

EIN CONTAINERTERMINAL ALS FLEXIBLER VERBRAUCHER: OPTIMIERUNG DER LADEPROZESSE VON ELEKTROFAHRZEUGEN IM SCHWERLASTVERKEHR

Serge Runge, Norman Ihle, Christoph Gutschi, Karlheinz Gödderz

Universität Oldenburg, serge.runge@efzn.de

Universität Oldenburg, norman.ihle@uni-oldenburg.de

cyberGRID GmbH, Klosterneuburg, cg@cyber-grid.com

Vattenfall Europe IS GmbH, Hamburg, karlheinz.goedderz@vattenfall.de

Kurzfassung: In diesem Beitrag wird der Betrieb eines Containerterminals mit batterieelektrisch angetriebenen Transportfahrzeugen behandelt. Durch die Anwendung eines Batteriewechselkonzepts lassen sich die Ladeprozesse der Wechselbatterien von den Transportprozessen der Fahrzeuge entkoppeln. Es zeigt sich ein quasi-stationäres Batteriespeichervolumen, für welches sich mit geeigneten Vorhersage- und Planungswerkzeugen ein Zweitnutzen erschließen lässt. Während ihrer Stationsaufenthalte können die Wechselbatterien in nennenswertem Umfang einem Angebot von Regelleistung und auf Abruf auch der Erbringung von Regelenergie dienen. Dabei muss die Konditionierung der Batteriespeichersysteme als ein integraler Bestandteil der Planung der Energiebereitstellung für das sie umgebende geschlossene Transportsystem aufgegriffen werden. In diesem Beitrag werden die Grundzüge eines heuristischen Planungsverfahrens und die Ergebnisse eines Ganzjahresvergleichs unterschiedlicher Optimierungsgesichtspunkte vorgestellt.

Keywords: Demand-Side-Management, Flexible Consumer, Industrial Energy Management, Energy Scheduling, Unit Commitment

1 Rahmenbedingungen in einem Containerterminal

Viele Nutzfahrzeuge weisen Fahrprofile auf, bei denen eine Elektrifizierung des Antriebs erwogen werden kann. Insbesondere bei geschlossenen Transportsystemen finden sich nahezu optimale Bedingungen für den Einsatz von Fahrzeugen mit Elektromotoren. Dies ist daran festzumachen, dass die Fahrzeuge häufig halten und anfahren müssen und bei den Fahrzeugen zumeist nur moderate Endgeschwindigkeiten zugelassen werden. Ein Containerterminalbetrieb stellt zudem ein vorzügliches Gebiet für die Verwendung elektrischer Batteriespeichersysteme in den Fahrzeugen dar, da er sich durch regelmäßigen Fahrzeugeinsatz, geringe Nutzungskonflikte und hohe Tagesfahrleistungen auszeichnet. Zusätzlich können die Standorte der Batteriesysteme und ihre Ladezustandsentwicklung innerhalb des Transportareals sehr gut nachvollzogen werden, wodurch der Energiebereitstellungsprozess für die Elektrofahrzeuge planbar und steuerbar wird. Auf Basis einer Vorhersage für das Aufkommen von Transportaufträgen kann Aufschluss darüber gewonnen werden, wie viel elektrische Energie die Fahrzeuge zu welcher Zeit verbrauchen werden und wann diese über Ladeprozesse nachzuführen ist. Diese Vorhersagemöglichkeiten erlauben es zum Beispiel einem Containerterminalbetrieb, die

Batteriesysteme quasi als stationär zu behandeln und sie einer energiewirtschaftlich optimierenden Anlageneinsatzplanung hinzuzuziehen. Dennoch bleiben sie über den gesamten Planungszeitraum hinweg den vorherzusehenden Logistikanforderungen unterworfen und müssen vorrangig für das Erfüllen von Transportaufträgen zur Verfügung stehen.

2 Bewirtschaftung quasi-stationärer Batteriespeichersysteme

Das Projekt BESIC („Batterie-Elektrische Schwerlastfahrzeuge im Intelligenten Containerterminalbetrieb“) befasst sich mit der Planung der Betriebsabläufe zur Bewirtschaftung des Batteriespeichervolumens im wasserseitigen Horizontaltransportbereich eines maritimen Containerterminals unter Anwendung eines Batteriewechselkonzepts. Die Wechselbatterien sind in Abhängigkeit von einer voraussichtlichen Transportlast einen Tag im Voraus zu subaggrieren, um in der Ausrichtung auf die Kosten des Strombezugs und die Erlöse aus einem Angebot von Minutenreserve eine größtmögliche Senkung der Energiekosten herbeizuführen. Das Transportauftragsaufkommen kann anhand von Informationen über die eintreffenden Schiffe und die Anzahlen der zu importierenden und zu exportierenden Container bestimmt werden. Zur Indikation der Strombezugspreise werden die Ergebnisse der sogenannten Stundenkontrakte im Vortagshandel herangezogen; zur Einschätzung der Leistungspreise für den Minutenreservemarkt dienen anonymisierte Zuschlagsergebnisse einer Tagesausschreibung der Vorwoche.

Nach derzeitigem Stand der Automatisierung werden die batterie-elektrischen Fahrzeuge ab einem gewissen Reserveniveau des Ladezustands zu einem Batterietausch an die Ladestation beordert. Es ist nicht möglich, dem Erreichen des Reserveniveaus vorzugreifen und ein Fahrzeug vorweg für einen Batterietausch an die Station zu holen. Aus diesem Grund werden die Batterieeinsatzaktivitäten nach einfachen Prioritäts- und Auswahlregeln geplant, so dass der Fahrbetrieb und die Stationsaufenthalte der Wechselbatterien der

Automatisierung im Feld gerecht werden. Eine Besonderheit der daran anknüpfenden Subaggregationsaufgabe liegt in den zeitlichen Verfügbarkeitsrestriktionen der umlaufenden Batteriesysteme und den Restriktionen auf die Speicherstände beim Tausch einer Wechselbatterie an der Ladestation. Am Ende eines Stationsaufenthalts muss eben so viel Ladungsmenge in der Wechselbatterie stecken, wie es daraufhin im Fahrbetrieb zum Erfüllen der Transportleistung bedarf.

In **Abbildung 1** wird an einem Beispiel erläutert, wie einem Abschaltpotenzial [1b] zum Angebots-/Erbringungszweck ein Zuschaltpotenzial [2b] zum Kompensationszweck in einem Angebot positiver

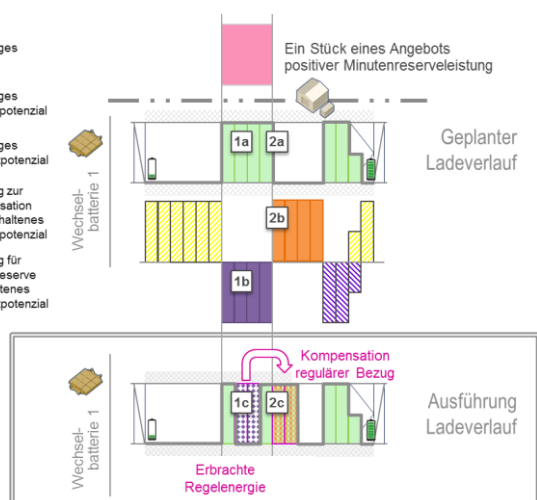


Abbildung 1: Flexibilität bei der Ausführung geplanter Ladeprozesse

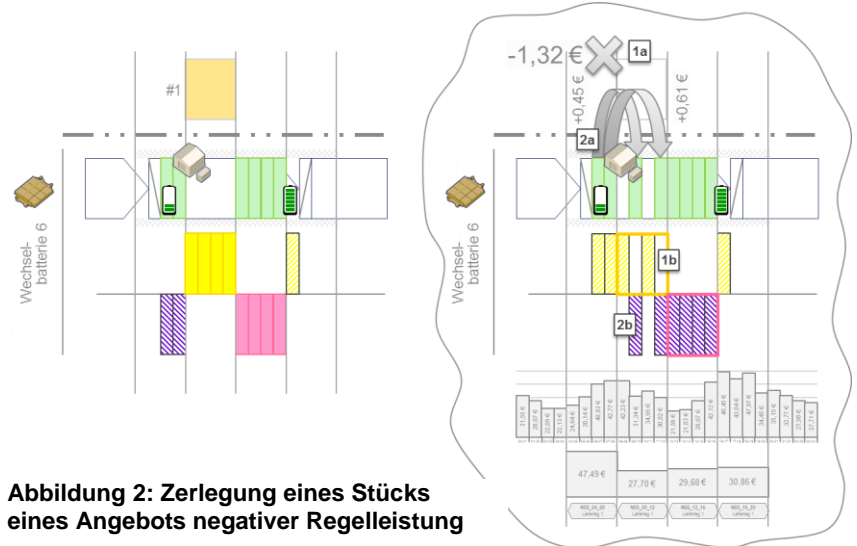
Regelleistung entgegen gestellt wird. Dieses Angebot geht komplett auf eine Wechselbatterie zurück, dessen Ladeverlauf flexibel festgelegt worden ist. Während diese in der betreffenden Produktperiode plangemäß [1a] geladen wird, kommt es bei der Ausführung

des Ladeverlaufs zu einem Abruf von positiver Regelenenergie. Dazu wird das reservierte Abschaltpotenzial [1b] ausgenutzt und das Laden der Wechselbatterie entgegen des geplanten Ladeverlaufs [1c] unterbrochen. Nachdem der Abruf beendet wurde, muss die aus der Unterbrechung herrührende Menge elektrischer Energie nachträglich geladen [2c] werden. Dazu wird das zu Kompensationszwecken reservierte Zuschaltpotenzial [2b] ausgenutzt und entgegen des geplanten Ladeverlaufs [2a] das Laden wieder aufgenommen.

Bei erstmaliger Festlegung des Ladeverlaufs kann zwar darauf abgezielt werden, die Leistungspreiserlöse für Minutenreserveangebote zu maximieren. Bei wechselnden Marktlagen muss dies jedoch nicht zwingend das bestmögliche energiewirtschaftliche Gesamtergebnis darstellen. Es ist also zwischen den Erlösen für das Angebot von Minutenreserve und den Kosten des Strombezugs abzuwägen. Wie in **Abbildung 2** dar-

gestellt, wird daher überprüft, ob gegenüber dem vorliegenden Planungsstand vom beabsichtigten Gebrauch von Zuschalt-/Abschaltpotenzial eines oder mehrerer Stücke von Minutenreserveangeboten abgesehen werden kann. Bei einer betrachteten Angebotszerlegung (Reservierung [1a] zum Angebotszweck würde aufgelöst) kann die dann ungebundene Festlegung von Ladeleistung für einen nächsten Planungsstand umverteilt werden, was zu veränderten Potenzialwerten [2b] führt. Eine Verbesserung des Gesamtergebnisses tritt ein, falls die Vergünstigung des Strombezugs [2a] im Ganzen die Erlösminderung [1a] überwiegt (im dargestellten Beispiel trifft dies nicht zu). Es wäre möglich, 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 2: Zerlegung eines Stücks eines Angebots negativer Regelleistung



3 Grundzüge eines heuristischen Verfahrens

In der Praxis gibt es derzeit keine Möglichkeit, den Energiebereitstellungsprozess für die Fahrzeuge in Verbindung mit prognostizierten Transportbedarfen und in Ausrichtung auf die Elektrizitätsmärkte durchgängig zu planen und zu steuern. Die Einsatzplanung für die Wechselbatterien in einem Containerterminalbetrieb wirft gegenüber dem Management von Transportsystemen oder eines Kraftwerksverbunds zusätzliche Anforderungen auf. Die integrierte Planungsproblemstellung weist eine hohe Entscheidungskomplexität auf und ist mit rein mathematischen Optimierungsmodellen (nachweislich mit einem OPL-Modell, kurz für Optimization Programming Language aus IBM CPLEX Studio) nicht in angemessener Zeit zu lösen. Darum ist im Rahmen des BESIC-Projekts ein heuristisches Lösungsverfahren konzipiert und umgesetzt worden.

Wie in **Abbildung 3** zu sehen ist, besteht der Lösungsansatz aus vier Problemlösungsmodulen. Er basiert im Wesentlichen auf der Generierung einer Startlösung und einer lokalen Suche im Lösungsraum. Bei der Ablaufplankonstruktion 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 \dot{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 ausdragen. 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.

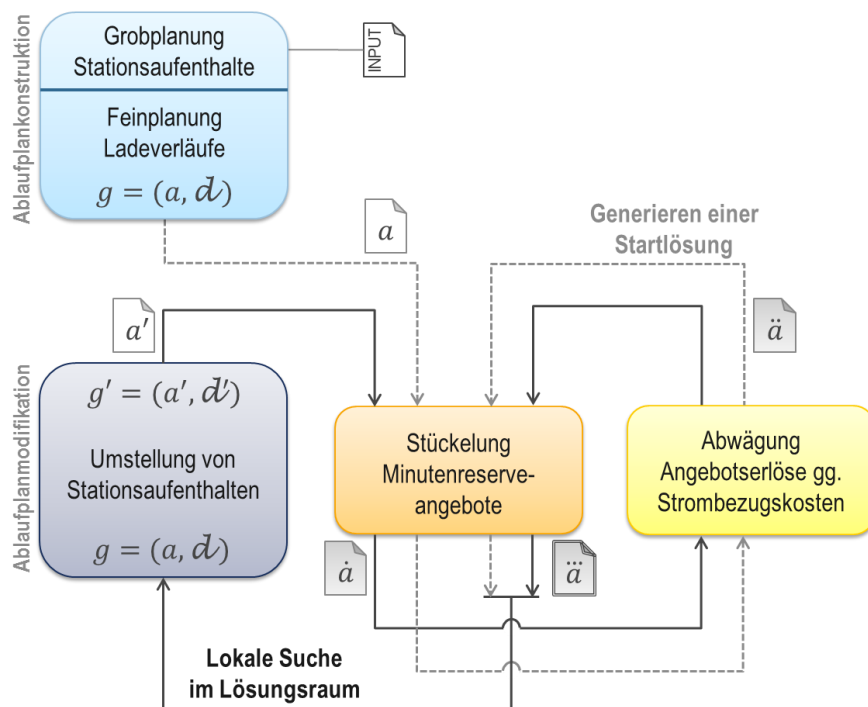


Abbildung 3 Übersicht der vier Problemlösungsmodule im heuristischen Lösungsverfahren

Im Weiteren wird versucht, ausgehend von einer Startlösung möglichst nah an eine Lösung mit optimalem Gesamtergebnis heranzukommen. Ein Übergang zu einer benachbarten Lösung sieht eine Umstellung von Batterieeinsatzaktivitäten wie beispielsweise das Verrücken eines Batterietausches vor. Es wird ein Präzedenzgraph \bar{d} für den Ablaufplan $a = \ddot{a}$ erstellt, mit dem zusammen er den anfänglichen Planungsstand $g = (a, \bar{d})$ 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 von zeitlichen Verschiebungen der Stationsaufenthalte der Wechselbatterie und der Anpassung des Ladeverlaufs einige Stücke von Minutenreserveangeboten auf der Strecke geblieben sein. Da die Einsatzaktivitäten untereinander weitläufig über Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen und Synchronitätsbeziehungen miteinander verknüpft sind, müssen beim Verschieben einer Batteriewechselaktivität praktisch immer weitere Einsatzaktivitäten zeitlich gedrängt oder ausgedehnt werden. Nachdem ein Stationsaufenthaltszeitraum für eine Wechselbatterie in dieser Weise verändert wurde, muss auch der Ladeverlauf darin gegebenenfalls reoptimierend neu eingestellt werden. Der modifizierte Ablaufplan $\tilde{a} = a'$ 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 \tilde{a} als Lösung beendet.

4 Prototypische Umsetzung

Im Rahmen des BESIC-Projekts ist in einem Containerterminalbetrieb eine Anwendungsumgebung für gesteuertes Laden eingerichtet und erprobt worden:

- 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 und koordiniert im Falle eines Abruf zur Erbringung von Regelenergie die Schalthandlungen gemäß der reservierten Zuschalt-/Abschaltpotenziale und übermittelt die zum Nachweis erforderlichen Messdaten nach außen.
- 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.

Es bietet sich an, die Erstellung eines Ablaufplans täglich wiederkehrend um 08:00 Uhr des Tags voraus anzustoßen, damit die Fristen des Wirk- und 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 vorentscheidend 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.

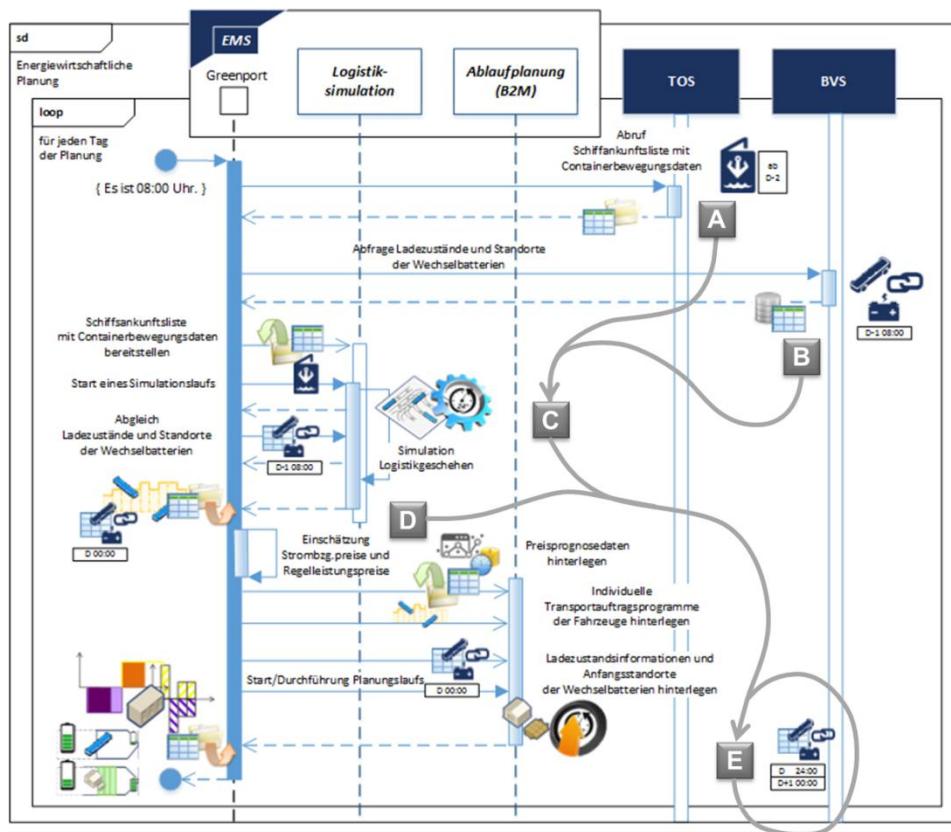


Abbildung 4 Sequenzdiagramm über die Ablaufplanerstellung mit Simulationsvorlauf in der Praxis

In **Abbildung 4** 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 das zugehörige Fahrzeug oder den Ladeplatz, 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 Realwelt 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.

5 Optimierungsgesichtspunkte im Ganzjahresvergleich

Das heuristische Planungsverfahren wurde am Anwendungsfallbeispiel eines deutschen Containerterminals getestet, der über eine Ausstattung von sieben Transportfahrzeuge, sieben Ladestellen und vierzehn Wechselbatterien verfügen mag.

In diesem Anwendungsfallbeispiel sind folgende Optimierungsgesichtspunkte zu untersuchen:

(verwendete Problemlösungsmodule, siehe dazu Abbildung 3:

■ Grob-/Feinplanung, ■ Stückelung Minutenreserve, ■ Abwägung Minutenrs. gg. Strombzgskosten)

■ *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 Wirkleistungsmarkt*

Bei einem zweiten Gesichtspunkt richtet sich die Ablaufplanung allein auf den Wirkleistungsmarkt aus. Dabei wird die Ladeleistung in den Zeitscheiben festgelegt, für welche die niedrigsten Strombezugspreise prognostiziert worden 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 Strombezugskosten zu erwarten. Auch beim bezugskostenoptimierten Laden ist es prinzipiell möglich, Minutenreserve anzubieten („bezugskostenoptimiert+“ ■■).

■ *einfältige Ausrichtung auf 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.

■ *zwiefältige Ausrichtung auf Wirk- und 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“ ■■■).

Bei einem rückwirkenden Vergleich für das Jahr 2013 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. Aus diesem Grund wird Tag für Tag eine gleiche Menge an elektrischer Energie in die Wechselbatterien nachgeführt, obwohl verschiedene Optimierungsgesichtspunkte zum Tragen kommen. Über das gesamte Jahr sind so 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 Stundenkontrakte herangezogen. Diese machen wohlgerne 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 1** sind die Planungsergebnisse der verschiedenen Optimierungsgesichtspunkte 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 Wirkleistungsmarkts 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 Strombezugs 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 Wirkleistungsmarkt hin optimiert wird, fallen eher zufällig mit 501,82 EUR überraschend hohe Minutenreserveerlöse ab; damit sind unter diesem Gesichtspunkt 27 % des Referenzwerts zu erreichen. Nach Abwägung der Strombezugskosten sind mit 1.212,70 EUR immerhin vergleichsweise hohe Minutenreserveerlöse zu machen.

Tabelle 1: Gesamtübersicht Planungsergebnisse

	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 Wirk- und Regelleistungsmarkt birgt im gewählten Anwendungsfallbeispiel eine Ersparnis von 0,94 Cent pro bezogener Kilowattstunde Strom. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die preislichen Konditionen in **Tabelle 1** nicht den tatsächlichen Stromlieferpreisen eines Containerterminalbetriebs in Deutschland entsprechen. Sie geben lediglich den auf Basis des Stromgroßhandels variablen Preisanteil wieder.