutss} \wedge \\ \text{PickupUsages} \left(\begin{array}{l} \text{ebubat}, \text{ebuest}, \\ \text{ebucst}, \text{ebuveh}, \text{ebutss} \end{array} \right) = \top \end{array} \right\} & \\
 \text{für } \text{bat} \in \text{Batteries}, \text{ts} \in \text{TimeSlots} & \tag{45}
 \end{aligned}$$

Funktionsgleichung der maximalen Länge eines durchgängigen Einsatzes zur Aufnahme einer Wechselbatterie für eine bestimmte Zeitscheibe

$$\begin{aligned}
 \text{TsPEBUMax}_{\text{bat}, \text{ts}} = & \max_{\substack{\text{ebubat}, \text{ebuest}, \\ \text{ebucst}, \text{ebuveh}, \text{ebutss} \\ \in \text{TsPEBUS}_{\text{bat}, \text{ts}}}} \text{len } \text{ebutss} \\
 \text{für } \text{bat} \in \text{Batteries}, \text{ts} \in \text{TimeSlots} & \tag{46}
 \end{aligned}$$

Funktionsgleichung für sämtliche längste durchgängige Einsätze zur Aufnahme einer Wechselbatterie

$$\begin{aligned}
 \text{AllPEBUS}_{\text{bat}} = \bigcup_{\text{ts} \in \text{TimeSlots}} \left\{ \left(\begin{array}{l} \text{ebubat}, \text{ebuest}, \\ \text{ebucst}, \text{ebuveh}, \text{ebutss} \end{array} \right) \middle| \begin{array}{l} \text{len } \text{ebutss} \geq \text{TsPEBUMax}_{\text{bat}, \text{ts}} \\ \in \text{TsPEBUS}_{\text{bat}, \text{ts}} \end{array} \right\} & \\
 \text{für } \text{bat} \in \text{Batteries} & \tag{47}
 \end{aligned}$$

III. Mobiler Einsatz einer Wechselbatterie

DEFINITION: *durchgängige mobile Einsatzmöglichkeit*

Ebenso wie für jede einzelne Zeitscheibe können Wechselbatterien und Transportfahrzeuge für jede mögliche Zeitperiode im Planungszeitraum einander unterschiedlich zugeordnet werden. Das Tripel $(\text{bat}, \text{veh}, \text{tss}) \in \text{MBU}$ aus einem Fahrzeugbezeichner $\text{veh} \in \text{Vehicles}$, einem Bezeichner einer Wechselbatterie $\text{bat} \in \text{Batteries}$ und einer Zeitperiode $\text{tss} \in \text{TimePeriods}$ wird in diesem Zeitabschnitt durchgängige mobile Einsatzmöglichkeit dieser Wechselbatterie mit diesem Fahrzeug genannt.

In **Abbildung 30** werden exemplarisch der durchgängige mobile Gebrauch der Wechselbatterie 'BAT1' mit dem Fahrzeug 'AGV58' (unten im Bild) sowie die entsprechende zeitweilige Fahrzeugbelegung vom Fahrzeug 'AGV58' mit der Wechselbatterie 'BAT1' und die zeitweiligen Tausche mit Wechselbatterie 'BAT1' gezeigt (oben im Bild). Ein geplanter durchgängiger mobiler Gebrauch beginnt beispielsweise bei der Zeitscheibe Nr. 9 und endet mit der Pfeilspitze bei der Zeitscheibe Nr. 22. Bei den Zeitperioden mit den Zeitscheiben Nr. 6 bis Nr. 14 oder den Zeitscheiben Nr. 18 bis Nr. 24 wird angezeigt, dass es nicht geplant ist, die Wechselbatterie 'BAT1' mobil mit dem Fahrzeug 'AGV58' zu gebrauchen.

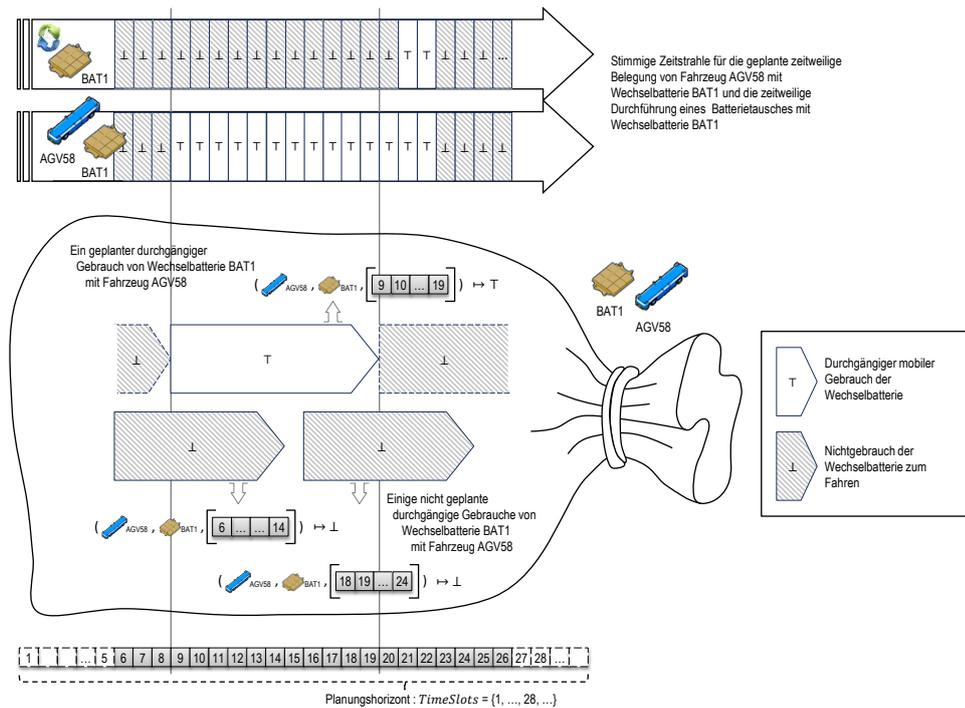


Abbildung 30 Planung des mobilen Gebrauchs von Wechselbatterien über die Zeit

An den zwei Markierungslinien in **Abbildung 30** ist zu erkennen, dass sowohl die Zeitstrahl als auch das Bündel auf das Zeitraster am unteren Bildrand ausgerichtet sind. Der markierte Abschnitt des Zeitrasters hebt in diesem Beispiel die Fahrzeitperiode des einen durchgängigen mobilen Gebrauchs hervor. Damit soll deutlich werden, wie der mobile Gebrauch einer Wechselbatterie auf der Basis von Einzelentscheidungen über die zeitweilige Fahrzeugbelegung und die zeitweiligen Tausche innerhalb der Fahrzeitperiode codiert ist.

DEFINITION: durchgängiger mobiler Einsatz einer Wechselbatterie

Sei $tss \in TimePeriods$ eine Zeitperiode. Sei innerhalb der Einsatzzeitperiode für das Fahrzeug $veh \in Vehicles$ in jeder Zeitscheibe entschieden, es zeitweilig mit der Wechselbatterie bat zu belegen. Sei die Wechselbatterie bat in jeder dieser Zeitscheiben nicht Gegenstand eines Batterietausches. Dann lässt sich daraus $MobileUsages(bat, veh, tss) = T$ für den Plan eine durchgängige mobile Einsatzaktivität der Wechselbatterie bat mit dem Fahrzeug veh für die Zeitperiode tss herleiten.

Funktionsgleichung für den mobilen Einsatz gemäß Fahrzeugbelegung, etc.

$$\begin{aligned} \text{MobileUsages}(bat, veh, tss) = & \\ & \bigwedge_{ts \in tss} \text{VehBatAllocations}(veh, bat, ts) \wedge \\ & \neg \bigvee_{ts \in tss} \text{BatteryExchanges}(bat, ts) \\ & \text{für } bat \in \text{Batteries}, veh \in \text{Vehicles}, tss \in \text{TimePeriods} \end{aligned} \quad (48)$$

Funktionsgleichung für sämtliche mobile Einsätze einer Wechselbatterie in einer bestimmten Zeitscheibe

$$\begin{aligned} TsMBUs_{bat,ts} = & \\ \left\{ \begin{array}{l} (mbubat, mbuveh, mbutss) \\ \in MBU \end{array} \middle| \begin{array}{l} mbubat = bat \wedge ts \in mbutss \wedge \\ \text{MobileUsages}(mbubat, mbuveh, mbutss) = \top \end{array} \right\} & \\ \text{für } bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots} & \end{aligned} \quad (49)$$

Funktionsgleichung der maximalen Länge eines durchgängigen mobilen Einsatzes einer Wechselbatterie für eine bestimmte Zeitscheibe

$$\begin{aligned} TsMBUMax_{bat,ts} = & \max_{\substack{(mbubat, mbuveh, mbutss) \\ \in TsMBUs_{bat,ts}}} \text{len } mbutss \\ & \text{für } bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots} \end{aligned} \quad (50)$$

Funktionsgleichung für sämtliche längste mobile Einsätze einer Wechselbatterie

$$\begin{aligned} AllMBUs_{bat} = & \bigcup_{ts \in \text{TimeSlots}} \left\{ \begin{array}{l} (mbubat, mbuveh, mbutss) \\ \in TsMBUs_{bat,ts} \end{array} \middle| \text{len } mbutss \geq TsMBUMax_{bat,ts} \right\} \\ & \text{für } bat \in \text{Batteries} \end{aligned} \quad (51)$$

Eine Fahrzeitperiode beginnt mit einer Zeitscheibe, in welcher das betreffende Fahrzeug aufs Neue mit einer Wechselbatterie belegt ist. Sie endet nach einer oder mehreren direkt aufeinanderfolgenden Zeitscheiben, in denen dieses Fahrzeug durchgängig mit dieser Wechselbatterie belegt ist.

Wie am Zeitstrahl der Fahrzeugbelegung in **Abbildung 30** zu erahnen ist, bestünde die Möglichkeit, einem Fahrzeug über den gesamten Planungszeitraum hinweg Wechselbatterien derart zuzuordnen, dass es im Plan keine zwei direkt aufeinanderfolgenden Zeitscheiben gibt, bei denen dieses Fahrzeug gleichermaßen mit einer gewissen Wechselbatterie belegt ist. Das bedeutet, es können für ein bestimmtes Paar von Fahrzeug und Wechselbatterie in einem Plan höchstens halb so viele verschiedene durchgängige Ausstattungsmöglichkeiten wahrgenommen werden wie es Zeitscheiben im Planungszeitraum gibt.

IV. Warten mit einer Wechselbatterie

DEFINITION: durchgängige Einsatzmöglichkeit zum Warten

Das Quadrupel $(bat, est, veh, tss) \in WEBU$ aus einem Bezeichner einer Wechselbatterie $bat \in \text{Batteries}$, einem Stationsbezeichner $est \in \text{Stations}$ für die Tauschspuren, einem Fahrzeugbezeichner $veh \in \text{Vehicles}$ und einer Zeitperiode $tss \in \text{TimePeriods}$ wird in diesem Zeitabschnitt durchgängige Einsatzmöglichkeit für das Warten dieses Fahrzeugs mit dieser Wechselbatterie bei dessen Zugang zu diesen Tauschspuren bzw. dessen Begebenheit an der bezeichneten Station genannt. Bei einer solchen Einsatzaktivität muss noch nicht endgültig feststehen, an welchen Regallagerplatz/Ladestelle die Wechselbatterie gebracht wird.

In **Abbildung 31** werden exemplarisch der durchgängige Gebrauch der Wechselbatterie 'BAT1' zum Warten mit dem Fahrzeug 'AGV58' auf die Zufahrt/Begebenheit an der Station 'STTA' (unten im Bild) sowie die zeitweilige Belegung des Fahrzeugs 'AGV58' mit der Wechselbatterie 'BAT1', die zeitweilige Begebenheit des Fahrzeugs 'AGV58' bei den Tauschspuren der Station 'STTA' und die zeitweiligen Tausche mit Wechselbatterie 'BAT1' (oben im Bild) gezeigt. Ein geplanter durchgängiger Gebrauch zum Warten des Fahrzeuges 'AGV58' mit der Wechselbatterie 'BAT1' etc. beginnt und endet beispielsweise bei der Zeitscheibe Nr. 20. Bei der Zeitperiode mit den Zeitscheiben Nr. 9 bis Nr. 17 wird angezeigt, dass nicht geplant ist, die Wechselbatterie 'BAT1' für das Warten vom Fahrzeug 'AGV58' etc. zu gebrauchen.

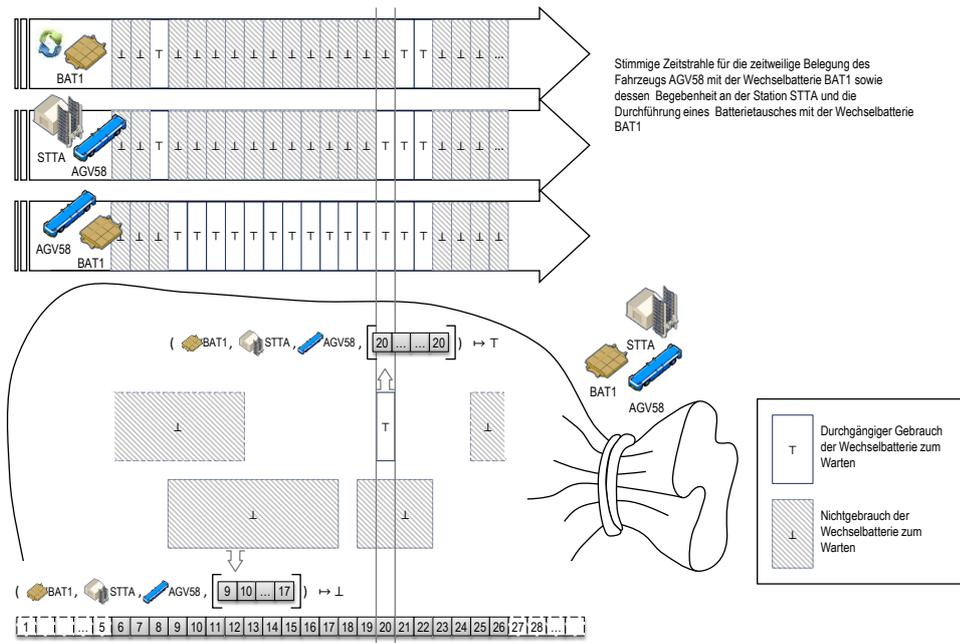


Abbildung 31 Planung des Einsatzes von Wechselbatterien zum Warten über die Zeit

Der in **Abbildung 31** markierte Abschnitt des Zeitrasters hebt in diesem Beispiel eine Wartezeitperiode hervor. Damit soll deutlich werden, wie eine solche Einsatzaktivität auf der Basis von Einzelentscheidungen über die zeitweilige Fahrzeugbelegung, die zeitweilige Begebenheit eines Fahrzeugs an einer Station und die zeitweiligen Tausche innerhalb der Aufnahmezeitperiode codiert ist.

DEFINITION: durchgängiger Einsatz einer Wechselbatterie zum Warten

Sei in der Zeitperiode $tss \in TimePeriods$ eine indefinite Einsatzaktivität der Wechselbatterie $bat \in Batteries$ geplant. Sei innerhalb der Einsatzzeitperiode für das Fahrzeug $veh \in Vehicles$ in jeder Zeitscheibe entschieden, es zeitweilig mit der Wechselbatterie bat zu belegen. Sei in jeder Zeitscheibe dieser Einsatzzeitperiode zudem entschieden, die Tauschspuren einer Station $est \in Stations$ durch dieses Fahrzeug auszulasten. Sei obendrein die Wechselbatterie bat in jeder dieser Zeitscheiben nicht Gegenstand eines Batterietausches. Dann lässt sich daraus $WaitingUsages(bat, est, veh, tss) = T$ für den Plan in dieser Zeitperiode ein durchgängiger Einsatz dieser Wechselbatterie beim Warten dieses Fahrzeuges herleiten.

Funktionsgleichung für den Einsatz einer Wechselbatterie zum Warten gemäß Fahrzeugbelegung, Begebenheit eines Fahrzeugs, etc.

$$\begin{aligned} \text{WaitingUsages}(bat, est, veh, tss) = & \\ & \bigwedge_{ts \in tss} \text{VehBatAllocations}(veh, bat, ts) \wedge \\ & \bigwedge_{ts \in tss} \text{ExtVehUtilizations}(est, veh, ts) \wedge \\ & \neg \bigvee_{ts \in tss} \text{BatteryExchanges}(bat, ts) \end{aligned}$$

für $bat \in Batteries, est \in Stations, veh \in Vehicles, tss \in TimePeriods$ (52)

Funktionsgleichung für sämtliche Warteinsätze einer Wechselbatterie in einer bestimmten Zeitscheibe

$$\begin{aligned} TsWEBUS_{bat,ts} = & \\ & \left\{ \left(\begin{array}{l} ebubat, ebuest, \\ ebuveh, ebutss \end{array} \right) \middle| \begin{array}{l} ebubat = bat \wedge ts \in ebutss \wedge \\ \text{WaitingUsages} \left(\begin{array}{l} ebubat, ebuest, \\ ebuveh, ebutss \end{array} \right) = \top \end{array} \right\} \end{aligned}$$

für $bat \in Batteries, ts \in TimeSlots$ (53)

Funktionsgleichung der maximalen Länge eines durchgängigen Einsatzes zum Warten einer Wechselbatterie für eine bestimmte Zeitscheibe

$$\begin{aligned} TsWEBUMax_{bat,ts} = & \max_{\substack{(ebubat, ebuest, \\ ebuveh, ebutss) \\ \in TsWEBUS_{bat,ts}}} \text{len } ebutss \end{aligned}$$

für $bat \in Batteries, ts \in TimeSlots$ (54)

Funktionsgleichung für sämtliche längste durchgängige Einsätze zum Warten einer Wechselbatterie

$$\begin{aligned} AllWEBUS_{bat} = & \bigcup_{ts \in TimeSlots} \left\{ \left(\begin{array}{l} ebubat, ebuest, \\ ebuveh, ebutss \end{array} \right) \middle| \begin{array}{l} \text{len } ebutss \geq TsWEBUMax_{bat,ts} \\ \in TsWEBUS_{bat,ts} \end{array} \right\} \end{aligned}$$

für $bat \in Batteries$ (55)

V. Abgabe einer Wechselbatterie

In **Abbildung 32** zeigt exemplarisch bei den Zeitscheiben Nr. 17 bis Nr. 22, dass nicht geplant ist, die Wechselbatterie 'BAT1' für die Abgabe durch das Fahrzeug 'AGV58' etc. zu gebrauchen. Ein geplanter durchgängiger Gebrauch zur Abgabe der Wechselbatterie 'BAT1' durch das Fahrzeug 'AGV58' etc. beginnt beispielsweise bei der Zeitscheibe Nr. 21 und endet mit der Zeitscheibe Nr. 22. Es ist in Ordnung, dass die Abgabeprozedur länger als bloß eine Zeitscheibe umfasst.

DEFINITION: durchgängige Einsatzmöglichkeit zu einer Abgabe

Das Quintupel $(bat, est, vehfrom, cstto, tss) \in DEBU$ aus einem Bezeichner einer Wechselbatterie $bat \in Batteries$, einem Stationsbezeichner $est \in Stations$ für die Tauschspuren, einem Fahrzeugbezeichner $veh \in Vehicles$, einem Stationsbezeichner $cstto \in Stations$ für die Ladestellen und einer Zeitperiode $tss \in TimePeriods$ heißt durchgängige Einsatzmöglichkeit zur Abgabe dieser Wechselbatterie mit Hilfe der Tauschspuren an die Ladestellen dieser Station durch dieses Fahrzeug in diesem Zeitabschnitt.

Der markierte Abschnitt des Zeitrasters hebt die Einsatzzeitperiode eines durchgängigen Gebrauchs zur Abgabe der Wechselbatterie 'BAT1' etc. hervor. Damit soll deutlich werden, wie ein solcher auf

der Basis von Einzelentscheidungen über die zeitweilige Fahrzeugbelegung, die zeitweilige Begebenheit eines Fahrzeugs an einer Station und die zeitweiligen Tausche innerhalb der Aufnahmezeitperiode codiert ist.

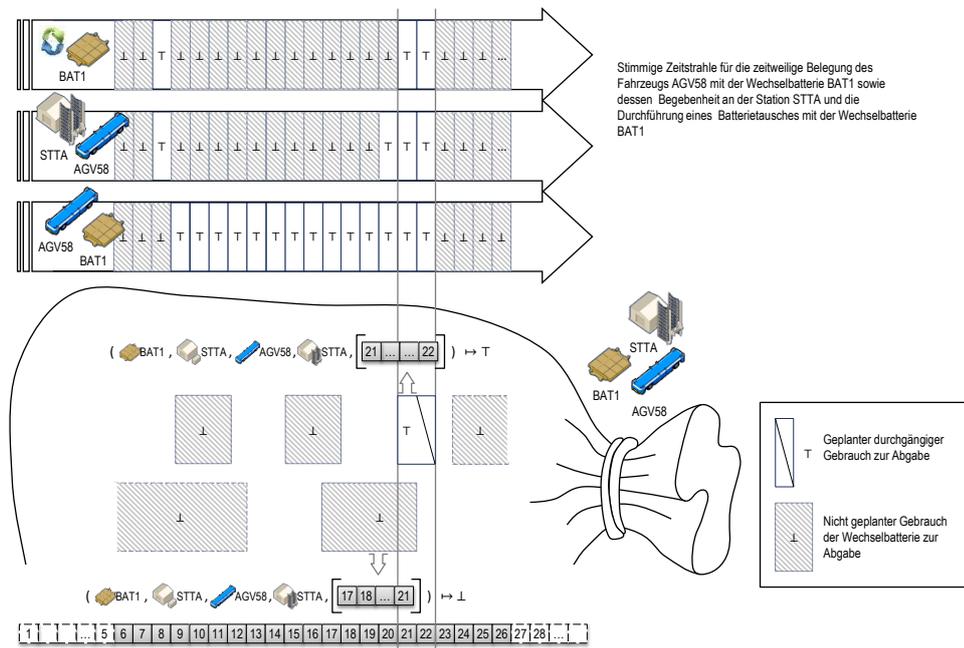


Abbildung 32 Planung des Gebrauchs zur Abgabe von Wechselbatterien über die Zeit

DEFINITION: durchgängiger Einsatz einer Wechselbatterie zur Abgabe

Sei in der Zeitperiode $tss \in TimePeriods$ eine indefinite Einsatzaktivität der Wechselbatterie $bat \in Batteries$ geplant. Sei innerhalb der Einsatzzeitperiode für das Fahrzeug $veh \in Vehicles$ in jeder Zeitscheibe entschieden, es zeitweilig mit der Wechselbatterie bat zu belegen. Sei in jeder Zeitscheibe dieser Einsatzzeitperiode zudem entschieden, die Tauschspuren einer Station $est \in Stations$ durch selbiges Fahrzeug auszulasten. Sei obendrein die Wechselbatterie bat in jeder dieser Zeitscheiben Gegenstand eines Batterietausches. Dann lässt sich daraus $DropoffUsages(bat, est, vehfrom, cstto, tss) = T$ für den Plan in dieser Zeitperiode ein durchgängiger Einsatz dieser Wechselbatterie bei ihrer Aufnahme von dieser Station durch dieses Fahrzeug herleiten. Wechselbatterien werden stets an die Ladestellen $cstto \in Stations$ derjenigen Station abgegeben, deren Tauschspuren durch das abgebende Fahrzeug ausgelastet sind $est = cstto$.

Funktionsgleichung für den Einsatz einer Wechselbatterie zur Abgabe gemäß Fahrzeugbelegung, Begebenheit eines Fahrzeugs, etc.

$$DropoffUsages(bat, est, vehfrom, cstto, tss) = BatteryUsages(bat, tss) \wedge \bigwedge_{ts \in tss} VehBatAllocations(vehfrom, bat, ts) \wedge \bigwedge_{ts \in tss} ExtVehUtilizations(est, vehfrom, ts) \wedge \bigwedge_{ts \in tss} BatteryExchanges(bat, ts)$$

für $bat \in Batteries$, $est \in Stations$, $vehfrom \in Vehicles$,
 $cstto \in Stations$, $est = cstto$, $tss \in TimePeriods$

(56)

Erstens müssen die Ladestellen der Station 'STTA' in jeder der Zeitscheiben zeitweilig durch die Wechselbatterie 'BAT1' ausgelastet sein. Zweitens muss das Fahrzeug 'AGV58' zeitweilig die Tauschspuren derselben Station 'STTA' auslasten. Drittens muss die Wechselbatterie 'BAT1' zeitweilig Gegenstand eines Batterietausches sein.

Funktionsgleichung für sämtliche Abgabeesätze einer Wechselbatterie in einer bestimmten Zeitscheibe

$$TsDEBUS_{bat,ts} = \left\{ \left(\begin{array}{l} ebubat, ebuest, \\ ebuveh, ebucst, ebutss \\ \in PEBU \end{array} \right) \middle| \begin{array}{l} ebubat = bat \wedge ts \in ebutss \wedge \\ \text{DropoffUsages} \left(\begin{array}{l} ebubat, ebuest, \\ ebuveh, ebucst, ebutss \end{array} \right) = T \end{array} \right\} \\ \text{für } bat \in Batteries, ts \in TimeSlots \quad (57)$$

Funktionsgleichung der maximalen Länge eines durchgängigen Einsatzes zur Abgabe einer Wechselbatterie für eine bestimmte Zeitscheibe

$$TsDEBUMax_{bat,ts} = \max_{\substack{ebubat, ebuest, \\ ebuveh, ebucst, ebutss \\ \in TsDEBUS_{bat,ts}}} \text{len } ebutss \\ \text{für } bat \in Batteries, ts \in TimeSlots \quad (58)$$

Funktionsgleichung für sämtliche längste durchgängige Einsätze zur Abgabe einer Wechselbatterie

$$AllDEBUS_{bat} = \bigcup_{ts \in TimeSlots} \left\{ \left(\begin{array}{l} ebubat, ebuest, \\ ebuveh, ebucst, ebutss \\ \in TsDEBUS_{bat,ts} \end{array} \right) \middle| \text{len } ebutss \geq TsDEBUMax_{bat,ts} \right\} \\ \text{für } bat \in Batteries \quad (59)$$

VI. Sequenzen von Einsatzaktivitäten

Auf der Grundlage der Zuordnungsentscheidungen lässt sich für jede der geplanten Einsatzaktivitäten der Wechselbatterien feststellen, welche Ressourcen einander durchgängig zugeordnet sind und auf welche Art die Wechselbatterie in der Einsatzzeitperiode gebraucht wird. Eine Abfolge der längsten durchgängigen Einsatzaktivitäten von Wechselbatterien wird Einsatzsequenz genannt.

Es gibt eine Menge von Einsatzweisen *BatteryUsageTypes* für die Wechselbatterien. Diese beziehen sich zyklisch aufeinander. Dieser Einsatzzyklus muss in einer Batterieeinsatzsequenz eingehalten werden.

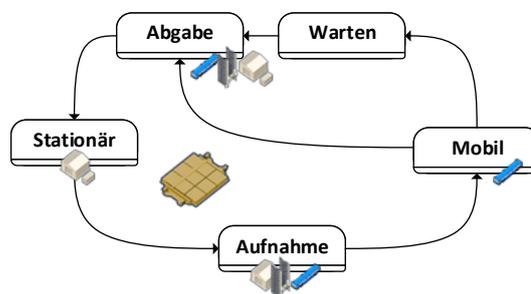


Abbildung 33 Zustandsdiagramm zu einem Einsatzzyklus einer Wechselbatterie

Über einen vollständigen Einsatzzyklus hinweg wird eine Wechselbatterie zunächst einmal teilweise oder voll geladen und anschließend wieder entladen. Die **Abbildung 33** zeigt ein Diagramm mit einem Zyklus über alle fünf Einsatzweisen. Im Teilzyklus des Ladens ist es möglich, die Wechselbatterien in der Station einzusetzen. Dafür steht links im Bild der Zustand mit der stationären Einsatzweise. Im Teilzyklus des Entladens lassen sich die Wechselbatterien in den Fahrzeugen einsetzen. Das

bildet der Zustand auf der rechten Bildseite mit der mobilen Einsatzweise ab. Darüber hinaus müssen die Wechselbatterien so eingesetzt werden, dass sie von der Station in die Fahrzeuge und umgekehrt von den Fahrzeugen in Station gelangen. Ein solcher Batterietausch setzt sich aus der Sicht der Wechselbatterie aus den drei Einsatzweisen in der Bildmitte zusammen. Ein Fahrzeug fährt eine Station an und reiht sich in die dortige Warteschlange ein. Ist ein Fahrzeug an vorderster Stelle in dieser Warteschlange, kann es direkt auf eine Tauschspur einfahren und seine Wechselbatterie an die Station abgeben. Daraufhin muss dieses Fahrzeug eine andere frisch geladene Wechselbatterie von der Station aufnehmen.

Menge von Bezeichnern der Einsatzweisen und zyklische Relation

$$\text{BatteryUsageTypes} = \{ \text{'Stationary'}, \text{'PickUp'}, \text{'Mobile'}, \text{'WaitingIdle'}, \text{'DropOff'} \} \quad (60)$$

$$\text{„<“} = \left\{ \begin{array}{l} (\text{'Stationary'}, \text{'PickUp'}), (\text{'PickUp'}, \text{'Mobile'}), (\text{'Mobile'}, \text{'WaitingIdle'}), \\ (\text{'Mobile'}, \text{'DropOff'}), (\text{'DropOff'}, \text{'Stationary'}) \end{array} \right\}$$

z.B. 'PickUp' < 'Mobile': *der mobile Einsatz setzt die Aufnahme einer Wechselbatterie voraus* (61)

$$\text{BUType}(\text{bat}, \text{tss}) = \text{'Stationary'} \Leftrightarrow (\text{bat}, \text{tss}) \in \text{AllSBUS}_{\text{bat}}$$

$$\text{BUType}(\text{bat}, \text{tss}) = \text{'PickUp'} \Leftrightarrow (\text{bat}, \text{tss}) \in \text{AllPEBUS}_{\text{bat}}$$

$$\text{BUType}(\text{bat}, \text{tss}) = \text{'Mobile'} \Leftrightarrow (\text{bat}, \text{tss}) \in \text{AllMBUS}_{\text{bat}}$$

$$\text{BUType}(\text{bat}, \text{tss}) = \text{'WaitingIdle'} \Leftrightarrow (\text{bat}, \text{tss}) \in \text{AllWEBUS}_{\text{bat}}$$

$$\text{BUType}(\text{bat}, \text{tss}) = \text{'DropOff'} \Leftrightarrow (\text{bat}, \text{tss}) \in \text{AllDEBUS}_{\text{bat}}$$

$$\text{AllBUS}_{\text{bat}} = \text{AllSBUS}_{\text{bat}} \cup \text{AllPEBUS}_{\text{bat}} \cup \text{AllMBUS}_{\text{bat}} \cup \text{AllWEBUS}_{\text{bat}} \cup \text{AllDEBUS}_{\text{bat}}$$

$$\forall_{\text{bu}_1 = (\text{bat}, [\text{bgn}_1, \text{end}_1]), \text{bu}_2 = (\text{bat}, [\text{bgn}_2, \text{end}_2]) \in \text{AllBUS}_{\text{bat}} : \text{bu}_1 \neq \text{bu}_2 \\ \text{end}_1 + 1 = \text{bgn}_2 \Rightarrow \text{BUType}(\text{bat}, [\text{bgn}_1, \text{end}_1]) < \text{BUType}(\text{bat}, [\text{bgn}_2, \text{end}_2]) \quad (62)$$

Die **Abbildung 34** zeigt beispielhaft eine dem oben beschriebenen Zyklus gerechte Abfolge von Batterieeinsatzaktivitäten und wie sie sich die Einsatzweisen zeitweise aus den Planungsentscheidungen herleiten. In der gezeigten Abfolge im Innenring kommt es vor, dass die Wechselbatterie in einem Fahrzeug gebraucht wird, welches noch die Verfügbarkeit einer Tauschspur oder auf den Zugang zur Station warten muss. Die Außenringe beinhalten die zugrundeliegenden Zuordnungsentscheidungen wie die zeitweilige Ladestellenauslastung, die zeitweilige Auslastung von Tauschspuren an einer Station und so weiter.

An einem Zeitstrahl lassen sich Zuordnungsentscheidungen wie die zeitweise Fahrzeugbelegung in einem Zeitraster von links nach rechts notieren. Allerdings lassen sich auf diese Weise lediglich kleinere wie auch größere zeitliche Ausschnitte wiedergeben. In **Abbildung 34** sind Zeitstrahlen zu sehen, die zu Ringen verkrümmt und ineinander gesteckt sind. Dadurch soll veranschaulicht werden, dass nachdem eine Wechselbatterie einen vollständigen Zyklus genommen hat, in derselben Einsatzsequenz erneut ein Zyklus anschließt. Die Ringe stellen hierfür im Uhrzeigersinn ein ewig fortlaufendes Zeitraster dar. Es kann zum Anfang eines Planungszeitraums für jede Wechselbatterie mit irgendeiner Einsatzweise in einen Zyklus eingesprungen/angefangen werden. Das abgebildete Beispiel kann in dieser Hinsicht für Wechselbatterien als recht universell betrachtet werden. Denn sinngemäß gibt es im Zeitraster der Ringe weder einen zeitlichen Beginn noch ein zeitliches Ende.

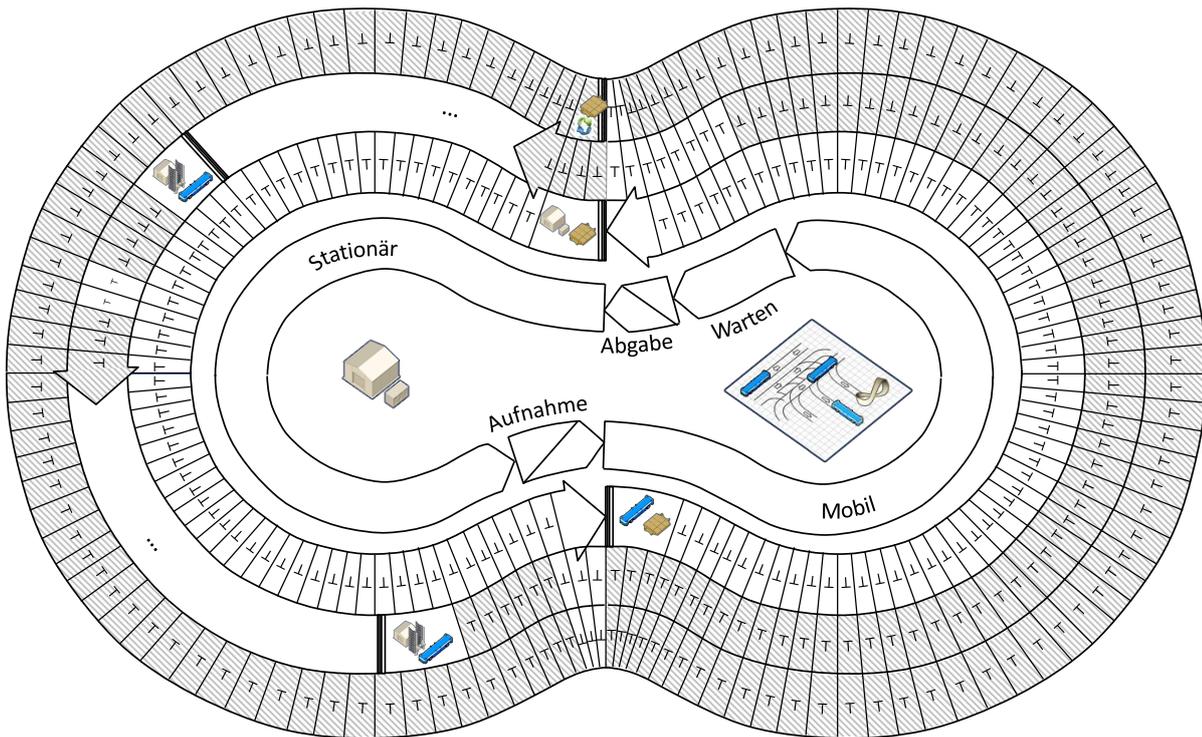


Abbildung 34 Übersicht des Einsatzzyklus für Wechselbatterien und zugrundeliegenden Planungsentscheidungen

Ein ordnungsgemäßer Einsatzzyklus für eine Wechselbatterie mag beispielsweise nach dem Muster in **Abbildung 34** in der oberen Bildmitte mit dem Teilzyklus des Ladens beginnen. Als Erstes wird dabei die Wechselbatterie stationär gebraucht und als Zweites durch ein Fahrzeug aufgenommen. Die stationäre Einsatzweise ist wesentlich für diesen Teilzyklus. Sie geht damit einher, dass die Wechselbatterie geladen werden kann. Bei der Aufnahme durch ein Fahrzeug kann hingegen nicht geladen werden, obwohl diese Einsatzweise der Wechselbatterie dem Teilzyklus des Ladens als ein Übergangsstück zugehört. Nach dem Teilzyklus des Ladens ist ein Einsatzzyklus zwingend mit dem Teilzyklus des Entladens fortzusetzen. Dabei wird die Wechselbatterie als Drittes vor allem mobil gebraucht. Während des Gebrauchs zum Fahren kann sie entladen werden. Dann kann die Wechselbatterie in einigen Fällen als Viertes dazu gebraucht werden, dass das Fahrzeug bei der Anfahrt oder dem Zugang zur Station warten muss. Zudem kann das Fahrzeug vor der Station darauf warten, dass eine andere Wechselbatterie verfügbar ist, die genügend geladen ist. Obwohl diese Einsatzweise dem Teilzyklus des Entladens zugehört, wird die Wechselbatterie beim Warten nicht entladen.

Der erste Außenring behandelt sowohl die zeitweise Auslastung der Ladestellen einer Station im Teilzyklus des Ladens als auch die zeitweise Fahrzeugbelegung im Teilzyklus des Entladens. Entsprechend gibt es auf diesem Ring zwei Zeitstrahle, wobei das Pfeilende eines Zeitstrahls in den Anfang des jeweils anderen Zeitstrahls gesteckt ist. Dadurch soll in **Abbildung 34** lediglich der Eindruck verstärkt werden, dass sich eine Wechselbatterie entweder im Fahrzeug oder in einer Station befinden kann. Wie oben beschrieben gibt es eine Vielzahl von zeitweisen Ausstattungs- und Aufenthaltsmöglichkeiten; es ließen sich ebenso viele unterschiedliche Zeitstrahle mit der Fahrzeugbelegung mit einer Wechselbatterie, etc. für die betreffenden Zeitscheiben in den ersten Außenring einzeichnen. Hier ist auf der einen Seite genau der Zeitstrahl mit einer Station abgebildet, deren Ladestellen in allen Zeitscheiben im Teilzyklus des Ladens zeitweise durch die Wechselbatterie ausgelastet sind. Auf der anderen Seite ist genau der Zeitstrahl mit einem Fahrzeug abgebildet, welches in allen Zeitschei-

ben im Teilzyklus des Entladens zeitweise mit der Wechselbatterie belegt ist. In **Abbildung 34** soll auch verdeutlicht werden, dass der Einsatzzyklus eingehalten werden kann, gleichgültig welches von mehreren Fahrzeugen die Wechselbatterie aufnimmt bzw. wieder abgibt und wie ein solches Fahrzeug zuvor oder danach zeitweilig belegt ist. Im zweiten Außenring wird die zeitweise Auslastung der Tauschspuren einer Station durch ein Fahrzeug behandelt. Einige zeitliche Ausschnitte im zweiten Außenring sind bewusst ausgespart, um mehrere Zeitstrahle darstellen zu können, die sich hinsichtlich der Tauschspurenauslastung überlagern können. In dem gewählten Beispiel begibt sich im Teilzyklus des Ladens zwischenzeitlich ein Fahrzeug an die Station, ohne letztendlich die Wechselbatterie aufzunehmen, auf die sich die Darstellung konzentriert. Im dritten Außenring wird das zeitweilige Tauschen einer Wechselbatterie behandelt. Im unteren Bildteil wird angedeutet, dass sich die betrachtete Wechselbatterie innerhalb des Teilzyklus des Ladens gleichzeitig mit einem Fahrzeug in einer Station befinden muss, ehe dann tatsächlich mit einem Batterietausch die Wechselbatterie vom Fahrzeug aufgenommen wird. Ähnlich verhält es bei diesem Beispiel im oberen Bildteil im Teilzyklus des Entladens, dass sich das Fahrzeug an die Station begibt und schließlich ein Batterietausch durchgeführt wird, wodurch die Wechselbatterie vom Fahrzeug abgegeben wird.

D. Ladeverlaufsentscheidungen

I. Lade-/Entladeleistung

Für jedes Paar von Wechselbatterie und Zeitscheibe wird eine Lade-/Entladeleistung entschieden. Diese muss innerhalb der Kapazitätsgrenzen des jeweiligen Batteriesystems gewählt werden.

DEFINITION: zeitweilige Lade-/Entlademöglichkeit

Innerhalb des Planungszeitraums kann die Lade-/Entladeleistung für eine Wechselbatterie beliebig oft angepasst werden. Unabhängig von der Planung für vorausgehende Zeitscheiben könnte in einer bestimmten Zeitscheibe geladen oder entladen werden. Genauer ausgedrückt, es kann eine Lade- oder Entladeleistung festgelegt werden. Das Paar (bat, ts) aus einem Bezeichner einer Wechselbatterie $bat \in Batteries$ und einer Nummer einer Zeitscheibe $ts \in TimeSlots$ heißt zeitweilige Lade-/Entlademöglichkeit dieser Wechselbatterie bat in der Zeitscheibe ts .

In **Abbildung 35** werden die zeitweiligen Lade-/Entlademöglichkeiten für die Wechselbatterien 'BAT1', 'BAT2', usw. in den einzelnen Zeitscheiben musterhaft gezeigt. Dazu finden sich links im Bild die Entscheidungstabelle und rechts im Bild die entsprechenden Zeitstrahle. Es ist in der Tabelle kenntlich gemacht, welche Auszüge durch die Zeitstrahle wiedergespiegelt werden.

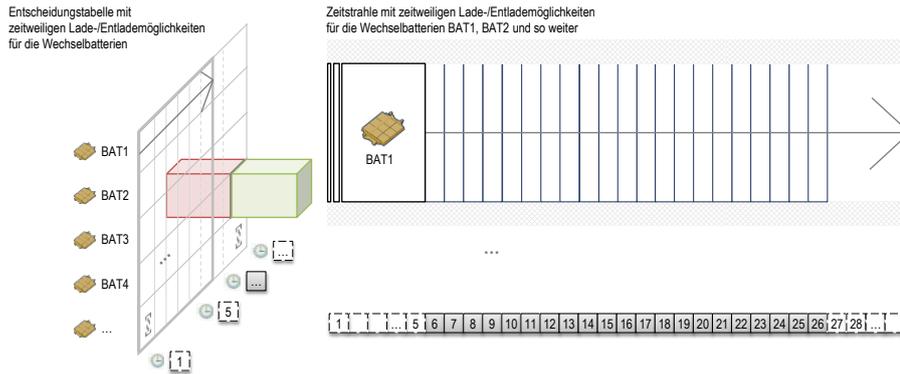


Abbildung 35 Übersicht der Lade-/Entlademöglichkeiten für die Wechselbatterien über die Zeit

DEFINITION: zeitweiliges Laden/Entladen

Die Entscheidungen zum zeitweiligen Laden/Entladen können mit Hilfe einer Funktion **ChargingPower** repräsentiert werden. Diese bildet zeitweilige Lade-/Entlademöglichkeiten mit einer Wechselbatterie $bat \in Batteries$ und einer der Zeitscheibe $ts \in TimeSlots$ auf einen ganzzahligen Wert $p = \text{Charging...Power}(bat, ts)$ ab, der für die elektrische Leistung in Kilowatt steht. Falls $p > 0$ ein Wert größer als null gewählt ist, so ist dadurch entschieden, die Wechselbatterie bat in der Zeitscheibe ts zeitweilig zu laden. Der Zahlenwert p bedeutet dann eine elektrische Leistung in Laderichtung, also eine sogenannte zeitweilige Ladeleistung der Wechselbatterie in der Zeitscheibe. Anderenfalls $p < 0$ ein Wert kleiner als null gewählt ist, so ist entschieden, die Wechselbatterie bat in der Zeitscheibe ts zu entladen. Der Zahlenwert p bedeutet dann eine elektrische Leistung in Entladerichtung, also eine sogenannte zeitweilige Entladeleistung dieser Wechselbatterie in dieser Zeitscheibe. Ansonsten $p = 0$ ist es entschieden, jene Wechselbatterie in jener Zeitscheibe weder zu laden noch zu entladen.

zu entscheidende Funktion zeitweiliger Lade-/Entlademöglichkeiten auf einen ganzzahligen Wert, der für die elektrische Leistung in Kilowatt steht

$$\text{ChargingPower}: Batteries \times TimeSlots \rightarrow \mathbb{Z} \quad (63)$$

Die gewählte Lade-/Entladeleistung muss innerhalb der typspezifisch begrenzten Lade-/Entladekapazitäten liegen

$$\begin{aligned} \forall bat \in Batteries \forall ts \in TimeSlots \\ \text{DischargeCapacity}(\text{BatteryType}(bat)) \leq p \leq \text{ChargingCapacity}(\text{BatteryType}(bat)) \\ \text{mit } p = \text{ChargingPower}(bat, ts) \end{aligned} \quad (64)$$

Für jede Wechselbatterie wie zum Beispiel 'BAT2' lässt sich an einem Zeitstrahl darstellen, dass festgelegt ist, zeitweilig zu laden oder eben zu entladen. In **Abbildung 36** wird für die Wechselbatterie 'BAT2' exemplarisch in den Zeitscheiben von Nr. 9 bis einschließlich Nr. 20 sowie in den Zeitscheiben Nr. 23 und Nr. 24 geladen. Dabei wurde in einigen Zeitabschnitten wie zum Beispiel Nr. 9, Nr. 10 und so weiter eine Ladeleistung von 48 kW festgelegt, wodurch die Ladekapazität voll ausgeschöpft ist. Die Limitierung der Lade- und Entladekapazität sind mit den schraffierten Balken oben und unten am Zeitstrahl angedeutet. Beispielsweise sind in den Zeitscheiben Nr. 17, Nr. 18 und so weiter lediglich 24 kW Ladeleistung ausgewählt. Hingegen wird die Wechselbatterie 'BAT2' in den Zeitscheiben Nr. 6, Nr. 7 und Nr. 8 zu entladen sein. Für die Zeitscheibe Nr. 6 ist zum Beispiel eine Entladeleistung von 48 kW und in den Zeitscheiben Nr. 7 und Nr. 8 von 24 kW entschieden.

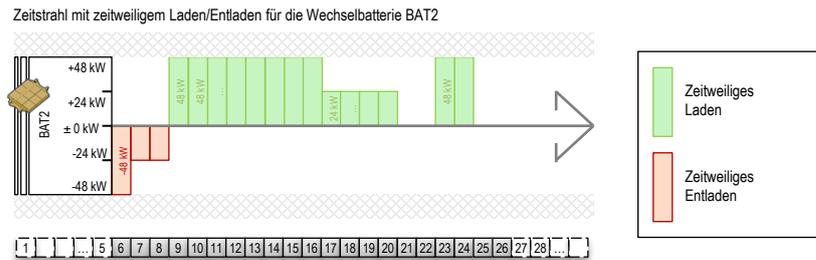


Abbildung 36 Festlegung des zeitweiligen Ladens/Entladens der Wechselbatterien über die Zeit

Bei der Durchführung eines Batterietausches wird eine Wechselbatterie kontaktiert/dekontaktiert: In der Abgaberichtung bewegt sie sich im Teilzyklus des Entladens bzw. zählt noch zur Ausstattung des betreffenden Fahrzeugs, solange sie noch aus einem Fahrzeug herauszuheben und an eine Ladestelle einzugeben ist. In der Aufnahmerichtung bewegt sie sich im Teilzyklus des Laden bzw. gehört noch einer Auslastung der Station an, solange sie noch von dort zu entnehmen und in eine Fahrzeug hinein zu bringen ist.

Wenn festgelegt ist, in einer Zeitscheibe mit einer Wechselbatterie einen Batterietausch vorzunehmen, dann kann diese Wechselbatterie in dieser Zeitscheibe weder zu laden noch zu entladen sein.

Bei einem Batterietausch kann weder geladen noch entladen werden.

(65)

$$\forall bat \in Vehicles \forall ts \in TimeSlots$$

$$\text{BatteryExchanges}(bat, ts) \Rightarrow \text{ChargingPower}(bat, ts) = 0$$

II. Beschränkungen der Ein-/Auspeicherung

Durch die gewählte Lade-/Entladeleistung lässt sich die elektrische Leistung ermitteln, mit der über die Zeit ein- bzw. ausgespeichert wird. Bei der Ein- bzw. Ausspeicherung handelt es sich jeweils um den Betrag der Lade- bzw. Entladeleistung. In **Abbildung 37** wird exemplarisch je ein Zeitstrahl zur Ein- bzw. Ausspeicherung bei der Wechselbatterie 'BAT2' gezeigt. Die Ein-/Ausspeicherung in diesem Beispiel ist stimmig zu der oben abgebildeten Lade-/Entladeleistung. Für die Zeitscheibe Nr. 7 wurde beispielsweise ermittelt, dass mit einer elektrischen Leistung von 24 kW ausgespeichert wird. Für die Zeitscheibe Nr. 10 steht zum Beispiel eine elektrische Leistung 48 kW zu Buche.

Funktionsgleichung für die zeitweilige Einspeicherung

$$\text{BatteryCharging}(bat, ts) = \begin{cases} |p|, & p \geq 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \text{ mit } p = \text{ChargingPower}(bat, ts)$$

für $bat \in Batteries, ts \in TimeSlots$ (66)

Funktionsgleichung für die zeitweilige Ausspeicherung

$$\text{BatteryDischarging}(bat, ts) = \begin{cases} |p|, & p \leq 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \text{ mit } p = \text{ChargingPower}(bat, ts)$$

für $bat \in Batteries, ts \in TimeSlots$ (67)

Auf der einen Seite kann eine Wechselbatterie während eines Aufenthalts in einer Station geladen werden. Eine Rückspeisung elektrischer Energie von der Ladestation wird in dieser Planungsproblemstellung nicht betrachtet. Darum ist es unzulässig, eine Entladeleistung in einer Aufenthaltsperiode zu wählen.

DEFINITION: zeitweiliges stationäres Laden

Sei **StationaryUsages**($sbubat, sbucst, sbutss$) = \top eine durchgängige stationäre Einsatzaktivität der Wechselbatterie $sbubat \in Batteries$ mit den Ladestellen der Station $sbucst \in Stations$ in der Aufenthaltsperiode $sbutss \in TimePeriods$. Falls dann für eine Lade-/Entlademöglichkeit mit dieser Wechselbatterie $sbubat$ und einer der Zeitscheiben $ts \in sbutss$ innerhalb der Aufenthaltsperiode ein Wert größer als null **ChargingPower**($sbubat, ts$) > 0 gewählt ist, so ist dadurch festgelegt, diese Wechselbatterie zeitweilig stationär zu laden. Im Zusammenhang mit dem Stationsaufenthalt ist eine gewisse Energiemenge, die einer Wechselbatterie innerhalb der Aufenthaltsperiode zuzuführen ist, durch eine Festlegung von Ladeleistung in dessen einzelnen Zeitscheiben verteilt. Falls sonst **ChargingPower**($sbubat, ts$) = 0, so ist dadurch innerhalb der betreffenden Aufenthaltsperiode festgelegt, die Wechselbatterie in der jeweiligen Zeitscheibe nicht zu laden.

Wenn festgelegt ist, eine Wechselbatterie in einer Zeitscheibe zu laden, dann sind in dieser Zeitscheibe die Ladestellen irgendeiner Station auszulasten.

Ist in eine Wechselbatterie einzuspeichern, muss sie sich in irgendeiner Station befinden (68)

$$\forall bat \in Batteries \forall ts \in TimeSlots$$

$$\mathbf{BatteryCharging}(bat, ts) > 0 \Rightarrow \bigvee_{cst \in Stations} \mathbf{CspBatUtilizations}(cst, bat, ts) = \top$$

Wenn festgelegt ist, eine Wechselbatterie in einer Zeitscheibe zu entladen, dann können in dieser Zeitscheibe auch nicht die Ladestellen irgendeiner Station auszulasten sein.

Ist aus einer Wechselbatterie auszuspeichern, darf sie sich in keiner der Stationen befinden (69)

$$\forall bat \in Batteries \forall ts \in TimeSlots$$

$$\mathbf{BatteryDischarging}(bat, ts) > 0 \Rightarrow \bigwedge_{cst \in Stations} \mathbf{CspBatUtilizations}(cst, bat, ts) = \perp$$

Wenn festgelegt ist, in einer Zeitscheibe eine Ladestelle durch eine Wechselbatterie auszulasten, dann kann diese Wechselbatterie in dieser Zeitscheibe nicht zu entladen sein.

Innerhalb einer Station kann nicht ausgespeichert werden (70)

$$\forall bat \in Batteries \forall ts \in TimeSlots$$

$$\bigvee_{cst \in Stations} \mathbf{CspBatUtilizations}(cst, bat, ts) = \top \Rightarrow \mathbf{BatteryDischarging}(bat, ts) = 0$$

Wenn festgelegt ist, in einer Zeitscheibe keinerlei Ladestelle durch eine Wechselbatterie auszulasten, dann kann diese Wechselbatterie in dieser Zeitscheibe auch nicht zu laden sein.

Außerhalb einer Station kann nicht eingespeichert werden. (71)

$$\forall bat \in Batteries \forall ts \in TimeSlots$$

$$\bigwedge_{cst \in Stations} \mathbf{CspBatUtilizations}(cst, bat, ts) = \perp \Rightarrow \mathbf{BatteryCharging}(bat, ts) = 0$$

Auf der anderen Seite kann eine Wechselbatterie als Ausstattung eines Fahrzeugs nur entladen werden. Eine Rückgewinnung elektrischer Energie an Bord der Fahrzeuge wird in dieser Planungsproblemstellung vernachlässigt. Insofern ist es unzulässig, eine Ladeleistung in einer Transportperiode festzulegen.

DEFINITION: zeitweiliges mobiles Entladen

Sei **MobileUsages**($mbubat, mbuveh, mbutss$) = T eine durchgängige mobile Einsatzaktivität der Wechselbatterie $mbubat \in Batteries$ mit dem Fahrzeug $mbuveh \in Vehicles$ in der Transportperiode $mbutss \in TimePeriods$. Falls dann für eine Lade-/Entlademöglichkeit mit dieser Wechselbatterie $mbubat$ und einer der Zeitscheiben $ts \in mbutss$ innerhalb der Transportperiode ein Wert kleiner als null **ChargingPower**($mbubat, ts$) < 0 gewählt ist, so ist dadurch festgelegt, die Wechselbatterie bat in der einzelnen Zeitscheibe mobil zu entladen. Anderenfalls **ChargingPower**($mbubat, ts$) = 0, so ist dadurch innerhalb der betreffenden Transportperiode festgelegt, die Wechselbatterie in der jeweiligen Zeitscheibe nicht zu entladen.

Wenn festgelegt ist, eine Wechselbatterie in einer Zeitscheibe zu laden, dann ist in dieser Zeitscheibe ein Fahrzeug mit dieser Wechselbatterie zu belegen.

Ist in eine Wechselbatterie einzuspeichern, darf sie sich in keinem Fahrzeug befinden (72)

$$\forall bat \in Batteries \forall ts \in TimeSlots$$

$$\mathbf{BatteryCharging}(bat, ts) > 0 \Rightarrow \bigwedge_{veh \in Vehicles} \mathbf{VehBatAllocations}(veh, bat, ts) = \perp$$

Wenn festgelegt ist, eine Wechselbatterie in einer Zeitscheibe zu entladen, dann ist in dieser Zeitscheibe irgendein Fahrzeug zu belegen.

Ist aus einer Wechselbatterie auszuspeichern, muss sie sich in irgendeinem Fahrzeug befinden (73)

$$\forall bat \in Batteries \forall ts \in TimeSlots$$

$$\mathbf{BatteryDischarging}(bat, ts) > 0 \Rightarrow \bigvee_{veh \in Vehicles} \mathbf{VehBatAllocations}(veh, bat, ts) = \top$$

Wenn festgelegt ist, in einer Zeitscheibe ein Fahrzeug mit einer Wechselbatterie zu belegen, dann kann diese Wechselbatterie in dieser Zeitscheibe nicht zu laden sein.

An Bord eines Fahrzeugs kann nicht eingespeichert werden (74)

$$\forall bat \in Batteries \forall ts \in TimeSlots$$

$$\bigvee_{veh \in Vehicles} \mathbf{VehBatAllocations}(veh, bat, ts) = \top \Rightarrow \mathbf{BatteryCharging}(bat, ts) = 0$$

Wenn festgelegt ist, in einer Zeitscheibe mit einer Wechselbatterie keinerlei Fahrzeug zu belegen, dann kann diese Wechselbatterie in dieser Zeitscheibe auch nicht zu entladen sein.

Außer Bord eines Fahrzeugs kann nicht ausgespeichert werden.

(75)

$$\forall_{\text{bat} \in \text{Batteries}} \forall_{\text{ts} \in \text{TimeSlots}} \bigwedge_{\text{veh} \in \text{Vehicles}} \text{VehBatAllocations}(\text{veh}, \text{bat}, \text{ts}) = \perp \Rightarrow \text{BatteryDischarging}(\text{bat}, \text{ts}) = 0$$

III. Ladezustand der Wechselbatterien

Für ein Fahrzeug im Fahrbetrieb muss elektrische Energie als nicht-erneuerbare Ressource zur Verfügung stehen, damit Fahrauftragszeitscheiben bearbeitet werden bzw. die gestellten Transportanforderungen abgedeckt werden können. Zudem ist die elektrische Energie für den Fahrbetrieb an Bord eines Fahrzeugs lokal zu bevorraten. Bei einer Aufnahme einer Wechselbatterie findet im Sinne der Planung mit nicht-erneuerbaren Ressourcen eine Produktion elektrischer Energie für das Fahrzeug statt. Bei der Erledigung von Fahraufträgen ergibt sich demgegenüber ein Konsum elektrischer Energie des Fahrzeugs. Die Abgabe einer Wechselbatterie führt zum Konsum der restlichen in der Wechselbatterie gespeicherten elektrischen Energie beim Fahrzeug.

Funktionsgleichung für die Entwicklung des Ladezustands über die Zeit

(76)

$$\begin{aligned} \text{StateOfCharge}(\text{bat}, \text{ts}) &= \text{InitialStateOfCharge}(\text{bat}) \\ &+ \sum_{\substack{\text{tsi} \leq \text{ts} \\ \text{tsi} \in \text{TimeSlots}}} \text{BatteryCharging}(\text{bat}, \text{tsi}) * \text{lenTs} \\ &- \sum_{\substack{\text{tsi} \leq \text{ts} \\ \text{tsi} \in \text{TimeSlots}}} \text{BatteryDischarging}(\text{bat}, \text{tsi}) * \text{lenTs} \\ &\text{für } \text{bat} \in \text{Batteries}, \text{ts} \in \text{TimeSlots} \end{aligned}$$

Der Ladezustand einer Wechselbatterie muss jederzeit innerhalb der Grenzen liegen

$$\forall_{\text{bat} \in \text{Batteries}} \forall_{\text{ts} \in \text{TimeSlots}} \text{socLowerBound} \leq \text{StateOfCharge}(\text{bat}, \text{ts}) \leq \text{socUpperBound} \quad (77)$$

Transportbedürfnisse werden in der betrachteten Problemstellung mit Ausnahme von Nullbedarf nicht allein durch die Ausstattung eines Fahrzeugs mit einer Wechselbatterie befriedigt. Über Fahrzeuge und Wechselbatterien als erneuerbare Ressourcen hinaus wird elektrische Energie als eine nicht-erneuerbare Ressource gebraucht. Sie wird stets indirekt über ein Batteriesystem zur Verfügung gestellt und tritt für die betreffenden Zeitabschnitt bezogen auf das dann ausgestattete Fahrzeug lokal auf. Für jedes Batteriesystem wird also wie in **Abbildung 37** der Ladezustandsverlauf nachvollzogen, der sich zwischen einem typspezifischen Minimal- und Maximalladezustandswert bewegen muss. Aus diesem Grund können keine Transportanforderungen in einer Zeitscheibe abgedeckt werden, deren Energiebedarf höher ausfällt als durch den Ladezustandsverlauf angezeigt wird. Je nachdem wie viel Transportanforderungen in einer Zeitscheibe erfüllt werden sollen, fällt auch der Energiebedarf der Fahrzeuge aus.

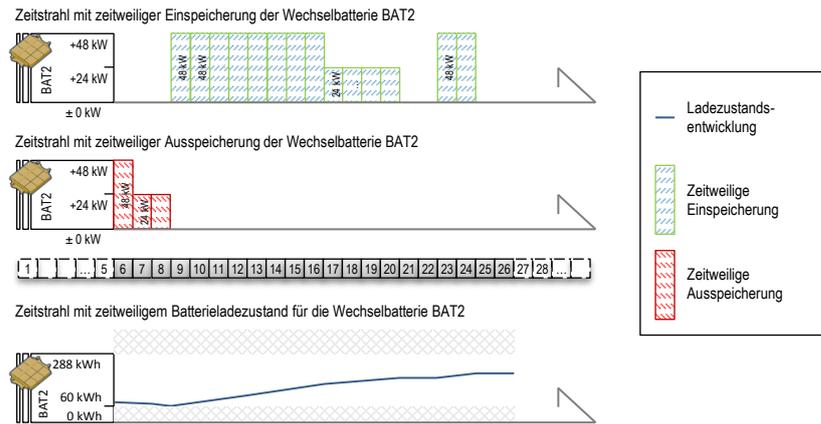


Abbildung 37 Ermittlung des Ladezustands der Wechselbatterien über die Zeit

Funktionsgleichung für die lokale Energiebereitstellung

$$\begin{aligned}
 & \text{DrivingEnergySupply}(\text{veh}, ts) \\
 = & \text{lenTs} * \sum_{\text{bat} \in \text{Batteries}} \begin{cases} \text{BatteryDischarging}(\text{bat}, ts), & \text{VehBatAllocations}(\text{veh}, \text{bat}, ts) = \top \\ 0, & \text{VehBatAllocations}(\text{veh}, \text{bat}, ts) = \perp \end{cases} \\
 & \text{für } \text{veh} \in \text{Vehicles}, ts \in \text{TimeSlots}
 \end{aligned} \tag{78}$$

Funktionsgleichung für die zeitweilige Ausspeicherung

$$\begin{aligned}
 \text{DrivingEnergyDemand}(\text{veh}, ts) &= \text{lenTs} * \text{TransportReqs}(\text{veh}, ts) * \text{powerPerMove} \\
 & \text{für } \text{bat} \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots}, \text{ z.B. } \text{powerPerMove} = \frac{1}{6}
 \end{aligned} \tag{79}$$

IV. Zugrundeliegendes Zu-/Abschaltpotenzial

Das Zu- und Abschaltpotenzial einzelner Zeitscheiben hängt von der in die Wechselbatterien einzuspeichernden Leistung ab; es kann sich nur gleichzeitig mit einem Stationsaufenthalt einer Wechselbatterie auf tun. Es wird von der festgelegten Ladeleistung gegenüber der Kapazitätsgrenze für das zeitweilige Laden ausprägt. Über die Zeit mag sich zum Beispiel mal ein reines Zuschaltpotenzial ergeben, wenn keine Ladeleistung gewählt wird; ein andermal ergibt sich ein reines Abschaltpotenzial, wenn eine maximale Ladeleistung gewählt wird. Es ist auch möglich, dass in einer Zeitscheibe an einer Ladestelle sowohl zu- als auch abgeschaltet werden kann, nämlich wenn eine Ladeleistung unterhalb der maximalen Ladeleistung festgelegt wird.

In **Abbildung 38** wird exemplarisch je ein Zeitstrahl für das zeitweilige Ab- und Zuschaltpotenzial der Wechselbatterie 'BAT2' gezeigt. In den Zeitscheiben Nr. 8, Nr. 9 und so weiter kann beispielsweise jeweils eine Leistung von 48 kW abgeschaltet werden. Dies geht darauf zurück, dass folglich des abgebildeten Beispiels festgelegt ist, mit einer Leistung von 48 kW zu laden. In den Zeitscheiben Nr. 21 und Nr. 22 steht keine Abschaltleistung zur Verfügung. Hier kann dagegen zeitweilig eine Leistung von 48 kW zugeschaltet werden. Umgekehrt verhält es sich in den Zeitscheiben Nr. 23 und Nr. 24 mit der möglichen Abschaltleistung von 48 kW. In den Zeitscheiben Nr. 17, Nr. 18 und so weiter kann zeitgleich eine Leistung von 24 kW ab- wie auch zugeschaltet werden.

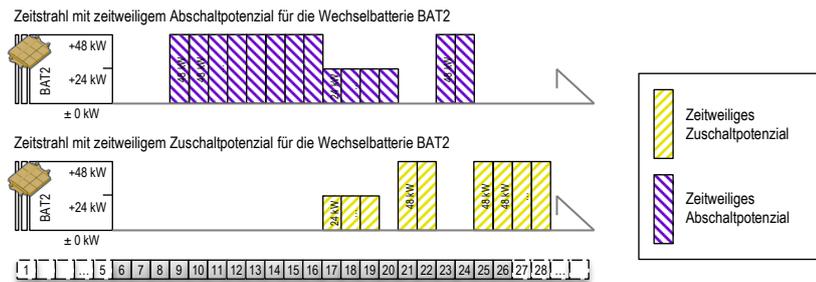


Abbildung 38 Ermittlung des Zu-/Abschaltpotenzials für die Wechselbatterien über die Zeit

Funktionsgleichung für das zeitweilige Abschaltpotenzial

$$\text{OverallSinglePowerDown}(bat, ts) = |bc| \quad \text{mit } bc = \text{BatteryCharging}(bat, ts) \\ \text{für } bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots} \quad (80)$$

Funktionsgleichung für das zeitweilige Zuschaltpotenzial

$$\text{OverallSinglePowerUp}(bat, ts) = |mp - bc| \\ \text{mit } mp = \text{ChargingCapacity}(\text{BatteryType}(bat)) \text{ und } bc = \text{BatteryCharging}(bat, ts) \\ \text{für } bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots} \quad (81)$$

V. Kumuliertes Zu-/Abschaltpotenzial

Insofern ein Ladeverlauf entschieden ist, lässt sich mit Blick auf ganze Stationsaufenthalte von Wechselbatterien analysieren, wie es um den zeitlichen Zusammenhang des Zu-/Abschaltpotenzials bestellt ist. Für einzelne Stellen im Ladeverlauf kann ermittelt werden, wie viel Potenzial für eine zeitliche Lastverschiebung bzw. Nachfragesteuerung zugrunde liegt. Innerhalb eines Ladeverlaufs kann Netzlast bzw. Stromnachfrage zeitlich nach vorne gezogen oder auch zeitlich nach hinten aufgeschoben werden. Stünde es zum Beispiel fest, eine Wechselbatterie vollständig zu laden, ehe für diese laut Plan ein Batterietausch ansteht, so könnte idealerweise im Plan vorgesehen werden, einen Teil der Netzlast bzw. der Stromnachfrage hinauszögern zu können.

In **Abbildung 39** wird exemplarisch ein Zeitstrahl für das zeitweilige rückwärts kumulierte Zuschaltpotenzial der Wechselbatterie 'BAT4' im zeitlichen Zusammenhang mit ihrem Aufenthalt an den Ladestellen der Station 'STTA' gezeigt. Ganz zu Beginn des Stationsaufenthalts folgt noch Zuschaltpotenzial einer Leistung von mehr als 288 kW nach. Ab dem Block der Zeitscheiben Nr. 49-52 trifft dies nicht mehr zu; das Zuschaltpotenzial der einzelnen Zeitscheiben Nr. 49 bis ganz zum Ende des Stationsaufenthalts bei Zeitscheibe Nr. 92 zusammengerechnet beträgt nur noch 264 kW. Insofern in den Zeitscheiben Nr. 65-68 bis Zeitscheiben Nr. 77-80 zeitweilig mit der maximalen Ladeleistung zu laden ist, bleibt das kumulierte nachfolgende Zuschaltpotenzial in dieser Zeit gleich hoch. Erst ganz zum Ende des Stationsaufenthalts ist den Zeitscheiben Nr. 85-88 beispielsweise kein nachfolgendes Zuschaltpotenzial mehr vorhanden.

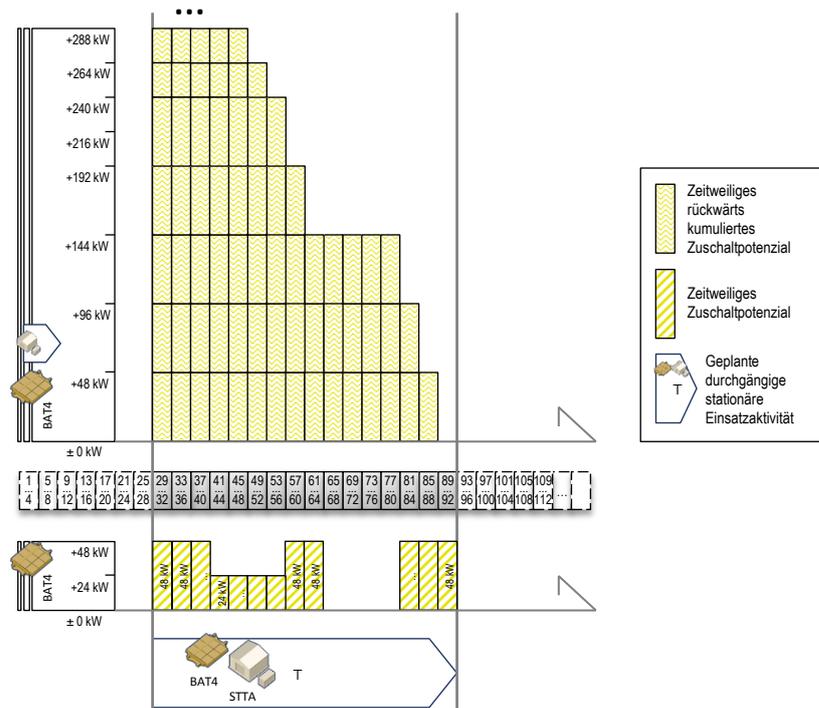


Abbildung 39 Ermittlung des kumulierten nachfolgenden Zuschaltpotenzials für die Wechselbatterien bei einem ihrer Stationsaufenthalte über die Zeit

Funktionsgleichung für das zeitweilige rückwärts kumulierte Zuschaltpotenzial

$$\text{OverallPowerIncreaseAfter}(bat, cst, ts) = \sum_{(bat, cst, tss) \in \text{TsStationaries}(bat, ts)} \sum_{tsb > ts} \text{OverallSinglePowerUp}(bat, ts) \quad (82)$$

für $bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots}$

Umgekehrt wird in **Abbildung 40** exemplarisch ein Zeitstrahl für das vorwärts kumulierte Zuschaltpotenzial der Wechselbatterie 'BAT4' im zeitlichen Zusammenhang mit ihrem Aufenthalt an den Ladestellen der Station 'STTA' gezeigt. Von Beginn des Stationsaufenthalts an gibt es Zuschaltpotenziale in den einzelnen Zeitscheiben. Diese bis zum Block der Zeitscheiben Nr. 45-48 zusammengerechnet ergibt ein kumuliertes Zuschaltpotenzial in Höhe von 192 kW. Ab den Zeitscheiben Nr. 57-60 geht in diesem Beispiel erstmals Zuschaltpotenzial mit einer Leistung von mehr als 288 kW voraus.

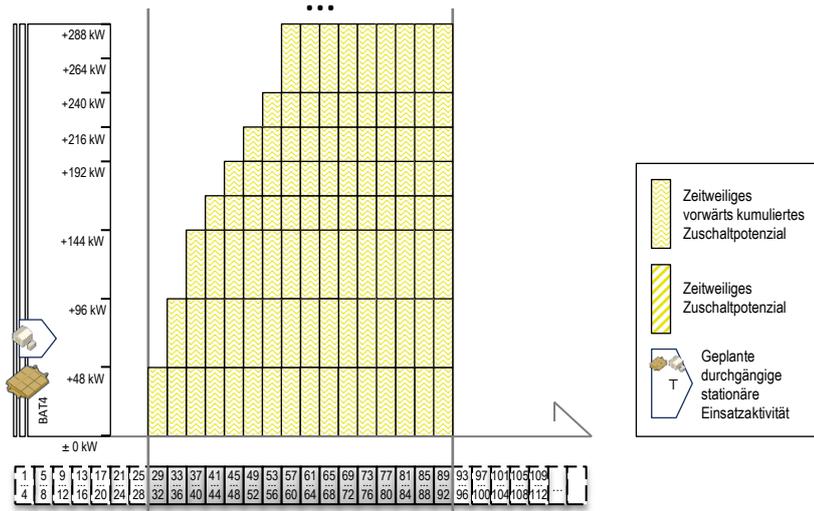


Abbildung 40 Ermittlung des kumulierten vorausgehenden Zuschaltpotenzials für die Wechselbatterien bei einem ihrer Stationsaufenthalte über die Zeit

Funktionsgleichung für das zeitweilige vorwärts kumulierte Zuschaltpotenzial

$$\text{OverallPowerIncreaseBefore}(\text{bat}, ts) = \sum_{\substack{(\text{bat}, \text{cst}, \text{tss}) \in \\ \text{TsStationaries}(\text{bat}, ts)}} \sum_{\substack{tsf \leq ts \\ tsf \in \text{tss}}} \text{OverallSinglePowerUp}(\text{bat}, ts)$$

für $\text{bat} \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots}$ (83)

In **Abbildung 41** wird exemplarisch ein Zeitstrahl für das rückwärts kumulierte Abschaltpotenzial Wechselbatterie 'BAT4' im zeitlichen Zusammenhang mit ihrem Aufenthalt an den Ladestellen der Station 'STTA' gezeigt. Zu Beginn des Stationsaufenthalts im Block der Zeitscheiben Nr. 29-32 folgt zum Beispiel noch das komplette Abschaltpotenzial einer Leistung von 288 kW nach. In diesem Beispiel kann nie mehr als eine Leistung von 288 kW über eine Stunde nachfolgend abzuschalten sein, da aufgrund der Nutzkapazität der Wechselbatterien innerhalb eines Stationsaufenthalts nicht mehr als 288 kWh Energie zugeführt und als Ladeleistung in die einzelnen Zeitscheiben der Aufenthaltsperiode verteilt werden können – wobei die Ladeleistung für eine Wechselbatterie auf Basis eines Blei-Batteriesystems zusätzlich auf maximal 48 kW beschränkt ist. Ab den Zeitscheiben Nr. 41-44 folgt etwas weniger Abschaltpotenzial nach, weil hier mit einer Leistung von 24 kW ein Teil des Abschaltpotenzials dieses Stationsaufenthalts vorzufinden ist. Insoweit das zeitweilige Laden in den Zeitscheiben Nr. 57-60 und Nr. 61-64 auszusetzen ist, bleibt das kumulierte nachfolgende Abschaltpotenzial in dieser Zeit gleich hoch. Ab den Zeitscheiben Nr. 77-80 ist beispielsweise kein nachfolgendes Abschaltpotenzial mehr vorhanden.

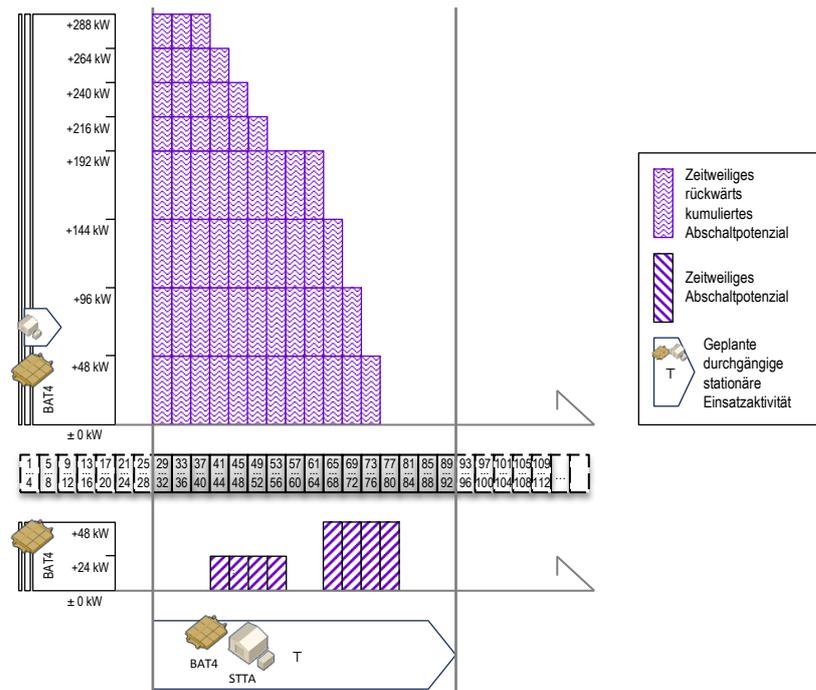


Abbildung 41 Ermittlung des kumulierten nachfolgenden Abschaltpotenzials für eine Wechselbatterie bei einem ihrer Stationsaufenthalte über die Zeit

Funktionsgleichung für das zeitweilige rückwärts kumulierte Abschaltpotenzial

$$\text{OverallPowerDecreaseAfter}(bat, ts) = \sum_{\substack{(bat, cst, tss) \in \\ \text{TsStationaries}(bat, ts)}} \sum_{tsb > ts} \text{OverallSinglePowerDown}(bat, ts)$$

für $bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots}$ (84)

Umgekehrt wird in **Abbildung 42** exemplarisch ein Zeitstrahl für das vorwärts kumulierte Abschaltpotenzial Wechselbatterie 'BAT4' im zeitlichen Zusammenhang mit ihrem Aufenthalt an den Ladestellen der Station 'STTA' gezeigt. Zu Beginn des Stationsaufenthalts im Block der Zeitscheiben Nr. 29-32 kann noch kein Abschaltpotenzial vorausgegangen sein. Ab den Zeitscheiben Nr. 41-44 geht in diesem Beispiel erstmals Abschaltpotenzial mit einer Leistung von 24 kW voraus. Und so weiter.

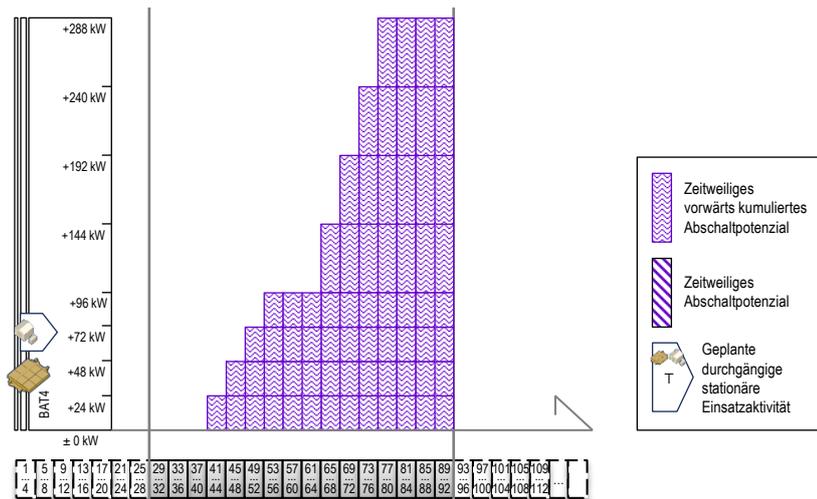


Abbildung 42 Ermittlung des kumulierten vorausgehenden Abschaltpotenzials für eine Wechselbatterie bei einem ihrer Stationsaufenthalte über die Zeit

Funktionsgleichung für das zeitweilige vorwärts kumulierte Abschaltpotenzial

$$\text{OverallPowerDecreaseBefore}(bat, ts) = \sum_{\substack{\langle bat, cst, tss \rangle \in \\ \text{TsStationaries}(bat, ts)}} \sum_{\substack{tsf \leq ts \\ tsf \in tss}} \text{OverallSinglePowerDown}(bat, ts)$$

für $bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots}$ (85)

VI. Lastverschiebungs-/Nachfragesteuerungspotenzial

Eine gewählte Ladeleistung führt zeitweilig zu einer Netzbelastung bzw. zu einer Stromnachfrage durch den Logistikbetrieb. Darüber hinaus sind in Bezug auf einen festgelegten Ladeverlauf gewisse Ausführungsspielräume ersichtlich.

Bei der Ausführung eines Plans ist es prinzipiell möglich, beim Laden einer Wechselbatterie die vorgesehene Netzlast bzw. Stromnachfrage zu einer Zeit im Vorlauf bewusst zu unterschreiten. Unvermeidlich muss im Nachgang beim Laden zu einer Zeit die dann vorgesehene Netzlast bzw. Stromnachfrage überschritten werden. Auf diese Weise kann Netzlast bzw. Stromnachfrage für eine oder mehrere Wechselbatterien in einem gemeinsamen zeitlichen Ausschnitt ihrer Aufenthaltsperioden hinausgeschoben werden. Das Potenzial für das Hinausschieben von Netzlast bzw. Stromnachfrage kann unter den Beschränkungen der Ladekapazität der Wechselbatterien und ihrer Ladezustandsentwicklung bereits im Zuge der Planung analysiert werden. Mit den entsprechenden Nachholungseffekten ist es ein integraler Bestandteil der Planung.

Wird zum Anfang eines Stationsaufenthalts in mehreren Zeitscheiben geladen und zum Ende dagegen nicht, so wird – über den gewählten Ladeverlauf hinweg betrachtet – das Potenzial für das Hinausschieben der Netzlast bzw. der Stromnachfrage in den vorderen Stellen anwachsend und in den späteren Stellen abfallend sein. Es ist an den einzelnen Stellen im Ladeverlauf darauf beschränkt, wie viel vorwärts kumuliertes Abschaltpotenzial und wie viel rückwärts kumuliertes Zuschaltpotenzial zeitweilig vorliegt. An der Stelle, wo sich die beiden Kurven schneiden, kann für den Stationsaufenthalt am meisten Netzlast bzw. Stromnachfrage nach hinten verschoben werden. Bei dem in **Abbildung 43** dargestellten Beispiel liegt diese Stelle mit einem Lastverschiebepotenzial von einer kumulierten Leistung von 144 kW zwischen dem Block der Zeitscheiben Nr. 65-68 und dem Block der Zeit-

scheiben Nr. 69-72. Davor ist zum Beispiel zwischen dem Block der Zeitscheiben Nr. 45-48 und dem Block der Zeitscheiben Nr. 49-52 das Lastverschiebepotenzial mit einer kumulierten Leistung von 48 kW niedriger. Dies ist darauf zurückzuführen, dass vom Beginn des Stationsaufenthalts bis einschließlich der Zeitscheibe Nr. 48 festgelegt ist, kumuliert nicht mehr als 48 kW an Ladeleistung zu platzieren. Es ist daher unbedeutend, dass von der Zeitscheibe Nr. 49 an bis zum Ende des Stationsaufenthalts eine kumulierte Leistung von mehr als 288 kW zugeschaltet werden kann.

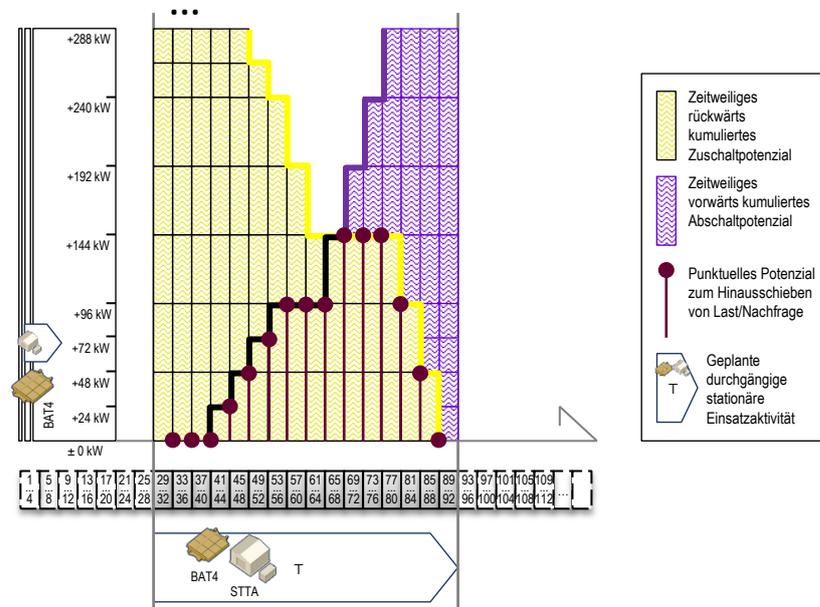


Abbildung 43 Ermittlung des Potentials für das Hinausschieben von Netzlast bzw. Stromnachfrage über die Zeit

Auch danach fällt es beispielsweise zwischen dem Block der Zeitscheiben Nr. 77-80 und dem Block der Zeitscheiben Nr. 81-84 mit einer kumulierten Leistung von 96 kW geringer aus. Dies liegt darin begründet, dass ab der Zeitscheibe Nr. 81 bis zum Ende des Stationsaufenthalts mit einer kumulierten Leistung von 96 kW nicht mehr so viel zugeschaltet werden kann wie zuvor vom Beginn des Stationsaufenthalts bis einschließlich zur Zeitscheibe Nr. 80 mit einer Leistung von 288 kW abgeschaltet werden kann.

Funktionsgleichung für das Potenzial für das Hinausschieben von Netzlast bzw. Stromnachfrage

$$\begin{aligned} \text{OverallForwardShiftPower}(bat, ts) &= \min(\text{OverallPowerDecreaseBefore}(bat, ts), \text{OverallPowerIncreaseAfter}(bat, ts)) \\ &\text{für } bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots} \end{aligned} \quad (86)$$

Umgekehrt ist es bei der Ausführung eines Plans möglich, beim Laden einer Wechselbatterie die vorgesehene Netzlast bzw. Stromnachfrage zu einer Zeit im Vorlauf bewusst zu überschreiten. Folglich muss im Nachgang die dann vorgesehene Netzlast bzw. Stromnachfrage unterschritten werden. So kann Netzlast bzw. Stromnachfrage für eine oder mehrere Wechselbatterien in einem gemeinsamen zeitlichen Ausschnitt ihrer Aufenthaltsperioden vorgezogen werden. Das Potenzial für das Vorziehen von Netzlast bzw. Stromnachfrage kann ebenfalls planerisch berücksichtigt werden.

Wird zum Anfang eines Stationsaufenthalts in mehreren Zeitscheiben nicht geladen und zum Ende dagegen schon, so wird – über den gewählten Ladeverlauf hinweg betrachtet – das Potenzial für das Vorziehen der Netzlast bzw. der Stromnachfrage in den vorderen Stellen anwachsend und in den

späteren Stellen abfallend sein. Es ist an den einzelnen Stellen im Ladeverlauf darauf beschränkt, wie viel vorwärts kumuliertes Zuschaltpotenzial und rückwärts kumuliertes Abschaltpotenzial zeitweilig vorliegen. An der Stelle, wo sich die beiden Kurven schneiden, kann für den Stationsaufenthalt am meisten Netzlast bzw. Stromnachfrage nach vorne gezogen werden. Bei dem in **Abbildung 44** dargestellten Beispiel liegt diese Stelle mit einem Lastverschiebepotenzial von einer kumulierten Leistung von 192 kW zwischen dem Block der Zeitscheiben Nr. 45-48 und dem Block der Zeitscheiben Nr. 49-52. Verständlicherweise ist zum Beispiel zwischen dem Block der Zeitscheiben Nr. 33-36 und dem Block der Zeitscheiben Nr. 37-40 das Lastverschiebepotenzial mit einer kumulierten Leistung von 96 kW niedriger.

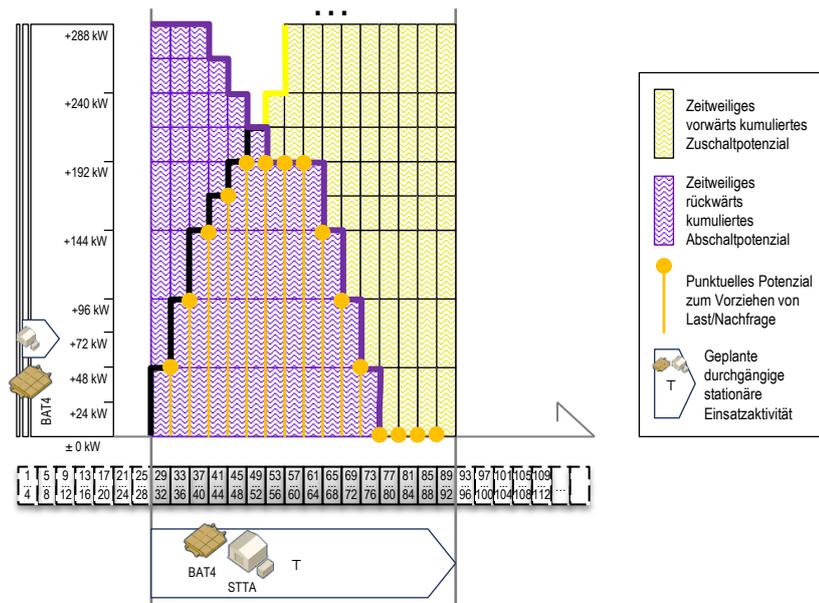


Abbildung 44 Ermittlung des Potenzials für das Vorziehen von Netzlast bzw. Stromnachfrage über die Zeit

Das soll zwar bei diesem Beispiel nicht allzu sehr verwundern, da der Stationsaufenthalt der Wechselbatterie 'BAT4' an der Station 'STTA' mit dem Block der Zeitscheiben Nr. 29-32 laut Plan erst vor kürzerer Zeit beginnt. Weil jedoch zum Beispiel in die frühen Zeitblöcke des Stationsaufenthalts wenig Ladeleistung verteilt ist, ist gleich zum Anfang eine recht hohe kumulierte Zuschaltleistung auszumachen. Danach liegt das Lastverschiebepotenzial beispielsweise zwischen dem Block der Zeitscheiben Nr. 69-72 und dem Block der Zeitscheiben Nr. 73-76 mit einer kumulierten Leistung von 48 kW geringer aus. Dies liegt darin begründet, dass ab der Zeitscheibe Nr. 72 bis zum Ende des Stationsaufenthalts mit einer kumulierten Leistung von 48 kW nicht mehr so viel abgeschaltet werden kann wie zuvor vom Beginn des Stationsaufenthalts bis einschließlich zur Zeitscheibe Nr. 73 mit einer Leistung von mehr als 288 kW zugeschaltet werden kann.

Funktionsgleichung für das Potenzial für das Vorziehen von Netzlast bzw. Stromnachfrage

$$\begin{aligned}
 &\mathbf{OverallBackwardShiftPower}(bat, ts) \\
 &= \min(\mathbf{OverallPowerIncreaseBefore}(bat, ts), \mathbf{OverallPowerDecreaseAfter}(bat, ts)) \\
 &\quad \text{für } bat \in \mathbf{Batteries}, ts \in \mathbf{TimeSlots} \qquad (87)
 \end{aligned}$$

VII. Effektivpotenzial für das Ab-/Zuschalten

Ein Abschalt- bzw. Zuschaltpotenzial kann nur dann effektiv genutzt werden, wenn punktuell ein Potenzial zum Hinausschieben bzw. Vorziehen von Netzlast / Stromnachfrage besteht. Ansonsten ist es unmöglich, eine Lastabsenkung / Nachfragereduktion in Bezug auf den gewünschten Ladezustand der Wechselbatterie ausgangs des betreffenden Stationsaufenthalts durch spätere Lasterhöhung / Nachfragesteigerung zu kompensieren.

In **Abbildung 45** wird zum Beispiel gezeigt, dass sämtliches zeitweiliges Abschaltpotenzial auch effektiv genutzt werden kann.

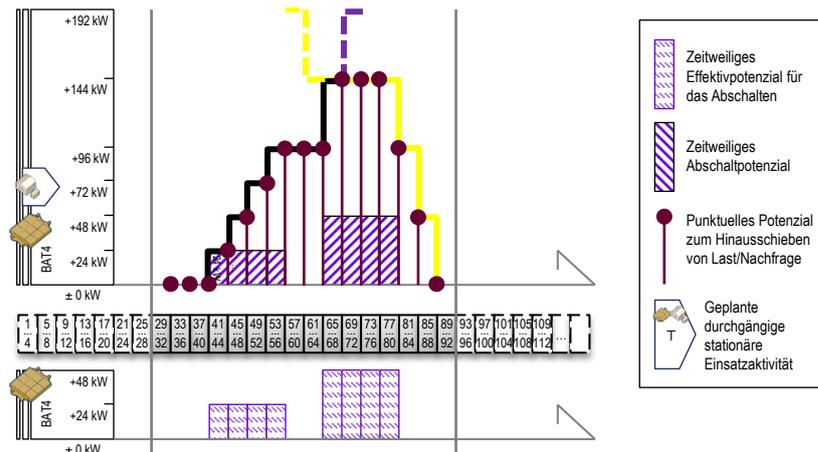


Abbildung 45 Ermittlung des Effektivpotenzials für das Abschalten über die Zeit

Funktionsgleichung für das Effektivpotenzial für das Abschalten

$$\begin{aligned} \text{OverallEffectivePowerDown}(bat, ts) &= \min(\text{OverallSinglePowerDown}(bat, ts), \text{OverallForwardShiftPower}(bat, ts)) \\ &\text{für } bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots} \end{aligned} \quad (88)$$

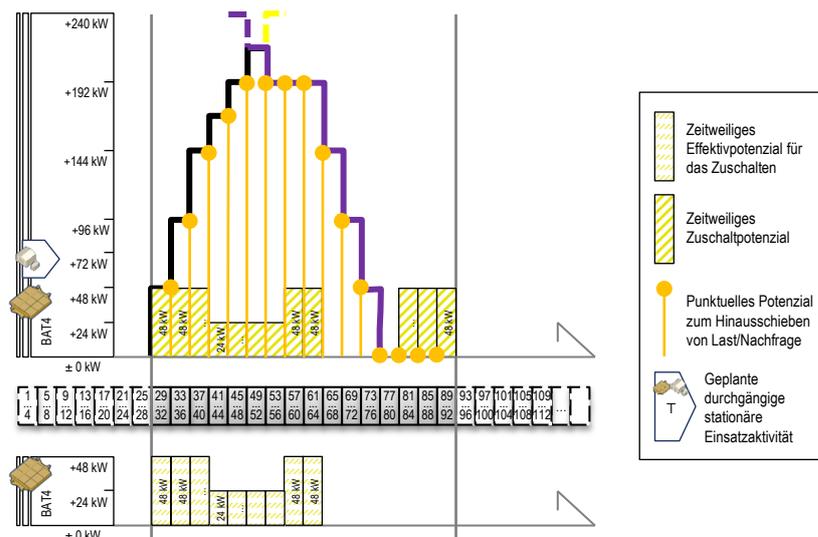


Abbildung 46 Ermittlung des Effektivpotenzials für das Zuschalten über die Zeit

Funktionsgleichung für das Effektivpotenzial für das Zuschalten

$$\begin{aligned} \text{OverallEffectivePowerUp}(bat, ts) \\ = \min(\text{OverallSinglePowerUp}(bat, ts), \text{OverallBackwardShiftPower}(bat, ts)) \\ \text{für } bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots} \end{aligned} \quad (89)$$

E. Flexibilisierungsentscheidungen

Das Zu-/Abschaltpotenzial einzelner Zeitscheiben kann unter gewissen Umständen mehr oder weniger nützlich sein. Je nachdem, wie die bei einem Stationsaufenthalt zuzuführende Energie auf die Ladezeitscheiben verteilt ist, lässt es sich einplanen, die Ladeleistung bei Bedarf erhöhen oder absenken zu können.

I. Angebot von Minutenreserve

In der Regel wird ein Containerterminalbetrieb nicht genügend Flexibilität besitzen, um ein Angebot von Minutenreserve direkt an den Markt zu stellen. Der Minutenreservemarkt ist unter anderem durch eine Mindestangebotshöhe reglementiert, weshalb es einem Containerterminalbetrieb allein schwerfallen dürfte, dort direkt teilzunehmen. Stattdessen bietet es sich an, dass der Containerterminalbetreiber seine Minutenreserveangebote einem Aggregator unterbreitet, welcher eine Mehrzahl schaltbarer Anlagen verwaltet und somit einen Marktzugang schafft. In dieser Planungsproblemstellung wird vereinfachend davon ausgegangen, dass der Containerterminalbetrieb einem Aggregator vollständige Minutenreserveangebote macht. Es zählt zwar durchaus zu den Aufgaben eines Aggregators, aus vereinzelt Angebotsteilen verschiedener Anlagen ein Komplettangebot zu bilden. Jedoch sind die Angebotsteile aus der Perspektive des Containerterminalbetreibers nicht so einfach mit dem für den Minutenreservemarkt prognostizierten Leistungspreis zu bewerten. Wie viel für den Einzelnen vom Aggregator für einen Angebotsteil zu erlösen wäre, hängt von den sich bietenden Angebotsteilen der anderen vom Aggregator verwalteten Anlagen ab. Bei der Minutenreserve gibt es in einer Ausschreibungsrunde und zu einem bestimmten Produkt immer nur eine einzige Produktperiode. Bei einem vollständigen Angebot ist es entschieden, dass in jeder Zeitscheibe der Produktperiode Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial als Minutenreserveleistung vorgehalten wird.

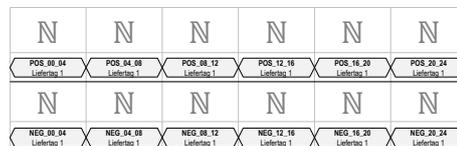


Abbildung 47 Übersicht der Angebotsmöglichkeiten für Minutenreserve über die Zeit

Ein Minutenreserveangebot setzt sich aus Schnipseln mit dem Gebrauch von Umschaltpotenzial zu Angebots-/Erbringungszwecken und dem Gebrauch von Umschaltpotenzial zu Kompensationszwecken zusammen. Je nachdem ob es sich um das Angebot positiver oder negativer Regelleistung handelt, kann Abschaltpotenzial sowie gleichermaßen Zuschaltpotenzial zu Angebotszwecken oder zu Kompensationszwecken gebraucht sein. Bei einem Angebot positiver Regelleistung wird Abschaltpotenzial zu Angebotszwecken und Zuschaltpotenzial zu Kompensationszwecken gebraucht. Bei einem Angebot negativer Regelleistung ist es anders herum. Verständlicherweise bildet die Kompensation

bezüglich des Batterieladezustands immer das Gegenstück zum Angebot von Regelleistung und der Erbringung von Regelenergie bei Bedarf.

II. Vorhalten von Minutenreserveleistung

Der Containerterminalbetreiber kann im Überblick der geplanten Ladezustandsentwicklung und den festgelegten Lade-/Entladeprozessen seiner Wechselbatterien Angebote für den Minutenreservemarkt erstellen. Zur Zusammenstellung eines Angebots kann in den Zeitscheiben innerhalb einer betreffenden Produktperiode Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial als Minutenreserveleistung bereitgehalten werden.

DEFINITION: zeitweilige Vorhaltungsmöglichkeit für Minutenreserveleistung

Innerhalb des Planungszeitraums kann in Bezug auf Minutenreserve die vorgehaltene Leistung für eine Wechselbatterie variieren. Unabhängig von der Planung für vorausgehende Zeitscheiben könnte in einer bestimmten Zeitscheibe positive oder negative Minutenreserveleistung vorgehalten werden. Das Tripel $((bdd, prd), bat, ts)$ aus einem Bezeichner einer Produktperiode $(bdd, prd) \in MrlBiddings \times MrlProducts$, einem Bezeichner einer Wechselbatterie $bat \in Batteries$ und einer Nummer einer Zeitscheibe $ts \in TimeSlots$ heißt zeitweilige Vorhaltungsmöglichkeit dieser Wechselbatterie bat bezüglich des durch (bdd, prd) bestimmten Zeitraums in der Zeitscheibe ts .

Bezüglich einer Vorhaltung von Minutenreserve ist für sämtliche Zeitscheiben im Planungszeitraum einzeln zu entscheiden. In **Abbildung 48** werden die zeitweiligen Vorhaltungsmöglichkeiten für die unterschiedlichen Produktperioden (1,'POS_00_04'), ..., (1,'NEG_00_04'), ..., (2,'...') und die Wechselbatterien 'BAT1', 'BAT2', usw. in den einzelnen Zeitscheiben musterhaft gezeigt. Dazu finden sich links im Bild die Entscheidungstabelle und rechts im Bild die entsprechenden Zeitstrahle. Es ist in der Tabelle kenntlich gemacht, welche Auszüge durch die Zeitstrahle wiedergespiegelt werden.

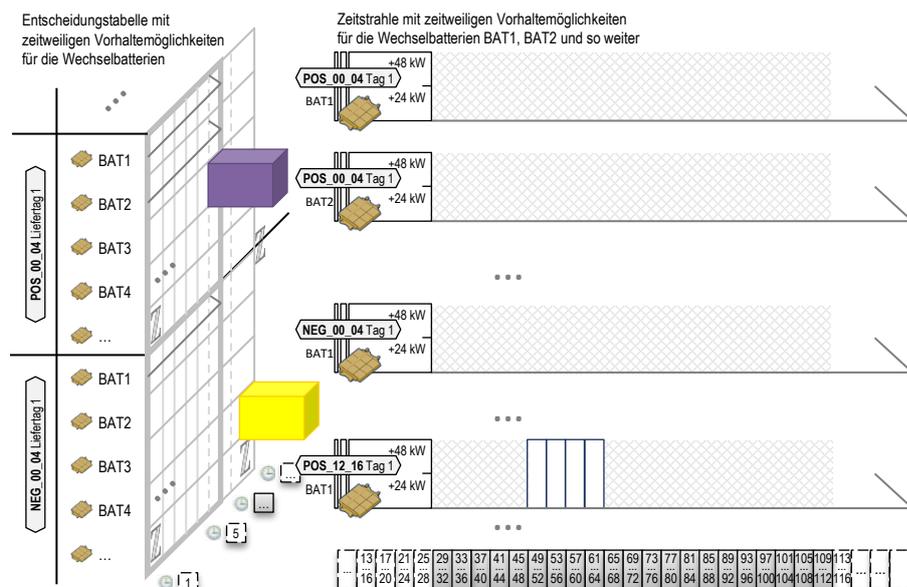


Abbildung 48 Übersicht der Vorhaltungsmöglichkeiten für bestimmte Produktperioden mit den Wechselbatterien über die Zeit

DEFINITION: zeitweiliges Vorhalten von Minutenreserve

Die Entscheidungen zum zeitweiligen Vorhalten von Minutenreserveleistung können mit Hilfe einer Funktion **MrIOfferPower** repräsentiert werden. Diese bildet zeitweilige Vorhaltungsmöglichkeiten für einen bestimmten Zeitraum $(bdd, prd) \in MrlBiddings \times MrlProducts$ mit einer Wechselbatterie $bat \in Batteries$ und einer der Zeitscheibe $ts \in TimeSlots$ auf einen ganzzahligen Wert $o = MrIOfferPow..er((bdd, prd), bat, ts)$ ab, der für die vorgehaltene elektrische Leistung in Kilowatt steht. Falls **PosNeg** $(bdd, prd) = 'Positive'$ für die betreffende Produktperiode die positive Regelrichtung gilt, so ist dadurch entschieden, die Last bezüglich des Ladens der Wechselbatterie bat in der Zeitscheibe ts auf Abruf zeitweilig abzusenken. Anderenfalls **PosNeg** $(bdd, prd) = 'Negative'$ die negative Regelrichtung gilt, so ist entschieden, die Last bezüglich des Ladens der Wechselbatterie bat in der Zeitscheibe ts auf Abruf zu erhöhen.

zu entscheidende Funktion zeitweiliger Vorhaltungsmöglichkeiten auf einen ganzzahligen Wert, der für die elektrische Leistung in Kilowatt steht

$$MrIOfferPower: (MrlBiddings \times MrlProducts) \times Batteries \times TimeSlots \rightarrow \mathbb{Z} \quad (90)$$

Für jede Wechselbatterie wie zum Beispiel 'BAT4' lässt sich an einem Zeitstrahl darstellen, dass festgelegt ist, zeitweilig Abschalt- bzw. Zuschaltpotenzial für Minutenreserve vorzuhalten. In **Abbildung 49** wird für die Wechselbatterie 'BAT4' exemplarisch in den Blöcken ab den Zeitscheiben Nr. 65-68 bis einschließlich der Zeitscheiben Nr. 77-80 eine Abschaltleistung in Höhe von 24 kW für Minutenreserve vorgehalten. In diesem Zeitraum kann in der Ausschreibungsrunde 'Tag 1' für den Produktblock 'POS_16_20' geboten und im Falle eines Zuschlags der entsprechende Leistungspreis erlöst werden.

Dem obigen Beispiel folgend ist es mit der Wechselbatterie 'BAT4' von selbigem Aufenthalt in der Station 'STTA' in den Blöcken ab den Zeitscheiben Nr. 33-36 bis einschließlich der Zeitscheiben Nr. 37-40 entschieden, zusätzlich eine Zuschaltleistung in Höhe von 24 kW vorzuhalten. Durch die Wechselbatterie 'BAT4' allein kann in diesem Beispiel der Produktblock 'POS_08_12' in der ersten Ausschreibungsrunde 'Tag 1' nicht komplett abgedeckt werden.

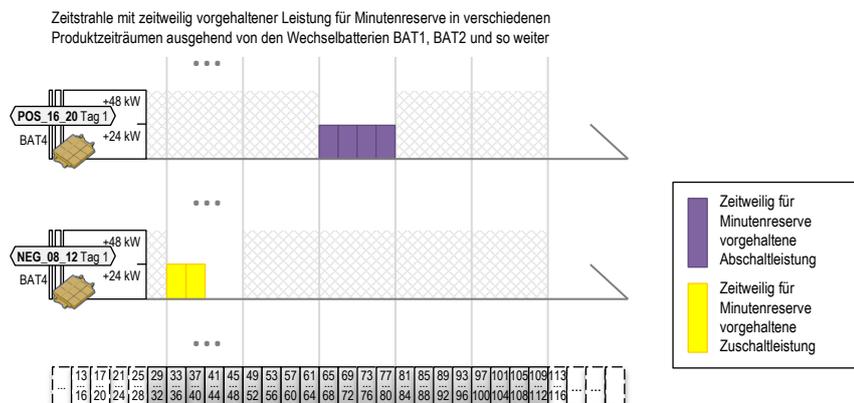


Abbildung 49 Festlegung des zeitweiligen Vorhaltens von Minutenreserve über die Zeit

III. Bereithalten von Kompensationsleistung

Erhält der Containerterminalbetreiber im Anschluss an die Planung einen Zuschlag auf ein Minutenreserveangebot, so wird er in der betreffenden Produktperiode plangemäß die entsprechende Minutenreserveleistung vorhalten. Zum Zeitpunkt der Planung ist es allerdings ungewiss, ob sich in einer solchen Produktperiode ein Bedarf an Regelenergie ergeben wird und ein automatisierter Abruf von Regelenergie beim Containerterminalbetrieb erfolgen wird. Falls er tatsächlich Regelenergie zu erbringen haben wird, werden in der Regelrichtung die plangemäßen Schalthandlungen vorgenommen werden; es wird also das zum Vorhalten von Minutenreserveleistung genutzte Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial in der Tat vorübergehend aktiviert und später deaktiviert werden. Im Bedarfsfall würde somit in einer betreffenden Zeitscheibe innerhalb der Produktperiode eine niedrigere bzw. höhere Leistungsaufnahme als die grundlegend festgelegte Ladeleistung erwirkt werden. Daher werden sich in diesem Fall für die Wechselbatterie Abweichungen gegenüber dem auf Grundlage der festgelegten Ladeleistung angenommenen Ladezustandsverlauf ergeben. Es ist aber zu verhindern, dass zum Ende des Stationsaufenthalts der gewünschte Ladezustand nicht erreicht wird. Zum Zeitpunkt der Planung können Vorkehrungen dafür getroffen werden, die im Bedarfsfall zu erbringende Minutenreserveenergie im Anschluss an die betreffende Produktperiode doch in die Wechselbatterie zu laden bzw. sie nicht zu überladen. Das Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial in den Zeitscheiben hinter einer Produktperiode kann als Kompensationsleistung bereitgehalten werden.

DEFINITION: zeitweilige Bereithaltbarkeit für Kompensationsleistung

Innerhalb des Planungszeitraums kann die bereitgehaltene Kompensationsleistung für eine Wechselbatterie variieren. Unabhängig von der Planung für vorangehende Zeitscheiben könnten in einer bestimmten Zeitscheibe Vorkehrungen getroffen werden, die in einer vorhergehenden Produktperiode im Bedarfsfall zu tätige Abschaltung bzw. Zuschaltung zu kompensieren. Das Tripel $((bdd, prd), bat, ts)$ aus einem Bezeichner eines Produktzeitraums $(bdd, prd) \in MrlBiddings \times MrlProducts$, einem Bezeichner einer Wechselbatterie $bat \in Batteries$ und einer Nummer einer Zeitscheibe $ts \in TimeSlots$ heißt zeitweilige Bereithaltbarkeit dieser Wechselbatterie bat bezüglich des durch (bdd, prd) bestimmten Zeitraums in der Zeitscheibe ts .

Bezüglich des Bereithaltens von Kompensationsleistung ist für sämtliche Zeitscheiben im Planungszeitraum einzeln zu entscheiden. In **Abbildung 50** werden die zeitweiligen Bereithaltbarkeiten für die unterschiedlichen Produktzeiträume (1,'POS_00_04'), ..., (1,'NEG_00_04'), ..., (2,'...') und die Wechselbatterien 'BAT1', 'BAT2', usw. in den einzelnen Zeitscheiben musterhaft gezeigt. Dazu finden sich links im Bild die Entscheidungstabelle und rechts im Bild die entsprechenden Zeitstrahle. Es ist in der Tabelle kenntlich gemacht, welche Auszüge durch die Zeitstrahle wiedergespiegelt werden.

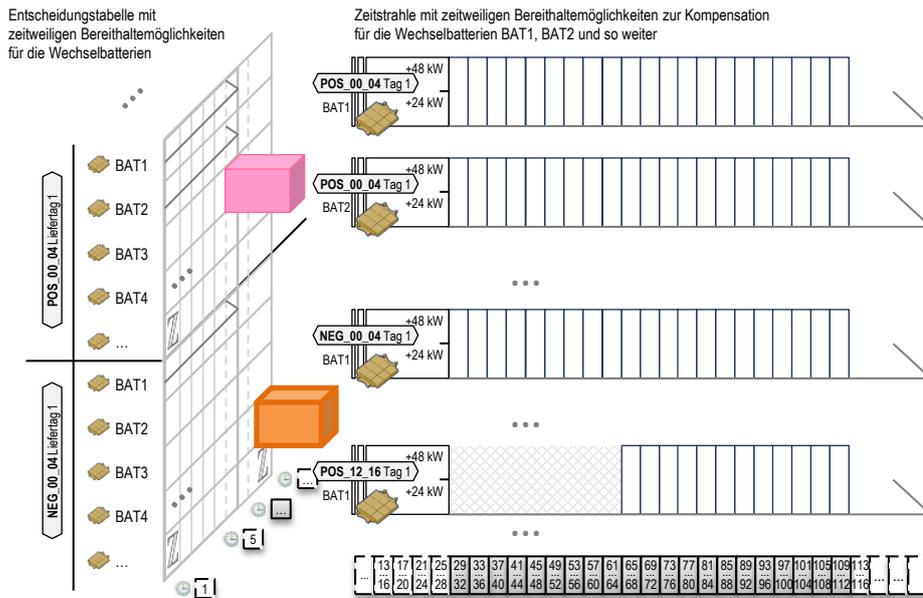


Abbildung 50 Übersicht der Bereithaltemöglichkeiten für bestimmte Produktzeiträume mit den Wechselbatterien über die Zeit

DEFINITION: zeitweilige Vorkehrung zur Kompensation

Die Entscheidungen darüber, ein Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial als eine Kompensationsleistung bereitzuhalten, können mit Hilfe einer Funktion **MrlCompensationPower** repräsentiert werden. Diese bildet zeitweilige Vorkehrungsmöglichkeiten für eine bestimmte Produktperiode $(bdd, prd) \in MrlBiddings \times MrlProducts$ mit einer Wechselbatterie $bat \in Batteries$ und einer Zeitscheibe $ts \in TimeSlots$ auf einen natürlichzahligen Wert $c = MrlCmps..Power((bdd, prd), bat, ts)$ ab, der für die bereitgehaltene elektrische Leistung in Kilowatt steht. Falls $PosNeg(bdd, prd) = 'Positive'$ für die betreffende Produktperiode die positive Regelrichtung gilt, so ist dadurch gegenteilig zu dem davor zu gebrauchenden Abschaltpotenzial entschieden, ein Zuschaltpotenzial der Wechselbatterie bat in der Zeitscheibe ts als Kompensationsleistung zu nutzen und gegebenenfalls zeitweilig doch noch Energie in die Wechselbatterie nachführen zu können. Anderenfalls $PosNeg(bdd, prd) = 'Negative'$ die negative Regelrichtung gilt, so ist umgekehrt entschieden, ein Abschaltpotenzial als Kompensationsleistung zu nutzen und gegebenenfalls nicht zu viel Energie in die Wechselbatterie nachführen zu können.

zu entscheidende Funktion zeitweiliger Vorkehrungsmöglichkeiten auf einen natürlichzahligen Wert, der für die elektrische Leistung in Kilowatt steht

$$MrlCompensationPower: (MrlBiddings \times MrlProducts) \times Batteries \times TimeSlots \rightarrow \mathbb{N} \quad (91)$$

Für jede Wechselbatterie wie zum Beispiel 'BAT4' lässt sich an einem Zeitstrahl darstellen, dass festgelegt ist, zeitweilig für positive oder negative Minutenreserve eine Kompensationsleistung bereitzuhalten. In **Abbildung 49** wird für die Wechselbatterie 'BAT4' exemplarisch in den Blöcken ab den Zeitscheiben Nr. 49-52 bis einschließlich der Zeitscheiben Nr. 53-56 eine Abschaltleistung in Höhe von 24 kW zur Kompensation einer Erbringung negativer Regelenenergie für den Produktblock 'POS_08_12' bereitgehalten.

Zeitstrahle mit zeitweilig bereitgehaltener Kompensationsleistung in verschiedenen Produktzeiträumen ausgehend von den Wechselbatterien BAT1, BAT2 und so weiter

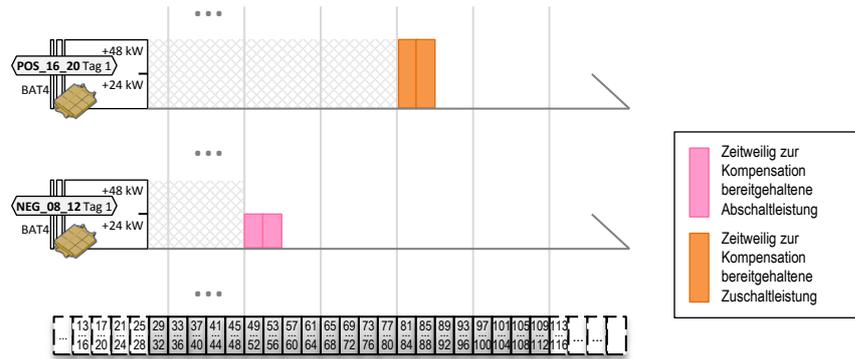


Abbildung 51 Festlegung des zeitweiligen Vorhaltens von Minutenreserve über die Zeit

IV. Verbleibendes Zu-/Abschaltpotenzial

Durch das Vorhalten von Minutenreserveleistung und das Bereithalten von Kompensationsleistung werden die zeitweiligen Zuschalt- wie auch die Abschaltpotenziale ausgeschöpft. Es kann in jeder Zeitscheibe insgesamt nicht mehr Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial als Minutenreserve- und/oder Kompensationsleistung ausgewiesen werden als sich ausgehend von der grundlegend festgelegten Ladeleistung ausprägt. Abgesehen von dem als Minutenreserve- und Kompensationsleistung ausgewiesenen Zu-/Abschaltpotenzial kann es allerdings eine Restflexibilität geben; es ist dann noch Zu-/Abschaltpotenzial vakant.

Funktionsgleichung für das genutzte Zuschaltpotenzial

$$\begin{aligned} \text{UsedSinglePowerUp}(bat, ts) = & \\ & \sum_{\substack{\langle bdd, prd \rangle \in \\ \text{AllNegPPs}}} \text{MrIOfferPower}(\langle bdd, prd \rangle, bat, ts) + \\ & \sum_{\substack{\langle bdd, prd \rangle \in \\ \text{AllPosPPs}}} \text{MrICompensationPower}(\langle bdd, prd \rangle, bat, ts) \\ & \text{für } bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots} \end{aligned} \quad (92)$$

Funktionsgleichung für das vakante Zuschaltpotenzial

$$\begin{aligned} \text{VacantSinglePowerUp}(bat, ts) = \text{OverallSinglePowerUp}(bat, ts) - \text{UsedSinglePowerUp}(bat, ts) \\ \text{für } bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots} \end{aligned} \quad (93)$$

In **Abbildung 52** wird exemplarisch ein Zeitstrahl für das zeitweilige ausgeschöpfte Zuschaltpotenzial der Wechselbatterie 'BAT4' gezeigt. In den Blöcken der Zeitscheiben Nr. 33-36 und Nr. 37-40 ist festgelegt, ausgehend von dem für die Wechselbatterie 'BAT4' gewählten Ladeverlauf bezüglich der Produktperiode (1, 'NEG_08_12') mit einer Leistung von 24 kW Zuschaltpotenzial als Minutenreserveleistung vorzuhalten. Insgesamt ist in diesem Zeitraum ein zeitweiliges Zuschaltpotenzial mit einer Leistung von 48 kW ausgeprägt, wobei nach Abzug der für Minutenreserve vorgehaltenen Leistung lediglich eine Leistung in Höhe von 24 kW verbleibt. Daneben ist in den Blöcken der Zeitscheiben Nr. 81-84 und Nr. 85-88 festgelegt, ausgehend von dem für die Wechselbatterie 'BAT4' gewählten Ladeverlauf ein Zuschaltpotenzial in Höhe von 48 kW zur möglichen Kompensation bereitzuhalten, die infolge einer vorhergehenden Abschaltung zur Regelenergieerbringung in Produktperiode

(1, 'POS_16_20') erforderlich geworden sein würde. Für denselben Zeitraum lässt sich insgesamt ein Zuschaltpotenzial von 48 kW ermitteln, so dass abzüglich der zur Kompensation vorgesehenen 48 kW für die Wechselbatterie 'BAT4' gar kein Zuschaltpotenzial verbleibt.

Die für Minutenreserve vorgesehene Zuschaltleistung darf den Potenzialwert nicht übersteigen

$$\forall bat \in Batteries \forall ts \in TimeSlots$$

$$\text{UsedSinglePowerUp}(bat, ts) \leq \text{OverallSinglePowerUp}(bat, ts) \quad (94)$$

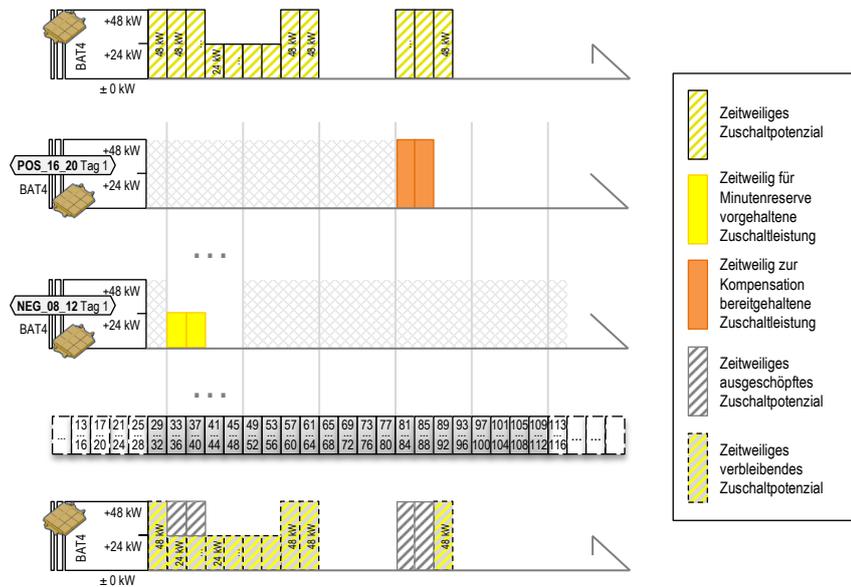


Abbildung 52 Ermittlung des zeitweilig ausgeschöpften (genutzten) Zuschaltpotenzials über die Zeit

Funktionsgleichung für das genutzte Abschaltpotenzial

$$\text{UsedSinglePowerDown}(bat, ts) =$$

$$\sum_{\langle bdd, prd \rangle \in \text{AllPosPPs}} \text{MrlOfferPower}(\langle bdd, prd \rangle, bat, ts) +$$

$$\sum_{\langle bdd, prd \rangle \in \text{AllNegPPs}} \text{MrlCompensationPower}(\langle bdd, prd \rangle, bat, ts)$$

für $bat \in Batteries, ts \in TimeSlots$ (95)

Funktionsgleichung für das vakante Abschaltpotenzial

$$\text{VacantSinglePowerDown}(bat, ts) = \text{OverallSinglePowerDown}(bat, ts) - \text{UsedSinglePowerDown}(bat, ts)$$

für $bat \in Batteries, ts \in TimeSlots$ (96)

In **Abbildung 53** wird exemplarisch ein Zeitstrahl für das zeitweilige ausgeschöpfte Abschaltpotenzial der Wechselbatterie 'BAT4' gezeigt. In den Blöcken der Zeitscheiben Nr. 49-52 und Nr. 53-56 ist festgelegt, ausgehend von dem für die Wechselbatterie 'BAT4' gewählten Ladeverlauf ein Abschaltpotenzial in Höhe von 24 kW zur möglichen Kompensation bereitzuhalten, die infolge einer vorhergehenden Zuschaltung zur Regelenergieerbringung in Produktperiode (1, 'POS_08_12') erforderlich geworden sein würde. In dem Zeitraum von Zeitscheibe Nr. 41 bis einschließlich Zeitscheibe Nr. 56 wird für die Wechselbatterie 'BAT4' insgesamt durchgehend ein Abschaltpotenzial von 24 kW ausgeprägt. Nach Abzug des für die Kompensation bereitgehaltenen Abschaltpotenzials verbleibt in dem

Zeitraum von Zeitscheibe Nr. 49 bis einschließlich Zeitscheibe Nr. 56 gar kein Abschaltpotenzial mehr. Daneben ist in den Zeitscheiben Nr. 65 bis einschließlich Zeitscheibe Nr. 80 festgelegt, ausgehend von dem für die Wechselbatterie 'BAT4' gewählten Ladeverlauf bezüglich der Produktperiode (1, 'NEG_16_20') mit einer Leistung von durchgehend 24 kW Abschaltpotenzial als Minutenreserveleistung vorzuhalten. Für denselben Zeitraum lässt sich insgesamt ein Abschaltpotenzial von 48 kW ermitteln, so dass abzüglich der zur Kompensation vorgesehenen 48 kW für die Wechselbatterie 'BAT4' noch 24 kW als Abschaltpotenzial verbleibt.

Die für Minutenreserve vorgesehene Abschaltleistung darf den Potenzialwert nicht übersteigen

$$\forall bat \in Batteries \forall ts \in TimeSlots$$

$$UsedSinglePowerDown(bat, ts) \leq OverallSinglePowerDown(bat, ts)$$

(97)

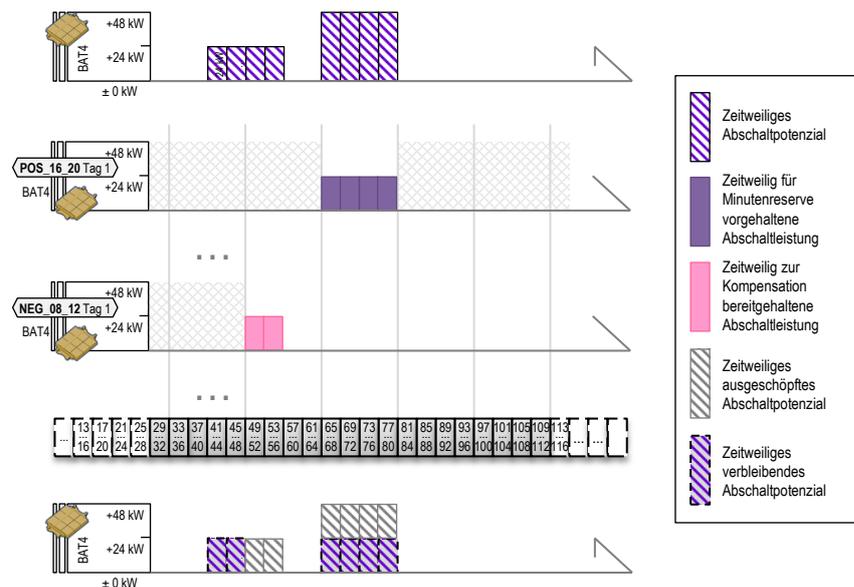


Abbildung 53 Ermittlung des zeitweilig ausgeschöpften (genutzten) Abschaltpotenzials über die Zeit

Auch der Zusammenhang von verbleibendem Zuschalt-/Abschaltpotenzial lässt sich Blick auf ganze Stationsaufenthalte von Wechselbatterien analysieren. Für einzelne Stellen im Ladeverlauf kann ermittelt werden, wie viel Potenzial für eine zeitliche Lastverschiebung bzw. Nachfragesteuerung verbleibt.

In **Abbildung 54** wird exemplarisch ein Zeitstrahl für das rückwärts kumulierte verbleibende Zuschaltpotenzial der Wechselbatterie 'BAT4' im zeitlichen Zusammenhang mit ihrem Aufenthalt an den Ladestellen der Station 'STTA' gezeigt. In diesem Beispiel ist es so, dass nur ganz zu Beginn des Stationsaufenthalts in den Zeitscheiben Nr. 29-32 verbleibendes Zuschaltpotenzial mit einer Leistung von 288 kW nachfolgt. In den Zeitscheiben Nr. 33-36 und Nr. 37-40 liegt ein Zuschaltpotenzial von 48 kW zugrunde. Davon sind jeweils 24 kW dazu gebraucht, um für Minutenreserve eine Zuschaltleistung vorzuhalten. Es verbleibt somit in dieser Zeit jeweils bloß ein Potenzial 24 kW zusätzlich rückwärts zu kumulieren. Insoweit in den Zeitscheiben Nr. 65-68 bis Zeitscheiben Nr. 77-80 gar kein Zuschaltpotenzial zugrunde liegt, ist das kumulierte nachfolgende verbleibende Zuschaltpotenzial in dieser Zeit gleich hoch. Zum Ende hin liegt zwar in den Zeitscheiben Nr. 81-84 und Nr. 85-88 insgesamt nochmals Zuschaltpotenzial zugrunde. Jedoch sind jeweils 48 kW dem Beispiel folgend dazu ge-

braucht, Zuschaltleistung zu Kompensationszwecken bereitzuhalten. Von den Zeitscheiben Nr. 61 bis einschließlich Nr. 88 bleibt daher das kumulierte nachfolgende verbleibende Zuschaltpotenzial gleich hoch.

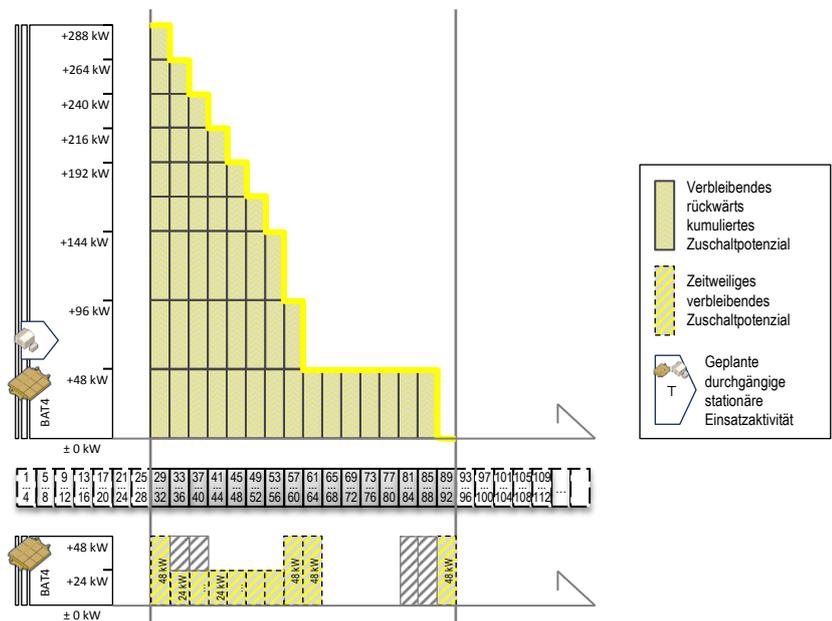


Abbildung 54 Ermittlung des kumulierten nachfolgenden verbleibenden Zuschaltpotenzials für die Wechselbatterien bei einem ihrer Stationsaufenthalte über die Zeit

Funktionsgleichung für das zeitweilige rückwärts kumulierte verbleibende Zuschaltpotenzial

$$\text{VacantPowerIncreaseAfter}(bat, ts) = \sum_{\substack{(bat, cst, tss) \in \\ \text{TsStationaries}(bat, ts)}} \sum_{\substack{tsb > ts \\ tsb \in tss}} \text{VacantSinglePowerUp}(bat, ts)$$

für $bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots}$ (98)

Funktionsgleichung für das zeitweilige vorwärts kumulierte verbleibende Zuschaltpotenzial

$$\text{VacantPowerIncreaseBefore}(bat, ts) = \sum_{\substack{(bat, cst, tss) \in \\ \text{TsStationaries}(bat, ts)}} \sum_{\substack{tsf \leq ts \\ tsf \in tss}} \text{VacantSinglePowerUp}(bat, ts)$$

für $bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots}$ (99)

In **Abbildung 55** wird exemplarisch ein Zeitstrahl für das rückwärts kumulierte verbleibende Abschaltpotenzial Wechselbatterie 'BAT4' im zeitlichen Zusammenhang mit ihrem Aufenthalt an den Ladestellen der Station 'STTA' gezeigt. In diesem Beispiel ist in den Blöcken der Zeitscheiben Nr. 49 bis Nr. 56 sowie der Zeitscheiben Nr. 65 bis Nr. 80 in bedeutendem Maße Abschaltpotenzial in Gebrauch. Darum ist hier weit weniger verbleibendes Abschaltpotenzial rückwärts zu kumulieren als insgesamt Abschaltpotenzial zugrunde liegt. Zu Beginn des Stationsaufenthalts im Block der Zeitscheiben Nr. 29-32 folgt zum Beispiel noch verbleibendes Abschaltpotenzial einer Leistung von 144 kW nach.

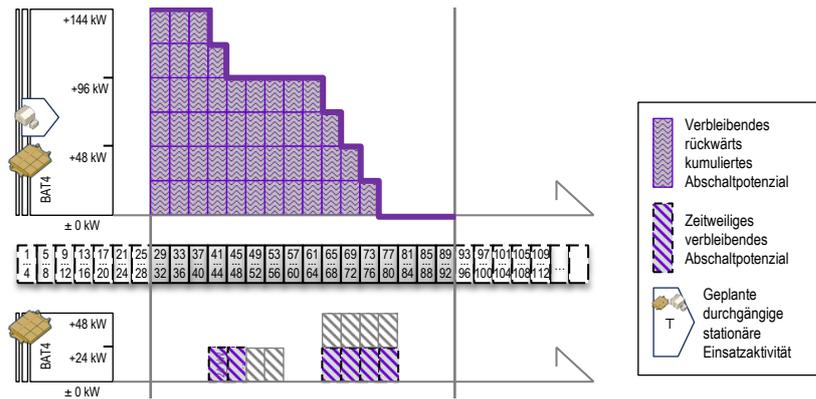


Abbildung 55 Ermittlung des kumulierten nachfolgenden verbleibenden Abschaltpotenzials für eine Wechselbat. bei Stationsaufenthalt

Funktionsgleichung für das zeitweilige rückwärts kumulierte verbleibende Abschaltpotenzial

$$\text{VacantPowerDecreaseAfter}(bat, ts) = \sum_{\substack{(bat, cst, tss) \in \\ \text{TsStationaries}(bat, ts)}} \sum_{\substack{tsb > ts \\ tsb \in tss}} \text{VacantSinglePowerDown}(bat, ts)$$

für $bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots}$ (100)

Funktionsgleichung für das zeitweilige vorwärts kumulierte verbleibende Abschaltpotenzial

$$\text{VacantPowerDecreaseBefore}(bat, ts) = \sum_{\substack{(bat, cst, tss) \in \\ \text{TsStationaries}(bat, ts)}} \sum_{\substack{tsf \leq ts \\ tsf \in tss}} \text{VacantSinglePowerDown}(bat, ts)$$

für $bat \in \text{Batteries}, ts \in \text{TimeSlots}$ (101)

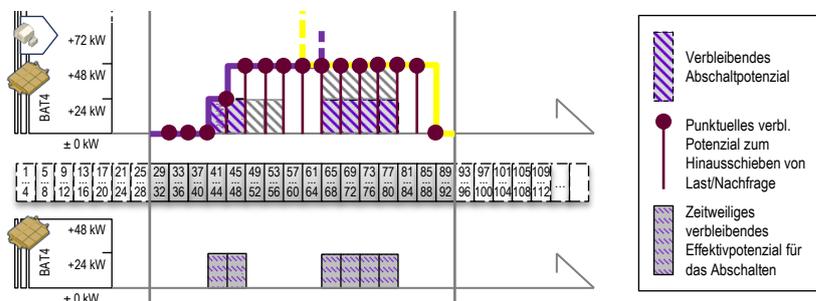


Abbildung 56 Ermittlung des verbleibenden Potenzials für das Hinausschieben von Netzlast bzw. Stromnachfrage über die Zeit

V. Reservieren zeitlichen Lastverschiebepotenzials

Das Angebot von Minutenreserve beruht auf Lastverschiebungs-/Nachfragesteuerungspotenzialen, bei denen Vorziehungs- und Nachholungseffekte auftreten (vgl. oben). Eine negative Minutenreserveleistung kann pro Wechselbatterie zum Beispiel bloß in der Weise vorgehalten sein, dass nicht die maximal zulässige Ladeleistung festgelegt ist. Sollte auf die Zuschaltleistung in ausgewiesener Höhe durch einen Abruf von Minutenreserve zurückgegriffen werden, so wird eine gewisse Energiemenge früher in die Wechselbatterie geladen als es im Ladeverlauf grundlegend vorgesehen ist. Das Laden würde somit im Bedarfsfall vorgezogen werden und eine gleiche Menge Energie später im Ladeverlauf herausgestrichen werden. Um nach erfolgtem Abruf den Ladeverlauf dementsprechend umzustellen, muss sich auf ein Abschaltpotenzial als Kompensationsleistung gestützt werden. Bei jedem Stationsaufenthalt einer Wechselbatterie müssen sich die für einen bestimmten Produktzeitraum als Minutenreserve- und Kompensationsleistung genutzten Zuschalt-/Abschaltpotenziale einander in

Bezug auf die erbrachte/kompensierte Energiemenge entsprechen. Dies bedeutet von der Energiemenge her betrachtet, dass nicht ein als Kompensationsleistung bereitgehaltenes Zu-/Abschaltpotenzial mehreren als Minutenreserveleistung vorgehaltenen Zu-/Abschaltpotenzialen gegenübergestellt werden darf.

Funktionsgleichung für die Energiemenge, die innerhalb einer bestimmten Produktperiode ausgehend vom Stationsaufenthalt einer Wechselbatterie im Falle eines Abrufs zur Erbringung von Minutenreserve unter Abschaltung der entsprechenden Ladestelle nicht geladen würde

$$\begin{aligned} & \mathbf{FBPosOfferEnergy}((bdd, prd), (bat, cst, tss)) \\ &= \sum_{ts \in \text{MrIOfferPPTs}(bdd, prd) \cap tss} \mathbf{MrIOfferPower}((bdd, prd), bat, ts) * \text{lenTs} \\ & \text{für } (bdd, prd) \in \text{AllPosPPs}, (bat, cst, tss) \in \text{AllSBUs}_{bat} \end{aligned} \quad (102)$$

Funktionsgleichung für die Energiemenge, die nach einer bestimmten Produktperiode ausgehend vom Stationsaufenthalt einer Wechselbatterie im Falle eines Abrufs zur Kompensation unter Zuschaltung der entsprechenden Ladestelle geladen würde

$$\begin{aligned} & \mathbf{FBPosCmps..Energy}((bdd, prd), (bat, cst, tss)) \\ &= \sum_{ts \in \text{MrICmpstPPTs}(bdd, prd) \cap tss} \mathbf{MrICmps..Power}((bdd, prd), bat, ts) * \text{lenTs} \\ & \text{für } (bdd, prd) \in \text{AllPosPPs}, (bat, cst, tss) \in \text{AllSBUs}_{bat} \end{aligned} \quad (103)$$

Für ein Angebot von Minutenreserve in positiver Regelrichtung muss bei allen beteiligten Wechselbatterien in ihrem betreffenden Stationsaufenthaltszeitraum die zur Erbringung von Regelenergie reservierte Energiemenge (Abschaltenergie) ebenso groß sein wie die für den Fall eines Abrufs zur Kompensation reservierte Energiemenge (Zuschaltenergie)

$$\forall (bdd, prd) \in \text{AllPosPPs} \quad \forall (bat, cst, tss) \in \text{AllSBUs}(bat) \\ \mathbf{FBPosOfferEnergy}((bdd, prd), (bat, cst, tss)) = \mathbf{FBPosCmps..Energy}((bdd, prd), (bat, cst, tss)) \quad (104)$$

Funktionsgleichung für die Energiemenge, die innerhalb einer bestimmten Produktperiode ausgehend vom Stationsaufenthalt einer Wechselbatterie im Falle eines Abrufs zur Erbringung von Minutenreserve unter Zuschaltung der entsprechenden Ladestelle geladen würde

$$\begin{aligned} & \mathbf{FBNegOfferEnergy}((bdd, prd), (bat, cst, tss)) \\ &= \sum_{ts \in \text{MrIOfferPPTs}(bdd, prd) \cap tss} \mathbf{MrIOfferPower}((bdd, prd), bat, ts) * \text{lenTs} \\ & \text{für } (bdd, prd) \in \text{AllNegPPs}, (bat, cst, tss) \in \text{AllSBUs}_{bat} \end{aligned} \quad (105)$$

Funktionsgleichung für die Energiemenge, die nach einer bestimmten Produktperiode ausgehend vom Stationsaufenthalt einer Wechselbatterie im Falle eines Abrufs zur Kompensation unter Abschaltung der entsprechenden Ladestelle nicht geladen würde

$$\begin{aligned} & \mathbf{FBNegCmps..Energy}((bdd, prd), (bat, cst, tss)) \\ &= \sum_{ts \in \text{MrICmpstPPTs}(bdd, prd) \cap tss} \mathbf{MrICmps..Power}((bdd, prd), bat, ts) * \text{lenTs} \\ & \text{für } (bdd, prd) \in \text{AllNegPPs}, (bat, cst, tss) \in \text{AllSBUs}_{bat} \end{aligned} \quad (106)$$

Für ein Angebot von Minutenreserve in negativer Regelrichtung muss bei allen beteiligten Wechselbatterien in ihrem betreffenden Stationsaufenthaltszeitraum die zur Erbringung von Regelenergie reservierte Energiemenge (Zuschaltenergie) ebenso groß sein wie die für den Fall eines Abrufs zur Kompensation reservierte Energiemenge (Abschaltenergie)

$$\forall (bdd, prd) \in AllNegPPs \quad \forall (bat, cst, tss) \in AllSBUS_{bat}$$

$$FBNegOfferEnergy((bdd, prd), (bat, cst, tss)) = FBNegCmps..Energy((bdd, prd), (bat, cst, tss)) \quad (107)$$

Die in den einzelnen Zeitscheiben reservierten Energiemengen bilden Schnipsel, aus denen ein Minutenreserveangebot zusammengestellt werden kann. Ein Anbieter von Minutenreserve muss dafür Sorge tragen, dass über die ganze vierstündige Produktperiode hinweg ein Regelenergieabruf erfolgen kann. Demzufolge ist es erforderlich, dass die angebotene Minutenreserveleistung in der jeweiligen Höhe während der kompletten Produktperiode gleichmäßig bereitgestellt wird.

Funktionsgleichung für das Angebot von Minutenreserveleistung

$$MrIOffer(bdd, prd) = \min_{ts \in MrIOfferPPTs(bdd, prd)} \sum_{bat \in Batteries} MrIOfferPower((bdd, prd), bat, ts)$$

für $(bdd, prd) \in AllPosPPs \cup AllNegPPs$ (108)

VI. Umschaltpotenzialflächen / Potenzialzusammenhang

Das Zu- und Abschaltpotenzial werden in elektrischer Leistung angegeben; es handelt sich jeweils um den Betrag der zu- oder abschaltbaren Ladeleistung (vgl. oben). Um es anschaulicher zu machen, können wie die Zuschaltleistung auf einen positiven Wertebereich und die Abschaltleistung auf einen negativen Wertebereich abgebildet werden. Es zeigt sich dann zeitlich zusammenhängendes Zu- und Abschaltpotenzial. Dieser Zusammenhang beginnt und endet an den Stellen, wo Zuschaltpotenzial in ein Abschaltpotenzial übergeht oder umgekehrt. In Abbildung 57 werden entsprechend eines Beispielverlaufs des Umschaltpotenzials über die einzelnen Zeitscheiben drei Flächen mit zusammenhängendem Zuschaltpotenzial und zwei Flächen mit zusammenhängendem Abschaltpotenzial dargestellt. Von dem Zuschaltpotenzial von insgesamt 120 kWh in der Fläche ganz hinten lässt sich zwecks Angebot/Erbringung von Minutenreserve kein Gebrauch machen, da keine Fläche mit Abschaltpotenzial als Gegenstück nachfolgt. Beim Übergang zur ersten Abschaltpotenzialfläche von hinten ist gedanklich ein Zuschaltpotenzial von 120 kWh zu vermerken. Zu dem Abschaltpotenzial von 24 kWh gibt es also in diesem Beispiel ein späteres Gegenstück. Denn es komplett in der nachfolgenden Zuschaltpotenzialfläche auf. Beim Übergang zur zweiten Zuschaltpotenzialfläche von hinten bleiben dann noch 96 kWh offen. Auf die Zuschaltpotenzialfläche mit 138 kWh folgt direkt die Abschaltpotenzialfläche mit 24 kWh. Es sind also davon zumindest 24 kWh Zuschaltpotenzial zwecks Angebot/Erbringung von Minutenreserve zu gebrauchen. Doch es ist damit nicht gesagt, in welchen einzelnen Zeitscheiben das Zuschaltpotenzial in Gebrauch zu nehmen ist. Innerhalb der Zuschaltpotenzialfläche mit 138 kWh herrscht gegenseitiger Ausschluss. Beim Übergang zur nächsten Abschaltpotenzialfläche sind 234 kWh gutzuschreiben. Damit ist es klar, dass das Abschaltpotenzial von 54 kWh uneingeschränkt in Gebrauch genommen werden kann. Das gleiche gilt in diesem Beispiel auch für die Zuschaltpotenzialfläche ganz vorne.

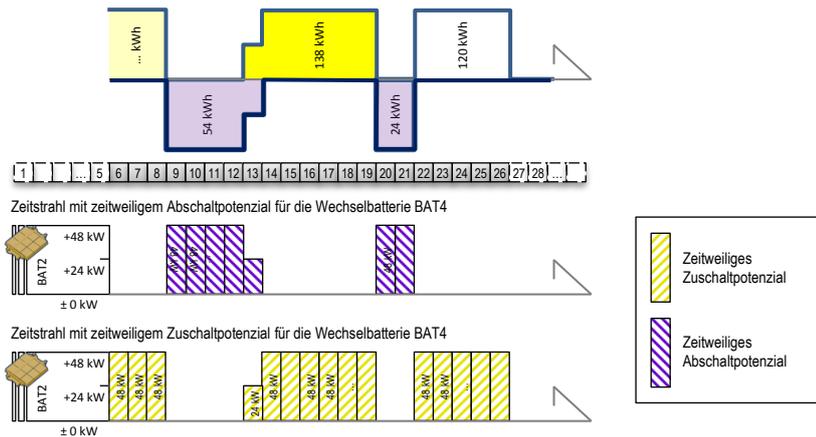


Abbildung 57 Ermittlung der Energiemengen der einzelnen Umschaltpotenzialflächen

F. Bewertung von Ablaufplänen

I. Strafpunkte

Es zählt als ein Strafpunkt, wenn ein Fahrzeug zeitweilig mit einer Wechselbatterie ausgestattet ist, aber planmäßig nicht die gestellten Transportanforderungen erfüllt.

Funktionsgleichung der Strafpunkte für das Nichterfüllen von Transportanforderungen (109)

$$\text{Penalty} = \sum_{\substack{(veh, bat, ts) \in \\ R_{VBA}}} \begin{cases} 1, & \text{BatteryDischrg.}(bat, ts) = \text{powerPerMove} * \text{Trans.Reqs}(veh, ts) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

II. Kosten des Strombezugs

In der Ausrichtung auf den Stromgroßhandel sind die Ablaufpläne nach den Kosten des Strombezugs zu bewerten. Dazu wird in den einzelnen Zeitscheiben des Planungszeitraums die für das Laden nachgefragte Leistung über die Länge der Zeitscheiben integriert und die Nachfragemenge für sämtliche Wechselbatterien aufsummiert. Über die einzelnen Zeitscheiben hinweg kann die Gesamtnachfragemenge mit dem jeweils geltenden prognostizierten Bezugspreis verrechnet werden.

Funktionsgleichung der Stromnachfrage in der Ladestation über die Zeit (110)

$$\text{TsConsumption}(ts) = \sum_{\substack{bat \in \text{Batteries} \\ \text{für } ts \in \text{TimeSlots}}} \text{BatteryCharging}(bat, ts) * \text{lenTs}$$

Funktionsgleichung Strombezugskosten,

Bezugspreise werden von EUR/MWh in EUR/kWh umgerechnet

(111)

$$\text{EnergyPurchaseCost} = \sum_{ts \in \text{TimeSlots}} \frac{\text{PurchasePrices}(ts)}{1000} * \text{TsConsumption}(ts)$$

III. Angebotserlöse Minutenreserve

In der Ausrichtung auf den Regelleistungsmarkt sind die Ablaufpläne nach den Erlösen durch das Angebot von Minutenreserve zu bewerten. Über die einzelnen Produktperioden im Planungszeit-

raum hinweg kann die Angebotsleistung mit dem jeweiligen Leistungspreis (Kapazitätspreis) verrechnet werden.

Funktionsgleichung Erlöse Minutenreserveangebote,

Leistungspreise werden von EUR/MWh in EUR/kWh umgerechnet

(112)

$$\text{BPMRevenue} = \sum_{\substack{(bdd, prd) \in \\ \text{AllPosPPs} \cup \text{AllNegPPs}}} \text{MrIOffer}(bdd, prd) * \frac{\text{MrICapacityPrices}(bdd, prd)}{1000}$$

IV. Nachgeführte Energiemenge

Die Gesamtnachfrage über den Planungszeitraum hinweg wird als die nachgeführte Energiemenge bezeichnet. Es gibt keine Einschränkungen für die Ladezustände der Wechselbatterien am hinteren Ende des Planungszeitraums. Je nachdem wie viel Energie den Wechselbatterien durch Festlegung von Ladeleistung zugeführt wird, werden die Ladezustände höher oder niedriger ausfallen.

Funktionsgleichung der nachgeführten Energiemenge

(113)

$$\text{TotalConsumption} = \sum_{ts \in \text{TimeSlots}} \text{TsConsumption}(ts)$$

G. Präzedenzgraph

Bei der Umstellung eines Ablaufplans müssen gewisse zeitliche Abhängigkeiten und Abhängigkeiten bezüglich des Ladezustands der Wechselbatterien berücksichtigt werden. Diese Abhängigkeiten beruhen auf verschiedenen Beziehungen zwischen den geplanten Batterieeinsatzaktivitäten.

Um sich der Beziehungen bewusst zu machen und die Abhängigkeiten verfolgen zu können, wird in jedem Stand der Ablaufplanumstellung neben dem Ablaufplan ein sogenannter Präzedenzgraph geführt. In einem Präzedenzgraph sind sämtliche geplante Batterieeinsatzaktivitäten und untergeordnete Vorgänge sowie die verschiedenen Beziehungen zwischen ihnen festgehalten; alle Veränderungen im Rahmen einer Ablaufplanumstellung wirken sich also auf den Ablaufplan und den zugehörigen Präzedenzgraph aus.

DEFINITION: Präzedenzgraph

Ein Präzedenzgraph $\mathcal{d} = (V_{\mathcal{d}}, E_{\mathcal{d}}, A_{\mathcal{d}}, \text{src}_{\mathcal{d}}, \text{trg}_{\mathcal{d}}, \text{ann}_{\mathcal{d}})$ für einen Ablaufplan besteht aus einer Menge von Knoten $V_{\mathcal{d}}$, einer Menge von Kanten $E_{\mathcal{d}}$ und einer Menge von Annotationen $A_{\mathcal{d}}$, an die Knoten. Er enthält einen Knoten für jede der Batterieeinsatzaktivitäten samt untergeordneten Vorgängen in dem zugehörigen Ablaufplan und eine gerichtete Kante für jede direkte Beziehung zwischen zwei Batterieeinsatzaktivitäten. Außerdem gibt es je einen speziellen Knoten zur Markierung des Anfangs und des Endes des Planungszeitraums. Von dem Knoten der Anfangsmarkierung läuft je eine Kante zu jedem Knoten einer Anfangsaktivität einer Einsatzsequenz. Von jedem Knoten einer Schlussaktivität einer Einsatzsequenz läuft je eine Kante zu dem Knoten der Endmarkierung. Mit den Abbildungen $\text{src}_{\mathcal{d}}, \text{trg}_{\mathcal{d}}$ werden die Quell- bzw. Zielknoten der Kanten festgehalten. Mit der Abbildung $\text{ann}_{\mathcal{d}}$ ist jedem Knoten eine Annotation zuzuordnen.

Mit dem **Beispiel 1** soll näher gebracht werden, wie ein Präzedenzgraph für einen zugehörigen Ablaufplan im Hinblick auf eine Ablaufplanumstellung strukturell aufgebaut ist. Da alle Batterieeinsatzsequenzen lückenlos sind, weisen sie alle die gleiche Gesamtbearbeitungsdauer auf.

Beispiel 1 Grundlegende Beziehungsstruktur der Batterieeinsatzaktivitäten

In Abbildung 58 ist ein batterie-zentrischer Ablaufplan in Form eines Gantt-Diagramms dargestellt. Die Zeitachse umfasst alle Zeitscheiben des Planungszeitraums von zwei Tagen. Der Übersicht halber werden an dieser Stelle Zeitscheiben mit der Länge einer Stunde angezeigt. Auf einer symbolischen Achse sind die einzelnen Wechselbatterieressourcen aufgetragen. Es wurde darauf verzichtet, den Verlauf der Lade- bzw. Entladeleistung komplett darzustellen. An dieser Stelle werden nur die Ladezustände am Start und am Ende einer jeweiligen Einsatzaktivität angedeutet.

Zu jeder der Wechselbatterien existiert in einem Ablaufplan eine lückenlose Einsatzsequenz von der ersten Zeitscheibe bis zur letzten Zeitscheibe des Planungszeitraums. Zwischendrin werden in Abbildung 58 die Batterieeinsatzaktivitäten des Ablaufplans in Form eines Präzedenzgraphen gezeigt. Die Knoten sind derart angeordnet, dass alle Einsatzaktivitäten einer Wechselbatterie in einer Zeile stehen. So entspricht jede Einsatzsequenz einer Wechselbatterie im Gantt-Diagramm genau einer Zeile im Präzedenzgraphen.

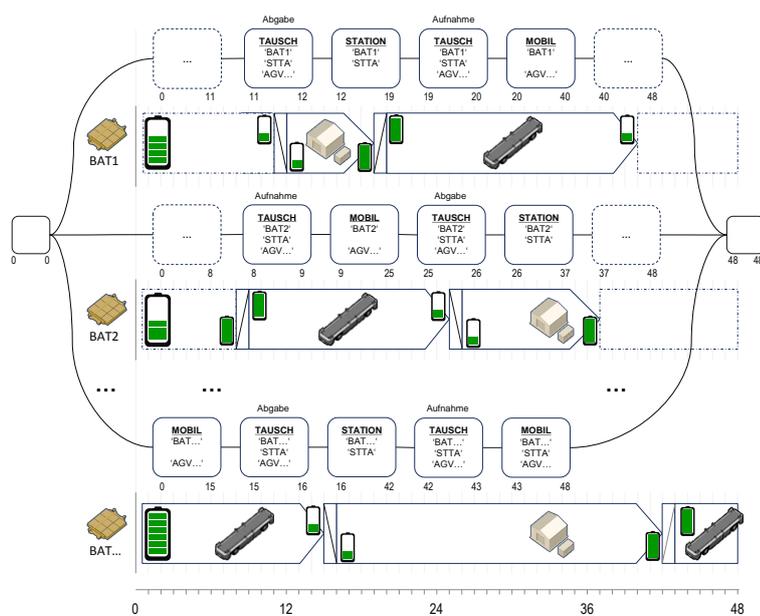


Abbildung 58 Genereller Aufbau des Präzedenzgraphen für die Batterieeinsatzplanung

Für die Wechselbatterie 'BAT1' ist zum Beispiel die Teilsequenz mit einer Batteriewechselaktivität in der Zeitscheibe Nr. 12, einer stationären Einsatzaktivität von Zeitscheibe Nr. 13 bis einschließlich Nr. 19 und so weiter abgebildet. Diese Teilsequenz findet sich in **Abbildung 58** in der obersten Zeile im Präzedenzgraphen wieder. Die Batteriewechselaktivität von Zeitscheibe Nr. 12 ist der Vorgänger der stationären Einsatzaktivität ab der Zeitscheibe Nr. 13. Diese wiederum ist der Vorgänger der Batteriewechselaktivität in der Zeitscheibe Nr. 20. Für die Wechselbatterie 'BAT2' ist beispielsweise die Teilsequenz mit einer Batteriewechselaktivität von der Zeitscheibe Nr. 9, einer mobilen Einsatzaktivität von Zeitscheibe Nr. 10 bis einschließlich Nr. 25 und so weiter abgebildet. Dies ist im Präzedenzgraphen entsprechend in **Abbildung 58** in der nächsten Zeile von oben wiedergegeben. Die Batteriewechselaktivität von Zeitscheibe Nr. 9 ist der Vorgänger der mobilen Einsatzaktivität ab Zeitscheibe Nr. 10.

Für die letzte Wechselbatterie im Gantt-Diagramm ist eine unterste Zeile im Präzedenzgraphen abgebildet. Auch hier sind die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen aus der Einsatzsequenz der Wechselbatterie ersichtlich.

Ganz links im Präzedenzgraph wurde ein künstlicher Knoten eingefügt, der Vorgänger zu der jeweils ersten Einsatzaktivität einer Zeile ist. Jede Batterieeinsatzsequenz beginnt mit diesem künstlichen Knoten. Ganz rechts im Präzedenzgraphen befindet sich ebenfalls ein künstlicher Knoten, der Nachfolger zu der jeweils letzten Einsatzaktivität einer Zeile ist. Jede Batterieeinsatzsequenz schließt mit diesem künstlichen Knoten ab. Der Knoten ganz links markiert den Anfang und der Knoten ganz rechts das Ende des Planungszeitraums.

I. Einzelaktivitäten

In diesem Abschnitt wird auf die Repräsentation und Darstellung von einzelnen Batterieeinsatzaktivitäten im Präzedenzgraph eingegangen. Die meisten Batterieeinsatzaktivitäten in einem Ablaufplan beinhalten eine Vielzahl von Vorgängen. Als solches finden sich diese Vorgänge auch in den Knoten eines zugehörigen Präzedenzgraphs wieder. Der Übersicht halber werden allerdings von einer Kette gleichartiger Vorgänge innerhalb eines Knotens nur der erste und der letzte Vorgang abgebildet. Auf diese Weise können die Abhängigkeiten von den Batterieeinsatzaktivitäten untergeordneten Vorgängen eckpunktartig korrekt wiedergegeben werden. Bei der Kurzdarstellung wird der Knoten in der Mitte der Vorgangskette zusammengefaltet und die übrigen Vorgänge ausgeblendet.

Stationäre Batterieeinsatzaktivitäten

Eine stationäre Batterieeinsatzaktivität setzt sich aus einer oder mehreren direkt aufeinanderfolgenden (stationären) Vorgängen zusammen. In der Station wird die betreffende Wechselbatterie gemäß einem festgelegten Verlauf allmählich geladen. Zum Start der stationären Batterieeinsatzaktivität liegt der Batterieladezustand in der Regel nah am Reserveniveau; zum Ende muss ein gewünschter/erforderlicher Batterieladezustand erreicht werden, damit mit der betreffenden Wechselbatterie elektrische Energie in ein Fahrzeug überführt werden kann.

Beispiel 2 *Repräsentation einer stationären Einsatzaktivität im Präzedenzgraph*

In **Abbildung 59** wird beispielhaft ein Ablaufplanausschnitt mit einem durchgehenden Stationsaufenthalt von Wechselbatterie 'BAT1' an einer der Ladestellen der Station 'STTA' gezeigt. Er ist für den Zeitraum vom Zeitpunkt 26 bis zum Zeitpunkt 37 geplant. Innerhalb des Aufenthaltszeitraums besteht durchgehend die Möglichkeit, Ladeleistung anzubringen; auf einen Vorgang folgt direkt ein nächster  Vorgang.

Es wird bedingt, dass die Wechselbatterie 'BAT1' mit einem Ladezustand  auf Reserveniveau in der Station landet und diese mit dem Vollladezustand  wieder verlässt. In den Vorgängen in den Zeitscheiben Nr. 30 bis Nr. 32 ist beispielsweise durchgehend eine Ladeleistung von 48 kW  festgelegt. Der weitere Ladeverlauf sieht so aus, dass für die Zeitscheiben Nr. 33 bis Nr. 35 eine Ladeleistung von 24 kW festgelegt ist.

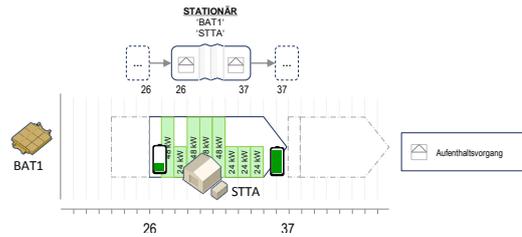


Abbildung 59 Abhängigkeiten bei einem Stationsaufenthalt einer Wechselbatterie

Im Präzedenzgraphen von **Abbildung 59** ist für den Knoten der stationären Einsatzaktivität eine Kurzdarstellung zu sehen. Insgesamt beinhaltet die Aktivität nämlich elf Vorgänge. Zur linken Seite des Knotens ist bloß der erste Vorgang in der Zeitscheibe Nr. 27 aufgeklappt; zur rechten Seite ist der letzte Vorgang in der Zeitscheibe Nr. 37 zu sehen. Die übrigen neun Vorgänge sind in der Mitte des Knotens zusammengerafft.

Mobile Batterieeinsatzaktivitäten

Eine mobile Batterieeinsatzaktivität setzt sich aus einer oder mehreren direkt aufeinanderfolgenden (mobilen) Vorgängen zusammen. Die Wechselbatterie wird zu Beginn mit einem bestimmten Ladezustand übernommen. Beim Fahren wird die betreffende Wechselbatterie allmählich entladen. Der Ladezustand darf zu keiner Zeit das Reserveniveau unterschreiten. Am Ende der Fahrzeugausstattung muss auch hier ein gewünschter/erforderlicher Batterieladezustand erreicht werden.

Beispiel 3 Repräsentation einer mobilen Einsatzaktivität im Präzedenzgraph

Der Ablaufplanausschnitt in **Abbildung 60** zeigt eine durchgehende Ausstattung von Fahrzeug 'AGV57' mit der Wechselbatterie 'BAT1'. Sie ist zum Beispiel für den Zeitraum vom Zeitpunkt 12 bis zum Zeitpunkt 24 geplant. Innerhalb dieses Zeitraums fällt gemäß des Transportprogramms  des Fahrzeugs nach und nach eine Entladeleistung  an; auf einen  Vorgang in der mobilen Einsatzaktivität folgt direkt einer nächster Vorgang. Für die Vorgänge in den Zeitscheiben Nr. 14 bis Nr. 16 ist beispielsweise durchgehend eine Entladeleistung von 18 kW  vorgesehen. In den Zeitscheiben Nr. 18 und Nr. 19 weist der Verlauf zum Beispiel auch eine Entladeleistung von 30 kW auf. Sie geht in den einzelnen Zeitscheiben auf die Transportanforderungen aus dem für das Fahrzeug 'AGV57' individuell vorhergesagten Auftragsprogramm zurück.

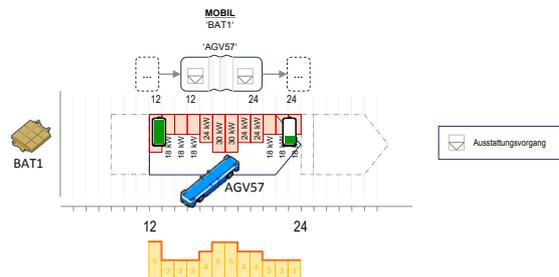


Abbildung 60 Abhängigkeiten bei einer Ausstattung eines Fahrzeugs mit einer Wechselbatterie

In **Abbildung 60** ist für den Knoten der mobilen Einsatzaktivität eine Kurzdarstellung zu sehen. Zur linken Seite des Knotens ist bloß der erste Ausstattungs Vorgang in der Zeitscheibe Nr. 13 aufgeklappt; zur rechten Seite ist der letzte Vorgang in der Zeitscheibe Nr. 24 zu sehen. Die übrigen Vorgänge sind in der Mitte des Knotens zusammengerafft.

Batteriewechselaktivität zur Abgabe einer Wechselbatterie

Eine Batteriewechselaktivität zur Abgabe einer Wechselbatterie umfasst keinen oder mehrere Wartevorgänge und schließt zwingend mit einem Abgabevorgang ab. Die Wechselbatterie wird zu Beginn mit einem bestimmten Ladezustand von einem Fahrzeug entgegen genommen und wird zum Ende mit dem gleichen Ladezustand an eine Ladestelle in der Station eingegeben.

Beispiel 4 *Repräsentation einer Batteriewechselaktivität zur Abgabe einer Wechselbatterie im Präzedenzgraph*

Der Ablaufplanausschnitt in **Abbildung 61** zeigt eine Abgabe der Wechselbatterie 'BAT1' an die Station 'STTA' durch das Fahrzeug 'AGV58'. Sie ist zum Beispiel für den Zeitraum vom Zeitpunkt 19 bis zum Zeitpunkt 23 geplant. Es folgt ein Wartevorgang  auf einen nächsten Wartevorgang bis die Wechselbatterie schließlich in einem einzigen Abgabevorgang  in die Station eingegeben wird.

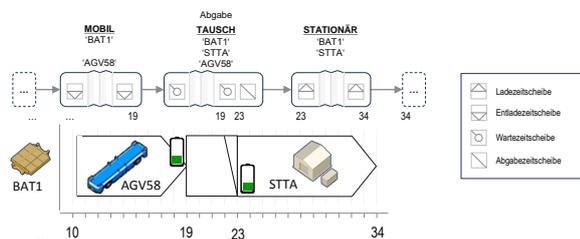


Abbildung 61 Abhängigkeiten bei einer Abgabeaktivität

Batteriewechselaktivität zur Aufnahme einer Wechselbatterie

Eine Batteriewechselaktivität zur Aufnahme einer Wechselbatterie umfasst lediglich einen Aufnahmevergung. Sie hat immer die Dauer von exakt einer Zeiteinheit. Die Wechselbatterie wird zu Beginn mit einem bestimmten Ladezustand von einer Ladestelle übernommen und wird zum Ende mit dem gleichen Ladezustand in ein Fahrzeug eingegeben.

Beispiel 5 *Repräsentation einer Batteriewechselaktivität zur Aufnahme einer Wechselbatterie im Präzedenzgraph*

Der Ablaufplanausschnitt in **Abbildung 62** zeigt eine Aufnahme der Wechselbatterie 'BAT1' von der Station 'STTA' durch das Fahrzeug 'AGV58'. Sie ist zum Beispiel für den Zeitraum vom Zeitpunkt 22 bis zum Zeitpunkt 23 geplant. Es gibt bloß den Aufnahmevergung  in der Zeitscheibe Nr. 23.

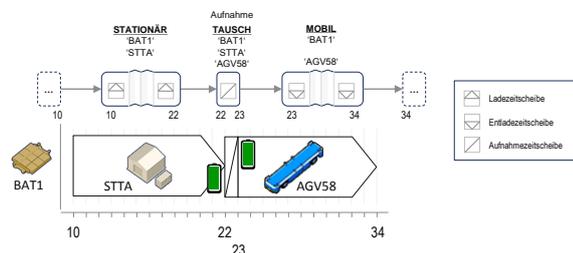


Abbildung 62 Abhängigkeiten bei einer Aufnahmeaktivität

II. Beziehungsstrukturen

Innerhalb einer Batterieeinsatzsequenz lassen sich unmittelbare Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen stationären Einsatzaktivitäten, Batteriewechselaktivitäten und mobilen Einsatzaktivitäten ausmachen. Dies ist vom Einsatzzyklus der Wechselbatterien und ihrem lückenlosen zu planenden Einsatz bedingt. Wegen der Batterietausche treten in einem Ablaufplan zwischen zwei Batteriewech-

selaktivitäten zudem Synchronitätsbeziehungen auf. All diese Beziehungen zwischen den Batterieeinsatzaktivitäten werden von einem sogenannten Präzedenzgraph wiedergespiegelt.

Beziehungen aus dem Fahrbetrieb

Im **Beispiel 6** wird darauf eingegangen, dass in den Teileinsatzsequenzen von Wechselbatterien im Ablaufplan beim Fahrbetrieb unmittelbare Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen auszumachen sind. Für jede Batterieeinsatzaktivität sind im Präzedenzgraph zumindest eine unmittelbare Vorgänger- und eine unmittelbare Nachfolgeraktivität zu sehen. Eine Wechselbatterie ist laut Ablaufplan zu jeder Zeit entweder stationär oder mobil einzusetzen, es sei denn sie durchläuft einen Batterietausch.

Im geplanten Ablauf reiht sich niemals eine stationäre Einsatzaktivität unmittelbar an eine mobile Einsatzaktivität; vielmehr steht in einem gültigen Ablaufplan immer eine Batteriewechselaktivität zwischen zwei solchen Aktivitäten. Zum einen kann sich das Beziehungsmuster zur Aufnahme einer Wechselbatterie durch ein Fahrzeug von einer Station ergeben; dieses zeigt sich in einer unmittelbaren Abfolge einer stationären Einsatzaktivität gefolgt von einer Batteriewechselaktivität gefolgt von einer mobilen Einsatzaktivität. Zum anderen kann sich das Beziehungsmuster zur Abgabe einer Wechselbatterie durch ein Fahrzeug an einer Station ergeben; dieses bildet sich mit einer unmittelbaren Abfolge einer mobilen Einsatzaktivität gefolgt von einer Batteriewechselaktivität gefolgt von einer stationären Einsatzaktivität heraus.

Beispiel 6 Beziehungsmuster aus dem Fahrbetrieb

Der Ablaufplanausschnitt in **Abbildung 63** zeigt eine Abfolge eines Aufenthalts der Wechselbatterie 'BAT2' an der Station 'STTA', der Aufnahme von dieser Station durch das Fahrzeug 'AGV59' und der Ausstattung dieses Fahrzeugs. Bis zum Zeitpunkt 17 ist beispielsweise ein Stationsaufenthalt der Wechselbatterie 'BAT2' an der Station 'STTA' geplant. Zusätzlich ist es geplant, dass die Wechselbatterie die Station im Vollladezustand verlässt. Ab dem Zeitpunkt 17 bis zum Zeitpunkt 18 wird die Wechselbatterie 'BAT1' von einer Ladestelle in der Station 'STTA' durch das Fahrzeug 'AGV59' aufgenommen.

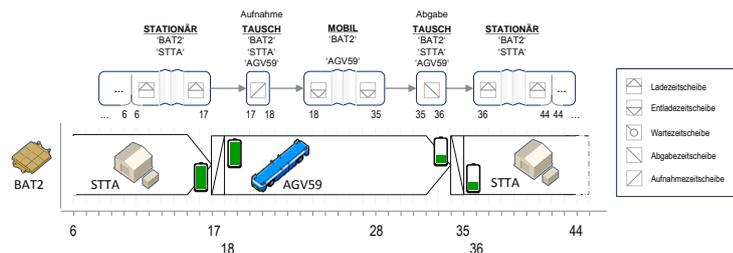


Abbildung 63 Abhängigkeiten bei einem Fahrbetrieb

In dieser Zeit verbleibt die Wechselbatterie freilich im Vollladezustand. Anschließend ist das Fahrzeug 'AGV59' vom Zeitpunkt 18 bis zum Zeitpunkt 35 mit der Wechselbatterie 'BAT2' ausgestattet. Die Wechselbatterie wird laut Plan im Vollladezustand in das Fahrzeug übernommen. Später ist die Wechselbatterie bis an das Reserveniveau leer gefahren. Das Fahrzeug 'AGV59' fährt ab dem Zeitpunkt 35 bis zum Zeitpunkt 36 an die Station 'STTA' heran und gibt die Wechselbatterie 'BAT2' ab. In dieser Zeit verbleibt die Wechselbatterie im Ladezustand auf Reserveniveau. Ab dem Zeitpunkt 36 hält sich die Wechselbatterie 'BAT2' dann wieder in der Station 'STTA' auf.

Eine Kante für eine Vorgänger-Nachfolger-Beziehung ist vom Knoten für die Vorgängeraktivität zum Knoten für die Nachfolgeraktivität gerichtet.

Beziehungen aus dem Batterietausch

Im **Beispiel 7** wird darauf eingegangen, dass Synchronisationsbeziehungen zwischen zwei Teileinsatzsequenzen beim Batterietausch auftreten. Eine Batteriewechselaktivität tritt niemals alleine in einem Ablaufplan auf. Für jede Aktivität zur Aufnahme einer Wechselbatterie existiert in der gleichen Zeit zumindest eine Aktivität zur Abgabe eben dieser Wechselbatterie.

Beispiel 7 Beziehungsmuster aus dem Batterietausch

In **Abbildung 64** ist ein Ablaufplanausschnitt mit einem Batterietausch gezeigt. In einer mobilen Batterieeinsatzaktivität wird die Wechselbatterie 'BAT8' im Fahrzeug 'AGV60' nach und nach entladen. Parallel wird die Wechselbatterie 'BAT3' an einer der Ladestellen von 'STTA' geladen. Schließlich wird bei der Wechselbatterie 'BAT8' in Ausstattung von Fahrzeug 'AGV60' beim Ladezustand das Reserveniveau erreicht und es wird ein Batterietausch über eine Tauschspur der Station 'STTA' angefordert. Die Wechselbatterien 'BAT3' und 'BAT8' sind dann jeweils in eine Batteriewechselaktivität verwickelt. Während die Wechselbatterie 'BAT8' vom Fahrzeug 'AGV60' an eine Ladestelle der Station 'STTA' abgegeben wird, nimmt es von einer Ladestelle der Station 'STTA' die Wechselbatterie 'BAT3' auf. Die Batteriewechselaktivitäten müssen jeweils mit einem Abgabe- bzw. Aufnahmevergang zu Ende gebracht werden.

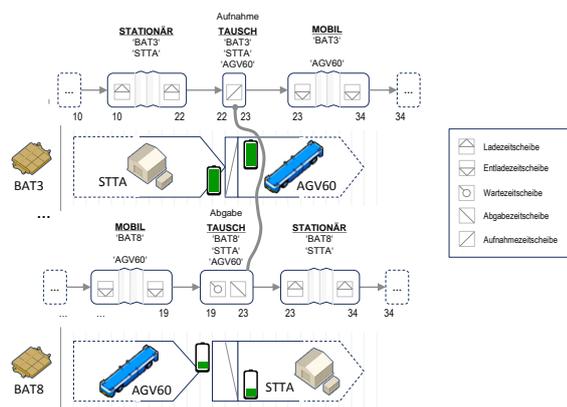


Abbildung 64 Abhängigkeiten bei einem Batterietausch

Dem Abgabevergang können innerhalb der Batteriewechselaktivität keine oder mehrere Wartevorgänge vorausgehen. Im abgebildeten Beispiel ergibt sich für das Fahrzeug 'AGV60' bei der Begebenheit zu einer Tauschspur der Station 'STTA' ein einziger Wartevorgang. Daraufhin wird die Wechselbatterie 'BAT3' in einer mobilen Batterieeinsatzaktivität mit Fahrzeug 'AGV60' allmählich entladen. Die Wechselbatterie 'BAT8' hält sich an einer Ladestelle der Station 'STTA' auf und wird dort möglicherweise geladen. Ein Fahrzeug muss zuerst die Wechselbatterie an eine Station abgeben, ehe es eine frisch geladene Wechselbatterie aufnehmen kann. Darum hängt der Aufnahmevergang in der Batteriewechselaktivität von 'BAT3' vom Abgabevergang in der Batteriewechselaktivität von 'BAT8' ab. Dabei muss für ein Fahrzeug eine Aufnahme einer Wechselbatterie in der gleichen Zeitscheibe wie eine Abgabe einer Wechselbatterie durchgeführt werden.

Eine Kante für eine Synchronitätsbeziehung ist vom Knoten für die Abgabeaktivität zum Knoten für die Aufnahmeaktivität gerichtet.

TEIL 5 HEURISTISCHES LÖSUNGSVERFAHREN

In diesem Kapitel werden – nah an einer späteren Implementierung – die vier Problemlösungsmodule aus **B2M** vorgestellt. Dieses basiert im Wesentlichen auf der Generierung einer Startlösung und einer lokalen Suche im Lösungsraum.

Es werden einfach geartete Prioritäten- und Zuordnungsregeln angewendet, um über das Erfüllen von Transportanforderungen im Fahrbetrieb und die Vornahme von Batterietauschen zu einem initialen Ablaufplan zu kommen. Dabei werden zunächst im Groben der Einsatz der Fahrzeuge und der Wechselbatterien und dann mit den Ladeverläufen die Feinheiten für den Aufenthalt der Wechselbatterien in der Station geplant. Es entsteht so ein Ablaufplan \bar{a} mit lückenlosen Einsatzsequenzen der Wechselbatterien und Festlegung von Ladeleistung zur Nachführung von elektrischer Energie an die Fahrzeuge. Aus ihm geht nach dem vorläufigen Stückeln von Minutenreserveangeboten ein angereicherter Ablaufplan \hat{a} hervor. Doch nicht jedes Stück eines Minutenreserveangebots darin trägt zu einem bestmöglichen Gesamtergebnis bei. Durch das Abwägen der Erlöse aus dem Angebot von Minutenreserveleistung gegenüber den Kosten des Strombezugs kommt es zu einem ausgemerzten Ablaufplan \ddot{a} , der bloß noch die Angebotsstücke enthält, bei denen die erwarteten Leistungspreiserlöse mögliche Vergünstigungen des Strombezugs überwiegen. Zudem ist bei ihm gewährleistet, dass alle Festlegungen von Ladeleistung am preisgünstigsten getroffen worden sind. Nachdem es bei dieser Abwägung zur Umverteilung von Ladeleistung aus den Zeitscheiben mit höheren prognostizierten Bezugspreisen in die Zeitscheiben mit niedrigeren prognostizierten Bezugspreisen gekommen sein kann, mögen sich nun die Zuschalt-/Abschaltpotenziale verändert ausprägen. Daher können womöglich für einen endangereicherten Ablaufplan \ddot{a} zusätzliche Stücke von Minutenreserveangeboten aufgebaut werden. Der Ablaufplan \ddot{a} stellt wiederkehrend eine Lösung des Ablaufplanungsproblems dar.

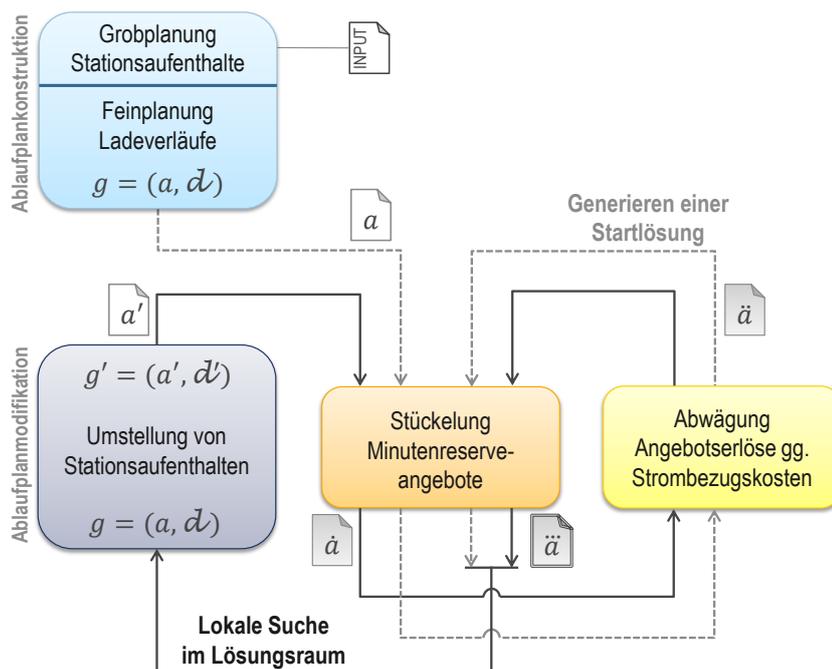


Abbildung 65 Übersicht der vier Problemlösungsmodule im heuristischen Lösungsverfahren

Im Weiteren wird versucht, ausgehend von einer Startlösung möglichst nah an eine Lösung mit optimalem Gesamtergebnis heranzukommen. Ein Übergang zu einer benachbarten Lösung sieht zunächst eine Umstellung von Batterieeinsatzaktivitäten wie beispielsweise das Verrücken eines Batterietausches vor. Es wird ein Präzedenzgraph \mathcal{d} für den Ablaufplan $a = \vec{a}$ erstellt, mit dem zusammen er den anfänglichen Planungsstand $g = (a, \mathcal{d})$ für die Modifikation des Ablaufplans bildet. Ein Präzedenzgraph zeigt die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen den Batterieeinsatzaktivitäten an, die es im konkreten Zeitbezug wie auch in Bezug auf den Ladezustand der Wechselbatterien zu beachten gilt. Der Ablaufplan a wie auch der Präzedenzgraph \mathcal{d} werden dann gleichsam modifiziert, so dass daraus ein neuer Planungsstand $g' = (a', \mathcal{d}')$ hervorgeht. Bei der Ablaufplanmodifikation mögen aufgrund zeitlicher Verschiebungen der Stationsaufenthalte der Wechselbatterie und der Anpassung des Ladeverlaufs einige Stücke von Minutenreserveangeboten auf der Strecke geblieben sein. Der modifizierte Ablaufplan $\vec{a} = a'$ ist also auf gleiche Weise wie der initiale Ablaufplan anzureichern. Dazu werden nacheinander eine vorläufige Stückelung von Minutenreserveangeboten, eine Abwägung der Minutenreserveerlöse gegenüber den Strombezugskosten und eine erneute Stückelung von Minutenreserveangeboten mit endgültig ausgeprägtem Zuschalt-/Abschaltpotenzial vorgenommen. Sollte nach einer gewissen Anzahl von Versuchen keine Verbesserung des Gesamtergebnisses erreicht werden können, wird die lokale Suche mit einem endangereicherten Ablaufplan \vec{a} als Lösung beendet.

A. *Ablaufplankonstruktion*

I. **Grobplanung von Stationsaufhalten**

Zum Auftakt in die Konstruktion eines Ablaufplans werden die Anfangsladezustände und Standorte der Wechselbatterien sowie die individuellen Transportauftragsprogramme der Fahrzeuge in die Planung übernommen. Aus den Standortinformationen der Wechselbatterien werden für die Planung anfängliche Zuordnungen von Wechselbatterien zu Fahrzeugen und Ladestellen zu Wechselbatterien hergeleitet.

Bei der Grobplanung wird eine unmittelbare Abfolge von Einsatzaktivitäten der Wechselbatterien erstellt. Zugleich wird Aufschluss darüber gewonnen, zu welcher Zeit und in welchem Maße Fahrzeuge dazu eingesetzt werden können, um Transportanforderungen abzudecken. Denn Fahrzeuge müssen im Fahrbetrieb korrespondierend zu den mobilen Einsatzaktivitäten von Wechselbatterien eingesetzt werden. Außerdem wird im Zuge der Grobplanung klar, zu welcher Zeit und wie stark die Ladestellen und Tauschspuren in den Stationen ausgelastet werden.

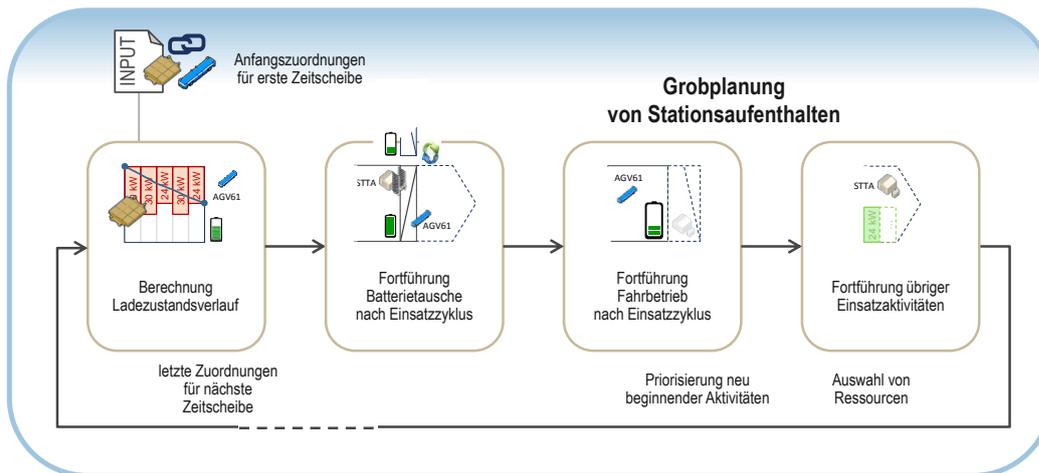


Abbildung 66 Übersicht der Konstruktionsschritte bei der Grobplanung von Stationsaufenthalten

In diesem ersten Problemlösungsmodul wird der Planungszeitraum von der ersten bis zur letzten Zeitscheibe durchlaufen und dabei wiederholt die in **Abbildung 66** gezeigten Konstruktionsschritte ausgeführt:

- Sukzessive Berechnung des Ladezustandsverlaufs und anderer Zustandsinformationen im Zeitverlauf

Im Verlauf der Zeit werden die Ladezustände der Wechselbatterien über die in den Vorgängen stationärer und mobilen Einsatzaktivitäten festgelegten Lade-/Entladeleistungen berechnet. Die Berechnung erfolgt fortlaufend mit den Vorgängen der zuletzt betrachteten Zeitscheibe; das heißt der letzte bekannte Ladezustand wird hergenommen und die im letzten Vorgang zugeführte bzw. entnommene Energie eingerechnet. Die Batterieladezustände sind ausschlaggebend für die Beendigung von Transportaktivitäten der Fahrzeuge und den korrespondierenden mobilen Einsatzaktivitäten der Wechselbatterien. Zudem werden die Auslastungswerte der Tauschspuren und auch der Ladestellen in den Stationen nachvollzogen. Für eine etwaige Neuordnung muss geschaut werden, wie es in der aktuellen Zeitscheibe um die kumulative Ressourcennutzung gestellt ist.

- Mit Blick auf die Ressourcenzuordnungen aus der vorangegangenen Zeitscheibe oder der anfänglichen Ressourcenzuordnung wird bestimmt, welche Einsatzaktivitäten mit Wechselbatterieressourcen fortzuschreiben und gegebenenfalls zu Ende zu führen sind. Gemäß einem festen Einsatzzyklus werden dann für die aktuelle Zeitscheibe die Einsatzaktivitäten der jeweils nachfolgenden Einsatzweisen neu erstellt und an die vorhandene Einsatzsequenz angebaut. Auf den stationären Gebrauch einer Wechselbatterie folgt zum Beispiel die Aufnahme dieser Wechselbatterie durch ein Fahrzeug. Der Auslöser dafür ist, dass sich laut Plan ein Transportfahrzeug an die Station begeben hat, um die verfügbare Wechselbatterie aufzunehmen.

- Behandeln der Tauschvorgänge als Auslöser neuer Einsatzaktivitäten

Über den aktuellen Auslastungszustand für die Tauschspuren einer Station hinaus wird eine Warteschlange von Fahrzeugen geführt, die sich an die Station begeben. Gelangt ein Fahrzeug in der aktuellen Zeitscheibe an die vorderste Position in der Warteschlange, wird der Zugang auf die betreffende Tauschspur gewährt und ein Abgabevorgang für die Wechselbatterie vollzogen. Daraufhin wird geprüft, ob das Fahrzeug zur gleichen Zeit auch noch den Aufnahmeprozess für eine frisch geladene Wechselbatterie vollziehen kann. Nach Aufnahme einer Wechselbatterie geht es für das betreffende Transportfahr-

zeug aufs Neue mit dem Fahrbetrieb weiter. Eine aufgenommene Wechselbatterie wird danach in demjenigen Fahrzeug mobil gebraucht, welches sie von der betreffenden Station aufgenommen hat. Eine abgegebene Wechselbatterie wird danach an einer Ladestelle in der betreffenden Station kontaktiert sein. Je nachdem wie lang die aktuell betrachtete Zeitscheibe ist, kann mehr als ein Fahrzeug die Abgabe-/Aufnahmevorgänge durchmachen. Alle übrigen Fahrzeuge, die in der Warteschlange für eine Tauschspur verbleiben, bekommen einen Vorgang für das Warten vermerkt.

○ Behandeln des Fahrbetriebs als Auslöser neuer Aktivitäten

Im Fahrbetrieb haben die Transportfahrzeuge strikt die Transportanforderungen zu erfüllen, die für sie individuell in der aktuellen Zeitscheibe vorgesehen ist. Der mit dem Fahrbetrieb korrespondierende mobile Gebrauch einer Wechselbatterie, erhält die Entladeleistung passend zu diesen Transportanforderungen für die aktuelle Zeitscheibe zugeschrieben. Der mobile Gebrauch einer Wechselbatterie bzw. der Fahrbetrieb eines Transportfahrzeugs enden damit, dass der Ladezustand der Wechselbatterie in den Reservebereich abgefallen ist. Dann nämlich entsteht der Bedarf für einen Batterietausch bei dem betreffenden Fahrzeug. Um sich an eine Station zu begeben, wird es zur Abgabe in die Warteschlange einer Tauschspur eingereiht.

- Vielfach müssen für neu erstellte Einsatzaktivitäten die Ressourcenzuordnungen der vorangegangenen Einsatzaktivität übernommen werden. Durch die Auswahl einer Wechselbatterie beim Aufnahmevorgang wird folglich mit darüber entschieden, mit welcher Wechselbatterie dieses Transportfahrzeug während des Fahrbetriebs ausgestattet ist. Einige Einsatzaktivitäten können allerdings nicht neu erstellt werden, ohne offene Ressourcenbedarfe zu schaffen. Es kann hinsichtlich der Aufnahme einer Wechselbatterie zwar die Zuordnung der Tauschspur von der Abgabe der Wechselbatterie an die Station übernommen werden. Es muss jedoch noch eine Wechselbatterie ausgewählt werden, welche an Bord des Fahrzeugs aufgenommen wird. Des Weiteren trifft es auf das Warten auf Zugang zur Station oder die Abgabe einer Wechselbatterie an die Station zu, die korrespondierend zu den vorausgegangenen Batterieeinsatzaktivitäten von einer Fahrzeugeinsatzaktivität ausgelöst worden sind. Solche anstehenden Einsatzaktivitäten werden danach sortiert, wie intensiv das vorhergesehene Transportauftragsprogramm des beteiligten Transportfahrzeugs ist. Es können bei dieser Sortierung beispielsweise die Transportanforderungen der nächsten fünf Zeiteinheiten betrachtet werden. Bei der Auswahl benötigter Ressourcen wird ebenfalls eine Sortierreihenfolge angewandt. Muss ein Transportfahrzeug einen Batterietausch vornehmen, wird eine Tauschspur der Batteriewechselstation ausgewählt, welche zurzeit am wenigsten ausgelastet ist.

- Fortführen der übrigen Einsatzaktivitäten

Sind sämtliche benötigte Ressourcen für eine Einsatzaktivität zugeordnet, so können darin für die aktuell betrachtete Zeitscheibe Vorgänge wie beispielsweise für Lade-/Entladeprozesse festgelegt werden. Beim stationären Einsatz einer Wechselbatterie wird stets die maximal zulässige Ladeleistung gewählt, so dass diese bei ihrem Stationsaufenthalt sofortig und schnellstmöglich geladen wird. Während des stationären Gebrauchs der Wechselbatterie, wird eine Ladestelle in einer Station ausgelastet. Entsprechend der gewählten Ladeleistung wirkt sich der Ladeprozess in der aktuellen Zeitscheibe auf die Leistungsaufnahme in der betreffenden Station aus.

In **Tabelle 8** findet sich eine Übersicht von Konstruktionsstrategien, die für eine Grobplanung des Einsatzes von Fahrzeugen und Wechselbatterien angewandt werden können.

Tabelle 8: Übersicht von Prioritäten- und Auswahlregeln in der Grobplanung bei der Ablaufplankonstruktion

	Planungsebene	Kurzbeschreibung
	Batterieeinsatz (Grobplanung)	
	Warteschlangenprinzip für die Abgabe von Wechselbatterien	Ist ein Transportfahrzeug mit einer Wechselbatterie ausgestattet, deren Ladezustand in den Reservebereich abgefallen ist, so muss ein Batterietausch durchgeführt werden. Für einen Batterietausch begibt sich das Transportfahrzeug zu einer Station und wartet dort auf Zugang zu einer Tauschspur.
	Zuordnungsregel für die Begebenheit an eine Station (Lowest Workload)	Es werden sämtliche Stationen betrachtet und nach der Auslastung ihrer Ladestellen sortiert. Eine Tauschspur einer Station mit dem niedrigsten Auslastungswert wird für eine anstehende Warte- oder Abgabeaktivität ausgewählt. In Ausstattungsszenarios mit bloß einer einzigen Station erübrigt sich diese Auswahlprozedur.
	Zuordnungsregel für die Aufnahme von Wechselbatterien (Highest State Of Charge)	Es werden sämtliche Wechselbatterien betrachtet, die derzeit Ladestellen der betreffenden Station auslasten. Es ist unerheblich, ob die Ladeprozesse noch in Gang sind oder die Wechselbatterie bereits ihren Vollladezustand erreicht hat. Sie werden nach ihrem Ladezustand sortiert und die Wechselbatterie mit dem höchsten Ladezustand wird für eine anstehende Fahrbetriebs- bzw. Aufnahmeaktivität ausgewählt.
	Zuordnungsregel für Lade-/Entladeleistung (Rush)	Für eine bestehende mobile Einsatzaktivität wird eine Entladeleistung ausgewählt, die exakt der im Fahrbetrieb gestellten Transportanforderungen entspricht. Für eine bestehende stationäre Einsatzaktivität wird die größtmögliche Ladeleistung ausgewählt, so dass die Wechselbatterie schnellstmöglich auf den Vollladezustand gebracht wird.

Programmauflistung 1 Planung des Einsatzes von Fahrzeugen und Wechselbatterien

Für die Grobplanung ist die Menge von Einsatzaktivitäten der Fahrzeuge und Wechselbatterien nicht starr vorgegeben. Vielmehr müssen bei der Grobplanung nach und nach Einsatzaktivitäten erstellt und diese zu einem Plan zusammengesetzt werden. Es werden lediglich die Ladezustände der Wechselbatterien, Zuordnungen zwischen Wechselbatterien und Fahrzeugen sowie Zuordnungen zwischen Ladestellen und Wechselbatterien für den Anfang des Planungszeitraums eingegeben. Anhand dieser Anfangszuordnungen werden für die Fahrzeuge und Wechselbatterien in ihren jeweiligen Einsatzsequenzen die ersten Einsatzaktivitäten erstellt (**Zeile 1-2**). Falls einer Wechselbatterie anfänglich ein Fahrzeug zugeordnet ist, so befindet sich diese laut Plan in Ausstattung dieses Fahrzeugs. Folglich werden für die Wechselbatterie eine mobile Einsatzaktivität und für das Fahrzeug eine korrespondierende Transportaktivität erzeugt. Anderenfalls einer Wechselbatterie anfänglich eine Ladestelle zugeordnet ist, so befindet sich diese in Station. Folglich wird für die Wechselbatterie eine stationäre Einsatzaktivität erzeugt.

Dann wird der Planungszeitraum von der ersten bis zur letzten Zeitscheibe abgelaufen. Es wird jede der Zeitscheiben nacheinander betrachtet. Der Ladezustand der Wechselbatterien wird dabei direkt im zeitlichen Verlauf mitverfolgt (**Zeile 5**). Nach und nach wird den Einsatzaktivitäten ein richtiger

Gehalt verliehen, indem ihnen einzelne Vorgänge einbeschrieben werden. Zu gegebener Zeit werden Einsatzaktivitäten zu Ende geführt und die Einsatzsequenz gemäß dem Einsatzzyklus der Wechselbatterien fortgeschrieben. Die Aktivitäten der Fahrzeuge sind ausschlaggebend dafür, dass in einer Batterieeinsatzsequenz in der aktuellen Zeitscheibe eine Aktivität abgeschlossen und eine neue Aktivität angelegt wird. Das könnte zum Beispiel der Übergang von einer Batteriewechselaktivität zu einer mobilen Einsatzaktivität sein, welcher von einer Aufnahme einer Wechselbatterie durch ein Fahrzeug ausgelöst wird.

Als erstes wird geschaut, ob durch ein Fahrzeug in dieser Zeit die Abgabe einer Wechselbatterie fertiggebracht werden kann (**Zeile 6-12**). Über die Zeit wird für jede der Tauschspuren eine Liste mit Fahrzeug geführt, die eine Wechselbatterie abzugeben haben. In dieser Liste wird ein Fahrzeug verzeichnet, wenn der Bedarf für einen Batterietausch festgestellt wird. An dieser Stelle kommt das Warteschlangenprinzip der Fahrzeuge bezüglich der Warte- und Abgabevorgänge von Wechselbatterien zum Tragen. Mit den vorderen Fahrzeugen in der Liste können Abgabevorgänge vollzogen werden; mit den übrigen Fahrzeugen in der Liste werden Wartevorgänge vollzogen. In aller Regel dauert eine Zeitscheibe ebenso lang wie die Abgabe einer Wechselbatterie an die Station, so dass in der betrachteten Zeitscheibe bloß für vorderste Fahrzeuge aus der Liste ein Abgabevorgang geschrieben wird. Aus einer Menge der verfügbaren Ladestellen wird eine Ladestelle an betreffender Station für den Abgabevorgang **1** ausgewählt. Es ist gleichgültig, welche der Ladestellen ausgewählt wird – der Abgabevorgang kann allerdings nur vollzogen werden, wenn die Menge der verfügbaren Ladestellen an der betreffenden Station nicht leer ist. Anhand der aktuellen Zuordnungen wird jeweils ermittelt, mit welcher Wechselbatterie ein betreffendes Fahrzeug aus der Liste (noch) ausgestattet ist und welche Batteriewechselaktivität in dieser Zeit durch einen Abgabevorgang zu ergänzen ist. Wird in der aktuellen Zeitscheibe bei einer Batteriewechselaktivität ein Abgabevorgang hinzugefügt, so wird diese Aktivität in dieser Zeit abgeschlossen. Zum einen wird die Zuordnung zwischen der Ladestelle und der abgegebenen Wechselbatterie vorgemerkt. Zum anderen wird dann die Zuordnung zwischen der abgegebenen Wechselbatterie und dem betreffenden Fahrzeug aufgehoben.

Als zweites wird geschaut, ob durch ein Fahrzeug in dieser Zeit die Aufnahme einer Wechselbatterie fertiggebracht werden kann (**Zeile 13-18**). Über die Zeit wird für jede der Tauschspuren eine Liste mit Fahrzeugen geführt, die eine Wechselbatterie aufzunehmen haben. Ein Fahrzeug wird dieser Liste just in der Zeit hinzugefügt, wenn es eine Wechselbatterie abgegeben hat. In aller Regel dauert eine Zeitscheibe ebenso lang wie die Aufnahme einer Wechselbatterie. Allerdings kann für ein Fahrzeug in einer einzigen Zeitscheibe die Abgabe gemeinsam mit der Aufnahme abgewickelt werden. Aus einer Menge der verfügbaren Ladestellen wird eine Ladestelle an betreffender Station für den Aufnahmevorgang **3** ausgewählt. Genauer genommen, wird entsprechend aktueller Zuordnungen mit der Ladestelle eine Wechselbatterie ausgewählt, die sich zu dieser Zeit dort befindet. So ist klar, mit welcher Wechselbatterie ein betreffendes Fahrzeug aus der Liste auszustatten ist und welche Batteriewechselaktivität in dieser Zeit durch einen Aufnahmevorgang zu ergänzen ist. An dieser Stelle wird eine Zuordnungsregel für die Aufnahme von Wechselbatterien angewandt; zum Beispiel kann die Ladestelle der Wechselbatterie mit dem höchsten Ladezustand gewählt werden. Wird in der aktuellen Zeitscheibe bei einer Batteriewechselaktivität ein Aufnahmevorgang hinzugefügt, so wird diese Aktivität in dieser Zeit abgeschlossen. Zum einen wird dann die Zuordnung zwischen der geräumten Ladestelle und der aufgenommenen Wechselbatterie aufgehoben. Zum anderen wird die Zuordnung zwischen der aufgenommenen Wechselbatterie und dem betreffenden Fahrzeug vorgemerkt.

Gegeben: Anfangsladezustände,
Anfangszuordnung von Wechselbatterien und Fahrzeugen,
Anfangszuordnung von Ladestellen und Wechselbatterien

```
1 Baue für jede Wb. eine Einsatzsequenz
2   mit einer Einsatzakt. entsprechend Anfangszuordnungen auf
3 Lege für jede Tauschspur ext die Warteschlangen pndDrpOffext, pndPckUpext an
4 für jede Zeitscheibe des Planungszeitraums
5   Berechne Ladezustände im Zeitverlauf
6   Behandle alle Abgaben von Wechselbatterien an die Station
7     über eine Tauschspur ext; pndDrpOffext  $\boxtimes$   $\emptyset$ 
8     wähle/designiere ① ggf. eine der verfügbaren Ldst. und ...
9     merke Zuordnung einer Ldst. zur abgegebenen Wb. hinzuzufügen
10    merke Zuordnung der abgegebenen Wb. zum Fzg. zu streichen
11    pndPckUpext  $\leftarrow$  pndDrpOffext
12    wtdrpOffVehs  $\leftarrow$  Verzeichne die wartenden/abgebenden Fahrzeuge
13 Behandle alle Aufnahmen von Wechselbatterien von der Station
14   über eine Tauschspur ext; pndPckUpext  $\boxtimes$   $\emptyset$ 
15   wähle/designiere ③ ggf. eine der frisch geladenen Wb. und ...
16   merke Zuordnung der geräumten Ldst. zur aufgenommenen Wb. zu streichen
17   merke Zuordnung der aufgenommenen Wb. zum Fzg. hinzuzufügen
18   pckUpBats  $\leftarrow$  Verzeichne die aufgenommenen Wechselbatterien
19   activeVehs  $\leftarrow$  Bestimme aus Zuordnungen zwischen Wb. und Fzg. alle aktiven Fzg.,
20   ausgenommen wtdrpOffVehs
21 Baue für alle aktiven Fzg. activeVehs Transportaktivitäten und
22   korrespondierende mobile Einsatzakt. der Wb. an (falls nicht vorhanden)
23 Etabliere neu begründete Transportakt./mob. Einsatzakt. oder schreibe d. fort
24   Schau voraus, ob die Wb. in Ausstattung den Reservebereich erreicht und
25   wähle/designiere ② ggf. zu einer Station eine Tauschspur und
26   pndDrpOffext  $\leftarrow$  ordne an, dass sich das Fzg. dorthin begibt
27   sttBats  $\leftarrow$  Bestimme aus Zuordnungen zwischen Ldst. und Wb.
28   alle in Station befindl. Wb., ausgenommen pckUpBats
29 Baue für alle in d. Station befindlichen Wb. sttBats stationäre Einsatzakt. an
30   (falls nicht vorhanden)
31 Etabliere neu begründete stationäre Einsatzakt. oder schreibe diese
32   mit maximal zulässiger Ladeleistung ④ fort
33 Aktualisiere Zuordnungen
34 wiederhole
```

Ist einer Wechselbatterie ein Fahrzeug zugeordnet, so ist dieses Fahrzeug grundsätzlich im Fahrbetrieb aktiv. Allerdings sind davon zu dieser Zeit alle Fahrzeuge auszunehmen, die just beim Zugang zur Station bzw. in der Station warten oder eine Wechselbatterie abgeben. Falls für die betrachtete Zeitscheibe nicht bereits vorhanden, werden in der Einsatzsequenz eines aktiven Fahrzeugs eine Transportaktivität und in der Einsatzsequenz der zugeordneten Wechselbatterie eine mobile Einsatzaktivität angebaut. Diese werden dann in der Zeit mit einem Vorgang fest etabliert oder fortgeschrieben (Zeile 19-26). Die Entladeleistung fällt vorläufig gemäß der Transportanforderungen dieser Zeitscheibe aus dem Transportauftragsprogramm des Fahrzeugs aus. Dies entspricht der Zuordnungsregel, als bald und so viel wie möglich von den gestellten Transportanforderungen abzudecken. Nachdem die Entladeleistung für die betreffende Wechselbatterie herausgefunden ist, wird bis zum Ende der aktuell betrachteten Zeitscheibe auf die Ladezustandsentwicklung hinausgeblickt. Falls sich der Ladezustand in den Reservebereich hinein entwickeln würde, wird die Entladeleistung letztlich so gewählt, dass sich der Ladezustand voraussichtlich exakt an die Grenze des Reservebereichs entwickelt. In diesem Fall ist zugleich die mobile Einsatzaktivität der betreffenden Wechselbatterie zu Ende zu führen. An dieser Stelle wird das Warteschlangenprinzip wieder aufgegriffen. Aus einer Menge der Tauschspuren ② wird eine für die bevorstehende Batteriewechselaktivität ausgewählt.

Es wird angeordnet, dass sich das Fahrzeug an die betreffende Station begibt, indem das Fahrzeug bei dieser Tauschspur in die Abgabeliste eingetragen wird.

Ist einer Ladestelle eine Wechselbatterie zugeordnet, ist diese grundsätzlich in einer Station kontaktiert und bereit geladen zu werden. Allerdings sind davon zu dieser Zeit alle Wechselbatterien auszunehmen, die just von einem Fahrzeug aufgenommen werden. Falls für die betrachtete Zeitscheibe nicht bereits vorhanden, wird in der Einsatzsequenz einer in der Station befindlichen Wechselbatterie eine stationäre Einsatzaktivität angebaut. Diese wird dann in der Zeit mit einem Vorgang fest etabliert oder fortgeschrieben (Zeile 27-31). Die Ladeleistung fällt vorläufig so hoch ⁴ wie maximal zulässig aus. Dies entspricht der Zuordnungsregel, das Laden sofortig zu beginnen und so rasch wie möglich zu vollführen.

Beispiel 8 *Grobplanung für den Einsatz von Fahrzeugen und Wechselbatterien*

In **Abbildung 67** wird dargestellt, wie die eingegebenen Anfangsstandorte verwendet werden, um den Einsatzsequenzen von Fahrzeugen und Wechselbatterien ein Startelement hinzuzufügen. Für den Anfang im Planungszeitraum ist klar, welchen Ladezustand eine Wechselbatterie aufweist und wo sie sich befindet. Für jede Wechselbatterie, die als Ausstattung eines Transportfahrzeugs fungiert, wird in der ersten Zeitscheibe eine mobile Batterieeinsatzaktivität begonnen.

Im abgebildeten Beispiel sind die Wechselbatterie 'BAT1' dem Fahrzeug 'AGV61' und die Wechselbatterie 'BAT2' dem Fahrzeug 'AGV57' anfänglich zugeordnet. Aus dem mobilen Gebrauch mit den Wechselbatterien lässt sich herleiten, dass sich die Transportfahrzeuge 'AGV57', ..., 'AGV61' und weitere zu Anfang im Fahrbetrieb befinden und ihre individuell vorhergesehenen Auftragsprogramme  absolvieren. Die Wechselbatterien 'BAT1', 'BAT2' und weitere werden gemäß der gestellten Transportanforderungen der Fahrzeuge  entladen. Zum Beispiel steckt die Wechselbatterie 'BAT1' in dem Fahrzeug 'AGV61' und wird dem hohen Fahranteil entsprechend mit einer Leistung von 30 kW entladen. Das Fahrzeug 'AGV57' weist zu dieser Zeit einen geringeren Fahranteil auf, so dass die Wechselbatterie 'BAT2' beispielsweise lediglich eine Entladeleistung  von 24 kW hat. Anders wird für jede Wechselbatterie, die sich in der Batteriewechselstation aufhält, in der ersten Zeitscheibe des Planungszeitraums eine stationäre Batterieeinsatzaktivität begonnen. Zum Beispiel befindet sich die Wechselbatterie 'BAT3' an einer der Ladestellen in der Station 'STTA'. Dort wird sie beispielsweise mit einer für Blei-Batteriesysteme maximalen Leistung von 48 kW  geladen.

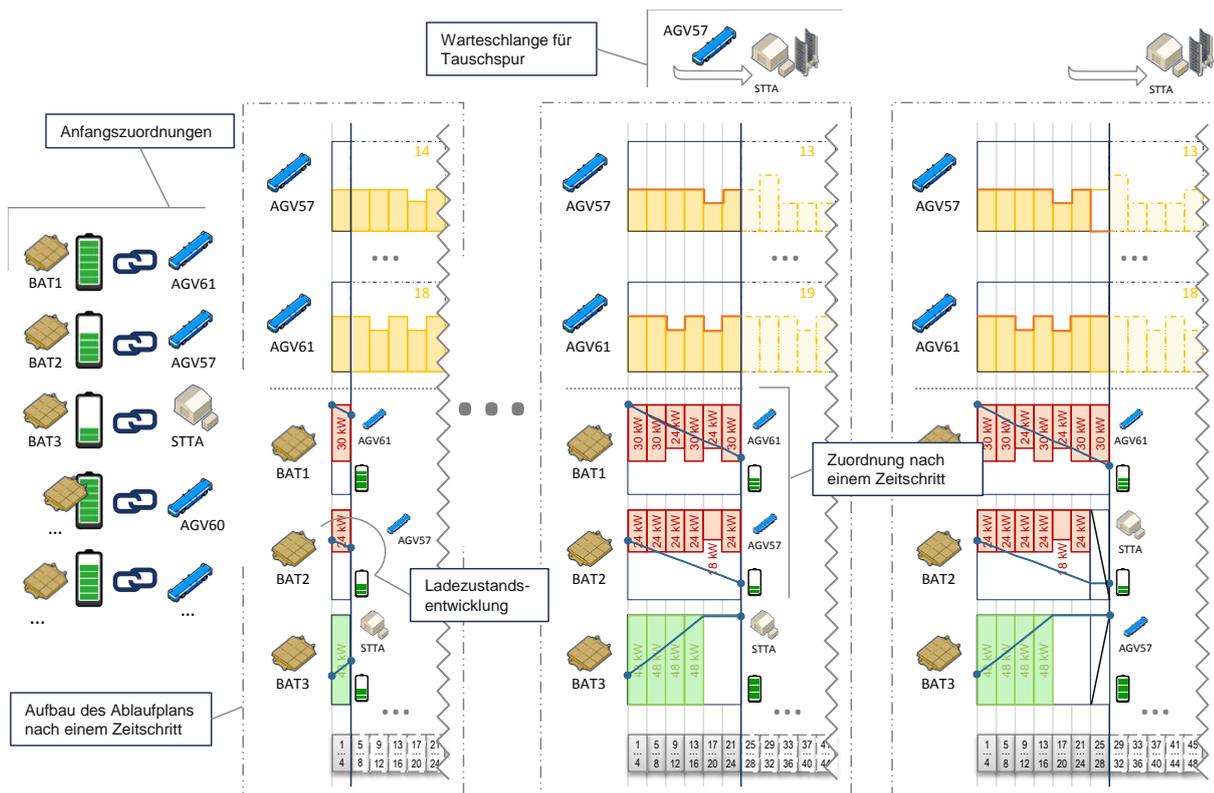


Abbildung 67 Erstellung von Einsatzaktivitäten zum Auftakt des Planungshorizonts gemäß Anfangsstandorten

Zum weiteren Aufbau eines Plans wird der Planungszeitraum von vorne bis hinten durchschritten. In jedem Zeitschritt wird für sich genommen versucht, für die bis dahin im Plan ungenutzten Ressourcen neue Batterieeinsatzaktivitäten zu begründen oder die laut Plan bereits in Gang gesetzten Batterieeinsatzaktivitäten geeignet fortzusetzen. Wie es in **Abbildung 67** ersichtlich ist, bleiben dabei die Ressourcenzuordnungen über weite Strecken bestehen. Nachdem eine Zeitscheibe abschließend betrachtet wurde, werden die Zuordnungen zwischen Fahrzeugen und Wechselbatterien für die nächste zu betrachtende Zeitscheibe übernommen. Von einer Zeitscheibe zur nächsten müssen stets die Transportanforderungen $\#$ erfüllt werden, die für die Transportfahrzeuge im Einzelnen vorgesehen sind. Die Intensität des Fahrbetriebs bzw. der Fahranteil eines Fahrzeugs ist maßgebend dafür, mit welcher Leistung die zugeordnete Wechselbatterie in der betreffenden Zeitscheibe entladen wird. Im Block der Zeitscheiben Nr. 1 bis Nr. 4 ist dem Fahrzeug 'AGV61' die Wechselbatterie 'BAT1' zugeordnet und diese wird mit einer Leistung von 30 kW entladen. Bei der Ladezustandsberechnung fällt die Wechselbatterie 'BAT1' zum Beispiel von zuvor 288 kWh nach einer Stunde Fahrbetrieb auf 258 kWh. Nach mehreren Blöcken von Zeitscheiben ist die Wechselbatterie 'BAT1' im Verlauf des Fahrbetriebs von Transportfahrzeug 'AGV61' auf einen Ladezustand von 120 kWh abgefallen. Die Entladeleistung für die Wechselbatterie 'BAT1' schwankt in diesem Zeitverlauf genauso wie die Intensität des Fahrbetriebs von Fahrzeug 'AGV61'. Es ist durch die Eingabedaten fest vorgesehen, dass das Fahrzeug 'AGV61' im Block der Zeitscheiben Nr. 13-16 höhere Transportanforderungen zu erfüllen hat als beispielsweise im Block der Zeitscheiben Nr. 17-20.

In den Zeitscheiben Nr. 21-24 gelangt bei der Wechselbatterie 'BAT1' ein Entladezyklus zum Ende, da der Ladezustand das Reserveniveau erreicht hat. Das betreffende Fahrzeug hat Bedarf für einen Batterietausch und wird in eine Warteschlange für die Tauschspuren der Station 'STTA' gehängt. Folglich wird in den nächsten Zeitscheiben versucht, die Abgabe von Fahrzeug 'AGV57' an die Station ein-

zuplanen. Wann die Abgabe tatsächlich erfolgt und das Fahrzeug in die Station einfahren kann, hängt von der Ressourcenverfügbarkeit der Tauschspuren ab. Die Zuordnung zwischen Batterie und Fahrzeug muss darum in den Zeitscheiben Nr. 21-24 vorerst aufrechterhalten bleiben. In den nächsten Zeitscheiben Nr. 25-28 ergibt es sich dann, dass die Abgabe der Wechselbatterie 'BAT1' zeitlich mit der Aufnahme einer frisch geladenen Wechselbatterie 'BAT3' einhergeht. In der Zeit des Batterietausches kann das Fahrzeug 'AGV57' in der Warteschlange nicht für Transportaufträge eingesetzt werden.

II. Feinplanung von Ladeverläufen

Bei der Feinplanung der Ladeverläufe kann auf Einsatzsequenzen der Wechselbatterien zurückgegriffen werden. Darin sind unter anderem die Stationsaufenthaltszeiträume einschließlich des Eingangs- und Ausgangsladezustands der Wechselbatterie vermerkt.

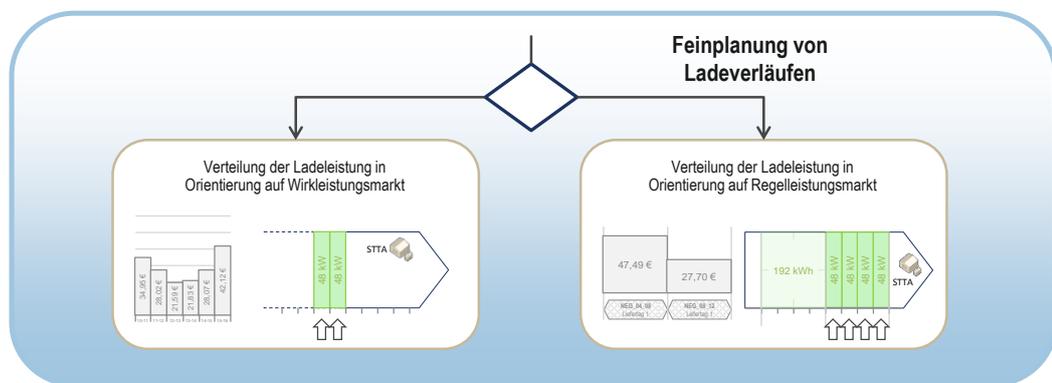


Abbildung 68 Übersicht der Konstruktionsschritte bei der Feinplanung der Ladeverläufe

In diesem zweiten Problemlösungsmodul geht es darum, die Freiheitsgrade für die Festlegung von Ladeleistung in der Orientierung auf den Stromgroßhandel und den Regelleistungsmarkt bestmöglich zu nutzen. In einem gesonderten Konstruktionsschritt lassen unter spezifischen Optimierungsgesichtspunkten die Ladeverläufe für die Wechselbatterien während ihres Aufenthalts in der Station planen. Wie in **Abbildung 68** mit der Verzweigung verdeutlicht wird, kann die Verteilung der Ladeleistung innerhalb des Stationsaufenthaltszeitraums entweder in Orientierung auf den Stromgroßhandel oder den Regelleistungsmarkt durchgeführt werden. In **Tabelle 9** findet sich eine Übersicht von Konstruktionsstrategien, die für eine Feinplanung des Ladeverlaufs angewandt werden können.

Tabelle 9 Übersicht von Prioritäten- und Auswahlregeln in der Grobplanung bei der Ablaufplankonstruktion

	Planungsebene	Kurzbeschreibung
	Ladeverläufe (Feinplanung)	
	Orientierung auf Stromgroßhandel	
	(F) 1 Minimum an Strombezugskosten	Es werden alle Zeitscheiben der stationären Batterieeinsatzaktivität in eine Liste gebracht und nach dem für sie prognostizierten/mitgeteilten Strombezugspreis sortiert. In aufsteigender Reihenfolge wird diesen Zeitscheiben nach und nach die fragliche Ladeleistung zugeordnet/an diese verteilt.

	Orientierung auf Regelleistungsmarkt	
Ⓕ 2	Maximum an Leistungspreiserlösen durch Minutenreserve	Es werden alle Zeitscheiben der stationären Einsatzaktivität in eine Liste gebracht und nach den prognostizierten Preisen von Minutenreserveprodukten sortiert, in deren Produktperioden sie zeitlich eingeschlossen sind. Die Ladeleistung wird primär in den Zeitabschnitten des Stationsaufenthalts verteilt, in denen Minutenreserveprodukte mit positiver Regelrichtung zu hohen Preisen oder Minutenreserveprodukte mit negativer Regelrichtung zu niedrigen Preisen gehandelt werden.
	Gegenwärtiger Automatisierungsstand	
Ⓕ 3	Höchste Verfügbarkeit von Wechselbatterien	Die Ladeleistung wird ganz vorne in den Stationsaufenthaltszeitraum gepackt.

Orientierung auf den Stromgroßhandel

Insoweit die Zeiträume der Stationsaufenthalte der Wechselbatterien feststehen, gibt es ein Minimum an Kosten für den Strombezug.

Programmauflistung 2 *Planung des Ladeverlaufs in Orientierung auf den Stromgroßhandel*

Jede der stationären Einsatzaktivitäten wird in beliebiger Reihenfolge für sich betrachtet. Angesichts der Eintritts-/Austrittsrestriktionen für den Ladezustand wird ermittelt, wie viel elektrische Energie innerhalb des Stationsaufenthaltszeitraums über die betreffende Wechselbatterie nachzuführen ist.

Gegeben: Einsatzsequenzen der Wechselbatterien,
Angebotszeiträume/Produktperioden von Minutenreserveprodukten und
ihre prognostizierten Regelleistungspreise

- 1 für jede stationäre Einsatzaktivität **sbu** in **bus**
- 2 Ermittle wie viel elektrische Energie nachzuführen ist **chargeEnergy**
- 3 Stecke **hrs** Liste von Stundenkontraktperioden für **sbu** ab;
- 4 für jede abgesteckte St.Kontraktperiode **hr** in aufsteigender Reihenfolge
- 5 Merke reihum für die Zeitscheiben im überlappten Aufenthaltsabschnitt
- 6 bis Obergrenze **chargeEnergy** gleichmäßig Ladeleistung vor
- 7 wiederhole
- 8 wiederhole

Über den Start- und Endzeitpunkt der stationären Einsatzaktivität wird eine Liste der sogenannten Stundenkontraktperioden abgesteckt, welche sich mit dem Stationsaufenthaltszeitraum überlappen. Diese werden aufsteigend in der Reihenfolge der prognostizierten Markträumungspreise durchlaufen, bis in den Vorgängen der stationären Einsatzaktivität so viel Ladeleistung festgelegt ist, dass die elektrische Energie wie eingangs und ausgangs bedingt nachgeführt wird. Zu der jeweiligen Stundenkontraktperiode wird die Ladeleistung wo möglich gleichmäßig in die darin befindlichen Zeitscheiben vorgemerkt.

Beispiel 9 Feinplanung eines Ladeverlaufs nach Maßgabe des Stromgroßhandels

In **Abbildung 69** ist ein Auszug aus einem Ablaufplan mit der Einsatzsequenz für die Wechselbatterie 'BAT5' zu sehen. Es ist geplant, dass sie sich von der Zeitscheibe Nr. 17 bis einschließlich Zeitscheibe Nr. 80 in der Station 'STTA' aufhält. Nach grober Ablaufplanung wird bedingt, dass diese Wechselbatterie mit einem Ladezustand auf Reserveniveau in die Station eingeht und sie im Vollladezustand wieder verlässt. Es sind in der abgebildeten stationären Einsatzaktivität 288 kWh elektrischer Energie nachzuführen.

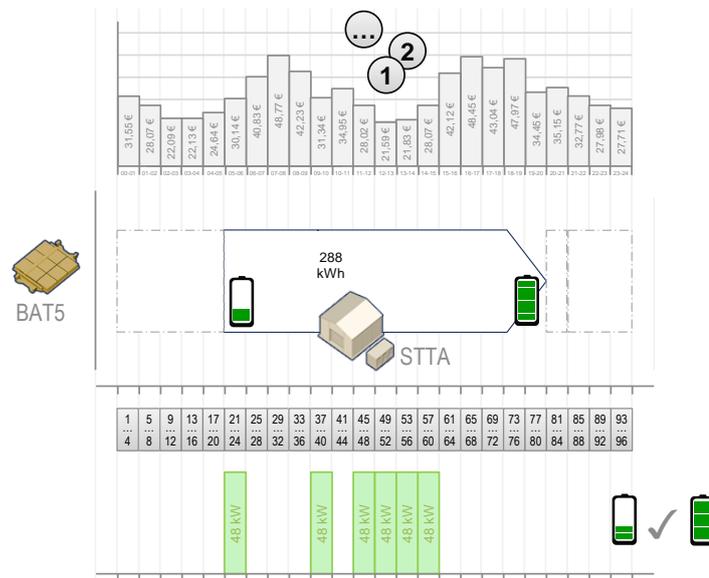


Abbildung 69 Bildung von Teilladeverläufen nach Maßgabe von Stundenauktionspreisen

Im oberen Teil von **Abbildung 69** sind die für Stundenkontrakte aus dem Vortagshandel prognostizierten Markträumungspreise zeitlich aufgestellt. Für den Strombezug in der Stunde 19 des Tages (18-19) wäre beispielsweise mit einem Preis von 47,97 EUR pro MWh zu rechnen; in der Stunde 3 des Tages (02-03) wäre der Strom in diesem Beispiel zu einem vergleichsweise niedrigen Preis von 22,09 EUR pro MWh zu beziehen.

Im unteren Teil von **Abbildung 69** sind Teilladeverläufe gezeigt, so wie sie in Betrachtung der Stundenauktionen gebildet werden, um Ladeleistung in der stationären Einsatzaktivität anzubringen.

Als Erstes wird der Kontrakt für die Stunde 13 ① betrachtet. In einem Teilladeverlauf wird für diesen Stundenblock von Zeitscheibe Nr. 49-52 eine Ladeleistung in Höhe von 48 kW vorgemerkt. Als Zweites wird der nächstniedrigste Kontrakt für die Stunde 14 ② in den Blick genommen. Im Teilladeverlauf wird für diesen Stundenblock von Zeitscheibe Nr. 53-56 eine Ladeleistung in Höhe von 48 kW vorgemerkt. Und so geht es weiter.

Orientierung auf den Regelleistungsmarkt

Insoweit die Zeiträume der Stationsaufhalte der Wechselbatterien feststehen, gibt es ein Maximum an Zu- und Abschaltpotenzial, das für eine bestimmte Produktperiode für Minutenreserve eingerichtet werden kann.

Es kann ausgehend von einem Stationsaufenthalt höchstens so viel positive Minutenreserveleistung angeboten werden, wie Ladeleistung in eine entsprechende Produktperiode festgelegt und im Anschluss nach der Produktperiode noch ebenso viel oder mehr von der maximal zulässigen Ladelei-

tung ausgespart werden kann. Ist ein Angebot positiver Regelleistung am lukrativsten einzuschätzen, so gibt es kein Vertun, dass die Ladeleistung in die entsprechende Produktperiode verteilt wird. Die Verteilung in diese Zeitscheiben erfolgt praktisch nach der Primärreihenfolge. Andersherum kann höchstens so viel negative Minutenreserveleistung angeboten werden, wie Ladeleistung innerhalb des Stationsaufenthalts im Anschluss nach der Produktperiode festgelegt und in einer entsprechenden Produktperiode ausgespart werden kann. Ist ein Angebot negativer Regelleistung am lukrativsten einzuschätzen, so ist fraglich, in welche von den anderen Produktperioden im Anschluss an die entsprechende Produktperiode denn die Ladeleistung zu platzieren ist. Die Verteilung muss sich nach einer Sekundärreihenfolge richten, über die sichergestellt wird, dass die Festlegung von Ladeleistung nicht etwa eine Ausparung von Ladeleistung bei einer nächstbesten Produktperiode für das Angebot negativer Regelleistung verhindert und diese somit einer Ausprägung von Zuschaltpotenzial beraubt, welches in Gebrauch zu nehmen wäre.

Es werden vorrangig im Zusammenhang mehrerer ausgelasteter Ladestellen bzw. Stationsaufenthalte Angebotsschnipsel für eine höher bewertete Produktperiode entschieden als vereinzelt mit nur einer Ladestelle einen kompletten vierstündigen Angebotsblock zu beschließen.

Es ist dann unmöglich, die angebotene Regelleistung zu steigern, ohne dass Ladeleistung umverteilt werden muss, die durch einen Angebotsschnipsel oder ein Stück eines Komplettangebots für eine höherwertigere Produktperiode gebunden ist. Es wird demnach für einen Stationsaufenthalt einer Wechselbatterie nur dann Ladeleistung ungebunden/frei zuordenbar verbleiben, wenn sich daraus nicht mal im Zusammenhang mit möglichen Angebotsschnipseln der Stationsaufenthalte anderer Wechselbatterien ein Komplettangebot erstellen lässt.

Programmauflistung 3 *Planung des Ladeverlaufs in Orientierung auf den Regelleistungsmarkt*

Wie oben erläutert, wird angesichts der Eintritts-/Austrittsrestriktionen für den Ladezustand ermittelt, wie viel elektrische Energie innerhalb des Stationsaufenthaltszeitraums über die betreffende Wechselbatterie nachzuführen ist.

Über den Start- und Endzeitpunkt der stationären Einsatzaktivität wird eine Liste von Produktperioden der Minutenreserveprodukte abgesteckt, welche sich mit dem Stationsaufenthaltszeitraum überlappen. Diese werden absteigend in der Reihenfolge der prognostizierten Regelleistungspreise durchlaufen, bis in den Vorgängen der stationären Einsatzaktivität so viel Ladeleistung festgelegt ist, dass die elektrische Energie (wie es eingangs und ausgangs bedingt ist) nachgeführt wird. In Bezug auf die stationäre Einsatzaktivität wird mit der Betrachtung einer Produktperiode ein Teilladeverlauf vorgemerkt. Für jede Zeitscheibe der aktuell betrachteten Produktperiode wird bestimmt, wie viel Ladeleistung unter Berücksichtigung der bereits angelegten Teilladeverläufe noch hineingelegt bzw. gegenüber der vorgemerkten Ladeleistung noch ausgespart werden kann. Diese einzelnen Leistungswerte werden über die Dauer der Zeitscheiben integriert und zu einer Menge elektrischer Energie zusammengerechnet, die höchstens noch in dem aktuellen Aufenthaltsabschnitt platziert werden kann.

Gegeben: Einsatzsequenzen der Wechselbatterien,
Angebotszeiträume/Produktperioden von Minutenreserveprodukten und
ihre prognostizierten Regelleistungspreise

```
1  für jede stationäre Einsatzaktivität sbu
2  Ermittle wie viel elektrische Energie nachzuführen ist chargeEnergy
3  Stecke pps Liste von Produktperioden für sbu ab;
4  für jede abgesteckte Produktperiode pp in absteigender Reihenfolge
5  falls pp negative Regelrichtung ist
6  Bestimme wie viel elektrische Energie energyToSpare
7  im überlappten Aufenthaltsabschnitt ausgespart werden kann,
8  höchstens chargeEnergy
9  Bilde ppffs Liste von nachfolgenden Produktperioden zu pp
10 in negativer Regelrichtung
11 für jede nachfolg. Produktper. ppff aus ppffs in aufsteigender Reihenf.
12 Merke reihum für die Zeitscheiben in ppff Ladeleistung vor und
13 zähle bis Obergrenze energyToSpare hoch
14 wiederhole
15 anderenfalls pp positive Regelrichtung ist
16 Bilde ppffs Liste von nachfolgenden Produktperioden zu pp
17 in positiver Regelrichtung
18 für jede nachfolg. Produktper. ppff aus ppffs in aufsteigender Reihenf.
19 Zähle für die Zeitscheiben in ppff hoch,
20 wie viel elektrische Energie energyToSpare ausgespart werden kann,
21 höchstens chargeEnergy
22 wiederhole
23 Merke reihum für die Zeitscheiben im überlappten Aufenthaltsabschnitt
24 bis Obergrenze energyToSpare Ladeleistung vor
25 ende
26 wiederhole
27 wiederhole
```

Falls die aktuell betrachtete Produktperiode für ein Minutenreserveprodukt in negativer Regelrichtung steht, so ist die Ladeleistung in eben dieser Produktperiode auszusparen bzw. durch den Verzicht auf Ladeleistung in den jeweiligen Zeitscheiben ein Zuschaltpotenzial auszuprägen. Im Weiteren würde von einem solchen Zuschaltpotenzial allerdings nur dann zu Angebotszwecken Gebrauch gemacht werden können, wenn hinten heraus noch ein Abschaltpotenzial zu Kompensationszwecken geweckt werden kann. Darum wird die Aussparung der Ladeleistung in dieser Zeit darauf begrenzt, wie viel Ladeleistung in Zeitscheiben in nachfolgende Produktperioden gelegt werden kann, um dort wiederum Abschaltpotenzial hervorzurufen. Alle nachfolgenden Produktperioden werden dabei in aufsteigender Reihenfolge der prognostizierten Regelleistungspreise für ein Angebot negativer Regelleistung betrachtet; die Ladeleistung wird wo möglich reihum in die darin befindlichen Zeitscheiben vorgemerkt.

Anderenfalls die aktuell betrachtete Produktperiode für ein Minutenreserveprodukt in positiver Regelrichtung steht, so ist die Ladeleistung in eben dieser Produktperiode zu legen und damit ein Abschaltpotenzial auszuprägen. Im Weiteren würde von einem solchen Abschaltpotenzial allerdings nur dann zu Angebotszwecken Gebrauch gemacht werden können, wenn hinten heraus noch ein Zuschaltpotenzial zu Kompensationszwecken geweckt werden kann. Darum wird die Verteilung der Ladeleistung in dieser Zeit darauf begrenzt, wie viel Ladeleistung in Zeitscheiben in nachfolgende Produktperioden ausgespart werden kann, um dort Zuschaltpotenzial hervorzurufen. Alle nachfolgenden Produktperioden werden dabei in aufsteigender Reihenfolge der prognostizierten Regelleistungspreise für ein Angebot positiver Regelleistung betrachtet; die Ladeleistung wird wo möglich reihum in die darin befindlichen Zeitscheiben vorgemerkt.

Beispiel 10 Feinplanung eines Ladeverlaufs nach Maßgabe von Regelleistungspreisen

In **Abbildung 70** ist ein Auszug aus einem Ablaufplan mit der Einsatzsequenz für die Wechselbatterie 'BAT1' zu sehen. Es ist geplant, dass sie sich von der Zeitscheibe Nr. 13 bis einschließlich Zeitscheibe Nr. 72 in der Station 'STTA' aufhält. Nach grober Ablaufplanung wird bedingt, dass diese Wechselbatterie mit einem Ladezustand auf Reserveniveau in die Station eingeht und sie im Vollladezustand wieder verlässt. Es sind in der abgebildeten stationären Einsatzaktivität 288 kWh elektrischer Energie nachzuführen.

Im oberen Teil von **Abbildung 70** sind die Produktperioden und die für die jeweiligen Minutenreserveprodukte prognostizierten Regelleistungspreise zeitlich aufgestellt. Für ein Angebot von negativer Regelleistung von Stunde 5 bis Stunde 8 (NEG_04_08) ^{NEG_04_08} Liefertag 1 wäre beispielsweise mit einem Preis von 47,49 EUR pro MW zu rechnen sein; ein Angebot positiver Regelleistung von Stunde 13 bis Stunde 16 (POS_12_16) ^{POS_12_16} Liefertag 1 wäre mit 7,91 EUR pro MW bewertet.

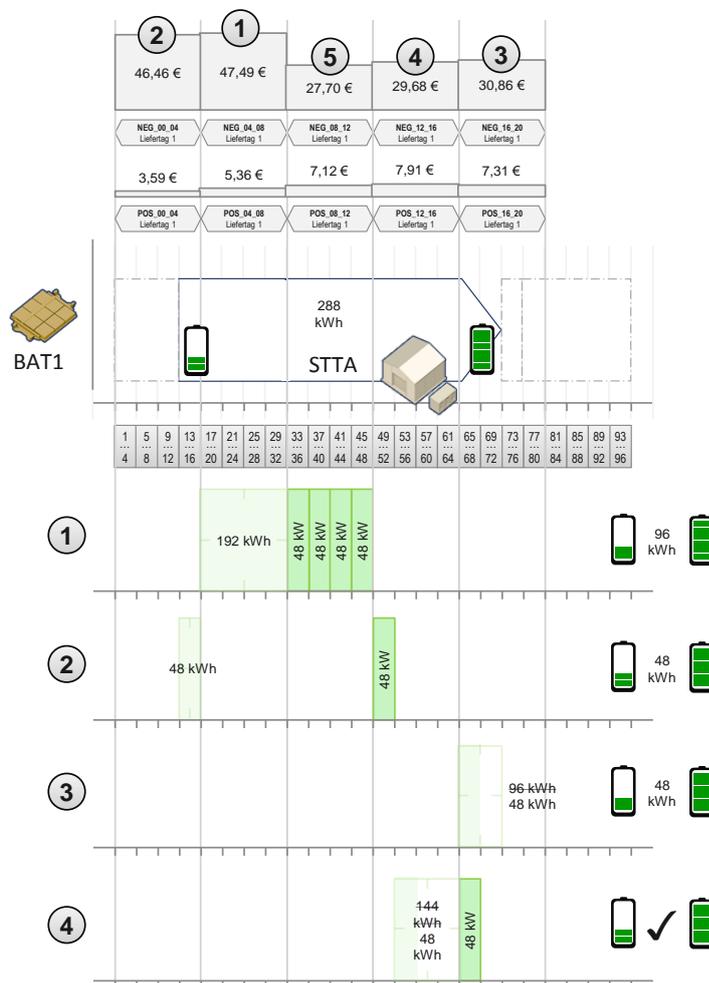


Abbildung 70 Bildung von Teilladeverläufen nach Maßgabe von Regelleistungspreisen

Im unteren Teil von **Abbildung 70** sind Teilladeverläufe gezeigt, so wie sie in Betrachtung der Produktperioden nach und nach gebildet werden, um Ladeleistung in der stationären Einsatzaktivität anzubringen.

Zuerst wird die Produktperiode von der Zeitscheibe Nr. 17 bis einschließlich Nr. 32 für negative Regelleistung (NEG_04_08) ① betrachtet. Der gesamte Aufenthaltsabschnitt steht bislang frei; es würde dort Zuschaltpotenzial in einer Menge von insgesamt 192 kWh elektrischer Energie eingestellt

werden können. Es folgen für ein Angebot negativer Regelleistung die Produktperioden in den Stunden 9 bis 12 (NEG_08_12), den Stunden 13 bis 16 (NEG_12_16) sowie den Stunden 17 bis 20 (NEG_16_20) nach. Von diesen weist die Produktperiode in den Stunden 9 bis 12 (NEG_08_12) den niedrigsten Regelleistungspreis auf. In einem Teilladeverlauf wird für die darin befindlichen Stundenblöcke von Zeitscheibe Nr. 49-52, Nr. 53-56 und so weiter jeweils eine Ladeleistung in Höhe von 48 kW vorgemerkt.

Als Zweites wird die Produktperiode von der Zeitscheibe Nr. 1 bis einschließlich Nr. 16 für negative Regelleistung (NEG_00_04) ② betrachtet. Diese wird vom Stationsaufenthalt zeitlich am vorderen Ende im Stundenblock der Zeitscheiben Nr. 13-16 angeschnitten. Dementsprechend würde dort bloß Zuschaltpotenzial von insgesamt 48 kWh elektrischer Energie ausgeprägt werden können. Es folgen für ein Angebot negativer Regelleistung die Produktperioden in den Stunden 5 bis 8 (NEG_04_08), den Stunden 9 bis 12 (NEG_08_12) und so weiter nach. Zwar ist unter diesen für die Produktperiode in den Stunden 9 bis 12 der niedrigste Regelleistungspreis prognostiziert worden. Jedoch ist mit vorhandenen Teilladeverläufen im entsprechenden Aufenthaltsabschnitt bereits durchgehend eine maximale Ladeleistung vorgemerkt. Es muss also in die Produktperiode in den Stunden 13 bis 16 mit dem nächstniedrigsten prognostizierten Regelleistungspreis ausgewichen werden. In einem Teilladeverlauf wird für den ersten darin befindlichen Stundenblock von Zeitscheibe Nr. 49-52 eine Ladeleistung in Höhe von 48 kW vorgemerkt.

Als Drittes wird die Produktperiode von der Zeitscheibe Nr. 65 bis einschließlich Nr. 80 für negative Regelleistung ③ betrachtet. Diese wird vom Stationsaufenthalt mit dem hinteren Ende zeitlich in den Stundenblöcken der Zeitscheiben Nr. 65-68 und Nr. 69-72 angeschnitten. Es würde dort ein Zuschaltpotenzial von insgesamt 96 kWh elektrischer Energie ausgeprägt werden können, wobei es in der stationären Einsatzaktivität nur noch eine Restmenge von 48 kWh anzubringen gilt. Da allerdings keinerlei Produktperioden mehr im Stationsaufenthaltszeitraum nachfolgen, kommen für den Teilladeverlauf keine Vormerkungen zu Stande.

Als Viertes wird die Produktperiode von der Zeitscheibe Nr. 49 bis einschließlich Nr. 64 für negative Regelleistung (NEG_12_16) ④ betrachtet. Dort würde ein Zuschaltpotenzial in Höhe von 144 kWh elektrischer Energie ausgeprägt werden können. Der Stundenblock in den Zeitscheiben Nr. 49-52 ist aufgrund der in vorhandenen Teilladeverläufen vorgemerkten Ladeleistung auszunehmen. Weiterhin ist nur noch eine Restmenge von 48 kWh in der stationären Einsatzaktivität anzubringen. Es folgt die Produktperiode in der Stunde 16 bis 20 (NEG_16_20) nach. In einem Teilladeverlauf wird für den ersten darin befindlichen Stundenblock von Zeitscheibe Nr. 65-68 eine Ladeleistung in Höhe von 48 kW vorgemerkt.

B. Ablaufplanmodifikation

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie ein Ablaufplan durch das Verrücken eines Batterietausches umgestellt werden kann. Es sind dabei Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen sowie Synchronitätsbeziehungen (Präzedenzen) zwischen den Einsatzaktivitäten der Wechselbatterien zu beachten. Entlang dieser Beziehungen können sich im Zuge einer Ablaufplanumstellung eine zeitliche Verschiebung und auch eine Ladezustandsveränderung innerhalb des Plans fortspinnen und sogar verstärken. Daher muss beim Überarbeiten der Batterieeinsatzaktivitäten das Prinzip verfolgt werden, im Übergang zur vorausgehenden/nachfolgenden Batterieeinsatzaktivität eine Ladezustandsveränderungen durch das Streichen/Hinzugeben von Lade-/Entladeleistung direkt glatt zu stellen und eine zeitliche Verschiebung durch Heraustrennen/Hineinfügen von Vorgängen abzdämpfen.

I. Verrücken eines Batterietausches

Eine Modifikationsschablone schreibt vor, wie ein Ablaufplan umgestellt werden kann, um aus einem vorliegenden Planungsstand zu einem nächsten Planungsstand zu gelangen. Sie sagt etwas darüber aus, wie Anforderungen zur Veränderung bestimmter Batterieeinsatzaktivitäten an den Ablaufplan heranzutragen sind. In einer Modifikationsschablone sind Anforderungen von zeitlichen Veränderungen und/oder Ladezustandsveränderungen für eine gewisse Typkonstellation von Batterieeinsatzaktivitäten vorgesehen.

Sämtliche gegenüber dem ursprünglichen Ablaufplan angeforderten Veränderungen sowie die bereits getätigten Veränderungen an den Batterieeinsatzaktivitäten werden festgehalten.

DEFINITION: **Veränderungsinformationen (Muss/Soll-Werte und Kann/Ist-Werte)**

Im Rahmen der Ausübung einer Modifikation eines Ablaufplans sei ein Zwischenstand mit dem Präzedenzgraph $\mathcal{d} = (V_{\mathcal{d}}, E_{\mathcal{d}}, A_{\mathcal{d}}, \text{src}_{\mathcal{d}}, \text{trg}_{\mathcal{d}}, \text{ann}_{\mathcal{d}})$ gegeben. Für jeden Knoten $v \in V_{\mathcal{d}}$ sind in der Annotation $a = \text{ann}_{\mathcal{d}}(v)$ die Veränderungsinformationen $a \in A_{\mathcal{d}}$ mit $a = (\text{pitinfo}_{\mathcal{d}}^v, \text{socinfo}_{\mathcal{d}}^v)$ enthalten. Diese setzen sich zum einen aus dem Muss/Soll-Wert $\text{pitStartIn}_{\mathcal{d}}^v$ und dem Kann/Ist-Wert $\text{pitStartOut}_{\mathcal{d}}^v$ für die Veränderung des Startzeitpunkts sowie dem Muss/Soll-Wert $\text{pitEndIn}_{\mathcal{d}}^v$ und dem Kann/Ist-Wert $\text{pitEndOut}_{\mathcal{d}}^v$ für die Veränderung des Endzeitpunkts der Batterieeinsatzaktivität zusammen $\text{pitinfo}_{\mathcal{d}}^v = (\text{pitStartIn}_{\mathcal{d}}^v, \text{pitStartOut}_{\mathcal{d}}^v, \text{pitEndIn}_{\mathcal{d}}^v, \text{pitEndOut}_{\mathcal{d}}^v)$. Zum anderen setzen sie sich aus dem Muss/Soll-Wert $\text{socStartIn}_{\mathcal{d}}^v$ und dem Kann/Ist-Wert $\text{socStartOut}_{\mathcal{d}}^v$ für die Ladezustandsveränderung eingangs sowie dem Muss/Soll-Wert $\text{socEndIn}_{\mathcal{d}}^v$ und dem Kann/Ist-Wert $\text{socEndOut}_{\mathcal{d}}^v$ für die Ladezustandsveränderung ausgangs der Batterieeinsatzaktivität zusammen $\text{socinfo}_{\mathcal{d}}^v = (\text{socStartIn}_{\mathcal{d}}^v, \text{socStartOut}_{\mathcal{d}}^v, \text{socEndIn}_{\mathcal{d}}^v, \text{socEndOut}_{\mathcal{d}}^v)$.

Die zeitlichen Veränderungen und die Ladezustandsveränderungen werden jeweils in einer Pastille mit vier Feldern \boxplus unterhalb der betreffenden Batterieeinsatzaktivität im Präzedenzgraphen annotiert. Die zwei Felder auf der linken Seite einer solchen Pastille stehen für die Veränderung des Startzeitpunkts bzw. die Ladezustandsveränderung eingangs; die zwei Felder auf der rechten Seite stehen für die Veränderung des Endzeitpunkts bzw. die Ladezustandsveränderung ausgangs einer Batterieeinsatzaktivität. In die oberen beiden Felder werden angeforderte Veränderungen vermerkt

(Muss/Soll-Felder), mit denen die Umstellung des Ablaufplans angesetzt worden ist oder die sich infolge des aktuellen oder voriger Veränderungsschritte ergeben haben; hinsichtlich des Übertrags der Veränderungen auf andere Batterieeinsatzaktivitäten werden sie auch als Zugänge bezeichnet. In die unteren beiden Felder wird eingetragen, inwieweit die Veränderungen gegenüber dem ursprünglichen Ablaufplan bereits umgesetzt worden sind (Kann/Ist-Felder); sie werden im Hinblick auf den Übertrag der Veränderungen auch als Abgänge bezeichnet. Die Stärke der zeitlichen Veränderung oder auch der Ladezustandsveränderung ist durch die Muss/Soll-Werte abzüglich der Kann/Ist-Werte zu ermitteln. Ein Negativwert für die Stärke einer zeitlichen Veränderung deutet auf eine Verschiebung nach vorne und ein Positivwert auf eine Verschiebung nach hinten hin.

Es ist eine Möglichkeit für die Modifikation eines Ablaufplans, einen Batterietausch zeitlich vorzuziehen oder hinauszuschieben. Ein Batterietausch beruht darauf, dass ein Fahrzeug eine mehr oder weniger entladene Wechselbatterie an eine Station abgibt und eine frisch geladene Wechselbatterie von dort aufnimmt. In **Abbildung 71** ist ersichtlich, welche Typkonstellation von Batterieeinsatzaktivitäten aufzufinden ist. Im Wesentlichen muss eine Batteriewechselaktivität zur Abgabe einer Wechselbatterie mit einer anderen Batteriewechselaktivität zur Aufnahme einer Wechselbatterie zusammenhängen. Letztere umfasst allein den für den Batterietausch relevanten Aufnahmevorgang. Es wird eine beliebige Wechselbatterie *pckbat* von einer Station *stt* mit einem Fahrzeug *veh* aufgenommen. Der Aufnahmevorgang dauert von einem Zeitpunkt $\dot{t}-1$ bis zu einem Zeitpunkt \dot{t} . Ebenso lang dauert die Batteriewechselaktivität zur Aufnahme der Wechselbatterie insgesamt. Im Gegensatz dazu kann eine Batteriewechselaktivität zur Abgabe einer Wechselbatterie zusätzlich zu dem für den Batterietausch relevanten Abgabevorgang noch einen oder mehrere Wartevorgänge umfassen. Sie hat jedenfalls bis zu einem Zeitpunkt \dot{t} zu dauern, so dass die Abgabeaktivität und die Aufnahmeaktivität zum gleichen Zeitpunkt enden. Es wird eine beliebige Wechselbatterie *drpbat* an eine Station *stt* mit einem Fahrzeug *veh* abgegeben.

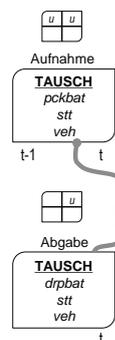


Abbildung 71 Modifikationsschablone für das Vorziehen eines Batterietausches

Eine zeitliche Veränderung des Endzeitpunkts der Aufnahmeaktivität zieht zwangsläufig eine zeitliche Veränderung ihres Startzeitpunkts in gleicher Stärke nach sich. Darüber hinaus ist jede Batteriewechselaktivität zur Abgabe einer Wechselbatterie derart an eine Batteriewechselaktivität zur Aufnahme dieser Wechselbatterie gekoppelt, dass eine zeitliche Veränderung des Startzeitpunkts der Aufnahmeaktivität in gleicher Stärke eine zeitliche Veränderung des Endzeitpunkts der Abgabeaktivität zur Folge hat. Daher sieht die Modifikationsschablone für das Vorziehen/Hinausschieben eines Batterietausches vor, den Start- und Endzeitpunkt der Batteriewechselaktivität zur Aufnahme einer Wechselbatterie und den Endzeitpunkt der Batteriewechselaktivität zur Abgabe dieser Wechselbatterie in einheitlicher Stärke \dot{u} zu verrücken. Zur Abgabe einer Wechselbatterie kann im Ablaufplan

stets die zum Batterietausch gehörige Aufnahme einer Wechselbatterie und umgekehrt herausgefunden werden.

Es richtet sich nach einem Ansatz für eine solche Modifikationsschablone, bei welchen Batterieeinsatzaktivitäten die vorgeschriebenen Veränderungen zum Einstieg in eine Umstellung eines Ablaufplans angefordert werden. In einem Ansatz werden die Elemente der Modifikationsschablone typgerecht und strukturerhaltend auf Batterieeinsatzaktivitäten im Ablaufplan beziehungsweise des zugehörigen Präzedenzgraphs abgebildet.

Beispiel 11 *Modifikationsansatz für das Vorziehen eines Batterietausches*

In **Abbildung 72** ist ein Auszug aus einem Präzedenzgraph und zugehörigem Ablaufplan eines ursprünglichen Planungsstands dargestellt. Es ist beispielhaft geplant, in der Zeitscheibe Nr. t einen Batterietausch vorzunehmen. Das Fahrzeug 'AGV61' wird sich an einer Tauschspur der Station 'STTA' einfinden und dort in der Zeitscheibe Nr. t die Wechselbatterie 'BAT6' abgeben. Gleichzeitig wird es von den Ladestellen an dieser Station die Wechselbatterie 'BAT2' aufnehmen. Vor der endgültigen Abgabe ist geplant, dass das Fahrzeug 'AGV61' eine Zeiteinheit lang wartet.

Der Start- und Endzeitpunkt der Batteriewechselaktivität zur Aufnahme der Wechselbatterie 'BAT2' und der Endzeitpunkt der Batteriewechselaktivität zur Abgabe der Wechselbatterie 'BAT6' sollen nun in diesem Beispiel um eine Zeiteinheit nach links zeitlich vorgezogen werden. Als solches sind diese Aktivitäten im Ablaufplan bzw. Präzedenzgraph farblich hervorgehoben. Das Element vom Typ einer Aufnahmeaktivität aus der Modifikationsschablone wird auf die Aufnahmeaktivität im Ablaufplan abgebildet und so weiter für das Element vom Typ einer Abgabeaktivität. Auch die Beziehung zwischen den beiden Aktivitäten im Ablaufplan wird zu einem Bestandteil des Modifikationsansatzes. Der Wechselbatterievariablen $pckbat$ kann der Bezeichner 'BAT2' zugewiesen werden und so weiter für die Variable $drpbat$. Die Zeitvariable findet dabei mit $\hat{t} = t$ zu einer Übereinstimmung. Daneben werden die Fahrzeugvariable mit $veh = 'AGV61'$ und die Stationsvariable mit $stt = 'STTA'$ unifiziert. Die Variable für die Stärke der Verschiebung wurde beispielsweise für diesen Modifikationsansatz auf $\hat{u} = -1$ beliebig festgelegt.

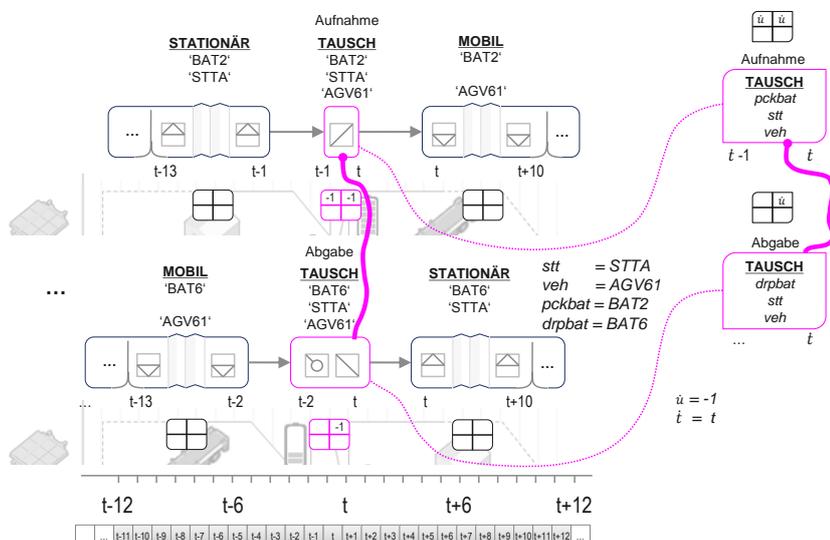


Abbildung 72 Modifikationsansatz für das Vorziehen eines Batterietausches

Die beabsichtigte zeitliche Verschiebung kann dadurch bewirkt werden, dass der Start- und Endzeitpunkt der Batteriewechselaktivität zur Aufnahme nebst dem Endzeitpunkt der Batteriewechselaktivität zur Abgabe der Wechselbatterie um eine Zeiteinheit nach vorne verschoben werden. Entsprechend des Ansatzes werden in die Pastille \boxplus unterhalb der Aufnahmeaktivität der Muss/Soll-Wert von -1 für den Startzeitpunkt und der Muss/Soll-Wert von -1 für den Endzeitpunkt eingetragen. In die Pastille \boxminus unterhalb der Abgabeaktivität wird ansatzkonform der Muss/Soll-Wert von -1 für den Endzeitpunkt geschrieben.

II. Ausübung einer Modifikation

Liegt in einem Planungsstand ein Modifikationsansatz vor, so kann eine Modifikation ausgeübt werden. Dies bedeutet in erster Linie eine oder mehrere Veränderungen an einzelnen Batterieeinsatzaktivitäten innerhalb eines Ablaufplans vorzunehmen. Aufgrund von Abhängigkeiten zwischen den Aktivitäten können solche Veränderungen allerdings auf den gesamten Ablaufplan ausstrahlen. Demnach schließt die Ausübung einer Modifikation in zweiter Linie sämtliche Veränderungsschritte mit ein, die infolge der Abhängigkeiten zwischen den betroffenen Batterieeinsatzaktivitäten erforderlich sein mögen.

DEFINITION: *Ausübung einer Modifikation / Schrittweise Ablaufplanumstellung*

Mit der Ausübung einer Modifikation wird ein anfänglicher Planungsstand $g = (a, \mathcal{d})$ aus einem ursprünglichen Ablaufplan a und einem zugehörigen Präzedenzgraph \mathcal{d} in einen neuen Planungsstand $g' = (a', \mathcal{d}')$ mit dem modifizierten Ablaufplan a' und dem Präzedenzgraph \mathcal{d}' überführt. Der ursprüngliche Ablaufplan a wird durch die Modifikation in den Ablaufplan a' gewandelt und mit ihm der Präzedenzgraph \mathcal{d} in den Präzedenzgraph \mathcal{d}' . Eine Ausübung einer solchen Modifikation wird $g \xrightarrow{*} g'$ geschrieben.

Eine Umstellung eines Ablaufplans geschieht mit der Durchführung eines einzigen oder mehrerer aufeinanderfolgenden Veränderungsschritte. Sie geht von einem anfänglichen Planungsstand $g = (a, \mathcal{d})$ aus und mündet in einen neuen Planungsstand $g' = (a', \mathcal{d}')$.

Die im vorliegenden Modifikationsansatz geforderten Änderungen werden in den Präzedenzgraph des anfänglichen Planungsstands geschrieben. Dadurch wird aus dem anfänglichen Planungsstand ein initialer Veränderungsstand $g \rightsquigarrow g_0$ gebildet. Erst im Lauf einer Ablaufplanumstellung wird ersichtlich, welche Veränderungsschritte tatsächlich durchzuführen sind. Es sind nämlich überall dort an Batterieeinsatzaktivitäten Veränderungsschritte zu vollziehen, wo laut Präzedenzgraph im aktuellen Stand noch Veränderungen ausstehend sind. In der Regel zieht ein erster Veränderungsschritt eine Vielzahl von Veränderungsschritten nach sich.

Durch die notwendigen Veränderungsschritte kommt es nach und nach $g_0 \rightsquigarrow g_1 \rightsquigarrow g_2 \rightsquigarrow \dots \rightsquigarrow g_*$ zu neuen Veränderungsständen. Sobald keinerlei Veränderungen mehr ausstehend sind, ist ein abschließender Veränderungsstand erreicht. Ist der Ablaufplan gültig, werden die Veränderungsinformationen aus dem Präzedenzgraph entfernt. Dadurch wird aus dem abschließenden Veränderungsstand ein neuer Planungsstand gebildet $g_* \rightsquigarrow g'$.

Zum einen bestehen in einem Ablaufplan zeitliche Abhängigkeiten zwischen den Batterieeinsatzaktivitäten. Eine Aktivität kann sowohl von einer anderen Aktivität innerhalb der Einsatzsequenz einer Wechselbatterie als auch von einer anderen Aktivität außerhalb der betreffenden Batterieeinsatzse-

quenz abhängen. Erstens müssen die Batterieeinsatzaktivitäten zeitlich lückenlos aneinander anschließen. Handelt es sich bei einer Einsatzaktivität um den unmittelbaren Vorgänger einer anderen Einsatzaktivität, so muss diese Einsatzaktivität laut Plan zum gleichen Zeitpunkt enden wie die andere Einsatzaktivität startet. Handelt es sich hingegen bei einer Einsatzaktivität um den unmittelbaren Nachfolger einer anderen Einsatzaktivität, so muss diese Einsatzaktivität laut Plan zum gleichen Zeitpunkt starten wie die andere Einsatzaktivität endet. Zweitens muss die Aufnahme einer Wechselbatterie synchron mit der Abgabe einer Wechselbatterie stattfinden. Hängen zwei Batteriewechselaktivitäten miteinander zusammen, so muss die mit der Aufnahme zur gleichen Zeit enden wie die mit der Abgabe der Wechselbatterie.

Zum anderen bestehen Abhängigkeiten bezüglich des Ladezustands der Wechselbatterien. Eine Aktivität übernimmt innerhalb einer bestimmten Batterieeinsatzsequenz die Wechselbatterie mit dem Ladezustand, mit welchem die vorausgegangene Aktivität diese Wechselbatterie hinterlässt.

Programmauflistung 4 *Ausübung einer Modifikation*

Zum Einstieg in die Ausübung einer Modifikation werden die zeitlichen Veränderungen und Ladezustandsveränderungen gemäß dem Ansatz bei den ausgewählten Batterieeinsatzaktivitäten angefordert. Damit ist initialer Veränderungsstand des Ablaufplans erreicht. Anschließend wird dieser Ablaufplan so lange schrittweise weiter überarbeitet, bis zu guter Letzt ein abschließender Veränderungsstand mit gültigem Ablaufplan erreicht ist, bei welchem alle Veränderungen wie angefordert umgesetzt worden sind.

```
1 Bilde initialen Veränderungsstand aus ursprünglichem Planungsstand
2 Lege Laufrichtung td auf rückwärts/vorwärts fest
3 wiederhole
4   falls die Richtung td rückwärts ist
5     laufe Präzedenzgraph rückwärts ab und führe Veränderungsschritte durch
6     (siehe Programmauflistung 5 vorwärts Traversieren im Präzedenzgraph)
7     drehe Laufrichtung td auf vorwärts um
8   anderenfalls die Richtung td vorwärts ist
9     laufe Präzedenzgraph vorwärts ab und führe Veränderungsschritte durch
10    (analog zu Vorwärtstraversierung)
11    drehe Laufrichtung td auf rückwärts um
12  ende
13 solange der Plan ... gültig ist und
14   nicht vollständig geschlossen ist
15 Bilde neuen Planungsstand aus abschliessendem Veränderungsstand
```

Aus jedem Veränderungsschritt geht ein neuer Zwischenstand des Ablaufplans hervor, der sich in der Überarbeitung/Modifikation befindet.

Sollte eine ausstehende Veränderung an einer Batterieeinsatzaktivität im zuletzt bekannten Zwischenstand nicht umsetzbar sein, so ist der Ansatz für die Modifikation am ursprünglichen Ablaufplan insgesamt nicht anwendbar.

Bei einer Umstellung eines Ablaufplans wie in **Programmauflistung 4** kommt es in aller Regel mehrfach dazu, dass die Laufrichtung für das Traversieren der Präzedenzen umzudrehen ist. Während eine Laufrichtung eingeschlagen ist, erfolgen meist mehrere Veränderungsschritte. Doch es kann auch vorkommen, dass in einer der beiden Laufrichtungen bereits alle angeforderten Veränderungen vollzogen worden sind. Ein einziger Veränderungsschritt ist stets auf eine bestimmte Batterieeinsatzaktivität fokussiert. Bei der Durchführung eines Veränderungsschritts wird die betrachtete Batterieein-

satzaktivität zunächst für sich genommen eingepasst. Dabei werden im betreffenden Knoten des Präzedenzgraphs die fehlenden Veränderungsinformationen ergänzt oder gegebenenfalls überarbeitet.

DEFINITION: *Einpassung einer Batterieeinsatzaktivität*

Sei $v \in V_{\mathcal{d}}$ ein Knoten im Präzedenzgraph $\mathcal{d} = (V_{\mathcal{d}}, E_{\mathcal{d}}, \dots)$ für eine bestimmte Batterieeinsatzaktivität. Weiter seien $\text{pitEndIn}_{\mathcal{d}}^v$ der Muss/Soll-Wert und $\text{pitEndOut}_{\mathcal{d}}^v$ der Kann/Ist-Wert für die zeitliche Veränderung des Endzeitpunkts sowie $\text{socEndIn}_{\mathcal{d}}^v$ der Muss/Soll-Wert und $\text{socEndOut}_{\mathcal{d}}^v$ der Kann/Ist-Wert für die Ladezustandsveränderung beim Endzeitpunkt der Batterieeinsatzaktivität. Der Endzeitpunkt eines Knotens v (einer Batterieeinsatzaktivität) heißt im Präzedenzgraph \mathcal{d} eingepasst, falls der Muss/Soll-Wert $\text{pitEndIn}_{\mathcal{d}}^v$ gleich dem Kann/Ist-Wert $\text{pitEndOut}_{\mathcal{d}}^v$ für die zeitliche Veränderung ist. Anderenfalls sind noch Veränderungen am Endzeitpunkt der Batterieeinsatzaktivität ausstehend. Analog heißt im Präzedenzgraph \mathcal{d} der Ladezustand ausgangs eines Knotens v (einer Batterieeinsatzaktivität) eingepasst, falls der Muss/Soll-Wert $\text{socEndIn}_{\mathcal{d}}^v$ gleich dem Kann/Ist-Wert $\text{socEndOut}_{\mathcal{d}}^v$ ist. Anderenfalls sind laut dem Präzedenzgraph \mathcal{d} noch Ladezustandsveränderungen ausgangs der Batterieeinsatzaktivität vorzunehmen. Das hintere Ende einer Batterieeinsatzaktivität heißt in einem Präzedenzgraph (einem Zwischenstand) fertig umgesetzt, genau dann wenn der Endzeitpunkt und der Ladezustand ausgangs der Batterieeinsatzaktivität eingepasst sind.

Dies gilt analog für das vordere Ende einer Batterieeinsatzaktivität mit dem Muss/Soll-Wert $\text{pitStartIn}_{\mathcal{d}}^v$ und dem Kann/Ist-Wert $\text{pitStartOut}_{\mathcal{d}}^v$ für die zeitliche Veränderung des Startzeitpunkts sowie dem Muss/Soll-Wert $\text{socStartIn}_{\mathcal{d}}^v$ und dem Kann/Ist-Wert $\text{socStartOut}_{\mathcal{d}}^v$ für die Ladezustandsveränderung eingangs der Batterieeinsatzaktivität.

Nach dem Einpassen einer bestimmten Batterieeinsatzaktivität werden Veränderungsinformationen an die übrigen Batterieeinsatzaktivitäten weitergetragen, mit denen die betrachtete Batterieeinsatzaktivität direkt in Beziehung steht. Durch diese Übertragung wird versucht, einen Einklang der betrachteten Batterieeinsatzaktivität zu den Übrigen herzustellen.

Stehen zwei Batterieeinsatzaktivitäten in einer Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zueinander, so muss die Nachfolgeraktivität genau dann starten, wenn die Vorgängeraktivität endet. Stehen zwei Batterieeinsatzaktivitäten in einer Synchronitätsbeziehung zueinander, so muss die Aktivität zur Aufnahme einer Wechselbatterie genau dann enden, wenn die Abgabe der betreffenden Wechselbatterie endet.

DEFINITION: *Geschlossenheit eines Zwischenstands bei der Ablaufplanumstellung*

Seien $v, w \in V_{\mathcal{d}}$ zwei Knoten für verschiedene Batterieeinsatzaktivitäten in einem Präzedenzgraph $\mathcal{d} = (V_{\mathcal{d}}, E_{\mathcal{d}}, \dots)$, die miteinander direkt in Beziehung stehen $(v, w) \in E_{\mathcal{d}}$.

Eine Vorgängeraktivität v heißt am hinteren Ende mit der Nachfolgeaktivität w am vorderen Ende zeitlich im Einklang, genau dann wenn der Kann/Ist-Wert $\text{pitEndOut}_{\mathcal{d}}^v$ gleich dem Muss/Soll-Wert $\text{pitStartIn}_{\mathcal{d}}^w$ ist. Darüber hinaus heißt die Vorgängeraktivität v am hinteren Ende mit der Nachfolgeaktivität w am vorderen Ende gemäß dem Ladezustand im Einklang, genau dann wenn der Kann/Ist-Wert $\text{socEndOut}_{\mathcal{d}}^v$ gleich dem Muss/Soll-Wert $\text{socStartIn}_{\mathcal{d}}^w$ ist.

Die Vorgängeraktivität v heißt am hinteren Ende mit dem vorderen Ende der Nachfolgeraktivität w vollständig im Einklang, wenn sie sowohl zeitlich als auch bezüglich des Ladezustands mit dieser im Einklang steht. Dies gilt analog für das hintere Ende einer Batterieeinsatzaktivität zur Abgabe einer Wechselbatterie und dem vorderen Ende einer Batterieeinsatzaktivität zur Aufnahme einer Wechselbatterie.

Steht die Batterieeinsatzaktivität v am hinteren Ende mit dem vorderen Ende von der Batterieeinsatzaktivität w vollständig im Einklang, wird die auf der Beziehung $e = (v, w)$ beruhende Abhängigkeit zwischen dem hinteren Ende von v und dem vorderen Ende von w als vorwärts geschlossen bezeichnet.

Ein Präzedenzgraph \mathcal{d} heißt vorwärts geschlossen, genau dann wenn alle Abhängigkeiten aus den darin befindlichen Beziehungen vorwärts geschlossen sind.

Zwischen dem vorderen Ende einer Nachfolgeraktivität w und dem hinteren Ende einer Vorgängeraktivität v ist der Einklang analog zu sehen, genau dann wenn der Muss/Soll-Wert $\text{pitStartOut}_{\mathcal{d}}^w$ gleich dem Kann/Ist-Wert $\text{pitEndIn}_{\mathcal{d}}^v$ ist.

Steht die Batterieeinsatzaktivität w am vorderen Ende mit dem hinteren Ende von der Batterieeinsatzaktivität v vollständig im Einklang, wird die auf der Beziehung $e = (v, w)$ beruhende Abhängigkeit zwischen dem vorderen Ende von w und dem hinteren Ende von v als rückwärts geschlossen bezeichnet.

Ein Präzedenzgraph \mathcal{d} heißt rückwärts geschlossen, genau dann wenn alle Abhängigkeiten aus den darin befindlichen Beziehungen rückwärts geschlossen sind.

Ein Präzedenzgraph \mathcal{d} heißt vollständig geschlossen, genau dann wenn er vorwärts wie auch rückwärts vollständig geschlossen ist.

III. Traversieren der Präzedenzen

Eine Veränderung an einer Batterieeinsatzaktivität kann sich rekursiv auf weitere Batterieeinsatzaktivitäten auswirken, die entweder unmittelbarer Nachfolger der betroffenen Batterieeinsatzaktivität sind oder die Aufnahme einer Wechselbatterie zeitgleich zu der Abgabe einer Wechselbatterie durch ein Fahrzeug bedeuten.

Um alle notwendigen Veränderungen am Ablaufplan vorzunehmen, wird der Präzedenzgraph entlang der Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen und entlang der Synchronitätsbeziehungen abgelaufen. Denn auf diese Weise offenbaren sich weitere notwendige Schritte zur Umstellung des Ablaufplans. Diesen Beziehungen in der Richtung der Nachfolgeraktivitäten respektive in Richtung der Aufnahme einer Wechselbatterie zu folgen, wird Vorwärtsrichtung  genannt. Anders herum in Richtung der Vorgängeraktivitäten respektive in Richtung der Abgabe einer Wechselbatterie werden die Beziehungen des Präzedenzgraphs sozusagen in der Rückwärtsrichtung  begangen. Mit der **Programmauflistung 5** wird hier näher auf die Vorwärtsrichtung eingegangen.

Programmauflistung 5 *vorwärts Traversieren im Präzedenzgraph*

Die Knoten des Präzedenzgraphs stehen für bestimmte Batterieeinsatzaktivitäten im Ablaufplan. Während eine Ablaufplanumstellung im Gange ist, werden die Knoten aller Batterieeinsatzaktivitäten, bei denen eine Änderung angefordert worden ist, in einem Teilgraph vermerkt. Dieser enthält

alle Knoten der Batterieeinsatzaktivitäten, auf die sich die Ablaufplanumstellung soweit ausgewirkt hat. Die Vorwärtsrichtung wird dadurch eingeschlagen, dass sämtliche Knoten aus diesem Teilgraph in eine Vorrangwarteschlange getan werden, die dann abgearbeitet wird.

```

Gegeben: Ablaufplan a, Präzedenzgraph d
          Teilgraph des Präzedenzgraphs subd und (bereits abgelaufene Batterieeinsatzaktivitäten)
          Katalog mit Veränderungsinformationen si

1 ein Teil des Präzedenzgraphs wurde bereits abgelaufen;
2   lege alle Knoten aus dem Teilgraph in eine Warteschlange fringe
3 solange noch Knoten anstehen; fringe  $\boxtimes$   $\emptyset$ 
4   Fokussiere auf Batterieeinsatzakt. bu zu dem Knoten
5   hole Veränderungsinformationen ab
6   Passe bu vom vorderen Ende her bezüglich Ladezustandsveränderungen und
7   zeitlichen Veränderungen ein
8   für jede abgehende Kante im Präzedenzgraph
9     Hole in Beziehung stehende Batterieeinsatzaktivität sucbcbu ab und
10    hole Veränderungsinformationen ab
11    falls hinteres Ende von bu mit vorderem Ende von sucbcbu
12    nicht vollständig im Einklang steht
13    Füge zu Wartschl. fringe  $\Leftarrow$  sucbcbu hinzu
14  ende
15  Übertrage Kann/Ist-Wert für Endzeitpunkt von bu als
16  Muss/Soll-Wert für Startzeitpunkt von sucbcbu steht
17  falls in bu die gleiche Wechselbatterie eingesetzt wird wie in sucbcbu
18  Übertrage Kann/Ist-Wert für Ladezustand ausgangs von bu als
19  Muss/Soll-Wert für den Ladezustand eingangs von sucbcbu
20  ende
21  wiederhole
22  Trage in Teilgraph abgelaufener Aktivitäten ein subd  $\Leftarrow$  bu
23 wiederhole

```

Es werden nacheinander Knoten aus der Vorrangwarteschlange entnommen. Beim Traversieren in Vorwärtsrichtung haben die Knoten der Aktivitäten Vorrang, die sich zeitlich weiter vorne im Planungszeitraum befinden. Die jeweilige Batterieeinsatzaktivität wird dann in den Fokus genommen und die zugehörigen Veränderungsinformationen aus dem Katalog abgeholt. Sollte die Batterieeinsatzaktivität am hinteren Ende noch nicht eingepasst sein, so muss sie überarbeitet werden; sie wird sowohl in Bezug auf Ladezustandsveränderungen als auch auf zeitliche Veränderungen eingepasst. Es hängt vom Typ der Batterieeinsatzaktivität ab, inwieweit sie eingepasst werden kann, ohne dass die Veränderungen sich auf das hintere Ende durchdrücken (siehe dazu auch oben). Sollten von der überarbeiteten Batterieeinsatzaktivität die Veränderungen am hinteren Ende ausstrahlen, müssen die Batterieeinsatzaktivitäten angeschaut werden, die durch abgehenden Kanten (das ist die Vorwärtsrichtung) im Präzedenzgraph mit ihr in Beziehung stehen. Beim Traversieren des Beziehungsgraphen in Kantenrichtung wird der aktualisierte Kann/Ist-Wert für den Endzeitpunkt der Batterieeinsatzaktivität des Quellknotens mit dem Muss/Soll-Wert für den Startzeitpunkt der Batterieeinsatzaktivität des Zielknotens verglichen. Ist noch kein Muss/Soll-Wert für den Startzeitpunkt beim Zielknoten vermerkt oder weicht er vom Kann/Ist-Wert für den Endzeitpunkt des Quellknotens ab, so wird der Kann/Ist-Wert bezüglich der zeitlichen Veränderung dorthin überspielt. Sollten beide Batterieeinsatzaktivitäten aus einer Einsatzsequenz stammen, so ist zudem der Kann/Ist-Wert für den Ladezustand der zuletzt überarbeiteten Batterieeinsatzaktivität als Muss/Soll-Wert zu übertragen. Falls die andere Batterieeinsatzaktivität überhaupt noch nicht betrachtet worden ist, so ist sie in die Vorrangwarteschlange einzutragen. Anderenfalls sie bereits zuvor betrachtet worden sein sollte,

so wird sie nur dann nochmals in die Vorrangwarteschlange eingetragen, falls sich neue Anforderungen an eine Veränderung ergeben haben sollten. Damit ist die Überarbeitung der Batterieeinsatzaktivität in der Vorwärtsrichtung vorerst abgeschlossen und sie wird in der Liste der abgelaufenen Batterieeinsatzaktivitäten hinzugefügt.

Nachdem ein Veränderungsschritt an einer bestimmten Batterieeinsatzaktivität vollzogen wurde, werden ausgehend von dieser Batterieeinsatzaktivität die Beziehungen im Präzedenzgraphen verfolgt und es können sich dabei weitere Veränderungsschritte als notwendig herausstellen. Einige notwendige Veränderungsschritte werden erkannt, derweil die Beziehungen im Präzedenzgraph vorwärts abgelaufen werden.

In einem Veränderungsschritt wird die betreffende Batterieeinsatzaktivität eingepasst. Falls die Beziehungen im Präzedenzgraph vorwärts verfolgt werden, geht das Einpassen von den Muss/Soll-Werten für die Veränderung des Startzeitpunkts bzw. des Ladezustands eingangs der Batterieeinsatzaktivität aus. Es werden dann wie in **Beispiel 12** die Muss/Soll-Werte und direkt auch die Kann/Ist-Werte für die Veränderung des Endzeitpunkts bzw. des Ladezustands ausgangs der Batterieeinsatzaktivität gebildet.

Beispiel 12 Traversierung des Präzedenzgraphs zur Modifikation eines Ablaufplans

In **Abbildung 73** ist ein Ausschnitt aus einem Ablaufplan abgebildet, bei welchem das Fahrzeug 'AGV62' die Wechselbatterie 'BAT9' an der Station 'STTB' gegen die 'BAT5' tauscht. In der Teileinsatzsequenz für die Wechselbatterie 'BAT5' kommt es zu Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen der stationären Einsatzaktivität in Station 'STTB' gefolgt von der Batteriewechselaktivität zur Aufnahme durch das Fahrzeug 'AGV62' gefolgt von der mobilen Einsatzaktivität. Umgekehrt kommt es in der Teileinsatzsequenz für die Wechselbatterie 'BAT9' zu Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen zwischen der mobilen Einsatzaktivität gefolgt von der Batteriewechselaktivität zur Abgabe durch das Fahrzeug 'AGV62' gefolgt von der stationären Einsatzaktivität. Zudem verbindet diese beiden Teileinsatzsequenzen eine Synchronitätsbeziehung zwischen der Batteriewechselaktivität zur Abgabe der Wechselbatterie 'BAT9' und der Batteriewechselaktivität zur Aufnahme der Wechselbatterie 'BAT5' durch das Fahrzeug 'AGV62' an der Station 'STTB'.

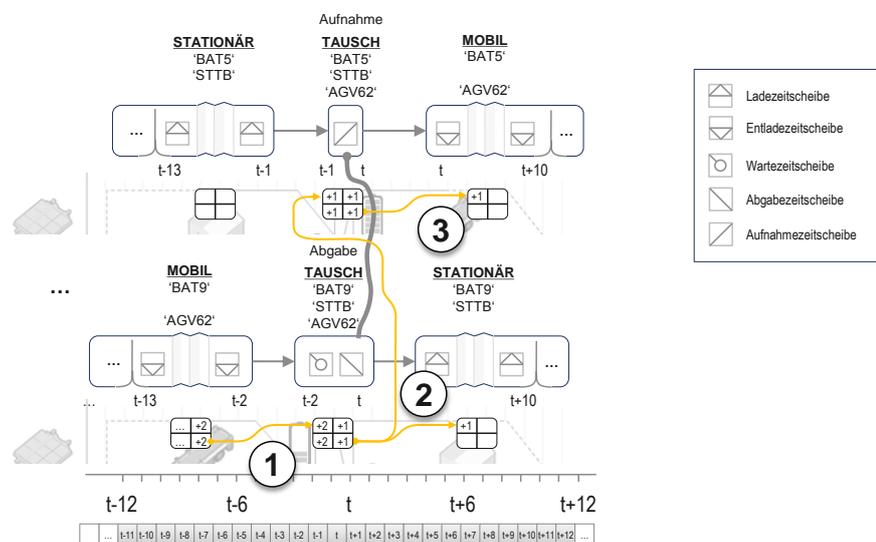


Abbildung 73 Vorwärtstraversierung einer Vorgänger-Nachfolger-Beziehung und einer Synchronitätsbeziehung

In diesem Beispiel geht die zeitliche Veränderung von der mobilen Batterieeinsatzaktivität in der Teileinsatzsequenz der Wechselbatterie 'BAT9' aus. Der Endzeitpunkt für die Ausstattung des Fahrzeugs 'AGV62' mit der Wechselbatterie 'BAT9' ist um eine Zeiteinheit nach vorne gerückt worden. Aus diesem Änderungsschritt resultierte ein neuer Zwischenstand des Ablaufplans hervor. Anschließend überträgt sich ① der Kann/Ist-Wert von +2 für den Endzeitpunkt der mobilen Batterieeinsatzaktivität entlang der Vorgänger-Nachfolger-Beziehung zu einem Muss/Soll-Wert von +2 für den Startzeitpunkt der Batteriewechselaktivität zur Abgabe der Wechselbatterie . Die zeitliche Veränderung kann dort zunächst ein wenig abgefangen werden, indem der Wartevorgang herausgetrennt wird. Dennoch verbleiben ein Muss/Soll-Wert sowie der Kann/Ist-Wert von +1 für den Endzeitpunkt. Aus diesem Änderungsschritt geht erneut ein neuer Zwischenstand für den Ablaufplan hervor. Dann spinnt sich der Kann/Ist-Wert für den Endzeitpunkt von +1 der Batteriewechselaktivität für die Abgabe der Wechselbatterie 'BAT9' sowohl entlang der Vorgänger-Nachfolger-Beziehung als Muss/Soll-Wert von +1 der stationären Batterieeinsatzaktivität als auch entlang der Synchronitätsbeziehung als Muss/Soll-Wert von +1 zur Batteriewechselaktivität zur Aufnahme der Wechselbatterie weiter ②. Der Aufenthalt der Wechselbatterie 'BAT9' in der Station 'STTB' gebraucht damit in diesem Beispiel nicht weiter beleuchtet zu werden. Bei der Batteriewechselaktivität zur Aufnahme der Wechselbatterie 'BAT6' in durch das Fahrzeug 'AGV62' kann die zeitliche Veränderung nicht abgefedert werden; der Start- und Endzeitpunkt werden jeweils um eine Zeiteinheit nach vorne gerückt. Wiedermals entsteht ein neuer Zwischenstand des Ablaufplans. Zuletzt wird in diesem Beispiel gezeigt, dass der Kann/Ist-Wert von +1 der Batteriewechselaktivität für die Aufnahme der Wechselbatterie 'BAT5' entlang der Vorgänger-Nachfolger-Beziehung auf den Muss/Soll-Wert der mobilen Einsatzaktivität mit dem Fahrzeug 'AGV62' übertragen wird ③. Nachdem die mobile Einsatzaktivität der Wechselbatterie 'BAT5' mit dem Fahrzeug 'AGV62' bezüglich der zeitlichen Verschiebung betrachtet wurde, gibt es einen neuen Zwischenstand des Ablaufplans. Mögliche weitere Veränderungsschritte liegen außerhalb des abgebildeten Ausschnitts dieses Beispiels.

Eine Batteriewechselaktivität ist bei einer Ablaufplanumstellung in Bezug auf Ladezustandsveränderungen als neutral anzusehen. Es ist klar, dass während eines Batterietausches weder geladen noch entladen werden kann. Also kann einer Ladezustandsveränderung durch eine Batteriewechselaktivität im Zuge einer Umstellung eines Ablaufplans nicht entgegnet werden. Ebenso ist es bei einer Batteriewechselaktivität unmöglich, im Zuge einer Umstellung eines Ablaufplans eine Ladezustandsveränderung hervorzurufen. Wie in **Beispiel 12** zu sehen, strahlt eine Veränderung am Ladezustand zum Ende einer stationären Einsatzaktivität bei einer nachfolgenden Batteriewechselaktivität glatt hindurch. Daher muss zum Start einer noch folgenden mobilen Einsatzaktivität eine entsprechende Veränderung des Ladezustands mitvollzogen werden. Ebenfalls strahlt eine Ladezustandsveränderung zum Ende einer mobilen Einsatzaktivität durch eine Batteriewechselaktivität zum Start einer dann noch folgenden stationären Einsatzaktivität durch.

Beim Traversieren im Präzedenzgraph wird kein Unterschied zwischen einer unmittelbaren Vorgänger-/Nachfolgerbeziehung oder eine Synchronitätsbeziehung gemacht. Synchronitätsbeziehungen treten in dieser Problemstellung lediglich im Zusammenhang von Batteriewechselaktivitäten auf. Eine Batteriewechselaktivität zur Aufnahme einer Wechselbatterie hat dabei exakt die Dauer einer Zeiteinheit. Sie besteht nur aus dem Aufnahmevorgang, welcher sich als solches nicht erübrigen lässt. Darum wirkt sich eine Veränderung des Endzeitpunkts automatisch auf den Startzeitpunkt der Batteriewechselaktivität aus und umgekehrt. Zudem bleibt der Ladezustand der Wechselbatterie wäh-

rend des Aufnahmevorgangs unangetastet. Das bedeutet, eine Veränderung des Ladezustands beim Start der Batteriewechselaktivität schlägt sich als eine Ladezustandsveränderung bei dessen Ende nieder.

Im **Beispiel 12** mit der Rückwärtstraversierung zeigt sich, dass eine Veränderung des Endzeitpunkts einer stationären Einsatzaktivität durch eine Aktivität zur Aufnahme einer Wechselbatterie stets durchgeleitet wird. Darum muss eine Veränderung des Startzeitpunkts einer nachfolgenden mobilen Einsatzaktivität mitgemacht werden. Im Gegensatz dazu mag eine Veränderung des Endzeitpunkts einer mobilen Einsatzaktivität durchaus von einer Aktivität zur Abgabe der Wechselbatterie zeitlich abgedefert werden.

Fortsetzung von **Beispiel 12**

In **Abbildung 74** wird die Umstellung des Ablaufplans wieder aufgegriffen, nachdem die Laufrichtung auf rückwärts umgedreht worden ist. Mit Ausnahme der stationären Einsatzaktivität von Wechselbatterie 'BAT5' gehören alle Aktivitäten des abgebildeten Ausschnitts zu bereits abgelaufenen Aktivitäten. Als die Rückwärtsrichtung eingeschlagen wird, sind darum all diese Aktivitäten zu überprüfen und gegebenenfalls einzupassen. Die mobile Einsatzaktivität von Wechselbatterie 'BAT5' und die stationäre Einsatzaktivität von Wechselbatterie 'BAT9' sind vorrangig zu betrachten, da sie im abgebildeten Ausschnitt zeitlich am weitesten hinten liegen. Doch sie sind bereits an sich eingepasst und stehen zu ihren Vorgängeraktivitäten im Einklang. Als Startzeitpunkt der mobilen Einsatzaktivität von Wechselbatterie 'BAT5' steht aktuell zum Beispiel genauso wie bei der Batteriewechselaktivität zur Aufnahme von Wechselbatterie 'BAT5' der Endzeitpunkt $t + 1$ fest. Nun kann ebenso gut die Batteriewechselaktivität zur Aufnahme wie die zur Abgabe der Wechselbatterie in der Mitte des Ausschnitts betrachtet werden. Die Batteriewechselaktivität zur Abgabe der Wechselbatterie 'BAT9' ist eigentlich uninteressant, da sie ebenfalls fertig umgesetzt ist und zu ihrer Vorgängeraktivität im Einklang steht. In diesem Beispiel mussten bei der mobilen Einsatzaktivität von Wechselbatterie 'BAT9' zwei Entladevorgänge eingezogen werden. Durch Herausstreichen des Wartevorgangs und der Verschiebung des Abgabevorgangs um eine Zeitscheibe konnte der Startzeitpunkt der Batteriewechselaktivität an den Endzeitpunkt der mobilen Einsatzaktivität angeglichen werden.

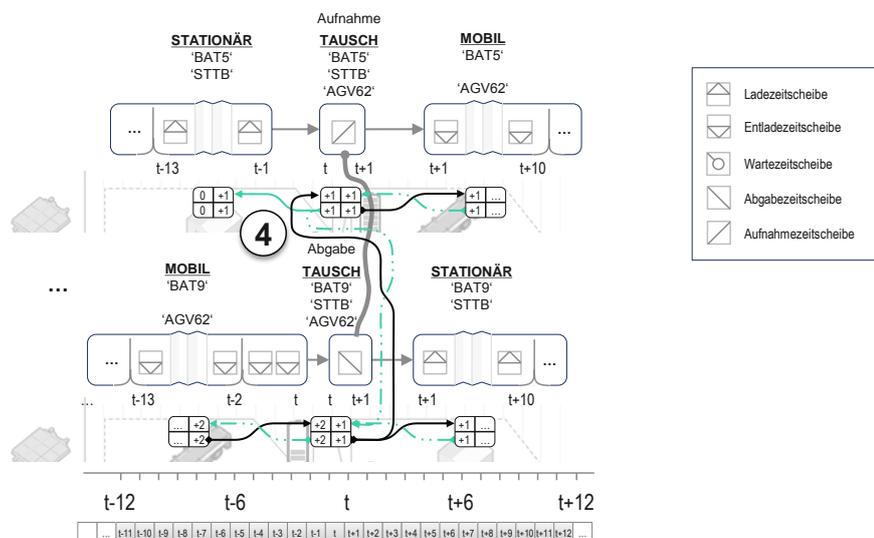


Abbildung 74 Rückwärtstraversieren einer Vorgänger-Nachfolger-Beziehung und einer Synchronitätsbeziehung

Bei der Batteriewechselaktivität zur Aufnahme der Wechselbatterie 'BAT5' besteht rückwärts gerichtet ein offenes Ende. Nachdem überprüft worden ist, dass sie an sich eingepasst ist, wird der Kann/Ist-Wert für den Startzeitpunkt von +1 zum Muss/Soll-Wert für den Endzeitpunkt von +1 der stationären Einsatzaktivität von Wechselbatterie 'BAT5'  überspielt ④. Daraufhin wird die stationäre Einsatzaktivität der Wechselbatterie 'BAT5' für sich betrachtet. In diesem Beispiel ist es möglich, den Endzeitpunkt auf t anzugleichen, indem ein Ladevorgang eingezogen wird. Aufgrund des Dämpfungsprinzips kann hingegen der Startzeitpunkt der stationären Einsatzaktivität $t - 13$ beibehalten werden. Der Muss/Soll-Wert für die zeitliche Veränderung des Startzeitpunkts ist so ± 0 , was im Einklang mit einer noch nicht betrachteten Batterieeinsatzaktivität außerhalb des abgebildeten Ausschnitts steht. Damit ist ihr vorderes Ende auch schon als vollständig geschlossenes anzusehen.

IV. Dämpfungsprinzip

Da die Einsatzaktivitäten der Wechselbatterien im Grunde von variabler Dauer sind, wird für die zeitliche Verschiebung sowie die Veränderungen bezüglich des Ladezustands ein Dämpfungsprinzip angewandt. Bei der Überarbeitung einer Batterieeinsatzaktivität ist die angeforderte zeitliche Veränderung sowie Ladezustandsveränderung von einem Ende gegenüber dem anderen Ende der Batterieeinsatzaktivität so weit wie möglich aufzulösen. Eine Batterieeinsatzaktivität wird in erster Linie bezüglich einer Ladezustandsveränderung und in zweiter Linie in Bezug auf eine zeitliche Veränderung überarbeitet.

In diesem Unterabschnitt wird erläutert, welche Zeitbereiche bei einer Überarbeitung einer Batterieeinsatzaktivität typübergreifend angeschaut werden. Danach wird vorgestellt, wie sich eine zeitliche Verschiebung bei unterschiedlichen Typen von Batterieeinsatzaktivitäten auswirkt. Insbesondere bei stationären Einsatzaktivitäten kann vermieden werden, dass sich eine zeitliche Veränderung von einem Ende hindurch auf das Ende weiterentwickelt.

Bei einer Veränderung des Start- oder Endzeitpunkts stehen jedenfalls die Zeitscheiben im Fokus, die sich im aktuellen Zwischenstand im Aktivitätszeitraum befunden haben. Welche Zeitscheiben im Vorlauf oder Nachlauf dazu zu betrachten sind, hängt von der Richtung und der Stärke der zeitlichen Veränderung ab. Aus Vorwärtsrichtung betrifft eine Verschiebung in den Startzeitpunkt einer Einsatzaktivität. Anders greift eine Verschiebung aus Rückwärtsrichtung auf den Endzeitpunkt einer Einsatzaktivität über.

DEFINITION: Verschiebekörper, Vorlauf und Nachlauf

Eine geordnete Menge sämtlicher Zeitscheiben zwischen dem zuletzt geplanten Start- und Endzeitpunkt wird in Bezug auf eine zeitliche Veränderung des Start- oder Endzeitpunkts einer Batterieeinsatzaktivität Verschiebekörper genannt. Auf die ersten Elemente im Verschiebekörper wird als Kopf und auf die letzten Elemente im Verschiebekörper als Ausläufer verwiesen.

Eine geordnete Menge ausgewählter Zeitscheiben aus dem Zeitbereich zwischen dem Anfang des Planungszeitraums bis zum zuletzt geplanten Startzeitpunkt heißt Vorlauf.

Eine geordnete Menge ausgewählter Zeitscheiben aus dem Zeitbereich zwischen dem zuletzt geplanten Endzeitpunkt und dem Ende des Planungszeitraums heißt Nachlauf.

1. Dämpfung bei einer stationären Einsatzaktivität

Unter gewissen Voraussetzungen können in Richtung der Verschiebung am Kopf einer stationären Einsatzaktivität endständige Aufenthaltsvorgänge herausgetrennt werden. Erstens muss für einen betrachteten Aufenthaltsvorgang eine Ladeleistung von null festgelegt sein und es darf keinerlei Ladeleistung dorthin umzuplatzieren sein. Zweitens muss das durch die Festlegung der Ladeleistung ausgeprägte Zuschalt-/Abschaltpotenzial komplett verblieben sein. Ein Aufenthaltsvorgang lässt sich zudem nur dann heraustrennen, wenn alle in der Verschieberichtung davor bzw. dahinter liegenden Vorgänge ebenfalls herausgetrennt werden.

Durch das Heraustrennen von Aufenthaltsvorgängen kann der Start- bzw. Endzeitpunkt verrückt werden, ohne dass sich die Verschiebung im Ablaufplan gleichstark fortspinnt. Eine stationäre Einsatzaktivität kann sinnbildlich an ihren Enden zusammengedrückt werden; es werden Aufenthaltsvorgänge herausgetrennt, anstatt sie um die entsprechende Anzahl von Zeiteinheiten zu verschieben.

Ist im Ablaufplan ausgehend von einer Wechselbatterie ein Schnipsel für ein Minutenreserveangebot vorgesehen, so wird innerhalb des Stationsaufenthaltszeitraums etwas Zuschalt-bzw. Abschaltpotenzial zum Angebotszweck und etwas dem entgegen gesetztes Abschalt-/Zuschaltpotenzial zum Kompensationszweck gebraucht. Wird in einer Produktperiode ein Zuschaltpotenzial zum Angebotszweck gebraucht, so muss innerhalb des Aufenthaltszeitraums der Wechselbatterie in der Station später in gleichwertiger Energiemenge ein Abschaltpotenzial zum Kompensationszweck gebraucht werden. Wird anders herum in einer Produktperiode ein Abschaltpotenzial zum Angebotszweck gebraucht, so muss innerhalb des Aufenthaltszeitraums später in gleichwertiger Energiemenge ein Zuschaltpotenzial zum Kompensationszweck gebraucht werden.

In Bezug auf ein Minutenreserveangebot fällt das Augenmerk je nach Verschieberichtung entweder zuerst auf einen Angebotszweck oder zuerst auf einen Kompensationszweck. Aus Richtung der Vorgängeraktivitäten liegt der Verschiebekopf vorne an der stationären Einsatzaktivität; es wird versucht, die stationäre Einsatzaktivität anhand der Aufenthaltsvorgänge am vorderen Ende einzupassen. Beim Einkürzen der stationären Einsatzaktivität bereite ein entsprechendes Minutenreserveangebot primär den Umstand, dass ausgehend von der betreffenden Wechselbatterie in einem Schnipsel Zuschalt-/Abschaltpotenzial zum Angebotszweck gebraucht wird. Anders liegt der Verschiebekopf aus Richtung der Nachfolgeaktivitäten hinten an der stationären Einsatzaktivität; es wird wie **Beispiel 13** probiert, die stationäre Einsatzaktivität angesichts der Aufenthaltsvorgänge am hinteren Ende passend zu machen. Beim Einkürzen bereite ein entsprechendes Minutenreserveangebot wiederum den Umstand, dass ausgehend von der betreffenden Wechselbatterie in einem Schnipsel Zuschalt-/Abschaltpotenzial zum Kompensationszweck gebraucht wird.

Beispiel 13 *Dämpfung einer von Nachfolgeaktivitäten ausgelösten Verschiebung bei einer stationären Einsatzaktivität*

In **Abbildung 75** werden relevante Ausschnitte eines beispielhaften Ablaufplans mit der Wechselbatterie 'BAT1' und des zugehörigen Präzedenzgraphen dargestellt. Im rechten Bildteil wird vom Präzedenzgraph der Knoten für die stationäre Einsatzaktivität genauer abgebildet. Da in diesem Beispiel der Fokus auf dem Stationsaufenthalt liegen wird, sind die Knoten für Vorgänger- und Nachfolgeaktivitäten bloß mit gestrichelten Linien angedeutet. Wegen einer Verschiebung nachfolgender Aktivitäten sei beispielsweise der Endzeitpunkt der betrachteten stationären Einsatzaktivität um sechs

Zeiteinheiten nach vorne zu rücken. Dies wird oberhalb des Knotens im Präzedenzgraph durch den Muss-Wert im oberen rechten Feld der Pastille  angezeigt.

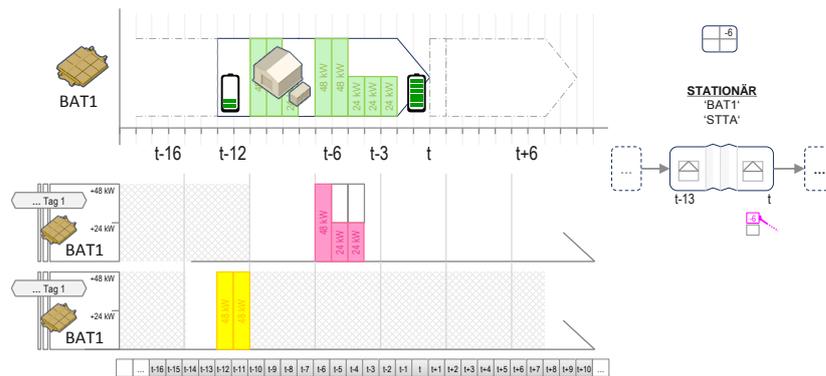


Abbildung 75 Startsituation im geplanten Ablauf einer stationären Einsatzaktivität, die von einer Verschiebung betroffen ist.

Neben einer Teilsequenz für den Einsatz der Wechselbatterie 'BAT1' ist in **Abbildung 75** auch die zeitweilige Vorhaltung von Zuschaltleistung  für Minutenreserve und die Bereithaltung von Abschaltleistung zur Kompensation  gezeigt. Im abgebildeten Beispiel sei es so entschieden, in den Zeitscheiben Nr. $t-12$ und Nr. $t-11$ ein Zuschaltpotenzial in Höhe von 48 kW für ein Angebot von Minutenreserve zu nutzen. Es handelt sich dabei ausgehend von der Wechselbatterie 'BAT1' um einen Schnipsel für ein Angebot zu einem Minutenreserveprodukt, welches einen vierstündigen Zeitraum umfasst. Das heißt, das Angebot begründet sich auf Zuschaltpotenzialen mehrerer verschiedener Wechselbatterien. Für die Wechselbatterie 'BAT1' ist in diesem Beispiel isoliert zu betrachten, wie die Zuschaltung im Bedarfsfall kompensiert werden kann. Es sei im abgebildeten Beispiel so entschieden, in der Zeitscheibe Nr. $t-6$ eine Abschaltleistung in Höhe von 48 kW und in den Zeitscheiben Nr. $t-5$ und Nr. $t-4$ in Höhe von 24 kW zu Kompensationszwecken bereitzuhalten. Des Weiteren sei festgelegt, zu keiner Zeit Abschaltpotenzial für ein Angebot von Minutenreserve oder ein Zuschaltpotenzial zu Kompensationszwecken zu nutzen.

In den Zeitscheiben Nr. $t-8$, Nr. $t-5$, Nr. $t-3$ und Nr. $t-2$ ist eine Ladeleistung  in Höhe von 24 kW festgelegt. In den Zeitscheiben Nr. $t-10$, Nr. $t-9$, Nr. $t-6$ und Nr. $t-4$ ist die maximale Ladeleistung von 48 kW gewählt. In der übrigen Zeit der stationären Einsatzaktivität ist eine Ladeleistung von null festgelegt. Insgesamt werden damit in diesem Aufenthaltszeitraum 288 kWh elektrischer Energie in die Wechselbatterie 'BAT1' nachgeführt. Eingangs des Stationsaufenthalts beim Zeitpunkt $t-13$ liegt der Ladezustand  auf dem Reservenniveau; Ausgangs zum Zeitpunkt t ist der Vollladezustand  erreicht.

Verständlicherweise kann eine stationäre Einsatzaktivität an ihren Enden eingekürzt werden, sollte dort der Ladeverlauf wie in **Beispiel 13** noch nicht eingesetzt haben oder bereits abgeschlossen sein.

Fortsetzung von **Beispiel 13**

Die festgelegte Ladeleistung  wird in den einzelnen Zeitscheiben durch die grünen Balken angezeigt. Es ist schnell ersichtlich, dass an beiden Enden der stationären Einsatzaktivität in diesem Beispiel eine Ladeleistung von null festgelegt ist. Die letzten zwei Aufenthaltsvorgänge sind in **Abbildung 76** farblich hervorgehoben. Im Präzedenzgraph sind die entsprechenden Knoten vom Zeit-

punkt $t-2$ bis zum Zeitpunkt t nach hinten aufgefaltet; im Gantt-Diagramm sind sie mit einer Umrandung markiert.

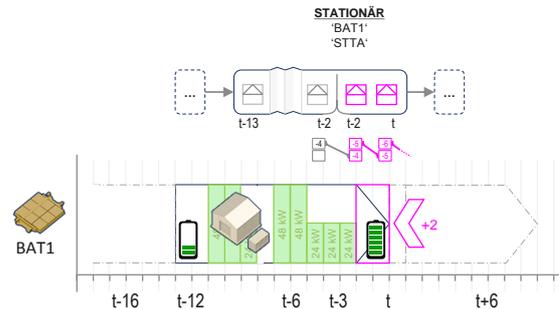


Abbildung 76 Dämpfung der Verschiebung bei endständigen Aufenthaltsvorgängen ohne Ladeleistung

Der Aufenthaltsvorgang \square in der Zeitscheibe Nr. t ist ohne weiteres Zutun heraustrennbar, denn es ist weder eine Ladeleistung festgelegt oder Ladeleistung hier hinein umzuplatzieren noch wird auf ein Zuschalt-/Abschaltpotenzial zurückgegriffen. Folglich wird vermerkt, dass dieser Aufenthaltsvorgang im Ablaufplan ersatzlos herausgetrennt \leftarrow werden kann. Dies wirkt sich schon mal um eine Zeiteinheit dämpfend auf die Verschiebung aus. Der Aufenthaltsvorgang ist von einer Verschiebung mit dem Muss-Wert -6 betroffen, der schon im oberen Feld des Karrees \square eingetragen ist; in das untere Feld des Karrees \square wird nun der Kann-Wert -5 eingetragen. Der Kann-Wert des letzten Aufenthaltsvorgangs aus der Einsatzaktivität wird als Muss-Wert \square des vorletzten Aufenthaltsvorgangs übernommen. Dieser ist bloß noch von einer Verschiebung mit dem Wert -5 betroffen, die im oberen Feld seines Karrees vermerkt ist. Auch der vorletzte Aufenthaltsvorgang \square in der Zeitscheibe Nr. $t-1$ kann auf diese Weise herausgetrennt \leftarrow werden und dämpft die Verschiebung weiter ab. In das untere Feld des Karrees \square wird hier nun der Wert -4 eingetragen.

Der vorausgehende Aufenthaltsvorgang \square in der Zeitscheibe Nr. $t-2$ ist von einer Verschiebung mit dem Wert -4 betroffen. Insoweit kann eine Dämpfung von zwei Zeiteinheiten erreicht werden.

Freilich kann am Kopf der stationären Einsatzaktivität schon eine Ladeleistung festgelegt sein oder es ist wissentlich im Zuge der laufenden Überarbeitung eine Ladeleistung dorthin umzuplatzieren gewesen. Der Ablaufplan kann in der Weise verändert werden, dass Ladeleistung von einer Zeitscheibe innerhalb des betreffenden Stationsaufenthaltszeitraums in eine andere Zeitscheibe umplatziert wird. Beim Umplatzen von Ladeleistung ist lediglich zu beachten, dass nicht etwa ein Zuschalt- oder Abschaltpotenzial aufgehoben wird, auf deren Grundlage laut Plan entweder Minutenreserve angeboten wird oder eine Kompensation möglich ist.

Fortsetzung von **Beispiel 13**

Die **Abbildung 77** zeigt nun den Ausschnitt des Ablaufplans, in welchem die zwei zuvor beschriebenen Aufenthaltsvorgänge in den Zeitscheiben Nr. t und Nr. $t-1$ herausgetrennt wurden. Wiederum sind die letzten zwei Aufenthaltsvorgänge farblich hervorgehoben, die für das Einkürzen der stationären Einsatzaktivität nach einander zu betrachten sind. Im Präzedenzgraph sind die entsprechenden Knoten vom Zeitpunkt $t-4$ bis zum Zeitpunkt $t-2$ nach hinten aufgefaltet; im Gantt-Diagramm sind sie mit einer Umrandung der Zeitscheiben Nr. $t-3$ und Nr. $t-2$ markiert.

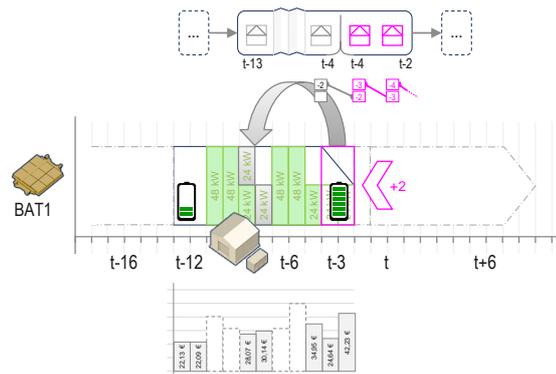


Abbildung 77 Dämpfung der Verschiebung bei Aufenthaltsvorgängen mit umplatzierbarer Ladeleistung

Im unteren Teil von **Abbildung 77** sind beispielhafte Bezugspreiskonditionen für den Stationsaufenthaltszeitraum angegeben. Es bietet sich an, hinsichtlich der Bezugspreiskonditionen die nächstgünstigen Zeitscheiben auszuwählen, um die Ladeleistung der betrachteten Aufenthaltsvorgänge dorthin zu verlegen. In dieser Hinsicht sei zum Beispiel der prognostizierte Bezugspreis mit 24,95 € für die Zeitscheibe Nr. $t-3$ niedriger als die Bezugspreise von 28,07 € für die Zeitscheibe Nr. $t-8$ und von 30,14 € für die Zeitscheibe Nr. $t-7$. Mit einem Bezugspreis von 34,95 € steht die Zeitscheibe Nr. $t-4$ weiter hinten in der Auswahlreihenfolge. In die Zeitscheibe Nr. $t-11$ mit dem Bezugspreis 20,09 € und die Zeitscheibe Nr. $t-12$ mit 20,13 € kann bis hierher keine weitere Ladeleistung angebracht werden, da sich durch die festgelegte Nullladeleistung ein Zuschaltpotenzial ausprägt, welches laut Plan jeweils vollständig zur Vorhaltung von Minutenreserve gebraucht wird. Darum stehen diese Zeitscheiben in der Reihenfolge der Bezugspreiskonditionen noch hinter der Zeitscheibe Nr. $t-4$. Eine Zeitscheibe kann auch mehrfach in dieser Reihenfolge stehen, falls zu einem Teil direkt Ladeleistung angebracht werden kann und ein anderer Teil durch den Gebrauch von Zuschaltpotenzial für ein Minutenreserveangebot blockiert ist.

Im abgebildeten Beispiel weist die stationäre Einsatzaktivität in den Zeitscheiben Nr. $t-3$ und Nr. $t-2$ zwei endständige Aufenthaltsvorgänge auf, in denen jeweils eine Ladeleistung in Höhe von 24 kW festgelegt ist. Damit diese Aufenthaltsvorgänge heraustrennbar werden, müsste die dort angebrachte Ladeleistung jeweils ausgeräumt werden. Eine Nutzung von Zuschalt-/Abschaltleistung findet zu dieser Zeit nicht statt. Gemäß der Reihenfolge der Bezugspreiskonditionen wird die Ladeleistung in Höhe von 24 kW aus dem Aufenthaltsvorgang in der Zeitscheibe Nr. $t-2$ zunächst in den Aufenthaltsvorgang in Zeitscheibe Nr. $t-3$ umzuplatzieren sein. Dies sollte ungeachtet dessen passieren, dass der Aufenthaltsvorgang in der Zeitscheibe Nr. $t-3$ anschließend selbst hinsichtlich der Dämpfung betrachtet wird. Ansonsten ließe sich an dieser Stelle argumentieren, ob die ursprünglich für die Zeitscheibe Nr. $t-2$ festgelegte Ladeleistung nicht besser zeitlich weitläufiger auszuräumen wäre. In der Folge wird vermerkt, dass der Aufenthaltsvorgang in der Zeitscheibe Nr. $t-2$ im Ablaufplan ersatzlos gestrichen werden kann. Beim Aufenthaltsvorgang in der Zeitscheibe Nr. $t-3$ sind daraufhin die ursprünglich festgelegte 24 kW Ladeleistung plus die just hierher zu verlegende 24 kW Ladeleistung loszuwerden. Die Ladeleistung in der Summe von 48 kW kann zu einem Teil von 24 kW in Zeitscheibe Nr. $t-8$ und zu einem anderen Teil von 24 kW in Zeitscheibe Nr. $t-7$ verlegt werden. Dann wird auch für den Aufenthaltsvorgang in Zeitscheibe Nr. $t-3$ vermerkt, dass er im Ablaufplan ersatzlos gestrichen werden kann. Insgesamt kann insoweit eine Dämpfung von vier Zeiteinheiten erreicht werden.

Am Kopf der stationären Einsatzaktivität kann ein Zuschalt-/Abschaltpotenzial ausgeprägt sein, welches zu Kompensationszwecken gebraucht wird. Dabei ist es unerheblich, ob für den betreffenden Aufenthaltsvorgang bei der Veränderung des Ablaufplans wissentlich eine Ladeleistung angebracht worden ist oder nicht. Entweder mag ein Abschaltpotenzial bezüglich einer früheren Zuschaltung oder ein Zuschaltpotenzial bezüglich einer früheren Abschaltung zum Kompensationszweck gebraucht werden. Der Ablaufplan kann in der Weise verändert werden, dass anstelle des Zuschalt-/Abschaltpotenzials von einer Zeitscheibe innerhalb des betreffenden Stationsaufenthaltszeitraums das Zuschalt-/Abschaltpotenzial einer anderen Zeitscheibe dem Kompensationszweck gewidmet werden kann. Für eine solche Umwidmung ist zu beachten, dass die Kompensationszwecke für das Angebot von Minutenreserve verfolgt werden. Also kann das Zuschalt-/Abschaltpotenzial erst nach der betreffenden Produktperiode des Minutenreserveangebots bereitgehalten werden.

Fortsetzung von **Beispiel 13**

In **Abbildung 78** wird es so dargestellt, dass die Aufenthaltsvorgänge in den Zeitscheiben Nr. $t-2$ und Nr. $t-3$ herausgetrennt wurden. In der Zeitscheibe Nr. $t-4$ gibt es in diesem Beispiel nun einen endständigen Aufenthaltsvorgang, in dem eine Ladeleistung kW in Höhe von 24 kW festgelegt ist und ein Abschaltpotenzial von 24 kW zu Kompensationszwecken kW gebraucht wird. Dieser ist farblich hervorgehoben und wird für das Einkürzen der stationären Einsatzaktivität betrachtet. Im Präzedenzgraph ist der entsprechende Knoten  vom Zeitpunkt $t-5$ bis zum Zeitpunkt $t-4$ nach hinten aufgefalt; im Gantt-Diagramm ist er mit einer Umrandung der Zeitscheibe Nr. $t-4$ markiert.

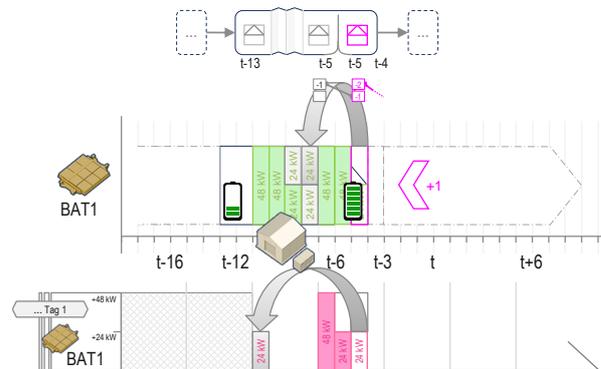


Abbildung 78 Dämpfung der Verschiebung bei Aufenthaltsvorgängen mit Gebrauch von Abschaltpotenzial

Im unteren Teil von **Abbildung 78** wird die Bereithaltung von Abschaltleistung zur Kompensation kW gezeigt. Die Produktperiode für das bislang beschlossene Angebot von Minutenreserve endet beispielsweise zum Zeitpunkt $t-11$. Mit einer gräulichen Sperrzone ist angedeutet, dass die Kompensation bei Bedarf nachträglich zu dieser Produktperiode vorgenommen werden müsste. Eine Umwidmung des Gebrauchs von Abschaltpotenzialen ist in diesem Beispiel nur innerhalb des Zeitbereichs von Zeitscheibe Nr. $t-10$ bis Nr. $t-4$ möglich. Verbleibende Abschaltpotenziale werden in der zeitlichen Reihenfolge der Zeitscheiben, in denen sie ausgeprägt sind, betrachtet. Sollte für das betreffende Minutenreserveangebot Regelernergie erbracht werden müssen, ist es möglich dieses frühestens ab der Zeitscheibe Nr. $t-10$ zu kompensieren. In der Auswahlreihenfolge steht demnach das verbleibende Abschaltpotenzial von 48 kW aus Zeitscheibe Nr. $t-10$ vor dem ungenutzten Abschaltpotenzial von 48 kW aus Zeitscheibe Nr. $t-9$ und so weiter.

Um die Verschiebung weiter abzdämpfen, müssten in der Zeitscheibe Nr. $t-4$ sowohl die festgelegte Ladeleistung 48 kW als auch der Gebrauch des ausgeprägten Abschaltpotenzials 24 kW ausgeräumt werden. Als Erstes wird die Nutzung des Abschaltpotenzials in Höhe von 24 kW von der Zeitscheibe Nr. $t-4$ auf die Zeitscheibe Nr. $t-10$ 24 kW verlegt. Danach ist es nicht mehr erforderlich, in der Zeitscheibe Nr. $t-4$ das entsprechende Abschaltpotenzial auszuprägen. Als Zweites kann also die festgelegte Ladeleistung von der Zeitscheibe Nr. $t-4$ in die Zeitscheibe Nr. $t-7$ umplatziert 48 kW werden. Daraufhin wird für den Aufenthaltsvorgang in Zeitscheibe Nr. $t-4$ vermerkt, dass er im Ablaufplan ersatzlos herausgetrennt \leftarrow werden kann. Insgesamt kann insoweit eine Dämpfung von fünf Zeiteinheiten erreicht werden.

Dieses bezieht sich auf eine bestimmte Produktperiode, die von dem Stationsaufenthaltszeitraum überlappt wird. Unter besonderen Umständen kann es erforderlich sein, Ladeleistung von einer Zeitscheibe im Aufenthaltszeitraum zu einer anderen Zeitscheibe umzuplatzieren, obwohl dort wegen der Nutzung von Zuschaltpotenzial ohne weiteres gar keine Ladeleistung aufgenommen werden kann.

Fortsetzung von **Beispiel 13**

Ein weiteres Mal wird es in **Abbildung 79** so dargestellt, dass Aufenthaltsvorgang in der Zeitscheibe Nr. $t-4$ bereits herausgetrennt wurde. Eine weitere Dämpfung erscheint ohne Weiteres nicht möglich, da mit dem nächsten endständigen Aufenthaltsvorgang eine Ladeleistung 48 kW ausgeräumt werden müsste, aber abgesehen von den Zeitscheiben, in denen Minutenreserve vorzuhalten 48 kW ist, keine der Zeitscheiben im Stationsaufenthaltszeitraum mehr aufnahmefähig ist.

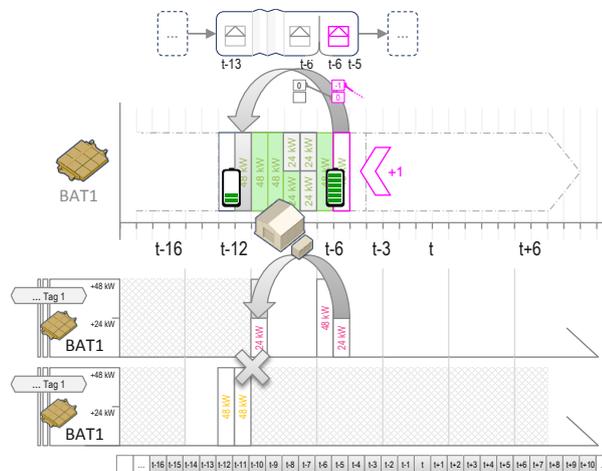


Abbildung 79 Dämpfung der Verschiebung bei Aufenthaltsvorgängen mit Aufhebung von Minutenreserveangeboten
 Als Erstes wird die Nutzung des Abschaltpotenzials in Höhe von 24 kW von der Zeitscheibe Nr. $t-4$ in die Zeitscheibe Nr. $t-10$ 24 kW verlegt. Als Zweites wird probiert, die Ladeleistung in Höhe von 48 kW umzuplatzieren 48 kW und den betrachteten Aufenthaltsvorgang damit heraustrennbar zu machen. Doch bei der nächstgünstigsten Zeitscheibe ist eine Blockierung durch das für ein Minutenreserveangebot gebrauchte Zuschaltpotenzial 48 kW vorzufinden. Bevor die Ladeleistung in der Zeitscheibe Nr. $t-11$ angebracht werden kann, muss das Minutenreserveangebot aufgehoben werden, welches dort das Zuschaltpotenzial in Gebrauch genommen hat. Die Aufhebung \times des Minutenreserveangebots bewirkt nicht nur, dass die Zuschaltpotenziale in Zeitscheiben Nr. $t-12$ und Nr. $t-11$ außer Ge-

brauch gestellt \boxed{KW} werden. Es werden auch die Abschaltpotenziale in den Zeitscheiben Nr. $t-10$, Nr. $t-7$ und Nr. $t-6$ nicht länger \boxed{KW} gebraucht. Weitere Auswirkungen reichen über den abgebildeten Ablaufplanausschnitt hinaus. Denn in diesem Beispiel wurde nur ein Angebotsschnipsel $\boxed{1}$ gezeigt; die übrigen Angebotsschnipsel werden mit der Aufhebung des Minutenreserveangebots selbstverständlich ebenfalls nicht mehr benötigt. Nachdem von Ladeleistung frei zu räumen ist, wird für den Aufenthaltsvorgang in Zeitscheibe Nr. $t-4$ vermerkt, dass er im Ablaufplan ersatzlos gestrichen \leftarrow werden kann.

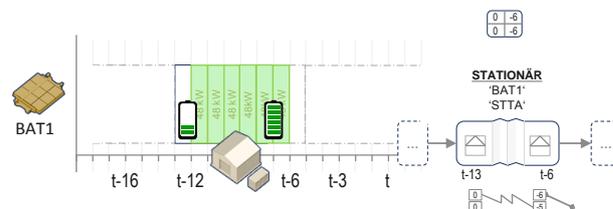


Abbildung 80 Endsituation im geplanten Ablauf einer stationären Einsatzaktivität, deren Verschiebung abgedämpft werden kann.

Wie in **Abbildung 80** gezeigt, kann die Verschiebung der stationären Einsatzaktivität insgesamt um sechs Zeiteinheiten gedämpft werden. Angesichts des Muss-Werts -6 wird darum der Kann-Wert -6 für den Endzeitpunkt \boxed{M} eingetragen. In der Folge müsste der Startzeitpunkt nicht mehr verschoben werden, was bei mehreren verketteten Aufenthaltsvorgängen \boxed{M} gar keine Schwierigkeiten bereitet. Abschließend werden der Muss-Wert ± 0 und der Kann-Wert ± 0 für den Startzeitpunkt der stationären Einsatzaktivität \boxed{M} vermerkt.

2. Dämpfung bei einer mobilen Einsatzaktivität

Eine mobile Einsatzaktivität einer Wechselbatterie mit einem Fahrzeug setzt sich aus einer oder mehreren direkt aufeinanderfolgenden Ausstattungsvorgängen zusammen. Aus ihrer Mitte können keine Ausstattungsvorgänge herausgelöst werden, denn im Plan muss die Ausstattung des Fahrzeugs mit der Wechselbatterie für den Fahrbetrieb durchgehend bestehen bleiben. In Richtung der Verschiebung können am Kopf der mobilen Einsatzaktivität können unter gewissen Voraussetzungen endständige Ausstattungsvorgänge herausgetrennt werden, um so den Endzeitpunkt einer mobilen Einsatzaktivität nach vorne rücken zu können. Für einen betrachteten Aufenthaltsvorgang und alle dahinter liegenden Vorgänge der Einsatzaktivität muss dafür grundlegend eine Entladeleistung von null festgestellt sein und es darf keinerlei Entladeleistung in diesen Ausstattungsvorgang hineingedrängt sein.

Mit einer mobilen Einsatzaktivität für eine Wechselbatterie mit einem Fahrzeug korrespondiert der Fahrbetrieb des Fahrzeugs in dieser Zeit. Wird die mobile Einsatzaktivität im Ablaufplan angepasst, so müssen diese Veränderungen auch an dem geplanten Fahrbetrieb einheitlich vorgenommen werden. Der Fahrbetrieb lässt zwar sehr viele Ablaufplanveränderungen zu, da innerhalb eines Transportauftragsprogramms eines Fahrzeugs sämtliche zeitweiligen Transportanforderungen unerfüllt bleiben können. Doch es können sich bei der Umstellung des Fahrbetriebs größere oder geringe Strafpunkte ergeben, je nachdem welche Transportanforderungen laut Plan letztlich abgedeckt sind oder nicht zu erfüllen sind.

Beispiel 14 Dämpfung einer von Nachfolgeaktivitäten ausgelösten Verschiebung
bei einer mobilen Einsatzaktivität

In diesem Beispiel wird das Heraustrennen/Hinzufügen endständiger Ausstattungsvorgänge erläutert. Es muss lediglich eine Wechselbatterie 'BAT1' und ein Fahrzeug 'AGV57' betrachtet zu werden. Das Fahrzeug 'AGV57' ist über einen gewissen Zeitraum mit der Wechselbatterie 'BAT1' ausgestattet. Es besitzt ein individuelles Transportauftragsprogramm #, nach dem sich der Energiebedarf, das heißt die Entladeleistung kW über die Zeit, richtet. In **Abbildung 81** werden relevante Ausschnitte eines entsprechenden Ablaufplans, des zugehörigen Präzedenzgraphen und des Fahrbetriebs dargestellt. Im rechten Bildteil wird vom Präzedenzgraph der Knoten für die mobile Einsatzaktivität genauer abgebildet. Da der Fokus auf dem Stationsaufenthalt liegen wird, sind die Knoten für Vorgänger- und Nachfolgeaktivitäten bloß mit gestrichelten Linien angedeutet. Wegen einer Verschiebung nachfolgender Aktivitäten sei beispielsweise der Endzeitpunkt der betrachteten stationären Einsatzaktivität um sechs Zeiteinheiten nach vorne zu rücken. Dies wird oberhalb des Knotens im Präzedenzgraph durch den Muss-Wert im oberen rechten Feld der Pastille $\begin{matrix} \square & 4 \\ \square & \end{matrix}$ angezeigt.

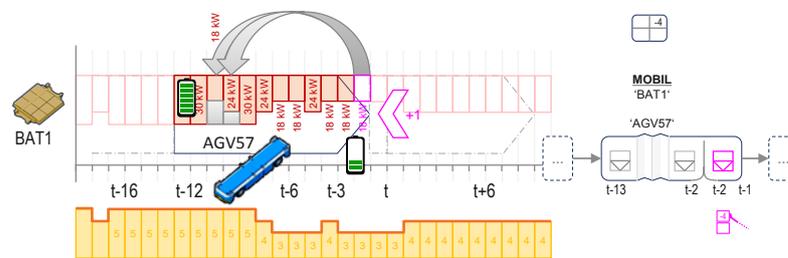


Abbildung 81 Heraustrennen eines Ausstattungsvorgangs bei einer mobilen Einsatzaktivität

Um einen Ausstattungsvorgang in der Zeitscheibe Nr. $t-1$ heraustrennbar \curvearrowright zu machen, muss die Entladeleistung kW von 18 kW abgeräumt und auf vorausgehende Ausstattungsvorgänge umverlegt werden. Bei einem Ausstattungsvorgang \square lässt sich maximal so viel Entladeleistung feststellen, wie es zeitweilig bedarf, um die Transportanforderungen vollständig zu erfüllen. In der Zeitscheibe Nr. $t-11$ kann 12 kW und in der Zeitscheibe Nr. $t-10$ kann 6 kW zusätzliche Entladeleistung angebracht werden.

Während ein Fahrzeug mit einer bestimmten Wechselbatterie ausgestattet ist, wird diese Wechselbatterie im Zuge des Fahrbetriebs dieses Fahrzeugs entladen. Im **Beispiel 14** ist gut zu sehen, dass die Entladung der Wechselbatterie im Verlauf der Zeit daran gekoppelt, wie intensiv die zeitweiligen Transportanforderungen sind. Bei einer Veränderung des Ablaufplans ist zu gewährleisten, dass die Ladezustände am Eingang wie auch am Ausgang der mobilen Einsatzaktivität bestehen bleiben. Denn eine Vorgängeraktivität mag zu einem bestimmten Ladezustand hinführen und eine Nachfolgeaktivität mag eben diesen Ladezustand benötigen.

Fortsetzung von **Beispiel 14**

Die **Abbildung 82** zeigt nun den Ausschnitt des Ablaufplans, in welchem wie zuvor beschrieben ein Ausstattungsvorgang in der Zeitscheibe Nr. $t-1$ herausgetrennt worden ist. In den Ausstattungsvorgängen \square in den Zeitscheiben Nr. $t-2$, Nr. $t-3$ und Nr. $t-4$ ist wiederum eine Entladeleistung \curvearrowright auszuräumen. Allerdings kann bei keiner der verbleibenden Ausstattungsvorgänge mehr Entladeleistung angebracht werden. Denn zu jeder Zeit des Fahrbetriebs wird die Transportlast #, genauer ge-

nommen der entsprechende Energiebedarf \square , exakt erfüllt. Es kann also in diesem Beispiel bloß noch auf den Vorlauf der mobilen Batterieeinsatzaktivität \curvearrowright ausgewichen werden.

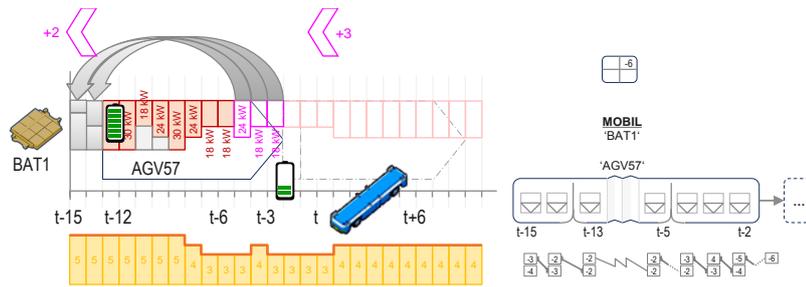


Abbildung 82 Durchrollen von Ausstattungsvorgängen bei einer mobilen Einsatzaktivität

Es wird in diesem Beispiel damit begonnen, die 18 kW Entladeleistung \square aus dem Ausstattungsvorgang \square in Zeitscheibe Nr. $t-2$ auszuräumen; sie kann gänzlich in einem neu begründeten Ausstattungsvorgang in Zeitscheibe Nr. $t-13$ platziert \square werden. In diesen Ausstattungsvorgang passen dann weitere 12 kW Entladeleistung aus dem Ausstattungsvorgang \square in der Zeitscheibe Nr. $t-3$ hinein. Doch es muss auch noch für 6 kW Entladeleistung \square ein Ausstattungsvorgang in der Zeitscheibe Nr. $t-14$ angebrochen werden. Die 24 kW Entladeleistung \square aus dem Ausstattungsvorgang \square in der Zeitscheibe Nr. $t-4$ können ebenfalls kompakt in dem Ausstattungsvorgang in Zeitscheibe Nr. $t-14$ untergebracht \square werden. Somit konnte Entladeleistung aus den drei endständigen Ausstattungsvorgängen vom hinteren Ende der mobilen Einsatzaktivität eingesammelt und auf neu begründete Ausstattungsvorgänge am vorderen Ende durchgerollt werden. Dabei wurde die zeitliche Verschiebung um eine Zeiteinheit abgeschwächt.

Insbesondere bei der Überarbeitung von mobilen Einsatzaktivitäten kann eine zeitliche Veränderung in eine Ladezustandsveränderung gewandelt werden. Dies kann wie im **Beispiel 14** deshalb geschehen, weil im Vorlauf zu der betreffenden mobilen Einsatzaktivität keine Zeitscheiben mehr zur Verfügung stehen, um weitere Ausstattungsvorgänge hinzuzufügen. Es ist dann unumgänglich, die zeitliche Veränderung im Gegenzug zu einer Ladezustandsveränderung ausgangs der mobilen Einsatzaktivität durchzusetzen.

Fortsetzung von **Beispiel 14**

Die **Abbildung 83** zeigt abschließend den Ausschnitt des Ablaufplans, in welchem wie zuvor beschrieben drei Ausstattungsvorgänge am Kopf der mobilen Einsatzaktivität herausgetrennt und anstatt zwei Ausstattungsvorgängen beim Ausläufer hineingefügt worden sind. Weiter wirkt eine zeitliche Veränderung mit einer Stärke von +2 gegen das hintere Ende der mobilen Einsatzaktivität. In den Ausstattungsvorgängen \square in den Zeitscheiben Nr. $t-5$ und Nr. $t-6$ ist jeweils eine Entladeleistung \square von 18 kW auszuräumen. Dies ergibt eine Ladungsmenge von 36 kWh, die ausgangs der mobilen Einsatzaktivität in der Wechselbatterie 'BAT1' zu verbleiben \curvearrowright haben.

periode wird Angebots-/Erbringungsteil genannt; ein Block mit Umschaltpotenzial einer Zeitscheibe des Stationsaufenthalts nach der Produktperiode wird Kompensationsteil genannt. Für einen Elementarbaustein muss ein Erbringungsteil mit einem gegensätzlichen Kompensationsteil verknüpft werden. Weil Minutenreserveangebote übergeordnet zu den stationären Einsatzaktivitäten aufgebaut werden können, werden die Elementarbausteine in einem Topf zusammengeschmissen.

- Zusammenziehen von Elementarbausteinen

Dann werden nach und nach Elementarbausteine aus dem Topf gezogen. Der Erbringungs- wie auch der Kompensationsteil eines frisch gezogenen Elementarbausteins werden mit den Erbringungs- und den Kompensationsteilen der vorher gezogenen Elementarbausteine beieinander gelegt. Bei der Ziehung der Elementarbausteine wird derart vorgegangen, dass alle Zeitscheiben der betreffenden Produktperiode gleichmäßig mit Erbringungsteilen überlagert werden. Denn schließlich kann aus mehreren Elementarbausteinen, deren Erbringungsteile zeitlich direkt aufeinanderfolgen und die ganze aktuell betrachtete Produktperiode abdecken, ein Stück eines Minutenreserveangebots erstellt werden. Die Erbringungsteile der gezogenen Elementarbausteine ordnen sich im Verlauf der Ziehung in Zeilen und Spalten über den Zeitscheiben der aktuell betrachteten Produktperiode an. Da das Laden an den Ladestellen nur gänzlich an- und abgeschaltet werden kann, werden Minutenreserveangebote in einer Stückelung der maximalen Ladeleistung eines Blei-Batteriesystems geplant. Nachdem ein Elementarbaustein gezogen wurde und für ein Stück eines Minutenreserveangebots erhalten kann, müssen solche Elementarbausteine aus dem Topf der Ziehung entfernt werden, welche entweder auf demselben Erbringungs- oder Kompensationsteil basieren.

- Stückeln von Minutenreserveangeboten aus Elementarbausteinen

Nach der Ziehung wird geschaut, in welcher Zeitscheibe innerhalb der Produktperiode respektive in welcher Spalte sich die wenigsten Erbringungsteile aufgetürmt haben. Alle Elementarbausteine, deren Erbringungsteile höher gelagert sind, werden aus dem Ergebnis der Ziehung verworfen. Die Erbringungsteile aller verbleibenden Elementarbausteine liegen so gesehen in ganzen Zeilen vor. Aus jeder dieser Zeilen wird ein Stück eines Minutenreserveangebots aufgebaut, indem die Erbringungsteile und zugehörige Kompensationsteile dazu verpackt werden. Dabei wird der Gebrauch von Zuschalt- bzw. Abschaltpotenzial aus den verwendeten Elementarbausteinen zu Angebots- wie auch zu Kompensationszwecken im Ablaufplan eingetragen.

- Umordnen von Angebotsschnipseln

Innerhalb eines Stücks eines Minutenreserveangebots werden die Erbringungsteile als Schnipsel angesehen. Zwei oder mehrere Schnipsel, die zeitlich direkt aneinander anschließen und deren Umschaltpotenzial auf dieselbe Wechselbatterie zurückgeht, können gruppiert werden. Direkt nach der Ziehung mögen die Angebotsstücke aus einer recht großen Anzahl von Schnipselgruppen aufgebaut sein. Im Endeffekt soll es aber nur so viele Schnipselgruppen wie nötig geben und die Schnipselgruppen sollen so umfassend wie möglich sein. Darum werden die Schnipselgruppen zwischen den Stücken von Minutenreserveangeboten derart getauscht, dass sich ausgehend von einer Wechselbatterie möglichst viele Schnipselgruppen in einem Stück gemeinsam wiederfinden und sie zwei oder mehrere von ihnen vereinen lassen.

Beispiel 15 *Formieren von Elementarbausteinen von Minutenreserveangeboten
ausgehend von einem Stationsaufenthalt*

In **Abbildung 85** ist ein Auszug aus einem Ablaufplan mit der Einsatzsequenz für die Wechselbatterie 'BAT5' zu sehen. Im Zeitraum von Zeitscheibe Nr. 17 bis einschließlich Nr. 68 hält sie sich an einer Ladestelle der Station 'STTA' auf. Dabei wird beispielsweise von Zeitscheibe Nr. 33 bis einschließlich

Nr. 48 eine Periode für ein Angebot positiver Regelleistung von der Stunde 9 bis Stunde 12 (POS_08_12) POS_08_12
Lieferung 1 überlappt. In dieser Produktperiode hat sich bei der Wechselbatterie 'BAT5' in den Zeitscheiben Nr. 41-44 und Nr. 45-48 ein Abschaltpotenzial ausgeprägt. Diese einzelnen Blöcke von Abschaltpotenzial  sind mit A1 und A2 durchnummeriert. Im Anschluss an jene Produktperiode findet sich in den Zeitscheiben Nr. 57-60, Nr. 61-64 und Nr. 65-68 ein Zuschaltpotenzial. Diese einzelnen Blöcke von Zuschaltpotenzial  sind mit Z1, Z2 und Z3 durchnummeriert.

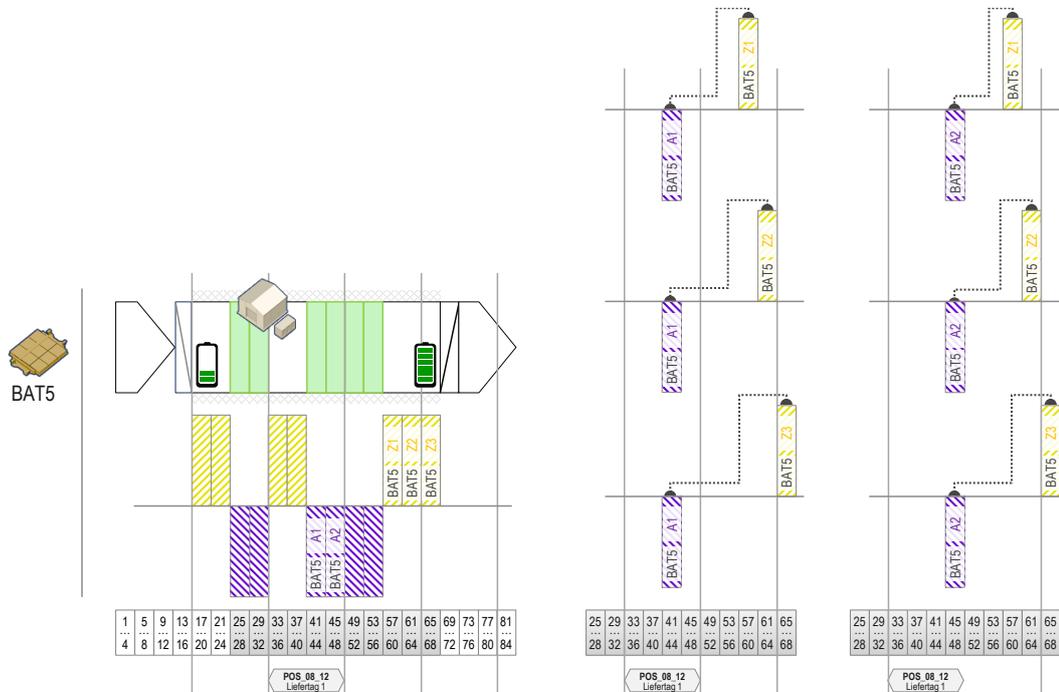


Abbildung 85 Formieren von Elementarbausteinen von Minutenreserveangeboten

Das Abschaltpotenzial jedes der aufgeführten Blöcke von Zeitscheiben kann dem Zuschaltpotenzial jedes der aufgeführten Blöcke von Zeitscheiben gegenübergestellt werden. Es kann zum Beispiel bei Bedarf in den Zeitscheiben Nr. 41-44 (Abschaltblock A1) zur Erbringung positiver Regelleistung abgeschaltet werden, um wenig später in den Zeitscheiben Nr. 57-60 (Zuschaltblock Z1) zur Kompensation bezüglich des Ladezustands zuzuschalten. Ein solcher Elementarbaustein (Abschaltblock A1 in Verknüpfung mit Zuschaltblock Z1) gewährleistet praktisch, dass das Laden nachgeholt werden könnte. Es können in diesem Beispiel insgesamt sechs verschiedene Elementarbausteine (A1-Z1, A1-Z2, ..., A2-Z3) formiert werden.

Beispiel 16 Zusammenziehen von Elementarbausteinen

Auf der linken Bildseite in **Abbildung 86** wird ein beispielhaftes Ergebnis einer Ziehung von Elementarbausteinen gezeigt. Der Fundus der Ziehung ist auf der rechten Bildseite abgebildet. Es sind in diesem Beispiel Elementarbausteine für das Angebot negativer Regelleistung in der Stunde 13 bis Stunde 16 (NEG_12_16) gezogen worden. Diese gehen auf zwei verschiedene Stationsaufenthalte von Wechselbatterien zurück.

In einer oberen Zeile wird angedeutet, wie die Elementarbausteine vom Stationsaufenthalt der Wechselbatterie 'BAT1' aufgebaut sind. In der abgebildeten Produktperiode sind die drei Zuschaltblöcke BAT1/Z1, BAT1/Z2 und BAT1/Z3 sowie die Abschaltblöcke BAT1/A1, ... BAT1/A6 verfügbar. Diese können einander wie abgebildet zu BAT1/Z1-BAT1/A1 über BAT1/Z3-BAT1/A1 bis hin zu BAT1/Z3-BAT1/A6 gegenübergestellt werden.

In einer unteren Zeile wird angedeutet, wie die Elementarbausteine vom Stationsaufenthalt der Wechselbatterie 'BAT2' aufgebaut sind. In der abgebildeten Produktperiode sind die zwei Zuschaltblöcke BAT2/Z1 und BAT2/Z2 sowie die Abschaltblöcke BAT2/A1 und BAT2/A2 verfügbar. Daraus lassen sich zum Beispiel die Elementarbausteine BAT2/Z1-BAT2/A1 über BAT2/Z2-BAT2/A1 bis hin zu BAT2/Z1-BAT2/A2 und BAT2/Z2-BAT2/A2 zusammenstellen.

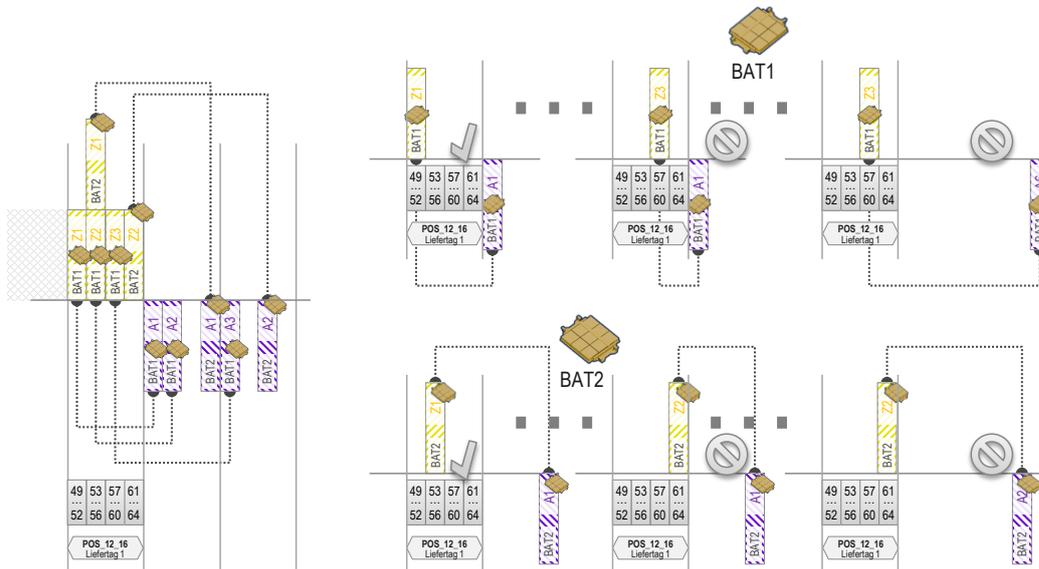


Abbildung 86 Ziehung von Elementarbausteinen aus einem Topf/Fundus

Nun wird für die Zeitscheiben innerhalb der Produktperiode eine Ziehung aus dem Fundus durchgeführt. Für die Zeitscheiben Nr. 49-52, Nr. 53-56 und Nr. 61-64 liegen die wenigsten Elementarbausteine vor. Beispielsweise mag eine erste Ziehung für die Zeitscheiben Nr. 49-52 den Elementarbaustein BAT1/Z1-BAT1/A1 ergeben haben, wie in der Aufstellung auf der linken Bildseite zu sehen ist. Daraufhin werden andere Elementarbausteine, die ebenfalls den Zuschaltblock BAT1/Z1 oder den Abschaltblock BAT1/A1 verwenden, aus dem Fundus gestrichen. Es wurde vorgemerkt, das zugrundeliegende Zuschalt- und Abschaltpotenzial in Gebrauch zu nehmen. In einer zweiten Ziehung mag sich beispielsweise für die Zeitscheiben Nr. 53-56 der Elementarbaustein BAT1/Z2-BAT1/A2 ergeben haben. Auch an dieser Stelle sind Elementarbausteine, die den Zuschaltblock BAT1/Z2 oder den Abschaltblock BAT1/A2 verwenden, aus dem Fundus zu streichen. Und so fort werden in diesem Beispiel die Elementarbausteine BAT1/Z3-BAT1/A3 für die Zeitscheiben Nr. 57-60 und BAT2/Z2-BAT/A2 für die Zeitscheiben Nr. 61-64 gezogen, bis dass ein Stück eines Minutenreserveangebots komplettiert ist. In einer fünften Ziehung wird zum Beispiel für die Zeitscheiben Nr. 53-56 mit BAT2/Z1-BAT2/A1 ein zweiter Elementarbaustein gezogen. In der Aufstellung auf der linken Bildseite türmt sich der Zuschaltblock BAT2/Z1 auf den Zuschaltblock BAT1/Z2.

Programmauflistung 6 Planung von Minutenreserveangeboten

Die Produktperioden der Minutenreserveprodukte werden (ab Zeile 1) absteigend in der Reihenfolge der prognostizierten Regelleistungspreise durchlaufen.

Zunächst müssen alle stationären Einsatzaktivitäten von Wechselbatterien herausgefunden werden, die sich mit der aktuell betrachteten Produktperiode zeitlich überschneiden (Zeile 2). Dabei ist es nicht auszuschließen, dass sich eine Wechselbatterie innerhalb einer vierstündigen Produktperiode zu mehreren Stationsaufenthalten an die Station gelangt.

Für jeden relevanten Stationsaufenthalt **sbu** wird (ab Zeile 3) ein Teilfundus mit Elementarbausteinen von Minutenreserveangeboten aufgebaut. Auf der einen Seite werden alle Zeitscheiben herbeigeholt, die in dem Aufenthaltsabschnitt liegen, welcher von der aktuell betrachteten Produktperiode abgedeckt wird. In diesen Zeitscheiben wäre vorhandenes Umschaltpotenzial zu Angebotszwecken und bedarfsweise zwecks Erbringung von Regelenergie zu gebrauchen (Zeile 4). Auf der anderen Seite werden alle Zeitscheiben hinzugeholt, die im übrigen Aufenthaltsabschnitt im Anschluss an die aktuell betrachtete Produktperiode liegen. In diesen Zeitscheiben wäre vorhandenes Umschaltpotenzial zu Kompensationszwecken zu gebrauchen (Zeile 5). Falls die aktuell betrachtete Produktperiode für ein Minutenreserveprodukt in negativer Regelrichtung steht, sind Angebotsblöcke auf Basis von Zuschaltpotenzial in den Zeitscheiben der einen Seite und Kompensationsblöcke auf Basis von Abschaltpotenzial in den Zeitscheiben der anderen Seite zu bilden. Anderenfalls die Produktperiode für ein Minutenreserveprodukt in positiver Regelrichtung steht, sind Angebotsblöcke auf Basis von Abschaltpotenzial in den Zeitscheiben der einen Seite und Kompensationsblöcke auf Basis von Zuschaltpotenzial in den Zeitscheiben der anderen Seite zu bilden. Nicht selten unterscheidet sich dabei die Anzahl der Angebotsblöcke **fromfbs** von der Anzahl der Kompensationsblöcke **intofbs**. Dies ist erstens darauf zurückzuführen, dass auf der einen Seite ungleich viele Zeitscheiben wie auf der anderen Seite vorzufinden sein können. Zweitens kann es auf der einen Seite ungleich viel des jeweiligen Umschaltpotenzials wie auf der anderen Seite geben.

Auf der Grundlage der Angebots- und Kompensationsblöcke wird dann für jeden der relevanten Stationsaufenthalte eine Menge von Elementarbausteinen der Minutenreserveangebote **pieces^{sbu}** zusammengestellt (Zeile 6ff). Dazu wird in Bezug auf einen Stationsaufenthalt jeder der Angebotsblöcke mit jedem der Kompensationsblöcke zu einem Elementarbaustein verknüpft. Sämtliche Elementarbausteine, die gebildet werden konnten, landen in einem Sammeltopf. Dabei kann stets nachvollzogen werden, von welchem Stationsaufenthalt einer Wechselbatterie ein Elementarbaustein ausgegangen ist und mit welchen Umschaltpotenzialen es zu welcher Zeit aufgebaut ist.

Gegeben: Einsatzsequenzen der Wechselbatterien einschließlich Ladeverläufen, Angebotszeiträume/Produktperioden **pps** von Minutenreserveprodukten und ihre prognostizierten Regelleistungspreise

```

1  für jede Produktperiode pp aus pps in absteigender Reihenfolge
2  sbus ← Bestimme relevante Stationsaufenthalte in Überschneidung zu pp
3  für jeden Stationsaufenthalt sbu aus sbus
4    fromfbs ← Bilde Angebotsblöcke mit Umschaltp. innerhalb von pp
5    intofbs ← Bilde Kompensationsblöcke mit Umschaltp. nach von pp
6    piecessbu ← Bilde für Stationsaufenthalt sbu durch paarweise Verknüpfung
7      der Angebotsbl. fromfbs mit den Kompensationsblöcken intofbs
8      eine Menge von Elementarbausteinen
9      Füge piecessbu in den Sammeltopf von Elementarbaust. ein
10 wiederhole
11 solange noch Elementarbausteine im Topf
12   Ermittle für welche Zeitscheibe ppti in pp aus dem Topf gezogen werden soll
13   Ermittle von welchem Stationsaufenthalt sbu der Baustein herrühren soll
14   Ziehe einen Elementarbaustein aus piecessbu mit Erbringungsteil für ppti; Füge
15 Erbringungsteil fromfb und Kompensationsteil intofb
16   im Raster von Zeilen/Spalten ein
17   Streiche wg. gegenseitigem Ausschlussprinzip aus dem Topf alle Baust.,
18   die entweder den gleichen Erbringungsteil fromfb oder
19   den gleichen Kompensationsteil intofb haben
20 wiederhole
21 amount ← Ermittle bis zu welchem Leistungswert
22   die Zeilen im Raster vollständig gefüllt/besetzt sind

```

23 Kappe Elementarbausteine, deren Erbringungsteile im Raster
24 über **amount** hinausragen
25 Stelle aus **jeder** Zeile des Rasters ein Stück eines Minutenres.angebots zusammen
26 und fasse dabei Schnipsel in den Angebotsstücken zu Gruppen zusammen
27 Für **jede** Zeitscheibe der Produktperiode eines Minutenreserveangebots
28 Reduziere Fragmentierung durch Vertauschen von einzelnen Schnipseln sowie
29 Gruppen von Schnipsel untereinander
30 **wiederhole**

Durch wiederholtes Ziehen aus diesem Sammeltopf wird dann (**ab Zeile 11**) versucht, Stück für Stück zu einem Minutenreserveangebot zu kommen. Im Ziehungsverlauf wird für die Gesamtmenge der Elementarbausteine im Blick behalten, wie viel Umschaltpotenzial in den jeweiligen Zeitscheiben der aktuell betrachteten Produktperiode blockhaft zur Verfügung steht. Es mag sein, dass für einige dieser Zeitscheiben überhaupt kein Umschaltpotenzial durch Elementarbausteine verfügbar ist. Des Weiteren wird mitgeführt, wie viele Elementarbausteine ausgehend von einem jeweiligen Stationsaufenthalt einer Wechselbatterie **pieces^{sbu}** noch verfügbar sind.

Es wird zielgerichtet aus dem Sammeltopf gezogen: Zuerst wird die Zeitscheibe **ppti** ermittelt, für die aus dem Sammeltopf gezogen werden soll. Dies richtet sich primär danach, bei welcher Zeitscheibe bislang am wenigsten Erbringungsteile zusammengezogen worden sind. Sekundär wird die Zeitscheibe selektiert, für welche unter den restlichen Elementarbausteinen weniger Erbringungsteile verfügbar sind. Daraufhin wird an eine Bausteinliste eines Stationsaufenthalts **pieces^{sbu}** herantreten, welche einen Elementarbaustein mit Erbringungsteil in der selektierten Zeitscheibe besitzt. Dies wiederum ist primär darauf fokussiert, auf wie viele verschiedenen Zeitscheiben die Erbringungsteile der Elementarbausteine verstreut liegen. Sekundär wird die Bausteinliste gewählt, die insgesamt weniger Elementarbausteine umfasst. Es ist nicht gesagt, dass in den priorisierten Bausteinlisten auch ein Baustein für die gewählte Zeitscheibe aus der Produktperiode verfügbar ist. Darum werden der Sortierung folgend sämtliche Bausteinlisten durchlaufen und nach einem Baustein in der gewählten Zeitscheibe durchforstet. Der Baustein wird zu den bereits gewählten/gezogenen Schnipseln hinzugefügt und türmt sich dort gegebenenfalls in einem Raster von Zeilen/Spalten auf. Nun sind aus dem Sammeltopf sämtliche Schnipsel zu entfernen, welche entweder den gleichen Umschaltblock **fromfb** im Erbringungsteil oder den gleichen Umschaltblock **intofb** im Kompensationsteil verwenden.

Sobald der Sammeltopf mit den Elementarbausteinen geleert ist, wird (**Zeile 21ff**) ermittelt, wie viel Umschaltleistung zusammenhängend für die Produktperiode gezogen worden ist. Es werden alle Zeitscheiben durchlaufen und der niedrigste Leistungswert **amount** ausgemacht, bis zu welchem sich die Umschaltblöcke in dem Raster aufgetürmt haben. Etwaige Überstände werden gekappt, indem die Bausteine mit ihrem Erbringungs- wie auch dem Kompensationsteil verworfen werden. Damit ist das Ziehungsergebnis nicht in Frage zu stellen, da es sich bei den überstehenden Elementarbausteinen um die zuletzt gezogenen Elementarbausteine handelt.

Danach wird das Raster (**ab Zeile 25**), in das die Elementarbausteine während der Ziehung abgelegt worden sind, Zeile für Zeile abgelaufen. Aus jeder Zeile des Raster werden die Elementarbausteine zu einem Stück eines Minutenreserveangebots verbunden/zusammengestellt. Bei dieser Zusammenstellung bleibt die Verknüpfung zwischen den Umschaltblöcken aus dem Erbringungsteil zu den Umschaltblöcken aus dem Kompensationsteil der einzelnen Elementarbausteine bestehen. Jeder Elementarbaustein wird als ein Schnipsel eines Angebotsstücks hergenommen.

Es mag sein, dass die Elementarbausteine, die im Ziehungsverlauf in einer Zeile bei einander gestellt wurden, aus einem selben Teilfundus stammen. In diesem Fall gehen die entsprechenden Schnipsel von dem gleichen Stationsaufenthalt einer Wechselbatterie aus und können innerhalb des Angebotsstücks gruppiert werden. Weil die Zusammenstellung der Elementarbausteine bzw. späterer Angebotschnipsel im Rahmen wiederholter Ziehungen verläuft, mögen die Elementarbausteine eines Teilfundus mehr oder weniger stark auf unterschiedliche Angebotsstücke verstreut worden sein. Um eine solche Fragmentierung bei den Angebotsstücken aufzuheben, können (**ab Zeile 27**) einzelne Schnipsel und Gruppen von Schnipsel zwischen den Angebotsstücken hin und her getauscht werden.

D. Abwägung von Erlösen gegenüber Kosten

Durch die Feinplanung des Ladeverlaufs kann zwar darauf abgezielt werden, die Leistungspreiserlöse für Minutenreserveangebote zu maximieren. Bei wechselnden Marktlagen ist es jedoch alles andere als selbstverständlich, dass dies das bestmögliche energiewirtschaftliche Gesamtergebnis darstellt. Weiterhin ist zwischen den Erlösen für das Angebot von Regelleistung und den Kosten des Strombezugs abzuwägen. Dahingehend wird in diesen Problemlösungsmodul überprüft, ob gegenüber dem vorliegenden Planungsstand vom beabsichtigten Gebrauch von Zuschalt-/Abschaltpotenzial eines oder mehrerer Stücke von Minutenreserveangeboten abgesehen werden kann, so dass die dann ungebundene Ladeleistung für einen nächsten Planungsstand umverteilt werden kann, um im Ganzen eine die Erlösminderung überwiegende Vergünstigung des Strombezugs zu erreichen. Es wäre sogar denkbar, dass sich nach einer etwaigen Umverteilung der Ladeleistung wieder Zuschalt-/Abschaltpotenzial ausprägt, welches aufs Neue für Angebote von Minutenreserve in Gebrauch genommen werden kann.

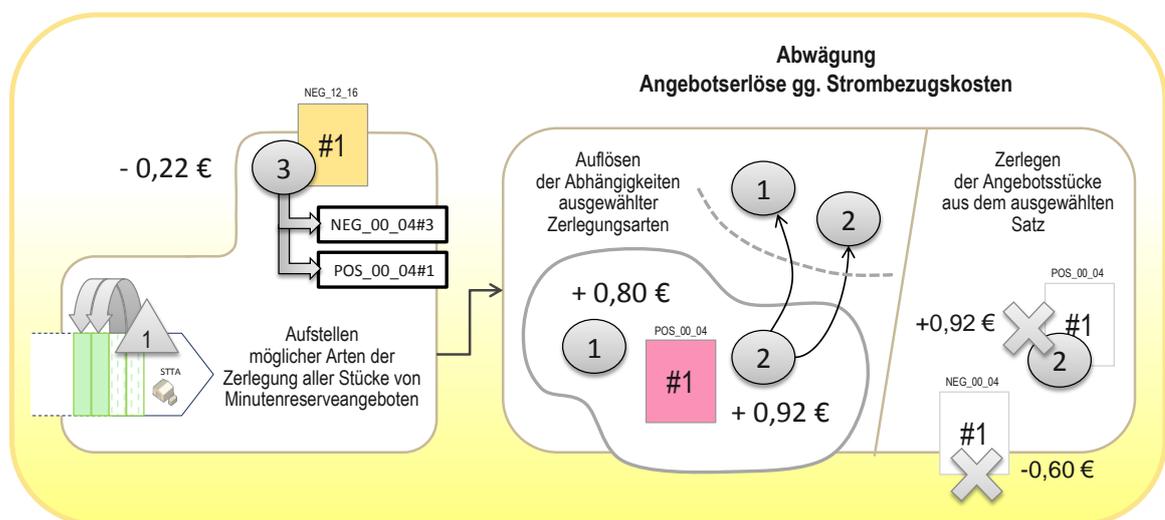


Abbildung 87 Übersicht der Dekonstruktionsschritte bei Abwägung von Minutenreserveerlösen gegenüber den Kosten des Strombezugs

Zur Abwägung der Erlöse aus dem Angebot von Minutenreserveleistung gegenüber den Kosten für den Strombezug werden die in **Abbildung 87** gezeigten Dekonstruktionsschritte durchlaufen:

- Aufstellen möglicher Arten der Zerlegung aller Stücke von Minutenreserveangeboten
Für jedes Stück eines Minutenreserveangebots wird geschaut, auf welche verschiedenen Arten es an sich aufgehoben und die freigesetzte Ladeleistung umverteilt werden kann. Um den Spielraum für die Umverteilung der Ladeleistung auszuweiten, ist in einigen Arten der Zerle-

gung eines bestimmten Angebotsstücks gedanklich vorauszusetzen, dass neben ihm auch noch anderweitige Angebotsstücke in irgendeiner Art zerlegt werden.

- Auflösen der Abhängigkeiten ausgewählter Zerlegungsarten

In diesem Universum verschiedener Arten der Zerlegung einzelner Stücke von Minutenreserveangeboten ist ein Satz von ihnen herauszusuchen, in welchem die Zerlegungsarten einander die Voraussetzungen gegenüber dem vorliegenden Planungsstand erfüllen und für einen nächsten Planungsstand eine Verbesserung des Gesamtergebnisses versprechen. Doch es gibt ebenso viele Weisen, die Voraussetzungen für eine bestimmte Art der Zerlegung eines Angebotsstücks zu erfüllen, wie die jeweiligen Arten der Zerlegung der anderweitigen Angebotsstücke miteinander kombiniert werden können. Es müssen sämtliche Alternativen dafür abgeprüft werden, die Voraussetzungen einer bestimmten Zerlegungsart direkt über eine andere Zerlegungsart oder indirekt über eine Kette von anderen Zerlegungsarten zu erfüllen.

- Zerlegen der Angebotsstücke aus dem ausgewählten Satz

Die ausgewählten Arten der Zerlegung können in beliebiger Reihenfolge am vorliegenden Planungsstand vorgenommen und damit ein nächster Planungsstand fabriziert werden.

I. Mögliche Zerlegung von Angebotsstücken

Die Zerlegung eines Stücks eines Angebots positiver Regelleistung im vorliegenden Planungsstand in Betracht zu ziehen, bedeutet zum einen, dass der beabsichtigte Gebrauch des Abschaltpotenzials der Angebots-/Erbringungsteile von Angebotschnipseln in den entsprechenden Zeitscheiben zurückgestellt würde. Im Zuge dessen würde bei der in diesen Zeitscheiben festgelegten Ladeleistung die Verankerung gelöst, das in Gebrauch genommene Abschaltpotenzial auszuprägen. Es würde also die Möglichkeit eröffnet, die Festlegung der Ladeleistung aus dem vorliegenden Planungsstand fallen zu lassen und in einem nächsten Planungsstand eine anderslautende Festlegung der Ladeleistung zu machen. Die Festlegung von Ladeleistung könnte sozusagen von einem vorliegenden Planungsstand zu einem nächsten Planungsstand innerhalb des Stationsaufenthaltszeitraums umgelegt werden. Zum anderen würde der beabsichtigte Gebrauch des Zuschaltpotenzials der Kompensationsteile von Angebotschnipseln in den entsprechenden Zeitscheiben gegenüber dem vorliegenden Planungsstand zurückgestellt. Dadurch würde bei diesen Zeitscheiben eine Blockade der Ladeleistung aufgehoben, das laut vorliegendem Planungsstand in Gebrauch genommene Zuschaltpotenzial auszuprägen. Es würde die Möglichkeit eröffnet, übrige Festlegungen der Ladeleistung in Bezug auf jene Zeitscheiben in Frage zu stellen und die Festlegungen der Ladeleistung in einem nächsten Planungsstand zu revidieren.

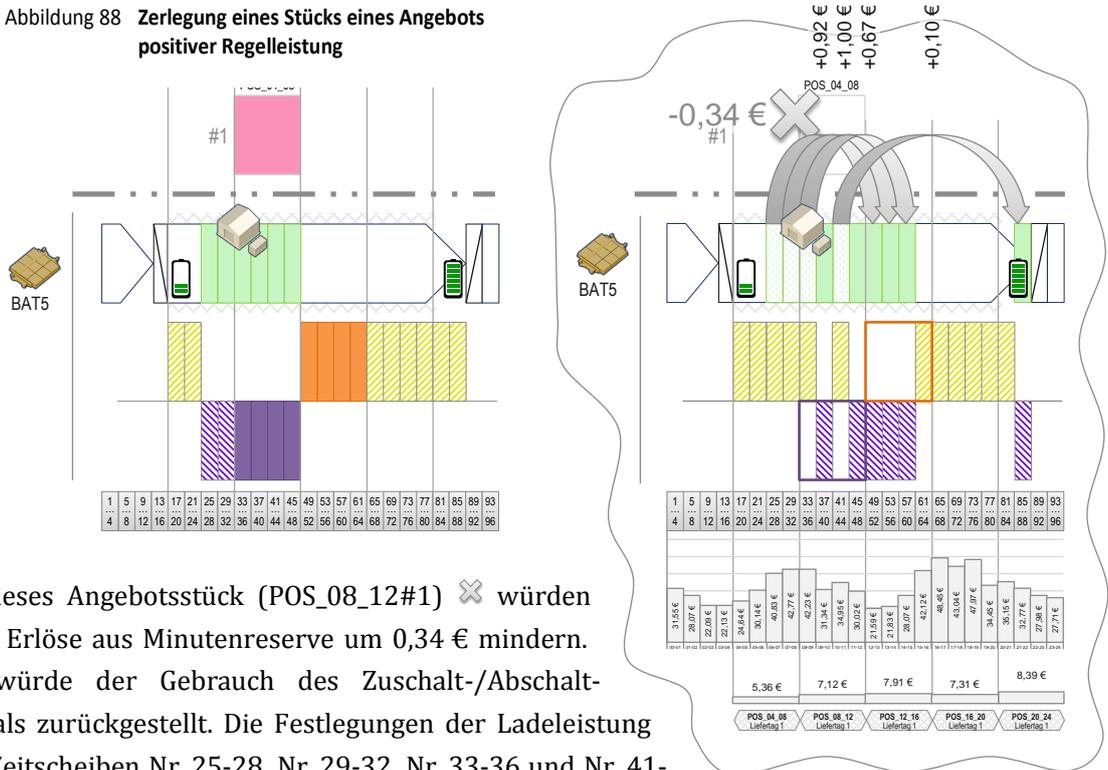
Beispiel 17 *Mögliche Zerlegung eines Stücks eines Minutenreserveangebots*

In **Abbildung 88** wird die Einsatzsequenz der Wechselbatterie 'BAT5' im Hinblick auf eine Zerlegung eines Stücks eines Minutenreserveangebots beleuchtet.

Auf der linken Bildseite wird ein Auszug aus dem vorliegenden Planungsstand und auf der rechten Seite wird ein Auszug aus einem möglichen nächsten Planungsstand gezeigt. Im mittleren Bildteil werden jeweils für den Stationsaufenthaltszeitraum die Festlegungen zu Ladeleistungen sowie die Ausprägung von Zuschalt-/Abschaltpotenzial gezeigt. Zudem ist darin der beabsichtigte Gebrauch von Zuschalt-/Abschaltpotenzial durch Stücke von Minutenreserveangeboten kenntlich gemacht. Mit den Hilfslinien im Zeitraster sind die Produktperioden für Minutenreserve voneinander abgeteilt. Im oberen Bildteil findet sich eine Aufstellung der geplanten Minutenreserveangebote. Im unteren Bildteil sind die prognostizierten Strombezugspreise neben das Zeitraster gestellt.

Im vorliegenden Planungsstand ist ein Ladeblock **48 kW** von der Zeitscheibe Nr. 25 bis einschließlich Zeitscheibe Nr. 48 festgelegt. Demzufolge ist in diesen Zeitscheiben durchgehend ein Abschaltpotenzial in Höhe von 48 kW vorzufinden. In den übrigen Zeitscheiben Nr. 17 bis Nr. 24 sowie Nr. 49 bis Nr. 88 ist ein Zuschaltpotenzial in Höhe von 48 kW ausgeprägt. Von der Stunde 9 bis Stunde 12 kann ein Stück positive Regelleistung zu 48 kW **#1** angeboten werden. Die Angebotsschnipsel nehmen derzeit in ihrem Angebots-/Erbringungsteil **48 kW** das Abschaltpotenzial aus den Zeitscheiben Nr. 33 bis Nr. 48 sowie das Zuschaltpotenzial in den Zeitscheiben Nr. 49 bis Nr. 64 **48 kW** in Gebrauch.

Abbildung 88 Zerlegung eines Stücks eines Angebots positiver Regelleistung



Ohne dieses Angebotsstück (POS_08_12#1) \times würden sich die Erlöse aus Minutenreserve um 0,34 € mindern. Dabei würde der Gebrauch des Zuschalt-/Abschaltpotenzials zurückgestellt. Die Festlegungen der Ladeleistung in den Zeitscheiben Nr. 25-28, Nr. 29-32, Nr. 33-36 und Nr. 41-44 würden fallen gelassen. Stattdessen könnte in den Zeitscheiben Nr. 49-52, Nr. 53-56 und Nr. 57-60 sowie in den Zeitscheiben Nr. 81-84 in gleicher Menge die Ladeleistung angebracht werden. Das Umlegen der Ladeleistung \Rightarrow von den Zeitscheiben Nr. 29-32 in die Zeitscheiben Nr. 53-56 führte beispielsweise zu einer Einzelvergünstigung von 1,00 € für den Strombezug. Durch neuerliche Festlegung von Ladeleistung würde in einem nächsten Planungsstand zum Beispiel in den Zeitscheiben Nr. 25-28 ein Zuschaltpotenzial ausgeprägt, in welchen im vorliegenden Planungsstand noch ein Abschaltpotenzial zu sehen ist. Wie sich das Zuschalt-/Abschaltpotenzial in einem nächsten Planungsstand genau ausprägt, ist allerdings für die Prüfung einer Zerlegung des Angebotsstücks unwesentlich. Da die Vergünstigung des Strombezug von insgesamt 2,69 € die Minderung der Erlöse von 0,34 € überwiegt, ist eine Zerlegung des Angebotsstücks (POS_08_12#1) nebst der vorgezeichneten Umlegung der Ladeleistung am vorliegenden Planungsstand umzusetzen.

Umgekehrt verhält es sich bei der Zerlegung eines Stücks eines Angebots negativer Regelleistung so, dass gegenüber dem vorliegenden Planungsstand zum einen der beabsichtigte Gebrauch des Zuschaltpotenzials der Angebots-/Erbringungsteile von Angebotsschnipseln in den entsprechenden Zeitscheiben zurückgestellt würde. Übrige Festlegungen von Ladeleistung in demselben Stationsaufenthaltszeitraum wären folglich bezüglich dieser Zeitscheiben zu hinterfragen. Möglicherweise könnte in einem nächsten Planungsstand diese Ladeleistung in jeden Zeitscheiben kostengünstiger plat-

ziert werden. Zum anderen bedeutet es, die Zerlegung eines Angebotsstücks negativer Regelleistung in Betracht zu ziehen, dass gegenüber dem vorliegenden Planungsstand der beabsichtigte Gebrauch des Abschaltpotenzials der Kompensationsteile von Angebotsschnipseln in den entsprechenden Zeitscheiben zurückgestellt würde. Dadurch würde die Festlegung der Ladeleistung in diesen Zeitscheiben aus dem vorliegenden Planungsstand freigestellt und die Ladeleistung könnte für einen nächsten Planungsstand womöglich innerhalb des Stationsaufenthaltszeitraums kostengünstiger angebracht werden.

Fortsetzung von **Beispiel 17** *Mögliche Zerlegung eines Stücks eines Minutenreserveangebots*

Ähnlich wie oben wird in **Abbildung 89** die Einsatzsequenz der Wechselbatterie 'BAT6' beleuchtet. Im vorliegenden Planungsstand ist ein kürzerer Ladeblock von der Zeitscheibe Nr. 25 bis einschließlich Zeitscheibe Nr. 32 festgelegt. Von der Zeitscheibe Nr. 33 bis einschließlich Zeitscheibe Nr. 48 findet eine Unterbrechung des Ladens statt. Demzufolge ist in diesen Zeitscheiben durchgehend ein Zuschaltpotenzial in Höhe von 48 kW vorzufinden. Ein weiterer Ladeblock reicht im vorliegenden Planungsstand von der Zeitscheibe Nr. 49 bis einschließlich Zeitscheibe Nr. 64. In dieser Zeit ist durchgehend ein Abschaltpotenzial in Höhe von 48 kW ausgeprägt. Von der Stunde 9 bis Stunde 12 kann ein Stück negative Regelleistung zu 48 kW angeboten werden. Die Angebotsschnipsel nehmen derzeit in ihrem Angebots-/Erbringungsteil das Zuschaltpotenzial aus den Zeitscheiben Nr. 33 bis Nr. 48 sowie das Abschaltpotenzial in den Zeitscheiben Nr. 49 bis Nr. 64 im Kompensationsteil in Gebrauch.

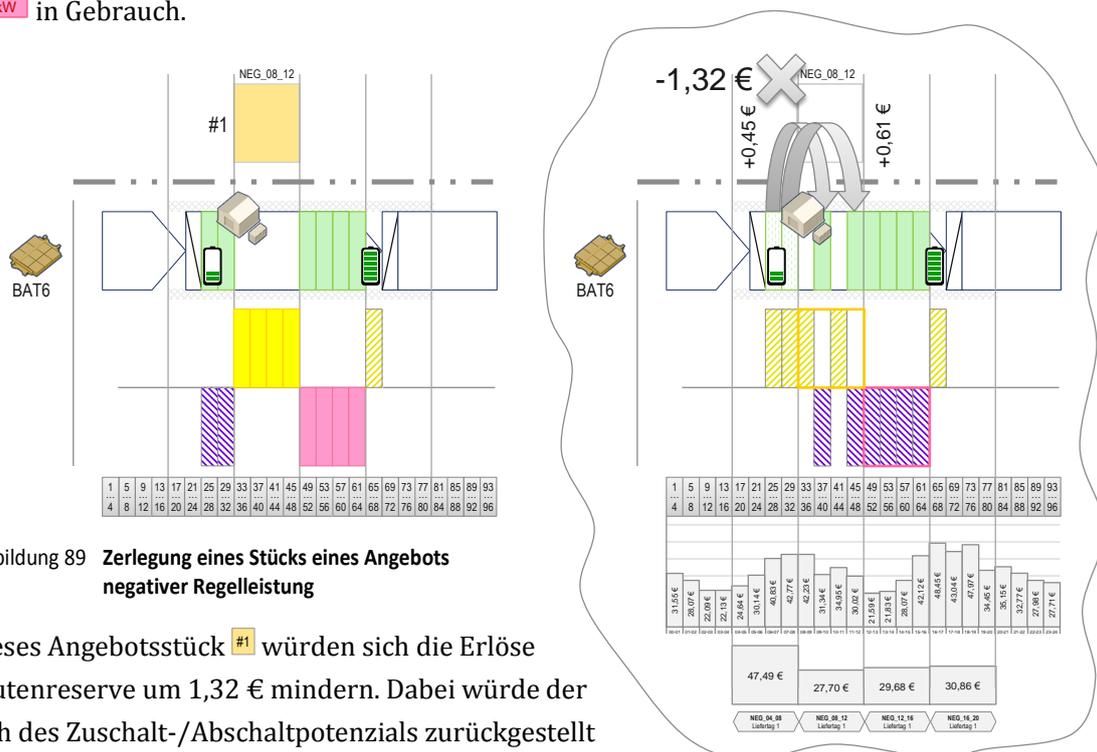


Abbildung 89 **Zerlegung eines Stücks eines Angebots negativer Regelleistung**

Ohne dieses Angebotsstück #1 würden sich die Erlöse aus Minutenreserve um 1,32 € mindern. Dabei würde der Gebrauch des Zuschalt-/Abschaltpotenzials zurückgestellt (durch Umrandung angedeutet). Die Festlegungen der Ladeleistung in den Zeitscheiben Nr. 25-28 und Nr. 29-32 würden fallen gelassen. Stattdessen könnte in den Zeitscheiben Nr. 37-40 sowie den Zeitscheiben Nr. 49-52 in gleicher Menge die Ladeleistung angebracht werden. Das Umlegen der Ladeleistung \rightarrow von den Zeitscheiben Nr. 29-32 in die Zeitscheiben Nr. 49-52 führte beispielsweise zu einer Einzelvergünstigung von 0,61 € für den Strombezug. Durch neuerliche Festlegung von Ladeleistung würde in einem nächsten Planungsstand zum Beispiel in den Zeitscheiben Nr. 37-40 ein Abschaltpotenzial ausgeprägt, in welchen im vorliegenden Planungsstand noch ein Zuschaltpotenzial zu

sehen ist. Da die Vergünstigung des Strombezug von insgesamt 1,06 € die Minderung der Erlöse von 1,32 € nicht überwiegt, ist eine Zerlegung des Angebotsstücks (NEG_08_12#1) unattraktiv.

II. Varianten für Schnipselgruppen

Jedes Stück eines Minutenreserveangebots besteht bekanntlich aus einer oder mehreren Gruppen von Schnipseln. Die Angebotschnipsel eines Minutenreserveangebots sind danach gruppiert, von welchem Stationsaufenthalt sie ausgehen und ob sie zeitlich zusammenhängend sind.

Wird die Zerlegung eines Angebotsstücks in Betracht gezogen, so wird genauer genommen auf eine Zerschlagung aller seiner Schnipselgruppen geschaut. Sollte anders herum erwogen werden, eine von dessen Schnipselgruppen zu zerschlagen, so ist ein Angebotsstück insgesamt als hinfällig zu betrachten.

Die mögliche Umlage der Festlegungen von Ladeleistung beschränkt sich zeitlich und auch mengenmäßig auf den Stationsaufenthalt, auf welchen die Angebotschnipsel der Gruppe zurückgehen.

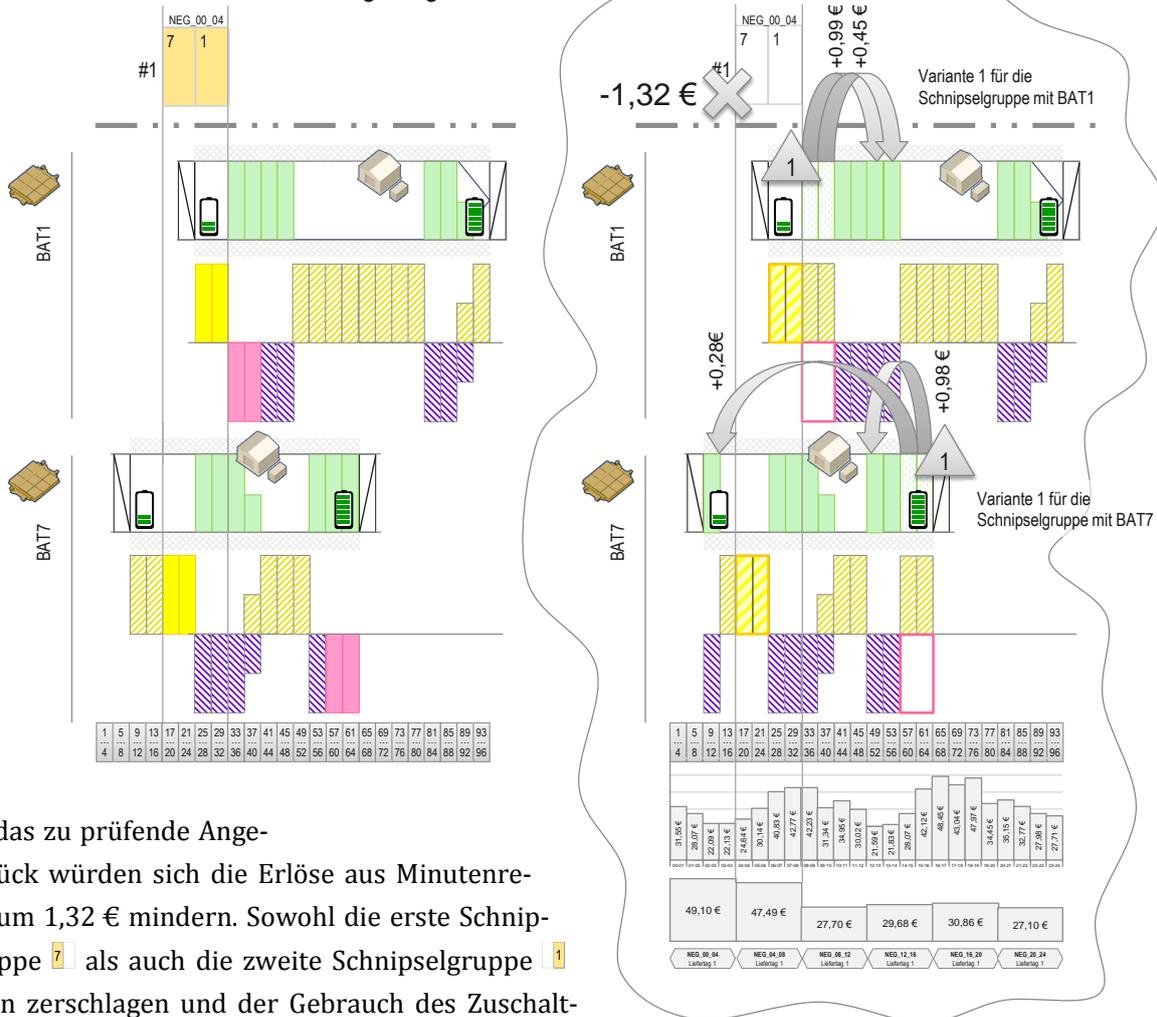
Beispiel 18 Mögliche Zerschlagung einer Schnipselgruppe

eines Stücks eines Minutenreserveangebots

In **Abbildung 90** werden ein Auszug mit einer Einsatzsequenz für die Wechselbatterie 'BAT1' und ein Auszug mit einer Einsatzsequenz für die Wechselbatterie 'BAT7' im Hinblick auf eine Zerlegung eines Stücks eines Minutenreserveangebots #1 beleuchtet. Es gehen eine erste Schnipselgruppe 7 auf den Stationsaufenthalt im Zeitraum von den Zeitscheiben Nr. 9 bis Nr. 64 der Wechselbatterie 'BAT7' und eine zweite Schnipselgruppe 1 auf den Stationsaufenthalt der Wechselbatterie 'BAT1' im Zeitraum von den Zeitscheiben Nr. 25 bis Nr. 96 zurück. Im vorliegenden Planungsstand gibt sowohl für die Wechselbatterie 'BAT1' als auch für die Wechselbatterie 'BAT7' einen zweigeteilten Ladeverlauf. Die Ladeblöcke kW für die Wechselbatterie 'BAT1' reichen von der Zeitscheibe Nr. 33 bis einschließlich Zeitscheibe Nr. 48 sowie von der Zeitscheibe Nr. 81 bis einschließlich Zeitscheibe Nr. 92. Dementsprechend ist in diesen Zeitscheiben Abschaltpotenzial ausgeprägt. In den übrigen Zeitscheiben innerhalb des Stationsaufenthaltszeitraums von Wechselbatterie 'BAT1' ist eine Ladeleistung von null festgelegt. Dadurch prägt sich in diesen Zeitscheiben ein Zuschaltpotenzial aus. Es ist ausgehend von Wechselbatterie 'BAT1' beabsichtigt, das Zuschaltpotenzial in den Zeitscheiben Nr. 25 bis Nr. 32 kW im Angebotsteil und das Abschaltpotenzial in den Zeitscheiben Nr. 33 bis Nr. 40 kW im Kompensationsteil von Schnipseln eines Angebots von Minutenreserve in der Stunde 5 bis Stunde 8 in Gebrauch zu nehmen.

Bei der Wechselbatterie 'BAT7' reichen die Ladeblöcke kW von der Zeitscheibe Nr. 25 bis Nr. 40 sowie von den Zeitscheiben Nr. 53 bis Nr. 64. In diesen Zeitscheiben ist im Stationsaufenthaltszeitraum von Wechselbatterie 'BAT7' ein Abschaltpotenzial ausgeprägt. In den übrigen Zeitscheiben ist hingegen ein Zuschaltpotenzial vorzufinden. Es ist ausgehend von Wechselbatterie 'BAT7' beabsichtigt, das Zuschaltpotenzial in den Zeitscheiben Nr. 17 bis Nr. 24 kW im Angebotsteil und das Abschaltpotenzial in den Zeitscheiben Nr. 57 bis Nr. 64 kW im Kompensationsteil von Schnipseln eines Angebots von Minutenreserve in der Stunde 5 bis Stunde 8 in Gebrauch zu nehmen.

Abbildung 90 Zerschlagung aller Schnipselgruppen eines einzigen Angebotsstücks



Ohne das zu prüfende Angebotsstück würden sich die Erlöse aus Minutenreserve um 1,32 € mindern. Sowohl die erste Schnipselgruppe 7 als auch die zweite Schnipselgruppe 1 würden zerschlagen und der Gebrauch des Zuschaltwie auch des Abschaltpotenzials zurückgestellt (durch Umrandung angedeutet). Bezogen auf den Stationsaufenthalt der Wechselbatterie 'BAT1' würden die Festlegungen der Ladeleistung in den Zeitscheiben Nr. 25-28, Nr. 29-32 und Nr. 33-36 fallen gelassen. Stattdessen könnte in den Zeitscheiben Nr. 49-52 und Nr. 53-56 in gleicher Menge die Ladeleistung angebracht werden. Das Umlegen der Ladeleistung im Stationsaufenthalt von Wechselbatterie 'BAT1' führte beispielsweise für die zweite Schnipselgruppe 1 zu einer Einzelvergünstigung von 1,44 € für den Strombezug.

Beim Stationsaufenthalt der Wechselbatterie 'BAT7' würden die Festlegungen der Ladeleistung in den Zeitscheiben Nr. 57-60 und Nr. 61-64 fallen gelassen. Stattdessen könnte ebenfalls in den Zeitscheiben Nr. 53-56 sowie in den Zeitscheiben Nr.9-12 in gleicher Menge die Ladeleistung angebracht werden. Das Umlegen der Ladeleistung im Stationsaufenthalt von Wechselbatterie 'BAT7' führte beispielsweise für die erste Schnipselgruppe 7 zu einer Einzelvergünstigung von 1,26 € für den Strombezug.

Zusammen ergäbe sich mit der Zerschlagung beider Schnipselgruppen eine Vergünstigung in Höhe von 2,70 € beim Strombezug, was die Erlösminderung in Höhe von 1,32 € deutlich überwiegt.

Wird eine Zerschlagung einer Schnipselgruppe in Betracht gezogen, so wird eben diese Schnipselgruppe dabei als hauptsächlich angesehen. Freilich ist es möglich, die Zerschlagung einer Schnipselgruppe ganz für sich allein in Betracht zu nehmen. Daraus ergibt sich die Basisvariante, den eigenen

Gebrauch von Zuschalt-/Abschaltpotenzial zurückzustellen und womöglich die Festlegungen von Ladeleistung in günstigere Zeitscheiben umzulegen. Doch die Umlage mag in der Basisvariante dadurch beschränkt sein, dass laut vorliegendem Planungsstand in den Zeitscheiben mit vergleichsweise günstigen prognostizierten Strombezugspreisen durch andere Schnipselgruppen Zuschalt-/Abschaltpotenziale in Gebrauch genommenen sind. Es kann dort keine Neufestlegung von Ladeleistung gemacht werden, ohne nebensächlich eine Zerschlagung einer oder mehrerer solcher Schnipselgruppen in Betracht zu ziehen. Was die Möglichkeiten für das Umlegen von Ladeleistung anbelangt, kann sich also innerhalb eines Stationsaufenthalts eine Schnipselgruppe eines Angebotsstücks mit Schnipselgruppen anderweitiger Angebotsstücke ins Gehege kommen.

Beispiel 19 Varianten für die Umlage der Festlegungen von Ladeleistung einer Schnipselgruppe

In **Abbildung 91** wird im Hinblick auf die Zerlegung zweier Angebotsstücke ein Auszug mit der Einsatzsequenz der Wechselbatterie 'BAT8' gezeigt. Es werden die Zerlegungen eines Stücks negativer Regelleistung von der Stunde 5 bis Stunde 8 (NEG_00_04#1) #1 sowie eines Stücks positiver Regelleistung von Stunde 13 bis Stunde 16 (POS_08_12#1) #1 erwogen. In der linken Bildhälfte ist der vorliegende Planungsstand und in der rechten Bildhälfte sind mögliche nächste Planungsstände dargestellt.

Für den Stationsaufenthalt der Wechselbatterie 'BAT8' im Zeitraum von Zeitscheibe Nr. 9 bis einschließlich Zeitscheibe Nr. 72 sind im vorliegenden Planungsstand zwei Ladeblöcke kW vorgesehen.

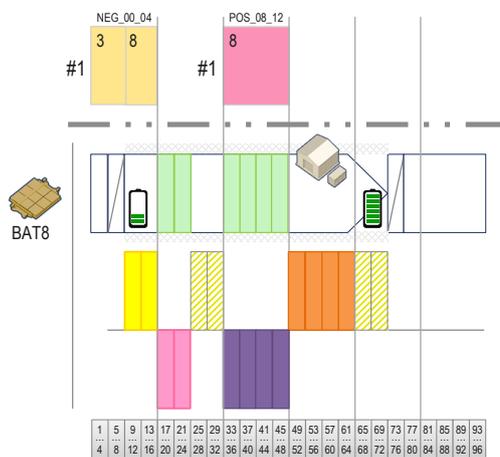
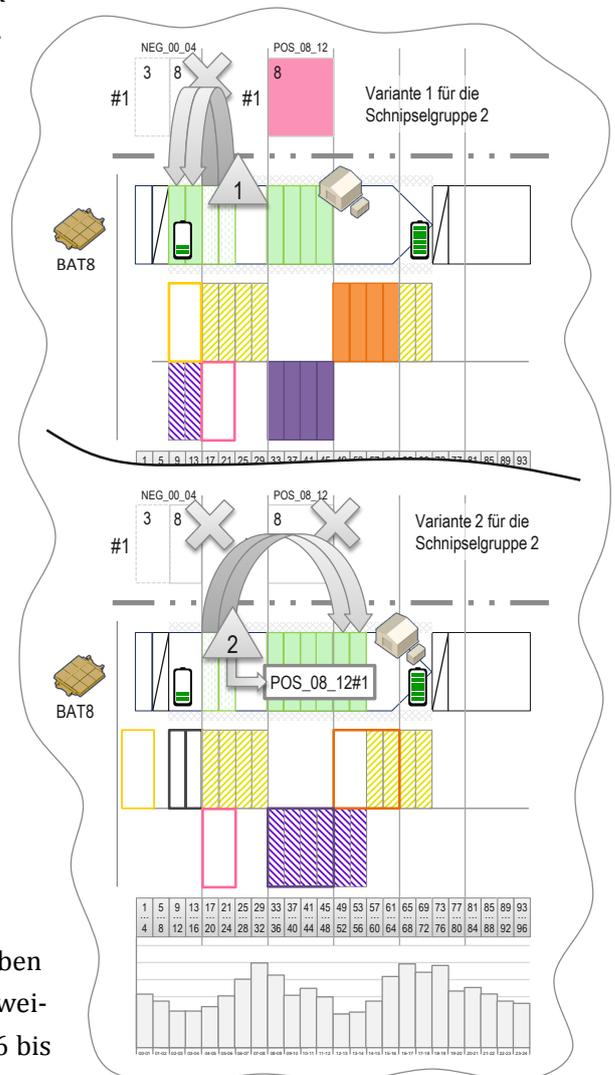


Abbildung 91 Varianten für das Umlegen von Ladeleistung bei Zerschlagung einer Schnipselgruppe

Ein erster Ladeblock reicht von den Zeitscheiben Nr. 17-20 bis zu den Zeitscheiben Nr. 21-24. Ein zweiter Ladeblock geht von den Zeitscheiben Nr. 33-36 bis zu den Zeitscheiben Nr. 45-48. In dieser Zeit ist im vorliegenden Planungsstand ein Abschaltpotenzial vorhanden. In der übrigen Zeit ist ein Zuschaltpotenzial ausgeprägt. Die zweite Schnipselgruppe des Angebotsstücks (NEG_00_04#1) geht auf den abgebildeten Stationsaufenthalt der Wechselbatterie 'BAT8' zurück. Das Zuschaltpotenzial in den Zeit-



scheiben Nr. 9-12 und Nr. 13-16 ist im Angebotsteil und das Abschaltpotenzial in den Zeitscheiben Nr. 17-20 und Nr. 21-24 ist im Kompensationsteil der Angebotsschnipsel in Gebrauch genommen. Das Angebotsstück (POS_08_12#1) besteht aus einer Schnipselgruppe, die ebenfalls auf den abgebildeten Stationsaufenthalt zurückgeht. Das Abschaltpotenzial in den Zeitscheiben Nr. 33-36 bis einschließlich zu den Zeitscheiben Nr. 45-48 wird im Angebotsteil und das Zuschaltpotenzial in den Zeitscheiben Nr. 49-52 bis zu den Zeitscheiben Nr. 61-64 wird im Kompensationsteil der Angebotsschnipsel in Gebrauch genommen.

Bei einer Zerschlagung der zweiten Schnipselgruppe des Angebotsstücks (NEG_00_04#1) würde der Gebrauch des Zuschalt-/Abschaltpotenzials zurückgestellt. Die Festlegungen der Ladeleistung in den Zeitscheiben Nr. 17-20 und Nr. 21-24 würden fallen gelassen, da sie für Zeitscheiben mit vergleichsweise hohen prognostizierten Strombezugspreisen getroffen worden sind. Es sind also Festlegungen über Ladeleistung in einer Menge von 96 kWh einzusammeln und innerhalb des Stationsaufenthaltszeitraums umzulegen. In den Zeitscheiben Nr. 49-52 mit 21,59 EUR pro MWh und danach in den Zeitscheiben Nr. 53-56 mit 21,83 EUR pro MWh finden sich die erstbesten Strombezugspreise. In dieser Zeit besteht allerdings im vorliegenden Planungsstand eine Blockade der Ladeleistung, das von einem Schnipsel aus (POS_08_12#1) in Gebrauch genommene Abschaltpotenzial auszuprägen. Wie in der zweiten Variante △ ersichtlich ist, könnte unter der Voraussetzung einer Aufhebung dieses Angebotsstücks zu jener Zeit eine Ladeleistung angebracht ⇒ werden. Mit einer Neufestlegung von Ladeleistung könnten die erstbesten Strombezugspreise in der zweiten Variante ausgeschöpft werden und in der ersten Variante △ hingegen nicht.

Je nachdem mit wie vielen anderen Schnipselgruppen sich eine Schnipselgruppe ins Gehege kommt, können für die hauptsächlich betrachtete Zerschlagung einer Schnipselgruppe eine oder mehrere Varianten für das Umlegen der Festlegungen von Ladeleistung gebildet werden. Doch auch jede andere Schnipselgruppe ist ihrerseits einmal im Hinblick auf eine Zerschlagung als hauptsächlichliche Schnipselgruppe anzusehen. Damit die Varianten eindeutig gebildet werden können und sie miteinander verträglich bleiben, ist eine Priorisierung der Zerlegung von Angebotsstücken und der Zerschlagung ihrer Schnipselgruppen erforderlich.

Beispiel 20 *Mögliche Umlage der Festlegungen von Ladeleistung einer Schnipselgruppe unter der Priorisierung anderweitiger Angebotsstücke und ihrer Schnipselgruppen*

In **Abbildung 92** wird im Hinblick auf die Zerlegung zweier Angebotsstücke ein Auszug mit der Einsatzsequenz der Wechselbatterie 'BAT9' gezeigt. Für den Stationsaufenthalt im Zeitraum von Zeitscheibe Nr. 17 bis einschließlich Zeitscheibe Nr. 88 sind zwei Ladeblöcke vorgesehen. Ein Ladeblock zu Beginn des Stationsaufenthalts reicht von den Zeitscheiben Nr. 17-20 bis zu den Zeitscheiben Nr. 29-32. Ein Ladeblock zum Ende des Stationsaufenthalts geht von den Zeitscheiben Nr. 65-68 bis zu den Zeitscheiben Nr. 69-72. Dementsprechend ist in dieser Zeit ein Abschaltpotenzial vorhanden. In der übrigen Zeit ist Zuschaltpotenzial vorzufinden. Das Abschaltpotenzial der Zeitscheiben Nr. 29-32 wird zusammen mit dem Zuschaltpotenzial in den Zeitscheiben Nr. 33-36 in einem Schnipsel 9 für ein Stück eines Angebots positiver Regelleistung in der Stunde 5 bis Stunde 8 (POS_04_08#1) in Gebrauch genommen. In Schnipseln 9 für ein Stück eines Angebots positiver Regelleistung in Stunde 17 bis Stunde 20 (POS_16_20#1) werden das Abschaltpotenzial der Zeitscheiben Nr. 65-68 und Nr. 69-72 und das Zuschaltpotenzial der Zeitscheiben Nr. 81-84 und Nr. 85-88 in Gebrauch genommen.

III. Umverteilungskombinationen

Ein Stück eines Minutenreserveangebots kann gegenüber dem vorliegenden Planungsstand auf zumindest eine oder meist mehrere verschiedene Arten zerlegt werden. Es besteht aus einer oder mehrerer Schnipselgruppen. Eine mögliche Zerlegung eines Angebotsstücks ist von den Varianten bestimmt, gemäß derer diese Schnipselgruppen zerschlagen würden. Zum einen sagt eine solche Variante für eine Schnipselgruppe aus, wie die Festlegungen von Ladeleistung umgelegt und welche Vergünstigung der Strombezugskosten dadurch erreicht werden könnte. Zum anderen wird für sie festgehalten, welche Zerlegungen anderweitiger Angebotsstücke für die mögliche Umlage voraussetzen wären. Aus der Kombination dieser Varianten ergibt sich für die mögliche Zerlegung eines Angebotsstücks, auf welche Weise die Ladeleistung gegenüber dem vorliegenden Planungsstand insgesamt umverteilt werden könnte und wie hoch die Summe der Vergünstigungen ausfiele. Zudem kommen die Voraussetzungen der Zerlegung anderweitiger Angebotsstücke bei der Kombination jener Varianten in einer Art der Zerlegung eines Angebotsstücks zusammen. In Verrechnung mit der Minderung um den Erlös eines Angebotsstücks ist klar, wie sich das energiewirtschaftliche Gesamtergebnis mit dessen Zerlegung verändern würde.

Programmauflistung 7 *Verschiedene Arten der Zerlegung von Angebotsstücken aufzählen*

Hinsichtlich ihrer Zerlegung werden die Minutenreserveangebote aufsteigend in der Reihenfolge ihrer Regelleistungspreiserlöse betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass vorrangig solche Angebote zu zerlegen sind, die im Vergleich mit anderen Angeboten einen niedrigeren Regelleistungserlös versprechen. Die erstbetrachteten Stücke von Minutenreserveangeboten werden gegenüber den nachbetrachteten Angebotsstücken priorisiert behandelt. Beim Durchlauf der Stücke von Minutenreserveangebote werden eine Menge aller Angebotsstücke mit Priorität **priooffers** und eine Menge sämtlicher Varianten einer Zerschlagung von deren Schnipselgruppen **variouscrs** geführt (**Zeile 1-3**). Eine derartige Priorisierung ist erforderlich, um zu vermeiden, dass eine freizusetzende Ladeleistung von einer Schnipselgruppe eines nachrangigen Angebotsstücks in die gleiche Zeitscheibe verlegt würde wie die Ladeleistung aus einer Schnipselgruppe eines vorrangigen Angebotsstücks. Ansonsten würden nämlich Varianten mit Umlage der Festlegungen von Ladeleistung dieser zwei Schnipselgruppen gebildet, die miteinander unverträglich sind.

Die Schnipselgruppen des aktuell betrachteten Minutenreserveangebots **offer** können in beliebiger Reihenfolge durchgegangen werden. Bei jeder dieser Schnipselgruppen existieren eine oder mehrere Varianten für die Umlage der Festlegungen von Ladeleistung mit/ohne Voraussetzung der Auflösung anderer Angebotsstücke. Für eine Gruppe von Angebotsschnipseln **sg**, welche innerhalb eines Stationsaufenthalts Abschalt- und Zuschaltpotenzial in Gebrauch genommen haben, können die Festlegungen von Ladeleistung umgelegt werden, durch die sich das betreffende Zuschalt- und Abschaltpotenzial ausgeprägt haben. Bei der Variantenbildung muss berücksichtigt werden, dass auch noch weitere Schnipselgruppen auf Zuschalt- und Abschaltpotenzial dieses Stationsaufenthalts angelegt sein können.

Für die Schnipselgruppen der zuvor betrachteten Stücke von Minutenreserveangeboten sind schon einige Varianten **variouscrs** generiert worden. Nun werden diejenigen Varianten **intercrs** herausgesucht, bei denen die Schnipselgruppe auf den gleichen Stationsaufenthalt zurückgeht wie die aktuell betrachtete Schnipselgruppe (**Zeile 6-7**). Denn es muss auf bekannte Varianten eingegangen werden, die keinerlei Zerlegungen über das aktuell betrachtete und die zu priorisierenden Stücke

von Minutenreserveangeboten hinaus voraussetzen. Während zum Beispiel für eine bestimmte Zeitscheibe im Stationsaufenthaltszeitraum im vorliegenden Planungsstand noch keine Festlegung von Ladeleistung vorzufinden ist, könnte eine Festlegung von Ladeleistung gemäß dieser Varianten dorthin zu verlegen sein.

```

1  Lege eine Menge der Minutenreserveangebote priooffers an,
2  die zu einer Zerlegung priorisiert wurden.
3  Lege eine Menge von Varianten der Umverteilung der Schnipselgruppen variouscrs an
4  für jedes Stück eines Minutenreserveangebots offer
5  aufsteigend in der Reihenfolge der Erlöse
6  für jede Schnipselgruppe sg aus dem Angebotsstück offer
7  intercrs ← Suche aus variouscrs alle Varianten heraus,
8  die den gleichen Stationsaufenthalt betreffen wie sg
9  Generiere für sg sämtliche Varianten crssg, die frei werdende Ladeleistung
10 im Stationsaufenthalt der betreffenden Wechselbatterie umzuverteilen;
11 gehe dabei auf bekannte Varianten intercrs ein, die keinerlei Zerlegungen
12 über die Stücke von Min.reserveang. mit niedrigerem Erlös priooffers und
13 das aktuell betrachtete Angebot offer hinaus betreffen
14 variouscrs ⇐ crssg
15 wiederhole
16 priooffers ⇐ offer
17 wiederhole
18 Lege eine Menge verschiedener Arten der Zerlegung varioussods der einzelnen
19 Angebotsstücke an
20 Kombiniere für jedes Stück eines Minutenreserveangebots offer
21 über all dessen Schnipselgruppen sg
22 die Varianten crssg kreuzweise miteinander
23 zu den Zerlegungsarten varioussods ⇐ sodsoffer

```

Anschließend wird (ab Zeile 18) eine Menge **varioussods** der verschiedenen Arten der Zerlegung von einzelnen Angebotsstücken angelegt. Bei jedem Angebotsstück werden die Mengen der für die einzelnen Schnipselgruppen generierten Varianten abgerufen und diese kreuzweise miteinander kombiniert. Sogleich wird für jede Zerlegungsart die Summe der Vergünstigung aus der Umlage der Festlegungen von Ladeleistung ermittelt und mit der Minderung der Erlöse nach Auslösung des Angebotsstücks verrechnet.

Beispiel 21 Kombination von Varianten der Zerschlagung

von Schnipselgruppen für die Zerlegung von Angebotsstücken

In **Abbildung 93** wird verdeutlicht, dass sich auf der Grundlage der Varianten für die Umlage der Festlegungen von Ladeleistung bei den einzelnen Schnipselgruppen eine Vielzahl von Kombinationen für die Umverteilung von Ladeleistung bei der Zerlegung eines Angebotsstücks ergeben kann. Es wird eine etwaige Zerlegung des ersten Stücks eines Angebots negativer Regelleistung von der Stunde 13 bis Stunde 16 (NEG_12_16#1) ¹¹ geprüft. Eine erste Schnipselgruppe ¹² dieses Angebotsstücks geht auf den Stationsaufenthalt der Wechselbatterie 'BAT1' zurück. Für diese Schnipselgruppe sind insgesamt zwei Varianten \triangle entdeckt worden. Eine erste Variante \triangle sieht vor, dass sich die Strombezugskosten durch Umlage der Festlegungen von Ladeleistung innerhalb des Stationsaufenthaltszeitraum um 0,12 EUR reduzieren ließen. Mit der zweiten Variante \triangle , welche neben der Zerlegung von NEG_12_16#1 eine Aufhebung von NEG_08_12#2 voraussetzt, ließen sich die Strombezugskosten sogar um 0,48 EUR drücken. In diesem Beispiel kommt sich also die Zerschlagung der ersten Schnipselgruppe im Stationsaufenthalt mit der Zerschlagung einer Schnipselgruppe eines anderweitigen Angebotsstücks ins Gehege. Eine zweite Schnipselgruppe ¹² geht auf den Stati-

onsaufenthalt der Wechselbatterie 'BAT2' zurück. Für diese Schnipselgruppe existieren insgesamt drei \triangle Varianten. Die Basisvariante $\triangle 1$ bringt eine Vergünstigung um 0,20 EUR mit sich. Mit der $\triangle 2$ zweiten Variante, welche neben der Zerlegung von NEG_12_16#1 eine Zerlegung von NEG_00_04#3 voraussetzt, würden die Strombezugskosten um 0,36 EUR reduziert. Eine dritte Variante $\triangle 3$ setzt neben der Zerlegung von NEG_12_16#1 eine Zerlegung von NEG_00_04#3 und einem weiteren Angebotsstück POS_00_04#1 voraus, womit sich die Strombezugskosten um 0,42 EUR reduzieren ließen.

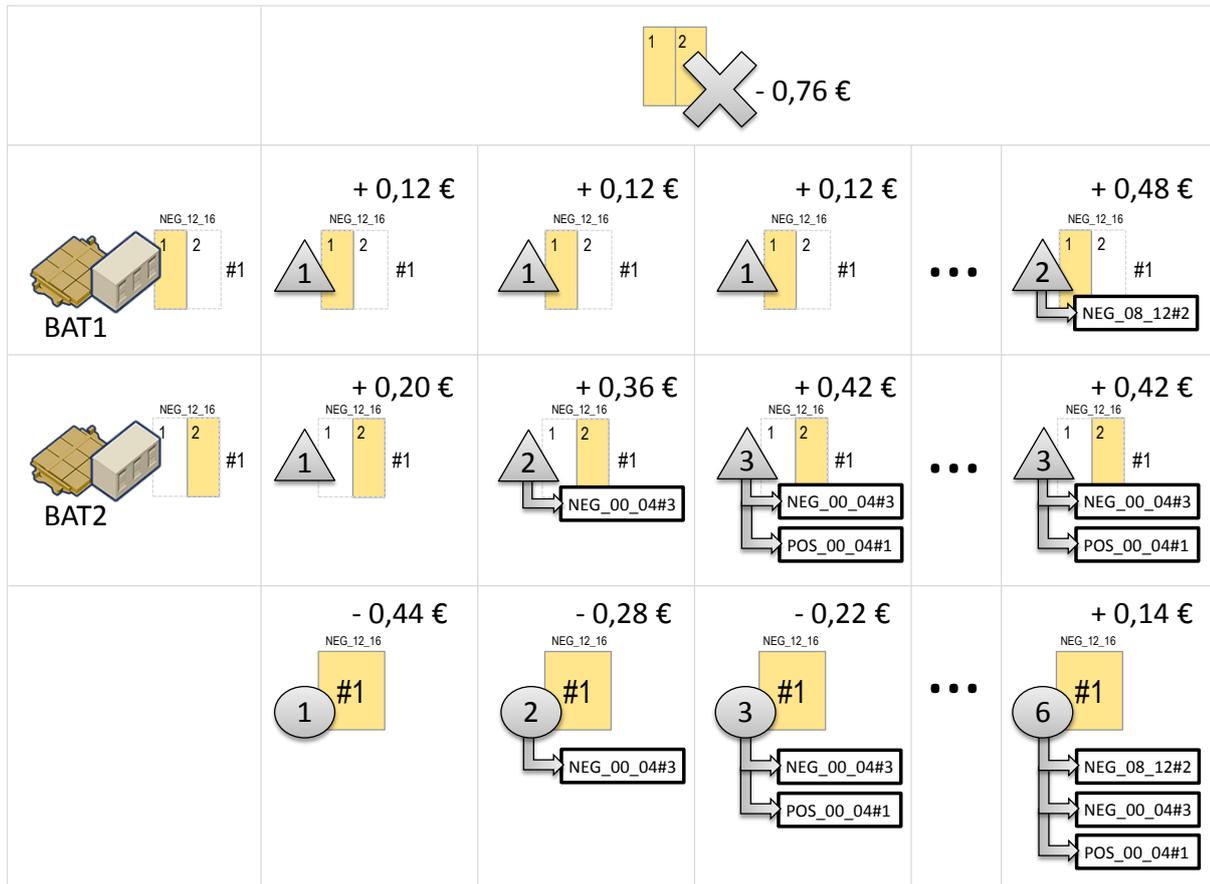


Abbildung 93 Kombination einzelner Varianten der Schnipselgruppen für die Angebotsstücke

Wie auch immer die Varianten einer Zerschlagung der unterschiedlichen Schnipselgruppen miteinander kombiniert werden; eine Zerlegung von NEG_12_16#1 würde jedenfalls zu einer Erlösminderung von 0,76 EUR führen. Eine erste Kombination $\textcircled{1}$ bestünde darin, dass die erste Schnipselgruppe in ihrer ersten Variante $\triangle 1$ und die zweite Schnipselgruppe in ihrer ersten Variante $\triangle 1$ zerschlagen würden. Dies entspräche einer Vergünstigung von insgesamt 0,32 EUR und einer Erlösminderung von 0,76 EUR. Unterm Strich würde also nach dieser Art der Zerlegung von NEG_12_16#1 ein nächster Planungsstand um 0,44 EUR leichter ausfallen. Eine zweite Kombination $\textcircled{2}$ begründet sich darauf, dass die erste Schnipselgruppe in ihrer ersten Variante $\triangle 1$ und die zweite Schnipselgruppe in ihrer zweiten Variante $\triangle 2$ zerschlagen würden. Dies liefe auf eine Vergünstigung von insgesamt 0,48 EUR und einer Erlösminderung von 0,76 EUR hinaus. Damit würde zwar ein nächster Planungsstand aus der Betrachtung der Zerlegung von NEG_12_16#1 für sich etwas weniger belastet; für eine Zerlegung von NEG_12_16#1 in dieser Art ist jedoch eine Voraussetzung, dass NEG_00_04#3 in irgendeiner Weise mit zerlegt würde. Ähnlich zeigt sich dies in der $\textcircled{3}$ dritten Kombination, die sich ebenfalls auf der ersten Variante für die erste Schnipselgruppe $\triangle 1$ begründet. Die Voraussetzungen einer Zerlegung von NEG_00_04#3 und NEG_... von der dritten Variante für die zweite Schnipsel-

gruppe   strahlen auf diese Art der Zerlegung von NEG_12_16#1 durch. Bei der Kombination  ist zu sehen, dass von der zweiten Variante für die erste Schnipselgruppe   die Voraussetzung einer Zerlegung von NEG_08_12#2 und von der dritten Variante für die zweite Schnipselgruppe   die Voraussetzungen einer Zerlegung von NEG_00_04#3 sowie POS_00_04#1 zusammen genommen werden.

Programmauflistung 8 *Bildung von Varianten für die Umverteilung der Ladeleistung eines Angebotschnipsels*

Sollte die aktuell betrachtete Gruppe von Angebotsschnipseln aufgehoben/zerschlagen werden, wird gegenüber dem vorliegenden Planungsstand bei dem betreffenden Stationsaufenthalt vom Gebrauch entsprechenden Abschalt- und Zuschaltpotenzials Abstand genommen.

Für jede Schnipselgruppe wird anhand der Festlegungen des vorliegenden Planungsstands die Ladeleistung gesammelt, die bei einer Zerlegung des Angebotsstücks entbunden würde. Dann wird in einem Durchgang aller Zeitscheiben ausgeguckt, in welcher Weise innerhalb des jeweiligen Stationsaufenthaltszeitraums eine Neufestlegung getroffen werden könnte. Dafür mögen unterschiedliche Varianten zu verfolgen sein. In einer Basisvariante wird allein davon ausgegangen, dass das Angebotsstück zerschlagen wird, welches auf der aktuell betrachteten Schnipselgruppe aufbaut. Dies mag zwar den Spielraum für eine Umlage der Festlegungen von Ladeleistung deutlich einschränken. Doch sollten sich für die freizusetzende Ladeleistung in aller Regel genügend Zeitscheiben für eine Neufestlegung von Ladeleistung finden lassen.

Gegeben: Varianten für die Zerschlagung von Schnipselgruppen der zu priorisierenden Angebotsstücke

- 1 Lege eine Menge **crs** von Umlagevarianten an, die zu verfolgen sein werden.
- 2 Lege ein Verzeichnis für die Energiemenge an,
- 3 die bei den verschiedenen Varianten noch umzuverteilen ist.
- 4 Bestimme die Energiemenge, die durch Angebotsschnipsel gebunden ist
- 5 Begründe eine Basisvariante und verzeichne die Energiemenge zu verteilen
- 6 Gehe **alle ti** der Zeitscheiben im Aufenthaltszeitraum
- 7 absteigend in der Reihenfolge der Strombezugspreise durch
- 8 Prüfe auf das Durchkreuzen anderweitiger Schnipselgruppen und
- 9 verzweige ggf. in neue Varianten
- 10 Ermittle Zu-/Abfluss **inPrios, outPrios** von Ladeleistung in **ti** gemäß Varianten
- 11 einer Zerschl. von Schnipselgruppen der zu prior. Angebotsstücke
- 12 Verfolge **jede** Variante **cr** aus **crs** mit ihrer jeweiligen Restenergiemenge
- 13 Ermittle wie viel Leistung in **ti** auszusparen ist
- 14 **stickyOthers, designatedOthers**
- 15 Ermittle wie viel Leistung in **ti** freizusetzen ist
- 16 **looseSelfAndOthers**
- 17 Teile nach Verrechnung der Leistungswerte die Restenergiemenge durch
- 18 Neufestlegung von Ladeleistung aus
- 19 **nächste**
- 20 **nächste**

Aus vorhandenen Varianten können weitere Varianten begründet/abgezweigt werden, indem auch noch von der Zerlegung anderweitiger Schnipselgruppen ausgegangen wird. Dadurch ist der Spielraum bei einer solchen Variante im Vergleich zu der zuvor verfolgten Variante ausgeweitet. Für jede Variante ist bekannt, zu welchen Strombezugskosten die Schnipselgruppe die Ladeleistung derzeit bindet und zu welchen Strombezugskosten für die Ladeleistung nach der Umlage anfielen. Das heißt, es kann berechnet werden, wie sich die Strombezugskosten durch die Umlage verändern würden.

Es wird probiert, die gesammelte Ladeleistung in die Zeitscheiben des Stationsaufenthaltszeitraums umzulegen, in denen die Strombezugspreise am niedrigsten einzuschätzen sind. Die Zeitscheiben werden also (**ab Zeile 6**) in der Bezugspreisreihenfolge betrachtet. Es wird geprüft, ob in der Zeitscheibe der Gebrauch von Zuschalt- oder Abschaltpotenzial durch anderweitige Stücke von Minutenreserveangeboten ansteht. Wird der Spielraum von einem Angebotsstück erstmals auf diese Weise durchkreuzt gesehen, sind weitere Varianten zu begründen und zur Nachverfolgung anzustellen, in denen ebenfalls von der Aufhebung/Zerlegung dieses Angebotsstücks auszugehen ist (**Zeile 8-9**).

Für alle Varianten wird (**Zeile 10**) gemeinsam ermittelt, wie viel Leistung bei Umlage der Festlegungen von Ladeleistung für Schnipselgruppen, deren Zerschlagung gegenüber der aktuell betrachteten Schnipselgruppe Priorität haben, in diese Zeitscheibe hineinverlegt **inPrios** und aus ihr abgezogen **outPrios** würde. Beim Versuch der Neufestlegung von Ladeleistung wird dann jede einzelne Variante (**ab Zeile 12**) für sich mit ihrer restlichen Energiemenge (was von der gesammelten Ladeleistung noch übrig ist) verfolgt. Sie hängt insbesondere von den Vermerken der aktuell verfolgten Variante ab, neben dem als hauptsächlich betrachteten Angebotsstück noch anderweitige Angebotsstücke mit zu zerlegen. Zum einen wird (**Zeile 13**) ermittelt, wie viel Leistung in dieser Zeitscheibe durch Schnipselgruppen anderweitiger Angebotsstücke, von deren Zerschlagung in dieser Variante nicht ausgegangen wird, bereits als Ladeleistung **stickyOthers** festgelegt ist oder für eine Zuschaltung **designatedOthers** reserviert ist. Zum anderen wird (**Zeile 15**) ermittelt, wie viel Leistung durch Schnipselgruppen (einschließlich der aktuell betrachteten), von deren Zerschlagung in dieser Variante ausgegangen wird, als Ladeleistung **looseSelfAndOthers** festgelegt ist. Nach Verrechnung dieser Leistungswerte bis hin zum Maximalwert der Ladeleistung wird eine größtmögliche Neufestlegung für die Variante (**Zeile 17**) berücksichtigt.

Ist die gesammelte Ladeleistung wieder komplett ausgeteilt, so wird die Variante für die aktuell betrachtete Schnipselgruppe abgeschlossen und muss nicht weiter verfolgt werden. Am längsten wird demnach die Basisvariante verfolgt, da bei ihr allein mit der Zerlegung der aktuell betrachteten Schnipselgruppe umgegangen wird. Je nachdem auf wie viele andere Schnipselgruppen beim Versuch, dort Ladeleistung hinein zu verlegen, gestoßen wird, kann in eine Vielzahl von Varianten verzweigt werden.

IV. Dependenzgraph

Entsprechend ihrer Voraussetzungen der Aufhebung anderweitiger Angebotsstücke können die verschiedenen Arten der Zerlegung von Angebotsstücken in die Struktur eines gerichteten Hypergraphs gebracht werden. Mit Hilfe des sogenannten Dependenzgraphs kann ermittelt werden, welche Angebotsstücke miteinander in welcher Art zerlegt werden können, um bei einem nächsten Planungsstand zum bestmöglichen energiewirtschaftlichen Gesamtergebnis zu gelangen. Die Knoten im Dependenzgraph sind einzelne Arten der Zerlegung von Angebotsstücken. Sie lassen sich zu Clustern der von einer Zerlegungsart als hauptsächlich betrachteten Angebotsstücke anordnen. Jeder von ihnen ist damit gekennzeichnet, welche Veränderung des Gesamtergebnisses bei seiner Art der Zerlegung eines Angebotsstücks an sich eintreten würde. Der Dependenzgraph spiegelt mit seinen Vorwärtshyperkanten wider, wie die Voraussetzungen zwischen einzelnen Arten der Zerlegung von Angebotsstücken direkt erfüllt werden können. Ein oder mehrere Zielknoten stehen für bestimmte Ar-

ten der Zerlegung sämtlicher anderweitigen Angebotsstücke, deren Aufhebung von der Art der Zerlegung eines Angebotsstücks im Quellknoten vorausgesetzt wird.

Fortsetzung von **Beispiel 21** *Dependenzgraph für die Zerlegung von Angebotsstücken*

Für NEG_12_16#1 #1 existieren in diesem Beispiel sechs verschiedene Arten der Zerlegung. Eine erste Zerlegungsart ① bestünde darin, sämtliche Schnipselgruppen in ihren Basisvarianten zu zerschlagen, so dass keinerlei anderweitige Angebotsstückzerlegungen vorauszusetzen sind. Eine zweite Zerlegungsart ② für NEG_12_16#1 #1 sieht vor, eine der Schnipselgruppen 12 in einer Variante zu zerschlagen, bei welcher die Zerlegung NEG_00_04#3 #3 vorauszusetzen ist. Dies wird mit den zwei Hyperkanten von dem Knoten der Kombination ② für NEG_12_16#1 #1 als Quellknoten zu jeweils einem der Knoten der Kombinationen ① für NEG_00_04#3 #3 als Zielknoten repräsentiert. Sollte NEG_12_16#1 gemäß der zweiten Kombination zerlegt werden, müsste auch das Angebotsstück NEG_00_04#3 in irgendeiner von insgesamt zwei Arten zerlegt werden.

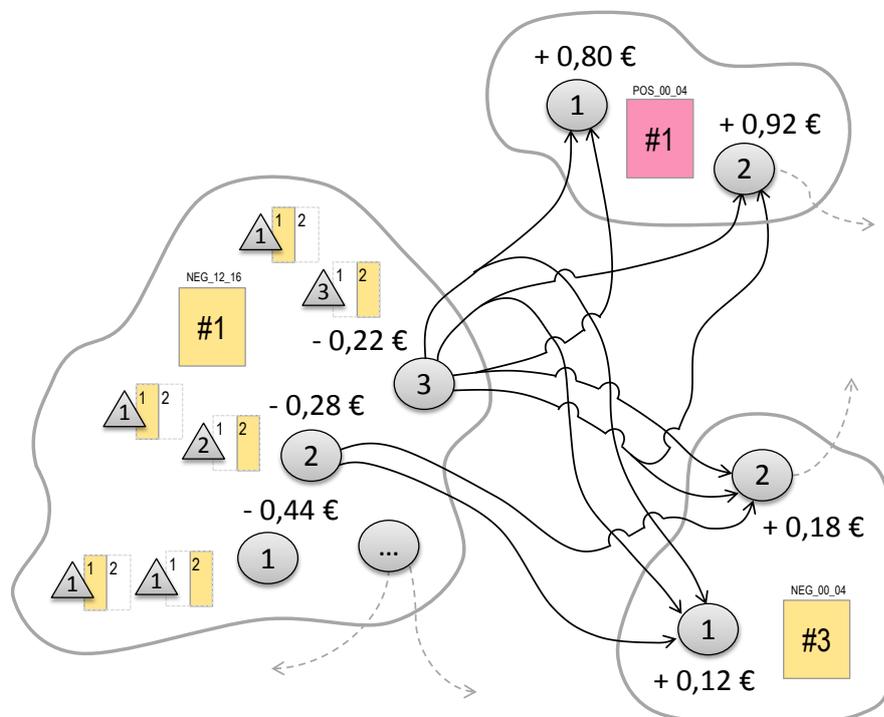


Abbildung 94 Aufbau eines Dependenzgraphs bezüglich der Zerlegung mehrerer Stücke von Minutenreserveangeboten

Bei der dritten Art der Zerlegung ③ bei NEG_12_16#1 #1 ist vorgesehen, dass eine oder durchaus mehrere Schnipselgruppen in solchen Varianten \triangle zerschlagen werden, bei welcher neben der Zerlegung von NEG_00_04#3 #3 auch noch die Zerlegung von POS_00_04#1 #1 vorauszusetzen ist. Im Dependenzgraph wird dies durch sechs gerichtete Hyperkanten repräsentiert, die den Knoten der dritten Kombination von NEG_12_16#1 ③ #1 als Quellknoten zu allen Paaren mit je einem Knoten einer Kombination von POS_00_04#1 ① #1 und einem Knoten einer Kombination von NEG_00_04#3 ① #3 als Zielknoten verbindet.

Um einen nächsten Stand des Ablaufplans zu bekommen, werden ein oder mehrere Teilgraphen aus dem Dependenzgraph gesucht, in welchem für jeden Knoten genau eine von dessen abgehenden Hyperkanten samt Zielknoten zugehört. Zudem darf einem Teilgraph nicht mehr als Knoten aus einem

Cluster des Dependenzgraphs angehören. Ein solcher Teilgraph zeigt nämlich an, welche Angebotsstücke in welcher Art miteinander zerlegt werden sollen, so dass sämtliche Voraussetzungen erfüllt/resolviert sind. Zur Verbesserung des Gesamtergebnisses müssten derartige Teilgraphen im Dependenzgraph gefunden werden, bei denen jeweils die Summe der Kosten aller ihrer Knoten positiv ausfällt. Eine optimale Lösung dieses Suchproblems besteht aus einer Menge von Teilgraphen, die bezüglich der Cluster im Dependenzgraph überlappungsfrei sind und die größtmöglichen Gesamtkosten aufweisen.

Beispiel 22 Lösen des Suchproblems für Teilgraphen im Dependenzgraph zur Zerlegung von Angebotsstücken

In **Abbildung 95** wird ein beispielhafter Dependenzgraph gezeigt, in welchem eine Menge von Teilgraphen mit größtmöglichen positiven Gesamtkosten gefunden werden soll.

In diesem Beispiel wird der Suchlauf mit dem Cluster A \boxed{A} gestartet.

Als erstes wird $\textcircled{a_1}$ der Suchknoten (a_1) betrachtet. Dieser weist keine unerfüllten Abhängigkeiten auf. Dennoch stellt er keinen brauchbaren Beitrag für die Lösung des Suchproblems dar, weil er mit -2 Pkt. negative Gesamtkosten aufweist. Danach ist zum Beispiel ab $\textcircled{a_1}$ dem Knoten a_1 komplett in der Tiefe gesucht worden.

Als zweites wird der Suchknoten ($a_2 \dots$) betrachtet. Bei diesem ist eine Abhängigkeit zu den Knoten von Cluster B noch nicht resolviert. Als erstes wird die Kante von a_2 zu b_1 $\textcircled{a_2} \rightarrow \textcircled{b_1}$ begangen und einschließlich des Knotens b_1 in den Teilgraph aufgenommen. Im Teilgraph $\textcircled{a_2} \rightarrow \textcircled{b_1}$ ($a_2 \rightarrow b_1$) sind keine Abhängigkeiten mehr unerfüllt; im Ganzen stellt er mit negativen Gesamtkosten von -1 Pkt. ebenfalls keinen brauchbaren Lösungsbeitrag dar. Einige Ausschnitte dieses Teilgraphs können allerdings wegweisend gewesen sein. Insofern in einem Teilgraph aus \boxed{A} dem Cluster A ein Knoten enthalten ist, stellt $\textcircled{a_2} \rightarrow \textcircled{b_1}$ ($\boxed{A} \rightarrow b_1$) mit ± 0 Pkt. die bislang beste bekannte Fortsetzung dar. Vom Suchknoten $\textcircled{a_2}$ wird als zweites die Kante a_2 zu b_2 $\textcircled{a_2} \rightarrow \textcircled{b_2}$ begangen und einschließlich des Knotens b_2 in den Teilgraph eingefügt. Es ist ein unvollständiger Lösungsbeitrag entstanden, da der Knoten b_2 eine Abhängigkeit zum Cluster C mit sich bringt, welcher mit dem Teilgraph ($a_2 \rightarrow b_2 \dots$) noch nicht entsprochen wird. Es wird mit der Suche in der Tiefe beim Suchknoten $\textcircled{a_2} \rightarrow \textcircled{b_2} \rightarrow ?$ sogleich fortgefahren. Als erstes wird die Kante von b_2 zu c_1 $\textcircled{b_2} \rightarrow \textcircled{c_1}$ abgegangen und damit $\textcircled{a_2} \rightarrow \textcircled{b_2} \rightarrow \textcircled{c_1}$ der Teilgraph ($a_2 \rightarrow b_2 \rightarrow c_1$) aufgedeckt. Dieser ist mit den negativen Gesamtkosten -2 Pkt. ebenfalls kein Lösungsbeitrag des Suchproblems. Insofern die Cluster A und B in einem Teilgraph abgedeckt sind, ist aber ($\boxed{A}, \boxed{B} \rightarrow c_1$) mit -4 Pkt. die bis dahin beste bekannte Fortsetzung. Als zweites wird ausgehend vom Suchknoten ($a_2 \rightarrow b_2 \dots$) die Kante b_2 zu c_2 $\textcircled{b_2} \rightarrow \textcircled{c_2}$ abgegangen. Der Knoten c_2 bringt seinerseits eine Abhängigkeit für den Cluster A mit sich; der Knoten a_2 ist ja aber bereits im Teilgraph enthalten. Somit stellt $\textcircled{a_2} \rightarrow \textcircled{b_2} \rightarrow \textcircled{c_2}$ der Teilgraph ($a_2 \rightarrow b_2 \rightarrow c_2$) einen Lösungsbeitrag mit $+3$ Pkt. dar. Der Teilgraph ($\boxed{A} \rightarrow b_2 \rightarrow c_2$) ist mit $+4$ Pkt. außerdem eine bessere Fortsetzung als ($\boxed{A} \rightarrow b_1$) mit ± 0 Pkt., insofern der Cluster A bereits abgedeckt ist. Es wird auch festgehalten, dass ($\boxed{A}, \boxed{B} \rightarrow c_2$) mit $+1$ Pkt. eine bessere Fortsetzung ist als ($\boxed{A}, \boxed{B} \rightarrow c_1$) mit -4 Pkt., insofern der Cluster A und der Cluster B abgedeckt sind. Ab dem Knoten a_2 ist damit komplett in der Tiefe gesucht worden.

Als nächstes wird der $\textcircled{a_3}$ der Suchknoten ($a_3 \dots$) betrachtet. Der Knoten a_3 birgt darin die Abhängigkeiten für den Cluster B nebst Cluster E. Als erstes wird die Kante a_3 zu b_1 nebst e_1 abgegangen. Der Teilgraph ($a_3 \rightarrow b_1 | e_1$) ist noch kein vollständiger Lösungsbeitrag, weil der Knoten



e_1 wiederum eine Abhängigkeit für den Cluster C mit sich bringt. Es kann ausgehend von diesem Suchknoten allerdings keine bessere Lösung mehr als $(a_2 \rightarrow b_2 \rightarrow c_2)$ mit +3 Pkt. erzielt werden. Beim Teilgraph $(a_3 \rightarrow b_1|e_1)$ sind der Cluster C und der Cluster D noch nicht abgedeckt. Ungeachtet dessen Abhängigkeiten können aus dem Cluster C bestenfalls der Knoten c_2 mit +1 Pkt. und aus dem Cluster D der Knoten d_1 mit +1 Pkt. hinzukommen. Der Teilgraph $(a_3 \rightarrow b_1, e_1)$ wird sich also mit jetzt ± 0 Pkt. maximal zu +2 Pkt. entwickeln lassen. Als nächstes wird beim Suchknoten (a_3) für den Knoten a_3 die Kante zu b_2 und e_1 abgegangen. Es sind somit die Cluster A, B und E abgedeckt. Mit der Abdeckung von Cluster A und B ist $(\boxed{A}, \boxed{B} \rightarrow c_2)$ als bestmögliche Fortsetzung bekannt, welche für den Teilgraph $(a_3 \rightarrow b_2|e_1)$ anwendbar ist. Es geht daraus der Lösungsbeitrag $(a_3 \rightarrow b_2, e_1 \rightarrow c_2)$ mit +4 Pkt. hervor. Abschließend wird darin nach wegweisenden Ausschnitten geschaut. Die Fortsetzung $(\boxed{A}, \boxed{E} \rightarrow b_2 \rightarrow c_2)$ wird zusätzlich bei Abdeckung von Cluster A und E festgehalten. Noch dazu wird die Fortsetzung $(\boxed{A}, \boxed{B}, \boxed{E} \rightarrow c_2)$ bei Abdeckung von Cluster A, B und E vermerkt. Außerdem wird bei Abdeckung der Cluster A, B und C $(\boxed{A}, \boxed{B}, \boxed{C} \rightarrow e_1)$ als beste Fortsetzung festgehalten. Aus dem Cluster A ist mit jedem Knoten begonnen worden, einen Teilgraph zu generieren.

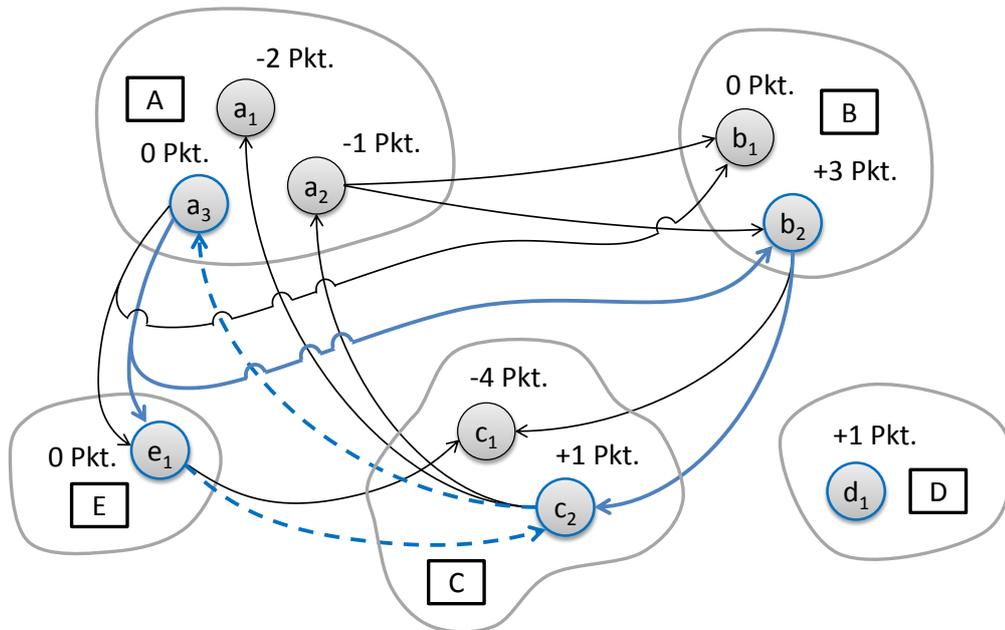
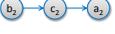
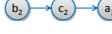


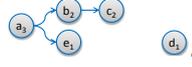
Abbildung 95 Suche von Teilgraphen in einem Dependenzgraphen

Nun wird auf der höchsten Ebene des Suchbaums mit dem Cluster B \boxed{B} weitergesucht. Es wird der Suchknoten (b_1) b_1 betrachtet. Dieser weist keinerlei Abhängigkeiten auf. Der Teilgraph (b_1) stellt also eine Lösung mit ± 0 Pkt. dar. Dies ist für die Gesamtlösung des Suchproblems nicht mehr von Bedeutung.

Als nächstes wird der Suchknoten $(b_2 \dots)$ betrachtet. Es wird als erstes die Kante von b_2 zu c_1 $b_2 \rightarrow c_1$ abgegangen. Der daraus resultierende Teilgraph $(b_2 \rightarrow c_1)$ $b_2 \rightarrow c_1$ ist ein Lösungsbeitrag mit negativen Gesamtkosten. Insofern das Cluster B abgedeckt ist, wird $(\boxed{B} \rightarrow c_1)$ als beste bekannte Fortsetzung festgehalten. Als zweites wird die Kante b_2 zu c_2 $b_2 \rightarrow c_2$ begangen. Beim Teilgraph $(b_2 \rightarrow c_2 \dots)$ wird eine Abhängigkeit zum Cluster A aufgedeckt. Er kann mit maximal +5 Pkt. schätzungsweise bessere Gesamtkosten erreichen als die bisher beste gefundene Lösung mit +4 Pkt. Als erstes wird darum nach Erweiterungen über die Kanten von c_2 zu a_1 $c_2 \rightarrow a_1$ der Lösungsbeitrag $(b_2 \rightarrow c_2 \rightarrow a_1)$


 gesehen. Doch die von ihm abgedeckten Cluster B, C und A werden allesamt auch vom Lösungsbeitrag $(a_3 \rightarrow b_2, e_1 \rightarrow c_2)$ zu vergleichsweise besseren Gesamtkosten abgedeckt. Mit der Erweiterung über die Kante von c_2 zu a_2  wird als zweites der Lösungsbeitrag $(b_2 \rightarrow c_2 \rightarrow a_2)$  betrachtet. Dieser sticht den bereits gefundenen Lösungsbeitrag $(a_3 \rightarrow b_2, e_1 \rightarrow c_2)$ ebenfalls nicht aus. Schließlich wird der Suchknoten $(b_2 \rightarrow c_2 \rightarrow a_3 \dots)$  betrachtet, der aus der Erweiterung über die Kante von c_2 zu a_3  hervorgegangen ist. In diesem wurde mit dem Knoten a_3 eine Abhängigkeit für den Cluster E geweckt. Aus der Anwendung der Fortsetzung $(\boxed{A}, \boxed{B}, \boxed{C} \rightarrow e_1)$ geht aus diesem Teilgraph der Lösungsbeitrag $(b_2 \rightarrow c_2 \rightarrow a_3 \rightarrow e_1)$ mit +4 Pkt.  hervor. Er ist gleichbedeutend mit dem $(a_3 \rightarrow b_2 | e_1 \rightarrow c_2)$ bereits gefundenen Lösungsbeitrag. Aus dem Cluster B ist mit jedem Knoten begonnen worden, einen Teilgraph zu generieren.

Ähnlich wie für den Cluster B verläuft die Suche auch für die Cluster C und E \boxed{C} \boxed{E} . Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Cluster A, B, C und E in dem Dependenzgraph zusammenhängend sind.

Die beste Gesamtlösung ist die Menge $S = \{(a_3 \rightarrow b_2, e_1 \rightarrow c_2), (d_1)\}$


Programmauflistung 9 *Auswahl der zu zerlegenden Angebotsstücke und Herausfinden der bestmöglichen Zerlegungsarten*

Die Suche funktioniert im Wesentlichen so, dass die in den Suchknoten hinterlegten Teilgraphen durch das Abgehen von Hyperkanten im Dependenzgraph nach und nach erweitert werden oder sprunghaft mit den als vorzüglich festgehaltenen Ausschnitten des Dependenzgraphs fortgesetzt/vervollständigt werden. Das Aufbauen der Teilgraphen entspricht im Grunde genommen einer schrittweisen Erkundung des Dependenzgraphs in mehrere Richtungen zugleich, wobei die im Vorwege erkundeten und mit Wegweisern markierten Ausschnitte des Dependenzgraphs in einem Schritt genommen werden können. Es bietet sich an, vorrangig in der Tiefe zu suchen, um sich in einem frühen Stadium gewiss zu werden, dass bestimmte Ausschnitte des Dependenzgraphs vorzüglich sind.

Wegweisend wird an die Knoten des Dependenzgraphs geschrieben/notiert, unter Abdeckung welcher Cluster bereits ein Teil eines Lösungsbeitrags **continuations** ermittelt werden konnte. Ein Cluster repräsentiert die Zerlegung eines bestimmten Stücks eines Minutenreserveangebots. Durch die Tiefensuche ist gewährleistet, dass ein zur Auflösung der Abhängigkeiten günstigster Ausschnitt des Dependenzgraphs aufgedeckt bzw. als Teil eines Lösungsbeitrags vermerkt worden ist, ehe der Knoten im Rahmen der Suche etwa ein weiteres Mal abgelaufen wird.

Jeder Teilgraph, der bei den Erkundungen im Dependenzgraph auftritt, wird als ein Suchknoten in einem Stapel **fringe** verwaltet. Aufgrund der Tatsache, dass der Dependenzgraph inkohärent aufgebaut ist und isolierte Knoten enthält, muss von jedem seiner Knoten einmal eine Erkundung in die Tiefe losgetreten werden. Dies kann (**in Zeile 5 und 6**) dadurch erreicht werden, dass aus jedem einzelnen Knoten des Dependenzgraphs ein Teilgraph erzeugt und dieser anfänglich als ein Suchknoten im Stapel abgelegt wird. Dabei werden die Cluster in der Reihenfolge der Anzahl der darin befindlichen Knoten und die Knoten selbst in der untergeordneten Reihenfolge ihrer Einzelkosten betrach-

tet. Diese einzelnen Knoten sind innerhalb der aus ihnen erstellten Teilgraphen als der Ursprung einer Erkundung zu verstehen.

```
1  Lege ein Annotationen continuations für vorerkundete Ausschnitte des Dep.Graps an,
2  die bei Abdeckung bestimmter Cluster eine bestmögliche Fortsetzung darstellen.
3  Lege ein Verzeichnis localbests der bisher besten Gesamtkosten an,
4  die sich für einen bestimmten Ursprung haben erzielen lassen.
5  Erstelle auf Basis jedes Knotens im Depend.Graph einen Teilgraph und
6  Lege diesen als anfänglichen Suchknoten auf dem Stapel fringe ab
7  solange sich noch ein Suchknoten mit Teilgraph subg findet, fringe  $\neq \emptyset$ 
8  Knüpfe die Ausschnitte des Dependenzgraphs in subg ein,
9  die sich als bestmögliche Fortsetzungen herausgestellt haben
10 nächster falls Gesamtkosten von subg nicht größer null oder
11 mit subg in Bezug auf den Ursprung der Erkundung wissentlich
12 keine besseren Gesamtkosten mehr zu erzielen sind
13 falls subg in sich alle Abhängigkeiten erfüllt / voll resolviert ist
14 Verzeichne ggf. die mit dem Teilgraph ausgewählten Cluster
15 als einen Lösungsbeitrag (global)
16 Verzeichne ggf. die Gesamtkosten des Teilgraphs
17 in Bezug auf den Urspr. der Erkundung (lokal)
18 Spalte den Teilgraph entlang der Erkundungsschritte in seine Teile und
19 Notiere am Kopf eines jeden solchen Ausschnitts des Dep.Graph
20 bei Abdeckung gew. Cluster ggf. eben diesen als beste bekannte Fortsetzung
21 ende
22 Nimm entsprechend dem Dependenzgraph die Erweiterungen für den Teilgraph
23 als Suchknoten vor fringe  $\leftarrow$  EXPANSION(subg)
24 wiederhole
```

Es wird mit der Suche (**ab Zeile 7**) fortgefahren, solange der Stapel mit Suchknoten nicht leer ist. Dazu wird wiederholt ein Teilgraph **subg** als oberster Suchknoten vom Stapel entnommen. Ein solcher stellt ein Zwischenresultat einer Erkundung des Dependenzgraphs bzw. der Auswahl von Angebotsstücken zur gemeinsamen Zerlegung dar. Zunächst wird versucht, bei ihm Ausschnitte des Dependenzgraphs, die als beste bekannte Fortsetzung vermerkt wurden, einzuknüpfen. Sollte er danach negative Gesamtkosten aufweisen oder sollte sich aus ihm bezogen auf seinen Erkundungsursprung wissentlich keine besseren Gesamtkosten mehr entwickeln lassen, ist woanders im Suchbaum weiterzumachen und der aktuell betrachtete Teilgraph wird als Suchknoten verworfen. In der Historie der Erkundungsschritte ist abzulesen, welche Art der Zerlegung eines Angebotsstücks bzw. welcher Knoten im Dependenzgraph der Ursprung der Erkundung gewesen ist. Es wird nachgeschlagen, welche Gesamtkosten der Lösungsbeitrag hat, der bezogen auf diesen Erkundungsursprung als bester Lösungsbeitrag festgehalten worden ist. Sollte diesbezüglich noch überhaupt noch kein Lösungsbeitrag gefunden worden sein, können Gesamtkosten von null anstelle der Gesamtkosten eines Lösungsbeitrags angenommen werden.

Es lässt sich die Menge aller Angebotsstücke aufstellen, deren Zerlegung durch die Knoten im Teilgraph angezeigt wird. Daneben lässt sich die Menge aller Angebotsstücke bestimmen, deren Aufhebung laut Dependenzgraph eine Voraussetzung für die im Teilgraph beinhalteten Knoten bzw. die von ihnen repräsentierten Zerlegungsarten ist. In der Differenzmenge finden sich alle Angebotsstücke bzw. Cluster des Dependenzgraphs, von denen es aussteht, dass der aktuell betrachtete Teilgraph sie abdeckte, um darin einen Beitrag zur Lösung des Suchproblems sehen zu können. Später wird zu versuchen sein, von dem Teilgraph in Richtung dieser Cluster weiterzugehen und den Suchbaum über den aktuell betrachteten Teilgraph als Suchknoten zu erweitern. Falls die Differenzmenge leer ist, sind folglich beim Teilgraph **subg** in sich alle Voraussetzungen der Zerlegung von Angebotsstücken

cken erfüllt. Er stellt als Suchknoten ein Blatt des Suchbaums dar und es kann sogleich ein gültiger Beitrag zur Lösung des Suchproblems darin erkannt werden.

Es wird (**Zeile 14**) geprüft, ob die mit dem Teilgraph ausgewählten Cluster des Dependenzgraphs als ein Lösungsbeitrag mit den Gesamtkosten des Teilgraphs zu verzeichnen sind. Bei der Suche wird ein ums andere Mal auf einen Teilgraphen getroffen werden, der dieselben Cluster des Dependenzgraphs abdeckt wie ein zuvor betrachteter Teilgraph. Es werden mit den an sich verschiedenen Teilgraphen also dieselben Angebotsstücke zur gemeinsamen Zerlegung ausgewählt sein. Dies wird sich insbesondere bei zyklischen Abhängigkeiten im Dependenzgraph so ergeben. Die Angebotsstücke werden laut dem einen Teilgraph aber definitiv auf andere Arten zu zerlegen sein als laut dem anderen Teilgraph. Dies bedeutet im Vergleich dieser beiden Teilgraphen in aller Regel unterschiedliche Gesamtkosten. Es gebraucht allerdings nur der Teilgraph mit den besseren Gesamtkosten als Lösungsbeitrag festgehalten zu werden.

Unabhängig davon wird (**Zeile 16**) geprüft, ob die Gesamtkosten des Teilgraphs `subg` bezogen auf den Ursprung der Erkundung den zuvor vermerkten Maximalwert übertreffen und diese gegebenenfalls als neuer Maximalwert verzeichnet.

Des Weiteren wird ein gänzlich resolvierter Teilgraph `subg` noch einmal (**Zeile 18**) aufgearbeitet/durchgelaufen, um auf Ausschnitte des Dependenzgraphs zu stoßen, die bei Abdeckung gewisser Cluster womöglich beste bekannte Fortsetzungen sind. Ausgehend vom Ursprung wird er dazu im Rahmen einer Breitensuche entlang der historischen Erkundungsschritte aufgespalten. Im Zuge dieser wiederholten Aufspaltung wird für jeden seiner Teile vermerkt, welche Cluster des Dependenzgraphs bis dahin abzudecken gewesen sind. Somit ist es möglich, all diese Teile korrekt an die Knoten des Dependenzgraphs zu notieren, falls sie mit ihren Gesamtkosten an den entsprechenden Stellen besser als die bisher vorgefundene Ausschnitte des Dependenzgraphs sind.

Zur weiteren Vervollständigung des Teilgraphs wird (**Zeile 22**) ermittelt, welche seiner Knoten Abhängigkeiten bergen, die noch nicht durch die anderen bereits beinhaltenen Knoten erfüllt werden. Dann wird im Dependenzgraphen für diese Knoten nachgesehen, auf welche Art und Weise die Voraussetzungen für die entsprechenden Arten der Zerlegung von Angebotsstücken erfüllt werden können. Es wird also für jeden dieser Knoten eine Menge von Hyperkanten herausgesucht. Von diesen Mengen wird das Kreuzprodukt erzeugt, um zu ersehen, wie ein weiterer Erkundungsschritt verlaufen kann. Es kann passieren, dass von zwei oder mehreren jener Knoten solche Hyperkanten herausgesucht worden sind, die zu einem und demselben Zielknoten führen. Auf diese Weise kann es sich ergeben, dass bei der Ausweitung des Teilgraphs über den Dependenzgraph verschiedene Erkundungspfade teilweise oder ganz miteinander verschmelzen. Im Ergebnis der Ausweitungen entstehen neue Teilgraphen, die als Suchknoten auf dem Stapel der Suche abgelegt werden.

E. *Suche benachbarter Lösungen*

Bei der lokalen Suche wird versucht, durch bewusstes Navigieren innerhalb dieser Nachbarschaftsstruktur eine bestmögliche Lösung zu erreichen. Die Güte einer Lösung wird durch das relative energiewirtschaftliche Gesamtergebnis unter Berücksichtigung von Strafpunkten bestimmt.

DEFINITION: **Verwendete Zielfunktion**

Als Zielfunktion dient das relative energiewirtschaftliche Gesamtergebnis, das heißt die Kosten des Strombezugs **EnergyPurchaseCost** abzüglich der Erlöse durch von Minutenreserve **BPMRevenue** im Verhältnis zur nachgeführten Energiemenge **TotalConsumption**

$$eval(s) = \frac{\text{EnergyPurchaseCost} - \text{BPMRevenue}}{\text{TotalConsumption}}$$

Die Startlösung wird auf der Grundlage eines Regelwerkes konstruiert (vgl. Ablaufplankonstruktion), so dass die Ladungsmenge der Wechselbatterien im Fahrbetrieb immer voll ausgeschöpft wird. Darum ist es kennzeichnend für die Startlösung, dass die Wechselbatterien so spät wie möglich getauscht werden. Würde bloß ein Batterietausch später als in der Startlösung vorgenommen und in dieser Zeit Transportanforderungen zu erfüllen sein, so könnte diese laut Plan nicht abgedeckt werden, da die betreffende Wechselbatterie ansonsten über das Reserveniveau hinaus entladen würde. Sind Transportanforderungen in einem Plan nicht abgedeckt, ist dies mit Strafpunkten zu bewerten. Ab einer nicht mehr vernachlässigbaren Anzahl von Strafpunkten wird ein Ablaufplan unattraktiv.

DEFINITION: **Kennzeichnung einer Lösung / Lösungsraum**

Auf Grundlage eines Einsatzplans für die Wechselbatterien lässt sich nur ein bester Nachfrageverlauf für den Strom ermitteln. Durch die Nutzung der Tauschspuren sind Beginn und Ende der Stationsaufenthaltszeiträume sowie der Zeiträume mit Fahrbetrieb markiert. Die Nutzungssequenz der Tauschspuren bildet darum einen Grundriss des Batterieeinsatzplans. Die Lösungen sind eindeutig dadurch gekennzeichnet, in welchen Zeitscheiben die Batterietausche vorgenommen werden.

Zur Kennzeichnung einer Lösung s können die Batteriewechselaktivitäten zur Abgabe einer Wechselbatterie in einer geordneten Menge selektiert werden – mögen sie nach einem Ressourcenindex der Wechselbatterie und der zeitlichen Reihenfolge der Abgabezeitscheibe innerhalb des Planungszeitraums geordnet/sortiert sein.

$$DRPU = \left\langle \begin{array}{l} (bat, ts) \in \\ Batteries \times TimeSlots \end{array} \middle| \text{DropoffUsages} \left(\begin{array}{l} bat, est, \\ vehfrom, cstto, tss \end{array} \right) = \top \wedge \right\rangle_{ts \in tss}$$

Aus diesen geordneten Abgabevorgängen können dann die Zeitscheibennummern in eine Kennzeichnung extrahiert werden.

$$ord(s) = (c_1, c_2, \dots, c_i) \\ \text{für } DRPU = \langle (bat_1, c_1 = ts_1), (bat_2, c_2 = ts_2), \dots, (bat_i, c_i = ts_i) \rangle$$

Der Lösungsraum enthält ebenso viele Dimensionen wie es Abgabevorgänge zur Kennzeichnung einer Lösung gibt. In jeder Dimension entspricht der Vorrat der Zeitscheibennummern dem Wertebereich.

Durch das Verrücken von Batterietauschen und anschließende Wiederanreicherung des Ablaufplans (vgl. Ablaufplanmodifikation) kann innerhalb des Lösungsraums für diese Planungsproblemstellung von einer vorhandenen Lösung zu einer benachbarten Lösung gesprungen werden. Um in der Nachbarschaftsstruktur nur gültige und weitgehend straffreie Lösungen zu haben, werden Modifikationen

mit Blick auf den Ablaufplan und den zugehörigen Präzedenzgraph ausgeübt. Denn um einen Ablaufplan korrekt umstellen zu können, müssen die unmittelbaren Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen und die Synchronitätsbeziehungen zwischen den Batterieeinsatzaktivitäten berücksichtigt werden.

DEFINITION: *Benachbarte Lösungen / Nachbarschaftsstruktur*

Die Nachbarschaft einer Lösung $s = (a, d)$ besteht aus der Menge aller Lösungen, die sich durch Verrücken irgendeines Batterietausches und anschließender Wiederanreicherung des Ablaufplans bilden lassen $\mathcal{N}_*(s) = \{ s' = (\ddot{a}', \ddot{d}') \mid (a, d) \xrightarrow{*} (a', d') \}$.

Zwei an sich unterschiedliche Lösungen s_1 und s_2 heißen (zueinander) direkt benachbart, genau dann wenn $s_2 \in \mathcal{N}_*(s_1)$.

Batterietausche können grundsätzlich um eine oder mehrere Zeiteinheiten verrückt werden. Darüber kann die Schrittweite bei der Suche adaptiert werden, um eine länger andauernde Stagnation in der Bewertung der Lösungen zu überkommen. Das heißt es werden Lösungskandidaten aus der näheren bis hin zur erweiterten Nachbarschaft angeschaut. Wird für eine gewisse Anzahl von Suchschritten keine Lösung mit einem verbesserten Zielfunktionswert aufgefunden, so sollte die Schrittweite vergrößert werden. Wird dagegen für eine gewisse Anzahl von Suchschritten stets eine Lösung mit einem verbesserten Zielfunktionswert aufgefunden, so kann die Schrittweite verringert werden. Die Schrittweite kann auch danach festgelegt werden, welchem erweiterten Kreis eine Lösung entsprach, die zuletzt einen verbesserten Zielfunktionswert gezeigt hat.

Die Strombezugspreise werden auf Grundlage der Ergebnisse des Vortagshandels – den Preisen für die sogenannten Stundenkontrakte – eingeschätzt. Es wird für die vier Zeitscheiben einer Stunde des Tages der gleiche Preis herangezogen. Darum mag das Verrücken eines Batterietausches um eine Zeitscheibe eben keine Veränderung bei den Strombezugskosten nach sich ziehen, falls sich die Stationsaufenthaltszeiträume der Wechselbatterien nicht um Zeitscheiben über die jeweiligen Stunden Grenzen hinweg ausweiten/verengen. In ähnlicher Weise mag es auch nicht zu einer Veränderung bei den Angebotserlösen für Minutenreserve kommen, falls die Stationsaufenthaltszeiträume der Wechselbatterien nicht innerhalb oder jenseits der Produktperioden um solche Zeitscheiben ausgeweitet/verengt werden, wegen derer sich zusätzliche Angebote ergeben können oder Angebote schwinden müssen. Darum treten in der direkten Nachbarschaft einer bestimmten Lösung oftmals eine oder mehrere Lösungen mit gleichem energiewirtschaftlichem Gesamtergebnis auf. Außerdem kann ausgehend von einer bestimmten Lösung durch das Verrücken des einen oder anderen Batterietausches eine Veränderung des energiewirtschaftlichen Gesamtergebnisses in gleicher Höhe passieren.

DEFINITION: *Nahe Nachbarschaft / Erweiterte Nachbarschaft*

Zur nahen Nachbarschaft \mathcal{N}_1 einer Lösung s zählen alle Lösungen, die sich durch das Verrücken irgendeines Batterietausches um $2^0 = 1$ Zeiteinheit nach vorne oder nach hinten unterscheiden.

In erweiterten Nachbarschaften \mathcal{N}_n zählen die Lösungen, die sich durch Verrücken irgendeines Batterietausches um $2^n, 2^{n-1}, \dots, 2^0$ Zeiteinheiten nach vorne oder nach hinten unterscheiden.

Trotz unterschiedlicher Stationsaufenthaltszeiträume können zwei Lösungen bezüglich des energiewirtschaftlichen Gesamtergebnisses durchaus gleichwertig sein. Bei der Suche dürfen solche Lösungen aus der Nachbarschaft, die der besten nächsten Lösung gleichwertig sind, nicht außer Acht gelas-

sen werden. Im Hauptpfad der Suche wird immer zu einer Lösung weitergegangen, die gleich oder besser als die aktuell betrachtete Lösung und die Beste unter den benachbarten Lösungen ist. In den Nachbarschaften mit mehr als einer einzigen nächsten besten Lösung müssen Nebenstränge losgetreten werden. Wird stets nur in der nahen Nachbarschaft nach Lösungen weitergesucht, so tauchen aus vorgenannten Gründen oft Lösungen auf, die Nebenstränge eröffnen ließen.

Zur Justierung eines Suchverfahrens ist untersucht worden, wie die Zielfunktionswerte bei zwiefältiger Ausrichtung auf den Stromgroßhandel und den Regelleistungsmarkt (das heißt unter dem Optimierungsgesichtspunkt „kombiniert“) verlaufen.

In diesem Abschnitt lässt sich auf Basis des Ausstattungsszenarios „2|2|4“ (das meint zwei Transportfahrzeuge, zwei Ladestellen und vier Wechselbatterien) ein Eindruck vom Verlauf der Zielfunktionswerte vermitteln. Hierbei weist ein Ablaufplan unter moderaten Auslastungsgegebenheiten lediglich zwei Batterietausche auf. Die Kennzeichnung der Lösungen erfolgt über die Nummern der Zeitscheiben, in denen die Batterietausche vorgenommen werden. Das bedeutet, dass sich die Lösungen in einer Ebene anordnen lassen und die Werte der Zielfunktion dreidimensional über dieser Ebene verlaufen.

Im Weiteren lässt sich in diesem Abschnitt begründen, dass ein adaptives Suchverfahrens mit Tabuliste dazu geeignet ist, ausgehend von einer Startlösung eine näherungsweise optimale Schlusslösung ausfindig zu machen.

Referenztag 23.06.2013	
Auslastungssituation	Transportlast eher hoch
Regelleistungsmarkt	insgesamt hochpreisig, maximaler Leistungspreis hoch
Stromgroßhandel	insgesamt niedrigpreisig, hohe preisliche Spannweite, starker Anstieg gegen Ende des Tages

An den meisten Tagen in 2013 werden die Einsparungen im Gesamtergebnis von einer Reduzierung der Strombezugskosten bestimmt. Dennoch gibt es am 23.06.2013 ein Marktumfeld, in welchem es für das vorteilhafteste Gesamtergebnis auch Erlöse durch Minutenreserve zu berücksichtigen gilt. Das Szenario „Regelleistung“ zeichnet sich dadurch aus, dass für die Minutenreserveprodukte im Mittel eine überdurchschnittlich hohe Leistungspreisvergütung winkt. Für die Produktperiode von 12:00 Uhr bis 16:00 Uhr ist das Angebot von Minutenreserve in negativer Regelrichtung mit 115,94 EUR/MW am höchsten einzuschätzen. Dagegen sind die Strombezugspreise im Tagesdurchschnitt mit 11,82 EUR/MWh äußerst niedrig einzuschätzen, wobei die Spannweite der Strombezugspreise mit 34,98 EUR/MWh ziemlich hoch ist. Zum Ende des Tages gibt es im Preisprofil einen steilen Anstieg. Um an diesem Tag zu einem Angebot von Minutenreserve für das favorisierte Produkt „NEG_12_16“ zu kommen, müsste teilweise im Anstiegszeitraum geladen werden und ein höherer Strombezugspreis hingenommen werden.

In den nachfolgenden Abbildungen sind für einen gewissen Aspekt wie zum Beispiel die Strombezugskosten relativ zur nachgeführten Energiemenge immer mehrere Diagramme enthalten.

Das Oberflächendiagramm im linken Bildteil zeigt eine Zentralansicht mit einem dreidimensionalen Werteverlauf über dem Lösungsraum an. Die beiden Achsen in der Ebene (X/Y-Achsen) mit den Zeitscheibenummern von 01 bis 96 spannen den Lösungsraum auf; die aufgestellte Achse (Z-Achse) hat den zu dem Aspekt passenden Wertebereich.

Der Wert der einzelnen Lösung, die von einem ersten Batterietausch in der Zeitscheibe Nr. 28 und einem zweiten Batterietausch in der Zeitscheibe Nr. 74 gekennzeichnet ist, wird mit einem Rasterfeld (der 3D-Oberfläche) an der Stelle mit 28 auf der X-Achse und 74 auf der Y-Achse wiedergegeben. Je höher das Rasterfeld liegt, umso höher ist der Aspekt bei dieser Lösung ausgeprägt; der dreidimensionale Werteverlauf wird zusätzlich durch die Farbgebung verdeutlicht.

Die Oberflächendiagramme im rechten Bildteil zeigen den gleichen Werteverlauf und Farbgebung in einer Seitenansicht oder in einer Ansicht von oben. Bei der Seitenansicht wird über die X-Achse hinweggeschaut. Bei der Ansicht von oben liegen die X-Achse unten und die Y-Achse an der Seite.

Einige Aspekte wie zum Beispiel die Strombezugskosten, die Minutenreserveerlöse und das Gesamtergebnis sind anstelle ihres Absolutwerts besser im Verhältnis zu der Menge nachgeführter Energie zu setzen. Es ist anzumerken, dass die Menge nachgeführter Energie an sich nicht in allen Lösungen gleich ist.

In **Abbildung 96** wird der Verlauf der Strombezugskosten relativ zur nachgeführten Energiemenge gezeigt. Das bedeutet, dass vorab an jeder Stelle der Wert für die Kosten des Strombezugs zu der Menge nachgeführter Energie ins Verhältnis gesetzt worden sind.

Aus der zentralen Perspektive **A** heraus betrachtet, ist der Verlauf in etwa wie eine Sitzschale geformt. Im Bereich der Stelle (15,16) bis herrüber zur Stelle (47,48) ist ein rechteckiges Plateau erkennbar, welches zu allen Seiten des Lösungsraums von Erhebungen umringt ist. In der Ecke (1,2) ist die Erhebung am niedrigsten ausgeprägt; in den Ecken (1,96) und (96,1) handelt es sich schon um größere Erhebungen. Die Erhebung in der Ecke (95,96) ist am stärksten. In der sicht **C** ist ein Profil mit einer leichten Erhebung vorne **1**, einem niedrig gelegenen Flachstück in der Mitte **2** und einer stärkeren Erhebung hinten **3** zu erkennen. Auf den ersten Blick ähnelt dieses Wertverlaufprofil dem Bezugspreisprofil aus dem Balkendiagramm **D**.

Doch dieser Anschein trügt ein wenig...

Ein später Batterietausch hat zur Folge, dass sich der Stationsaufenthalt im Anschnitt durch das Ende des Planungszeitraums befindet. Darum muss die abgegebene Wechselbatterie unausweichlich in einer der späten Stunden des Tages geladen werden. Da die Strombezugskosten nach einem starken Anstieg im hinteren Drittel **3** hoch liegen, ergeben sich entsprechend hohe Werte bei den Strombezugskosten. Wird der Batterietausch allmählich vorgezogen, wächst der im Anschnitt befindliche Stationsaufenthalt der abgegebenen Wechselbatterie an. Es existiert ein gewisser zeitlicher Spielraum, in dem eine Festlegung von Ladeleistung getroffen werden kann. Der betreffende Stationsaufenthalt kann schließlich soweit in den vorderen Zeitbereich vorgezogen werden, bis dass die Wechselbatterie durch die Festlegung von Ladeleistung in den niedrigpreisigen Stunden in der Tagesmitte **2** geladen werden kann. Von hinten angefangen beginnt das Flachstück im Wertverlaufprofil dort, wo das Preisgefälle im Preisprofil endet und der niedrigste Bezugspreis zu finden ist. Wird der Batterietausch allzu weit in den vorderen Zeitbereich gezogen **1**, wird der Stationsaufenthalt der abgegebenen Wechselbatterie schließlich aus dem Anschnitt gerissen. Es wird ein behelfsmäßiger weiterer Batterietausch erforderlich und es kommt wiederum zu einem zeitlich sehr knappen Stationsaufenthalt am hinteren Ende des Planungszeitraums **3**.

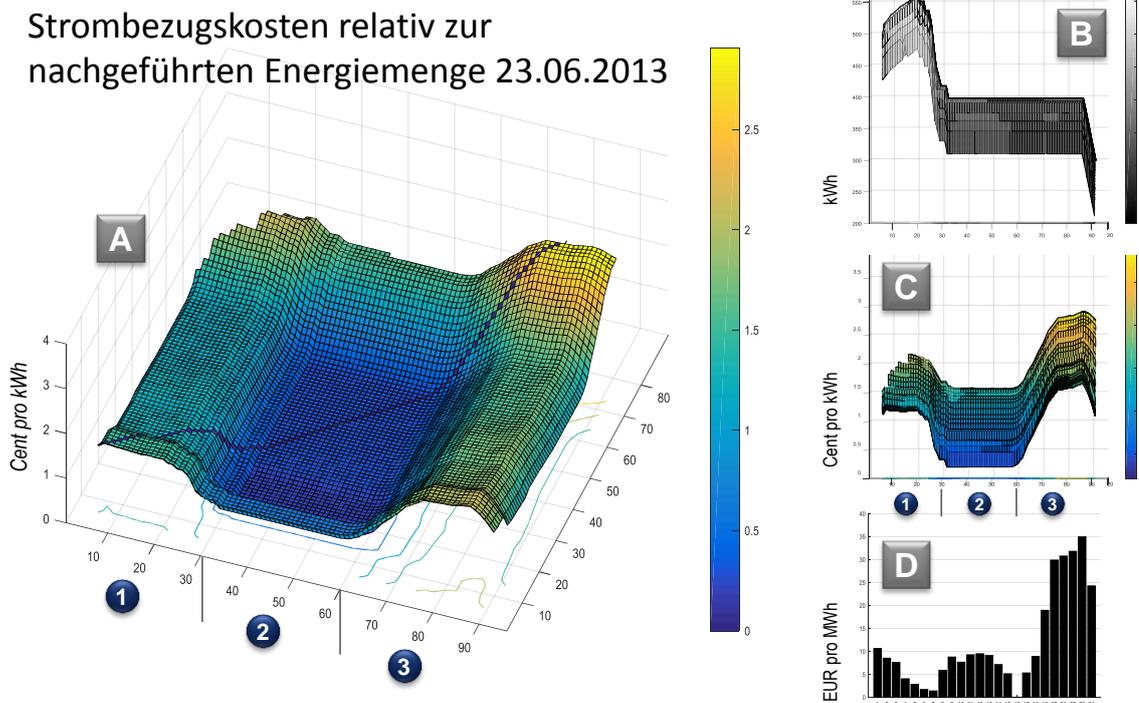


Abbildung 96 Diagramme für die Strombezugskosten in Relation zu der Menge nachgeführter Energie für den 23.06.2013

In **Abbildung 97** wird der Verlauf der Minutenreserveerlöse gezeigt. Aus der zentralen Perspektive **A** heraus betrachtet, ist der Verlauf in etwa wie ein Becken geformt. Andeutungsweise lässt sich an der Diagonalen durch die Beckenform eine Spiegelung erkennen; die Stellen (57, 48) und (48, 57) sehen recht spiegelbildlich zueinander aus. Über einen größeren Bereich von Lösungen können gleichwertige Minutenreserveerlöse erzielt werden. Im Werteverlauf ist eine Stufe mit Erlösen von -9,28 EUR auszumachen. In der Ansicht von oben **B** wird klarer, an welchen Stellen die Beckenform begrenzt wird. Bei den Stellen (12, 55) und (55, 26) schaut es nach einer einfachen eckpunktartigen Begrenzung aus. Entlang der Stellen (12, 39), (18, 39), (18, 34), (25, 34) und (25, 26) sieht es eher nach einer Sägezahnform aus. In den zwei Balkendiagrammen **C** sind die Regelleistungspreise

angegeben. Im dem oberen Balkendiagramm finden sich die Minutenreserveprodukte in negativer Regelrichtung und in dem unteren Balkendiagramm die in positiver Regelrichtung. Es ist ersichtlich, dass die Minutenreserveprodukte in negativer Regelrichtung sehr viel höher bewertet sind als die in positiver Regelrichtung. Der Höhe der Minutenreserveerlöse im Lösungsraum ist zu entnehmen, dass bei den eingezeichneten Lösungen lediglich auf das Produkt NEG_12_16 angeboten werden kann. Um für dieses Produkt ein Angebot zusammenstellen zu können, muss der Zeitbereich von Stunde 13 bis Stunde 16 ② von Festlegungen von Ladeleistung ausgespart und es müssen Festlegungen von Ladeleistung im Zeitbereich ab der Stunde 17 ③ getroffen werden. Auf diese Weise kommen das zwecks Angebot/Erbringung benötigte Zuschaltpotenzial und das zwecks Kompensation bezüglich des Ladezustands benötigte Abschaltpotenzial zu Stande. Aufgrund der maximalen Ladeleistung können die Wechselbatterien zügiger als in vier Stunden geladen werden. Das bedeutet, dass zumindest zwei Stationsaufenthalte für ein Minutenreserveangebot zusammengenommen werden müssen.

Vom hinteren Ende des Planungszeitraums gesehen ist es erst ab den Stellen (57,48) und (48,57) möglich, mit den betreffenden Stationsaufenthalten der abgegebenen Wechselbatterien die Produktperiode NEG_12_16 an sich komplett mit Zuschaltpotenzial sowie den Zeitbereich nach der Produktperiode mit Abschaltpotenzial abzudecken. Es ist entscheidend, dass zumindest eine Wechselbatterie vor der mit Zeitscheibe Nr. 48 beginnenden Produktperiode abgegeben wird, damit der vordere Teil der Produktperiode mit Zuschaltpotenzial durch sie abgedeckt werden kann. Der hintere Teil fängt offenbar bei der Lösung an der Stelle (57,48) und bei der Lösung an der Stelle (48,57) mit der Zeitscheibe Nr. 58 ② an.

Die Stellen (12,55) und (55,26) sind ebenfalls begrenzend für die Beckenform. Über den Stationsaufenthalt einer in der Zeitscheibe Nr. 55 ② abgegebenen Wechselbatterie kann der hintere Teil der Produktperiode gerade so noch abgedeckt werden. Der vordere Teil kann eben ausgehend von dieser Wechselbatterie nicht mehr abgedeckt werden, da die Zeitscheibe mit der ihrer Abgabe schon innerhalb der Produktperiode NEG_12_16 liegt. Wenn nun durch den jeweils anderen Batterietausch eine Wechselbatterie in den Stunden ① weit vor dem Beginn der Produktperiode abgegeben wird, muss eine ausreichend große Energiemenge nachzuladen sein, so dass im vorderen Teil der Produktperiode entsprechendes Zuschaltpotenzial ausgebildet werden kann. Wie viel Energie in dem betreffenden Stationsaufenthalt nachzuführen ist, hängt von der Transportlast im vorausgehenden Fahrbetrieb des Fahrzeugs ab, welches die Wechselbatterie in die Station abgibt. Es ist also bedeutsam, welcher der beiden kennzeichnenden Batterietausche in der Produktperiode und welcher weit früher vorgenommen wird.

Es können auch beide Batterietausche wie an den Stellen (12,39), (18,39), ... in den Stunden ① weit vor der Produktperiode durchgeführt werden. Doch wird der Batterietausch vorgezogen, so wird der unmittelbar vorausgehende Fahrbetrieb in den Anschnitt am vorderen Ende des Planungszeitraums zurückgedrängt. Bei unverändertem Ladezustand zu Beginn des Planungszeitraums bedeutet dies, dass die betreffende Wechselbatterie während des Fahrbetriebs weniger entladen wird. Demzufolge muss innerhalb des Stationsaufenthalts der abgegebenen Wechselbatterie eine geringere Energiemenge nachgeführt werden. Wird der Batterietausch allzu früh vorgenommen, ist die nachzuladende Energiemenge so weit geschrumpft, dass zu wenig Spielmasse vorhanden ist. Es kann dann ausgehend von der betreffenden Wechselbatterie nicht genügend Zuschalt-/Abschaltpotenzial ausgebildet werden, um ein Angebot von Minutenreserve aufzubauen.

Minutenreserveerlöse 23.06.2013

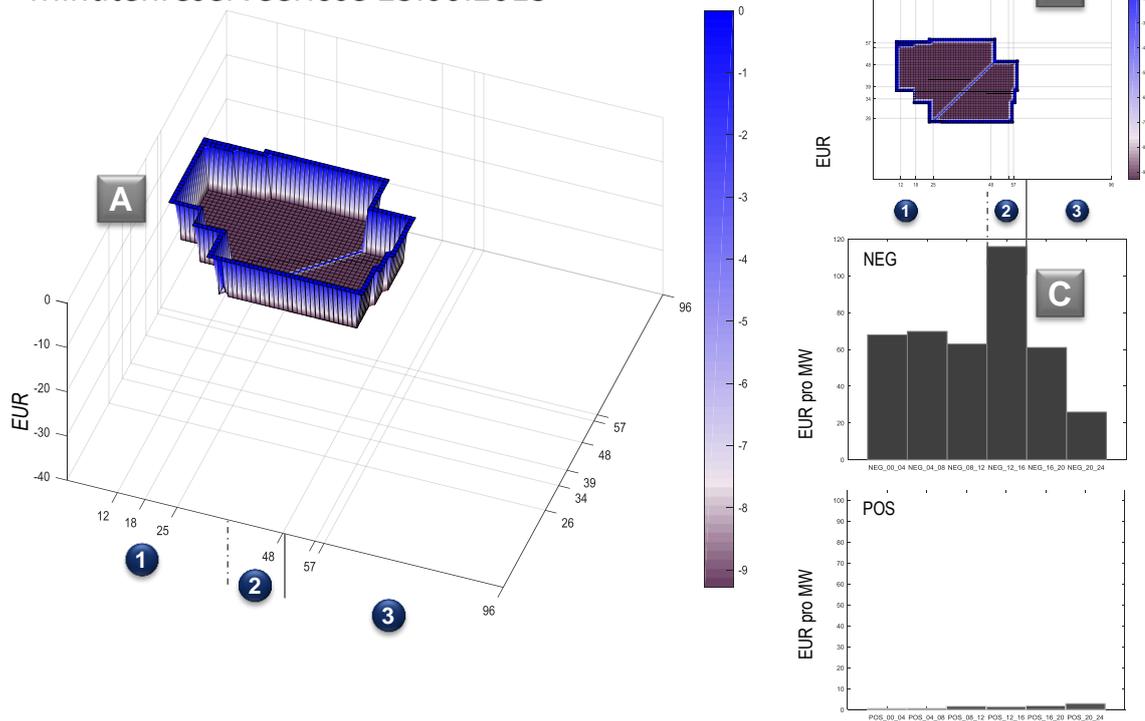


Abbildung 97 Diagramme für die Minutenreserveerlöse für den 23.06.2013

In **Abbildung 98** wird das energiewirtschaftliche Gesamtergebnis dargestellt. Im Oberflächendiagramm im linken Bildteil **A** sind die Werte sämtlicher erreichbarer Lösungen eingetragen. Durch den oben gezeigten Aspekt der Strombezugskosten ist hier die Grundform einer Schale zu erkennen. Vom Aspekt der Minutenreserveerlöse rührt es her, dass im Plateau in der Schalenform ein Becken eingezogen ist. Über die Zentralansicht ist es nachzuvollziehen, wie sich der Wertverlauf aus den Einzelaspekten der Strombezugskosten und der Minutenreserveerlöse zusammensetzt. Im Konturdiagramm im rechten Bildteil oben **B** sind die Strafpunkte der Lösungen zu sehen. Bereits im Nahbereich der Startlösung kommt es zu Strafpunkten. Wird ein Batterietausch aus der Startlösung zeitlich weiter nach hinten verschoben, so ergeben sich Strafpunkte, da die betreffende Wechselbatterie konstruktionsgemäß bis auf das Reserveniveau entladen ist und sich der Fahrbetrieb durch die zeitliche Verschiebung nach hinten ausdehnt. Dadurch taucht innerhalb dieses Fahrbetriebs zusätzliche Transportlast auf, welche jedoch mit der betreffenden Wechselbatterie mangels Energie oberhalb des Reserveniveaus nicht abgedeckt werden kann. Im Oberflächendiagramm im rechten Bildteil unten **C** sind ebenfalls die energiewirtschaftlichen Gesamtergebnisse dargestellt, wobei nur die Lösungen eingezeichnet sind, welche weniger als eine vernachlässigbare Anzahl von Strafpunkten haben (die Konturlinie ist farblich hervorgehoben). Dies dünnt den Wertverlauf sehr stark aus – die Werte bleiben jedoch zusammenhängend. Während der lokalen Suche darf nicht zu einer Lösung mit Strafpunkten navigiert werden. In den Oberflächendiagrammen sind die Stellen farblich markiert, die auf dem Hauptpfad der Suche liegen. Im rechten Bildteil ganz unten ist sozusagen eine nähere Ansicht **D** von diesem straffreien Ausschnitt des Lösungsraums gezeigt.

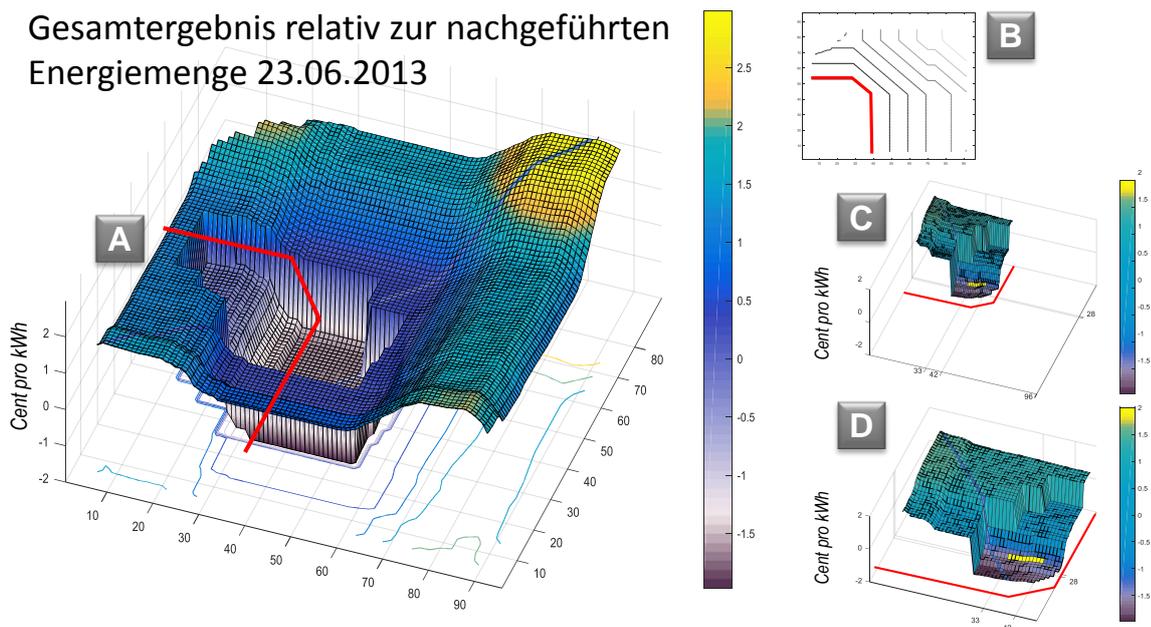


Abbildung 98 Diagramme für das Gesamtergebnis in Relation zu der Menge nachgeführter Energie für den 23.06.2013

Die Startlösung für den 23.06. ist (42,28) mit einem relativen Gesamtergebnis von -1,428 Cent/kWh. Dies kann als ein ziemlich günstiges Ergebnis eingestuft werden, zumal hier bereits größere Erlöse für ein Angebot von Minutenreserve im höchstpreisigen Produkt zu Stande gekommen sind.

In einem ersten Suchschritt werden in der 1er-Nachbarschaft folgende Lösungen betrachtet:

<i>Id</i>	<i>Bzgl.</i>	<i>Mrl.</i>	<i>Gesamt</i>	<i>Energie</i>	<i>relatives</i>	<i>Gesamterg.</i>
(41, 28)		3,31 EUR	9,28 EUR	-5,96 EUR	413 kWh	→ [-1,442 Cent/kWh]
(43, 28)		3,33 EUR	9,28 EUR	-5,94 EUR	416 kWh	[-1,428 Cent/kWh]
(42, 27)		3,82 EUR	9,28 EUR	-5,46 EUR	432 kWh	[-1,263 Cent/kWh]
(42, 29)		3,33 EUR	9,28 EUR	-5,94 EUR	416 kWh	[-1,428 Cent/kWh]

Die Lösung (41, 28) hat aus dieser Nachbarschaft mit -1,442 Cent/kWh das beste nächste relative Gesamtergebnis. Sie weist zudem ein günstigeres Gesamtergebnis auf als die vorherige Lösung (42,28), weshalb mit der lokalen Suche an dieser Stelle fortgefahren werden kann. In der Lösung (41, 28) sind 3 kWh weniger nachzuführen als bei (42,28); im Gegenzug liegen die Kosten des Strombezugs bei (41, 28) zwei Cent niedriger als bei (42,28). Dies gereicht für (41, 28) in Relation zu der nachzuführenden Energiemenge zu einem besseren Gesamtergebnis. Sollte es weitere Lösung aus dieser Nachbarschaft geben, die mit der besten nächsten Lösung gleichwertig sind, so werden diese in einer Liste zur Verzweigung in Nebenpfade vermerkt. Aus dieser Nachbarschaft heraus sind keinerlei Vermerke vorzunehmen. Im Übrigen ist es nicht möglich, den ersten Batterietausch zu der Lösung (43, 28) oder den zweiten Batterietausch zu der Lösung (42, 29) frei von Strafpunkten hinauszuschieben.

In einem zweiten Suchschritt werden in der 1er-Nachbarschaft folgende Lösungen betrachtet:

<i>Id</i>	<i>Bzgk.</i>	<i>Mrl.</i>	<i>Gesamt</i>	<i>Energie</i>	<i>relatives</i>	<i>Gesamterg.</i>
(40, 28)		3,29 EUR	9,28 EUR	-5,99 EUR	410 kWh	→ [-1,462 EUR/kWh]
(42, 28)		3,33 EUR	9,28 EUR	-5,94 EUR	416 kWh	[-1,428 EUR/kWh]
(41, 27)		3,80 EUR	9,28 EUR	-5,48 EUR	429 kWh	[-1,276 EUR/kWh]
(41, 29)		3,31 EUR	9,28 EUR	-5,96 EUR	413 kWh	[-1,444 EUR/kWh]

Hier stellt die Lösung (40, 28) mit -1,462 EUR/kWh die beste nächste Lösung dar. Wiederum stellt (40, 28) ein günstigeres Gesamtergebnis dar als die vorher betrachtete Lösung (41, 28). Wie schon in dem vorigen Suchschritt wurde der erste Batterietausch um eine Zeitscheibe zeitlich nach vorne gezogen. Damit wird der Fahrbetrieb mit der betreffenden Wechselbatterie stärker in den Anschnitt am vorderen Ende des Planungszeitraums gedrängt. Durch das Vorziehen des Batterietausches wird am hinteren Ende des Fahrbetriebs ein Vorgang mit einer Transportlast von umgerechnet 3 kWh Ladungsmenge herausgestrichen. Diese hätten zu überdurchschnittlichen Strombezugskosten nachgeladen werden müssen. In der lokalen Suche wird es demnach mit dieser Lösung im Hauptpfad weitergehen. Auch in dieser Nachbarschaft gibt es keinen Anlass dafür, in Nebenpfade zu verzweigen. Denn die Lösung (40, 28) hat in dieser Nachbarschaft keinerlei ebenbürtige Lösung neben sich.

Für den 23.06. kann die lokale Suche ziemlich problemlos so fortgesetzt werden. Der Hauptpfad wird durch das Vorziehen des ersten Batterietausches beherrscht. Er geht über die Lösung (39, 28) zur Lösung (38, 28) und so weiter bis zur Schlusslösung (33, 28).

TEIL 6 EVALUATION

Die oben aufgeführten Problemlösungsmodule für das Generieren einer Startlösung sowie für die Suche nach besseren Lösungen sind in der Programmiersprache Java prototypisch umgesetzt worden.

In diesem Kapitel werden Ergebnisse einer Evaluation der energiewirtschaftlichen Ablaufplanung unter praxisnahen Auslastungsgegebenheiten des Containerterminals und einem realistischen Marktumfeld vorgestellt. Zum einen ist geschaut worden, welcher der geeignetste Optimierungsgesichtspunkt bei der Ablaufplankonstruktion ist. Zum anderen ist betrachtet worden, inwieweit das Gesamtergebnis aus Minutenreserveerlösen und Strombezugskosten unter Komplettabdeckung der Transportlast durch lokale Suche noch verbessert werden kann.

Gegenwärtig ist CTA mit sieben batteriebetriebenen Fahrzeugen, sieben Ladestellen in einer Station und vierzehn Blei-Säure-Batteriesystemen mit 288 kWh Nutzspeicherkapazität ausgestattet. Damit die Resultate für die Praxis aussagekräftig sind, sind bei der beschriebenen Evaluation in erster Linie das Ausstattungsszenario „7/7/14“ und in zweiter Linie das Ausstattungsszenario „7/7/11“ zugrunde gelegt worden.

A. Prototypische Implementierung

Im Rahmen des Projekts „Batterie-Elektrische Schwerlastfahrzeuge im Intelligenten Containerterminalbetrieb (BESIC)“ ist beim Container-Terminal Altenwerder in Hamburg (CTA) eine Anwendungsumgebung für gesteuertes Laden eingerichtet und erprobt worden.

Folgende Anwendungskomponenten sind für die vorliegende Arbeit von näherer Bedeutung:

- Das betriebliche Energie-Management-System (EMS) übernimmt jeweils Tags voraus die energiewirtschaftliche Ablaufplanung und stößt die Vermarktung von Minutenreserve gegenüber einem übergeordneten Aggregator an. Am Geltungstag selbst sorgt es für eine planmäßige Durchführung der Ladeprozesse, koordiniert im Falle eines Abruf zur Erbringung von Regenergie die Schalthandlungen gemäß der reservierten Zuschalt-/Abschaltpotenziale und übermittelt die zum Nachweis erforderlichen Messdaten nach außen. Innerhalb des EMS wurden die vier Problemlösungsmodule ergänzt.
- Die Terminalbetriebssoftware (engl. Terminal-Operating-System, kurz TOS) bietet eine Softwareunterstützung für die Aufgaben auf den Ebenen der kaufmännischen Planung und der alltäglichen Einsatzplanung. Dazu zählen unter anderem die Liegeplatzzuweisung und die Zuordnung von Containerbrücken für die Schiffe sowie die Einteilung von Bedienpersonal an den Kränen.
- Das Batterien-Verwaltungs-Systems (BVS) dient der Sammlung von Statusinformationen über die umlaufenden Wechselbatterien sowie der Überwachung der Ladeprozesse in der Station und des Fahrbetriebs der batterie-elektrischen Fahrzeuge. Zudem erkennt es den Bedarf für einen Batterietausch und stößt ggf. eine Ausfahrt eines Transportfahrzeugs zur Station an.

In der Praxis tragen simulationsbasierte Vorhersageergebnisse entscheidend dazu bei, dass die Ladeprozesse der Wechselbatterien am Vortag geplant und dann auf Abruf gesteuert werden können. In diesem Abschnitt wird erklärt, unter welchen Fristigkeiten Ablaufpläne innerhalb der Anwendungsumgebung des CTA zu erstellen sind und wie die nötigen Eingabedaten für eine energiewirtschaftliche Ablaufplanung gewonnen werden.

Es bietet sich an, die Erstellung eines Ablaufplans täglich wiederkehrend um 08:00 Uhr des Tags voraus anzustoßen, damit die Fristen des börslichen Stromgroßhandels und des Regelleistungsmarkts gewahrt und energiewirtschaftliche Geschäfts-/Anwendungsfälle verwirklicht werden können. Gegenwärtig müsste ein dem Containerterminal übergeordneter Betreiber eines virtuellen Kraftwerks die Angebote für Minutenreserve bis 10:00 Uhr in einer Tagesausschreibung platzieren. Ein Stromhändler/-lieferant müsste bis 14:30 Uhr eine Fahrplannominierung durchführen, was als vor entscheidend für dessen Engagement im tagaktuellen Handel anzusehen ist.

Das EMS wurde neben einer Ablaufplanungskomponente auch um eine Komponente für Logistiksimulation erweitert. Mit Hilfe von Simulation können die für eine Vortagsplanung notwendigen Eingabedaten gewonnen werden. Zum einen muss von Tag zu Tag die Transportlast vorhergesagt werden, welche im Verlauf des Planungszeitraums auf die individuellen batterie-elektrischen Fahrzeuge entfällt. Zum anderen kann vorausgesehen werden, welche Standorte und Ladezustände die Wechselbatterien zu Anfang des Planungszeitraums haben werden. Unter Standortinformationen sind die Belegung der Ladestellen mit Wechselbatterien und die Zuordnung von Wechselbatterien an Bord von Fahrzeugen zu verstehen.

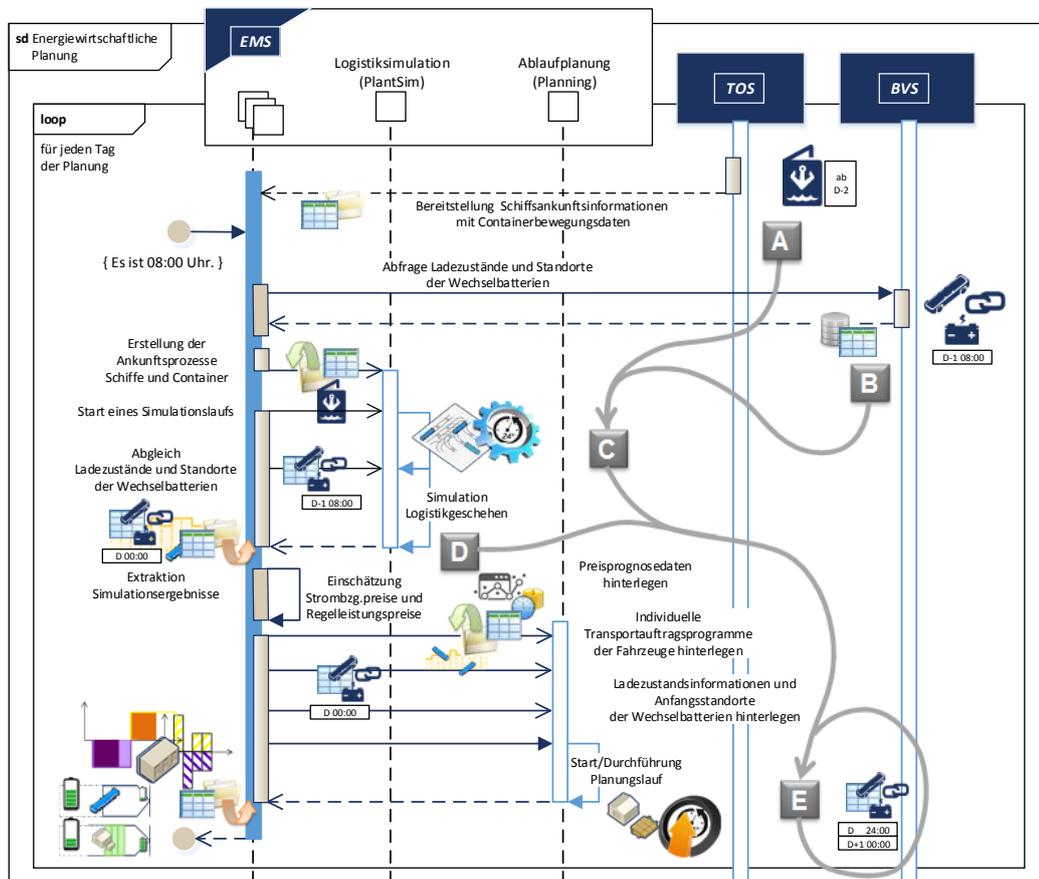


Abbildung 99 Sequenzdiagramm über die Ablaufplanerstellung mit Simulationsvorlauf in der Praxis

In **Abbildung 99** wird das Zusammenwirken der drei Teilsysteme bei der Erstellung eines Ablaufplans mit Simulationsvorlauf dargestellt:

- A** Über entsprechende Meldungen der Reedereien werden dem TOS grundlegende Informationen über die vermeintliche Ankunftszeit der Containerschiffe und deren Lade-/Löschlisten zur Verfügung gestellt. Einige größere Seeschiffe, insbesondere die auf festen Überseerouten, erreichen den Containerterminal beinahe fahrplanartig. Kleinere Zubringerschiffe verkehren hingegen in unregelmäßiger Weise zwischen verschiedenen Containerterminals. Auf Basis dieser Informationen wird eine Schiffsankunftsliste erstellt und die Anzahlen der zu ladenden und zu löschen Container annotiert. Diese Liste kann in einem Tabellenformat vom TOS bereitgestellt und in die Logistiksimulation ab D-2 vorgegeben werden. Es werden Informationen über sämtliche Schiffsankünfte ab zwei Tagen vor dem Planungszeitraum benötigt, um auch die Abfertigung von Containerschiffen innerhalb des Planungszeitraums simulieren zu können, die bereits vor Beginn des Planungszeitraums eintreffen.
- B** Die im Einsatz befindlichen Wechselbatterien kommunizieren in regelmäßigen Abständen Statusinformationen an das BVS wie zum Beispiel ihren Standort, den prozentualen Ladezustand, die Batteriesystemtemperatur, ggf. den Elektrolytstand und so weiter. Zusätzlich werden von den Ladegeräteeinheiten in der Station gewisse Statusinformationen wie beispielsweise die Verfügbarkeit, der aktuelle Ladestrom, aktuelle Ladespannung, aktuelle Ladeleistung, die verstrichene Zeit im Ladevorgang, die geschätzte verbleibende Zeit zur Beendigung des Ladevorgangs und so weiter an das BVS übermittelt. All diese Statusinformationen werden in einer Datenbankanwendung abgelegt und können über eine Weboberfläche zum Zeitpunkt D-1 08:00 abgefragt/dargestellt werden.
- C** In der Logistiksimulation werden hauptsächlich die Containerbewegungen beim Entladen und Beladen der Schiffe mit Kaikränen, beim Horizontaltransport zwischen Kaimauer und Blocklager in beiden Richtungen und die Ein-/Auslagerung mit Portalkränen betrachtet. Ein Simulationslauf reicht von D-2 bis D. Sobald im Simulationslauf der entsprechende Modellzeitpunkt erreicht ist, muss der Simulationsstand an die tatsächlichen Statusinformationen der Welt D-1 08:00 angeglichen werden. Anschließend wird mit dem Simulationslauf fortgefahren und zum Modellzeitpunkt D 00:00 bezüglich der Standorte und Ladezustände der Wechselbatterien ein Schnappschuss des Simulationsstands gemacht. Im Simulationsmodell sind realistische Verteilungen der Umschlagszeiten hinterlegt und der Fahrkurs exakt nachgebaut. Zu Vorhersagezwecken können die Start- und Endzeiten einer Bearbeitung von Transportaufträgen im Zuge eines Simulationslaufes aufgezeichnet werden. Auf diese Weise lässt sich die Transportlast von Fahrzeuggruppen bis hin zu einzelnen Fahrzeugen im Verlauf des Planungszeitraums vorhersehen/einschätzen.
- D** Es werden die Markträumungspreise der letzten Vortagshandelszeiträume abgerufen und daraus mögliche Bezugspreiskonditionen für den Containerterminalbetrieb prognostiziert. Es werden die mittleren erzielten Leistungspreise der zurückliegenden Tagesausschreibungen für Minutenreserve abgerufen und daraus mögliche Leistungspreiskonditionen für den Containerterminalbetrieb prognostiziert.
- E** Abschließend wird eine energiewirtschaftliche Ablaufplanung durchgeführt. Falls sich gerade ein Ablaufplan in Ausführung befindet und er als zutreffend herausgestellt hat, sollten sich bis

zum kommenden Tag die Standorte und die Ladezustände der Wechselbatterien plangemäß entwickeln. Dann stellen die Planungsergebnisse am Ende des Planungszeitraums D 24:00 die Vorgaben für den kommenden Tag dar D+1 00:00. Anderenfalls es bei Ausführung eines Ablaufplans zu Abweichungen gekommen ist oder ohnehin mit der Ablaufplanung neu angesetzt werden muss, können nur die Simulationsergebnisse zur Hochrechnung der Ladezustände der Wechselbatterien sowie als Anhaltspunkt für deren Standort dienen.

B. *Optimierungsgesichtspunkte in der Ablaufplankonstruktion*

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse eines Ganzjahresvergleichs der energiewirtschaftlichen Ablaufplanung unter verschiedenen Optimierungsgesichtspunkten dargestellt (das heißt allein die Ablaufplankonstruktion, ohne Modifikationen am Ablaufplan im Rahmen einer lokalen Suche).

Für jeden Tag des Jahres wird anhand der tatsächlichen Schiffsankunftslisten mit Hilfe eines Simulationsmodells das Logistikgeschehen ex post nachgespielt. Die Schiffankunftslisten enthalten die Ist-Daten für das Jahr 2013 für das Eintreffen eines Containerschiffes und den Beginn der Abfertigung. Es wird die Verarbeitung von Transportaufträgen durch die einzelnen Fahrzeuge in der Flotte simuliert. Da nur ein gewisser Anteil der Fahrzeuge in der Flotte im Fokus der Planung steht, kann es mitunter zu erheblichen Vorhersagefehlern kommen. Diese ergeben sich insbesondere bei geringer Auslastung des Containerterminalbetriebs bzw. bei niedrigem Aufkommen an Transportaufträgen. Dann nämlich kann es passieren, dass den im Planungsfokus stehenden Fahrzeugen durch andere Fahrzeuge die Aufträge weggeschnappt werden. In der Praxis wird es wichtig sein, dass es gute Vorhersagemöglichkeiten gibt. Denn das Transportauftragsaufkommen ist eine bedeutende Planungsgrundlage, insbesondere weil die Transportanforderungen über den Planungszeitraum hinweg individuell für ein Fahrzeug vorgegeben werden müssen. Für eine Evaluation des optimierenden Planungsverfahrens mögen die Ergebnisse eines simulationsbasierten Vorhersageverfahrens genügen; das Simulationsmodell ist daraufhin validiert worden, dass es den Gesamtlastgang mit einem durchschnittlichen absoluten Fehler von 8%-10% vorhersagen kann. Aufgrund der Tatsache, dass der Gesamtlastgang des Containerterminals und das Aufkommen an Transportaufträgen insgesamt im zeitlichen Verlauf korrelieren, können diese Vorhersagewerte als realistisch hergenommen werden.

Für den Ganzjahresvergleich wird die Planung tageweise rollierend ausgeführt. Die Anfangsbelegung der Ladestellen, die Anfangszuordnung von Wechselbatterien zu Fahrzeugen und die Anfangsladezustände des ersten Tages werden der Simulation entnommen. An den darauffolgenden Tagen werden jeweils die Belegung der Ladestellen, die Zuordnung der Wechselbatterien zu Fahrzeugen und die Ladezustandswerte aus vorangegangenen Planungsergebnissen übertragen. Eine Grundregel der Planung besagt, dass alle Wechselbatterien, die sich zum Ende des Planungszeitraums in der Station befinden, so voll wie möglich geladen sein sollen. Trotzdem verschiedene Optimierungsgesichtspunkte zum Tragen kommen, bleibt die nachgeführte Energiemenge für einen Tag aus diesem Grund gleich. Im Jahr 2013 sind insgesamt 543.028 kWh elektrischer Energie in die Wechselbatterien der Transportfahrzeuge nachzuführen. Die Zeitpunkte für die Batterietausche sind bei allen Optimierungsgesichtspunkten die gleichen.

Die Konditionen für den Strombezug werden anhand von Marktdaten für das Jahr 2013 der Strombörse EPEX SPOT gebildet. Es werden die tatsächlichen Markträumungspreisergebnisse der Stun-

denkontrakte herangezogen. Diese machen wohlgermerkt nur einen Bruchteil des Stromlieferpreises für einen deutschen Containerterminalbetrieb aus. Die Konditionen für ein Angebot von Minutenreserve werden anhand von anonymisierten Angebots-/Zuschlagslisten gebildet. Es wird für jedes Minutenreserveprodukt jeweils der durchschnittliche Regelleistungspreis aller mit Zuschlag versehenen Angebote berechnet. Es werden die tatsächlichen Ausschreibungsergebnisse für das Jahr 2013 von der Transparenzplattform regelleistung.net verwendet.

In **Tabelle 10** sind die Planungsergebnisse der verschiedenen Optimierungsgesichtspunkte für das Ausstattungsszenario „7/7/14“ im Ganzjahresvergleich zusammengefasst.

Die Kosten des Strombezugs in Höhe von 20.862,58 EUR bei den Gesichtspunkten „sofortig“ und „sofortig+“ sind als eine Referenz anzusehen. Erwartungsgemäß haben sich unter den Gesichtspunkten des Stromgroßhandels allein „bzgskostenopt.“ und „bzgskostenopt.+“ mit 16.687,43 EUR die niedrigsten Strombezugskosten ergeben; hier betragen die Kosten des Strombezugs nur 80 % des Referenzwerts. Ebenfalls ist zu erwarten gewesen, dass sich unter dem Gesichtspunkt des Regelleistungsmarkts allein „erlösoptimiert“ mit 24.473,53 EUR die höchsten Strombezugskosten einstellen; hier liegen die Kosten des Strombezug bei 117 % des Referenzwerts. Nach Abwägung der Strombezugskosten gegenüber den Minutenreserveerlösen „kombiniert“ zeigen sich in Höhe von 16.973,02 EUR mit 81 % des Referenzwerts vergleichsweise niedrige Strombezugskosten.

Beim Gesichtspunkt „erlösoptimiert“ sind die Erlöse aus dem Angebot von Minutenreserve in Höhe von 1.849,88 EUR als Referenz anzusehen. Unter den Gesichtspunkten „sofortig“ und „bzgskostenopt.“ werden gar keine Angebote von Minutenreserve getätigt. Werden die den derzeitigen Automatisierungsregeln entspringenden Abläufe planvoll überschaut „sofortig+“, so gehen daraus mehr oder minder zufällig Minutenreserveerlöse in Höhe von 41,49 EUR hervor, was gerade einmal 2 % des Referenzwertes entspricht. Obwohl unter dem Gesichtspunkt „bzgskostenopt.+“ allein auf den Stromgroßhandel hin optimiert wird, fallen eher zufällig mit 501,82 EUR überraschend hohe Minutenreserveerlöse ab; damit sind unter diesem Gesichtspunkt 27 % des Referenzwertes zu erreichen. Nach Abwägung der Strombezugskosten sind mit 1.212,70 EUR immerhin vergleichsweise hohe Minutenreserveerlöse zu machen.

Tabelle 10: Gesamtübersicht Planungsergebnisse bei Ganzjahresvergleich verschiedener Optimierungsgesichtspunkte

(verwendete Problemlösungsmodule:

 Grob-/Feinplanung,  Stückelung Minutenreserve,  Abwägung Minutenrs. gg. Strombzgskosten

 Minimum an Strombezugskosten,  Maximum an Minutenreserveerlösen,  Maximale Verfügbarkeit)

	Kosten des Strombezugs		Erlöse durch Minutenreserve		Gesamtergebnis		nachgeführte Energiemenge	relatives Gesamtergebnis
sofortig  	20.862,58 EUR	100%	n.v.	0%	20.862,58 EUR	100%	542.952 kWh	3,84 Cent/kWh
sofortig+   	20.862,58 EUR	100%	41,49 EUR	2%	20.821,21 EUR	100%	542.952 kWh	3,83 Cent/kWh
bzgskostenopt.  	16.687,43 EUR	80%	n.v.	0%	16.687,43 EUR	80%	542.952 kWh	3,07 Cent/kWh
bzgskostenopt.+   	16.687,43 EUR	80%	501,82 EUR	27%	16.185,57 EUR	78%	542.952 kWh	2,98 Cent/kWh
erlösoptimiert   	24.473,53 EUR	117%	1.849,88 EUR	100%	22.623,47 EUR	109%	542.952 kWh	4,16 Cent/kWh
kombiniert     	16.973,02 EUR	81%	1.212,70 EUR	66%	15.760,34 EUR	76%	542.952 kWh	2,90 Cent/kWh

Hinsichtlich der Kosten des Strombezugs konnten unter den Gesichtspunkten „bzgskostenopt.“ und „bzgskostenopt.+“ gegenüber der Referenz eine maximale Ersparnis in Höhe von 4.175,15 EUR erlangt werden; unter dem Gesichtspunkt „erlösoptimiert“ konnte hinsichtlich der Minutenreserveerlöse maximal ein Mehr von 1.849,88 EUR erreicht werden. Damit schlagen sich die Strombezugskosten eher als die Minutenreserveerlösen im Gesamtergebnis nieder. Dennoch schneidet der Gesichtspunkt „kombiniert“ im Gesamtergebnis am besten ab.

Eine zwiefältige Ausrichtung auf den Stromgroßhandel und den Regelleistungsmarkt birgt im gewählten Anwendungsfallbeispiel eine Ersparnis von 0,94 Cent pro bezogene Kilowattstunde Strom. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die preislichen Konditionen in **Tabelle 10** nicht den tatsächlichen Stromlieferpreisen eines Containerterminalbetriebs in Deutschland entsprechen. Sie geben lediglich den auf Basis des Stromgroßhandels variablen Preisanteil wieder.

In **Abbildung 100** werden die drei Gesichtspunkte „bzgskostenopt.+“, „erlösoptimiert“ und „kombiniert“ noch einmal hinsichtlich der Strombezugskosten und der Minutenreserveerlöse in Bezug zum Gesichtspunkt „sofortig“ gesetzt.

Bei den Strombezugskosten lassen sich am 16.06.2013 unter den Gesichtspunkten „bzgskostenopt.+“ und „kombiniert“ 92,77 EUR einsparen. Am 17.02.2013 gelingt es hingegen unter dem Gesichtspunkt „bzgkostenopt.+“ mit 0,41 EUR kaum besser zu sein als unter dem Gesichtspunkt „sofortig“. Beim Gesichtspunkt „kombiniert“ ist am 18.08.2013 sogar ein Minus von -6,40 EUR hinzunehmen. Unter dem Gesichtspunkt „erlösoptimiert“ ist am 27.10.2013 maximal ein Plus von 19,57 EUR gegenüber dem Gesichtspunkt „sofortig“ zu ermitteln. Doch der Gesichtspunkt „erlösoptimiert“ ist hier im Mittel mit -9,89 EUR im Hintertreffen. Minimal ist am 16.06.2013 ein deutliches Minus von 78,48 EUR festzustellen. Der Gesichtspunkt „bzgskostenopt.+“ ist auch im Bezug zum Gesichtspunkt „sofortig“ erwartungsgemäß im Mittel mit 11,44 EUR stärker im Plus als der Gesichtspunkt „kombiniert“ mit 10,66 EUR im Mittel.

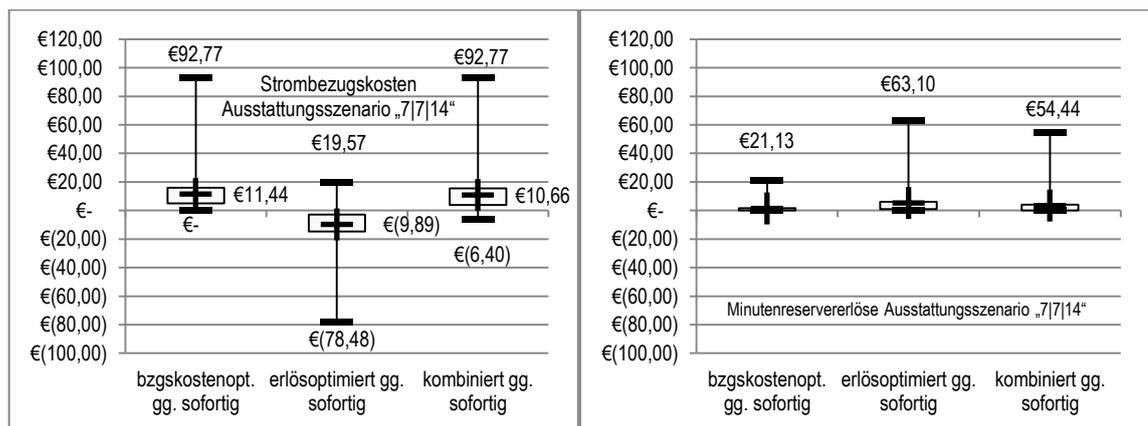


Abbildung 100 Kastendiagramme für die Differenz in den Strombezugskosten (links) und den Erlösen für Minutenreserve (rechts) zwischen den genannten Optimierungsgesichtspunkten

Bei den Minutenreserveerlösen kann am 21.07.2013 unter dem Gesichtspunkt „kombiniert“ mit 54,44 EUR maximal ein annähernd so großes Plus eingefahren werden wie beim Gesichtspunkt „erlösoptimiert“ mit 63,10 EUR. Im Mittel ist der Gesichtspunkt „kombiniert“ mit 3,32 EUR gegenüber dem Gesichtspunkt „sofortig“ dennoch ein bisschen schwächer im Plus als der Gesichtspunkt „erlös-

optimiert“ mit 5,07 EUR. Unter dem Gesichtspunkt „bzgskostenopt.+“ ist am 07.07.2013 gegenüber dem Gesichtspunkt „sofortig“ maximal ein Plus von 21,13 EUR zu ermitteln.

Das Balkendiagramm in **Abbildung 101** zeigt die Differenz der Strombezugskosten und die Differenz der Minutenreserveerlöse zwischen den Optimierungsgesichtspunkten „kombiniert“ und „bzgskostenopt.“ über das ganze Jahr 2013. Die Differenz in den Strombezugskosten ist für den Optimierungsgesichtspunkt „kombiniert“ gegenüber dem Optimierungsgesichtspunkt „bzgskostenopt.“ stets negativ, da unter dem Optimierungsgesichtspunkt „bzgskostenopt.“ an jedem der Tage in 2013 die niedrigstmöglichen Kosten des Strombezugs verzeichnet werden können. Die Differenz in den Strombezugskosten findet sich dementsprechend in den dunklen Balken im negativen Bereich wieder. Wegen der Abwägung der Strombezugskosten gegenüber den Minutenreserveerlösen können beim Optimierungsgesichtspunkt „kombiniert“ nur höhere Erlöse als beim Optimierungsgesichtspunkt „bzgskostenopt.“ herauspringen. Die Differenz in den Minutenreserveerlösen ist in den hellen Balken im positiven Bereich zu finden. Im Gesamtbild fällt es auf, dass an den Sommertagen sowohl in Bezug auf die Kosten des Strombezugs als auch der Minutenreserveerlöse größere Differenzen als an den Wintertagen auftreten. An Sommertagen sind die Strombezugspreise im Mittel niedriger einzuschätzen und auch die preisliche Spannweite fällt geringer aus als an Wintertagen. Im Gegensatz dazu gibt es an Sommertagen höhere maximale Bewertungen der Minutenreserveprodukte. Es ist dadurch vor allem an Sommertagen attraktiv, sich zusätzlich dem Regelleistungsmarkt zuzuwenden. Im Frühjahr 2013 sind im energiewirtschaftlichen Gesamtergebnis kaum Unterschiede zwischen den Optimierungsgesichtspunkten zu erkennen. Am 30.01. schneidet der Optimierungsgesichtspunkt „kombiniert“ bezüglich der Minutenreserveerlöse 3,67 EUR besser und bezüglich der Strombezugskosten -0,04 EUR schlechter ab als der Optimierungsgesichtspunkt „bzgskostenopt.“. Damit ist das Plus bei den Minutenreserveerlösen für „kombiniert“ ziemlich unangefochten. Am 17.03. steht einem Plus von 5,20 EUR bei den Minutenreserveerlösen für „kombiniert“ ein Defizit von -2,97 EUR bei den Strombezugskosten gegenüber. An einem Sommertag wie dem 20.07. ist mit einem Plus von 18,58 EUR bei den Minutenreserveerlösen und einem Defizit von -4,40 EUR bei den Strombezugskosten ein größerer Ausschlag zu sehen. Leicht abgeschwächt zeigt sich dies auch an Herbsttagen wie dem 20.10. Absolut gesehen tragen diese Tage im Sommer und Herbst für den Optimierungsgesichtspunkt „kombiniert“ am stärksten dazu bei, ein besseres energiewirtschaftliches Gesamtergebnis als unter „bzgskostenopt.“ zu erreichen. In den winterlichen Tagen ergibt sich eigentlich ein ähnliches Bild wie im Frühjahr. Allerdings gibt es im Dezember einige stärkere Ausschläge rund um die Weihnachtstage und den bevorstehenden Jahreswechsel.

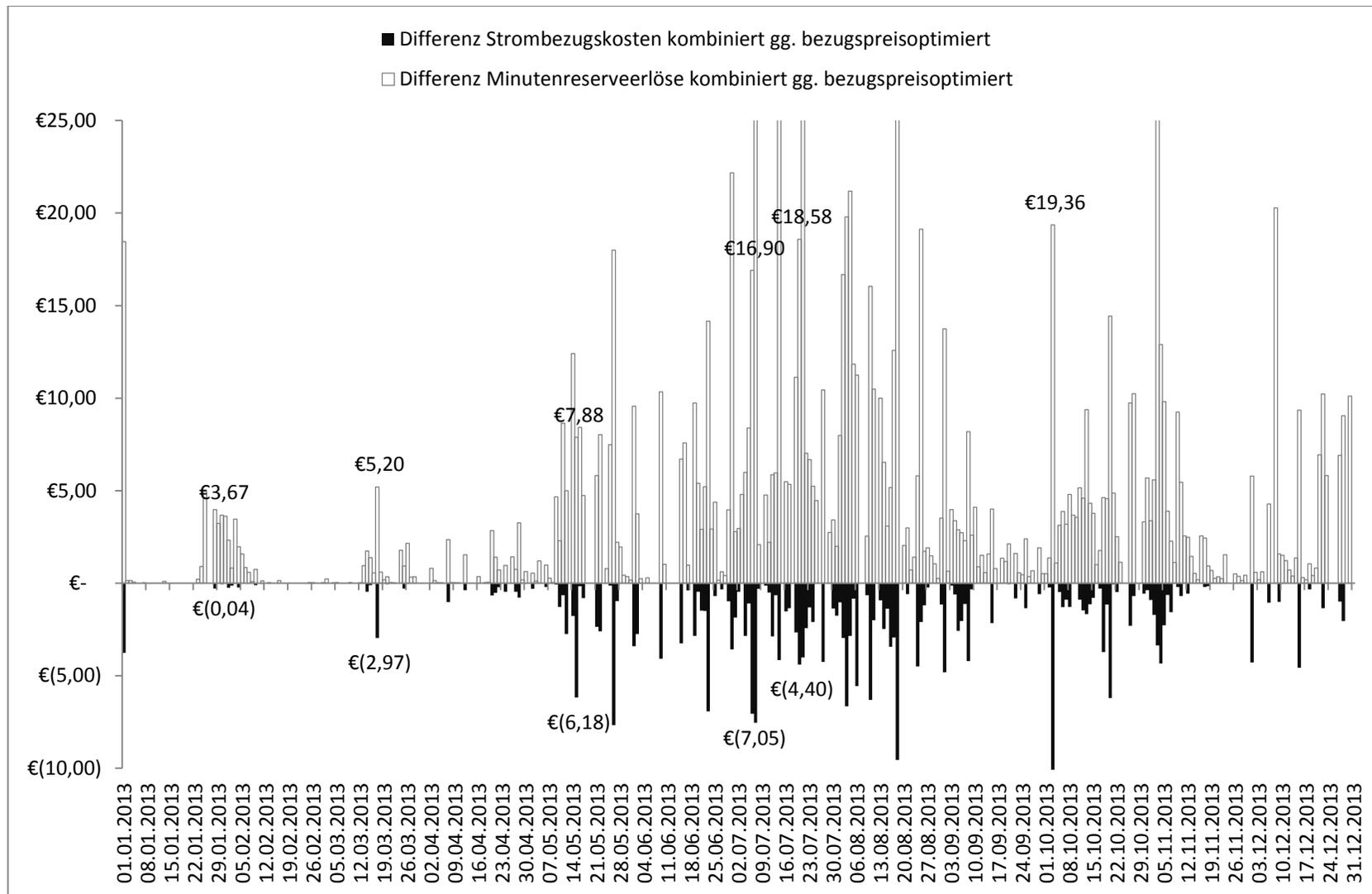


Abbildung 101 Balkendiagramm mit der Differenz der Strombezugskosten und der Minutenreserveerlöse über das Jahr 2013 zwischen den Optimierungsgesichtspunkten „bezugspreisopt.“ und „kombiniert“

C. *Verbesserung durch Ablaufplanmodifikation*

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse eines Ganzjahresvergleichs der energiewirtschaftlichen Ablaufplanung unter dem Optimierungsgesichtspunkt „kombiniert“ für die Startlösung gegenüber der darauf basierenden Schlusslösung nach lokaler Suche dargestellt.

In **Tabelle 11** sind die Planungsergebnisse der Startlösung nach Ablaufplankonstruktion und der Schlusslösung nach Ablaufplanmodifikation für die Ausstattungsszenarios „7/7/14“ und „7/7/11“ im Ganzjahresvergleich zusammengefasst.

Für das Ausstattungsszenario „7/7/14“ betragen die Kosten des Strombezugs bei der Startlösung im Gesamtjahr 16.973,02 EUR. Die Schlusslösung liegt mit Strombezugskosten von 14.526,84 EUR klar besser. Dies entspricht 70 % vom Referenzwert des Optimierungsgesichtspunkts „sofortig“. Auch bei den Erlösen aus Minutenreserve kann die Schlusslösung gegenüber der Startlösung deutlich zulegen. Die Minutenreserveerlöse liegen bei der Startlösung bei 1.212,70 EUR. Die Schlusslösung kommt mit 1.969,26 EUR auf 106 % des Referenzwerts des Optimierungsgesichtspunkts „erlösoptimiert“. Folglich ist das Gesamtergebnis bei der Schlusslösung mit 12.557,58 EUR ebenfalls besser als bei der Startlösung mit 15.760,34 EUR. Im Ergebnis der lokalen Suche beläuft sich das Gesamtergebnis auf nur noch 60 % des Referenzwerts.

Es ist zu beachten, dass sich durch das Verrücken der Batterietausche bei den Schlusslösungen im Übergang zum nächsten Tag andere Ladezustände der Wechselbatterien einstellen als bei der Startlösung. Es kann sich zwischen der Startlösung und der Schlusslösung stark unterscheiden, wie viel Strom an dem einen oder dem anderen Tag nachgeführt wird. Weiterhin gilt auch bei der Ablaufplanmodifikation, dass jede Wechselbatterie, die sich am hinteren Ende des Planungszeitraums in der Station aufhält, so weit wie möglich geladen sein muss. Im Rahmen der lokalen Suche besteht dennoch die Tendenz, die Stromnachfrage in Zeiten mit überdurchschnittlichem Bezugspreis aufzugeben, um mit Blick auf einen einzelnen Tag die Strombezugskosten im Verhältnis zur nachgeführten Energiemenge zu verbessern. Über das gesamte Jahr gesehen, ist die Gesamtmenge nachgeführter Energie mit 543.084 kWh bei den Schlusslösungen allerdings nicht gravierend höher als bei den Startlösungen mit 542.952 kWh. Ohnehin dürften diese Gesamtmengen nachgeführter Energie über das Jahr hinweg niemals mehr als die Stromnachfrage eines Tages auseinanderdriften.

Wegen des Mengenunterschieds bei der nachgeführten Energie muss das Gesamtergebnis geringfügig relativiert werden. Bei der Startlösung zeigt sich ein relatives Gesamtergebnis von 2,90 Cent/kWh. Das relative Gesamtergebnis ist bei der Schlusslösung mit 2,31 Cent/kWh nach wie vor besser.

Im Ausstattungsszenario „7/7/11“ ist der Pool von Wechselbatterien minimal ausgelegt. Darum herrscht in diesem Szenario per se eine geringere Überkapazität. In der Folge durchlaufen einzelne Wechselbatterien über das Jahr mehr Lade-/Entladezyklen; die Stationsaufenthalte verkürzen sich. Dies macht sich zum einen mit einem geringen Zuwachs von +4 % bei den Kosten des Strombezugs und zum anderen mit einem drastischen Einschnitt von -40 % der Minutenreserveerlöse bemerkbar. Auch nach der Ablaufplanverbesserung nehmen die Strombezugskosten um +5 % zu und die Minutenreserveerlöse fallen um -33 % ein.

Tabelle 11: Gesamtübersicht Planungsergebnisse der Startlösung nach Ablaufplankonstruktion und der Schlusslösung nach Ablaufplanmodifikation

(verwendete Problemlösungsmodule:

■ Grob-/Feinplanung, ■ Stückelung Minutenreserve, ■ Abwägung Minutenreserve gg. Strombezugskosten

① Minimum an Strombezugskosten, ② Maximum an Minutenreserveerlösen)

	Kosten des Strombezugs		Erlöse durch Minutenreserve		Gesamtergebnis		nachgeführte Energiemenge	relatives Gesamtergebnis
Szenario „7 7 14“ sieben Fahrzeuge, sieben Ladestellen, 14 Wechselbatterien								
Startlösung „kombiniert“ ■ ■ ■ ① ②	16.973,02 EUR	81%	1.212,70 EUR	66%	15.760,34 EUR	76%	542.952 kWh	2,90 Cent/kWh
Schlusslösung „kombiniert“ ■ ■ ■ ① ②	14.526,84 EUR	70%	1.969,26 EUR	106%	12.557,58 EUR	60%	543.084 kWh	2,31 Cent/kWh
Szenario „7 7 11“ sieben Fahrzeuge, sieben Ladestellen, 11 Wechselbatterien								
Startlösung „kombiniert“ ■ ■ ■ ① ②	17.701,02 EUR	+4%	731,46 EUR	-40%	16.969,62 EUR	+8%	542.260 kWh	3,13 Cent/kWh
Schlusslösung „kombiniert“ ■ ■ ■ ① ②	15.248,46 EUR	+5%	1.321,36 EUR	-33%	13.927,10 EUR	+11%	544.190 kWh	2,56 Cent/kWh

In **Abbildung 102** sind die Planungsergebnisse für das Ausstattungsszenario „7|7|14“ monatsweise in einem Säulendiagramm aufbereitet. Es wird noch einmal klar, dass die Schlusslösung nicht bloß bezüglich der Strombezugskosten, sondern auch in Bezug auf die Erlöse aus Minutenreserve besser liegt. Im Mai 2013 haben sich für die Startlösung Gesamtergebnisse in Summe von 1.345,40 EUR ergeben. Zu diesen Gesamtergebnissen haben seitens der Startlösung Minutenreserveerlöse in Summe von 102,37 EUR beigetragen. Seitens der Schlusslösung sind für den Monat Mai 2013 Gesamtergebnisse in Summe von 1.121,95 EUR ermittelt worden. Dabei haben sich die Minutenreserveerlöse in Summe auf 148,72 EUR gemehrt. Die Ablaufplanverbesserung erscheint im Verlaufe des Jahres 2013 recht gleichmäßig zu sein; beispielsweise ist auf den ersten Blick kein Zusammenhang zwischen der Verbesserung durch lokale Suche und der mittleren Spannweite der Strombezugskosten in dem jeweiligen Monat zu sehen.

In **Abbildung 103** sind die Planungsergebnisse für das Ausstattungsszenario „7|7|11“ monatsweise in einem Säulendiagramm aufbereitet. Im Mai 2013 haben sich für die Startlösung Gesamtergebnisse in Summe von 1.449,80 EUR ergeben. Die Gesamtergebnisse für die Schlusslösung liegen dagegen im Monat Mai in Summe bei 1.192,41 EUR. Es ist über das ganze Jahr hinweg zu sehen, dass die geringere Überkapazität den zeitlichen Spielraum etwas verengt, was sich insbesondere durch einen Rückgang bei den Minutenreserveerlösen äußert.

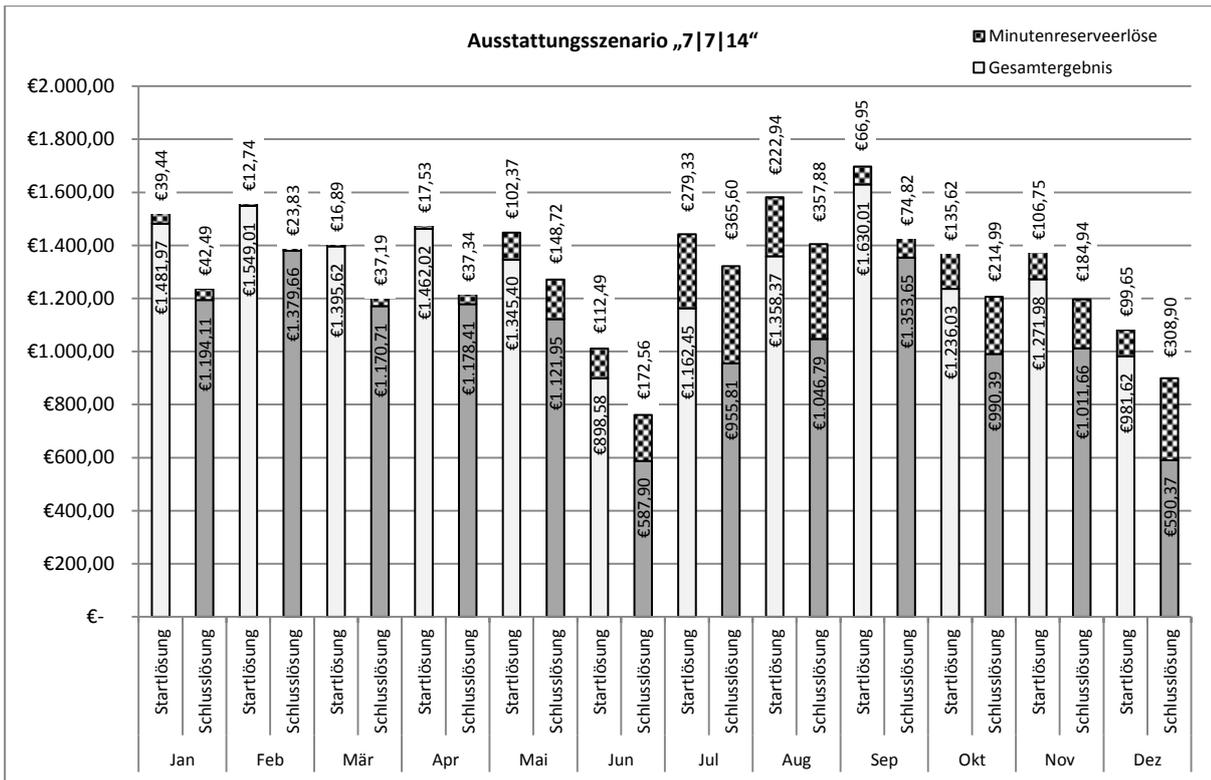


Abbildung 102 Säulendiagramm mit gestapelten Werten für das Gesamtergebnis und die Minutenreserveerlöse der Startlösung in Gegenüberstellung zur Schlusslösung für das Ausstattungszenario „7|7|14“

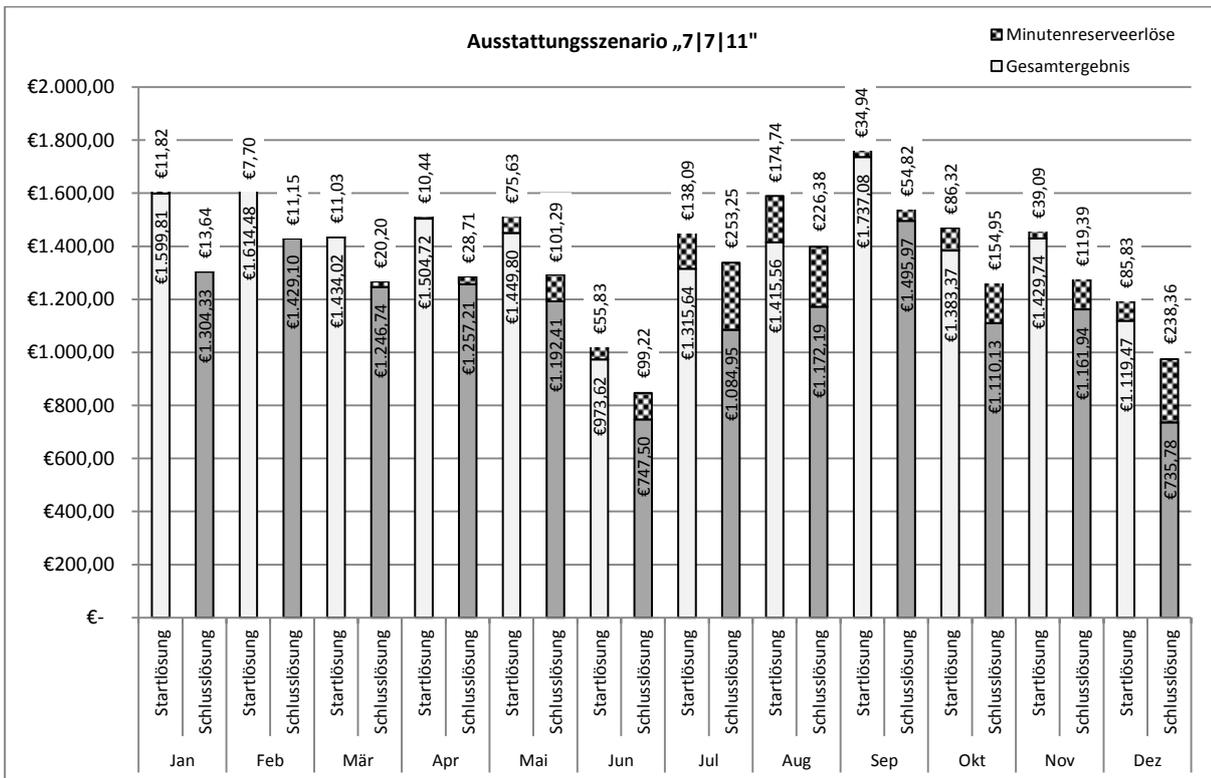


Abbildung 103 Säulendiagramm mit gestapelten Werten für das Gesamtergebnis und die Minutenreserveerlöse der Startlösung in Gegenüberstellung zur Schlusslösung für das Ausstattungszenario „7|7|11“

D. Suchstrategien

In diesem Abschnitt werden die einige Beobachtungen bei der Durchführung der lokalen Suche mit verschiedenen Optionen zur Beschleunigung/Verfeinerung wiedergegeben und reflektiert.

Als Suchoptionen gelten hier die Schrittweitenanpassung, das Verzweigen in Nebenpfade (es wird auf gleichwertige nächstbeste Lösungskandidaten zurückgekommen - Backtracking) und das Abbrennen von Werteplateaus (ausgehend von stagnierenden Werten wird nur ein Nebenpfad ausgetreten)

Die lokale Suche wird mit der Startlösung in Gang gesetzt.

Wie oben erwähnt, ist es kennzeichnend für die Startlösung, dass die Batterietausche so spät wie möglich durchgeführt werden, ehe es zur Nichterfüllung von Transportanforderungen kommt. Die Startlösung ist also am Rande des straffreien Ausschnitts des Lösungsraums angesiedelt, weshalb die Suche auf ihrem Hauptpfad in Richtung des Ursprungs des Lösungsraums vordringen müsste. Zum Ursprung des Lösungsraums zählen die Lösungen, bei denen die Batterietausche frühestmöglich durchgeführt – also praktisch in unterschiedlicher Abfolge ganz zu Beginn des Planungszeitraums vorgenommen werden. Bei realistischen Probleminstanzen ist der Lösungsraum wissentlich so groß, dass nicht einmal der Ausschnitt straffreier Lösungen komplett abgesucht werden kann. Darum ist zu beleuchten, inwieweit der Lösungsraum vom Hauptpfad der Suche und gegebenenfalls durch Verzweigung in Nebenpfade einzubeziehen ist, um eine attraktive Schlusslösung aufzufinden. Weiterhin ist es sehr bedeutsam, ob dabei lokale Optima überwunden und die Suche effektiv fortgesetzt werden kann.

In der **Tabelle 9** sind die Eckdaten und Resultate experimenteller Läufe der lokalen Suche für den Referenztag 23.06.2013 zusammengefasst. Entlang des Hauptpfads gelangt sie schon nach bloß zehn Suchschritten zu einem lokalen Optimum. Wie oben angeklungen, ist es beim Verrücken eines Batterietausches um nur eine Zeiteinheit gut möglich, dass zeitlich nach vorne wie auch nach hinten keine neue Stunde und demnach kein günstigerer Bezugspreis für einen Stationsaufenthalt erschlossen wird. In einem solchen Fall wird keiner der Lösungskandidaten aus der Einer-Nachbarschaft eine echte Verbesserung darstellen, so dass ein – wenngleich liegt zu überbrückendes – lokales Minimum besteht. Wie in der ersten Zeile zu sehen ist, läuft der Hauptpfad ohne Schrittweitenanpassung in das lokale Minimum mit Strombezugskosten in Höhe von 18,74 EUR und Minutenreserveerlösen in Höhe von 14,16 EUR. Die Minutenreserveerlöse sind zwar vermeintlich hoch, jedoch ist trotz einer ziemlich hohen Menge nachzuführender Energie das relative Gesamtergebnis von +0,3... Cent/kWh in Kenntnis besserer Ergebnisse für den Referenztag als nicht attraktiv einzustufen.

Die zweite Zeile zeigt auf, dass ohne Schrittweitenanpassung auf dem Hauptpfad der Suche keinerlei Nebenpfade ausgetreten werden. Denn in den zehn Suchschritten wird jeweils ein einziger nächstbester Lösungskandidat entdeckt und alleinig über den Hauptpfad begangen. Die Laufzeit für die Experimente ohne Schrittweitenanpassung ist dementsprechend mit unter 1 Minute äußerst niedrig, da die Suche auf dem Hauptpfad rasch in ein lokales Optimum verfällt.

Ein lokales Optimum kann dadurch überbrückt werden, dass die Schrittweite erhöht wird, sobald in der bisher betrachteten Nachbarschaftskonstellation kein nächstbesterer Lösungskandidat vorgefunden werden kann. Durch die Erhöhung der Schrittweite wird es möglich einen Batterietausch um mehrere Zeiteinheiten zu verrücken und praktisch aus dem lokalen Optimum herauszuspringen. Immer wenn ein nächstbesterer Lösungskandidat entdeckt wird, kann die Schrittweite wieder ver-

ringert und die Suche somit verfeinert werden.

Beim Experiment in der dritten Zeile ist zu beobachten gewesen, dass der Hauptpfad dank Schrittweitanpassung über drei lokale Optima hinweggegangen ist und erst im vierten lokalen Optimum gehalten hat. Dieses vierte lokale Optimum erscheint mit Strombezugskosten in Höhe von 4,95 EUR und Minutenreserveerlösen in Höhe von 14,86 EUR eine attraktive Lösung zu sein. Es bietet damit im Verhältnis zur Menge nachzuführender Energie die niedrigsten Strombezugskosten und auch die Minutenreserveerlöse ließen sich im Vergleich zum ersten lokalen Optimum des Hauptpfads leicht steigern. Beim Referenztag ist mit -1,1... Cent/kWh das beste bekannte relative Gesamtergebnis zu sehen. Wird allein der Hauptpfad begangen, liegt die Laufzeit mit 5 Minuten nach insgesamt 166 Suchschritten ziemlich niedrig.

Tabelle 12 Übersicht der Eckdaten und Resultate experimenteller Suchläufe zur Überprüfung von Suchoptionen

	Schrittweitanpassung	Rückverfolgung (Nebenpfade)	Wertplateaus abbrennen	Suchschritte	Laufzeit	attraktive Lösung gefunden	Anzahl lokaler Optima	Kosten des Strombezugs	Erlöse aus Minutenreserve	relatives Gesamtergebnis
23.06.2013				10	< 1 Min.	Nein	1	18,74 EUR	14,16 EUR	+ 0,3.. Cent/kWh
		●		10	< 1 Min.	Nein	1	18,74 EUR	14,16 EUR	+ 0,3.. Cent/kWh
	●			166	5 Min.	Ja	4	4,95 EUR	14,86 EUR	- 1,1.. Cent/kWh
	●	●		> 2400	> 2 Std.	Ja	> 200	4,95 EUR	14,86 EUR	- 1,1.. Cent/kWh
	●	●	●	1862	55 Min.	Ja	127	4,95 EUR	14,86 EUR	- 1,1.. Cent/kWh

Werden zusätzlich zur Schrittweitanpassung auch noch Nebenpfade begangen, so ufer die Suche aus – für den Referenztag wurde die Suche nach einer Laufzeit von etwas mehr als 2 Stunden und über 2400 Suchschritten abgebrochen. Dabei sind über 200 lokale Optima vorgefunden worden, von denen jedoch keines besser als das zuvor gesehene vierte lokale Optimum auf dem Hauptpfad ist. Dass sich die Suche in Nebenpfaden verliert, liegt insbesondere an den preislichen Vorgaben. Zum einen sind die berücksichtigten Stundenkontrakten zeitlich gröber aufgelöst sind als das Viertelstundenraster, in welchem der Ladeverlauf festgelegt werden kann. Zum anderen bewirkt nicht jede Ausweitung eines Stationsaufenthaltszeitraums den zeitlichen Anschnitt eines Stundenkontrakts, der günstigere Bezugspreiskonditionen bietet als jene Stundenkontrakte, die zuvor vom Stationsaufenthalt zeitlich überlappt sind. Wie sich schon oben in den Verläufen der Zielfunktionswerte für den Referenztag abzeichnet, gibt es größere Plateaus. Im Experiment in der fünften Zeile wurde die Suche darauf beschränkt, von einem solchen Plateau aus lediglich in einen Nebenpfad zu verzweigen. Dies führte zu einer fristwahrenden Laufzeit von insgesamt 55 Minuten und 1862 Suchschritten, wenngleich für den Referenztag das relative Gesamtergebnis nicht weiter gesteigert werden konnte. Mit den aufgeführten Suchoptionen kann offenbar die Anfälligkeit der trajektionsbasierten Suche für lokale Optima bei der Planungsproblemstellung dieser Arbeit effektiv abgemildert werden.

TEIL 7 FAZIT UND AUSBLICK

A. *Fazit*

Die zwiefältige Ausrichtung auf den Stromgroßhandel und den Regelleistungsmarkt verspricht im Anwendungsfallbeispiel mit dem Container-Terminal Altenwerder in Hamburg (CTA) auf Basis des Vergleichs über das ganze Jahr 2013 eine relativ hohe Reduktion der Gesamtkosten für die Energiebereitstellung an eine batteriebetriebene Transportfahrzeugflotte.

Die Ablaufplankonstruktion **B2M** bringt unter dem entsprechenden Optimierungsgesichtspunkt ("kombiniert") Ablaufpläne hervor, deren Gesamtkosten für das Laden durchschnittlich rund 20 % gegenüber dem jetzigen Stand der Automatisierung niedriger liegen. Prozentual gesehen zeigt sich hier ein enormes Einsparpotenzial, welches stärker von einer Reduktion der Strombezugskosten als von zusätzlichen Erlösen durch das Angebot von Minutenreserve herrührt. Entscheidend für die Güte der Ablaufpläne ist daher ihre Anreicherung durch die Abwägung von Vergünstigungen bei den Strombezugskosten gegenüber einer Minderung der Erlöse für Minutenreserve. Dies wird in dieser Arbeit dadurch gelöst, dass vorläufig die Ladeverläufe für größtmögliche Minutenreserveerlöse festgehalten werden und dann im Einzelnen die Zerlegung von Angebotsstücken von Minutenreserve überprüft wird. Die Überprüfung wird über eine Suche von Teilgraphen aus einem sogenannten Dependenzgraph vorgenommen, welcher die Abhängigkeiten zwischen unterschiedlichen Arten der Zerlegung von Minutenreserveangeboten und ihre teils negativen Veränderung am energiewirtschaftlichen Gesamtergebnis widerspiegelt.

Die gegenwärtige Ausstattung des CTA bildet ein Szenario „7/7/14“ mit einem vermeintlich großzügigen Verhältnis von Wechselbatterien zu Fahrzeugen. Beim Durchsuchen benachbarter Lösungen sind für dieses Szenario Ablaufpläne aufzudecken gewesen, deren Gesamtkosten nochmals um bis zu 25 % besser liegen als die Gesamtkosten des Ablaufplans aus der unter dem Optimierungsgesichtspunkt „kombiniert“ konstruierten Startlösung. Die Verbesserungen durch die Ablaufplanmodifikation **B2M** sind anteilig am Gesamtergebnis gleichermaßen bei den Strombezugskosten wie auch den Minutenreserveerlösen zu erzielen. Es ist als ein grundlegendes Verbesserungsmuster zu sehen, die Batterietausche nach Möglichkeit entweder just vor der Produktperiode des am höchsten bewerteten Minutenreserveprodukts oder der Stunde mit dem minimalen Strombezugspreis vorzunehmen.

Absolut gesehen dürften die Einsparungen bei üblichen Flottengrößen an einem Einzelstandort nicht so hoch ausfallen, dass eine Weiterentwicklung und Einführung von Werkzeugen für eine Vortagsplanung und planmäßige Steuerung von Ladeprozessen der Wechselbatterien gemäß **B2M** lohnenswert ist. Im Anwendungsfallbeispiel des CTA sind die jährlichen Einsparungen nach kompletter Umstellung der Flotte auf batterie-elektrische Fahrzeuge mit etwa 60 TEUR zu veranschlagen.

Bisherige Flottenversuche im CTA haben gezeigt, dass sich in Anwendung eines Batteriewechselkonzepts für das quasi-stationäre Batteriespeichervolumen ein Zweitnutzen entfalten lässt. Während ihrer Stationsaufenthalte können die Wechselbatterien in nennenswertem Umfang einem Angebot von Regelleistung und auf Abruf auch der Erbringung von Regelenergie dienen. Dahingehend ist in dieser Arbeit die Konditionierung der Batteriespeichersysteme als ein integraler Bestandteil der Planung der Energiebereitstellung für das sie umgebende geschlossene Transportsystem aufgegriffen worden.

B. *Ausblick*

Die praxisnahe Evaluation des heuristischen Planungsverfahrens **B2M** sowie die prototypische Implementierung im Anwendungsfallbeispiel eines Containerterminalbetriebs haben weiteren Untersuchungsbedarf aufgezeigt:

❖ Erweiterung des Planungshorizonts

Es hat sich herausgestellt, dass die Stationsaufenthalte der Wechselbatterien äußerst günstig gelegt werden können, indem Batterietausche planvollerweise früher oder später vorgenommen werden. Bedingt durch die ziemlich hohe Nutzspeicherkapazität der Wechselbatterien decken die Stationsaufenthalte in der Praxis größere zeitliche Ausschnitte des eintägigen Planungszeitraums ab. Darum ist es im Rahmen der lokalen Suche oftmals sehr gangbar, die Batterietausche an den Anfang des Planungszeitraums vorzuziehen, um Anschnitte der Stationsaufenthaltszeiträume im Übergang von einem Tag zum nächsten Tag zu vermeiden. Denn dann sind bei den einzelnen Stationsaufenthalten die Zeitfenster besonders weit offen, in denen günstige Konditionen für ein Angebot von Minutenreserve und den reinen Strombezug vorgefunden werden können. Häufig unterscheidet sich die nachgeführte Energiemenge zwischen der Startlösung und der Schlusslösung nach lokaler Suche sehr stark voneinander. Die Auswertung in der vorliegenden Arbeit hat ergeben, dass an manchen Tagen bei den Schlusslösungen weniger Energie nachgeführt wird als an Bord der Fahrzeuge verbraucht wird. Die Konsequenz daraus ist, dass in den Schlusslösungen am darauffolgenden Tag zwangsläufig mehr Batterietausche eingeplant werden müssen.

❖ Skaleneffekte bei zukünftigen Ausstattungsvarianten

In der vorliegenden Arbeit wurde die gegenwärtige Ausstattung für etwas weniger als ein Zehntel der Fahrzeuge in der Flotte des CTA als ein realistisches Szenario „7/7/14“ betrachtet. Für die Zukunft ist eine vollkommene Umstellung der Fahrzeugflotte auf batteriebetriebene Fahrzeuge denkbar. Dabei ergäben sich womöglich völlig veränderte Ausstattungsszenarios wie zum Beispiel „86/2x42/128“, in welchem auslegungsgemäß zwei Stationen mit einer größtmöglichen Anzahl von Ladestellen und so weiter vorkommen. Bei unverändertem Planungshorizont von einem Tag käme es in solchen Szenarios wahrscheinlicher zu einer zeitlichen Überlappung von Stationsaufenthaltszeiträumen. Somit würden sowohl zahlenmäßig und zeitlich mehr Schnipsel für eine Zusammenstellung von Minutenreserveangeboten zur Verfügung stehen. Es ist zu untersuchen, wie es unter diesen Umständen um die Vermarktbarkeit der Zuschalt-/Abschaltpotenziale bestellt wäre. Denn wie sich in dieser Arbeit gezeigt hat, kann es bei geringfügiger Ausstattung oft passieren, dass mit Schnipseln aus vorhandenen Zuschalt-/Abschaltpotenzialen kein Vierstundenblock zwecks Angebot von Minutenreserve zusammengestellt werden kann. Die betreffenden Schnipsel sind dann als nutzlos zu betrachten und die Zuschalt-/Abschaltpotenziale tragen nicht zum energiewirtschaftlichen Gesamtergebnis bei.

❖ Parametrierbarkeit gegenüber äußeren Einflüssen

In der energiewirtschaftlichen Ablaufplanung muss eine Grundannahme darüber getroffen werden, wie viel Strom zwischen dem Reserveniveau und dem Niveau des Vollladezustands während eines Stationsaufenthalts nachgeführt werden kann. Im Anwendungsfallbeispiel dieser Arbeit ist die Erfahrung gemacht worden, dass die Nutzspeicherkapazität der Wechselbatterien in Abhängigkeit von der Außentemperatur nur teilweise zugegriffen werden kann. Bei niedrigen Außentemperaturen kann innerhalb eines kompletten Lade-/Entladezyklus deutlich weniger Strom an die Fahrzeuge bereitgestellt werden. Im Verlaufe eines Jahres werden sich starr getroffene Grundannahmen diesbezüglich verfälschen. Bei der Ausführung eines Ablaufplans an dessen Geltungstag kommt es dann zu Abweichungen bei den geplanten Batterietauschzeitpunkten und den vorgesehenen Batterieladeständen.

GLOSSAR

- Aggregator** Dies bezeichnet ein Dienstleistungsunternehmen für die Vermarktung von Flexibilität von mehrerer Einspeise- und Entnahmestellen. Ein \sim bündelt die Flexibilität innerhalb eines Pools und stellt auf dieser Grundlage gemeinsame Angebote von Regelleistung zusammen. Es kann unter anderem in der Stufe von Minutenreserve angeboten werden
↑ Minutenreserveangebot.
- Angebotschnipsel**
ein \uparrow Stück eines Minutenreserveangebots kann auf der Zeitachse (horizontale Achse) aus einem oder mehreren Schnipseln aufgebaut werden. Diese \sim können von unterschiedlichen Stationsaufhalten der Wechselbatterien ausgehen und dementsprechend gruppiert werden.
- Angebotsstück** Ein Angebot von Minutenreserve \uparrow kann auf der Leistungsachse (vertikale Achse) aus einem oder mehreren Stücken aufgebaut werden. In einem \sim ist der ganze vierstündige Zeitraum einer Produktperiode für Minutenreserve abgedeckt.
- Art der Zerlegung, Zerlegungsart**
↑ Zerlegung eines Stücks eines Minutenreserveangebots
- Ausgleichsenergie** (elektrische Energie)
die zur Umlage der Kosten der Erbringung von Regelenergie festgestellte Differenz zwischen der Höhe eines nominierten Bilanzkreisfahrplans und der Höhe der von einem Verantwortlichen tatsächlich gelieferten bzw. bezogenen Energie.
- Batterieeinsatz, mobiler**
Dies bezeichnet einen Typ von Einsatzaktivität, bei welchem sich eine Wechselbatterie an Bord eines Fahrzeugs befindet
- Batterieeinsatz, stationärer**
Dies bezeichnet einen Typ von Einsatzaktivität, bei welchem sich eine Wechselbatterie in der Station befindet
- Batterietausch** Ein \sim meint die Abgabe einer gänzlich oder teilweise entladenen Wechselbatterie und die Aufnahme einer frisch geladenen Wechselbatterie durch ein Fahrzeug über eine Tauschspur in der Station
- Containertransporter, Transportfahrzeug**
Ein Fahrzeug für den Transport von Containern zwischen einer Containerbrücke und einem Lagerblock auf der Seeseite eines maritimen Containerterminals.
- Dämpfungsprinzip**
Es wird im Zuge einer Ablaufplanumstellung versucht, eine zeitliche Veränderung oder eine Ladezustandsveränderung in einer betroffenen Einsatzaktivität so weit wie möglich für sich umzusetzen und ein Fortspinnen auf die in Beziehung stehenden Einsatzaktivitäten zu vermeiden.
- Dependenzgraph**
Eine Umverteilungskombination für ein bestimmtes Stück eines Minutenreserveangebots kann voraussetzen, dass ein anderweitiges Angebotsstück mit ihm gemeinsam zerlegt/aufgelöst wird. Im Dependenzgraph sind sämtliche Umverteilungskombinationen mit ihren gegenseitigen Voraussetzungen verzeichnet.

Elektrizitätsbereitstellungsgeschehen

Das ~ meint die Gesamtheit der Lade- und Batterietauschprozesse, die zur Versorgung der batteriebetriebenen Fahrzeuge im Transportsystem notwendig sind.

Energienachführung, nachgeführte Energie (in kWh)

Als ~ wird eine Menge elektrischer Energie bezeichnet, die durch das Laden von Wechselbatterien und die Vornahme von Batterietauschen an die Fahrzeuge bereitgestellt wird.

Entladeleistung, erforderliche (elektrische Leistung, in kW)

Es wird für einen gewissen Zeitabschnitt angegeben/vorgesehen, mit welcher durchschnittlichen elektrischen Leistung aus einer Wechselbatterie ausgespeichert wird, um den Fahrverbrauch zu decken.

Fahrbetrieb Während eines ~ ist ein Fahrzeug, ↑ Containertransporter mit einer Batterie ausgestattet, die teilweise oder gänzlich entladen wird, bis dass der Bedarf für einen ↑ Batterietausch besteht oder ein solcher frühzeitig vorgenommen wird.

Fahrplan Ein ~ gibt für jede Viertelstunde innerhalb der Periode einer entsprechenden Übertragung bzw. eines Handelsgeschäfts an, welche Energiemenge [welcher Leistungsmittelwert] zwischen Bilanzkreisen ausgetauscht bzw. am Einspeiseknoten/Entnahmeknoten eingespeist/entnommen wird.

Horizontaltransportareal

Ein maritimes Containerterminal sieht oftmals eine rein horizontale Beförderung von Containern zwischen Containerbrücken und Lagerblöcken mit Hilfe von Fahrzeugen vor. Das ~ eines Containerterminals bildet ein ↑geschlossenes Transportsystem.

Ladeverlauf Ein ~ umfasst sämtliche Festlegungen von ↑Ladeleistung im Zeitraum eines ↑Stationsaufenthalts einer Wechselbatterie.

Ladeblock Als ~ wird ein Ausschnitt des ↑Ladeverlaufs mit mehreren direkt aufeinanderfolgenden Zeitscheiben bezeichnet, in denen eine Ladeleistung größer als null festgelegt worden ist.

Ladeprozess Ein ~ meint das Wiederaufladen einer Wechselbatterie mit der Ansteuerung eines oder mehrerer ↑Ladevorgänge.

Ladevorgang Ein ~ besteht aus einer Konstantstromphase und gegebenenfalls abschließender Konstantspannungsphase; er wird durch das Anschalten einer Ladegeräteinheit eingeleitet und durch Abschalten terminiert

Ladeleistung, festgelegte (elektrische Leistung, in kW)

Es wird für einen gewissen Zeitabschnitt angegeben/festgelegt, mit welcher durchschnittlichen elektrischen Leistung in eine Wechselbatterie eingespeichert wird, um diese wieder für ein Fahrzeug, ↑Containertransporter verfügbar zu machen

Lastgang Ein ~ erfasst im Zeitraster von Viertelstunden die verbrauchten Energiemengen bzw. Leistungsmittelwerte an einer Entnahmestelle.

Lastverschiebungspotenzial (elektrische Leistung)

Ein ~ gibt mit Bezug auf einen Zeitpunkt an, inwieweit die Leistungsaufnahme an einer Ladestelle entgegen dem geplanten Ladeverlauf zuvor abgesenkt und später erhöht werden kann (und umgekehrt).

Logistikgeschehen

Das ~ meint die Gesamtheit der Umschlags- und Transportprozesse oder Ähnlichen, die zur Abfertigung eines Containerschiffes an einem maritimen Containerterminal notwendig sind.

Minutenreserve

umgangssprachlich für die Tertiärregelung im Netzregelverbund, die zur Ablösung von Maßnahmen in der Primär- und Sekundärregelung in Kraft tritt. Ein Angebot von Minutenreserve meint, dass einem Regelzonenverantwortlichen die Vorhaltung von Minutenreserveleistung über eine jeweilige Produktperiode hinweg angeboten wird.

Modifikationsansatz

Ein ~ bildet die Graphenelemente einer ↑ Modifikationsschablone auf die Elemente des ↑ Präzedenzgraphs für den vorliegenden Ablaufplan ab, so dass beispielsweise kenntlich ist, welcher ↑ Batterietausch zu verrücken ist

Modifikationsschablone

Eine ~ schreibt vor, wie eine Umstellung eines Ablaufplans eingeleitet werden kann, wie beispielsweise über das ↑ Verrücken eines Batterietausches

Präzedenzgraph

Ein ~ beschreibt die Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen und Synchronisationsbeziehungen zwischen den geplanten Einsatzaktivitäten in einem Ablaufplan

Regelenergie (elektrische Energie)

die zur Vermeidung größerer Abweichungen von der Sollfrequenz auf Abruf durch einen Regelzonenverantwortlichen in das Verbundnetz eingespeiste oder aus dem Netz entnommene Menge elektrischer Energie.

Reserveniveau (für den Ladezustand)

Das ~ markiert einen Wert für den Ladezustand, ab welchem ein Fahrzeug, das mit der betreffenden Wechselbatterie ausgestattet ist, einen Bedarf für einen Batterietausch hat.

Schnipsel ↑ Angebotsschnipsel

Stationsaufenthalt

Bei der Anwendung eines Batteriewechselkonzepts kann sich eine Batterie entweder in der Station befinden (in der sie geladen werden kann) oder sie ist an Bord eines Fahrzeugs unterwegs (während dessen ↑ Fahrbetrieb sie entladen wird).

dazu genauer noch: **Stationsaufenthaltszeitraum**

siehe auch ↑ stationärer Batterieeinsatz

Subaggregation

Bündelung diverser Anlagen hinter einem Netzanschlusspunkt (egal ob Einspeise- oder Entnahmestelle) bezüglich der Veräußerung von Flexibilität und der Ansteuerung der Anlagen.

Traversieren (des ↑ Präzedenzgraphs)

Das ~ meint den im Präzedenzgraph verzeichneten Beziehungen zwischen Einsatzaktivitäten zu folgen und eine zeitliche Veränderung und/oder Ladezustandsveränderung dementsprechend weiter umzusetzen.

Transportsystem, geschlossenes

Ein ~ dient der Beförderung von Gütern innerhalb räumlicher Grenzen, wobei es Möglichkeiten zur Standortbestimmung und Lageerfassung jedes einzelnen Fahrzeugs gibt und sich diese wiederkehrend neuer Transportaufträge widmen können.

Transportauftragsprogramm

Ein ~ umfasst sämtliche individuell für ein Fahrzeug vorhergesagte Anzahlen zu bewältigender Transportaufträge (also die Transportlast).

Veränderungsinformationen, Kann/Ist-Werte, Muss/Soll-Werte

Die ~ in einem Präzedenzgraph informieren darüber, inwieweit eine zeitliche Veränderung oder eine Ladezustandsveränderung am vorliegenden Ablaufplan bereits vorgenommen worden ist bzw. noch ausstehend ist.

Verrücken eines Batterietausches

Das ~ meint einen vorliegenden Ablaufplan so zu modifizieren, dass der betreffende Batterietausch zeitlich vorgezogen oder aufgeschoben wird.

Zerlegung eines Stücks eines Minutenreserveangebots

dazu auch: **Umverteilungskombination**

Je nachdem aus wie vielen ↑ Schnipselgruppen ein ↑ Stück eines ↑ Minutenreserveangebots zusammengesetzt ist, gibt es eine Vielzahl von Kombinationen ihrer unterschiedlichen Zerlegungsarten.

Zerschlagung von Gruppen von Angebotsschnipseln

dazu auch: **Variante für die Umlage der Festlegungen von Ladeleistung**

Jede Gruppe von ↑ Schnipseln eines ↑ Stücks eines ↑ Minutenreserveangebots kann auf unterschiedliche Arten zerlegt werden, weil sämtliche Möglichkeiten der Umverteilung der dann ungebundenen Ladeleistung in Betracht zu ziehen sind.

Zuschalt-/Abschaltpotenzial (elektrische Leistung, in kW)

Ein ~ geht vom Aufenthalt einer Wechselbatterie in der Station aus und gibt für einen gewissen Zeitabschnitt an, inwieweit die elektrische Leistungsaufnahme an einer von ihr ausgelasteten Ladestelle erhöht oder abgesenkt werden kann.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Unerwartete Stromerträge aus Windkraftanlagen rufen einen Regelungsbedarf hervor [nach Vortrag von TenneT TSO GmbH, IQPC Tagung 14.11.2012]	2
Abbildung 2: Typischer Verlauf der Netzlast und der Residuallast in Deutschland.....	3
Abbildung 3: Veranschaulichung der Preisdämpfung auf der Strombörse durch die Vermarktung der Stromerträge aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen	4
Abbildung 4: Das geschlossene Transportsystem im seeseitigen Horizontaltransportareal eines Containerterminalbetriebs dient als Anwendungsfallbeispiel	7
Abbildung 5: Übersicht der Problementeile in der Gesamtproblemstellung einer Bewirtschaftung des Batteriespeichervolumens innerhalb eines geschlossenen Transportsystems mit batteriebetriebenen Fahrzeugen	8
Abbildung 6: Exemplarischer Fahrzeug- und Batterieeinsatz mit einer Fahrzeugnutzungs- sequenz und zwei Nutzungssequenzen von Wechselbatterien.....	9
Abbildung 7: Exemplarische Ladeverläufe für eine Wechselbatterie bei einem Aufenthalt in der Station.....	11
Abbildung 8: Das Prinzip der zeitlichen Verschiebung von Stromverbrauch/-nachfrage.....	12
Abbildung 9: Exemplarische Zusammenstellung eines Angebots negativer Regelleistung über die Ladezeitfenster zweier Wechselbatterien	13
Abbildung 10 Bilanzieller Zusammenhang zwischen der Belieferung von Letztverbrauchern in der Realwelt und den Fahrplanlieferungen in der Marktmodellwelt	26
Abbildung 11 In der Fahrplanwelt wird Ausgleichenergie abgerechnet/verrechnet, wenn Fahrplanabweichungen eingetreten sind.	27
Abbildung 12: Illustration der Einbettung des Geschehens der Energiebereitstellung in das Logistikgeschehen und die Rollen der Ressourcen in der Planungsproblemstellung.....	62
Abbildung 13 Übersicht der Produktblöcke bei der Ausschreibung von Minutenreserve gegenüber den Stunden eines Tages	65
Abbildung 14 Übersicht der Vorhalte-/Produktperioden für verschiedene Minutenreserveprodukte	67
Abbildung 15 Übersicht beispielhaft prognostizierter Leistungspreise für Minutenreserve	68
Abbildung 16 Übersicht beispielhaft prognostizierter Strombezugspreise.....	69
Abbildung 17 Übersicht der Ausstattungsmöglichkeiten für die Transportfahrzeuge mit Wechselbatterien über die Zeit	72
Abbildung 18 Festlegung der Belegung der Transportfahrzeuge mit Wechselbatterien über die Zeit	73
Abbildung 19 Übersicht der Aufenthaltsmöglichkeiten für Wechselbatterien in den Ladestationen über die Zeit.....	74
Abbildung 20 Festlegung der Auslastung der Ladestellen durch Wechselbatterien über die Zeit.....	75
Abbildung 21 Kumulierte Auslastung der Ladestellen einer Station	75
Abbildung 22 Übersicht der Ausfahrmöglichkeiten für Transportfahrzeuge in den Ladestationen über die Zeit.....	76
Abbildung 23 Festlegung der Auslastung der Tauschspuren durch Transportfahrzeuge über die Zeit	77
Abbildung 24 Kumulierte Auslastung der Tauschspuren einer Station.....	78
Abbildung 25 Planung der Begebenheit eines Fahrzeug an irgendeiner Station über die Zeit	78

Abbildung 26 Übersicht der Tauschmöglichkeiten für Wechselbatterien über die Zeit.....	79
Abbildung 27 Festlegung des Tauschens der Wechselbatterien über die Zeit.....	80
Abbildung 28 Planung des stationären Gebrauchs von Wechselbatterien über die Zeit.....	81
Abbildung 29 Planung des Gebrauchs zur Aufnahme von Wechselbatterien über die Zeit	83
Abbildung 30 Planung des mobilen Gebrauchs von Wechselbatterien über die Zeit.....	85
Abbildung 31 Planung des Einsatzes von Wechselbatterien zum Warten über die Zeit	87
Abbildung 32 Planung des Gebrauchs zur Abgabe von Wechselbatterien über die Zeit	89
Abbildung 33 Zustandsdiagramm zu einem Einsatzzyklus einer Wechselbatterie	90
Abbildung 34 Übersicht des Einsatzzyklus für Wechselbatterien und zugrundeliegenden Planungsentscheidungen.....	92
Abbildung 35 Übersicht der Lade-/Entlademöglichkeiten für die Wechselbatterien über die Zeit	94
Abbildung 36 Festlegung des zeitweiligen Ladens/Entladens der Wechselbatterien über die Zeit.....	95
Abbildung 37 Ermittlung des Ladezustands der Wechselbatterien über die Zeit	99
Abbildung 38 Ermittlung des Zu-/Abschaltpotenzials für die Wechselbatterien über die Zeit.....	100
Abbildung 39 Ermittlung des kumulierten nachfolgenden Zuschaltpotenzials für die Wechselbatterien bei einem ihrer Stationsaufenthalte über die Zeit	101
Abbildung 40 Ermittlung des kumulierten vorausgehenden Zuschaltpotenzials für die Wechselbatterien bei einem ihrer Stationsaufenthalte über die Zeit	102
Abbildung 41 Ermittlung des kumulierten nachfolgenden Abschaltpotenzials für eine Wechselbatterie bei einem ihrer Stationsaufenthalte über die Zeit.....	103
Abbildung 42 Ermittlung des kumulierten vorausgehenden Abschaltpotenzials für eine Wechselbatterie bei einem ihrer Stationsaufenthalte über die Zeit.....	104
Abbildung 43 Ermittlung des Potenzials für das Hinausschieben von Netzlast bzw. Stromnachfrage über die Zeit.....	105
Abbildung 44 Ermittlung des Potenzials für das Vorziehen von Netzlast bzw. Stromnachfrage über die Zeit.....	106
Abbildung 45 Ermittlung des Effektivpotenzials für das Abschalten über die Zeit.....	107
Abbildung 46 Ermittlung des Effektivpotenzials für das Zuschalten über die Zeit.....	107
Abbildung 47 Übersicht der Angebotsmöglichkeiten für Minutenreserve über die Zeit.....	108
Abbildung 48 Übersicht der Vorhaltemöglichkeiten für bestimmte Produktperioden mit den Wechselbatterien über die Zeit.....	109
Abbildung 49 Festlegung des zeitweiligen Vorhaltens von Minutenreserve über die Zeit.....	110
Abbildung 50 Übersicht der Bereithaltemöglichkeiten für bestimmte Produktzeiträume mit den Wechselbatterien über die Zeit.....	112
Abbildung 51 Festlegung des zeitweiligen Vorhaltens von Minutenreserve über die Zeit.....	113
Abbildung 52 Ermittlung des zeitweilig ausgeschöpften (genutzten) Zuschaltpotenzials.....	114
Abbildung 53 Ermittlung des zeitweilig ausgeschöpften (genutzten) Abschaltpotenzials.....	115
Abbildung 54 Ermittlung des kumulierten nachfolgenden verbleibenden Zuschaltpotenzials für die Wechselbatterien bei einem ihrer Stationsaufenthalte über die Zeit	116
Abbildung 55 Ermittlung des kumulierten nachfolgenden verbleibenden Abschaltpotenzials für eine Wechselbat. bei Stationsaufenthalt.....	117
Abbildung 56 Ermittlung des verbleibenden Potenzials für das Hinausschieben von Netzlast bzw. Stromnachfrage über die Zeit	117

Abbildung 57 Ermittlung der Energiemengen der einzelnen Umschaltpotenzialflächen.....	120
Abbildung 58 Genereller Aufbau des Präzedenzgraphen für die Batterieeinsatzplanung	122
Abbildung 59 Abhängigkeiten bei einem Stationsaufenthalt einer Wechselbatterie.....	124
Abbildung 60 Abhängigkeiten bei einer Ausstattung eines Fahrzeugs mit einer Wechselbatterie	124
Abbildung 61 Abhängigkeiten bei einer Abgabeaktivität.....	125
Abbildung 62 Abhängigkeiten bei einer Aufnahmeaktivität.....	125
Abbildung 63 Abhängigkeiten bei einem Fahrbetrieb.....	126
Abbildung 64 Abhängigkeiten bei einem Batterietausch	127
Abbildung 65 Übersicht der vier Problemlösungsmodule im heuristischen Lösungsverfahren	128
Abbildung 66 Übersicht der Konstruktionsschritte bei der Grobplanung von Stationsaufenthalten	130
Abbildung 67 Erstellung von Einsatzaktivitäten zum Auftakt des Planungshorizonts gemäß Anfangsstandorten.....	136
Abbildung 68 Übersicht der Konstruktionsschritte bei der Feinplanung der Ladeverläufe.....	137
Abbildung 69 Bildung von Teilladeverläufen nach Maßgabe von Stundenauktionspreisen	139
Abbildung 70 Bildung von Teilladeverläufen nach Maßgabe von Regelleistungspreisen	142
Abbildung 71 Modifikationsschablone für das Vorziehen eines Batterietausches	145
Abbildung 72 Modifikationsansatz für das Vorziehen eines Batterietausches.....	146
Abbildung 73 Vorwärtstraversierung einer Vorgänger-Nachfolger-Beziehung und einer Synchronitätsbeziehung	152
Abbildung 74 Rückwärtstraversieren einer Vorgänger-Nachfolger-Beziehung und einer Synchronitätsbeziehung	154
Abbildung 75 Startsituation im geplanten Ablauf einer stationären Einsatzaktivität, die von einer Verschiebung betroffen ist.	157
Abbildung 76 Dämpfung der Verschiebung bei endständigen Aufenthaltsvorgängen ohne Ladeleistung	158
Abbildung 77 Dämpfung der Verschiebung bei Aufenthaltsvorgängen mit umplatzierbarer Ladeleistung	159
Abbildung 78 Dämpfung der Verschiebung bei Aufenthaltsvorgängen mit Gebrauch von Abschaltpotenzial	160
Abbildung 79 Dämpfung der Verschiebung bei Aufenthaltsvorgängen mit Aufhebung von Minutenreserveangeboten.....	161
Abbildung 80 Endsituation im geplanten Ablauf einer stationären Einsatzaktivität, deren Verschiebung abgedämpft werden kann.....	162
Abbildung 81 Heraustrennen eines Ausstattungsvorgangs bei einer mobilen Einsatzaktivität.....	163
Abbildung 82 Durchrollen von Ausstattungsvorgängen bei einer mobilen Einsatzaktivität	164
Abbildung 83 Wandel einer zeitlichen Veränderung in eine Ladezustandsveränderung bei einer mobilen Einsatzaktivität	165
Abbildung 84 Übersicht der Konstruktionsschritte bei Stückelung von Minutenreserveangeboten	165
Abbildung 85 Formieren von Elementarbausteinen von Minutenreserveangeboten	167
Abbildung 86 Ziehung von Elementarbausteinen aus einem Topf/Fundus	168
Abbildung 87 Übersicht der Dekonstruktionsschritte bei Abwägung von Minutenreserveerlösen gegenüber den Kosten des Strombezugs.....	171

Abbildung 88 Zerlegung eines Stücks eines Angebots positiver Regelleistung.....	173
Abbildung 89 Zerlegung eines Stücks eines Angebots negativer Regelleistung.....	174
Abbildung 90 Zerschlagung aller Schnipselgruppen eines einzigen Angebotsstücks.....	176
Abbildung 91 Varianten für das Umlegen von Ladeleistung bei Zerschlagung einer Schnipselgruppe.....	177
Abbildung 92 Beeinflussung der Umverteilungsvariante durch priorisierte andere Schnipselgruppen	179
Abbildung 93 Kombination einzelner Varianten der Schnipselgruppen für die Angebotsstücke	182
Abbildung 94 Aufbau eines Abhängigkeitsgraphen bezüglich der Zerlegung mehrerer Stücke von Minutenreserveangeboten.....	185
Abbildung 95 Suche von Teilgraphen in einem Abhängigkeitsgraphen.....	187
Abbildung 96 Diagramme für die Strombezugskosten in Relation zu der Menge nachgeführter Energie für den 23.06.2013	195
Abbildung 97 Diagramme für die Minutenreserveerlöse für den 23.06.2013	197
Abbildung 98 Diagramme für das Gesamtergebnis in Relation zu der Menge nachgeführter Energie für den 23.06.2013	198
Abbildung 99 Sequenzdiagramm über die Ablaufplanerstellung mit Simulationsvorlauf in der Praxis.....	201
Abbildung 100 Kastendiagramme für die Differenz in den Strombezugskosten (links) und den Erlösen für Minutenreserve (rechts) zwischen den genannten Optimierungsgesichtspunkten	205
Abbildung 101 Balkendiagramm mit der Differenz der Strombezugskosten und der Minutenreserveerlöse über das Jahr 2013 zwischen den Optimierungsgesichtspunkten „bezugsopt.“ und „kombiniert“	207
Abbildung 102 Säulendiagramm mit gestapelten Werten für das Gesamtergebnis und die Minutenreserveerlöse der Startlösung in Gegenüberstellung zur Schlusslösung für das Ausstattungsszenario „7/7/14“	210
Abbildung 103 Säulendiagramm mit gestapelten Werten für das Gesamtergebnis und die Minutenreserveerlöse der Startlösung in Gegenüberstellung zur Schlusslösung für das Ausstattungsszenario „7/7/11“	210

LITERATURVERZEICHNIS

- Albadi, M. H. & El-Saadany, E. F. (2007). Demand response in electricity markets: An overview. In *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE* (pp. 1–5).
- Andor, M., Flinkerbusch, K., Janssen, M., Liebau, B. & Wobben, M. (2010). Negative Electricity Prices and the Priority of Renewable Energy Sources. *Zeitschrift Für Energiewirtschaft*.
- Arndt, U., von Roon, S. & Wagner, U. (2010). Virtuelle Kraftwerke: Theorie oder Realität? *BWK*, 58(6), 52–57.
- Arroyo, J. M. & Conejo, A. J. (2000). Optimal response of a thermal unit to an electricity spot market. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(3), 1098–1104.
- Artigues, C., Demasse, S. & Néron, E. (Eds.). (2010). Resource-Constrained Project Scheduling: Models, Algorithms, Extensions and Applications.
- Artigues, C., Lopez, P. & Haït, A. (2009). Scheduling under energy constraints. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*. Montréal, Canada.
- Atan, T. S. & Pandit, R. (1996). Auxiliary tool allocation in flexible manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, 89(94), 642–659.
- Atmani, A. & Lashkari, R. S. (1998). A model of machine-tool selection and operation allocation in FMS. *International Journal of Production Research*, 36(5), 1339–1349.
- Ayoub, A. K. & Patton, A. D. (1971). Optimal Thermal Generating Unit Commitment. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-90.
- Baldick, R. (1995). The generalized unit commitment problem. *IEEE Transactions on Power Systems*.
- BDEW. (2013a). Kraftwerksplanungen und aktuelle ökonomische Rahmenbedingungen für Kraftwerke in Deutschland. Energie-Info. Berlin.
- BDEW. (2013b). BDEW-Roadmap: Realistische Schritte zur Umsetzung von Smart Grids in Deutschland. Berlin.
- Begleitforschung E-Energy. (2014). Smart Energy made in Germany – Erkenntnisse zum Aufbau und zur Nutzung intelligenter Energiesysteme im Rahmen der Energiewende. Berlin
- Begleitforschung IKT-EM I. (2012). Ergebnisbericht zum Förderprogramm “IKT für Elektromobilität.” Berlin.
- Bian, Z., Yang, Y., Mi, W. & Mi, C. (2015). Dispatching Electric AGVs in Automated Container Terminals with Long Travelling Distance. *Journal of Coastal Research*, 73, 75–81.
- Blazewicz, J., Ecker, K. H., Pesch, E., Schmidt, G. & Weglarz, J. (2007). *Handbook on Scheduling: From Theory to Applications*.
- Block, C., Bomarius, F., Bretschneider, P., Briegel, F., Burger, N., Fey, B., Weinhardt, C. (2008). Internet der Energie - IKT für Energiemärkte der Zukunft - Die Energiewirtschaft auf dem Weg ins Internetzeitalter.
- Bode, S. & Groscurth, H. (2006). Zur Wirkung des EEG auf den Strompreis. Hamburg: Hamburgisches Welt-Wirtschafts-Archiv (HWWA).
- Borggrefe, F. & Paulus, M. (2011). The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany. *Applied Energy*, 88(2), 432–441.
- Böttcher, J. & Drexl, A. (1999). Project scheduling under partially renewable resource constraints. *Management Science*, (4).
- Brinkmann, B. (2005). *Seehäfen – Planung und Entwurf*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Brucker, P., Drexl, A., Möhring, R., Neumann, K. & Pesch, E. (1999). Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods. *European Journal of Operational Research*, 112, 3–41.
- Brucker, P., Knust, S., Schoo, A. & Thiele, O. (1998). A branch & bound algorithm for the resource-constrained project scheduling problem. *Eur. J. Oper. Res.*, 107(2), 272–288.

- Bundesnetzagentur. (2011). "Smart Grid" und "Smart Market" – Eckpunktepapier der Bundesnetzagentur zu den Aspekten des sich verändernden Energieversorgungssystems. Bonn: Bundesnetzagentur.
- Bundesnetzagentur. (2012). Konsolidierte Lesefassung in Anlage zum Beschluss BK6-07-002: Marktregeln für die Durchführung der Bilanzkreisabrechnung Strom (MaBiS). Bonn
- Carlo, H. J., Vis, I. F. A. & Roodbergen, K. J. (2014). Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme. *European Journal of Operational Research*, 236(1), 1–13.
- Chaleshtarti, A. S. & Shadrokh, S. (2011). Branch and Bound Algorithms for Resource Constrained Project Scheduling Problem Subject to Cumulative Resources. *2011 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, 147–152.
- Chen, B., Potts, C. N. & Woeginger, G. J. (1998). A review of machine scheduling: Complexity, algorithms and approximability. In D.-Z. Du & P. M. Pardalos (Eds.), *Handbook of combinatorial optimization* (pp. 21–169).
- Christofides, N., Alvarez-Valdes, R. & Tamarit, J. (1987). Project scheduling with resource constraints: a branch and bound approach. *Eur. J. Oper. Res.*, 29(3), 262–273.
- Crastan, V. (2012). Elektrische Energieversorgung 2: Energie- und Elektrizitätswirtschaft, Kraftwerktechnik und alternative Stromversorgung. Springer-Verlag.
- Dauzère-Pérès, S., Roux, W. & Lasserre, J.-B. (1998). Multi-resource shop scheduling with resource-flexibility. *European Journal of Operational Research*, 107, 289–305.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). (2012). Integration der erneuerbaren Energien in den deutsch-europäischen Strommarkt. Berlin.
- Dobner, M. (2014). Automated Guided Vehicles - In the past exotic, today reliable, cost-effective and environmentally friendly. In *Proceedings of the TOC Europe 2014*. London, UK.
- Domschke, W. & Drexl, A. (1990). *Einführung in Operations Research*. Berlin: Springer-Verlag.
- Domschke, W., Voß, S. & Scholl, A. (2013). *Produktionsplanung: Ablauforganisatorische Aspekte* (2. überarb.). Springer-Verlag.
- Ebben, M. (2001). Logistic Control In Automated Transportation Networks. Universität Twente.
- Erschler, J. & Lopez, P. (1990). Energy-based approach for task scheduling under time and resources constraints. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Project Management and Scheduling* (pp. 115–121). Compiègne, France.
- ETG Task Force Energiespeicher. (2008). VDE-Studie Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger. Frankfurt am Main, DE.
- ETG Task Force SmartDistribution. (2008). Smart Distribution 2020: virtuelle Kraftwerke in Verteilungsnetzen: Technische, regulatorische und kommerzielle Rahmenbedingungen. Frankfurt am Main, DE: VDE.
- Focacci, F., Nuijten, W. & Laborie, P. (2000). Solving Scheduling Problems with Setup Times and Alternative Ressources. In *Proceedings of the 4th International Conference on AI Planning*.
- Gendreau, M. & Potvin, J.-Y. (Eds.). (2010). *Handbook of Metaheuristics*. Boston, MA: Springer US.
- Giuntoli, M. & Poli, D. (2013). Optimized thermal and electrical scheduling of a large scale virtual power plant in the presence of energy storages. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(2), 942–955.
- Gollmer, R., Möller, A., Römisch, W., Schultz, R., Schwarzbach, G. & Thomas, J. (1997). Optimale Blockauswahl bei der Kraftwerkseinsatzplanung. *VDI Berichte*, 71–85.
- Graeber, D. R. (2014). *Handel mit Strom aus erneuerbaren Energien*. Springer-Verlag.
- Graham, R. L., Lawler, E. L., Lenstra, J. K. & Kan, a. H. G. R. (1979). Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: a Survey. *Annals of Discrete Mathematics*.
- Günther, H.-O. & Kim, K. H. (2005). *Container Terminals and Automated Transport Systems: Logistics Control Issues and Quantitative Decision Support*. Springer Science & Business Media.
- Haasis, H.-D. & Kramer, H. (2010). *Maritime Wirtschaft - Theorie, Empirie Und Politik: Festschrift Zum 65. Geburtstag Von Manfred Zachcial*. Peter Lang.

- Haubrich, H.-J. (2010). Gutachten zur Dimensionierung des Regelleistungsbedarfs unter dem Netzregelverbund. Bonn.
- Herrmann, J. W. (2006). *Handbook of Production Scheduling*. Springer New York.
- Herroelen, W. (2005). Project scheduling - Theory and practice. *Production and Operations Management*, 14(4), 413–432.
- HHLA Container-Terminal Altenwerder GmbH. (2011, June 8). New model of Gottwald battery-driven container AGV begins operation at Hamburg. *Port Technology International*.
- Horstmann, K.-P. & Cieslarczyk, M. (Eds.). (2006). *Energiehandel: Ein Praxishandbuch*. Heymanns Verlag GmbH.
- Huguet, M. & Lopez, P. (2000). Mixed Task Scheduling and Resource Allocation Problems. In *Proceedings of 2nd International Workshop CP-AI-OR00* (pp. 71–79). Paderborn, DE.
- Ibaraki, T. & Katoh, N. (1989). *Resource Allocation Problems: Algorithmic Approaches*. The MIT Press.
- Institut für Seeverkehrswirtschaft und Logistik. (2013). Containerumschlagpotenzial Hafen Hamburg – Neujustierung des Prognosekorridors unter Berücksichtigung aktueller Entwicklungen. Bremen.
- Institut für Seeverkehrswirtschaft und Logistik, IHS Global Insight Deutschland GmbH, & Raven Trading. (2010). *Prognose des Umschlagpotenzials des Hamburger Hafens für die Jahre 2015, 2020 und 2025*. Bremen.
- Kamper, A. (2010). *Dezentrales Lastmanagement zum Ausgleich kurzfristiger Abweichungen im Stromnetz*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Kasiske, F. (2013). Container Handling in Panel III : Terminal Technology – Not Just for Containers anymore. Vancouver, BC.
- Kawakami, T. & Takata, S. (2012). Battery Life Cycle Management for Automatic Guided Vehicle Systems. In M. Matsumoto, Y. Umeda, K. Masui, & S. Fukushige (Eds.), *Proceedings of EcoDesign 2011: 7th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing* (pp. 403–408). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Kellenbrink, C. (2014). *Ressourcenbeschränkte Projektplanung für flexible Projekte*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Kemme, N. (2013). Container-Terminal Logistics. In *Design and Operation of Automated Container Storage Systems* (pp. 9–52). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Kempton, W. & Tomić, J. (2005). Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. *Journal of Power Sources*, 144(1), 280–294.
- Kim, K. H. & Bae, J. W. (2004). A Look-Ahead Dispatching Method for Automated Guided Vehicles in Automated Port Container Terminals. *Transportation Science*, 38(2), 224–234.
- Kolisch, R. & Hartmann, S. (2006). Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: an update. *Eur. J. Oper. Res.*, 174(1), 23–27.
- Kuhn, H. (1990). *Einlastungsplanung von flexiblen Fertigungssystemen*. Physica Verlag.
- Lalik, B. (2011). Energieeffiziente Antriebsstränge für Schwerlastfahrzeuge. In M. Geimer & P.-M. Synek (Eds.), *Tagungsband der 3. Fachtagung Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen* (pp. 73–84). Karlsruhe, DE: KIT Scientific Publishing.
- Lazic, M. B. (2006). Is the Semi-Automated or Automated Rail Mounted Gantry Operation a Green Terminal? In *Proceedings of the 2006 Facilities Seminar*. Jacksonville, FL, US.
- Li, Q., Choi, S. S., Yuan, Y. & Yao, D. L. (2011). On the Determination of Battery Energy Storage Capacity and Short-Term Power Dispatch of a Wind Farm. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2(2), 148–158.
- Mackensen, R., Rohrig, K. & Emanuel, H. (2008). *Das regenerative Kombikraftwerk*.
- McHaney, R. (1995). Modelling battery constraints in discrete event automated guided vehicle simulations. *International Journal of Production Research*.
- Meier, L. H. (2008). Planung in Container-Terminals. In *Koordination interdependenter Planungssysteme in der Logistik* (pp. 61–139). Wiesbaden: Gabler Wissenschaftsverlage.

- Mohamed, Z. M. & Bernardo, J. J. (1997). Tool planning models for flexible manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, 103(96), 497–514.
- Nabe, C., Beyer, C., Brodersen, N., Schäffler, H., Adam, D., Heinemann, C., ... Mühe, S. (2009). Einführung von lastvariablen und zeitvariablen Tarifen.
- Neubarth, J., Woll, O., Weber, C. & Gerecht, M. (2006). Beeinflussung der Spotmarktpreise durch Windstromerzeugung. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 56(7), 42–45.
- Neumann, K. & Schwindt, C. (2003). Project scheduling with inventory constraints. *Mathematical Methods of Operations Research (ZOR)*, 56(3), 513–533.
- Nikonowicz, L. B. & Milewski, J. (2012). Virtual Power Plants-general review: structure, application and optimization. *Journal of Power Technologies*, 92(3), 135–149.
- Nottrott, A., Kleissl, J. & Washom, B. (2013). Energy dispatch schedule optimization and cost benefit analysis for grid-connected, photovoltaic-battery storage systems. *Renewable Energy*, 55, 230–240.
- Novas, J. M. & Henning, G. P. (2014). Integrated scheduling of resource-constrained flexible manufacturing systems using constraint programming. *Expert Systems with Applications*, 41, 2286–2299.
- OECD. (2012). Strategic Transport Infrastructure Needs to 2030. OECD Publishing.
- Padhy, N. P. (2004). Unit commitment-a bibliographical survey. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2), 1196–1205.
- Peffer, K., Tuunanen, T., Gengler, C. E., Rossi, M., Hui, W., Virtanen, V. & Bragge, J. (2006). The Design Science Research Process: A Model for Producing and Presenting Information Systems Research. In *Proceedings of 2006 DESRIST*. Claremont, CA.
- Pinedo, M. L. (2012). Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. Springer.
- Pokharel, B. K., Shrestha, G. B., Lie, T. T. & Fleten, S.-E. (2005). Price based unit commitment for generating companies in deregulated markets. In *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005* (pp. 428–433 Vol. 1).
- von Roon, S. & Gobmaier, T. (2010). Demand Response in der Industrie - Status und Potenziale in Deutschland. Response.
- Sauer, J. (2004). Intelligente Ablaufplanung in lokalen und verteilten Anwendungsszenarien. Reihe Wirtschaftsinformatik. Vieweg+Teubner Verlag.
- Schneider, F., Klabjan, D. & Thonemann, U. W. (2013). Incorporating Demand Response with Load Shifting into Stochastic Unit Commitment. *SSRN Electronic Journal*.
- Schrecker, A. (2000). Planung und Steuerung Fahrerloser Transportsysteme: Ansätze zur Unterstützung der Systemgestaltung. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Schwab, A. J. (2006). Elektroenergiesysteme: Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie (German Edition). Springer.
- Scott, J. (2012, June). Trends in marine terminal automation. *Port Technology International*, 82–85.
- Servatius, H., Schneidewind, U. & Rohlfing, D. (2011). *Smart Energy: Wandel zu einem nachhaltigen Energiesystem*. Springer.
- Shahidehpour, M., Yamin, H. & Li, Z. (2008). Market Operations in Electric Power Systems: Forecasting, Scheduling and Risk Management (1st ed.). Wiley-IEEE Press.
- Shaw, J. J., Gendron, R. F. & Bertsekas, D. P. (1985). Optimal Scheduling Of Large Hydrothermal Power Systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-104*.
- Sonnenschein, M., Rapp, B. & Bremer, J. (2010). Demand Side Management und Demand Response. In *Handbuch Energiemanagement* (Vol. 3, p. 19). Heidelberg.
- Sprecher, A., Hartmann, S. & Drexl, A. (1997). An exact algorithm for project scheduling with multiple modes. *OR Spectrum*, 19, 195–203.
- Stahlbock, R. & Voß, S. (2007). Operations research at container terminals: a literature update. *OR Spectrum*, 30(1), 1–52.
- Steck, M. H. E. (2013). Entwicklung und Bewertung von Algorithmen zur Einsatzplanerstellung virtueller Kraftwerke. Technische Universität München.

- Stecke, K. E. (1983). Formulation and Solution of Nonlinear Integer Production Planning Problems for Flexible Manufacturing Systems. *Management Science*, 29(3), 273–288.
- Ströbele, W., Pfaffenberger, W. & Heuterkes, M. (2012). *Energiewirtschaft: Einführung in Theorie und Politik*. Oldenbourg Verlag.
- Teleke, S., Baran, M. E., Huang, A. Q., Bhattacharya, S. & Anderson, L. (2009). Control Strategies for Battery Energy Storage for Wind Farm Dispatching. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(3), 725–732.
- Tempelmeier, H. & Kuhn, H. (1992). OR-Modelle zur Planung flexibler Fertigungssysteme Ein Überblick. *OR Spektrum*, 14, 177–192.
- Udhayakumar, P. & Kumanan, S. (2010). Task scheduling of AGV in FMS using non-traditional optimization techniques. *International Journal of Simulation Modelling*, 9(1), 28–39.
- Ullrich, G. (2014). Fahrerlose Transportsysteme: Eine Fibel - mit Praxisanwendungen - zur Technik - für die Planung. Springer-Verlag.
- Van Dommelen, F. (2012, August). Upgrading to automated guided vehicles. *Port Technology International*, 70–71.
- Van Harten, A., Van der Heijden, M. C. & Ebben, M. J. R. (1999). *Teilprojektbericht OLS: Batteriemangement und Energiestudien*.
- VDE. (2012, June). VDE-Studie: Demand Side Integration – Lastverschiebungspotenziale in Deutschland. Energietechnische Gesellschaft im VDE.
- Viole, H. (2014, December). Neue Vermarktungsmöglichkeiten und Geschäftsmodelle – Womit verdienen Stadtwerke in Zukunft Geld? *Kursbuch Stadtwerke*, 11–13.
- Wieschemann, A. (2014). Battery AGV: A Zero-emission, Low-cost Alternative. In *Proceedings of the TOC Asia 2014*. Singapore, SG.
- Wieschemann, A. & Wulff, B. (2011). Abschlussbericht zum Vorhaben Forschung und Entwicklung batteriebetriebener Schwerlastfahrzeuge (AGV) und deren Erprobung in einem Feldversuch im Container-Terminal Altenwerder in Hamburg. Düsseldorf.
- Woldt, T. (2008). Beitrag zur Energiesystemintegration dezentraler Energiewandlungsanlagen mit besonderer Berücksichtigung kleiner Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in kommunalen Versorgungsstrukturen. Brandenburgische Technische Universität Cottbus.
- Wood, A. J., Wollenberg, B. F. & Sheblé, G. B. (2013). *Power Generation, Operation and Control*. Wiley.
- Wook, B. J. & Hwan, K. K. (2000). A pooled dispatching strategy for automated guided vehicles in port container terminals.
- Xu, J., Xu, X. & Xie, S. Q. (2011). Recent developments in Dual Resource Constrained (DRC) system research. *European Journal of Operational Research*, 215(2), 309–318.
- Yoon, Y. & Kim, Y.-H. (2014). Charge scheduling of an energy storage system under time-of-use pricing and a demand charge. *TheScientificWorldJournal*, 2014, 937329.
- Zeilinger, F. X. & Einfalt, A. (2011). Simulation der Auswirkung von Demand Side Management auf die Leistungsaufnahme von Haushalten. 7. *Internationale Energiewirtschaftstagung 2011*.
- Zhang, L., Zhao, J., Han, X. & Niu, L. (2005). Day-ahead Generation Scheduling with Demand Response. In *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES* (pp. 1–4).
- Zimmermann, W. & Stache, U. (2001). *Operations-Research: quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung*. Oldenbourg Verlag.

STICHWORTVERZEICHNIS

Ablaufplankonstruktion 129-137, 191-214

Ablaufplanmodifikation

121-129, 144-154, 191, 208-214

Dämpfungsprinzip 156-163

Einklang von Batterieeinsatzaktivitäten 149-155

Einpassung einer Batterieeinsatzaktivität 149

Geschlossenheit des Batterieeinsatzes 149-150

Kann/Ist-Wert 144-165

Ladezustandsveränderung 144-165

Modifikationsansatz 146-147

Modifikationsschablone 144-146

Muss/Soll-Wert 144-165

Präzedenzgraph 121-129, 144-163, 192

Synchronisationsbeziehung 127, 149-154

Synchronitätsbeziehung

126-127, 144-153, 192

Vorgänger-Nachfolger-Beziehung

48, 123-129, 144-154, 192

Rückwärtstraversierung 154

Verrücken eines Batterietausches

129, 144-146, 191-192, 208

Vorwärtstraversierung 148, 152

Zeitliche Veränderung

5, 12, 60, 129, 144-165, 197

Zwischenstand 144-155

Ablaufplanung

14-17, 31-35, 41-60, 139-142, 200-214

Batterieeinsatzplanung 8, 87

Ablaufplanverbesserung 208-209

Erweiterte Nachbarschaft 192

Hauptpfad 49, 197-199

Nachbarschaftsstruktur 49, 190-192

Nahe Nachbarschaft 192

Nebenpfade 49, 198-199

Abwägung 13, 128-129, 171, 204-213

Arten der Zerlegung von Angeboten

171-190, 213-218

Dependenzgraph 184-190, 213-214

Umverteilung von Ladeleistung 128, 171-183

Varianten für die Umverteilung 52, 176-185

Batteriewechselkonzept 50-53

Batterietausch 8-9, 24, 40-44, 51-62, 76-79,

91-100, 126-136, 145-146, 191-200

Batteriewechselstation 131-135

Feinplanung 137-142, 171, 204-209

Ausprägung von Umschaltpotenzial 140

Festlegung von Ladeleistung 8, 96, 121-128,

137-140, 156, 172-184, 195-196

Ladeverlauf 8-13, 100-105, 113-123, 139-143,

157, 173-178

Flexibler Verbraucher

Aggregator 108, 200

Demand Side Integration 5

Demand Side Management 5

Flexibilität 7-16, 40, 51, 64, 104-108, 165

Nachfragesteuerung 100, 115

Subaggregation 16, 50

Gesamtergebnis

Minutenreserveerlös

129, 173-176, 194-197, 204-213

Strombezugskosten 13-16, 59-61, 120-137,

171-213

Grobplanung 8, 87, 129-137

Batteriewechselaktivität 122-155

Einsatzsequenz 9, 90-91, 121-151, 166-178

Einsatzzyklus 90-93, 125-133

Entladeteilzyklus 7

Ladeteilzyklus 7

Fahrbetrieb

9-10, 24, 35, 43-51, 98, 126-136, 162, 191-199

Fahrzeugausstattung 8-9, 43-45, 71, 97-98,

124-127, 135, 153, 164

Stationsaufenthalt 10-16, 44-54, 61-65, 96-119,

123-143, 153-183, 191-196, 214

Transportlast 7-8, 15-18, 24, 35-44, 50-52, 71,

120-136, 163, 193-202

Kraftwerkeinsatzplanung 1-2, 50-59

Anlagenverbund 54-57

Virtuelles Kraftwerk 30, 201

Minutenreserveangebot 13-16, 59-61,

108-128, 156-180, 193-204, 213-214

Angebotszweck 2, 3, 8, 12, 108, 141, 156, 166,

169, 170, 172, 173, 174, 175, 177, 204

Elementarbaustein 12, 165, 166, 167, 168, 169,

170, 171

Kompensationszweck

12, 108-116, 141, 156-166, 169-177

Schnipsel
12-13, 109, 119, 140, 156-166, 170-184
Stückelung 128-129, 165-190, 204-209

Minutenreservemarkt 5-17, 28-30, 50-66,
108-109, 120, 137-140, 193, 205-206, 213

Optimierungsgesichtspunkt
193, 200, 206, 208, 213

Problemlösungsmodul 130, 137, 165, 171

Ressourcenallokation 17, 31-32, 45

Stromgroßhandel 1-2, 14-17, 27, 50-61, 120,
137-139, 193, 204-205

Tagaktueller Handel 2, 28, 201

Vortagshandel 2, 28, 56, 68-69, 139, 192