



Fakultät II – Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften

Department für Informatik

Simulationsbasierte Energiebedarfsprognose in Seehafen Container-Terminals

Dissertation zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

Vorgelegt von: Nico Grundmeier, M.Ed.

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn

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

Datum der Disputation 13. Juni 2016

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn, der mich vor und während des Entstehungsprozesses dieser Arbeit durchgehend mit konstruktiven Vorschlägen und Ideen unterstützt hat. Des Weiteren bedanke ich mich bei Prof. Dr. Dr. h. c. Appelrath und Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff für die Begutachtung dieser Arbeit.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen Verwandten, Freunden und Bekannten, die mein Jamern und Klagen jahrelang ertragen haben und mir trotzdem immer mit Rat und Tat zur Seite standen und mir auch in schwierigen Zeiten immer wieder neuen Zuspruch gegeben haben. Ihr könnt euch nicht vorstellen, wie wichtig dieser Rückhalt für mich war.

Den mit Abstand wichtigsten Beitrag hat meine Familie mit ihrer Unterstützung während der Anfertigung dieser Dissertation geleistet. Meinen Eltern danke ich dafür, dass sie mir ein Studium ermöglicht haben, wodurch ich überhaupt erst in die Lage versetzt wurde, diese Dissertation anzufertigen. Meiner Frau Vanessa danke ich für die schier unerschöpfliche Geduld und ihren fortwährenden Zuspruch. Ihre motivierenden Worte haben mich immer wieder neu angetrieben. Meinem Sohn Noah danke ich, da er mir mit seiner Geburt während der Entstehung dieser Arbeit neue positive Impulse gegeben hat. Ohne ihre liebevolle Fürsorge wäre die Anfertigung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Abstract

Bei Seehafen Container-Terminals gibt es einen deutlichen Trend zur Elektrifizierung von schwerem Gerät, welches für Containerumschläge und deren Transport zuständig ist. Als Beispiel sind in der jüngeren Vergangenheit neben diesel-betriebenen Transportfahrzeugen auch batterie-elektrisch betriebene Fahrzeuge für den Einsatz im Container-Terminal entwickelt worden. Weltweit war das HHLA Container-Terminal Altenwerder (CTA) in Hamburg das erste Terminal, welches Prototypen eines Transportfahrzeugs mit einem voll-elektrischen Antriebsstrang eingesetzt hat (Wieschemann und Wulff 2011). Kurze Zeit später führte das APM Terminal Maasvlakte 2 (M-2) in Rotterdam als erster Container-Terminal überhaupt eine Bestellung von 37 voll elektrischen Lift-AGVs durch („APM Terminals’ Maasvlakte II to Pioneer Container Automation Technology“ 2012). Mit der Einführung solcher Elektrofahrzeugflotten im Terminalbetrieb und der Liberalisierung des Energiemarkts eröffnen sich neue Möglichkeiten für das Energiemanagement eines Terminals (Wawer 2007) (Runge u. a. 2014). Dies kann z.B. durch die Nutzung eines Batteriewechselkonzepts erreicht werden, bei welchem Wechselbatterien bezugspreisoptimiert geladen oder Lastverschiebungspotenziale vermarktet werden. Um als Akteur am Strommarkt agieren zu können und somit von Energiekostensenkungen zu profitieren, ist es notwendig, Kenntnisse über den eigenen Energieverbrauch zu besitzen und die zukünftige Leistungsaufnahme über einen kurzfristigen Zeitraum zu prognostizieren.

In dieser Arbeit wird ein integriertes Simulationsmodell vorgestellt, welches die kombinierte Betrachtung von Logistikprozessen und Energieverbrauchsprozessen zum Ziel hat. Es wird untersucht, ob eine Simulation eine geeignete Methode ist, eine Prognose der Leistungsaufnahme in einem Container-Terminal anzufertigen und somit eine Interaktion mit dem Energiemarkt zu ermöglichen. Ein solches Modell kann neben der elektrischen Lastgangprognose eines Container-Terminals aber auch dazu genutzt werden, die elektrische Leistungsaufnahme allgemein in multimodalen Umschlagsanlagen vorherzusagen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	xi
1. Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielstellung	4
1.3 Anforderungen	5
1.4 Aufbau der Arbeit	9
2. Container-Terminals.....	11
2.1 Aufbau eines Container-Terminals	11
2.2 Elektrische Verbraucher im Terminal	19
2.2.1 Containerkräne.....	20
2.2.2 Kühlcontainer	23
2.2.3 Allgemeine Verbraucher	25
2.2.4 Transportfahrzeugversorgung.....	25
2.2.4.1 Batteriewechselstation	25
2.2.4.2 Ladesäulen	27
2.2.4.3 Induktives Laden	27
2.2.4.4 Batterietypen.....	28
2.3 Planungsprobleme in Seehafen Container-Terminals	29
2.3.1 Liegeplatzplanung	30
2.3.2 Containerbrückeneinsatzplanung.....	30
2.3.3 Stau- und Entladeplanung.....	30
2.3.4 Transportplanung (Vehicle Dispatching Problem - VDP)	31
2.3.5 Container Stellplatzzuweisung	31
2.3.6 Batteriewechsel- und Ladeplanung	32
2.3.7 Kombinierte Planungsprobleme	33
3. Geschäftsanwendungsfälle durch Demand Side Integration	35
3.1 Netzentgeltbefreiung.....	35
3.2 Lastgangvoranmeldung.....	36

3.3	Lastgangglättung	36
3.4	Bereitstellung von Regelenergie	36
3.5	Handel am Day-Ahead Markt (Bezugspreisoptimiertes Laden)	38
3.6	Zusammenfassung	39
4.	Prognose elektrischer Leistungsaufnahme	41
4.1	Gütemaße zur Bewertung eine Prognose.....	43
4.2	Prognosemethoden.....	46
4.2.1	Vergleichstagverfahren	46
4.2.2	Zeitreihenanalyse	48
4.2.3	Künstliche Neuronale Netze.....	49
4.2.4	Simulation	52
4.3	Zusammenfassung	56
5.	Modellierung und Simulation von multimodalen Umschlagsanlagen	59
5.1	Logistik.....	59
5.2	Ansatz von Xin et. Al 2014	62
5.3	Ansatz von Le 2012.....	63
5.4	Ansatz von Kaffka 2015	64
5.5	Zusammenfassung	65
6.	Modellierung und Simulation von Leistungsaufnahmeprozessen.....	67
6.1	Ansatz von Christiansen et al.	68
6.2	Ansatz von Soldinger und Petku	70
6.3	Ansatz von Wolff et al.	71
6.4	Ansatz von Schlegel et al.....	73
6.5	Ansatz von Kulus et al.....	76
6.6	Zusammenfassung	77
7.	Simulationsbasierte Energiebedarfsprognose	79

7.1	Zustandsbasierte Abbildung von Energieverbrauchsprozessen in ereignisdiskreten Simulationen (ZAES)	83
7.1.1	Zusammenfassung	91
7.2	Power Consumption Terminal Modell	92
7.2.1	Entitäten des PCT-Modells	92
7.2.1.1	Allgemeiner Aufbau des Modells	92
7.2.1.2	Allgemeine Entitäten	93
7.2.1.3	Schiffsankunftsbereich	98
7.2.1.4	Containerbrücken.....	100
7.2.1.5	LiftingDevice.....	102
7.2.1.6	Zwei-Katz-Containerbrücke	103
7.2.1.7	Lagerbereich	105
7.2.1.8	Horizontaltransportbereich	106
7.2.1.9	Hinterlandanbindung	110
7.3	Prozessbeschreibungen	111
7.3.1	Ablauf der Simulation	111
7.3.2	An und Abtransport der Container in der Hinterlandanbindung	114
7.3.3	Durchführung von Transportaufträgen	115
7.3.4	Ein- und Auslagerung von Kühlcontainern Kühlcontainer	117
7.3.5	Durchführung eines Batteriewechsels	118
7.3.6	Beleuchtung.....	119
7.3.7	Zusammenfassung	119
7.4	Greenport	120
7.4.1	Aufbau Greenport	120
7.4.2	Verbraucher.....	121
7.4.2.1	Containerbrücken und Portalkräne	121
7.4.3	Prozesse Greenport	122
7.4.3.1	Create Containership	122
7.4.4	Ablauf der Simulation	124
7.4.4.1	Initialisierung der Simulation	125
7.4.4.2	Logistiksimulation Vorlauf 1	127
7.4.4.3	Synchronisation Livedaten	129
7.4.4.4	Logistiksimulation Vorlauf 2	130
7.4.4.5	Logistiksimulation Prognose	130
7.4.5	Zusammenfassung	131
8.	Evaluierung	133

8.1	Modell des Container-Terminal Altenwerder	133
8.1.1	Aufbau	133
8.1.2	Energieverbrauchsdaten	135
8.1.3	An und Abtransport der Container in der Hinterlandanbindung	141
8.1.3.1	Bestimmung der Basisleistungsaufnahme	143
8.2	Studie 1: Gesamtenergiebedarfsprognose	143
8.2.1	Gesamtenergiebedarfsprognose 2013	145
8.2.2	Prognoseauswertung der Jahre 2011 bis 2013	150
8.2.3	Prognose des Energieverbrauchs von Feiertagen	152
8.2.4	Verwendung von prognostizierten Schiffsankunftszeiten	156
8.2.5	Zusammenfassung	160
8.3	Energiebedarfsprognose der BWS	160
8.3.1	Zusammenfassung	165
8.4	Evaluationsbewertung	165
9.	Zusammenfassung und Ausblick	169
9.1	Zusammenfassung	169
9.2	Ausblick	170
10.	Literaturverzeichnis	174
11.	Glossar	183

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit.....	9
Abbildung 2: Funktionsbereiche eines Container-Terminals.....	12
Abbildung 3: Aufbau eines Containerschiffs	13
Abbildung 4: Schematische Aufbau einer 1-Katz-Containerbrücke.....	14
Abbildung 5: AGV	17
Abbildung 6: Schematischer Aufbaue eines Blocklagers	18
Abbildung 7: Durchschnittliche Leistungsaufnahme in einem Container-Terminal aufgeteilt nach Verbrauchsgruppen (Hui u. a. 2014)	20
Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der Leistungsaufnahme eines Portalkrans bei einer Containerumschlagoperation. (Adaptiert nach (Le 2012)).....	21
Abbildung 9: Containerumschlag im Containerhafen.....	23
Abbildung 10: Integral-Kühlcontainer mit externem Kühlaggregat (Horn 2015)	24
Abbildung 11: Schematischer Aufbau einer Batteriewechselstation.....	26
Abbildung 12: Beispiel eins Stauplans übermittelt durch eine Reederei (Adaptiert nach (Steenken, Winter, und Zimmermann 2001)).....	31
Abbildung 13: Exemplarische Batterieaufenthaltszeiten in einer Batteriewechselstation.....	32
Abbildung 14: Lastverschiebungspotenzial bei einer Batterieladung in einer Batteriewechselstation	38
Abbildung 15: Typischer Preisverlauf im Day-Ahead-Markt (nach („Next Kraftwerke“ 2015))	38
Abbildung 16: Vorgehen zur Optimierung von Batteriewechselzeitpunkten (Ihle u. a. 2014)	39
Abbildung 17: Illustration der Parametrisierung des Vergleichstagsverfahrens mit VTV(7,3) mit einem Montag als Prognosetag	47

Abbildung 18: Struktur eines MLPs mit einer versteckten Schicht (Mertens und Rässler 2012).....	51
Abbildung 19: Formalisierung eines Simulationsvorgangs.....	55
Abbildung 20: Struktur eines multimodalen Transportprozesses. Adaptiert nach (Deutsch 2013).....	60
Abbildung 21: Zuordnung von Prozess- und Ressourcenenergie im Prozessmodell nach (Christiansen u. a. 2013)	70
Abbildung 22: Schematische Darstellung der Überführung von Betriebszustand in einen Energiezustand nach (Wolff, Kulus, und Dreher 2012).	72
Abbildung 23: Möglichkeiten der Energiezustandstransformation nach (Wolff, Kulus, und Dreher 2012)	73
Abbildung 24: Komponentenmodell von Produktionsmitteln und Infrastruktur nach (Schlegel, Stoldt, und Putz 2013).....	75
Abbildung 25: Abstraktionsschichten	81
Abbildung 26: Vorgehensmodell nach (Rabe, Spieckermann, und Wenzel 2008)	82
Abbildung 27: Klassendiagramm eines Verbrauchers	84
Abbildung 28: Ablauf zur Bestimmung der Leistungsaufnahme eines Verbrauchers	86
Abbildung 29: Überführungslogik der Ressourcenzustandsänderung bei einem Wechsel des Betriebsmodus (3)	87
Abbildung 30: Übermittlung der aktuellen Leistungsaufnahme an die Energiebeobachter-Komponente durch einen direkten Verbraucher (5)	88
Abbildung 31: Übermittlung der aktuellen Leistungsaufnahme an die Energiebeobachter-Komponente durch einen allgemeinen Verbraucher	89
Abbildung 32: Aufbau eines Beschreibungsschemas eines Verbrauchers	90
Abbildung 33: Allgemeiner Aufbau des PCT-Modells	93

Abbildung 34: Beispiel eines gerichteten Graphen mit Mehrfachkanten und Kantengewichtungen.	94
Abbildung 35: Klassendiagramm des Layouts	94
Abbildung 36: Beispiellayout eines Container-Terminals	95
Abbildung 37: Schematischer Aufbau des Terminal Operating Systems.....	96
Abbildung 38: Beschreibung der Beleuchtung als Verbraucher im Greenport Modell	97
Abbildung 39: Klassendiagramm einer Kaimauer	98
Abbildung 40: Klassendiagramm eines Containerschiffs	99
Abbildung 41: Klassendiagramm Container	99
Abbildung 42: Beschreibung einer Containerbrücke als Verbraucher	101
Abbildung 43: Klassendiagramm Containerbrücke	102
Abbildung 44: Klassendiagramm Lifting Device	103
Abbildung 45: Energierelevante Prozesse einer Zwei-Katz-Containerbrücke	104
Abbildung 46: Klassendiagramm 2-Katz-Containerbrücke.....	104
Abbildung 47: Klassendiagramm eines Blocklagers	106
Abbildung 48: Beschreibung eines Transportfahrzeugs als Verbraucher. Es wird zwischen aktiven und passiven Flurförderfahrzeugen unterschieden.	107
Abbildung 49: Klassendiagramm Fahrzeug.....	108
Abbildung 50: Klassendiagramm Batteriewechselstation	109
Abbildung 51: Klassendiagramm einer Lade- und einer Tanksäule	110
Abbildung 52: Klassendiagramm der Hinterlandanbindung.....	110
Abbildung 53: Allgemeiner Ablauf der Logistiksimulation.....	111
Abbildung 54: Ablauf der Transportauftragszuweisung (YT Dispatch)	113

Abbildung 55: Ablaufdiagramm eines Transportauftrags.....	116
Abbildung 56: Ablaufdiagramm eines Energiebeschaffungsauftrags.....	117
Abbildung 57: Nachrichtenübertragung bei Ein- und Auslagerung eines Kühlcontainers an seine endgültige Position.....	118
Abbildung 58: Ablauf eines Batteriewechsels	119
Abbildung 59: Allgemeiner Verbraucher Beleuchtung	119
Abbildung 60: Architektur des Prognoseprozesses.....	121
Abbildung 61: Prozesskette, welche durch das Ereignis „Ankunft eines Containerschiffes“ ausgelöst wird.....	122
Abbildung 62: Ablauf der Durchführung einer Energiebedarfsprognose	125
Abbildung 63: Zeitlicher Ablauf einer Energiebedarfsprognose	128
Abbildung 64: Synchronisation der Simulationskomponenten mit dem Livesystem	130
Abbildung 65: Schematischer Aufbau des Container-Terminals Altenwerder	134
Abbildung 66: Screenshots der CTA-Simulation implementiert in Plant Simulation	135
Abbildung 67: Stündlicher Energieverbrauch einer Containerbrücke in Abhängigkeit der Containerumschläge	138
Abbildung 68: Beispiel einer Häufigkeitsverteilung der benötigten Umschlagszeit von einem Container durch eine Containerbrücke bei einem Seeschiff	141
Abbildung 69: Zusammenhang zwischen MAE und der relevanten Tagesanzahl der Vergleichstagverfahren bei der Anlieferung.....	142
Abbildung 70: MAPE für die Lastprognose des Jahres 2013 durch das Vergleichstagverfahren (7,t)	145
Abbildung 71: Beispiel einer Lastgangprognose.....	146
Abbildung 72: Durchschnittlicher MAPE des Gesamtlastverlaufs durch Simulation - 2013	147
Abbildung 73: Maximaler MAPE des Gesamtlastverlaufs durch Simulation - 2013.....	147

Abbildung 74: Minimaler MAPE des Gesamtlastverlaufs durch Simulation und VTV (7,6) – 2013	148
Abbildung 75: Vergleich des Determinationskoeffizienten für die Monate Januar bis Dezember des Jahres 2013	148
Abbildung 76: Durchschnittliche Abweichung zwischen realen und simulierten Schiffsabfertigungszeiten	149
Abbildung 77: MAPE und Determinationskoeffizient der Jahre 2011 bis 2013	150
Abbildung 78: MPE und RMSPE für die Jahre 2011 bis 2013.....	151
Abbildung 79: MAE und RMSE für die Jahre 2011 bis 2013.....	151
Abbildung 80: Prozentuale Abweichung zwischen prognostizierten Gesamtverbrauch des Jahres und den realen Werten in Prozent.....	152
Abbildung 81: Lastverläufe des CTA Neujahr in den Jahren 2010 bis 2012	153
Abbildung 82: Vergleich des MAPE zwischen VTV und simulationsbasierter Prognose für Feiertage der Jahre 2011 bis 2013	154
Abbildung 83: BIAS-Vergleich zwischen Simulation und Vergleichstagverfahren der Prognose von Feiertagen	155
Abbildung 84: Determinationskoeffizient bei der Prognose des Energiebedarfs an Feiertagen für die Jahre 2011 bis 2013.....	155
Abbildung 85: Differenzen Schiffsankunftszeit, Schiffsabfahrtszeit und Arbeitsbeginn Real / Prognose	157
Abbildung 86: Absolute Containerabweichung	158
Abbildung 87: Prozentuale Abweichung zwischen realem und prognostiziertem Containerumschlag	159
Abbildung 88: Vergleich der Prognosegüte der simulationsbasierten Lastgangprognose bei der Verwendung prognostizierten und tatsächlich eingetretenen Schiffsankunftszeiten.....	159
Abbildung 89: Visualisierung der Batteriewechsel- und Ladezeiten	162

Abbildung 90: Durchschnittliche, maximale und minimale Einsatzzeit eines AGV bis zu einem Batteriewechsel..... 163

Abbildung 91: Durchschnittliche, maximale und minimale Aufenthaltszeiten einer Wechselbatterie in der Batteriewechselstation. 164

Abbildung 92: Prozentualer Anteil der elektrischen Leistungsaufnahme durch die Batteriewechselstation am Gesamtverbrauch..... 164

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Batterietechnologien Blei-Säure und Li-Ionen nach (H. Wenzel und Wedel 2015).....	29
Tabelle 2: Übersicht der Geschäftsanwendungsfälle Energiemanagement im Container-Terminal.....	40
Tabelle 3: Vergleich unterschiedlicher Prognosemethoden	56
Tabelle 4: Erfüllung der Anforderung 10-Abbildung energierelevanter Prozesse.....	65
Tabelle 5: Anforderungsdeckung der Methoden zur Energiesimulation	78
Tabelle 6: Zusammensetzung eines Datensatzes der Segelliste.....	97
Tabelle 7: Beispiel einer Transportliste der LKW-Transporte im Terminal	114
Tabelle 8: Beispiel einer Transportliste der Zugankünfte im Terminal	115
Tabelle 9: Beispiel des Aufbaus eines Transportauftrags wobei zwischen einem Transportauftrag bei einem Offline und einem Online Verfahren unterschieden wird.	116
Tabelle 10: Leistungsaufnahmebestimmung des Objekts Containerbrücke und Portalkran ..	122
Tabelle 11: Ergänzung der Segelliste.....	126
Tabelle 12: Format der aufgezeichneten Containerumschläge einer Containerbrücke.	136
Tabelle 13: Leistungsaufnahme der einzelnen Verbraucher einer Containerbrücke.....	139
Tabelle 14: Approximierte Werte für α_0 und α_1 für Portalkräne und Containerbrücken	139
Tabelle 15: Beispieldatensatz aufgezeichneter Containerumschlagszeiten einer Containerbrücke.....	140
Tabelle 16: Auswertung des Vergleichstagverfahrens: Anlieferung (stundenweise).....	141
Tabelle 17: Auswertung des Vergleichstagverfahrens: Auslieferungen (stundenweise)	142
Tabelle 18: Feiertage im Container-Terminal Altenwerder in den Jahren 2011 bis 2013	153
Tabelle 19: Aufbau einer prognostizierten Segelliste	156

1. Einleitung

Mit der Einführung von Elektromobilität in Industriebetrieben erhält die Beschaffung von elektrischer Leistung eine deutlich erhöhte Relevanz, auch in Betrieben bei denen die Strombeschaffung bisher keine strategische Bedeutung gespielt hat. Dies gilt insbesondere auch für Container-Terminals, welche dieselbetriebene Transportfahrzeuge gegen batterie-elektrisch angetriebene Fahrzeuge austauschen. Als Beispiel kann hier das HHLA Container-Terminal Altenwerder (CTA) in Hamburg genannt werden, welches als erstes Terminal weltweit einen Prototypen eines mit einem voll-elektrischen Antriebsstrang ausgerüsteten Transportfahrzeugs eingesetzt hat (Wieschemann und Wulff 2011). Als ein weiteres Beispiel kann das APM Terminal Maasvlakte 2 (M-2) in Rotterdam genannt werden, welcher eine Bestellung von 37 voll elektrischen Lift-AGVs in Auftrag gegeben hat („APM Terminals’ Maasvlakte II to Pioneer Container Automation Technology“ 2012). Durch die Nutzung von flexiblen Strombezugsverträgen ergeben sich neue Möglichkeiten und Anwendungsfälle im Bereich der Energieversorgung, die mit traditionellen Vollversorgungsverträgen nicht möglich waren. Zur Nutzung von ökonomischen und ökologischen Vorteilen verschiedener Anwendungsfälle im Bereich des Energiemanagements wird eine möglichst genaue Prognose der voraussichtlichen elektrischen Leistungsaufnahme des Folgetags benötigt. In dieser Arbeit wird ein integriertes Simulationsmodell vorgestellt, welches die kombinierte Betrachtung von Logistikprozessen und Energieverbrauchsprozessen zum Ziel hat. Auf Grundlage dieses Simulationsmodells soll eine Prognose des Energiebedarfs im Terminal erstellt werden. Im Rahmen der Arbeit wird untersucht, ob die Durchführung einer Simulation eine geeignete Methode ist, eine Prognose der elektrischen Leistungsaufnahme in einem Container-Terminal anzufertigen und somit eine Interaktion mit dem Energiemarkt zu ermöglichen.

1.1 Motivation

Im letzten Jahrzehnt wurden die Energiemärkte weltweit liberalisiert. Mit der Umsetzung der EU-Richtlinie 96/92/EG für den Elektrizitätsbinnenmarkt begann auch die leistungsgebundene Energieversorgung von Strom in Europa. Die Einführung eines Tagesbilanzierungsregimes war neben der Trennung zwischen Vertrieb und Produktion von elektrischer Energie ein wichtiger Schritt zur Öffnung des Strommarktes und dem diskriminierungsfreien Zugang von Unternehmen zu den Stromnetzen. Das derzeitige Bilanzierungsregime regelt, dass Stromlieferanten wie auch Stromhändler mit einer Vorlaufzeit von knapp einem Tag die voraussichtlichen Stromentnahmen aus den Netzen mit entsprechenden Einspeisungen in das Netz ausgleichen. Die entsprechenden Mengen können entweder in OTC (*Over-the-counter*) Geschäften erworben oder an einer Strombörse (z.B. *European Energy Exchange* oder *Europäischer Spotmarkt EPEX*) gehandelt werden. Gegenüber dem Übertragungsnetzbetreiber ist je Bilanzkonto

ein Bilanzkreisverantwortlicher zu benennen, welcher die Verantwortung für die wirtschaftlichen Auswirkungen von Abweichungen zwischen Entnahme und Einspeisung im Bilanzkreis abwickelt. Auf der physikalischen Seite ist der Regelzonenbetreiber verantwortlich für den sicheren Betrieb des Elektrizitätsnetzes. Um eine stabile Netzfrequenz zu gewährleisten, muss jederzeit die Summe der Netzeinspeisung mit der Summe der Netzausspeisungen übereinstimmen. Die Kosten für die Regelenergie werden anschließend auf die Bilanzkreisverantwortlichen umgelegt. Um Bilanzkreisabweichungen und damit auch den Bedarf von Regelenergie zu vermeiden, gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: Entweder kann eine Anpassung des Angebots an die Nachfrage erfolgen oder der Verbrauch an die Erzeugung angepasst werden (Sonnenschein, Rapp, und Bremer 2010).

Bereits vor der Liberalisierung der Strommärkte befassten sich in Deutschland energieintensive Unternehmen mit der Optimierung ihres Strombezugsverhaltens. So wurden z.B. Spitzenlastmanagement eingesetzt, wobei durch gezielte operative Eingriffe Lastspitzen vermieden werden oder Verbräuche in Zeiträume mit vergünstigten Bezugspreisen verlagert werden. Energiemanagementsysteme übernehmen dabei die operative Überwachung des Energiebezugs und falls möglich auch die Steuerung der Energieverbrauchsprozesse. Wird hierbei auf externe Anreize reagiert, so spricht man von Demand Response (Gellings und Chamberlin 1987). Diese Anreize können variable Preissignale sein, z.B. abgeleitet von aktuellen Bezugspreisen an der Strombörse. Aber auch weitere Anreizsignale, wie etwa die Verfügbarkeit von großen Mengen elektrischer Leistung produziert durch erneuerbare Energien, sind möglich. Auf Grundlage dieser Anreizsignale kann der Stromverbrauch reduziert bzw. sogar erhöht werden. Demand Side Management ergänzt diese verbraucherseitigen Reaktionen auf außenstehende Signale um allgemeine Maßnahmen, wie Energieeffizienzmaßnahmen, verbraucherseitige Energiemanagementmaßnahmen (ohne dynamische Preisanreize), Spitzenlastkappung oder Lastverlagerung (International Energy Agency 2003). Die deutschen Verbände VDE und BDEW fassen die Begriffe Demand Response und Demand Side Management unter dem Oberbegriff Demand Side Integration zusammen (Apel u. a. 2012). Für die Integration des Endverbrauchers in die Anpassungen auf Verbraucherseite werden in verschiedenen Studien hohe Potenziale im Kontext von Demand Side Integration genannt. Allein in Deutschland wird das Potenzial für die Nutzung von flexiblen Lasten zwischen 2.500 (Apel u. a. 2012) und 2.700 MW geschätzt (Ahlers, Aniol, und Scholz 2013). Dabei werden in verschiedenen Studien die stromintensiven Branchen (Aluminium, Chemie, Stahl, Papier, Glas und Zement) als Zielgruppe genannt ((Klobasa 2007) (Kohler 2010) (Gobmaier, Bernhard, und Roon 2012) (Roon und Gobmaier 2010)) oder Möglichkeiten und Potenziale bei der Einbindung von Haushaltskunden (Liebe und Wissner 2015) (Zeilinger und Einfalt 2011) (Kamper 2009) untersucht. Die Logistikbranche wird in keiner dieser Ausarbeitungen genannt oder betrachtet. Durch die Nutzung von Elektrofahrzeugen verbunden mit einem Batteriewechselkonzept entstehen aber auch hier neue Potenziale (Runge u. a. 2014), (Grundmeier u. a. 2014). Dies gilt

insbesondere für geschlossene Logistiksysteme, wie sie auch in einem maritimen Container-Terminal vorzufinden sind.

Um Energiedienstleistungen im Sinne von Demand Response und Demand Side Integration bereitstellen zu können, aber auch für die innerbetriebliche Optimierung der elektrischen Leistungsaufnahme ist insbesondere Wissen über zukünftige Lastverläufe erforderlich. Diese wird benötigt, um daraus Potenziale für das Zu- und Abschalten der Leistungsaufnahme bestimmen zu können. Mit Kenntnis des zukünftigen Energieverbrauchs ist es möglich, Potenziale für das Angebot bestimmter Energiedienstleistungen von Endverbraucherseite kurzfristig zu bestimmen. Mögliche Geschäftsanwendungsfälle werden in Kapitel 3 erläutert. In einem Container-Terminal basiert die Flexibilität im Strombezug zum Beispiel auf der Möglichkeit, bei der Nutzung von automatisierten Elektrofahrzeugen (B-AGVs) für den Containertransport, Batterieladeprozesse zeitlich variabel zu gestalten (Runge u. a. 2014). Bei der Nutzung eines Batteriewechselkonzepts ergibt sich die Variabilität, da der Ladeprozess einer Batterie kürzer ist als die Aufenthaltszeit der Batterie in der Ladestation bis zum nächsten Gebrauch. Somit ist im Container-Terminal mit Nutzung von Elektrofahrzeugen neben einer Prognose der elektrischen Leistungsaufnahme auch die Prognose der Batteriewechselzeiten der Elektrofahrzeuge relevant. Zu den möglichen anzubietenden Energiedienstleistungen gehören unter anderem das Bereitstellen einer möglichst exakten Lastgangprognose für den Stromlieferanten, das Bereitstellen von Zu- und Abschaltpotenzialen zur Ausgleichsenergievermeidung, das Verschieben von Energieverbrauchsprozessen in günstigere Bezugszeiträume oder das Anbieten von Minutenreserveleistung. Die teilweise der Regulierung unterliegenden Prozessabläufe zur Bereitstellung dieser Energiedienstleistungen bedingt, dass die Lastgangprognose wie auch das Bestimmen der Flexibilität spätestens am Vortag der eigentlichen Erbringung erfolgen. Neben der externen Vermarktung kann eine Lastgangprognose auch für Energiemanagementmaßnahmen innerhalb des Terminals genutzt werden, z.B. zum frühzeitigen Erkennen neuer Lastspitzen und der frühzeitigen Einleitung von Maßnahmen, um diese zu verhindern. Unter einer Lastspitze wird an dieser Stelle die maximal verrichtete elektrische Arbeit innerhalb einer Viertelstunde eines bestimmten Zeitraums verstanden.

Forschungsgegenstand dieser Arbeit ist es zu untersuchen, ob eine Simulation eine geeignete Methode ist, den elektrischen Energiebedarf eines Container-Terminals kurzfristig zu prognostizieren. Die Grundidee ist dabei, die Logistik- und Energieverbrauchsprozesse auf Grundlage der zukünftigen Schiffsankünfte zu simulieren und somit zu prognostizieren. Es ergeben sich die Fragen:

1. Wie kann eine Simulation dazu genutzt werden, um eine Gesamtlastgangprognose eines Container-Terminals anzufertigen?

2. Wie kann eine Simulation dazu genutzt werden, Lastverschiebungspotenziale einer Batteriewechselstation vorherzusagen?

Zusammenfassend aus diesen Fragen ergibt sich die Forschungsfrage dieser Arbeit:

„Inwiefern ist eine Simulation eine geeignete Methode, die Logistikprozesse und damit einhergehende elektrische Leistungsaufnahme eines maritimen Seehafen Container-Terminals zu prognostizieren und wie kann eine solche Simulation entworfen und genutzt werden?“

1.2 Zielstellung

Aus der oben dargestellten Problemstellung ergibt sich das Ziel dieser Arbeit:

„Die Entwicklung und Evaluation einer Simulation zur Prognose der Logistikprozesse unter Berücksichtigung der elektrischen Leistungsaufnahme in einem Seehafen Container-Terminal.“

Um dieses Ziel zu erreichen, müssen drei voneinander abhängige Ziele erreicht werden, welche im Folgenden beschrieben werden:

Z.1 Entwicklung einer Methode zur zustandsbasierten Abbildung von Energieverbrauchsprozessen in ereignisbasierten Simulationen

Es soll eine Methode zur zustandsbasierten Abbildung von Energieverbrauchsprozessen (ZAES) entwickelt werden. Diese Methode soll dazu geeignet sein, Energieverbrauchsprozesse innerhalb einer ereignisdiskreten Simulation detailliert abzubilden. Die Methode ist allgemeingültig zu halten, sodass diese generell in ereignisbasierten Simulationen, insbesondere in Materialflusssimulationen, eingesetzt werden kann und somit auch auf Themengebiete in einem verwandten Kontext übertragen werden kann.

Z.2 Entwicklung eines Simulationsmodells zur kombinierten Betrachtung von Logistik und Energieverbrauchsprozessen eines Container-Terminals

Es gilt ein generisches Simulationsmodell eines Container-Terminals zu entwickeln, welches es erlaubt, die Logistik- und Energieverbrauchsprozesse eines Container-Terminals abzubilden. Dabei soll eine kombinierte Betrachtung der Logistik- und Energieverbrauchsprozesse erfolgen. Hierdurch werden Wechselwirkungen zwischen dem Energieverbrauch und der Energiebereitstellung berücksichtigt, welche z.B. durch Batterieladeprozesse entstehen, zu deren Zeiten keine Transportaufträge vom betroffenen Transportfahrzeug durchgeführt werden können. Zur Abbildung der Energieverbrauchsprozesse wird die zuvor entwickelte Methode ZAES eingesetzt. Es gilt das Modell allgemeingültig zu halten, um es flexibel einsetzen zu

können und auch die Energieverbrauchsprozesse in weiteren Umschlagsanlagen (z.B. Binnenhäfen) abbilden zu können.

Z.3 Prognose des Gesamtenergiebedarfs eines Container-Terminals

Das in Ziel 2 entwickelte Modell soll um Methoden ergänzt werden, welche es ermöglichen, die Logistik- und Energieverbrauchsprozesse der einzelnen Teilverbraucher auf Grundlage der zukünftigen Schiffsankünfte und den geplanten Containerumschlägen vorherzusagen (*Greenport*). Der Energiebedarf soll dabei in Form eines Lastgangs beschrieben werden, welcher die verrichtete elektrische Arbeit aller Komponenten in einem 15-Minuten Intervall angibt. Aus der Aggregation der einzelnen Verbraucher kann der Gesamtlastgang bestimmt werden.

1.3 Anforderungen

Um die genannten Ziele zu erreichen, werden diese in diesem Abschnitt in Form von Anforderungen weiter verfeinert. Sie dienen dazu, den Stand der Technik zu bewerten und den Anwendungsbereich des entwickelten Simulationsmodells *Greenport* zu spezifizieren. Die zur Erfüllung der Teilziele notwendigen Anforderungen werden herausgearbeitet und um bereichsübergreifende Anforderungen (Sonstige) ergänzt.

Entwicklung einer Methode zur zustandsbasierten Abbildung von Energieverbrauchsprozessen in ereignisbasierten Simulationen

A.1 Direkte Verbraucher. Direkte Verbraucher beziehen elektrische Leistung in Abhängigkeit eines konkreten Produktions- oder Teilprozesses, z.B. durch das Heben oder Senken eines Containers. Befindet sich ein Verbraucher „in Betrieb“, ver- oder bearbeitet also ein Produktionsteil, wird eine festgelegte elektrische Leistung aufgenommen. Die verrichtete elektrische Arbeit kann dann durch die Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Zeit berechnet werden. (Solding und Petku 2005) Direkte Verbraucher sollen im Modell berücksichtigt werden und je nach Produktionsprozess über eine spezifische Leistungsaufnahme verfügen.

A.2 Allgemeine Verbraucher. Verbraucher, welche sich keinem konkreten Prozess zuordnen lassen und sich fluktuierend über die Zeit verändern, werden als allgemeine Verbraucher bezeichnet. Ein Beispiel für einen allgemeinen Verbraucher wäre z.B. Belüftung einer Werkshalle. (Solding und Petku 2005) Allgemeine Verbraucher spielen in vielen Intralogistiksystemen eine Rolle und müssen berücksichtigt werden. In einem Container-Terminal ist z.B. die Beleuchtung des Betriebsgeländes ein allgemeiner Verbraucher.

A.3 Ressourcenenergie. Um einen genauen Aufschluss über die Leistungsaufnahme eines Verbrauchers zu erlangen, ist es notwendig, zwischen der Prozesslast direkter Verbraucher und

der Grundlast zu unterscheiden. So verfügt z.B. eine in Betrieb befindliche Maschine über eine Basisleistungsaufnahme, die u.a. durch die eingeschaltete Beleuchtung erzeugt wird (Ressourcenenergie). Diese findet unabhängig vom eigentlichen Prozess statt. Um eine differenzierte Betrachtung der Energieverbrauchsprozesse zu ermöglichen, muss das Modell in der Lage sein, Ressourcenenergie abzubilden

A.4 *Energierrelevante Einflussfaktoren.* Die benötigte elektrische Leistung einer Maschine bei der Durchführung eines Prozesses hängt von vielen Faktoren ab. Zum Beispiel ist die Höhe der Leistungsaufnahme beim Heben eines Containers abhängig vom Gewicht des Containers. Auch können werkstückunabhängige Faktoren Einfluss auf die Leistungsaufnahme einer Maschine ausüben. So ist z.B. die Leistungsaufnahme eines Kühlcontainers abhängig von der aktuellen Außentemperatur. Das Modell muss in der Lage sein, diese energierelevanten Einflussfaktoren zu berücksichtigen.

A.5 *Integrierte Betrachtung der Energieverbrauchsprozesse* Eine Vielzahl von Ansätzen zur Simulation der Leistungsaufnahme in Logistik- und Produktionssystemen setzt auf entkoppelte Modelle zur Simulation der Produktionsprozesse und zur Simulation der Verbrauchsprozesse. Aus Nutzersicht ergeben sich jedoch zahlreiche Vorteile durch die Nutzung einer integrierten Lösung. Daher soll das in dieser Arbeit vorgestellte Modell die Logistik und das Energiegeschehen in einem integrierten Modell abbilden.

Entwicklung eines Simulationsmodells zur kombinierten Betrachtung von Logistik und Energieverbrauchsprozessen eines Container-Terminals

A.6 *Räumliche und zeitliche Differenzierung* Der zeitliche Aufwand und der Energieverbrauch einzelner Prozesse in einem Container-Terminal hängen im großen Maße von den individuellen Arbeitsschritten der am Containerumschlag beteiligten Verbraucher ab. Diese ergeben sich durch die Terminalauslastung und die verwendeten Betriebsstrategien (Liegeplatzplanung, Transportauftragszuweisung...). Insbesondere die Positionierung der Umschlagsgeräte im Terminal hat einen großen Einfluss auf Logistik- und Energieverbrauchsprozesse. Müssen z.B. Container über eine weite Strecke von ihrem Lagerplatz zu einem Containerschiff transportiert werden, wird ein höherer Energie- und zeitlicher Aufwand für die Durchführung des Transportauftrags notwendig sein, als wenn Container nur über kurze Distanzen transportiert werden müssen. Um diesem Umstand gerecht zu werden, sollen Umschlagsprozesse im Terminal räumlich und zeitlich differenziert abgebildet werden, wodurch die Verwendung von statistischen Durchschnittswerten vermieden wird.

A.7 *Verbrauch.* Das Modell muss den Energiebedarf von Transportfahrzeugen in Abhängigkeit des individuellen Transportauftragsprogramms der Fahrzeuge abbilden. Diese Darstellung muss in Abhängigkeit von unterschiedlichen Fahrzeugzuständen (z.B. Geschwindigkeit oder

Gewicht der Ladung) und Umweltzuständen (z.B. Außentemperatur) erfolgen. Auch müssen Wechselwirkungen zwischen Energiebezug und Energiebereitstellung abgebildet werden. Fährt z.B. ein Fahrzeug die enthaltende Wechselbatterie leer, steht keine weitere Antriebsleistung mehr zur Verfügung

A.8 Kapazität. Neben dem Verbrauch stellt die Batteriekapazität einen elementaren Faktor bei der Bewertung von E-Mobility Planungsproblemen dar. Im Gegensatz zu Treibstofftanks in konventionellen Fahrzeugen weist die Batterie eine Dynamik in Abhängigkeit von Umweltfaktoren auf (Vetter u. a. 2005). Zum Beispiel kann die aus der Batterie zur Verfügung gestellte Leistung abhängig vom Entladeverlauf, der Außentemperatur oder ihrer Vergangenheit (Memory-Effekt) sein.

A.9 Energiebereitstellung der Horizontaltransportflotte Es existieren vielfältige Möglichkeiten wie Elektrofahrzeuge geladen werden können. Diese reichen von einfachen Steckverbindungen über Induktionsladevorrichtungen bis hin zu Batteriewechselstationen (Kley 2011). Je nach Art werden komplett unterschiedliche Güterarten zwischen der Ladeinfrastruktur und dem Fahrzeug ausgetauscht (elektrische Energie bzw. komplette Batterien). Darüber hinaus muss die Leistung, mit welcher dieser Transfer durchgeführt werden kann, abgebildet werden. Die Modellierung muss flexibel verschiedene Einflüsse integrieren können. Die übertragende Leistung einer Induktionsschleife ist bspw. von dem Abstand zur Bodenplatte des Fahrzeugs abhängig (Hoerstebroek 2014). Die Leistung einer normalen Ladestation ist wiederum abhängig vom Stromtyp (Wechsel- oder Gleichstrom), der Spannung und der Stromstärke und ggf. der Anzahl der Phasen. Neben den technischen Eigenschaften der Ladeinfrastruktur sind der Standort und der Zugang zu dieser zu definieren. Die Ladeinfrastrukturkomponenten müssen flexibel auf dem Terminalgelände platzierbar sein. So kann Ladeinfrastruktur sowohl an möglichen Zielorten der Transportfahrzeuge (Lager oder Containerbrücke) als auch in Wartebereichen dieser platziert werden. Darüber hinaus muss in dem Modell definierbar sein, ob die Transportfahrzeuge Zugang zu der jeweiligen Ladestation erhalten. Hier gibt es technische Zugangsrestriktionen, wie z.B. Steckerstandards (VDE Verband, o. J.) Auch die Geschwindigkeit, mit welcher eine Batterie geladen werden kann, unterliegt gewissen Schwankungen. So ist eine Lithium-Ionen Batterie i.d.R. schnell bis auf eine Kapazität von 80% geladen, wohingegen die restlichen 20% ein Mehrfaches an Zeit benötigen (Jossen, o. J.). Das Modell muss in der Lage sein, diese Dynamik abzubilden.

A.10 Abbildung energierelevanter Prozesse. Um die Leistungsaufnahme eines Container-Terminals abzubilden, müssen relevante Verbraucher eines Terminals modelliert werden. Das Simulationsmodell soll dazu in der Lage sein, Energieverbrauchsprozesse einzelner Verbraucher zu berücksichtigen. Die unterschiedlichen Stromverbraucher eines Container-Terminals

1 Einleitung

sollen hierzu individuell abgebildet werden. Durch die Aggregation der Teillastgänge lässt sich die Gesamtleistungsaufnahme bestimmen.

Prognose des Gesamtenergiebedarfs eines Container-Terminals

A.11 Simulation des zukünftigen Logistikgeschehens. Das Modell soll vollautomatisch auf Grundlage der zukünftigen Schiffsankünfte, Bahnlieferungen und LKW Ankünften die Logistik- und Energieverbrauchsprozesse eines Container-Terminals prognostizieren.

A.12 Datenvervollständigung. Das Modell soll auf Grundlage der zukünftigen Schiffsankünfte die Logistik- und Energieverbrauchsprozesse abbilden. Da die für eine Prognose notwendigen Daten oftmals unvollständig sind, sollen diese automatisch ergänzt werden, indem z.B. stochastische Informationen genutzt werden. Hierbei fehlende Informationen, wie etwa Containergewichte oder die Anzahl von Kühlcontainern auf einem Schiff, müssen automatisiert ergänzt oder anderweitig behandelt werden.

A.13 Realistischer Systemstartzustand. Um eine simulationsbasierte Energiebedarfsprognose anzufertigen, muss zur Simulationsdurchführung ein realistischer Systemzustand vorherrschen. Dieser umfasst den aktuellen Zustand der einzelnen Verbraucher des Systems sowie die Basisleistungsaufnahme, welche sich aus verschiedenen Faktoren, wie etwa der Anzahl der eingelagerten Kühlcontainer, zusammensetzt.

A.14 Feiertage. Die Prognose des Energiebedarfs eines Feiertags stellt besondere Anforderungen an das Simulationsmodell, da Pausen der Arbeitsmannschaften berücksichtigt werden müssen. Feiertage müssen bei der Vorhersage berücksichtigt und gesondert behandelt werden.

Sonstige

Neben den Anforderungen der spezifischen Bereiche wurden die folgenden übergreifenden Anforderungen identifiziert.

A.15 Operative Kennzahlen. Das Simulationsmodell muss Kennzahlen berechnen können, welche den Energiebedarf eines Container-Terminals beschreiben. Aber auch Kennzahlen, welche sich durch die Logistikoperationen und den technischen Eigenschaften der Transportfahrzeuge ergeben, sollen erfasst werden, um die Bestimmung der operativen Verwendbarkeit von Planungsstrategien und unterschiedlicher Energieausstattungsszenarien zu untersuchen. Dieses betrifft Ausfälle aufgrund unzureichender Energie oder zeitliche Aspekte, wie die Standzeiten, Wartezeiten oder Verspätungen durch Lade- oder Betankungsvorgänge. Um die räumlichen Aspekte zu bedienen, sind Kennzahlen abhängig von dem jeweiligen Standort der Fahrzeuge oder der Energieversorgungsstationen zu erfassen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in acht Hauptkapitel sowie Einleitung und Fazit. Der Aufbau der Arbeit orientiert sich dabei an einem typischen ingenieurmäßigen Vorgehen bzw. an dem von (Peppers u. a. 2007) aufgestellten „*Design science research process model*“ und adressiert die Bereiche Problemidentifikation (Kapitel 1), Ziel und Anforderungsermittlung (Kapitel 1), Bewertung bestehender Verfahren und Systeme (Kapitel 4-6), Konzeption und Implementierung (Kapitel 7) sowie die Demonstration und Evaluation (Kapitel 8). Zusätzlich werden die für den Leser notwendigen Grundlagen eines Container-Terminals erläutert (Kapitel 2-3). Abbildung 1 stellt den Aufbau dieser Arbeit zusammenfassend dar.

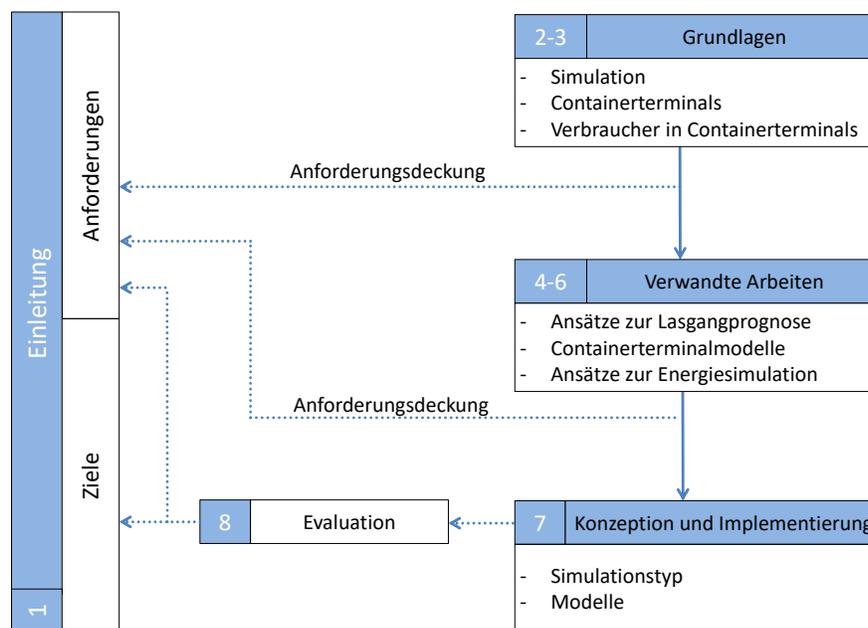


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

Kapitel zwei und drei beschreiben die relevanten Grundlagen, um Anforderungen und Ziele zu verstehen. Die Kapitel 4-6 befassen sich mit der Analyse des Stands der Technik, wobei zwischen Methoden zur Lastgangprognose, Methoden zur Container-Terminalsimulation und Methoden zur Energiesimulation unterschieden wird. Die Kapitel bewerten die Vorgehensweisen und Modelle hinsichtlich ihres Erfüllungsgrades der in Abschnitt 1.2 genannten Ziele und Anforderungen. Ziel ist die Identifikation von geeigneten Methoden, die für die Aufgabenstellung dieser Arbeit verwendet oder adaptiert werden können. Kapitel 7 stellt das detaillierte Konzept von Greenport zur Erfüllung der Ziele und Anforderungen vor. Dazu gehen die Ergebnisse aus

1 Einleitung

den vorherigen Kapiteln ein. Zudem wird die prototypische Implementierung von Greenport beleuchtet. Kapitel 7 evaluiert den Prototypen hinsichtlich seines Anforderungs- und Zielerfüllungsgrades. Die Anwendbarkeit wird anhand eines Anwendungsbeispiels am Container-Terminal Altenwerder in Hamburg demonstriert.

2. Container-Terminals

Im folgenden Abschnitt werden der Aufbau und die grundlegende Funktionsweise eines Container-Terminals erläutert. Im Anschluss werden die relevanten Energieverbrauchsprozesse beschrieben, welche berücksichtigt werden müssen, um eine Abbildung relevanter Energieverbräuche zu gewährleisten.

2.1 Aufbau eines Container-Terminals

Die Hauptfunktion eines Seehafen-Container-Terminals liegt sowohl im Umschlag von Containern verschiedener Verkehrsträger als auch in deren Zwischenlagerung auf dem Terminalgelände. Ein Seehafen Container-Terminal ist ein offenes und komplexes System, welches über zwei Schnittstellen zur Außenwelt verfügt. Zum einen gibt es die seeseitige Schnittstelle zum Be- und Entladen von Containerschiffen und zum anderen eine landseitige Schnittstelle für den An- und Abtransport der Container per LKW oder Bahn. Ein Container-Terminal verfügt immer über ein Containerlager, in welchem Container zwischengelagert werden. Eine Zwischenlagerung ist notwendig, um die unterschiedlichen Ankunftszeiten von Schiffen und Landfahrzeugen auszugleichen. Seehafen Container-Terminals tragen wesentliche logistische Leistungen zum Gütertransport bei und sind somit wichtige Entkopplungspunkte für den weltweiten Güterverkehr (Lehmann 2006) (Meier 2009). Grundsätzlich kann ein Seehafen-Container-Terminal in 5 Funktionsbereiche untergliedert werden, in denen unterschiedliche Planungsaufgaben existieren. Zu den Funktionsbereichen gehören der Kaimauerbereich, der Containerbrückenbereich, der Horizontaltransportbereich, den Containerlagerbereich und die Hinterlandanbindung. Abbildung 2 verdeutlicht einen verbreiteten Aufbau eines Container-Terminals mit der Anordnung der verschiedenen Funktionsbereiche. Im Folgenden werden die einzelnen Funktionsbereiche, das dort eingesetzte Equipment und die in den einzelnen Bereichen relevanten Planungsprobleme erläutert.

Der wohl prägnanteste Begriff im Zusammenhang mit Container-Terminals ist der Container selbst. Hierbei handelt es sich um einen mehrfach verwendbaren offenen oder geschlossenen, kasten-, tank- oder plattformartigen Großbehälter für den Warentransport. Er ist dabei so ausgelegt, dass er allen Transportbeanspruchungen sowie Witterungsverhältnissen standhalten und dauerhaft über einen längeren Zeitraum wiederverwendet werden kann. Durch standardisierte Transportvorrichtungen kann der Container einfach von unterschiedlichen Transportmitteln, wie z.B. LKW, Schiff und Bahn transportiert werden. Container gibt es in verschiedenen Längen, z.B. 10, 20, 30 und 40 Fuß (ft), d.h. 3, 6, 9 und 12m. Im Schiffverkehr werden überwiegend 20ft (Twenty-foot Equivalent Unit - TEU) und 40ft (Fourty-foot Equivalent Unit – FEU) Container verwendet. Aufgrund ihrer Standardisierung ist es möglich, anstelle eines 40ft

2 Container-Terminals

-Containers auch genau zwei 20ft -Container zu transportieren, da ihre Längen aufeinander abgestimmt sind und sie in der Breite und Höhe gleich sind. Dadurch werden Transport- und Umschlagvorgänge wesentlich vereinfacht und beschleunigt. Es gibt eine Vielzahl von Containertypen, die entsprechend ihrer Warenart oder Bauweise definiert sind. Grundsätzlich kann allerdings zwischen Standardgut- und Spezialgutcontainern sowie Kühlcontainer und Out-of-Gauge-Container (OOG) unterschieden werden. Standardgutcontainer sind genormte ISO-Container. In Spezialgutcontainern werden z.B. Gefahrgüter transportiert, während OOG-Container z.B. Übergröße besitzen können. Kühlcontainer werden für das Isolieren von Waren genutzt (Arnold u. a. 2002) (Martin 2004).

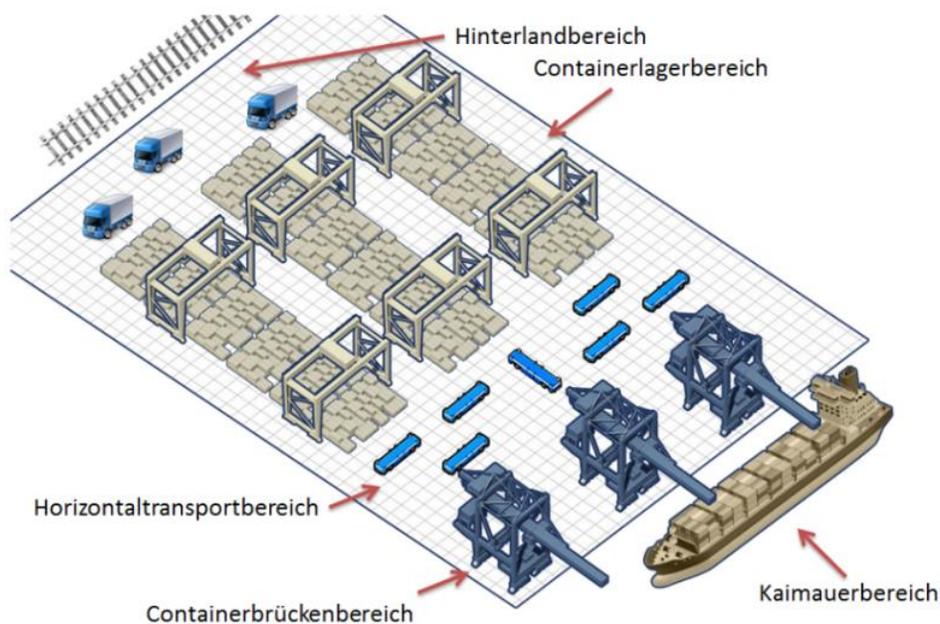


Abbildung 2: Funktionsbereiche eines Container-Terminals

Der Kaimauerbereich beinhaltet die einzelnen Liegeplätze der Containerschiffe, welche entlang der Kaimauer angeordnet werden. Der Kaimauerbereich stellt somit die seeseitige Schnittstelle für den Ab- und Antransport für Container dar. Im Kaimauerbereich werden die Schiffe zur Ent- und Beladung positioniert. Die Hauptkomponente des Kaimauerbereichs stellt die Kaimauer dar, welche dabei idealerweise eine Gerade bildet, welche eine maximale Flexibilität bei der Liegeplatzzuordnung der Schiffe und der Zuordnung von Kaikränen zu Schiffen bietet. Die an der Kaimauer festmachenden Containerschiffe variieren zwar in ihrer Größe und somit in ihrer Transportkapazität, der generelle Aufbau ist jedoch bei allen Schiffstypen gleich. Abbildung 3 zeigt den schematischen Aufbau eines Containerschiffs.

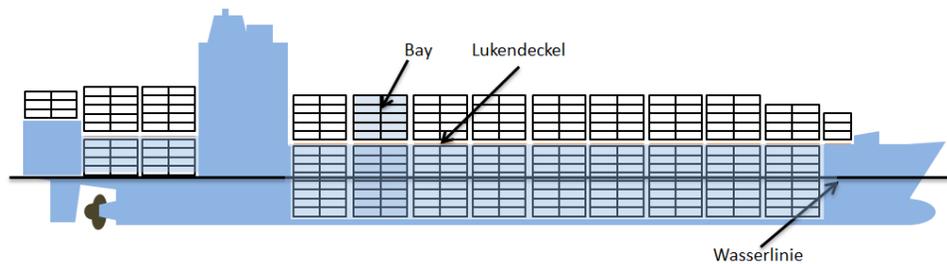


Abbildung 3: Aufbau eines Containerschiffs

Container werden über das Schiff verteilt in sogenannten Bays gelagert. Die im Bauch des Schiffes befindlichen Container werden mit sogenannten Lukendeckeln verschlossen, auf denen weitere Container gestapelt werden können.

Im Containerbrückenbereich erfolgt die Be- und Entladung der Containerschiffe durch Containerbrücken, die entlang der Kaimauer angeordnet sind. Alle Kräne zum Be- und Entladen der Containerschiffe sind dabei mit sogenannten Spreadern ausgerüstet. Dabei handelt es sich um einen normierten Rahmen, welcher den Abschluss der Hebevorrichtung des Krans bildet und an der Oberseite der Container befestigt werden kann. Sind Spreader und Container miteinander verbunden, kann der Container von der Brücke bewegt werden. Die Länge eines Spreaders ist dabei variabel, wodurch auch Container mit einer abweichenden Größe, z.B. Container mit Übergröße, bewegt werden können. Einige Kräne sind in der Lage, zwei 20ft-Container gleichzeitig zu transportieren. Diese werden Twin-Lift-Spreader genannt. Die heute am meisten eingesetzte Art von Kränen zur Be- und Entladung von Containerschiffen ist die Containerbrücke. Dabei handelt es sich um einen großen Portalkran, welcher auf Schienen entlang der Kaimauer verfahrbar ist. Es wird dabei zwischen Containerbrücken mit einer oder zwei Laufkatzen unterschieden. Als Laufkatze wird dabei der fahrbare Wagen am Ausleger der Containerbrücke bezeichnet. 1-Katz-Brücken besitzen eine Laufkatze, welche bei einem Entladevorgang den Container aus dem Schiff zum Kai transportiert und diesen dort auf den Boden oder direkt auf ein Transportfahrzeug stellt. Die Krankatze wird dabei von einem Kranfahrer gesteuert, welcher sich in einer Kabine oberhalb des Schiffsdecks befindet. Nach heutigem Stand der Technik sind 1-Katz-Brücken in der Lage, bis zu 35 Containerbewegungen pro Stunde durchzuführen. Eine Containerbewegung wird dabei als Transport eines Containers vom Kai in das Containerschiff oder umgekehrt als Transport vom Containerschiff an den Kai verstanden. Abbildung 4 zeigt den schematischen Aufbau einer Containerbrücke. Mit der Entwicklung von 2-Katz-Brücken wurde die Produktivität der Containerbrücken noch weiter verbessert. Diese Brücken sind in der Lage, bis zu 45 Container in der Stunde umzuschlagen. Die Produktivitätssteigerung gründet sich dabei auf eine Teilautomatisierung der Brücke. Die see-seitige Hauptkatze wird weiterhin manuell gesteuert, da für das zentimetergenaue Aufnehmen

2 Container-Terminals

und Absetzen eines Containers in einem ständig schwankenden Schiff bisher noch keine technisch befriedigende Lösung entwickelt wurde. Der Container wird nach der Aufnahme aus dem Schiff jedoch nicht direkt an den Kai transportiert, sondern auf einer sogenannten Laschplattform abgesetzt. Bei einer Laschplattform handelt es sich um eine ebene Fläche im unteren Teil der Containerbrücke. Der Transport des Containers von der Laschplattform zum Kai oder vom Kai zur Laschplattform wird von einer vollautomatischen Portalkatze übernommen. Normalerweise sind Laschplattformen so dimensioniert, dass dort mehrere Container zwischengelagert werden können. Durch die Entkopplung vom Horizontaltransportbereich, die kurzen Fahrtwege der Katzen und deren parallelen Betrieb können extrem kurze Umschlagszeiten erreicht werden, die von keinem anderen Kran an der Seeseite erreicht werden.

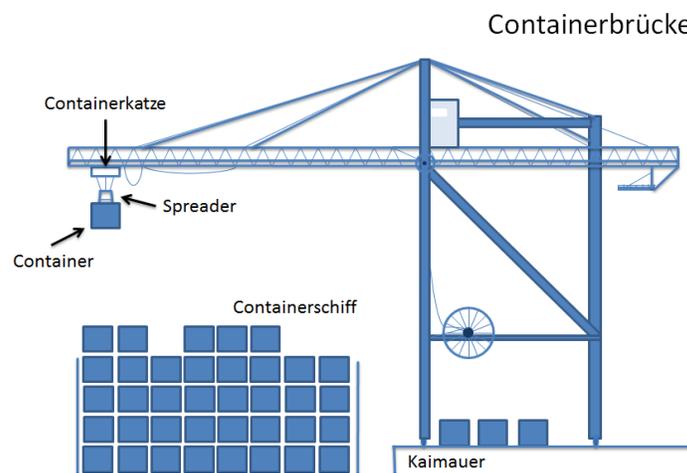


Abbildung 4: Schematische Aufbau einer 1-Katz-Containerbrücke

Neben Containerbrücken werden vor allem in kleineren Seehäfen Mobilkräne eingesetzt, welche günstiger in der Anschaffung sind und flexibler eingesetzt werden können. Jedoch erreichen sie nur geringere Umschlagsraten von bis zu maximal 25 Containern pro Stunde. Teilweise sind vor allem ältere Schiffe mit eigenem Hebezeug ausgerüstet. Die auf dem Schiff befestigten Kräne waren früher unerlässlich, da die Terminals noch nicht mit eigenen Kränen zum Entladen der Schiffe bestückt waren. Heutzutage existieren jedoch nur noch wenige Häfen ohne eigene Kräne, weshalb der Schiffsanteil mit bordeigenem Hebezeug immer weiter zurückgeht.

Der Bereich zwischen dem Kai und der Lagerfläche im Terminal wird als Horizontaltransportbereich bezeichnet. Der Übergang in den Lagerbereich kann fließend sein, wenn Flurfördergeräte Container direkt auf einen Lagerplatz bewegen. Im Horizontaltransportbereich kommen je nach Container-Terminal unterschiedliche Arten von Flurförderfahrzeugen zum Einsatz. Diese

können hinsichtlich ihrer Fertigkeit, Container selbständig auf- oder abzuladen, und nach ihrem Automatisierungsgrad unterschieden werden.

Aktive Fahrzeuge besitzen die Fähigkeit, Container selbständig auf- oder abzuladen, während passive Fahrzeuge hierzu die Hilfe eines weiteren Gerätes, z.B. eines Krans, benötigen. Durch die Fähigkeit der aktiven Fahrzeuge zum selbständigen Be- und Entladen wird die Übergabe eines Containers an der Containerbrücke entkoppelt. Somit muss die Containerbrücke nicht auf ein freies Fahrzeug warten, sondern kann einen Container einfach auf dem Boden abstellen. Umgekehrt muss auch das Fahrzeug nicht auf die Containerbrücke warten, sondern kann direkt einen auf dem Boden zwischengelagerten Container weitertransportieren. Lagerkräne entfallen bei aktiven Fahrzeugen oftmals sogar gänzlich, da diese deren Aufgabe übernehmen. Passive Fahrzeuge hingegen sind nicht in der Lage, Container selbständig auf- oder abzuladen. Das macht eine Harmonisierung mit den Einsatzplänen weiterer Geräte, in der Regel Containerbrücken und Lagerkränen, unerlässlich.

Ein weiteres Unterscheidungskriterium für Flurförderfahrzeuge ist der Automatisierungsgrad der Fahrzeuge. Hier wird zwischen bemannten Fahrzeugen, welche von einem Fahrer gesteuert werden, und automatischen, unbemannten Systemen unterschieden. Bemannte Systeme sind in der Regel günstiger in der Anschaffung, verursachen jedoch aufgrund des Personalbedarfs höhere laufende Kosten. Bezüglich der vorgestellten Unterscheidungskriterien können alle Flurfördergeräte in vier Kategorien eingeteilt werden, deren wichtigste Vertreter im Folgenden kurz dargestellt werden. Eine Kurzdarstellung der einzelnen Fahrzeuge gibt (Lehmann 2006). Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Fahrzeuge findet man in (Brinkmann 2005).

Die ersten Container-Terminals arbeiteten mit Chassis-Systemen. Hierbei handelt es sich um ein Fahrgestell, auf dem ein Container abgesetzt werden kann. Das (beladene) Chassis kann anschließend von einer Zugmaschine bewegt werden. Es können auch mehrere aneinander gekoppelte Chassis bewegt werden. Man spricht dann von einem Trailerzug. Der Vorteil von Chassis-Systemen liegt in dem niedrigen Anschaffungspreis im Vergleich zu anderen Flurfördergeräten. Allerdings wird das einem Container zugewiesene Chassis die gesamte Zeit von diesem blockiert, wodurch vom Terminalbetreiber sehr viele Chassis vorgehalten werden müssen. Als passives System benötigen Chassis ein weiteres Gerät zum Auf- und Abladen von Containern. Ein weiterer Nachteil von Chassis ist die fehlende Möglichkeit der Containerstapelung, wodurch der Platzbedarf auf dem Terminalgelände steigt. Ebenso muss der Fahrbereich großzügig dimensioniert werden, da insbesondere Trailerzüge beim Wenden einen großen Wendekreis benötigen. Chassis-Systeme werden immer seltener in Container-Terminals eingesetzt und sind bevorzugt in nordamerikanischen Häfen zu finden, wo oftmals eine über das ganze Terminal verteilte Lagerung der Container stattfindet.

2 Container-Terminals

Aktive bemannte Flurfördergeräte benötigen einen Fahrer und sind in der Lage, Container selbständig aufzunehmen oder abzulegen. Ein weit verbreiteter Vertreter dieses Fahrzeugtyps ist der Portalhubwagen. Ein Portalhubwagen nimmt Container auf, indem er über ihn fährt und ihn hochhebt. Infolgedessen können Portalhubwagen sowohl den Umschlag- als auch Transportfahrzeugen zugeordnet werden. Sie sind gummibereit und können frei auf dem Terminalgelände von einem Fahrer bewegt werden. Portalhubwagen gibt es in mehreren Ausführungen. Ein Straddle Carrier ist ein in Seehafen-Container-Terminals häufig eingesetzte Version. Diese können abhängig von ihrer Konstruktion bis zu vier Container übereinander stapeln. Eine andere Form eines Portalhubwagens ist der Shuttle Carrier, der jedoch höchstens zwei Container übereinander stapeln kann. Er ist kompakter gebaut und erreicht im Durchschnitt eine höhere Geschwindigkeit im Horizontaltransport als ein voll beladener Straddle Carrier. Ein derartiges Transportfahrzeug kann nur in Bereichen eingesetzt werden, in denen die Stapelhöhe der des Shuttle Carriers entspricht und damit nicht höher als zwei Container beträgt (Arnold u. a. 2002). Bei den Fahrzeugen wird zwischen Single-Load-Carrier (SLCs), welche nur einen Container transportieren können und Multi-Load-Carrier (MLC), welche in der Lage sind, mehrere Container gleichzeitig aufzunehmen, unterschieden. Aktuell in Terminals eingesetzte Fahrzeuge können maximal bis zu zwei Standardcontainer aufnehmen.

Die hohen Personalkosten und schwierige Planbarkeit der Fahrten bei Chassis-Systemen begünstigten die Entwicklung von fahrerlosen Transportsystemen. Ihr Fahrkurs besteht aus einem Gitter von in den Boden eingesetzten Transpondern oder Induktionsspulen, die logisch zu Spuren verschaltet werden. Die Fahrzeuge sind in der Lage ihre eigene Position im Fahrkurs zu bestimmen und werden über Funk gesteuert. Das Routing und die Verkehrsregelung übernimmt ein Steuerungssystem. Fahrerlose Transportsysteme (AGVs) ermöglichen durch hohe Planbarkeit und Präzision einen sicheren Terminalbetrieb. Abbildung 5 zeigt die schematische Darstellung eines AGVs. Ein Nachteil dieser Flurfördersysteme ist deren derzeit noch relativ geringe Geschwindigkeit von maximal 6m/s. Durch die hohe Steuerbarkeit der Fahrzeuge ist es jedoch möglich, eine größere Anzahl von Fahrzeugen einzusetzen, wodurch dieser Nachteil zum Teil ausgeglichen werden kann. Batterieelektrische AGVs verhalten sich sehr ähnlich zu ihren mit Verbrennungsmotoren ausgestatteten Gegenstücken. Anstelle eines Verbrennungsmotors wird ein elektrischer Antrieb verwendet, welcher keinen fossilen Brennstoff verbrennt, sondern die notwendige Energie aus einer Batterie gewinnt.

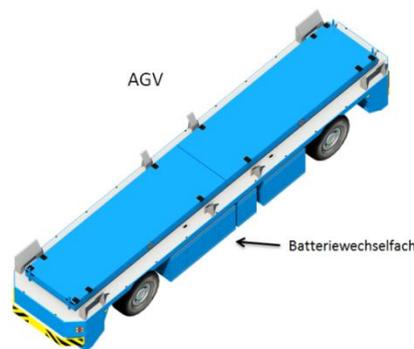


Abbildung 5: AGV

Aktuell wird die Diskussion über die geeignetste Wahl der Flurfördergeräte von zwei Argumenten beherrscht. Einerseits werden die Flexibilität und die Unabhängigkeit der aktiven Fahrzeuge als sehr wichtig erachtet, da nur mit dieser Art von Fahrzeugen auf Lagerkräne verzichtet werden kann und komplizierte Abstimmungsprozesse zwischen Fahrzeugen und Kränen vermieden werden. Andererseits sind die Vorteile automatisierter Lösungen, wie gesteigerte Präzision, bessere Planbarkeit und geringe Personalkosten deutlich. Die Entwicklung automatischer Straddle-Carrier, der sogenannten Automated Lifting Vehicles (ALV), versucht die Vorteile beider Extreme zu kombinieren. ALVs sind vollautomatisch, können aber selbständig Container auf- und abladen. Sie werden seit Dezember 2005 im Container-Terminal in Brisbane (Australien) eingesetzt. Damit war dies der erste Term weltweit, welcher diese Fahrzeuge einsetzt. Momentan gibt es noch einige Probleme für den Einsatz von ALVs beim Transport von übergroßen Containern. Auch die Anschaffungskosten im Vergleich zu bemannten Straddle Carrier sind aktuell noch extrem hoch. Es ist aber davon auszugehen, dass sich dieses System künftig in weiteren Container-Terminals eingesetzt werden.

Container werden vor ihrer Verladung auf ein Containerschiff oder umgekehrt auf einen LKW normalerweise zwischengelagert, da diese nicht sofort verladen werden können. Die durchschnittliche Verweildauer eines Containers im Terminal liegt bei 3-4 Tagen. In Extremfällen jedoch können diese Zeiten jedoch auch deutlich länger ausfallen. Im Allgemeinen wird zwischen statischen, dynamischen und automatisierten Lagersystemen unterschieden. (Bichler u. a. 2010) In einem Container-Terminal haben sich abgesehen von experimentellen Lagersystemen nach (Lehmann 2006) folgende etabliert:

In einem **Blocklager** werden Container in mehreren Ebenen übereinander gestapelt. Zwischen den einzelnen Reihen eines Lagerblocks werden keine Zwischenräume gelassen, sodass eine platz sparende Lagerung möglich ist. Allerdings wird hierdurch der Zugriff auf einzelne Container stark eingeschränkt. Der Zugriff auf bestimmte Container muss von oben erfolgen, da seitlich die Container der mittleren Reihen nicht erreichbar sind. Zum anderen sind Container

2 Container-Terminals

der unteren Ebenen nur erreichbar, wenn vorher die darüberliegenden Container umgestapelt werden. Für den Zugriff auf Container in einem Blocklager werden Portalkräne verwendet, die entweder auf Schienen rollen (Rail-Mounted Gantry Cranes, RMGs) oder auf Rädern (Rubber-Tyred Gantry Cranes, RTGs). Eine Weiterentwicklung der RMGs sind Double Rail-Mounted Gantry Cranes (DRMGs). Sie bestehen aus einem Paar von Kränen unterschiedlicher Größe. Das Besondere hierbei ist, dass der kleinere der beiden Kräne den größeren unterfahren kann. Dadurch sind beide Kräne in der Lage, auf beiden Seiten des Blocklagers zu arbeiten. Im Vergleich hierzu besitzen herkömmliche Blocklager meist einen Pufferbereich in der Mitte des Lagers, in dem für den Landtransport bestimmte Importcontainer und für den Seetransport bestimmte Exportcontainer an den jeweils anderen Kran übergeben. Bei überfahrbaren DRMGs kann dieser Pufferbereich eingespart werden. Außerdem kann bei Ausfall eines Krans der Betrieb immer noch aufrechterhalten werden. RTGs sind im Vergleich zu den Schienen gebundenen RMGs unabhängig von starren Fahrwegen. Sie können auch bei notwendigen Wartungs- und Reparaturarbeiten aus dem Block herausgefahren werden, damit der laufende Betrieb nicht behindert wird. Weiterhin sind sie kleiner, leichter und billiger in der Anschaffung. Jedoch können sie die Umschlagleistung der RMGs nicht erreichen, auch ist die maximale Stapelhöhe geringer. Schlussendlich sind RTGs wartungsintensiver als ihre schienen gebundenen Pendanten. Abbildung 6 zeigt den schematischen Aufbau eines Blocklagers.

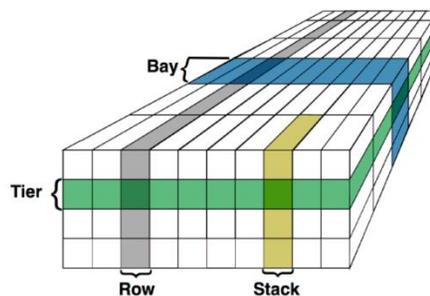


Abbildung 6: Schematischer Aufbau eines Blocklagers

Während Blocklager sich durch eine sehr gute Flächennutzung auszeichnen, ist bei **Flächenlagern** ein leichter Zugriff möglich. Die Container lagern über eine große Fläche auf dem gesamten Terminal verteilt. Ihre Stapelhöhe ist geringer (in der Regel maximal 4 Ebenen), da für die Ein- und Auslagerung der Container keine Portalkräne benutzt werden. Vielmehr sind dafür aktive Flurfördergeräte, wie z.B. Straddle-Carrier, zuständig. Die Einsparung der Investitionskosten für die Portalkräne ist der große Vorteil dieser Lagerungsart, die schlechte Flächennutzung ihr Hauptnachteil. Der Extremfall eines Flächenlagers tritt in Terminals auf, die mit einem Chassis-System arbeiten. Chassis können nicht übereinander gestapelt werden, so dass die Grundfläche des Lagers für alle Container (mit deren Chassis) Platz bieten muss.

In Terminals, in denen eine sehr geringe Fläche zur Verfügung steht, verwendet man das andere Extrem – das **Regallager**. Container werden durch Horizontal- und Vertikalförderer in einem Regallager untergebracht. Diese eher seltene Variante ist z.B. in Hongkong zu finden, wo die geringe Grundfläche durch eine 12-etagige Lagerung kompensiert wird. Die hohen Umschlagzahlen des Terminals in Hongkong zeigen, dass man auch mit dieser Lagerungsform erfolgreich sein kann.

Die genaue Ankunftszeit von Exportcontainern, welche per LKW angeliefert werden, ist unbekannt. Bis zu 30% der Exportcontainer erreichen das Terminal erst, nachdem der Ladeprozess bereits begonnen hat. Aufgrund der fehlenden Informationen muss der zuständige Dispatcher Echtzeitinformationen auswerten und die Transport- sowie Ladesequenzen immer wieder aktualisieren. (Winter und Zimmermann 1998)

2.2 Elektrische Verbraucher im Terminal

Im folgenden Abschnitt werden die unterschiedlichen elektrischen Verbraucher eines Container-Terminals dargestellt. Abbildung 7 stellt beispielhaft die Zusammensetzung der Leistungsaufnahme in einem Container-Terminal dar. Die Leistungsaufnahme wurde dabei an einem typischen Arbeitstag in einem realen Terminal protokolliert. Die dargestellten Verbrauchsdaten sind nur exemplarisch und werden von Terminal zu Terminal und von Tag zu Tag variieren. Dennoch kann eine grundlegende Gemeinsamkeit erkannt werden. So ist zu erkennen, dass die Kühlcontainer (Orange), Bürogebäude (Grün) und die Beleuchtung (Blau) die Grundlast des Terminals bilden, wobei diese relativ stabil und konstant im Laufe des Tages bleibt. Gut zu erkennen ist, dass die Beleuchtung lediglich in der Nacht eingeschaltet wird und am Tage keine elektrische Leistungsaufnahme verursacht. Die in dem untersuchten Terminal eingesetzten Containerbrücken STS-Kräne (Pink) und RTG-Kräne (Braun) haben hingegen einen ständig wechselnden Spitzenanteil an der Gesamtleistungsaufnahme im Terminal. Diese werden je nach Hafenauslastung unterschiedlich stark beansprucht und produzieren daher eine vom Containerumschlag abhängige Last (Hui u. a. 2014).

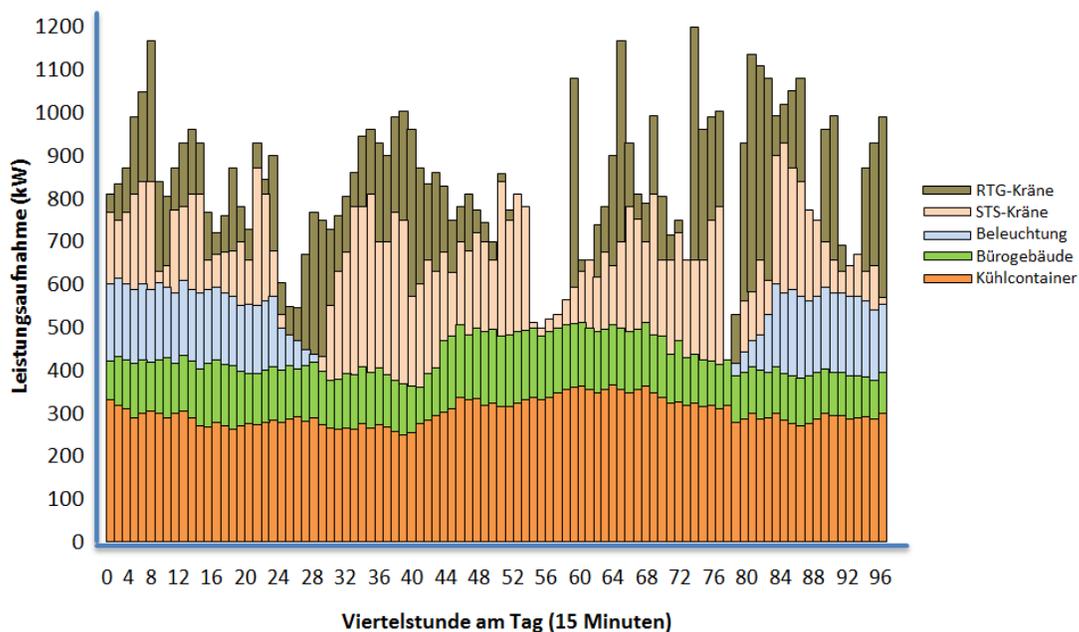


Abbildung 7: Durchschnittliche Leistungsaufnahme in einem Container-Terminal aufgeteilt nach Verbrauchsgruppen (Hui u. a. 2014)

2.2.1 Containerkräne

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, gibt es zwei Typen von Kränen, welche in Container-Terminals eingesetzt werden. Dies sind zum einen Containerbrücken, welche für die Beladung der Containerschiffe zuständig sind und zum anderen Portalkräne, die in verschiedenen Bereichen des Terminals vorkommen können. Die Leistungsaufnahme der Containerkräne variiert stark in Abhängigkeit der Terminalauslastung. Abbildung 8 verdeutlicht die schwankende Leistungsaufnahme beispielhaft am Verbrauch eines Portalkrans während einem Umschlagsprozess. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass es sich um einen Portalkran der neueren Generation handelt, welcher bereits das Prinzip der Energierückgewinnung nutzt. Hierbei wird freigewordene Energie beim Absenken eines Containers und beim Bremsen der Containerkatze gewonnen.

Abbildung 8 zeigt die vereinfachte Leistungsaufnahme eines Portalkrans bei der Durchführung eines Containerumschlags. Es ist zu erkennen, dass die Leistungsaufnahme stark vom gerade durchgeführten Prozess (Container heben, Container senken, Beschleunigen,...) eines Containerkrans abhängt. Auch äußere Faktoren, wie z.B. das Gewicht eines zu hebenden Containers oder die aktuelle Windgeschwindigkeit, üben Einfluss auf die nötige Leistungsaufnahme. Eine detaillierte Übersicht über mathematische Funktionen zur Bestimmung der Leistungsaufnahme einer Containerbrücke gibt (Tran 2012).

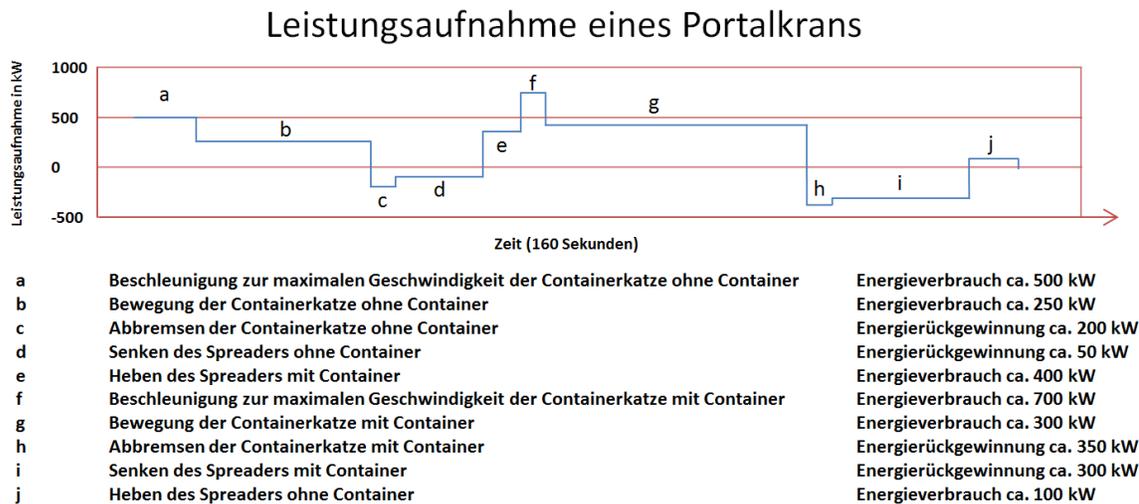


Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der Leistungsaufnahme eines Portalkrans bei einer Containerumschlagoperation. (Adaptiert nach (Le 2012))

Neben der Leistungsaufnahme, welche durch Umschlagsprozesse erzeugt werden, beziehen einzelne Komponenten auch elektrische Leistung unabhängig von Umschlagsprozessen. (Johanson 2010). Hierzu zählen:

- **Motorkühlung.** Die Motorkühlung erfolgt im Normalfall durch eine Luftkühlung, angetrieben durch elektrische Ventilatoren. Aber auch andere Lösungen wären möglich, wie z.B. die Verwendung einer Wasserkühlung, wobei hier Wasserdruckpumpen Ventilatoren als elektrische Verbraucher ablösen.
- **Hydraulikpumpen.** Um einen Container zu heben, muss der Spreader der Containerbrücke (Containergeschirr) eine physische Verbindung zum Container herstellen. Die hierfür benötigte kinetische Energie wird durch elektrische Hydraulikpumpen bereitgestellt.
- **Flutlichter.** In großen Container-Terminals werden Container kontinuierlich umgeschlagen. In der Dämmerung sowie in der Nacht sind Flutlichter an den Containerbrücken angebracht, um dem Kranführer ein Arbeiten auch unter schlechten Sichtbedingungen zu ermöglichen. Unabhängig hiervon gelten in vielen Ländern, darunter auch Deutschland, gesetzliche Bestimmungen, welche die Verwendung von Flutlichtanlagen auch am Tage vorschreiben.

- **Containerbrückenbeleuchtung.** Um einen sicheren Arbeitsablauf an Containerbrücken zu gewährleisten, verfügen diese über eine Umgebungsbeleuchtung. Je nach Landesgesetzen sind auch diese Beleuchtungselemente beim Betrieb des Krans unabhängig von der Tageszeit einzuschalten.
- **Klimaanlage.** Abhängig von dem Land in welchem sich Containerbrücken im Einsatz befinden, verfügen diese eventuell über eine Klimaanlage. Der Energieverbrauch der Klimaanlage ist jedoch so niedrig, dass dieser bei der Modellbildung vernachlässigt werden kann.
- **Kranbewegung.** Unter einer Kranbewegung wird hier die Bewegung einer Containerbrücke an der Kaimauer verstanden. Für diesen Fortbewegungsprozess wird elektrische Leistung benötigt.

Zusammen haben diese Energieverbrauchskomponenten ca. einen Anteil von 25% am Gesamtenergiebedarf einer Containerbrücke unter Vollauslastung. Ist eine Containerbrücke nicht voll ausgelastet, steigt der prozentuale Anteil des statischen Verbrauchs so lange, bis die Komponenten abgeschaltet werden, z.B. dann, wenn eine Containerbrücke über einen längeren Zeitraum keine Containerumschlagsaufgaben übernehmen wird.

Bisher wurden keine vollautomatischen Containerbrücken entwickelt. Die in Containerbrücken eingesetzten Bedienmannschaften müssen in gewissen Abständen ausgetauscht werden. Normalerweise geschieht dies zu einem Zeitpunkt an allen Containerbrücken gleichzeitig. Abbildung 9 verdeutlicht dies am Beispiel des Container-Terminals Altenwerder. Der in rot dargestellten Containerumschlag an den Containerbrücken erreicht in gleichmäßigen Abständen einen lokalen Tiefpunkt. Dieser Tiefpunkt tritt alle 8 Stunden zum Schichtwechsel der Bedienmannschaften auf. Aus Sicherheitsgründen muss eine Containerbrücke während eines Schichtwechsels ihren Betrieb unterbrechen. Während der Schichtwechsel können keine Containerumschläge durchgeführt werden, wodurch die Leistungsaufnahme in dieser Zeit sinkt. Lediglich die Basisverbraucher beziehen zu diesem Zeitpunkt elektrische Leistung.

Containerbrücken wechseln dynamisch die Position am Kai, wobei ein spezieller Fahrmotor die benötigte elektrische Leistung zur Verfügung steht. Portalkräne verhalten sich ähnlich wie eine Containerbrücke. Jedoch handelt es sich hierbei im Normalfall um ein vollautomatisiertes Gerät, welches keinen Kranführer benötigt. Aus diesem Grund wird auch keine Klimaanlage benötigt, wodurch die Basisleistungsaufnahme verringert wird. Auch müssen keine Schichtwechsel durchgeführt werden.

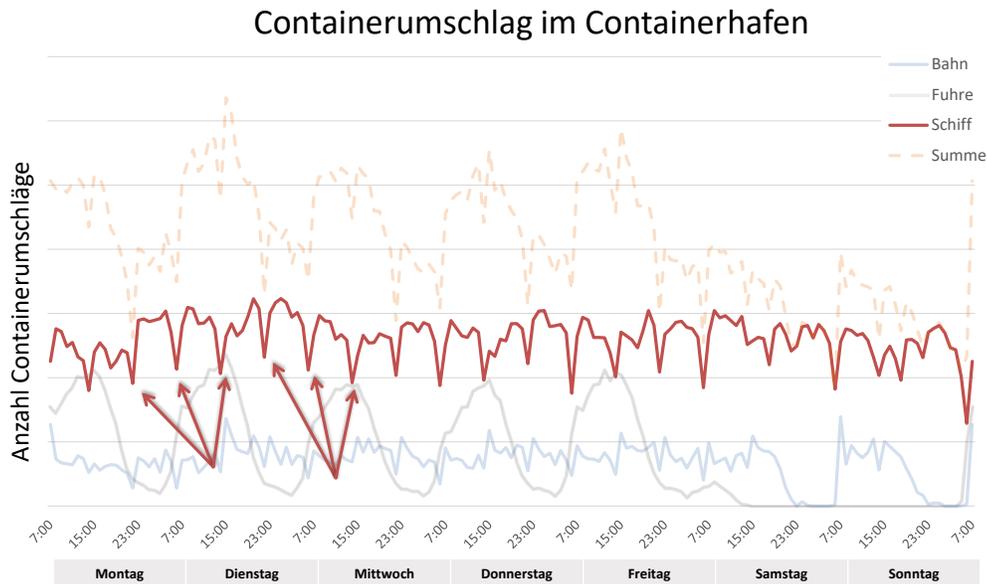


Abbildung 9: Containerumschlag im Containerhafen

2.2.2 Kühlcontainer

Ein Kühlcontainer wird als isolierter kühlbarer Behälter definiert, der an Kaltluftsysteme angeschlossen wird oder über ein eigenes Kältesystem verfügt. Klassischerweise wurden sogenannte Porthole-Kühlcontainer eingesetzt, wobei der Container direkt mit Kaltluft versorgt wurde und über kein eigenes Kühlaggregat verfügt. Hierfür müssen Containerschiffe über eigene Ladungskühlanlagen und Kühlstäbe verfügen, welche Kaltluft zu den Containern führen. Erste Versuche, Kühlcontainer mit eigenen Kühlaggregaten auszustatten, hatten nur mäßigen Erfolg. Insbesondere die Fracht von Früchten war problematisch, da diese spezielle Ansprüche an die Umgebungsbedingungen haben. Durch Fortschritte in der Kältetechnik, Messtechnik und Automation wurde es jedoch möglich, den Transport auch von anspruchsvollen Frachten, wie z.B. Südfrüchte, in Integralcontainern durchzuführen. Seit Anfang der 2000er Jahre setzte sich der Integralcontainer zunehmend durch und verdrängte die alte Kühltechnik bei Porthole-Container. Containerschiffe sind seitdem standardgemäß mit einer großen Anzahl von Stromanschlüssen ausgestattet, an denen Kühlcontainer betrieben werden können. Ebenso finden sich in Container-Terminals spezielle Lagerbereiche, welche über eigene Stromanschlüsse für Kühlcontainer verfügen. Es ist zu beachten, dass Kühlcontainer nicht ununterbrochen über eine Leistungsaufnahme zur Kühlung verfügen. Die Kühlaggregate werden nur bei Bedarf eingeschaltet, sobald die Solltemperatur zu stark abweicht. Somit ist nicht davon auszugehen, dass sämtliche Kühlcontainer auf einem Schiff oder in einem Terminallager gleichzeitig elektrische Leistung beziehen. Unabhängig von der Kühlleistung ist jedoch immer ein Basisver-

2 Container-Terminals

brauch der Lüfter zur Luftumwälzung gegeben. (Hochhaus 1996) Im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Verwendung von Integralcontainern ein Standard ist und keine anderen Technologien mehr eingesetzt werden. Abbildung 10 zeigt einen Integral-Kühlcontainer mit externem Kühlaggregat.



Abbildung 10: Integral-Kühlcontainer mit externem Kühlaggregat (Horn 2015)

Die Leistungsaufnahme eines Integral-Kühlcontainers hängt von vielen unterschiedlichen Faktoren ab, was die Aussage über einen durchschnittlichen Energieverbrauch sehr schwierig macht. (Wild 2004).

- der vorhandenen Umgebungstemperatur
- der Einbringtemperatur der zu kühlenden / beheizenden Produkte
- der Einbringmenge
- der Art der Ladung
- der gewählten Kühltemperatur
- der Art der Verpackungen der kühlenden / beheizenden Produkte
- dem Zu- bzw. Entladezyklus (häufiges Öffnen führt zu einem höheren Verbrauch)
- dem Standort des Containers
- der Containergröße (20` oder 40`)
- sonstige Faktoren (Alter der Isolierung, Kompressortyp, Kältemittel, etc.)

Eine Arbeit, die sich ausführlich mit den Energieverbräuchen von Kühlcontainern beschäftigt, wurde 2004 von Yves Wild veröffentlicht (Wild 2004). Der Basisverbrauch eines Kühlcontai-

ners wird mit 0,5kW und die maximale Leistungsaufnahme mit 6kW angegeben. Es wird eine korrigierte mittlere Leistungsaufnahme für Integral-Kühlcontainer angegeben. Diese beträgt unter Berücksichtigung der statistischen Einschaltwahrscheinlichkeit 1,94kW/TEU und 3,02kW/FEU.

2.2.3 Allgemeine Verbraucher

Zu den allgemeinen Verbrauchern eines Container-Terminals zählen die Beleuchtung und der Stromverbrauch der Bürogebäude.

In einem Container-Terminal kommen unterschiedliche Beleuchtungsgeräte zum Einsatz. Dazu gehören Hochlichtmasten (*High mast light Poles*), Flutlichter, Straßenbeleuchtung und Parklichter. Es gilt zu unterscheiden zwischen Beleuchtungselementen, welche permanent in Betrieb sind, und jenen, die nur bei Bedarf eingeschaltet werden. Zu den permanenten Beleuchtungselementen zählen die Hochlichtmasten. Alle anderen Beleuchtungselemente werden bei Bedarf oder in der Nacht hinzugeschaltet. Die Gebäudebeleuchtung variiert stark von Terminal zu Terminal. Die Hauptgebäude sind Wartungsgebäude für Terminalequipment, Servicegebäude für Lastwagenfahrer, Kühlcontainerwascheinrichtung, Bürogebäude und ein Operationsgebäude. (URS und AECOM 2012)

In Bürogebäuden ist die dort vorhandene IT-Infrastruktur der größte Verbraucher. Der Strombedarf variiert zwischen Tag und Nacht, da in der Nacht nur eine Basismannschaft für den Betrieb zuständig ist und viele IT-Komponenten und Beleuchtungselemente abgeschaltet sind.

2.2.4 Transportfahrzeugversorgung

Elektrische Transportfahrzeuge beziehen ihre Energie aus einem geeigneten Energieträger, einer Batterie. Diese kann fest in das Fahrzeug integriert sein oder je nach Bedarf ausgewechselt werden. Bei fest in das Fahrzeug integrierten Batterien müssen die Fahrzeuge für einen Batterieladevorgang aus dem normalen Transportgeschehen entfernt werden und stationär geladen werden. In dieser Zeit stehen die Fahrzeuge nicht für weitere Transportvorgänge zur Verfügung. Bei einem Wechselprinzip wird eine entladene Batterie gegen eine geladene Batterie ausgetauscht. Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten erläutert, eine Batterie zu laden.

2.2.4.1 Batteriewechselstation

In einer Batteriewechselstation werden Wechselbatterien eines Transportfahrzeugs vollautomatisch gewechselt. Abbildung 11 zeigt den schematischen Aufbau einer Batteriewechselstati-

2 Container-Terminals

on. Diese besteht aus einem Regalbediengerät, welches den Wechsel einer Batterie durchführt. Leere Batterien werden in einem Batterieregal gelagert, welches über Aufbewahrungsfächer und über Ladefächer verfügt. Aufbewahrungsfächer dienen nur der Zwischenlagerung einer Batterie, während Ladefächer über ein Ladegerät verfügen, welche elektrische Leistung übertragen kann.

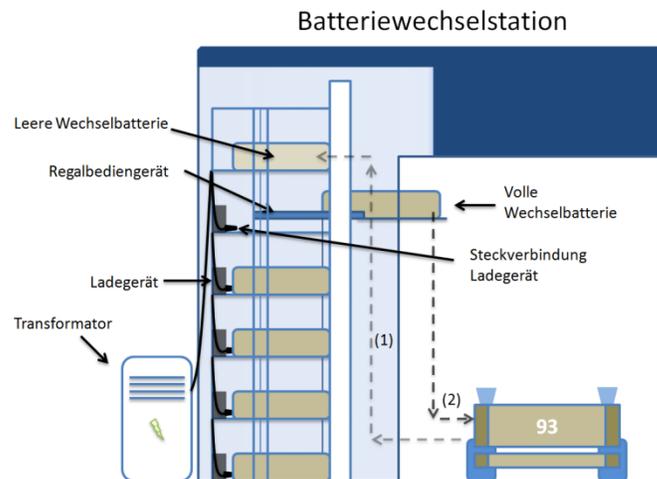


Abbildung 11: Schematischer Aufbau einer Batteriewechselstation.

Im Folgenden wird der genaue Ablauf eines vollautomatischen Batteriewechselvorgangs nach (MacCarley 2000) beschrieben. Das Fahrzeug muss relativ zum Manipulator oder der Manipulator relativ zum Fahrzeug ausgerichtet werden.

1. Die elektrische Verbindung der entladenen Batterie muss vom Fahrzeug getrennt werden.
2. Die physikalischen Halterungen zwischen Batterie und Batteriehaltewanne muss geöffnet werden.
3. Die Wechselbatterie muss entnommen werden.
4. Einlagerung der entladenden Batterie in ein Aufbewahrungs- oder Ladefach.
5. Entfernen einer geladenen Wechselbatterie aus einem Ladefach.
6. Die geladene Batterie muss in die Batteriehaltewanne des Fahrzeugs eingesetzt werden.
7. Die physikalischen Halteverbindungen zwischen Fahrzeugwanne und Wechselbatterie müssen geschlossen werden.
8. Elektrische Verbindungen zwischen Wechselbatterie und Fahrzeug herstellen.

9. Sicherung des Manipulators, um dem Fahrzeug eine sichere Ausfahrt aus der Wechselstation zu ermöglichen.

Es existieren eine Reihe von möglichen Lösungen, um einen vollautomatischen Batteriewechsel durchzuführen. Im Folgenden wird eine Übersicht über existierende Lösungen gegeben.

- Zugriff auf die Wechselbatterie vom Boden des Fahrzeugs.
- Die Nutzung eines Anhängers, in welchem die Batterie transportiert wird.
- Zugriff auf die Wechselbatterie von der Seite. (Abbildung 11 zeigt einen automatisch arbeitenden Batteriewechsel bei der Verwendung einer seitlich angebrachten Batteriehaltewanne.)
- Zugriff auf die Wechselbatterie von vorne oder hinten.

Diese Übersicht ist nicht komplett und neue Innovationen sind immer möglich. Detailliertere Informationen gibt (MacCarley 2000). Ein Ladefach in der Batteriewechselstation beinhaltet normalerweise ein Ladegerät, welches die Ladung der Batterie übernimmt. In dieser Arbeit wird die Ladung von Batterien vereinfacht betrachtet, indem die C-Laderate verwendet wird. Eine Laderrate von 1C meint, dass eine Wechselbatterie von 0 auf 100% in einer Stunde geladen werden kann. Eine Laderrate von 2C meint, dass eine Batterie in einer halben Stunde von 0 auf 100% geladen werden kann. Detaillierte Informationen über den Ladeprozess von Batterien geben Kester und Buxton (2008) (Kester und Buxton 1998).

2.2.4.2 Ladesäulen

Eine Möglichkeit stellt das konduktive Laden per Kabel, Stecker und Buchse dar. Hierzu werden Elektrofahrzeuge nahe einer Ladestation positioniert und eine physikalische Verbindung zwischen Batterie und dem Batterieladegerät hergestellt. Anschließend wird die Batterie des Fahrzeugs geladen. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist es, dass ein Fahrzeug während des Ladevorgangs nicht für Transportaufgaben zur Verfügung steht, sondern so lange warten muss, bis die Batterie vollständig geladen ist. (Wietschel, Schraven, und Kley 2011)

2.2.4.3 Induktives Laden

Eine Alternative zum konduktiven Ladeverfahren stellt die kabellose Energieübertragung dar, wobei die Energie ohne elektrische Kontakte zwischen Ladestation und elektrischen Verbraucher übertragen wird. Es gibt unterschiedliche Übertragungstechniken zur kabellosen Energieübertragung, wobei nach Kley (2010) (Wietschel, Schraven, und Kley 2011) nur die stationäre induktive Technik bisher technisch einwandfrei umsetzbar ist. Hierbei müssen Fahrzeuge über oder neben einer Ladestation stehen, um Energie zu übertragen. Mit Hilfe der induktiven

Technik ist es zumindest theoretisch möglich, Fahrzeuge dynamisch während der Fahrt zu laden. Ein Vorteil der induktiven Energieübertragung ist insbesondere die Möglichkeit Fahrzeuge auch bei kurzen Stopps, etwa unter Containerbrücken, zu laden, ohne dass ein Nutzereingriff erforderlich ist. Durch eine Erdung der stationären Komponenten und einen Potenzialausgleich über die Fahrzeugmasse wird die Technik potenzialfrei zum Netz und berührungssicher, wenn die Übertragungsstrecke unzugänglich gemacht wird. Da bei der Energieübertragung weder Kontaktbelastungen zwischen primärer und sekundärer Einheit auftreten und auch keine Kabelbrüche zu befürchten sind, entsteht ein geringerer Verschleiß im Vergleich zum konduktiven Ladeverfahren. Hierdurch lässt sich der Wartungsaufwand reduzieren.

2.2.4.4 Batterietypen

Für den Einsatz im Fahrzeug existieren heute im Wesentlichen drei Batterietechnologien. (Warrier, Osborne, und Odama 2009)(Bühler u. a. 2015)(Axsen, Kurani, und Burke 2010)

Blei-Säure-Batterien können hohe Leistungen bereitstellen und dabei einen hohen Wirkungsgrad erreichen. Sie sind aufgrund einer ausgereiften Fertigungstechnik und der günstig zu beziehenden Rohstoffe relativ günstig in der Anschaffung. Auch der Wartungsaufwand für diesen Batterietyp ist sehr gering bei einer gleichzeitig hohen Zuverlässigkeit und Sicherheit der Batterie. Der Nachteil dieses Batterietyps ist eine eher niedrige Batteriedichte und eine hohe Degeneration bei wiederholter Tiefentladung. Aufgrund der Eigenschaften der Batterie werden diese insbesondere als Starterbatterien in Fahrzeugen und in Notstromversorgungssystemen eingesetzt.

Nickel-basierte Batterien werden mit Cadmium kombiniert. Die Vorteile von Nickel-Cadmium (NiCd) liegen in den niedrigen Herstellungskosten und in der Tatsache, dass sie auch in einem hohen Temperatureinsatzbereich lange Lebensdauern aufweisen. Die Nachteile liegen in einer geringen Energiedichte und einer hohen Selbstentladungsrate. Der dazu auftretende Memory-Effekt und das verwendete giftige Cadmium machen den Einsatz der Batterie in Fahrzeugen unwahrscheinlich.

Nickel-Metallhydrid (NiMH)-Batterien werden mit einem Metallhydrid kombiniert. Sie haben ebenfalls eine hohe Selbstentladungsrate, verfügen jedoch im Gegensatz zu NiCd-Batterien über keinen Memory-Effekt. Aufgrund der eingesetzten Materialien ist dieser Batterietyp besonders robust und umweltfreundlich. Höhere Energiedichten im Vergleich zur Blei-Säure- und NiCd-Batterie ermöglichen den Einsatz in HEVs. Tiefentladungen verringern jedoch deutlich die Lebenserwartung der Batterie. Die Kosten dieses Batterietyps sind sehr hoch und werden aufgrund ihres weit verbreiteten Einsatzes wohl auch nicht mehr signifikant sinken.

Lithium-basierte Batterien können auf verschiedenen Elektrodenmaterialien beruhen, in denen sich Lithium-Ionen einlagern, die bei Ent-/Beladung zwischen den Elektroden wandern. Lithium-Ionen (Li-Ion)-Batterien weisen eine hohe Energiedichte, eine geringe Selbstentladung und keinen Memory-Effekt auf. Lithium zeigt jedoch mit Wasser oder Sauerstoff eine hohe Reaktivität, sodass versucht wird, durch verschiedene Elektrolyt- und Elektrodenmaterialien Li-Ionen Batterien sicherer und stabiler zu machen. Um die Sicherheit im Fahrzeugeinsatz zu gewährleisten, muss ein Batteriemanagementsystem die Batterie in einem engen Toleranzband halten. Der Einsatz anderer Elektrodenmaterialien, wie Eisenphosphor oder Manganoxid kann helfen, die Reaktivität zu reduzieren. Allerdings wird hierbei die Energiedichte reduziert (Kley 2011). Aufgrund dieser Anforderungen und der eingesetzten Materialien ist dieser Batterietyp noch sehr kostenintensiv.

Tabelle 1: Vergleich der Batterietechnologien Blei-Säure und Li-Ionen nach (H. Wenzel und Wedel 2015)

Blei-Säure	Li-Ionen
Leichte Bestimmung des SOC: Zellspannung ist proportional zur Säurekonzentration und damit zu SOC	Bestimmung des Ladezustands (SOC) durch komplexe mathematische Algorithmen nur annähernd möglich
Monatliche Vollladungen und 2 mal pro Jahr „refresh“ Ladung zur Erhöhung der Batterielebensdauer notwendig.	Kontinuierliches Monitoring der Zellspannung und aufwendiges BMS notwendig, um die Batteriesicherheit zu gewährleisten.
Schnelle Selbstentladung: je nach Batterietyp und –alter bis zu 30% pro Monat bei 20 Grad.	Langsame Selbstentladung: unter 2% pro Monat bei 20 Grad
Maximale Entladetiefe (DODmax) bei 60%, tiefere Entladung lässt die Batterie beschleunigt altern	Maximale Entladetiefe bei 80%, tiefere Entladung lässt die Batterie beschleunigt altern

2.3 Planungsprobleme in Seehafen Container-Terminals

Voß und Koster geben einen detaillierten Überblick über die verschiedenen Planungsprobleme in maritimen Seehäfen (Vis und De Koster 2003). Hierzu gehören unter anderem die Liegeplatzplanung, Containerbrückenzuweisung, Transportfahrzeugzuweisung, Lagerauswahl sowie der An- und Abtransport von Containern per Bahn oder Lastkraftwagen. Zu den verschiedenen Planungsproblemen im Terminal werden umfangreiche Quellen benannt, welche sich detaillierte Lösungen der einzelnen Probleme vorstellen und diese miteinander vergleichen. Im Ausblick wird ein Problem der aktuellen Forschung fokussiert. Die meisten Ansätze beschäftigen sich lediglich mit einem Typ von Container-Umschlagsmitteln. Eine Aufgabe der zukünftigen Forschung besteht darin, den gleichzeitigen Einsatz von unterschiedlichen Transportmitteln im Terminal zu testen. Etwa den parallelen Einsatz von AGVs und Chassis Systemen. Es gibt eine Vielzahl von Arbeiten, welche die einzelnen Planungsprobleme im Container-Terminal für die unterschiedlichen Terminalbereiche isoliert betrachten, wobei die Abhängigkeiten zu weiteren Terminalbereichen größtenteils ausgeblendet werden. Eine der zukünftigen Herausforderungen ist die kombinierte Betrachtung von Wechselwirkungen der unterschiedli-

chen Planungsprobleme, da die einzelnen Probleme für sich betrachtet nicht immer weiter optimiert werden können (Stahlbock und Voß 2007). Im Folgenden werden die wichtigsten Planungsprobleme vorgestellt.

2.3.1 Liegeplatzplanung

Die Liegeplatzplanung (Berth allocation problem - BAP) behandelt die Zuordnung von Containerschiffen an eine konkrete Kaimauerposition. Durch die gewählte Methode wird festgelegt, wann und wo ein Containerschiff am Kai anlegen soll. Für die Planung wird ein Containerschiff meist als zweidimensionales Objekt betrachtet, wobei die Schiffsgröße gegeben ist. Die Operationszeit des Schiffes im Hafen muss auf Grundlage der umzuschlagenden Container geschätzt werden. Ziel der Planung ist es, jedem ankommenden Schiff schnellstmöglich einen Kaimauerplatz zuzuweisen, wobei die verfügbaren Kaimauerpositionen für jedes Schiff einen unterschiedlichen Nutzen aufweisen. Arbeiten, die sich mit der BAP beschäftigen, wurden u.a. von Guan und Cheung (Guan und Cheung 2004), Dai et al. (Dai u. a. 2008) und (Günther und Kim 2006) veröffentlicht.

2.3.2 Containerbrückeneinsatzplanung

Die Containerbrückeneinsatzplanung (Crane Scheduling Problem – CSP) behandelt die Zuordnung von Containerbrücken zu den am Kai liegenden Schiffen. Die Zuordnung hat großen Einfluss auf die Operationszeit der Containerschiffe. Für diesen Planungsbereich existiert eine Vielzahl von Untersuchungen, wobei unterschiedliche Schwerpunkte in der Modellierung, verschiedene Zielsetzungen und Optimierungsmethoden betrachtet werden. Arbeiten, welche sich mit dem CSP beschäftigen, wurden u.a. von Bierwirth und Meisel (Meisel und Bierwirth 2006) und Zhu und Lim (Y. Zhu und Lim 2006) veröffentlicht.

2.3.3 Stau- und Entladeplanung

Während die groben Daten der Schiffsankünfte bereits weit im Voraus bekannt sind, erfolgen detailliertere Informationen über die zu entladenden Container, erst kurz vor Ankunft der Schiffe. Diese Informationen, die in Form eines Stauplans übermittelt werden, beinhalten die genaue Position der Container in jeder Bay, den Containertyp und ihr Gewicht. Ein Beispiel für einen übermittelten Stauplan einer Reederei ist der Abbildung 12 zu entnehmen. Durchschnittlich werden diese Informationen etwa zwei Tage vor Ankunft des Containerschiffs dem Zielhafen übermittelt. Informationen über Exportcontainer werden von Zeit zu Zeit bis ca. einen Tag vor Ankunft des Schiffes aktualisiert. Während des Be- und Entladeprozesses wird der Stauplan vom zuständigen Dispatcher vervollständigt, indem jeder Position im Schiff ein konkreter Container des passenden Typs zugewiesen wird. Nachdem der Entladeprozess been-

det wurde, werden die Exportcontainer der zuvor bestimmten Ladesequenz folgend zu den Containerbücken transportiert. Hierbei wird für jede Bay eine eigene Ladesequenz erstellt. Um Wartezeiten während dem Beladeprozess zu minimieren, sollte die Transportsequenz der Container der Ladesequenz entsprechen (Steenken, Winter, und Zimmermann 2001). Bis heute (Stand 2015) enthalten die übermittelten Staupläne oftmals fehlerhafte Informationen. Diese betreffen sowohl die Import- als auch Exportcontainer. Hierbei können falsche Anzahlen, fehlerhafte Gewichtsinformationen oder auch falsche Typinformationen vorliegen. Aus diesem Grund müssen beim Be- und Entladeprozess immer wieder Plananpassungen in Echtzeit vorgenommen werden (Pacino u. a. 2011).

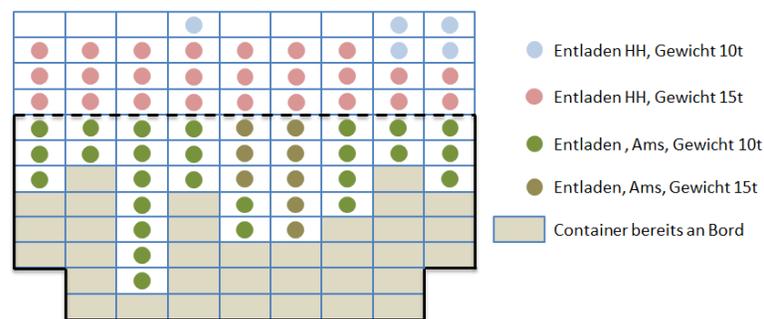


Abbildung 12: Beispiel eines Stauplans übermittelt durch eine Reederei
(Adaptiert nach (Steenken, Winter, und Zimmermann 2001))

2.3.4 Transportplanung (Vehicle Dispatching Problem - VDP)

Die Transportplanung betrachtet die einzelnen Containertransporte durch Transportfahrzeuge. Das VDP führt die Bereiche der Containerbrücken- und der Yardplanung (SLP) zusammen, da sich durch diese Bereiche die Distanzen für die durchzuführenden Containertransporte ergeben. Es wird zwischen einer Online-Einsatzplanung und einer Offline-Planung unterschieden. Bei der Online-Einsatzplanung werden Entscheidungen erst dann getroffen, wenn sie unmittelbar benötigt werden und anschließend sofort ausgeführt. Diese Art der Planung wird häufig in sehr dynamischen Planungsumgebungen eingesetzt. Bei einer offline-Einsatzplanung werden sämtliche Entscheidungen über einen bestimmten Zeitraum vorausgeplant (Lehmann 2006).

2.3.5 Container Stellplatzzuweisung

Die Yardorganisation (Storage Space Allocation und Location Assignment) betrachtet die Verteilung ankommender Containerströme auf die Yard-Lagerplätze. In der Literatur sind dabei

sehr unterschiedliche Modelle zu finden, die einerseits die Lagerung lediglich andeuten und andererseits sehr speziell und differenziert betrachten. Grob kann zwischen zwei Arten von Modellen unterschieden werden. Zum einen existieren Modelle, welche den Fokus auf die Block-Zuordnung legen (Storage Space Allocation), von der exakten Positionierung des Containers in dem Block jedoch abstrahieren (Location Assignment). (Stahlbock und Voß 2007)

2.3.6 Batteriewechsel- und Ladeplanung

Ein neues Planungsproblem, welches sich aus dem Einsatz von Elektrofahrzeugen im Container-Terminalbetrieb ergibt, ist die Batteriewechselplanung (BWP). Wird ein Batteriewechselkonzept wie im Container-Terminal Altenwerder eingesetzt, müssen die Zeitpunkte der Batteriewechsel geplant und koordiniert werden. Hierbei kann ein reaktiver oder ein geplanter Ansatz genutzt werden. Bei einem reaktiven Ansatz wird ein Batteriewechsel immer dann durchgeführt, wenn ein Batteriewechsel unmittelbar benötigt wird. Dies kann z.B. bei der Unterschreitung eines festgelegten Batterieladezustandes sein. Bei einem geplanten Ansatz werden die Zeitpunkte der Batteriewechsel im Voraus geplant und koordiniert. Eine geplante Festlegung der Batteriewechselzeitpunkte kann durchaus Sinn machen, um z.B. Stauungen vor der Station zu vermeiden. Diese können auftreten, wenn zu viele Fahrzeuge zu einem ähnlichen Zeitpunkt einen Batteriewechsel benötigen.

Ein weiteres Planungsproblem, welches sich ergibt, ist die Batterieladeplanung (BLP). Auch hier können reaktive oder geplante Ansätze genutzt werden. Bei einem reaktiven Ansatz wird eine Batterie geladen, sobald diese in der Batteriewechselstation eingelagert wurde. Bei einem geplanten Ansatz wird die Batterie erst zu einem späteren Zeitpunkt geladen. Dies ermöglicht auch die Vermarktung von Lastverschiebungspotenzialen, wie in Abschnitt 1 beschrieben. Abbildung 13 zeigt beispielhafte Batterieaufenthaltszeiten in einer Batteriewechselstation.

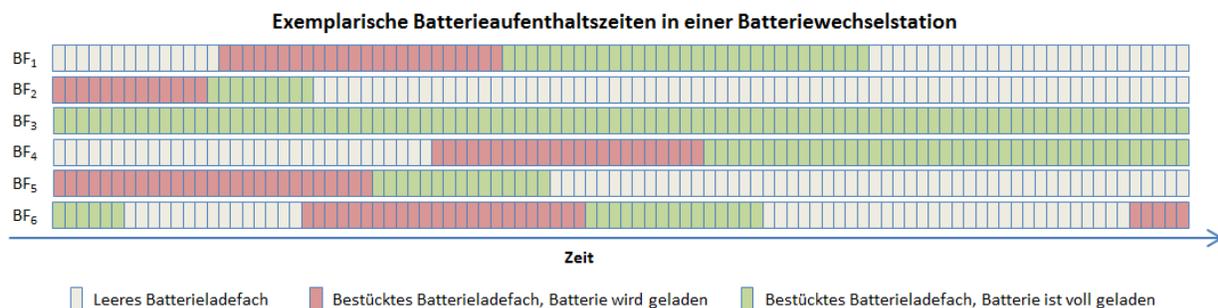


Abbildung 13: Exemplarische Batterieaufenthaltszeiten in einer Batteriewechselstation

Ein Kasten entspricht einer Zeitspanne von 15 Minuten. Die blau dargestellten Kästen repräsentieren ein leere Batterieladefach ($BF_1 \dots BF_6$). Rote Kästen repräsentieren eine in der Lade-phase befindliche Wechselbatterie. Grüne Kästen repräsentieren eine vollgeladene Batterie, welche sich noch in einem Batterieladefach befindet. Es ist zu erkennen, dass in dem gezeigten Beispiel die Batterien nach ihrer Lade-phase noch über einen längeren Zeitraum ungenutzt in der Station verweilen. Dieser Zeitraum könnte dazu genutzt werden, Lastverschiebungspotenziale zu nutzen.

2.3.7 Kombinierte Planungsprobleme

Aufgrund der starken Abhängigkeiten der Terminalbereiche untereinander gibt es auch Ansätze, welche eine kombinierte Betrachtung unterschiedlicher Problembereiche fokussieren. Meisel et al. (Meisel und Bierwirth 2006) entwickelten ein heuristisches Verfahren, welches die Schiffsliegeplatzplanung und die Containerbrückenzuweisung kombiniert betrachtet, um die zur Verfügung stehenden Ressourcen besser zu nutzen. Weitere kombinierte Modelle wurden von (Legato, Mazza, und Trunfio 2010) (Zeng und Yang 2009) veröffentlicht.

3. Geschäftsanwendungsfälle durch Demand Side Integration

Im folgenden Abschnitt geht es darum, aufzuzeigen, welche Geschäftsanwendungsfälle geeignet sind, um im Rahmen des Demand Response und der Demand Side Integration genutzt werden zu können. Ziel ist es dabei, marktwirtschaftliche Vorteile zu erlangen. Die aufgeführten Möglichkeiten beziehen sich explizit auf den deutschen Strommarkt und sind so eventuell nicht auf andere Länder übertragbar.

3.1 Netzentgeltbefreiung

Durch die Stromentgeltverordnung (StromNeV) ist jeder Nutzer verpflichtet, Entgelte für die Nutzung der Stromnetze zu entrichten. Dabei ist ein fester Betrag pro bezogener kWh entnommener Leistung zu bezahlen, wobei die Preise je nach Region, Spannungsebene und Netzbetreiber variieren. Durch die Netzentgelte werden die Kosten für Wartung und Betrieb der bestehenden Netze (inklusive der Beschaffung von Regel- und Ausgleichsenergie) und den Ausbau der Netze gedeckt. Die Netzentgelte werden in einem sogenannten Briefmarkentarif berechnet. Dies bedeutet, dass pro bezogener kWh das gleiche Entgelt berechnet wird unabhängig vom Zeitpunkt der Entnahme und der Übertragungsdistanz. (Consult 2012) Mit der letzten Novellierung der StromNeV im Jahre 2014 ist es nach §19 Abs. 2 S.2 Industriebetrieben möglich, unter bestimmten Voraussetzungen ermäßigte Netzentgelte zu entrichten. So werden bei einer Stromabnahme von mehr als 10 Gigawatt pro Kalenderjahr durch einen Verbraucher ab 7000 Benutzungsstunden Rabatte auf die Netzentgelte gewährt (Kuck 2014).

- Ab 7000 Benutzungsstunden - bis zu 80% Netzentgeltreduzierung
- Ab 7500 Benutzungsstunden - bis zu 85% Netzentgeltreduzierung
- Ab 8000 Benutzungsstunden - bis zu 90% Netzentgeltreduzierung

Eine Benutzungsstunde ist dabei definiert als:

$$\text{Benutzungsstunde} = \frac{\text{Jahresverbrauch in kWh}}{\text{maximaler Verbrauch einer Viertelstunde in kWh}}$$

Umso höher die Jahresbenutzungsstunden sind, umso gleichmäßiger ist die Leistungsaufnahme eines Stromabnehmers. Um von reduzierten Netzentgelten zu profitieren, ist es also nötig, einen möglichst gleichmäßigen Lastverlauf zu erzeugen. Dies kann z.B. durch Umplanungen der Betriebsabläufe erreicht werden. Beispielsweise könnte es vermieden werden, batterieelektrische Fahrzeuge in Spitzenlastzeiten zu laden.

3.2 Lastgangvoranmeldung

Ein weiteres Mittel, dem Kunden finanzielle Anreize zu geben, ist die Lastgangvoranmeldung. Hierbei wird dem Stromanbieter der Lastverlauf des Folgetages mitgeteilt, wodurch reduzierte Strombezugspreise gezielt ausgehandelt werden können. In der Praxis weicht der prognostizierte Energieverbrauch von dem tatsächlichen Energieverbrauch ab. Da der Lieferant in der Regel aber nur die Prognosemengen einkauft, muss bei Abweichungen im Verbrauch kurzfristig Regel- oder Ausgleichsenergie eingekauft werden, um die Energieversorgung zu gewährleisten. Diese Maßnahmen werden dem Lieferanten vom Bilanzkreisverantwortlichen in Rechnung gestellt. Dieser wiederum gibt seine Kosten auf zwei Arten weiter. Es kann bereits im Vorfeld ein Risikozuschlag auf den Energiepreis addiert werden oder es werden Mehr- und Mindermengen definiert. Diese Grenzen legen fest, in welchem Fenster sich der Verbrauch bewegen darf. Werden die Grenzen über- oder unterschritten, müssen vertraglich festgelegte Strafen bezahlt werden (Schwab 2012).

3.3 Lastgangglättung

Aufgrund des hohen Verbrauchs und der hohen Anschlussleistung von Industrieunternehmen wird diesen kein bestimmtes Standardlastprofil unterstellt, sondern der Verbrauch wird über bestimmte Zähler gemessen und protokolliert. Mit Hilfe dieses Profils kann ein individueller Preis ausgehandelt werden. Der Preis ist dabei in besonderem Maße von dem Stromverbrauch und der Lastkurve abhängig. Hierbei ist zu beachten, dass Unternehmen mit einem besonders gleichmäßigem Verbrauchsverhalten für gewöhnlich günstigere Konditionen bekommen (Müller 2001). Die Nutzung dieser Rabatte ist unabhängig von einer Befreiung der Netzentgelte möglich.

3.4 Bereitstellung von Regelleistung

Regelleistung wird dann benötigt, wenn unvorhergesehene Schwankungen im Stromnetz entstehen. Dies kann z.B. durch eine kurzfristige Änderung der Windeinspeisung oder durch einen Kraftwerksausfall geschehen. Die hierdurch entstehenden Schwankungen müssen kurzfristig ausgeglichen werden. Primär findet der Ausgleich über regelfähige Kraftwerke statt. Jedoch ist in der jüngeren Entwicklung auch ein Trend dahingehend zu beobachten, dass regelfähige Lasten, wie z.B. Kühlhäuser, genutzt werden. So kann z.B. bei einem deutlichen Engpass in der Energieversorgung ein spontaner Lastabwurf realisiert werden, indem die Kühlanlagen der Kühlhäuser kurzzeitig abgeschaltet werden (Keller u. a. 2014). Es wird zwischen positiver und negativer Regelleistung unterschieden. Positive Regelleistung ist dann erforderlich, wenn die Leistungsentnahme größer ist als die Leistungseinspeisung in das Stromnetz. In diesem Fall muss das Leistungsangebot erhöht oder Verbraucher abgeschaltet werden. Negati-

ve Regelleistung ist dann erforderlich, wenn die Leistungsentnahme geringer ist als die Leistungseinspeisung. In diesem Fall muss das Leistungsangebot gesenkt oder die Nachfrage erhöht werden. Die technischen Anforderungen für die Bereitstellung von Primär- und Sekundärleistung sind sehr hoch. So muss z.B. der Abruf ferngesteuert werden können, wobei Übertragungsnetzbetreiber direkten Zugriff auf die bereitstellenden Erzeuger oder Verbraucher haben. Für den Abruf von Minutenreserveleistung sind die Anforderungen technisch weniger aufwändig, da mehr Zeit zwischen der Anforderung der Leistung und der Bereitstellung liegen kann. So ist es möglich, die Leistung auch telefonisch abzurufen. Bei Regelenergie wird zwischen Primärregelung, Sekundärregelung und Minutenreserve unterschieden (Gobmaier, Bernhard, und Roon 2012) (Hermann, Harthan, und Loreck 2011).

Primärregelleistung: Bei einer wöchentlichen Auktion wird Leistung über die Dauer von einer Woche versteigert, jeweils eine Woche im Voraus. Ein Energiemarktteilnehmer muss die angebotene Leistung stufenlos sowohl zuschalten als auch reduzieren können und die Leistung über den gesamten Angebotszeitraum halten können. Primärregelleistung muss innerhalb von 30 Sekunden bereitgestellt werden, wobei eine automatische Regelung über die Netzfrequenz stattfindet. Die Mindestangebotsgröße beträgt 1 MW. Das Angebot von Primärregelung eignet sich fast nur für schaltbare Lasten mit sehr geringem spezifischem Schaltaufwand, da fast kontinuierlich Abrufe mit einem Teil der vorgehaltenen Leistung erfolgen.

Sekundärregelleistung: Wie bei der Primärregelleistung wird in einer wöchentlichen Auktion Leistung über die Dauer einer Woche jeweils eine Woche vorher veräußert. Die Leistung muss über einen Zeitraum von einer Woche zu- oder abgeschaltet werden können. Die Reaktionszeit, also die Zeit, in welcher die Leistung gesteuert werden muss, beträgt 5 Minuten. Es erfolgt eine automatische Schaltung durch ein Steuersignal des Übertragungsnetzbetreibers. Die Mindestangebotsgröße beträgt 5 MW.

Minutenreserve: Bei einer täglichen Auktion werden jeweils 4-Stunden Blöcke Leistung für den nächsten Tag angeboten. Die angebotene Leistung muss im gesamten Zeitblock gehalten werden können. Der Abruf kann telefonisch oder online erfolgen. Der Reaktionszeitraum beträgt 15 Minuten. Die Mindestangebotsgröße beträgt 5 MW. Das Angebot muss um 10 Uhr des Vortages für den Folgetag ab 0 Uhr bereitgestellt werden.

Aufgrund der Anforderungen der Anlagen zur Marktteilnahme einer Anlage eignet sich insbesondere das Angebot von Minutenreserve. So können z.B. die Ladevorgänge von Wechselbatterien in einer Batteriewechselstation verschoben werden, wenn die durchschnittliche Aufenthaltsdauer der Batterien in der Station größer ist als die benötigte Ladedauer. Abbildung 14 zeigt dies exemplarisch für eine Batterie, die sich für einen Zeitraum von insgesamt 14,6 Stunden in einer Batteriewechselstation befindet, wobei eine Vollladung der Batterie lediglich

3 Geschäftsanwendungsfälle durch Demand Side Integration

7 Stunden benötigt. Damit könnte in den ersten sieben Stunden der der Aufenthaltszeit der Batterie ein 4 Stundenblock Minutenreserve angeboten werden. Wird durch den Übertragungsnetzbetreiber keine Minutenreserve abgerufen, kann die Batterie in der verbleibenden Zeitspanne dennoch problemlos geladen werden.

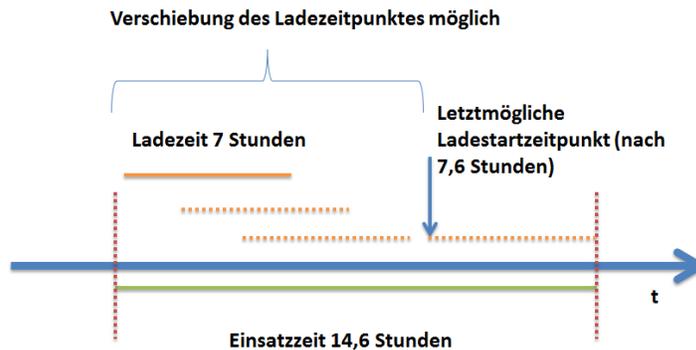


Abbildung 14: Lastverschiebungspotenzial bei einer Batterieladung in einer Batteriewechselstation

3.5 Handel am Day-Ahead Markt (Bezugspreisoptimiertes Laden)

Eine weitere Möglichkeit als Verbraucher aktiv am Strommarkt teilzunehmen, ist der gezielte Einkauf von elektrischer Leistung am Day-Ahead-Markt. Hier können Angebote für die gezielte Abnahme elektrischer Arbeit an einem Tag, bis jeweils 12 Uhr mittags des Vortages, eingestellt werden. Es können Angebote für einzelne Stunden abgegeben werden, wobei eine Mindestmenge von 0,1 MWh gehandelt werden muss. Jedoch ist es auch möglich, freie Blockgruppen, die über eine Stunde hinausgehen, zu handeln.

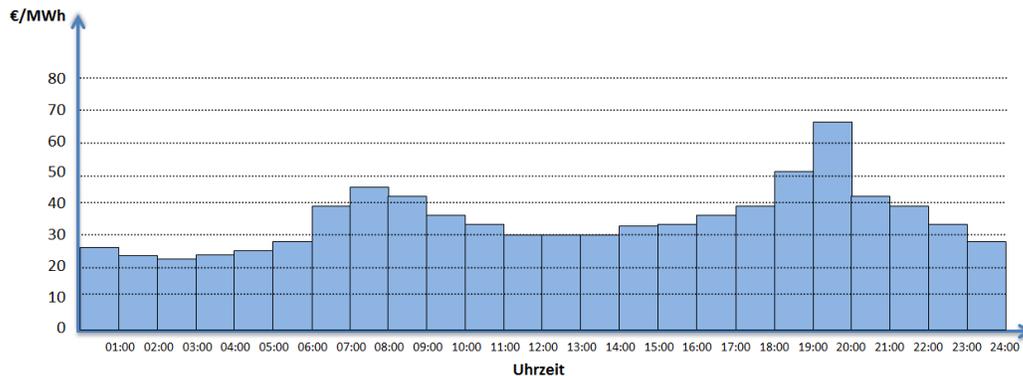


Abbildung 15: Typischer Preisverlauf im Day-Ahead-Markt (nach („Next Kraftwerke“ 2015))

3 Geschäftsanwendungsfälle durch Demand Side Integration

Bei solchen Blockgeboten darf die Menge 400 MWh nicht überschritten werden. („Next Kraftwerke“ 2015) Abbildung 15 zeigt einen typischen Preisverlauf im Day-Ahead-Markt. Kann der Lastgang für den Folgetag gezielt prognostiziert werden, ist es möglich, elektrische Leistung für den gesamten Terminalbetrieb einzukaufen. Weiter ergibt sich die Möglichkeit, Batterieladungen gezielt in Phasen zu legen, in denen elektrische Leistung günstig zu beziehen ist. Diese Möglichkeit besteht dann, wenn sich eine Batterie über einen langen Zeitraum ungenutzt in einer Batteriewechselstation befindet (siehe Abbildung 14) und der Ladezeitraum somit verschoben werden kann.

Darüber hinaus gibt es Überlegungen, Transportaufträge und die daraus resultierenden Batteriewechselvorgänge gezielt zu planen und so zu optimieren, dass möglichst viel Ladepotenzial in günstige Zeiträume verschoben wird (Ihle u. a. 2014). Abbildung 16 stellt den Ablauf eines Vorgehens zur Optimierung von Batteriewechselzeitpunkten dar.

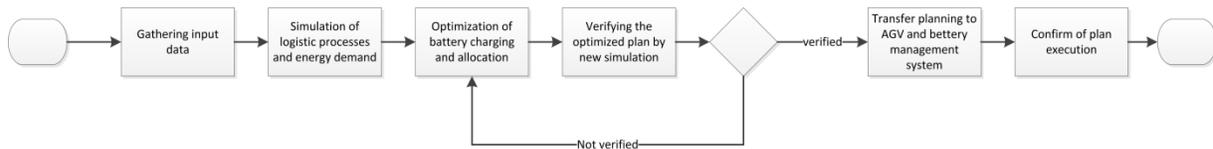


Abbildung 16: Vorgehen zur Optimierung von Batteriewechselzeitpunkten (Ihle u. a. 2014)

In einem ersten Schritt müssen die relevanten Informationen zusammengetragen werden, welche nötig sind, die Energieverbrauchs- und Logistikprozesse eines Container-Terminals zu prognostizieren. Anschließend können auf Grundlage der prognostizierten Logistik- und Verbrauchsparameter optimierte Betriebsablaufpläne erstellt werden, welche wiederum durch die Simulation validiert werden. Anschließend können die optimierten Einsatzpläne in das Real-system eingespeist werden.

3.6 Zusammenfassung

Es wurden 5 mögliche Geschäftsanwendungsfälle identifiziert, welche genutzt werden können, falls Kenntnisse über den zukünftigen Lastverlauf sowie Zuschalt- und Abschaltpotenziale bekannt sind. Tabelle 2 gibt eine Übersicht der Anwendungsfälle. Für die Geschäftsanwendungsfälle „*Befreiung von Netzentgelten*“ und „*Bezugspreisoptimiertes Laden*“ ist die Dauer der benötigten Lastgangprognose nicht festgelegt, wobei ein Zeitraum von mindestens 24 Stunden gewählt wurde, um Terminalbetreibern genügend Zeitraum zu geben, Einfluss auf den Energieverbrauch zu nehmen und ggf. Logistik- und Batterieladeprozesse anzupassen. Für den Anwendungsfall „*Lastgangvoranmeldung*“ wird vom Energieversorgern eine Prognose von

3 Geschäftsanwendungsfälle durch Demand Side Integration

mindestens 24 Stunden verlangt, um von vergünstigten Preiskonditionen profitieren zu können.

Tabelle 2: Übersicht der Geschäftsanwendungsfälle Energiemanagement im Container-Terminal

Geschäftsanwendungsfall	Zeitraum	Methode	Einsatz	Prognosezeitraum
Bereitstellung von Regelenergie (Minutenreserve)	10 Uhr des Vortages	Abschaltpotenzial bereitstellen	Teillastprognose	24 Stunden
Netzentgeltbefreiung	Nicht festgelegt	Interne Verschiebung von Lasten	Steuerbare Lasten	Min. 24 Stunden
Lastgangvoranmeldung	Nicht festgelegt	Einhalten der Last	Gesamtlastgangprognose	Min 24 Stunden
Lastgangglättung	Nicht festgelegt	Interne Verschiebung von Lasten	Steuerbare Lasten	Min. 24 Stunden
Bezugspreisoptimiertes Laden	12 Uhr des Vortages	Gesteuertes Laden	Elektromobilität	24 Stunden

Zu beachten ist, dass ein Strommarktteilnehmer immer nur eine dieser Dienstleistungen gleichzeitig anbieten kann, da es sonst bei einer gleichzeitigen Vermarktung von mehreren Dienstleistungen zu gegensätzlichen Anforderungen kommen kann.

4. Prognose elektrischer Leistungsaufnahme

Im folgenden Abschnitt sollen der Begriff Prognose und verschiedene Gütemaße erläutert werden, welche Auskunft über die Güte einer Prognose geben. Zudem werden unterschiedliche Prognoseverfahren vorgestellt und hinsichtlich ihrer Potenziale bewertet, den Energieverbrauch eines Container-Terminals zu prognostizieren.

Der Begriff der Prognose bezeichnet nach (Vogel 2015) eine „*Aussage über Zustände oder Entwicklungen in der Zukunft*“. Prognosen betreffen alle Lebensbereiche. Beispiele hierfür sind z.B. die Prognosen von Rohstoffpreisen, Einspeisungsprognosen von erneuerbaren Energien oder Prognosen von Transportkapazitäten und Lagerbeständen. Nach (Crone 2010) erfolgt eine Prognose immer auf der Basis einer rationalen Theorie, also einer sachlogischen Begründung für gemessene Vergangenheitsdaten. Prognoseverfahren lassen sich systematisch grob in zwei unterschiedliche Gruppen teilen (Vogel 2015):

1. Qualitative Prognoseverfahren
2. Quantitative Prognoseverfahren

Zu den qualitativen Prognosen zählen Prognosen, die subjektiv und nicht quantifizierbar sind. Die Aussagen lassen sich somit nicht durch Zahlen darstellen, sondern sind lediglich nur verbaler Natur. Sie sind zumeist unverbindlich und können intuitiv zustande kommen. Außerdem besitzen sie nur einen geringen Formalisierungsgrad. Visionen und Wahrsagungen als Beispiel können als qualitative Prognose aufgefasst werden. Eine weitere Möglichkeit für qualitative Prognosen ist das Sammeln und Auswerten von Expertenmeinungen. Diese können durch mündliche oder schriftliche Befragungen gewonnen werden. Bekannte Methoden sind das Brainstorming, die Delphi-Methode oder das Panel-Konsensus-Verfahren. Das Brainstorming als Gruppensitzung hat das Finden neuer Ideen zum Ziel. Die Umsetzung und Realisierbarkeit dieser Ideen hat zunächst keine weitere Relevanz für das Verfahren. Bei der Delphi-Methode werden Experten in mehrstufigen Aktionen mit Fragebögen befragt. Das Ergebnis der Fragebögen wird in einer nächsten Stufe anonym auf dem neuen Fragebogen für alle Teilnehmer offen mitgeteilt. Das Ziel dieser Methode ist es, dass die Meinungen der Experten sich im Verlauf der Befragungen annähern, ohne dass dominante Meinungsmacher das Ergebnis beeinflussen. Beim Panel-Konsensus-Verfahren diskutieren mehrere Experten offen über eine Fragestellung. Das Ziel dieser Methode ist es, einen Konsens aller Beteiligten zu der gegebenen Fragestellung zu finden. Quantitative Verfahren hingegen basieren auf der Auswertung empirischer Daten. Die damit erstellten Prognosen lassen sich quantifizieren und durch Zahlen ausdrücken. Voraussetzung für die Anwendung quantitativer Prognosen ist immer das Vorhandensein einer Datenbasis, mit welcher Auswertungen vorgenommen werden können (Vogel 2015). Bei den quantitativen Prognoseverfahren wird zwischen den Wirkungsprognosen und den

4 Prognose elektrischer Leistungsaufnahme

Entwicklungsprognosen unterschieden. Bei den Wirkungsprognosen handelt es sich um eine Analyse kausaler Zusammenhänge von einstellbaren Variablen. Es wird also basierend auf einer Ursache die Wirkung dieser Ursache prognostiziert. Die Wirkungsprognose kann nach (Crone 2010) auch als kausale Prognose bezeichnet werden. Bei der Entwicklungsprognose hingegen hängen die vorherzusagenden Größen von nicht einstellbaren Variablen ab. Die Entwicklungsprognose kann auch als Zeitreihenprognose bezeichnet werden. Eine Zeitreihe ist eine Folge von Werten einer Variablen, die sich auf aufeinanderfolgende Zeitpunkte oder Zeiträume bezieht. Eine formale Definition wird in (Neusser 2011) gegeben. Hierbei wird zunächst der stochastische Prozess $\{Y_t\}$ mit der Indexmenge der diskreten Zeit $t \in N$ als indexierte Folge von Zufallsvariablen Y_t definiert. Anschließend wird die Realisation eines stochastischen Prozesses als Funktion $t \rightarrow y_t$ definiert, die jedem Zeitpunkt t die Realisation von Y_t , die als y_t bezeichnet wird, zuweist. Ein Zeitreihenmodell $\{y_t\}$ ist nun eine Spezifikation der gemeinsamen Verteilung eines stochastischen Prozesses $\{Y_t\}$, für den $\{y_t\}$ eine Realisation ist. Beispiele für Zeitreihen sind Börsenkurse oder Temperaturverläufe des Wetters. Zeitreihen können nach F. Crone (Crone 2010) als „Überlagerung einer oder mehrerer regelmäßiger und unregelmäßiger Komponenten aufgefasst werden, die jedoch nicht einzeln beobachtet werden können“. Bei den Zeitreihenkomponenten kann man in oberster Hierarchieebene zwischen regelmäßigen und unregelmäßigen Komponenten unterscheiden. Regelmäßige sind hierbei nach einem bestimmten Muster immer wieder auftretende Komponenten. Unregelmäßige Komponenten sind hierbei nicht vorhersagbare Komponenten, die zufällig auftreten und keine bestimmten Muster folgen. Zu nennende Beispiele sind Ausreißer oder Strukturveränderungen. Zu den regelmäßigen Komponenten zählen das grundlegende Niveau der Zeitreihe, eine saisonale Komponente, eine Trendkomponente und eine irreguläre Komponente. Die Überlagerung aller Einzelkomponenten bildet die Zeitreihe. Ein Prognoseverfahren ist eine exakte Beschreibung von Handlungsschritten, die zu einer Prognose führen. Basierend auf den unterschiedlichen Komponenten einer Zeitreihe haben sich für die Zeitreihenprognose unterschiedliche Modelle und Verfahren zur Vorhersage entwickelt. Naive Prognosemethoden sind Methoden, die den zu prognostizierenden Wert mit einfachen Rechenmethoden weiterschreiben. Sie erklären eine Zeitreihe mit einem starken Anteil der Niveauebene einer Zeitreihe. Für die naive Prognose kann beispielsweise der zuletzt aktuelle Wert als Prognosewert verwendet werden. Zeitreihenprognosemodelle, die auf dem Mittelwert basieren, verwenden für die Prognose eines zukünftigen Wertes mehrere historische Werte, die gleich oder unterschiedlich gewichtet den prognostizierten Wert bilden. Regressionsverfahren sind Verfahren, die die Beziehung zwischen einer abhängigen und mehreren unabhängigen Variablen modellieren. ARIMA Verfahren sind Verfahren, bei denen sowohl regressive als auch gewichtete frühere Werte die Prognose beeinflussen. Neuronale Netze, auf die aufgrund des Fokus der Arbeit im folgenden Verlauf intensiver eingegangen wird, sind informationsverarbeitende Systeme, die aus einer bestimmten Anzahl von Knoten ein Netz bilden, Informationen in das Netz

geben und verarbeitete Informationen aus dem Netz erhalten. Detailliertere Ausführungen zu den jeweiligen Prognoseverfahren sind in (Crone 2010) zu finden.

Zur Bewertung von quantitativen Prognosen existieren unterschiedliche Gütemaße. Prognosen können durchaus fehlerhaft sein, was unterschiedliche Gründe haben kann. Eine Möglichkeit besteht darin, dass das der Prognose zugrunde liegende Prognosemodell unpassend gewählt wurde. Ein wesentlicher Schritt bei der Erstellung der Prognose ist deshalb die Wahl eines passenden Prognosemodells. Ein weiterer Grund für Prognosen, welche einen hohen Prognosefehler aufweisen, ist, dass sich die äußeren Einflüsse verändert haben. Wenn sich Gesetzmäßigkeiten verändern, die beispielsweise in der Vergangenheit gültig waren, in der Zukunft für die Prognose aber nicht mehr gültig sind, kann dies einer der Gründe für eine fehlerhafte Prognose sein. Als letzter Grund kann die Anwesenheit von unregelmäßigen, zufälligen Einflüssen sein, die weder berechenbar noch vorhersagbar sind. Sie nehmen Einfluss auf die Prognosegüte, ohne dass sie im Voraus einkalkuliert werden können.

4.1 Gütemaße zur Bewertung eine Prognose

Voraussetzung für eine quantitative Bewertung, welche einen aussagekräftigen Vergleich der Prognoseergebnisse ermöglicht, ist die Auswahl geeigneter statistischer Gütemaße. In der Literatur wird diesbezüglich eine Vielzahl von Gütemaßen aufgeführt, welche die Abweichung zwischen prognostizierten und beobachteten Werten auf unterschiedliche Art und Weise bewerten. Eine Klassifikation erfolgt dabei in einfache, relative, quadratische und normierte Gütemaße. Bei einfachen Gütemaßen ergibt sich der Prognosefehler direkt aus der Differenz zwischen Prognose- und Beobachtungswert. Relative Maße ermitteln die Differenz und setzen sie zu den beobachteten Werten in Beziehung. Sie eignen sich insbesondere dann, wenn die Güte der Prognosen mit unterschiedlichen Werteniveaus verglichen werden soll. In quadratischen Gütemaßen fließt die Differenz zwischen prognostizierten und beobachteten Werten im Quadrat in die Berechnung ein. Im Gegensatz zur linearen Fehlergewichtung bei einfachen und relativen Gütemaßen führt eine quadratische Fehlergewichtung zu einer stärkeren Einflussnahme größerer Abweichungen. Normierte Gütemaße zeichnen sich durch einen beschränkten Wertebereich aus, z.B. zumeist ein Wert innerhalb des Intervalls 0 und 1. Normierte Werten erlauben daher eine leichte Interpretation.

Erste Rückschlüsse auf die praktische Anwendbarkeit der unterschiedlichen Gütemaße leiten sich bereits aus dieser Klassifikation ab. Weber (Weber 1998) ordnet die Gütemaße zusätzlich nach weiteren Eigenschaften, um eine genauere Interpretation zu erreichen. Normierte Gütemaße reagieren demnach nicht gleich sensitiv gegenüber Abweichungen zwischen prognostizierten und beobachteten Werten. Unterschiede gibt es in der Sensitivität hinsichtlich Abweichungsfehler und Niveaufehler, welche auf eine systematische Über- oder Unterschätzung der

Werte hindeuten. Als letztes lassen Wendepunktfehler Rückschlüsse auf nicht prognostizierte Vorzeichenwechsel im beobachteten Zeitreihenverlauf zu. Einfache, relative und quadratische Gütemaße können darüber hinaus nach Art der Verlustfunktion näher beschrieben werden. Demgemäß bewerten symmetrische Verlustfunktionen Unter- und Überschätzungen der beobachteten Werte gleichermaßen. Bei asymmetrischen Verlustfunktionen können sich positive und negative Abweichungen ausgleichen. Im Folgenden wird eine nach (Weber 1998), (Bamberg, Baur, und Krapp 2012), (Vogel 2015) und (Höft 2005) Auswahl an statistischen Gütemaßen, gegliedert nach den oben genannten Klassifikationskriterien, erläutert. Auf Gütemaße für die Bewertung eines einzelnen Prognosewertes wurde hierbei verzichtet, da der kleinste untersuchte Prognosehorizont 96 ¼-Stunden-Werte (ein Tag) umfasst.

Einfache Gütemaße

Der Mittlere absolute Fehler (MAE) aus der Gruppe der einfachen Gütemaße kommt aufgrund der symmetrischen Verlustfunktion zur Anwendung, da sowohl positive als auch negative Abweichungen zwischen prognostiziertem und realem Lastgang von Relevanz sind. Der MAE gibt Auskunft über die gemittelte Abweichung zwischen prognostizierten und beobachteten Werten, wobei sich positive und negative Werte nicht gegenseitig aufheben.

$$\text{Mittlerer absoluter Fehler (MAE)} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |\hat{y}_t - y_t|$$

Relative Gütemaße

Als relative Gütemaße kommen der Mittlere prozentuale Fehler (MPE) und der Mittlere absolute prozentuale Fehler (MAPE) zum Einsatz. Der MPE gibt die prozentuale Abweichung zwischen prognostizierten und beobachteten Werten an. Da der MPE eine asymmetrische Verlustfunktion besitzt, können sich negative und positive Werte gegenseitig aufheben.

$$\text{Mittlerer prozentualer Fehler (MPE)} = 100 * \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{(\hat{y}_t - y_t)}{y_t}$$

Aufgrund der asymmetrischen Verlustfunktion des MPE wird zusätzlich der MAPE als statisches Gütemaß zur prozentualen Abweichung genutzt, da sich hier positive und negative Werte nicht aufheben.

$$\text{Mittlerer absoluter prozentualer Fehler (MAPE)} = 100 * \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{\hat{y}_t - y_t}{y_t} \right|$$

Quadratische Gütemaße

Als Vertreter der Gütemaße mit quadratischer Fehlergewichtung werden die Wurzel aus dem Mittleren quadratischen Fehler (RMSE) und die Wurzel des Mittleren quadratischen prozentualen Fehlers (RMSPE) herangezogen. Bei diesen Gütemaßen werden große Abweichungen zwischen prognostizierten und beobachteten Werten stärker gewichtet, wodurch einzelne Ausreißer einen großen Einfluss auf die Prognosegüte bekommen.

$$\text{Wurzel aus MSE (RMSE)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - y_t)^2}$$

$$\text{Root Mean Square Percentage Error (RMSPE)} = 100 * \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{(\hat{y}_t - y_t)^2}{y_t^2}}$$

Normierte Gütemaße

Zur Analyse der Niveau- und Wendepunktfehler kommen der Bias-Anteil des MSE (BIAS) und der Determinationskoeffizient (R^2) mit dem Wertebereich [0; 1] zur Anwendung. Die Bedeutung des Determinationskoeffizienten ist in den markanten Wendepunkten im zeitlichen Verlauf der elektrischen Last begründet.

$$\text{Determinationskoeffizient (R}^2\text{)} = \frac{(\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - \bar{\hat{y}}) * (y_t - \bar{y}))^2}{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - \bar{\hat{y}})^2 * \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}$$

Bei dem BIAS-Anteil des MSE handelt es sich um einen Niveaufehler. Weicht der BIAS-Anteil von 0 ab, liegt eine systematische Unter- bzw. Überschätzung der beobachteten Werte vor.

$$\text{BIAS} = \frac{(\bar{\hat{y}} - \bar{y})^2}{\text{MSE}}; \text{ für MSE} \neq 0$$

mit

$$\text{Mittlerer quadratischer Fehler (MSE)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_t - y_t)^2$$

Märtens und Rässler (Mertens und Rässler 2012) geben noch drei weitere Bewertungskriterien für Prognoseverfahren an. Die Eigenschaft der Reagibilität und Stabilität eines Prognosever-

fahrens gibt an, wie gut das Prognoseverfahren auf sich ändernde Umstände reagiert. Wenn die Prognose mit fortschreitender Zeit immer ungenauer wird, ist dies ein Indiz dafür, dass sich äußere Umstände geändert haben könnten. Das Verfahren muss also bei berechenbaren Veränderungen reagibel sein, bei zufälligen Veränderungen muss das Prognoseverfahren jedoch stabil genug sein, dass dieses den Einfluss zufälliger Veränderungen möglichst gering hält. Zusammenfassend muss das Prognoseverfahren einen Kompromiss aus Reagibilität auf Veränderungen im Verhalten der Zeitreihe und Stabilität bei Zufallsabweichungen finden. Eine weitere Anforderung ist, dass das Prognoseverfahren Eingriffsmöglichkeiten bietet, so dass die Prognose mit dem Ziel der Verbesserung verändert werden kann. Das Prognoseverfahren sollte ohne großen Aufwand veränderbar sein, sodass beispielsweise menschliche Experten Zusatzinformationen in das Prognosesystem eingeben können, aus deren Berücksichtigung eine Verbesserung der Prognose resultieren könnte. Als dritte weitere Anforderung sind die benötigte Rechenzeit und der Speicherplatzbedarf zu nennen. Sie werden durch die Häufigkeit der Prognose und der Menge der einbezogenen Daten bestimmt.

4.2 Prognosemethoden

Akkurate Modelle zur Vorhersage der elektrischen Leistungsaufnahme sind für Energieversorgungsunternehmen von großer Bedeutung. Die Vorhersage der Leistungsaufnahme der zu versorgenden Verbraucher hilft dabei, wichtige Entscheidungen, wie den Einkauf von Energie, die Höhe der Energieproduktion zu planen. Nach Feinberg (2005) (Feinberg und Genethliou 2005) gibt es folgende etablierte Verfahren zur kurzfristigen Lastgangprognose:

4.2.1 Vergleichstagverfahren

Ein etabliertes Verfahren zur Prognose von Zeitreihen stellt das Vergleichstagverfahren dar. Dieses Verfahren wird u.a. oftmals von Energieversorgern eingesetzt, um den Strombedarf für Haushalts- bzw. Privatkunden vorherzusagen. Hierbei wird der Lastverlauf eines historischen Referenztages zur Prognose genutzt. Durch die Vielzahl der Haushalte in einem Versorgungsgebiet tritt ein statistischer Mittlungseffekt ein, der eine hinreichend präzise Prognose der benötigten Energiemenge ermöglicht. Für die meisten Industriekunden genügt eine derartige Prognose nicht, da es hier aufgrund der unterschiedlichen Produktionsprozesse und Produktionsarten an einem statistischen Mittelwert fehlt. Verschieben sich bei einem Produktionsunternehmen beispielsweise die Arbeitszeiten, so treten erhebliche Abweichungen ein, die dazu führen können, dass der Energieversorger nicht genügend Energie bereitstellt. Aufgrund dieser von äußeren Kriterien abhängigen Schwankungen ist die Ermittlung eines statistischen Mittelwertes für mehrere Industrieverbraucher nicht praktikabel, um den tatsächlichen Strombedarf vorherzusagen. (Clesle und Saller 2007) Im Container-Terminal Altenwerder tritt eine sich durchaus wiederholende Abfertigung von Containerschiffen auf. Sogenannte „Loops“

sind Containerschiffe, welche turnusmäßig jede Woche gleiche Routen abfahren. Aufgrund dieser sich wiederholender Abläufe wird davon ausgegangen, dass auch das Vergleichstagsverfahren eine geeignete Methode darstellt, den Energieverbrauch in einem Container-Terminal zu prognostizieren.

Das Vergleichstagsverfahren $VTV(Tagesdifferenz, Referenztage)$ lässt sich über zwei Parameter parametrisieren. Einerseits muss bestimmt werden, welcher Tag des vorangegangenen Zeitraums als Referenz genutzt werden soll. Dieser Parameter wird im Weiteren als Tagesdifferenz bezeichnet. Der zweite Parameter gibt an, wie viele Referenztage für eine Prognose betrachtet werden sollen. Abbildung 17 verdeutlicht die Funktionsweise eines Vergleichstagsverfahrens. In dem dargestellten Beispiel wird der zukünftige elektrische Energiebedarf eines Montags aus dem durchschnittlichen Verbrauch der letzten drei Montage prognostiziert.

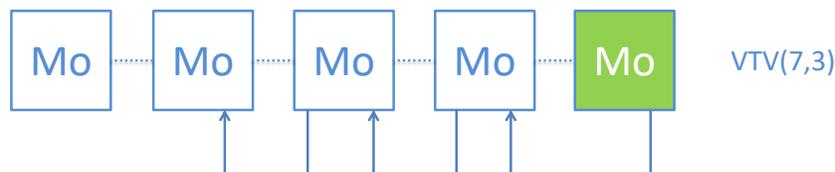


Abbildung 17: Illustration der Parametrisierung des Vergleichstagsverfahrens mit $VTV(7,3)$ mit einem Montag als Prognosetag

Natürlich können auch kleinere Einheiten als ganze Tage (z.B. Stunden oder Viertelstundenwerte) bestimmt werden. Das Vergleichstagsverfahren wird in diesem Fall ebenfalls durch zwei Parameter beschrieben. Zum einen muss definiert werden, wie viele Werte den Lastverlauf eines Tages beschreiben. Typischerweise wird der Lastgang eines Verbrauchers in Viertelstundenwerten beschrieben. Also wird der Lastverlauf eines Verbrauchers pro Tag durch 96 einzelne Werte beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Vergleichstagsverfahren wie folgt definiert:

Sei eine Zeitreihe z eine Reihe reeller Werte:

$$z = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

Der zu prognostizierende Energieverbrauch \hat{x}_t zum Zeitpunkt t ist dann definiert durch

$$\hat{x}_t = \frac{\sum_{i=1}^n x_{t-i*d}}{n}$$

wobei d definiert ist als:

$$d = \text{Tagesdifferenz} * 96$$

Die Variable n gibt die Anzahl der Werte der Zeitreihe an, aus welchen der Durchschnitt gebildet werden soll.

4.2.2 Zeitreihenanalyse

Die Zeitreihenanalyse ist eine Disziplin, welche sich mit der inferenzstatistischen Analyse von Zeitreihen und der Vorhersage ihrer zukünftigen Entwicklung beschäftigt. Etablierte Modelle der Zeitreihenanalyse sind ARMA (autoregressive moving average), ARIMA (autoregressive integrated moving average), ARMAX (autoregressive moving average with exogenous variables) und ARIMAX (autoregressive integrated moving average with exogenous variables). Diese Methoden basieren auf der Annahme, dass die Zeitreihen eine interne Struktur aufweisen, also z.B. einen Trend oder saisonale Effekte beinhalten. Die Verfahren erkennen und verarbeiten solche Strukturen.

ARMA und ARIMA Modelle benutzen als Eingangsparameter zur kurzfristigen Lastprognose lediglich die vergangene Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Zeit. An dieser Stelle tritt dasselbe Problem wie schon bei dem Vergleichstaggerfahren auf, da auf äußere sich wechselnde Einflüsse nicht reagiert wird. Hierdurch unterliegen diese Modelle den gleichen Einschränkungen wie auch das Vergleichstaggerfahren und sind zur Lastgangprognose nur bedingt geeignet. Ein etabliertes Modell zur Zeitreihenanalyse ist das ARIMAX Modell. Bei diesem Modell werden autoregressive Prozesse (AR) mit gleitenden Mittelwertmodellen (MA) kombiniert. Der Begriff autoregressiv beschreibt stochastische Modelle, welche die Zielvariable y_t auf die Linearkombination der Werte früherer Zeitpunkte und einen aktuellen Fehlerterm ϵ zurückführen. Ein autoregressives Modell kann durch die Gleichung

$$y_t = \epsilon_t + \sum_{i=1}^n \alpha_i y_{t-i}$$

beschrieben werden, wobei n die Ordnung angibt und somit wie viele Zeitschritte die berücksichtigten Vergangenheitswerte zurückliegen. Bei Moving-Average-Modellen (MA-Modellen) geht man davon aus, dass die Zeitreihe nicht aus sich selbst, sondern aus den vorangegangenen Störungen erklärt werden kann. Ein MA-Modell der Ordnung m kann formal als

$$y_t = \sum_{j=0}^m \beta_j \epsilon_{t-j}$$

dargestellt werden. Bei beiden Modellen geht es darum, die Gewichte α bzw. β der einzelnen Terme zu schätzen. Dies kann zum Beispiel mittels der Methode der kleinsten Quadrate oder

der Maximum-Likelihood-Methode erfolgen. Ein Autoregressive Moving Average Model (ARMA) wird durch die Kombination dieser beiden Terme erreicht, so dass sich

$$y_t = \epsilon_t + \sum_{i=1}^n \alpha_i y_{t-i} + \sum_{j=0}^m \beta_j \epsilon_{t-j}$$

ergibt. Um die entsprechenden Werte für die Berechnung und Prognose von Zeitreihenwerten zu nutzen, wird als Voraussetzung die Stationarität der Zeitreihen, das heißt die Befreiung von Trend und Saisoneinflüssen und eines um Null angesiedelten Durchschnitts, gefordert. Dies kann durch Komponentenerlegung und Differenzierung der Zeitreihe erreicht werden. Eine Differenzbildung wird durch die Subtraktion eines Wertes mit seinem Vorgänger erreicht. Zudem kann auch die Nutzung des Logarithmus auf die Zeitreihenwerte angewandt werden. Die Anzahl der Differenzbildungen, die benötigt werden um einen stationären Prozess zu erlangen, wird als Integration der Ordnung d bezeichnet. Man erhält damit ein sogenanntes ARIMA[n,d,m]-Modell. (Schlittgen 2015) Dieses Modell kann auch noch um sogenannte exogene Variablen x_t ergänzt werden. Diese beschreiben äußere Einflüsse, die auf die Zeitreihe, welche bisher nur in Bezug auf sich selbst betrachtet wurde, einwirken. Ein Beispiel dafür sind meteorologische Einflüsse auf eine elektrische Lastkurve. Ein ARIMAX-Modell kann beschrieben werden als

$$y_t = \epsilon_t + \sum_{i=1}^n \alpha_i y_{t-i} + \sum_{j=0}^m \beta_j \epsilon_{t-j} + \gamma_r x_{r,1} + \dots + \gamma_{r,t}$$

wobei r für eine der R-Einflussgrößen steht. (Swider 2006) Methoden der Zeitreihenanalyse werden häufig für die Lastgangprognose angewandt und sind entsprechend verbreitet umgesetzt. Teilweise werden die Verfahren dabei auch mit anderen Methoden kombiniert.

4.2.3 Künstliche Neuronale Netze

Neuronale Netze sind eine weitere Möglichkeit, Zeitreihenprognosen durchzuführen. Nach (Crone 2010) bezeichnet der allgemeine Begriff des Neuronalen Netzes zunächst ein „interdisziplinäres Forschungsgebiet von Systemen, Theorien, Modellen und Verfahren hinsichtlich biologischer Neuronen und Neuronenverbände“. In (Ertel 2013) werden Netzwerke aus Nervenzellen im Gehirn von Menschen und Tieren als Neuronale Netze bezeichnet. Durch die komplexe Vernetzung der Gehirnzellen sind Lebewesen in der Lage, Intelligenz und motorische Fähigkeiten zu entwickeln. Crone (Crone 2010) definiert basierend auf (Levine 2000) eine Abgrenzung der Neuronalen Netze auf industrielle Einsatzgebiete. Die Abgrenzung des

4 Prognose elektrischer Leistungsaufnahme

Einsatzes Neuronaler Netze auf industrielle Anwendungen wird durch die Bezeichnung „Künstliche Neuronale Netze“ (KNN) erreicht.

Kernbegriff des KNNs ist das sogenannte Neuron. Ein Neuron ist die informationsverarbeitende Einheit innerhalb des Netzes. Es werden Informationen an ein Neuron angelegt, anschließend verarbeitet und abschließend neue Informationen bereitgestellt. Analog zum biologischen Vorbild bestehen KNN aus einer sehr großen Anzahl parallel arbeitender Neuronen, die im Vergleich zum Gesamtsystem jeweils sehr einfach aufgebaut sind. Die Neuronen sind untereinander hochgradig verbunden. Durch gerichtete Verbindungen können sie sich die Neuronen nach vorgegebenen Regeln untereinander aktivieren, wodurch eine Informationsverarbeitung stattfindet. Auf diese Weise ist es möglich, durch KNN mittels einfacher arithmetischer Funktionen komplexe Eingabe-Ausgabe-Zusammenhänge abzubilden. Ein fundamentaler Unterschied zwischen KNN und konventionellen Algorithmen ist die Eigenschaft von KNN, zur Bearbeitung eines Problems lediglich eine Struktur und ein Lernverfahren zu benötigen. Das bedeutet, dass nicht jeweils ein problemspezifisches Programm geschrieben wird, sondern, dass sich das Netz für die Bearbeitung eines vorliegenden Problems in einem Lernprozess anhand von Trainingsläufen selbständig konfiguriert. Durch die Lernfähigkeit werden die realen Vorgänge eines Nervensystems imitiert. Die meist große Anzahl von Neuronen in einem künstlichen neuronalen Netz wird dabei in Schichten angeordnet. Die erste Schicht ist die sogenannte Eingabeschicht und dient als Schnittstelle für Eingabedaten, wobei die Dimension des Eingabervektors die Anzahl der benötigten Neuronen in dieser Schicht vorgibt. Die Signale der Eingabeneuronen werden an alle direkt verbundenen Neuronen weitergegeben. Analog der Eingabeschicht gibt es eine Ausgabeschicht, die die Ausgabe des KNN darstellt. Jedes Neuron der Ausgabeschicht steht dabei für einen Ausgabewert. Die eigentliche Informationsverarbeitung findet in den sogenannten verborgenen Schichten (Hidden-Layer) statt. Hierbei handelt es sich um eine beliebige Anzahl von Schichten, die zwischen der Eingabe- und der Ausgabeschicht angeordnet werden. Die Anzahl der verborgenen Schichten sowie die Anzahl der Neuronen jeder dieser Schichten sind dabei freie Parameter eines jeden Netzes (Eisenbach 2005). Besteht das Netz aus mindestens einer verborgenen Schicht, so wird dieses Netz auch als Multilayer-Perceptron (MLP) bezeichnet. Für die Prognose von Zeitreihen wird üblicherweise ein solches Netz genutzt. Abbildung 18 zeigt den Aufbau eines MLP mit vier Neuronen in der Eingangsschicht, drei Neuronen in einer versteckten Schicht sowie 2 Neuronen in der Ausgabeschicht.

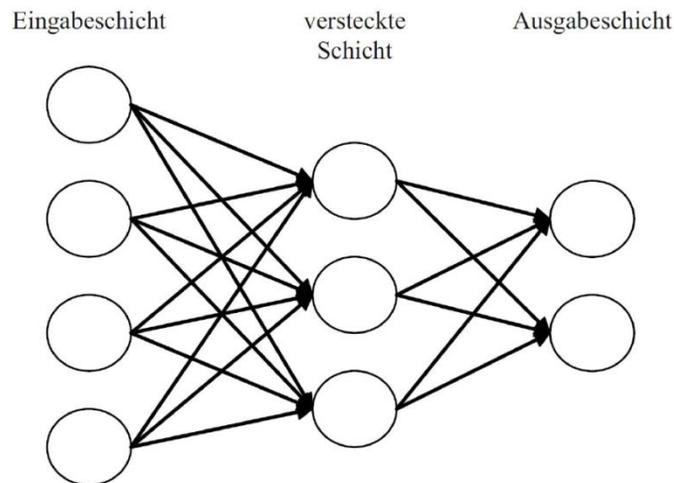


Abbildung 18: Struktur eines MLPs mit einer versteckten Schicht (Mertens und Rässler 2012).

Neuronen tauschen Informationen über gerichtete, gewichtete Verbindungen aus, d.h. dass Informationen nur in eine Richtung durch eine Verbindung fließen können und dass jedes Signal zwischen zwei Neuronen mit einem Faktor (=Gewicht) multipliziert wird. Besteht eine Verbindung von einem Neuron i zu einem Neuron j wird das zu dieser Verbindung gehörende Gewicht mit $w_{i,j}$ bezeichnet. Der Lernprozess eines KNN erfolgt durch eine Modifikation der Gewichte. Dazu werden dem Netz verschiedene Trainingsmuster wiederholt präsentiert. Die Lernregel gibt dann an, wie die Gewichte verändert werden. Die Lernregel ist eine der interessantesten Teile eines KNN, da sie erlaubt, dass ein Netz eine gegebene Aufgabe selbstständig aus Beispielen lernt zu lösen (Lenze 1997). Typische Lernverfahren, welche zur Anwendung kommen können, sind Backpropagation, Hebb- oder Delta-Regeln. Um das Netz zu trainieren, ist es notwendig, diejenige Kombination der einzelnen Gewichte zu finden, bei der der Netzfehler minimal ist. Jedem Neuron sind üblicherweise drei Funktionen zugeordnet: eine Netzeingabefunktion, eine Aktivierungsfunktion und eine Ausgabefunktion. Diese Funktionen werden während der Berechnung jeweils mit einer (reellwertigen) Zahl belegt. Ein Eingabeneuron besitzt zusätzlich noch eine vierte Zustandsgröße, die externe Eingabe ext_u repräsentiert (Kruse u. a. 2013). Ein Neuron j übernimmt die Eingabe seiner i Vorgängerneuronen, berechnet eine gewichtete Summe über die Eingabewerte, subtrahiert einen Schwellenwert θ_i und wendet eine Aktivierungsfunktion a an.

Der große Vorteil der datengetriebenen Neuronalen Netze im Vergleich mit klassischen, modellgetriebenen Prognoseverfahren ist, dass das Verfahren wenige Kenntnisse über Struktur der Abhängigkeiten und das Modell der Prognosedomäne haben muss. Es reicht aus, eine große Datenmenge aus zusammengehörigen Ein- und Ausgabewerten zu haben. Bei klassischen Verfahren muss eine Beziehung zwischen Prognosegegenstand und beeinflussenden Faktoren

gegeben sein, die bekannt sein muss. Einem Neuronalem Netz muss dieses Wissen vorher nicht bekannt sein. Der Begriff des „Generalisierens“ beschreibt den logischen Schluss von bekannten, vergangenen Daten auf zukünftige, unbekannte Daten. Selbst wenn Daten verrauscht sind, also immer auch noch teils zufällige oder unbekannte Einflussfaktoren, die Daten beeinflussen, können Neuronale Netze zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Ein weiterer Vorteil ist, dass KNNs als universal einsetzbare funktionale Approximatoren eingesetzt werden können, sodass sie jede beliebige, lineare oder nicht-lineare Funktion annähern können.

4.2.4 Simulation

Die letzte der aufgeführten Methoden ist ein simulationsbasierter Ansatz. Simulationsverfahren zur Prognose sind in der Praxis noch selten anzutreffen, werden jedoch in den nächsten Jahren an Bedeutung gewinnen, da ein simulationsbasierter Ansatz dazu geeignet ist, auch komplexe Wirkungszusammenhänge abzubilden und auch auf sich verändernde äußere Einflüsse reagieren kann. Klassischerweise werden Simulationsmodelle dazu genutzt, Erkenntnisse über ein mögliches Verhalten von Systemen zu erlangen. Eine Simulation ist immer dann eine geeignete Methode, wenn Experimente am Realsystem schwierig erscheinen. Dies ist z.B. in den folgenden Situationen der Fall:

1. Das Realsystem existiert (noch) nicht.
2. Auf dem Realsystem durchgeführte Experimente wären zu gefährlich oder zu teuer.
3. Das Realsystem wurde zerstört.
4. Es soll eine Prognose für die zukünftige Entwicklung des Realsystems erstellt werden.
5. Vorgänge im System laufen in der Realität zu schnell oder zu langsam ab.

Als Alternative bietet sich die Durchführung einer Simulationsstudie an, da die hier genannten Nachteile nicht auftreten. Eine weitere Alternative wäre die Verwendung analytischer Methoden zur Ermittlung von Ergebnissen auf einem Modell. Allerdings sind reale Systeme im Allgemeinen zu komplex, um für sie eine analytische Lösung zu entwickeln (Sauerbier 1999).

Bei einer Simulationsstudie wird ein Realsystem durch ein Abbild, das Modell, dargestellt. Auf diesem Modell können anschließend Experimente durchgeführt werden und aus den Ergebnissen Rückschlüsse auf das Verhalten des Realsystems gezogen werden. Buchholz (2001) (Buchholz 2011) gibt folgende Definition eines Modells:

„Ein Modell M für ein System S und ein Experiment E ist ein System S' , auf das E angewendet werden kann und Aussagen über die Anwendung E auf S macht.“

Nach dieser Definition wird für ein System und Experiment ein Modell konstruiert. So können für ein System S je nach Fragestellung verschiedene Modelle existieren. So wird sich z.B. das Modell eines PKWs zur Ermittlung der Schadstoffemissionen von einem Modell zur Ermittlung des Unfallverhaltens deutlich unterscheiden. Nach Buchholz müssen aber alle Modelle folgende Anforderungen erfüllen.

1. Um Ergebnisse vom Modell auf das Originalsystem zu übertragen, ist eine ausreichend genaue Abbildung bzgl. der relevanten Merkmale notwendig.
2. Um Modelle handhabbar zu halten, müssen Details weggelassen werden (durch Abstraktion oder Idealisierung).

Zwischen diesen beiden Anforderungen existiert offensichtlich ein Zielkonflikt. Um ein System möglichst detailgetreu abzubilden, müssen zahlreiche Details eingearbeitet werden, wodurch es weniger handhabbar wird als ein abstraktes Modell. Weiter ergibt sich das Problem, dass die relevanten Merkmale eines Systems in den meisten Fällen nicht bekannt sind und damit auch nicht klar ist, welche Auswirkungen eine Idealisierung oder Abstraktion des Systems auf das Verhalten des Modells hat. Bisher wurde das Modell nur als vereinfachte Abbildung der Wirklichkeit definiert. Nach dieser Definition können verschiedene Modelltypen existieren, wie etwa das Materielle Modell, welches eine Nachbildung der Form eines Systems ist. Beispielsweise wären dies Modellautos oder Globen. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Formale Modell betrachtet, welches aus der mathematischen-logischen Verknüpfung von Symbolen nach einer vorgegebenen Syntax entsteht. Das Verhalten des Modells wird dabei durch die zugehörige Semantik beschrieben. Dieser Modelltyp kann nach festgelegten Regeln beschrieben werden und sich mittels einer Programmiersprache in ein auf einem Computer analysierbares Modell transformieren lassen. Formale Modelle können nach Buchholz (Buchholz 2011) weiter klassifiziert werden:

- **Statisch –dynamisch:** Bei statischen Modellen bleibt der Zustand konstant, während dynamische Modelle sich dadurch auszeichnen, dass sich der Zustand mit der Zeit ändert.
- **Deterministisch – stochastisch:** In einem deterministischen Modell erfolgt auf eine Eingabe immer eine eindeutige Reaktion am Ausgang. In stochastischen Modellen können auch bei identischen Eingaben unterschiedliche Werte am Ausgang angenommen werden.
- **Kontinuierlich – diskret:** In kontinuierlichen Modellen ändern sich die Zustandsvariablen kontinuierlich mit der Zeit, während in diskreten Modellen Zeitpunkte existieren, zu denen eine Zustandsänderung auftritt. Zwischen diesen Zeitpunkten bleibt

4 Prognose elektrischer Leistungsaufnahme

der Zustand unverändert. Die Kombination von kontinuierlichen und diskreten Modellen wird als hybrides Modell bezeichnet.

Mit der Modellbildung ist auch immer eine Zielsetzung verbunden. Nach Buchholz (2011) (Buchholz 2011) lassen sich folgende Zielstellungen bei der Modellierung unterscheiden.

Erklärungsmodelle bilden den Ist-Zustand eines Systems ab und dienen dazu, das Verhalten des abgebildeten Systems zu verdeutlichen. Dazu werden Visualisierungstechniken in Form von 2-D oder 3-D Animationen eingesetzt, um dynamische Abläufe abzubilden. Erklärungsmodelle beschreiben teilweise nur das qualitative Verhalten, d.h. quantitative Aspekte wie etwa Zeiten werden nicht berücksichtigt. Erst wenn das Verhalten auch bewertet werden soll, müssen quantitative Aspekte zusätzlich berücksichtigt werden.

Prognosemodelle dienen zur Vorhersage zukünftigen Verhaltens. Dazu muss das aktuelle Verhalten in die Zukunft extrapoliert werden. Ein solches Modell wird im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden (siehe Kapitel 7).

Gestaltungsmodelle werden zur Analyse und zum Vergleich von Systemalternativen genutzt. Sie stellen quasi eine Experimentierumgebung für ein System dar.

Optimierungsmodelle unterstützen bei der Suche nach einer optimalen Konfiguration oder Steuerung als Zielsetzung. Sie werden kombiniert mit Optimierungsmethoden eingesetzt. Der Begriff Optimierung ist dabei so zu verstehen, dass eine „gute“ Lösung gefunden wird und nicht das Optimum. Dies ist aufgrund der Komplexität vieler Realsysteme nur in seltenen Fällen möglich.

Der zu verwendende Modelltyp wird dabei von der Zielsetzung bestimmt. Darüber hinaus wird zwischen zwei unterschiedliche Arten der Modellbildung unterschieden. Zum einen gibt es das induktive Vorgehen, bei welchem das Verhalten des Systems am Ausgang in Abhängigkeit der Parameter am Eingang analysiert wird. Formal bedeutet dies, dass ein $f(C, U)$ oder auch nur ein $f(C)$, falls U unbeobachtbar, an einigen Punkten beobachtet wird. Anschließend wird eine Funktion $g(C, U)$ bzw. $g(C)$ gesucht, sodass diese für jede beobachtbare Situation $g(\cdot)$ und $f(\cdot)$ ähnliche Werte liefert. Zum anderen gibt es das deduktive Verfahren, bei welchem die Modellbildung auf Basis der Systemstruktur erfolgt. Zur Modellbildung sind also Kenntnisse über die Struktur des Modells, die auftretenden Wechselbeziehungen und das Verhalten der Komponenten vorausgesetzt. Nach Buchholz (Buchholz 2011) sollte wenn möglich, deduktiv modelliert werden, da die so entstehenden Modelle meistens deutlich bessere Abbildungen der Realität darstellen als induktiv erstellte Modelle.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Modelle normalerweise in ihrer Komplexität vereinfachte Abbildungen des Realsystems darstellen. Hierbei gilt zu beachten, dass eine Vereinfachung nur so weit vorgenommen werden darf, wie die Übertragbarkeit der Ergebnisse des Modells auf die Realität gewährleistet werden kann. Es gilt also einen Kompromiss zwischen Einfachheit und Aussagekraft des Modells zu finden. Je nach Anforderungen und Ziel der Simulationsstudie eröffnet sich dem Modellierer dabei ein weites Spektrum von einer groben Annäherung des Systems (starke Vereinfachung) und der vollständigen Emulation des Systems, bei welchem keine Vereinfachungen vorgenommen werden.

Formal kann ein Simulationsvorgang wie folgt beschrieben werden. Sei S ein System, das eine Eingabe x aus der Menge X in eine Ausgabe y aus der Menge Y transformiert. Sei ferner M das Modell von S . Dieses System transformiert eine Eingabe x' aus der Menge X' in eine Ausgabe y' aus der Menge Y' . Man kann der Einfachheit halber S und M als Funktionen $S: X \rightarrow Y$ und $M: X' \rightarrow Y'$ betrachten. Seien $g: X \rightarrow X'$ und $h: Y' \rightarrow Y$ Funktionen, die der Umcodierung dienen. Oftmals handelt es sich bei den Funktionen g und h um bijektive Funktionen. Dann kann man die Ausgabe des Systems S unter x , also $S(x)$ durch Simulation ermitteln, indem man $S(x) = h(M(g(x)))$ setzt. Diese Gleichung wird nur bei einer Emulation des Systems immer erfüllt. Bei einer Vereinfachung des Modells ist es möglich, dass $h(M(g(x)))$ vom tatsächlichen Ergebnis der Simulation $S(x)$ abweicht. Da man das tatsächliche $S(x)$ im Allgemeinen aber nicht kennt und gerade deshalb eine Simulation durchführt, verwendet man $h(M(g(x)))$ trotzdem als Ergebnis für das zu ermittelnde $S(x)$. Das Prinzip besteht also darin, die Eingabe erst umzucodieren, dann das Modell anzuwenden und das Ergebnis zurückzucodieren. Abbildung 19 verdeutlicht die Formalisierung des Simulationsvorgangs. Dabei ist der Weg der direkten Anwendung des Systems weiß und der Weg der Ergebnisermittlung mittels Simulation grau dargestellt.

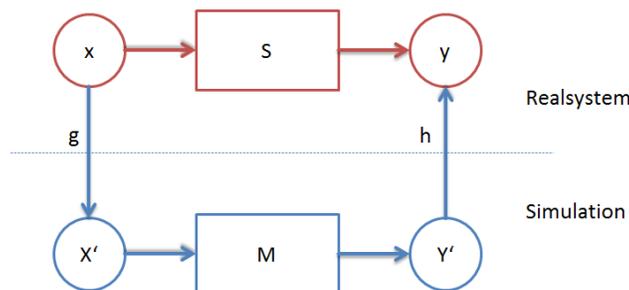


Abbildung 19: Formalisierung eines Simulationsvorgangs

4 Prognose elektrischer Leistungsaufnahme

Die Anwendung des Modells M findet normalerweise rechner- bzw. softwaregestützt statt, so dass bei Verwendung des Begriffs Simulation von einer rechnergestützten Simulation ausgegangen werden kann. Die bisher erfolgte Beschreibung ist nur für deterministische Simulationen gültig. Bei Simulationen, welche vom Zufall abhängen, kann man die Ausgabe von M als eine Funktion $M: X' \times Z \rightarrow Y'$ ansehen, wobei Z den Zufall darstellt, also die Menge aller möglichen Zufallsfolgen. Die Ergebnisse einer Simulation hängen somit von der Eingabe und vom Zufall ab (Raffel 2005).

4.3 Zusammenfassung

Die vorgestellten Methoden zur Energiebedarfsprognose haben verschiedene Stärken und Schwächen. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Verfahren. Auch wenn mit diesen Methoden teilweise sehr gute Ergebnisse im Bereich der Lastgangprognose erzielt werden können, haben sie jedoch alle einen gemeinsamen Nachteil. Einflüsse unterschiedlicher Betriebsstrategien auf den Energieverbrauch lassen sich durch diese Methoden nicht bewerten und auch keine Erkenntnisse über die Energieverbrauchsprozesse der Einzelkomponenten gewinnen. Aus diesem Grund wird eine Simulation als geeignete Methode gewählt. Hiermit wird ein universelles Werkzeug zur Verfügung gestellt, um neue Betriebsstrategien zu bewerten und gleichzeitig die Auswirkungen auf die Leistungsaufnahme im Terminal verfolgen und prognostizieren zu können. Durch eine Prognose der Leistungsaufnahme von Umschlagsgeräten ergeben sich verschiedene Anwendungsfälle, welche sich dazu eignen, eine Energiekostensenkung zu erreichen. Beispiele hierfür sind (Grundmeier u. a. 2014). Im Folgenden sollen daher Simulationsmodelle betrachtet werden, welche sich im Kontext Container-Terminal bewegen. Es werden aber auch Arbeiten betrachtet, welche sich generell dem Thema Energieverbrauch im Container-Terminal befassen.

Tabelle 3: Vergleich unterschiedlicher Prognosemethoden

Methode	Genauigkeit	Übertragbarkeit	Einrichtungsaufwand	Berechnungsaufwand	Prognose basiert auf historischen Daten	Entscheidungsunterstützung
Vergleichstagverfahren	O	++	++	++	Ja	--
Zeitreihenanalyse	+	+	+	+	Ja	--
Künstliche Neuronale Netze	+	o	-	+	(Nein)	--
Simulation	++	-	-	-	(Nein)	++

Auch wenn mit den genannten Methoden teilweise sehr gute Ergebnisse im Bereich der Lastgangprognose erzielt werden können, haben diese jedoch auch Nachteile. Verfahren wie etwa das Vergleichstagverfahren, Regressionsmodelle oder Zeitreihenanalysen und auch Neuronale Netze benötigen erst einmal historische Zeitreihen, teilweise in einem Umfang von mehreren

Jahren, um solide Ergebnisse zu erzielen. Zusätzlich erhöhen, die höchst dynamischen Prozesse in einem Container-Terminal die Schwierigkeit der Prognose, da eine Vielzahl der Prozesse in einem Container-Terminal von stochastischen Einflüssen abhängen. So kann etwa die Umschlagzeit eines Containers an einer Containerbrücke schon durch die tägliche Verfassung des Kranführers starken Schwankungen unterliegen. Auch Einflüsse unterschiedlicher Betriebsstrategien auf den Energieverbrauch lassen sich durch diese Methoden nicht bewerten und auch keine Erkenntnisse über die Energieverbrauchsprozesse der Einzelkomponenten gewinnen. Werden Abläufe im Terminal geändert, kann dies dazu führen, dass einmal fertiggestellte Modelle ihre Gültigkeit verlieren. Eine Anpassung der hier aufgeführten Modelle ist schwierig, da eventuell erst wieder über einen Zeitraum von mehreren Jahren Daten aufgezeichnet werden müssen.

Ein Simulationsmodell hat die hier aufgeführten Nachteile nicht, kann leicht veränderten Bedingungen angepasst werden und ist nicht auf eine große Anzahl historischer Daten angewiesen.

Nach (S. Wenzel u. a. 2008) ist ein Problem immer dann simulationswürdig, wenn:

„Eine Aufgabenstellung ist immer simulationswürdig, wenn die Lösung eines Problems nur mit der Methode Simulation gefunden werden kann. Das ist etwa der Fall, wenn dynamische Prozesse oder stochastische Einflüsse eine nicht zu vernachlässigende Rolle in dem zu untersuchenden System spielen. Die Simulationswürdigkeit ist ebenfalls gegeben, wenn die Lösung mit anderen mathematischen Verfahren zwar möglich wäre, ein Simulationsmodell die Lösung aber wesentlich erleichtert. Sind besondere Anforderungen bezüglich Kommunikation und Visualisierung der Ergebnisse gestellt, so ist die Erstellung eines Simulationsmodells durchaus auch dann zu vertreten, wenn das zugrunde liegende Problem mit anderen Mitteln u. U. sogar einfacher und schneller zu lösen wäre.“

Wolff et al. (Wolff, Kulus, und Dreher 2012) und Larek et al. (Larek u. a. 2011) stellen Ansätze vor, wie Simulation als Werkzeug zur Lastgangprognose genutzt werden kann.

Im Abschnitt **„Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.“** wurde beschrieben, dass ein Container-Terminal dem klassischen Bereich der Logistik zugeordnet werden kann. Zur Abbildung, Planung und Prognose von Logistikprozessen hat sich das Verfahren der Durchführung von Simulationsstudien bewährt (S. Wenzel u. a. 2008). Auch Planungen und Infrastrukturauslegungen im Terminal werden oftmals durch Simulationsstudien beantwortet. (Voß, Stahlbock, und Steenken 2004) geben eine Übersicht über zahlreiche Simulationsmodelle zur Abbildung der Prozesse in einem Seehafenterminal. Aus diesem Grund soll in dieser Arbeit ein Simulationsmodell eines Container-Terminals geschaffen werden, welches die kombinierte Betrachtung der Materialflüsse und Energieflüsse ermöglicht. Durch eine Prognose

4 Prognose elektrischer Leistungsaufnahme

se der Materialflüsse, also der Umschlagvorgänge im Terminal, soll so auch die zukünftige Leistungsaufnahme im Terminal prognostiziert werden.

5. Modellierung und Simulation von multimodalen Umschlagsanlagen

5.1 Logistik

Der Begriff Logistik beschreibt nach (Deutsch 2013) die Aufgabe der *„Planung, Steuerung und Kontrolle von Material- und Informationsflüssen sowohl innerhalb einer Unternehmung als auch zwischen der Unternehmung und ihren Lieferanten und Kunden.“* Es wird demnach zwischen den Aktivitäten Planung, Steuerung und Kontrolle unterschieden. Die Planung beschreibt die gedankliche Vorwegnahme von Handlungsschritten und Aktionen vor der eigentlichen Umsetzung. Aufbauend auf der Planung erfolgt der Prozess der Steuerung, welcher für die Umsetzung des Plans zuständig ist. Die Kontrolle überprüft und vergleicht die Ergebnisse der Umsetzung mit denen des Plans. Die von Deutsch angegebene Definition unterscheidet zwischen Material- und Informationsflüssen. Materialflüsse beschreiben alle Vorgänge, die mit stofflichen, also fassbaren oder materiellen Gütern zusammenhängen. Informationsflüsse hingegen beschreiben Vorgänge, die sich mit immateriellen Gütern befassen. Des Weiteren wird unterschieden zwischen der innerbetrieblichen und der außerbetrieblichen Durchführung der Arbeiten. Das Ziel der Logistik ist die Erbringung einer hochwertigen Leistung, einer hohen Qualität und einer Kostensenkung. Die Aufgaben der Logistik lassen sich nach den 6-R-Regeln von Jünemann (Jünemann 1989) wie folgt zusammenfassen: *„Das richtige Produkt zur richtigen Zeit am richtigen Ort in der richtigen Menge in der richtigen Qualität zu richtigen Kosten.“* Teilaufgaben der Logistik sind somit der Transport, der Umschlag, die Lagerung und die Bereitstellung von Gütern.

Nach Deutsch (Deutsch 2013) kann der Begriff *„Transport“* als *„Überwindung der räumlichen Distanz“* eines Transportguts angesehen werden. Der Transport dient somit der Verschiebung eines Guts von einer lokalen Position auf eine andere lokale Position. Der Verkehr entsteht durch Transporte und Transporte wiederum durch Transportmittel wie bspw. Schiffe oder Flurförderfahrzeuge. Die Durchführung des Transports kann nach (Schieck 2008) in Transportprozessen dargestellt werden. Es kann zwischen unimodalen Transportprozessen und multimodalen Transportprozessen unterschieden werden. Unimodale Transportprozesse bezeichnen direkte Transporte von einem Absender zu einem Empfänger ohne weiteren Umschlag des Transportguts. Unter multimodalen Transportprozessen wird der verkehrsträgerübergreifende Transport von der Quelle zum Ziel verstanden. Für den Wechsel des Transportguts von einem Kettenglied der Transportkette zu einem anderen Kettenglied ist ein Umladeprozess/Umschlag notwendig. In Abbildung 20 ist ein multimodaler Transportprozess dargestellt. Das Transportgut wird vom Absender versendet. Der Teilprozess Vorlauf entspricht dem ersten Kettenglied der Transportkette, der Teilprozess Nachlauf entspricht dem letzten Kettenglied. Zwischen

5 Modellierung und Simulation von multimodalen Umschlagsanlagen

dem Vorlauf und dem Nachlauf werden die Transportketten dem Hauptlauf zugeordnet. Zwischen dem Wechsel sämtlicher Transportketten erfolgt ein Umschlag, wobei die Umschläge zwischen Vor- und Hauptlauf sowie zwischen Haupt- und Nachlauf üblicherweise außerbetrieblich erfolgen. In der Praxis haben Vor- und Nachlauf eine Sammel- und Verteilfunktion, sodass die Konzentration des Transportguts im Hauptlauf erhöht werden kann und somit eine höhere Auslastung erreicht werden kann.

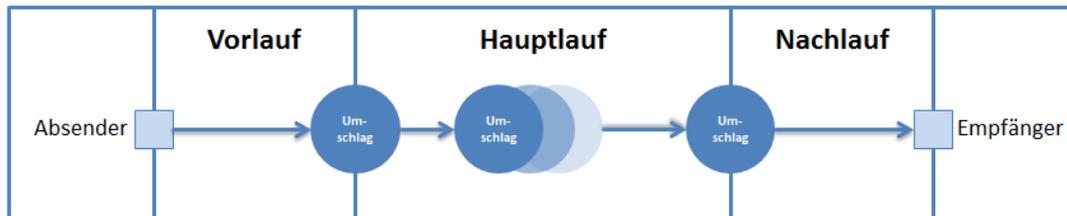


Abbildung 20: Struktur eines multimodalen Transportprozesses. Adaptiert nach (Deutsch 2013)

Der multimodale Transportprozess kann in den gebrochenen und den kombinierten Verkehr unterteilt werden. Beim gebrochenen Verkehr kann das Transportgut in unterschiedliche Ladeeinheiten aufgebrochen werden, wohingegen der kombinierte Verkehr eine Auflösung der Ladeeinheiten ausschließt. Das Transportgut verändert sich somit nicht. Des Weiteren kann der gebrochene Verkehr zwischen intra- und intermodalem Transport unterschieden werden. Beim intramodalen Transport wird das Transportgut mit genau einem Verkehrsträger transportiert. Beim intermodalen Transport hingegen wird das gleiche Transportgut in der gleichen Ladeeinheit mit Hilfe von mindestens zwei verschiedenen Verkehrsträgern transportiert. Ein Beispiel für einen intermodalen Transportprozess ist der weltweite Containertransport. Hierbei werden die unterschiedlichsten Waren (Transportgut) in Form von standardisierten Containern (Ladeeinheit) auf unterschiedlichen Schiffen, Lastkraftwagen oder Güterzügen (Transportmittel) befördert.

Bisher wurden Planungsprobleme im Container-Terminal zumeist aus logistischer Perspektive betrachtet und energietechnische Aspekte ausgeblendet. So zielen Optimierungsmöglichkeiten traditionell auf die Erhöhung des Containerumschlagvolumens und eine Reduzierung der Schiffsliegezeiten ab, ohne jedoch die Energieversorgung der Umschlagsgeräte mit einzubeziehen. Stahlbock und Voß (Stahlbock und Voß 2007) sowie Sun et al. 2012 (Sun u. a. 2012) geben einen Überblick über aktuelle Modelle und Verfahren zur Optimierung von Betriebsstrategien unterschiedlicher Planungsbereiche im Container-Terminal. Viele der Modelle sind zur Lösung von spezifischen Planungsproblemen gedacht und bilden daher nur Teilbereiche eines Terminals ab. So stellen Zhu et al. (M. Zhu u. a. 2010) etwa eine Simulationsarchitektur bereit, um die Auswirkungen von Twin-Transporten an Kai- und Lagerkräne zu untersuchen. Bei die-

ser Transportform werden von einem Kran 2 Container gleichzeitig bewegt. Das Simulationsmodell bildet nur den Bereich zwischen Kaimauer und Blocklager ab, da die Operationen in weiteren Terminalbereichen für die Fragestellung nicht relevant sind. Da Energieverbraucher im gesamten Terminal zu finden sind, wird im Folgenden auf Simulationsmodelle eingegangen, die alle Bereiche eines Container-Terminals umfassen. Grob lassen sich die existierenden Container-Terminalmodelle in zwei Gruppen einteilen. Zur ersten Gruppe gehören Simulationsmodelle, welche als Ziel haben eine allgemeine Plattform zur Entscheidungsunterstützung bereitzustellen. Sie dienen dazu, neue Betriebsstrategien oder den Einsatz neuer Transportmittel zu testen und ihre Auswirkungen auf das Gesamtsystem Container-Terminal zu untersuchen oder eine allgemeine Layoutplanung durchzuführen. Modelle dieser Gruppe verfügen zumeist über eine makroskopische Betrachtungsweise der Terminals. Beispiele für diese Gruppe sind (Sun u. a. 2012) (Li und Li 2010) (Cartení, Erberto, und de Luca 2005). Zur zweiten Gruppe gehören Modelle, welche ein spezifisches Optimierungsziel verfolgen, wodurch der Containerdurchfluss erhöht werden kann. Modelle dieser Gruppe besitzen zumeist eine mikroskopische Betrachtungsweise des Logistikgeschehens im Terminal. Ein Beispiel eines Modells dieser Gruppe ist (Bielli, Boulmakoul, und Rida 2006). Ein wesentlicher Teil der aufgeführten Techniken betrachtet lediglich isolierte Teilprobleme des Gesamtkontextes, wie z.B. die Liegeplatzplanung von Containerschiffen oder die Stellplatzzuweisung von Containern. Da jedoch starke Abhängigkeiten der unterschiedlichen Planungsprobleme existieren, wird von Stahlbock und Voß eine zusammenhängende Problembetrachtung favorisiert. Ihrer Meinung nach seien solche Modelle zielführend und können in Zukunft dazu dienen, neue Operationsstrategien zu entwickeln, um den Containerdurchsatz weiter zu erhöhen.

Gemeinsam haben die vorgestellten Modelle, dass Energieverbräuche der beteiligten Umschlagsgeräte nicht betrachtet werden, welche jedoch gerade bei der Nutzung von elektrisch angetriebenen Transportfahrzeugflotten von großer Bedeutung sind. Erst in jüngster Vergangenheit wurden Arbeiten veröffentlicht, welche sich mit den energietechnischen Aspekten eines Container-Terminals befassen. Darunter befinden sich auch zwei Simulationsmodelle, welche die Leistungsaufnahme in Container-Terminals berücksichtigen. Die wichtigsten Arbeiten und Simulationsmodelle werden im Folgenden näher beschrieben.

Im aktuell laufenden Projekt Green Cranes werden die ökonomischen und ökologischen Vorteilen elektrischer Containerbrücken untersucht (Sapina 2013). Eine Arbeit, welche sich ebenfalls mit den Potenzialen von elektrischen Containerbrücken befasst, wurde von (Bishop 2009) veröffentlicht. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass im Vergleich zu dieselbetriebenen Containerbrücken die Betriebskosten um mehr als 50% gesenkt werden können.

(Johanson 2010) beschreibt ebenfalls die Leistungsaufnahme von Containerbrücken. Zusätzlich wird aber auch der Verbrauch von Portalkränen untersucht. Dabei werden Lösungen vor-

gestellt, wie in Zukunft Energieeinsparungen bei der Nutzung der Kräne getroffen werden können. Es wird detailliert erläutert, welche Einzelkomponenten eines Krans elektrische Leistung aufnehmen und inwiefern dabei elektrische Verbräuche reduziert werden können. Es werden insbesondere Beispiele gegeben, wie die Leistungsaufnahme der allgemeinen Verbraucher eines Containerkrans gesenkt werden kann. Für die Motorkühlung wird eine sensorgesteuerte Schaltung vorgeschlagen, welche nur dann in Betrieb ist, wenn auch eine Kühlung notwendig ist. Flutlichter sollten automatisch abgeschaltet werden, wenn eine Containerbrücke nicht im Betriebsmodus ist. Neben der technischen Ebene werden auch auf der Prozessebene Vorschläge gemacht, wie Energieeinsparungen durchzusetzen sind. Es wird eine synchronisierte Arbeit der Portalkräne und Containerbrücken vorgeschlagen. Dabei könnte die durch Rückspeisung gewonnene Energie bei einem Senkvorgang dazu genutzt werden, einem im Hebeprozess befindlichen Kran diese Energie zukommen zu lassen.

Neben der Untersuchung ökonomischer und ökologischer Vorteile von Containerbrücken wurden auch zwei Arbeiten veröffentlicht, welche sich generell mit den Energieverbräuchen in Container-Terminals befassen. Eine dieser Arbeiten wurde 2012 von Tran (Tran 2012) veröffentlicht. Im Rahmen der Arbeit wurde die Leistungsaufnahme der einzelnen Teilverbraucher des Melbourn Container-Terminals über einen Zeitraum von einem Jahr aufgezeichnet und analysiert. Als Ergebnis wird darauf basierend eine analytische Methode zur Bestimmung der zu erwartenden maximalen Leistungsaufnahme vorgestellt. Eine weitere Arbeit in diesem Kontext wurde von (Verbeeck und Kuijper 2013) veröffentlicht, welche untersucht, welche Verbrauchsgruppen im Terminal dazu geeignet sind, Lastverschiebungspotenziale im Bereich des Smart Grid bereitzustellen. Die Autoren sehen diese insbesondere im Bereich der Kühlcontainerlager gegeben. In nicht vollautomatisierten Container-Terminals macht die Energieversorgung der Kühlcontainer bis zu 50% der Gesamtleistungsaufnahme aus, wobei eine kurzzeitige Abschaltung einzelner Kühlaggregate nicht zur Erwärmung der Ladung führt. Durch eine intelligente Steuerung der Ab- und Zuschaltungen einzelner Container können Lastverschiebungspotenziale auch über einen längeren Zeitraum angeboten werden.

5.2 Ansatz von Xin et. Al 2014

Jianbin et al. (Xin, Negenborn, und Lodewijks 2014) gehen auf die bisher vernachlässigte Betrachtung der Energieverbräuchen in maritimen Container-Terminals ein. Sie beanstanden, dass der Energieverbrauch im Terminal zwar aus strategischer Sicht betrachtet wird, bei der Optimierung auf Prozessebene die Energieverbräuche von Containerumschlagsgeräten jedoch völlig vernachlässigt werden. In der Arbeit wird eine Architektur für ein hybrides System vorgestellt, welches Logistikprozesse unter Berücksichtigung der Energieverbräuche optimiert. Das System besteht dabei aus einer zeitkontinuierlichen und einer ereignisdiskreten Komponente. Die ereignisdiskrete Komponente wird dazu genutzt, einen optimierten Maschinenbele-

gungsplan der Containerumschlagsgeräte zu erstellen, wobei die zeitkontinuierliche Komponente anschließend eine Optimierung der Umschlagsprozesse unter Berücksichtigung des Energiebezugs durchführt. Eine Reduzierung des Energieverbrauchs wird immer dann möglich, wenn bei dem Erstellen des Maschinenbelegungsplans Wartezeiten an den beteiligten Umschlagsgeräten entstehen. Dies ist z.B. der Fall, wenn ein Transportfahrzeug einen Lagerkran erreicht, um einen Container abzuladen, dieser aber noch durch die Durchführung einer anderen Umschlagsoperation blockiert ist. In diesem Fall ist es möglich, die Fahrgeschwindigkeit des AGVs so weit zu reduzieren, bis der Zeitpunkt des Erreichens am Kran und die Beendigung des Umschlagsprozesses zusammenfallen. Hierdurch ergeben sich keine Verzögerungen bei der Durchführung des Containerumschlags, jedoch wird die Leistungsaufnahme des AGVs durch die langsamere Fahrgeschwindigkeit reduziert. Eine weitere Möglichkeit der Optimierung stellen die Arbeitsgeschwindigkeiten der Lager- und Containerbrücken dar. Ist deren Umschlagsoperation beendet, bevor ein neues AGV für weitere Containertransporte zur Verfügung steht, entstehen ebenfalls Wartezeiten. Auch in diesem Fall ist es möglich, die Arbeitsgeschwindigkeit der Kräne zu senken, wobei die Leistungsaufnahme reduziert wird, ohne die Logistikprozesse negativ zu beeinflussen.

Die Autoren beschränken sich in ihrer Betrachtung auf die Transporte von Containern zwischen Containerbrücken und Portalkränen, weitere Aspekte des Terminals wie etwa die Energieversorgung der Horizontaltransportflotte oder der Verbrauch statischer Komponenten werden nicht betrachtet. Nebenläufigkeitseffekte, welche durch die Reduzierung der Arbeits- bzw. Fahrtzeitgeschwindigkeiten entstehen könnten, werden nicht berücksichtigt. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die exakten Gewichte der Container und die exakten Umschlagszeiten der Portal- und Kaikräne bestimmt werden können. Auch stochastische Einflüsse werden nicht berücksichtigt, wodurch das Modell nur dazu dient, die theoretischen Potenziale einer energieeffizienten Einsatzplanung aufzuzeigen.

5.3 Ansatz von Le 2012

Kim Le (Le 2012) stellt ein von AECOM entwickelte Simulation vor, welche Blocklager und die dazugehörigen Portalkräne abbildet. Dabei werden insbesondere die verschiedenen Prozesse (Heben eines Container, Senken eines Containers und horizontale Bewegung eines Containers) der Kräne detailliert betrachtet. Da es sich um eine kommerzielle Lösung handelt, wird der genaue Aufbau des Modells nicht erläutert. Es bleibt bei der Beschreibung des Konzeptmodells. Es wird deutlich, dass es sich um ein sehr detailliertes Modell handelt, welches die einzelnen Prozesse eines Portalkrans abbildet und in Abhängigkeit der Containergewichte und der Arbeitsgeschwindigkeit die Leistungsaufnahme bestimmt. Um eine Simulation mit dieser Genauigkeit durchführen zu können, ist es notwendig, genaue Kenntnis über die Eigenschaften eines Containers, wie etwa Position und Gewicht, zu besitzen.

5.4 Ansatz von Kaffka 2015

Kaffka et al. (Kaffka, Clausen, und Miodrag 2015) stellen eine Simulation zur Allokation von Emissionswerten auf Behälterebene in multimodalen Umschlagsanlagen mittels Simulation vor. Im Mittelpunkt der Arbeit steht die Modellierung von Emissionswerten, welche von Portalkränen innerhalb multimodaler Umschlagsanlagen erzeugt werden. Die Emissionswerte werden auf Grundlage von simulierten Energieverbrauchswerten der Containerbrücken bestimmt. Zur Simulation wird die Simulationsumgebung TerminalSim genutzt, welche auf der Simulationssoftware Enterprise Dynamics 8 der Firma INONTROL Simulation Solutions beruht und von Kaffka et al. (Kaffka, Clausen, und Stein 2014) entwickelt wurde. Um die Energieverbrauchsprozesse der Containerbrücken abbilden zu können, werden den einzelnen Prozessschritten einer Containerbrücke feste Leistungsaufnahmewerte zugeordnet. Die Prozesskette eines Kranspiels beginnt dabei mit einer Lehrfahrt zur nächsten umzuschlagenden Ladeinheit. Anschließend wird der Spreader der Containerbrücke gesenkt und die Ladeinheit durch Schließen der Twist-Locks oder der Greifarme aufgenommen. Darauffolgend wird die Last angehoben und zur Zielposition verfahren. Nach dem Erreichen der Endposition wird der Spreader gesenkt und die Ladeinheit abgestellt. Die Prozesskette schließt mit dem erneuten Anheben des Spreaders, wodurch dieser für weitere Umschlagsprozesse zur Verfügung steht. Jedem dieser Einzelprozesse wurde ein fester Leistungsaufnahmewert zugeordnet, wobei zwischen acht unterschiedliche Containerklassen (20 Fuß Leer, 40 Fuß Leer, 20 Fuß Leicht, 40 Fuß Leicht, 20 Fuß Mittel, 40 Fuß Mittel, 20 Fuß Schwer, 40 Fuß Schwer) unterschieden wurde. Dies bedeutet, dass für jede Klasse und jedem Prozessschritt genau ein Leistungsaufnahmewert hinterlegt wurde. Die notwendigen Leistungsaufnahmewerte wurden aus Energieverbrauchsmessungen eines Realsystems gewonnen. Die benötigten Zeiten für die Durchführung eines Teilprozesses (Handlingzeiten) wurden ebenfalls auf Grundlage historischer Beobachtungen an einem Realsystem bestimmt. Hierfür wurden die Containerumschlagszeiten mehrere Kräne über einen Zeitraum von einer Woche beobachtet und mittels MiniTab stochastische Verteilungsfunktionen abgeleitet, welche in das Simulationsmodell als Zeitverbrauch für diese Prozessschritte integriert wurde.

Ein Ergebnis der Studie ist, dass die unterschiedlichen Containergewichte keinen signifikanten Einfluss auf die Energieverbräuche ausüben, da die meiste Energie dafür benötigt wird, die Kräne mit einer Masse von über 300 Tonnen in Bewegung zu setzen. Ein Unterschied von bis zu maximal 20 Tonnen hat nach Kaffka et al. keinen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch eines Containerumschlags, wohingegen die Bewegungsentfernung einen sehr großen Einfluss auf die Verbräuche gezeigt hat.

5.5 Zusammenfassung

Die veröffentlichten Simulationsmodelle eines Container-Terminals, welche elektrische Leistung integriert abbilden, betrachten nur Teilbereiche eines Containerterminals und können somit die an ein Simulationsmodell zur Prognose des Energieverbrauchs gestellte Anforderung *A10-Abbildung energierelevanter Prozesse* nicht erfüllen. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die erfüllten Teilanforderungen, um eine Vollständigkeit zu erfüllen.

Tabelle 4: Erfüllung der Anforderung 10-Abbildung energierelevanter Prozesse

Methode	Xin et al. 2014	Le 2012	Kaffka et al. 2015
Leistungsaufnahme von Containerbrücken	x	x	-
Leistungsaufnahme von Transportfahrzeugen	x	-	-
Energieversorgung der Horizontaltransportflotte	-	-	-
Leistungsaufnahme von Portalkränen	x	x	x
Allgemeine Verbraucher im Terminal (Büro, Beleuchtung,...)	-	-	-
Hinterlandanbindung betrachtet	-	-	-

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine gesamtheitliche Betrachtung der Leistungsaufnahme im gesamten Terminalbereich, insbesondere eine Prognose der Leistungsaufnahme, bisher noch nicht erfolgt ist. An dieser Stelle existiert ein aktueller Forschungsbedarf, welcher im Rahmen dieser Arbeit geschlossen werden soll (*A7-Vollständigkeit*).

5 Modellierung und Simulation von multimodalen Umschlagsanlagen

6. Modellierung und Simulation von Leistungsaufnahmeprozessen

(Herrmann u. a. 2011) analysieren unterschiedliche Ansätze zur Abbildung von Energieverbräuchen in ereignisbasierten Materialflusssimulationen. Dabei werden die bisher veröffentlichten Ansätze in drei grundsätzliche Kategorien eingeordnet.

1. **Gekoppelte Ansätze** nehmen eine Kopplung von ereignisbasierter Simulation und externem Energiebewertungstool vor. Die ereignisbasierte Simulation übernimmt hierbei die Simulation der Materialflüsse. Auf Grundlage der unterschiedlichen Zustände der Materialflussobjekte (arbeitend, wartend, etc.) wird der Energieverbrauch vom Energiebewertungstool bestimmt.
2. **Kombinierte Ansätze** nehmen eine dynamische Kopplung von ereignisbasierter Simulation, weiteren Simulationsmethoden und einem externen Energiebewertungstool vor.
3. **Integrierte Ansätze** vereinen Simulation und Energiebewertung in einem Werkzeug.

Die Vorteile von gekoppelten Ansätzen liegen in der strikten Trennung von Material- und Energiefluss. Eine Simulation muss lediglich Zustandsveränderungen der Materialflussobjekte statistisch erfassen und protokollieren. Auf Grundlage der erfassten Zustandsveränderungen werden von einem externen Energiebewertungstool Energieverbräuche nachträglich berechnet. Dieser Ansatz ist leicht zu implementieren, da bei der Erstellung einer Materialflusssimulation lediglich beachtet werden muss, Zustandsveränderungen zu protokollieren. Mit wenig Aufwand können auch Schnittstellen implementiert werden, welche es ermöglichen, Zustandsveränderungen zur Laufzeit an das gekoppelte Energiebewertungstool zu übermitteln, wodurch auch eine Online-Überwachung der Gesamtleistungsaufnahme möglich wird. Diese Methode kann einfach auf bereits bestehende Simulationsmodelle angewendet werden, da nur ein geringer Aufwand benötigt wird, vorhandene Simulationsmodelle anzupassen. Der Nachteil liegt in der fehlenden Möglichkeit, Wechselwirkungen zwischen Energieebene und Materialflussebene abzubilden. Im Falle eines Container-Terminals, welches elektrisch angetriebene Transportfahrzeuge mit einem Wechselbatteriekonzept einsetzt, sind jedoch gerade Wechselwirkungen zwischen Energiebereitstellung und Energieverbrauch von Interesse. So sind die Transportleistungen der Fahrzeuge von den zur Verfügung stehenden geladenen Wechselbatterien abhängig. Stehen bei Bedarf keine geladenen Batterien zur Verfügung, können Transportfahrten nicht durchgeführt werden, welches negative Auswirkungen auf den Containerumschlag ausübt. Aus diesem Grund ist ein gekoppelter Ansatz nur bedingt dazu geeignet, Energieverbräuche in einer Container-Terminalsimulation abzubilden.

Kombinierte Ansätze zeichnen sich durch eine Kombination verschiedener Simulationsmethoden aus. Sie sind dazu geeignet, Energieverbräuche mit einem nahezu beliebigen Detaillierungsgrad abzubilden. So können z.B. Temperaturmodelle eingebunden werden, um den Einfluss der Temperatur auf den Energieverbrauch zu berücksichtigen. Der Nachteil liegt in der hohen Komplexität der Modellierung solcher Systeme. Unterschiedliche Simulationsmodelle müssen in verschiedenen Systemen entwickelt und implementiert werden. Diese sind schließlich mit dynamischen Schnittstellen zu vernetzen, was dazu führt, dass Ansätze dieser Kategorie oft für sehr spezifische Fragestellungen entwickelt werden. Die entwickelten Modelle sind nur schwer auf andere Probleme übertragbar und müssen oftmals für kleine Änderungen im System grundlegend neu entwickelt werden.

Integrierte Ansätze haben den Vorteil, dass eine Implementierung im Vergleich zu den gekoppelten und kombinierten Ansätzen leichter umzusetzen ist. Da Energieverbräuche und Materialflüsse in einem System betrachtet werden, ist es auch möglich, Wechselwirkungen zwischen der Energiebereitstellung und dem Energieverbrauch abzubilden. Ein Nachteil ist die Begrenzung auf die Funktionalitäten des verwendeten Simulationsframeworks. (Schlegel, Stoldt, und Putz 2013) betonen auf Grundlage zahlreicher Experteninterviews, dass eine Integration von Energiebetrachtung mittels spezieller Erweiterungsbausteine in bestehenden Planungswerkzeugen gegenüber z.B. der Verbindung von Materialflusssimulatoren mit weiteren speziell für energetische Untersuchungen prädestinierten Simulationstools unbedingt zu bevorzugen ist. Die ähnliche Ansicht vertreten auch (Schlegel, Stoldt, und Putz 2013), welche darauf hinweisen, dass eine Kopplung unterschiedlicher Simulationswerkzeuge aufgrund ihrer Komplexität nur schwer in Entwicklungsprozesse von Industrieunternehmen zu integrieren sind.

(Schlegel, Stoldt, und Putz 2013) bemängeln den generellen Nachteil, dass aktuelle Simulationswerkzeuge allgemeine Verbraucher oftmals nicht beachten und somit dem Anspruch einer vollständigen Betrachtung aller elektrischen Verbraucher nicht gerecht werden.

Aufgrund der einfachen Möglichkeit der Modellierung von Wechselwirkungen zwischen Energieverbrauch und Energiebereitstellung soll in dieser Arbeit ein integrierter Ansatz einer Energieverbrauchssimulation eingesetzt werden. Im Folgenden wird ein Überblick über diese gegeben.

6.1 Ansatz von Christiansen et al.

(Christiansen u. a. 2013) stellen ein Ansatz für die Analyse und Optimierung des Energieverbrauchs von automatisierungstechnischen Systemen vor. Dabei gliedert sich ihr Beitrag in drei Abschnitte. Im ersten Abschnitt wird eine präzise Definition der fundamentalen energietechni-

schen Terminologie eingeführt, welche im Folgenden genannt und auch für diese Arbeit übernommen wird.

- **Prozessenergie** beschreibt die Energie, welche für die Ausführung eines konkreten Prozessschrittes benötigt wird, z.B. Energie für den Transport von Produkten auf einem Förderband.
- **Ressourcenenergie** beschreibt die Energie, welche durch die am Prozess beteiligten Komponenten, z.B. Sensoren, Aktoren, Steuerung, benötigt wird.
- **Produktenergie** beschreibt die Energie, die in einem Produkt, etwa die thermische Energie nach einer Heizphase, enthalten ist.
- **Systemenergie** stellt die Summe aller im System enthaltenen Energiemengen und – Flüsse von Prozess-, Ressourcen- und Produktenergie dar.
- **Energiebedarf** beschreibt die benötigte Energiemenge zur Befriedigung eines Bedürfnisses, z.B. dem Erzeugen eines Gutes unter Einsatz einer dafür geeigneten Technik unter definierten Randbedingungen.
- **Energieverbrauch** beschreibt die Bezugsenergie, also die Menge an Energie die ein Endverbraucher bezieht bzw. die für die Deckung des Energiebedarfs aufgewandte Menge bestimmter Energieformen unter realen Bedingungen.

Im zweiten Abschnitt wird ein Beschreibungsmodell zur Beschreibung von technischen Prozessen unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs vorgestellt. Die Autoren merken an, dass es mit der Formalisierten Prozessbeschreibung (FPB) bereits ein etabliertes universelles Beschreibungsmittel zur grafischen Modellierung von Prozessen existiert, die energietechnischen Aspekte in der Beschreibung jedoch nicht ausreichend berücksichtigt werden. Neben der grafischen Modellierung des Prozessablaufs bietet die FPB insbesondere die Möglichkeit, den Prozess mittels eines Informationsmodells detailliert zu beschreiben. Für die grafische Modellierung stehen Operatoren (Prozessoperator (PO)), (Technische Ressource (TR)) sowie Zustände (Produkt, Energie) zur Verfügung. Zwar besteht mit dem Zustand Energie die grundsätzliche Möglichkeit zur Modellierung energietechnischer Aspekte, doch wird die ungenaue Beschreibung, wie energietechnische Aspekte zu modellieren sind, bemängelt. Des Weiteren ist eine Differenzierung des Zustands Energie in Prozess- bzw. Ressourcenenergie nicht möglich. Um diesen Umstand auszugleichen, wird das FPB erweitert. Hierzu erfolgt die energietechnische Spezifizierung des Prozessmodells anhand von Attributen. Prozessoperationen und technischen Ressourcen werden die jeweiligen Energieformen zugeordnet. Wie in Abbildung 21 dargestellt, wird hierbei zwischen physikalischen Energieformen (elektrisch, mechanisch) und automatisierungstechnische Energieaspekte (Prozessenergie, Ressourcenenergie) unterschieden. Da Prozessenergie die Menge, die zur Ausführung eines Prozesses benötigte Energie

beschreibt, wird diese Energiemenge als variabel angesehen, da diese nur während der Prozessausführung benötigt wird. Die zur Ausführung des Prozesses benötigte Ressourcenenergie wird in einen fixen und einen variablen Anteil unterteilt. Der fixe Energiebedarf repräsentiert hierbei die Energie, die zur Grundversorgung der Ressource benötigt wird. Der variable Anteil hingegen ergibt sich z.B. aus der Prozessenergie. Je nach Detaillierungsgrad und Anwendungsfall können weitere fixe oder variable Energieanteile modelliert werden. Als Beispiele werden hier u.a. Druckluft oder Beleuchtung genannt.

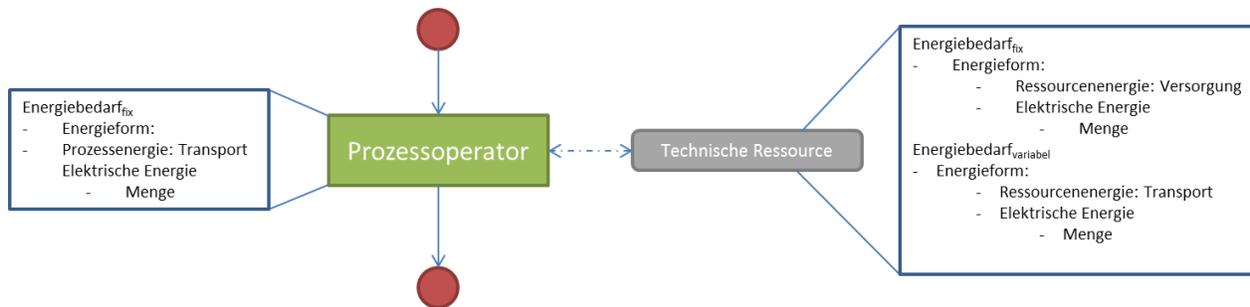


Abbildung 21: Zuordnung von Prozess- und Ressourcenenergie im Prozessmodell nach (Christiansen u. a. 2013)

Im dritten Teil wird der eigentliche integrierte Ansatz zur Energiesimulation vorgestellt. Hierbei wird ein automatisierungstechnisches System durch eine Materialflusssimulation abgebildet. In der Simulation werden die unterschiedlichen Komponenten einer Anlage durch Module dargestellt. Jedes Modul nimmt während eines Simulationslaufs wechselnd einen der drei Betriebszustände „Prozess“, „Stand-By“ oder „Leerlauf“ ein. Jedem Betriebszustand eines Moduls wird ein konstanter Energieverbrauchswert zugeordnet, welcher aus Leistungsmessungen am realen System bestimmt wurde. Unter der Beachtung von Modellierungsungenauigkeiten und abstraktionsbedingten Fehlern im Modell sowie physikalischer Effekte wie Reibungseffekte einer realen Anlage konnte bei der Simulation des Energieverbrauchs im Schnitt eine Genauigkeit von 87 Prozent erreicht werden.

6.2 Ansatz von Soldinger und Petku

(Soldinger und Petku 2005) stellen ebenfalls einen Ansatz zur Betrachtung energietechnischer Aspekte bei Materialflusssimulationen vor. Während eines Simulationslaufs werden die im Modell enthaltenen Objekte unterschiedliche Betriebszustände annehmen. Diese repräsentieren etwa die unterschiedlichen Zustände einer Produktionsmaschine. Elektrischen Verbrauchern wird für jeden Betriebszustand ein konstanter Energieverbrauchswert zugeordnet. Im Vergleich zu dem Ansatz von Christiansen et al. (2013) wird nicht nur der durch einen Prozess

ausgelöste Energieverbrauch betrachtet. Vielmehr wird zwischen allgemeinen, direkten und indirekten Energieverbräuchen unterschieden.

- **Allgemeine Energieverbräuche** lassen sich keinem konkreten Prozess zuordnen und verändern sich fluktuierend über die Zeit. Ein Beispiel für einen allgemeinen Verbraucher wäre z.B. die Beleuchtung oder Belüftung einer Werkshalle.
- **Direkte Energieverbräuche** lassen sich einem konkreten Produktionsprozess oder Teilprozess zuordnen, z.B. das Betreiben einer Fertigungsmaschine. Hierbei wird zwischen den Zuständen „in Betrieb“ und „nicht in Betrieb“ unterschieden. Befindet sich eine Maschine „in Betrieb“, ver- oder bearbeitet also ein Produktionsteil, wird eine festgelegte elektrische Leistung aufgenommen. Die aufgenommene elektrische Arbeit kann dann durch die Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Zeit berechnet werden.
- **Indirekte Verbräuche** werden zwar durch einen Prozess hervorgerufen, können diesem jedoch nicht konkret zugeordnet werden. Als Beispiel für einen indirekten Energieverbrauch wird die Verlustleistung eines Stromtransformators aufgeführt.

Nach (Solding und Petku 2005) ist eine Abbildung dieser drei Verbrauchstypen notwendig, um die aggregierte Leistungsaufnahme zu jedem Zeitpunkt einer Simulation angeben zu können. Kritisch an dem vorgestellten Ansatz ist, dass lediglich die zwei Zustände „in Betrieb“ und „nicht in Betrieb“ gelistet aufgeführt werden. Verbräuche andere Zustände werden ausgeblendet, wodurch eine vollständige Betrachtung der elektrischen Leistungsaufnahme nicht möglich ist. Die Autoren weisen explizit auf die Wichtigkeit hin, allgemeine Verbraucher in einer Energiesimulation zu berücksichtigen, jedoch wird nicht erläutert, wie eine konkrete Umsetzung allgemeiner Verbraucher im Modell stattfindet.

6.3 Ansatz von Wolff et al.

(Wolff, Kulus, und Dreher 2012) stellen einen ähnlichen Ansatz wie (Solding und Petku 2005) und (Christiansen u. a. 2013) vor. Während jedoch in den erstgenannten Arbeiten der Fokus auf der praktischen Realisierbarkeit einer Energiesimulation liegt, legen Wolff et al. (2012) den Fokus auf einer wissenschaftlich formalen Beschreibung einer Methode zur Simulation von Energieverbräuchen in Materialflusssimulationen. Ein Unterscheidungsmerkmal ist dabei, dass unterschiedlichen Betriebszuständen eines Materialflussobjekts nicht direkt eine Leistungsaufnahme zugeordnet wird. Es werden sogenannte Energiezustände eingeführt, in welche Betriebszustände überführt werden. Zusätzlich werden die möglichen Zustände eines Materialflussobjekts nach (Beyer 2010) um die Zustände „Standby“ und „Vorbereitend“ erweitert. Ein Objekt kann also die Betriebszustände „Aus“, „Standby“, „Vorbereitend“ und „Produzierend“ annehmen, wobei jedem Zustand in einen oder mehrere Energiezustände überführt wer-

den kann. In der Realität wird eine Produktionsmaschine durchaus verschiedene Prozesse nacheinander durchführen, z.B. Lackieren und Trocknen. Obwohl beide Prozesse von ein und derselben Maschine durchgeführt werden, erzeugen diese eine unterschiedliche Leistungsaufnahme der Maschine. Aus diesem Grund wird ein Produktionsprozess nach dem Ansatz von (Dietmair, Verl, und Wosnik 2008) in mehrere Teilprozesse unterteilt, wobei jeder Teilprozess durch ein zusätzliches Materialflussobjekt repräsentiert wird. Bei einem Wechsel des Betriebszustandes wird dieser in einen Energiezustand überführt. Der Energieverbrauch eines Objekts wird somit mit dem aktuellen Betriebszustand („Aus“, „Standby“,...) und dem Energiezustand („Aus“, „Standby“,...) in Beziehung gesetzt. (Wolff, Kulus, und Dreher 2012) führen auf, dass bisher noch keine einheitliche Definition für Energiezustände getroffen wurde. Energiezustände werden dem jeweiligen Anwendungskontext angepasst und neu definiert. Typische Energiezustände sind „Off“, „Standby“, „Ready-To-Produce“ und „Producing“, aber auch alternative Definitionen wie „Power Load during Start Up“, „Base Load“ und „Power Load during Manufacturing“ werden aufgeführt. Abbildung 22 zeigt schematisch den Prozess der Überführung eines Betriebszustands in einen Energiezustand.

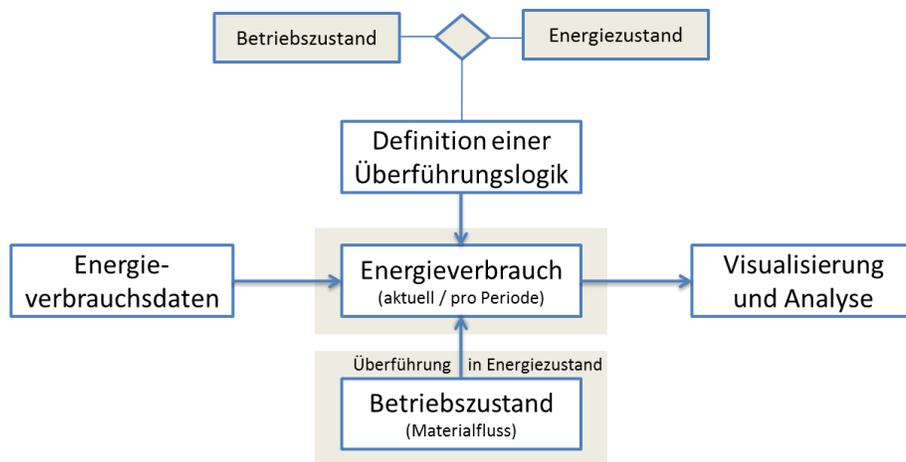


Abbildung 22: Schematische Darstellung der Überführung von Betriebszustand in einen Energiezustand nach (Wolff, Kulus, und Dreher 2012).

Sobald die Änderung eines Betriebszustands registriert wird, wird dieser in einer Betriebszustandsvariable gespeichert. Eine Überführungslogik überführt nun den aktuellen Betriebszustand in einen Energiezustand. Im simpelsten Falle kann dies durch eine Tabelle realisiert werden, welche jedem Betriebszustand einen festen Energiezustand zuordnet. Es können aber auch komplexe Algorithmen implementiert werden, welche die Überführung von Betriebs- in Energiezustand übernehmen. Neben festen Leistungsaufnahmewerten können auch Lastprofile hinterlegt werden.

Die Überführung eines Betriebszustandes in einen Energiezustand kann in unterschiedlicher Art und Weise erfolgen. Abbildung 23 zeigt eine Übersicht über die möglichen Überführungsarten. Bei einer N:1 Überführung wird jedem Betriebszustand exakt ein Energiezustand zugeordnet, wohingegen bei einer 1:N Überführung ein Betriebszustand in unterschiedliche Energiezustände überführt werden kann. Dies ist z.B. der Fall, wenn eine Maschine bei der Verarbeitung unterschiedlicher Materialien über verschiedene Leistungsaufnahmewerte verfügt oder wenn diese von äußeren Faktoren wie Temperatur oder Luftfeuchtigkeit abhängen. Auch unterschiedliche Arbeitsgeschwindigkeiten einer Maschine und eine daraus resultierende Leistungsaufnahmeveränderung können so abgebildet werden. Weiter muss der Definitionsraum eines Energiezustands festgelegt werden. Zum einen wird hier die „Vereinigung gleicher Maschinentypen“ genannt, die für sämtliche Maschinen dieselben Typen von Energiezuständen definiert. Während diese Definition für kleinere Modelle zielführend und vor allem leicht zu implementieren ist, reicht diese zum anderen für komplexere Systeme nicht mehr aus. So verfügen z.B. Einlagerungssysteme nicht über die gleichen Betriebszustände wie eine Produktionsanlage, verbrauchen jedoch bei der Ein- bzw. Auslagerung eines Guts Energie. In diesem Fall ist es notwendig, für jeden Maschinentyp oder sogar für jede einzelne Maschine individuelle Energiezustände zu definieren.

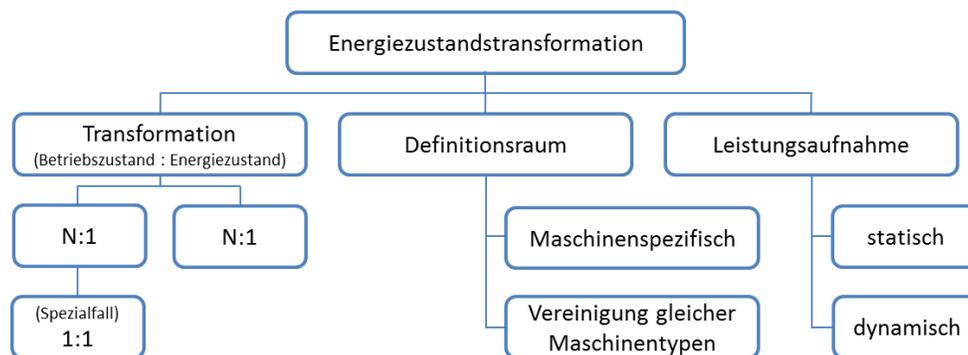


Abbildung 23: Möglichkeiten der Energiezustandstransformation nach (Wolff, Kulus, und Dreher 2012)

Als letztes muss die Art der Leistungsaufnahme festgelegt werden. Dies kann konstant oder dynamisch geschehen. Bei einer konstanten Zuweisung wird beim Durchlaufen eines Betriebszustandes immer die gleiche elektrische Arbeit verrichtet, während bei der dynamischen Zuweisung die verrichtete elektrische Arbeit von der Zeit abhängig ist.

6.4 Ansatz von Schlegel et al.

(Schlegel, Stoldt, und Putz 2013) stellen einen neuen Ansatz zur erweiterten Integration energetischer Betrachtungen in der Materialflusssimulation vor. Sie verfolgen dabei das Ziel der

„Ganzheitlichkeit“, indem nicht nur die elektrische, sondern sämtliche Energieflüsse abgebildet werden können. Auf Grundlage von Experteninterviews werden sechs Kernanforderungen an eine energetische Betrachtung in Materialflusssimulationen genannt:

1. **Integrierte Betrachtung.** Eine integrierte Betrachtung von Material- und Energiefluss in einem Tool ist zu bevorzugen.
2. **Ganzheitliche Betrachtung der Energie- und Medienflüsse.** Vor allem bei der Abbildung von Produktionsprozessen und – anlagen reicht es nicht aus, lediglich elektrische Verbraucher zu betrachten. Auch andere Energieträger, wie z.B. Gas, müssen berücksichtigt werden. Zusätzlich sollten auch weitere Prozessmedien, wie etwa Druckluft oder Kühlmittel abgebildet werden.
3. **Einhaltung der Erzeuger-Verbraucher-Dualität.** Dies bedeutet, dass sowohl Anlagen der Produktion als auch jene der Infrastruktur nach dem systemtheoretischen Ansatz beschrieben werden sollten. Dies bedeutet, dass verschiedene Zustände eingenommen werden können, in denen sie als „Verbraucher“ bestimmte Energien und Prozessmedien in Anspruch nehmen, andere dabei als „Erzeuger“ ihrer Umgebung zur Verfügung stellen und dabei ggf. einen Materialfluss realisieren.
4. **Freie Betriebszustandswahl.** Anlagen sollen eine frei definierbare Anzahl von Betriebszuständen einnehmen können, welchen jeweils genau ein Leistungsaufnahmewert zugeordnet wird.
5. **Programmgesteuerte Zustände .** Programmgesteuerte Zustände müssen berücksichtigt werden. Diese werden aufgrund interner oder externer Schalthandlungen eingenommen.
6. **Externe Steuerungsmöglichkeiten.** Ein entwickelter Ansatz soll in der Lage sein, auch auf externe Steuerungsinstanzen d.h. zusätzliche Software reagieren zu können.

Grundlage des vorgestellten Ansatzes ist ein allgemeingültiges Komponentenmodell, mit welchem sich alle in der Fertigung vorhandenen Elemente beschreiben lassen. Das Komponentenmodell wird in Abbildung 24 dargestellt und teilt sich in zwei Ebenen. Die horizontale Ebene versinnbildlicht den Materialfluss, während in der vertikalen Ebene der Energie- und Medienfluss angedeutet ist. Der Materialfluss wird in Materialflusssimulationen standardmäßig abgebildet, während Funktionalitäten zum Abbilden des Verbrauchs und der Erzeugung von Energie oftmals nicht existieren. Diese Aspekte werden im vorgestellten Ansatz durch einen zusätzlich entwickelten Baustein (eniBRIC) abgedeckt. Dieser kann als Einzelbaustein funktional in ein Materialflussnetzwerk eingesetzt werden und beispielsweise ein Teilsystem einer Fabrik darstellen, welches Energien, Medien oder Infrastrukturleistungen bereitstellt. Hierzu gehören z.B. Druckluftkompressoren, Lüftungsanlagen oder die Beleuchtung einer

Werkshalle. Komplementär zu den Materialflüssen bildet der Baustein den energetisch relevanten Input (z.B. Aufnahme an Elektroenergie und Kühlwasser einer Induktionswärmanlage) und Output (z.B. Abwärme über Abluft und Kühlwasser) je Betriebszustand ab. Die reine Betrachtung elektrischer Energie wird also um weitere Energietypen wie Gas, Wasser etc. erweitert. Für jede zu betrachtende Komponente im Produktionssystem muss ein eniBRIC Baustein einzeln instanziiert werden, während Auswertungs- und Konfigurationsbausteine nur einmalig im Modell hinterlegt werden.

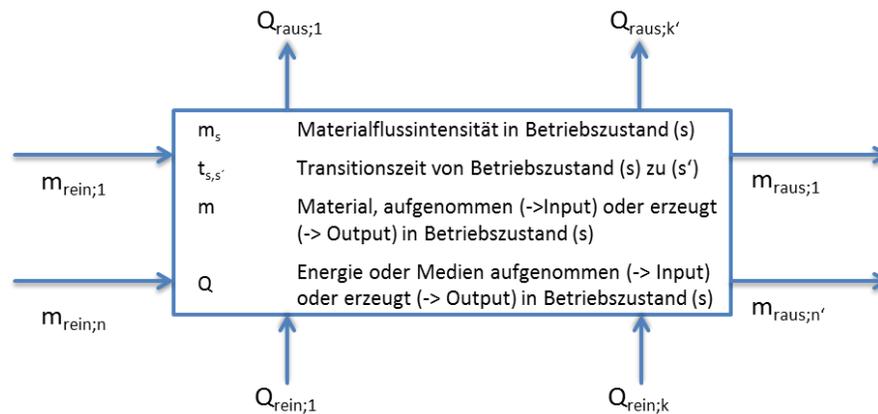


Abbildung 24: Komponentenmodell von Produktionsmitteln und Infrastruktur nach (Schlegel, Stoldt, und Putz 2013)

Neu an dem Ansatz ist auch, dass Wechselwirkungen zwischen Energie- und Materialfluss berücksichtigt werden. Während der Simulation kann der Betriebszustand einzelner eniBRIC Instanzen über eine standardisierte Schnittstelle verändert werden. Sobald ein Betriebszustandswechsel initiiert wird, prüft die betroffene Instanz zunächst, ob ausreichend Kapazitäten für die benötigten Medien bei den jeweiligen Erzeugern verfügbar sind. Trifft dies nicht zu, wird konfigurationsabhängig entweder der Betriebszustandswechsel blockiert, bis der Mangel beseitigt wurde oder eine entsprechende Meldung ausgegeben. Weiter wird zwischen Input- und Output Energieströmen unterschieden. So wird etwa durch die Aufnahme elektrischer Leistung Wärme erzeugt, welche berücksichtigt wird. Die Autoren lösen sich von der Betrachtung limitierter Betriebszustände eines Materialflussbausteins und fordern eine frei wählbare Anzahl von Betriebszuständen, die Einfluss auf die Intensität des Materialflusses nehmen und jeweils eine spezifische Leistungsaufnahme zugeordnet werden kann. Zusätzlich definieren sie die bereitzustellenden eingehenden bzw. bereitgestellten abgegebenen Energien. Die Autoren betrachten ebenfalls die Problematik des veränderlichen Verbrauchs von Produktionsanlagen. In Produktionssystemen kann nicht immer davon ausgegangen werden, dass die betrachteten Anlagen über ihre gesamte Betriebszeit hinweg eine konstante Leistungsaufnahme besitzen.

Als Beispiel wird ein Wärmebehandlungsofen aufgeführt, der zum Teil verschiedene Temperaturprofile durchläuft, wobei die Leistungsaufnahme stark von der zu erreichenden Temperatur abhängt. Bei steigender Heizleistung kann auch von einer steigenden Leistungsaufnahme ausgegangen werden, während bei einer unveränderten Temperatur lediglich die entstehende Verlustleistung ausgeglichen werden muss. Ein Abkühlen des Ofens kann entweder passiv ohne Energieeintrag oder aktiv mit zusätzlicher Kühlleistung realisiert werden. Um einer veränderlichen Leistungsaufnahme gerecht zu werden, kann der Verbrauch über verschiedene Betriebszustände modelliert werden, welche zeitlich gesteuert nacheinander durchlaufen werden. Die genaue Reihenfolge kann hierbei als Information in dem zu bearbeitenden Teil (BE) gespeichert werden. Allerdings gehen die Autoren nicht auf vom Werkstück abhängige Faktoren ein, welche die Leistungsaufnahme beeinflussen. Je Betriebszustand wird jeweils nur ein fester Energieverbrauch angenommen. Das Modell wird exemplarisch in Plant Simulation umgesetzt, wobei es die Autoren bei der konzeptionellen Beschreibung des Ansatzes belassen. So wird zwar beschrieben, dass eniBRIC über einheitliche Schnittstellen verfügt, doch werde diese nicht näher erläutert.

6.5 Ansatz von Kulus et al.

(Kulus, Wolff, und Dreher 2011) stellen einen Ansatz vor, wie Energieverbrauch eines Fertigungssystems durch die Nutzung von Plant Simulation prognostiziert werden kann. Das vorgestellte Modell wird anhand einer Fallstudie der Automobilindustrie validiert. Es wird betont, dass der Ausgangspunkt einer Energieverbrauchssimulation die Datenaufnahme einnimmt, da neben den materialflusstechnischen Eingangsdaten auch Informationen zum energetischen Verhalten der Produktionsanlagen notwendig sind. Diese umfassen im Wesentlichen die zustandsbezogenen Leistungsaufnahmen der Maschinen, da bei der Prozessausführung die elektrische Leistung der Anlagen je nach Art der auftretenden Betriebszustände (z.B. Fertigen, Warten, Rüsten) variiert. An die Implementierung einer Energiesimulation stellen die Autoren spezifische Anforderungen:

1. Die Separierung der Energieverbrauchssimulation-Funktionalität vom eigentlichen Simulationsmodell.
2. Funktionalitäten der Energieerfassung müssen aktiviert und deaktiviert werden können, um auch eine Simulation ohne Berücksichtigung der Energieverbrauchsaspekte durchführen zu können.
3. Die Berechnung und Darstellung des Energieverbrauchs erfolgen zur Simulationslaufzeit.
4. Die Ergebnisse müssen exportiert werden können.

5. Die Simulation sollte rückstandsfrei erfolgen. Dies bedeutet, dass alle relevanten Energie-Attribute und Ergebnisse dynamisch zur Laufzeit erzeugt werden. Nach dem Zurücksetzen der Simulation in den Ausgangszustand werden diese wieder aus dem Simulationsmodell entfernt.

Um den Energieverbrauch abzubilden, werden drei Module entwickelt und in Plant Simulation integriert. Ein Parametrierungs- und Import-Modul ist für den Import der aufbereiteten Leistungswerte zuständig. Diese sind im Modell durch den Nutzer manuell editierbar. Ein Kalkulationsmodul ist für die Zustandsüberwachung zuständig. Ausgewählte Anlagen werden von diesem beobachtet und registrieren den Zeitpunkt der Zustandsveränderungen. Anhand festgelegter Objektattribute (z.B. belegt, pausiert, arbeitend), wird bestimmt, welcher Betriebszustand aktuell vorliegt und die entsprechende Leistungsaufnahme bestimmt. Nach einer weiteren Zustandsänderung wird der Verbrauch als Produkt der Leistungsaufnahme und Zustandsdauer berechnet. Als letztes wurde ein Statistik- und Visualisierungs-Modul zur Buchung und Dokumentation des Energieverbrauchs entwickelt.

Die Autoren entwickeln eine spezifische Lösung in Plant Simulation für ein Problem und stellen keine allgemeine Methode zur Verfügung, wodurch eine generelle Übertragbarkeit des Ansatzes nicht gegeben ist. Die Höhe der Leistungsaufnahme wird nur von den Betriebszuständen eines Moduls beeinflusst. Eigenschaften eines Werkstückes oder äußere Faktoren werden hierbei nicht berücksichtigt. Die spezifische Lösung erlaubt es lediglich, vorgegebenen Betriebszustände der Materialflussbausteine von Plant Simulation zu beobachten. Eigene Betriebszustände können nicht definiert werden. Die Anzahl der Betriebszustände hängt somit von der Auswahl des Simulationswerkzeugs ab.

6.6 Zusammenfassung

Bei den vorgestellten Ansätzen zur integrierten Modellierung von Material- und Energieflüssen ergibt sich der Nachteil, dass die Leistungsaufnahme nur abhängig vom Betriebszustand der einzelnen Anlagenkomponente, nicht aber vom Werkstück, dem Bewegungsablauf oder weiteren äußeren Faktoren ist. Lediglich Schlegel et al. (2013) gehen auf die äußeren Faktoren der Umwelt- und Gebäudeeinflüsse ein, schließen jedoch explizit die Betrachtung des einzelnen zu bearbeitenden Stückguts aus. Somit können aus den Modellen nur relativ grobe Aussagen zum effektiven Energieverbrauch abgeleitet werden.

Allgemeine Verbraucher erwähnen lediglich Solging und Petku (2005), gehen jedoch nicht konkret darauf ein, wie diese modelliert werden sollen. Um der Anforderung der Vollständigkeit (A4-Vollständigkeit) gerecht zu werden, sind die allgemeinen Verbraucher eines Container-Terminals zu berücksichtigen.

6 Modellierung und Simulation von Leistungsaufnahmeprozessen

Die elektrische Energiebereitstellung wird lediglich in der vorgestellten Methode von Schlegel et al. (2013) berücksichtigt. Bei der Verwendung von Elektrofahrzeugen im Container-Terminalbetrieb muss die Energiebereitstellung in Form von Batterien gewährleistet werden, da dieser große Einfluss auf die Verfügbarkeit einzelner Fahrzeuge und somit auf die den Containerdurchsatz ausübt.

Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die Anforderungen einer Energiesimulation im Kontext eines Container-Terminals. Es ist zu erkennen, dass keine vorgestellte Methode zur Energiesimulation sämtliche Anforderungen erfüllt. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit eine geeignete Methode entwickelt, welche die vorherrschenden Methoden um relevante Komponenten ergänzt.

Tabelle 5: Anforderungsdeckung der Methoden zur Energiesimulation

A1. Prozessenergie direkter Verbraucher	X	X	X	X	X
A.2 Allgemeine Verbraucher	-	O	-	-	-
A.3 Ressourcenenergie	X	O	-	-	-
A.4 Energierrelevante Einflussfaktoren	-	-	-	O	-
A.5 Integrierte Betrachtung	X	X	X	X	X
A.9 Elektrische Energiebereitstellung	-	-	-	X	-
	(Christiansen u. a. 2013)	(Solding und Petku 2005)	(Wolff, Kulus, und Dreher 2012)	(Schlegel, Stoldt, und Putz 2013)	(Kulus, Wolff, und Dreher 2011)

X = Anforderung erfüllt, O = Anforderung teilweise erfüllt, - = Anforderung nicht erfüllt

7. Simulationsbasierte Energiebedarfsprognose

Aufgrund der Komplexität der Abläufe in einem maritimen Container-Terminal ist es nur sehr schwer oder vielleicht überhaupt nicht möglich, den Energiebedarf analytisch zu prognostizieren. Alle Containertransporte werden im Terminal von der Terminallogistiksteuerung (TLS) geplant. Hierbei wird eine Ent- und Beladungsreihenfolge der Container festgelegt, Lagerplätze für Container reserviert und Schwerlastfahrzeugen, welche den Containertransport im Terminal übernehmen, konkrete Transportaufträge zugewiesen. Der Planungshorizont, in dem sich diese Systeme bewegen, ist mit ca. 15 Minuten als eher kurz zu bezeichnen. Die kurze Zeitspanne bedingt sich durch die Komplexität der Betriebszustandsinformationen des Terminals, welche in Echtzeit verarbeitet werden müssen und die generelle Verfügbarkeit der zur Planung benötigten Daten. Im Gesamtzusammenhang gesprochen werden konkrete Container verplant, die sich bereits auf der Anlage befinden und deren Merkmale bekannt sind (OOG-Container, Reefeer-Container...). Dies bedeutet, dass eine Planung von Containertransportoperationen, insbesondere für Container, welche landseitig durch LKWs gehandelt werden, nicht durchgeführt werden kann, da die Ankunfts- und Abholzeit einzelner Container nicht bekannt sind. Auch die Reihenfolge, in welcher Container umgeschlagen werden, lässt sich erst kurz nach dem Erreichen von einem Container auf dem Terminalgelände bestimmen. Ebenfalls an der Wasserseite ist eine langfristige Planung nur bedingt durchführbar. Bei Großschiffen steht etwa zwei Tage vor ihrer Ankunft im Hafen fest, welche Container sich an Bord befinden und über welche Merkmale diese verfügen. Bei kleineren Transportschiffen, wie z.B. Feedern und insbesondere Kähnen für die Umfuhr zwischen verschiedenen Terminals, stehen diese Informationen, wenn überhaupt, erst wenige Stunden vor Ankunft des Schiffes im Terminal fest. Eine genaue Planung der Logistikabläufe ist an dieser Stelle nicht möglich. Aufgrund der fehlenden Informationen trifft das TLS je nach aktuellem Stand im Terminal kurzfristige Entscheidungen, etwa die Durchführung von Lageroptimierungen (Umstapeln von Containern) bei einer niedrigen Terminalauslastung. Ein großer Planungshorizont ist auch aus Sicht der operativen Mitarbeiter im Terminal nicht wünschenswert, da diese lediglich wenige Container innerhalb einer Warteschlange überblicken wollen und können (Petersen 2014).

Um die Logistikabläufe und den damit einhergehenden Energieverbrauch eines Container-Terminals zu prognostizieren, muss der Planungshorizont vergrößert werden, wobei Plandaten ohne konkreten Containerbezug verwendet werden müssen. Dieses ist nicht durch vorhandene TLS-Systeme zu bewerkstelligen, welche immer mit konkreten Plandaten einzelner Container arbeiten. Aus diesem Grund soll das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell aus zu erwartenden Containerumschlägen, Auftragslisten und weiteren Einflussgrößen den Energiebedarf eines Container-Terminals prognostizieren, ohne dabei die erst kurzfristig verfügbaren Plandaten zu verwenden.

Bei dem vorgestellten Modell geht es darum, die Logistikprozesse und die daraus resultierenden Energieverbrauchsprozesse nur auf Grundlage der zukünftigen Schiffsankünfte, Containeranlieferungen und Abholungen zu simulieren. Ziel der Forschungsfrage ist es, zu überprüfen, ob dies eine geeignete Methode ist, den Energieverbrauch zu prognostizieren.

Im folgenden Kapitel wird erläutert, inwiefern eine Simulation dazu genutzt werden kann, den Energiebedarf eines Container-Terminals zu prognostizieren. Die Grundidee des vorgestellten Ansatzes ist es, die zukünftigen Logistikprozesse zu simulieren und auf Grundlage dieser Daten den Energieverbrauch der einzelnen Verbraucher abzubilden. Die Simulation des Energieverbrauchs und der Energiebereitstellung soll dabei integriert stattfinden, da eine nachträgliche Bestimmung der Energieverbräuche existierende Wechselwirkungen zwischen Energiebereitstellung und Energieverbrauch nicht berücksichtigen würde. So muss z.B. der Energieverbrauch von Transportfahrzeugen während eines Simulationslaufs abgebildet werden, um die Ausfallzeiten der Fahrzeuge zu berücksichtigen, welche durch Tank- oder Batterieladevorgänge entstehen. Diese Ausfallzeiten haben Einfluss auf die Logistikprozesse, welche wiederum Einfluss auf die Energieverbräuche anderer Verbraucher, wie etwa Containerbrücken, ausüben. Für ein Konzept zur simulationsbasierten Energiebedarfsprognose und dessen Evaluation sind drei Entwicklungsschritte notwendig:

1. Entwicklung einer neuen Methodik zum Abbilden von Energieverbrauchsprozessen in Materialflusssimulationen, um den in Abschnitt 1.3 formulierten Anforderungen zu entsprechen. Im Folgenden als „Zustandsbasierte Abbildung von Energieverbrauchsprozessen in ereignisdiskreten Simulationen“ (ZAES) bezeichnet.
2. In einem zweiten Teilschritt ist ein diskretes ereignisbasiertes Simulationsmodell zu entwickeln, welches die Betriebsabläufe und Energieverbrauchsprozesse in einem Container-Terminal kombiniert abbildet. Hierbei soll es sich um ein generisches Simulationsmodell handeln, welches zur Beantwortung unterschiedlicher Fragestellungen domänenspezifisch erweitert werden kann. So ist es möglich, dieses Modell dazu zu nutzen, neue Strategien der Energiebereitstellung zu entwickeln oder Fragen zur optimalen Infrastrukturauslegung (Anzahl Wechselbatterien, notwendige Kapazität der Batterien, etc.) zu beantworten. Im Folgenden wird dieses Modell als „*Power Consumption Terminal Model*“, kurz PCTM bezeichnet.
3. In einem dritten Schritt ist das *Power Consumption Terminal Model* domänenspezifisch zu erweitern, um den Energiebedarf eines Container-Terminals zu prognostizieren. Die Erweiterungen beziehen sich zum einen auf die Art und Weise, wie die Höhe der Energieverbräuche bestimmt und benötigte Zeiten für Logistikprozesse berechnet werden. Zum anderen muss eine Architektur ergänzt werden, welche die notwendigen Informationen bereitstellt, auf dessen Grundlage die Logistik- und

Energieverbrauchsprozesse prognostiziert werden. Im Folgenden wird dieses Modell als *Greenport* bezeichnet.

4. In einem letzten Schritt gilt es die Funktions- und Leistungsfähigkeit des Modells zu zeigen. Hierzu wird ein Modell des Container-Terminals Altenwerder in Hamburg entworfen und eine Instanz des Modells prototypisch im diskreten Simulationsframework Plant Simulation implementiert. Im Folgenden als CTA-Modell bezeichnet.

Im Rahmen dieser Arbeit werden also die drei unterschiedlichen Modelle (PCTM, Greenport und CTA-Modell) entwickelt und die Simulationssoftware Plant Simulation zur Evaluation genutzt. Auf der obersten Modellebene befindet sich das PCT-Modell, welches die Logistikprozesse eines Container-Terminals abbildet. Um die Energieverbräuche der Logistikprozesse integriert abzubilden, wird eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode „Zustandsbasierte Abbildung von Energieverbrauchsprozessen in ereignisdiskreten Simulationen“ (ZAES) entwickelt und genutzt. Das PCT-Modell wird um Funktionalitäten und Objekte ergänzt, um eine Prognosefunktionalität zu erfüllen (GreenPort). Schließlich wird eine konkrete Ausprägung des Modells entwickelt (CTA-Modell) und in Form einer Simulation in der Simulationsplattform Plant Simulation implementiert und evaluiert (CTA-Simulation). Abbildung 25 führt die verschiedenen Abstraktionsschichten auf der Modell- und Simulationsebene auf.

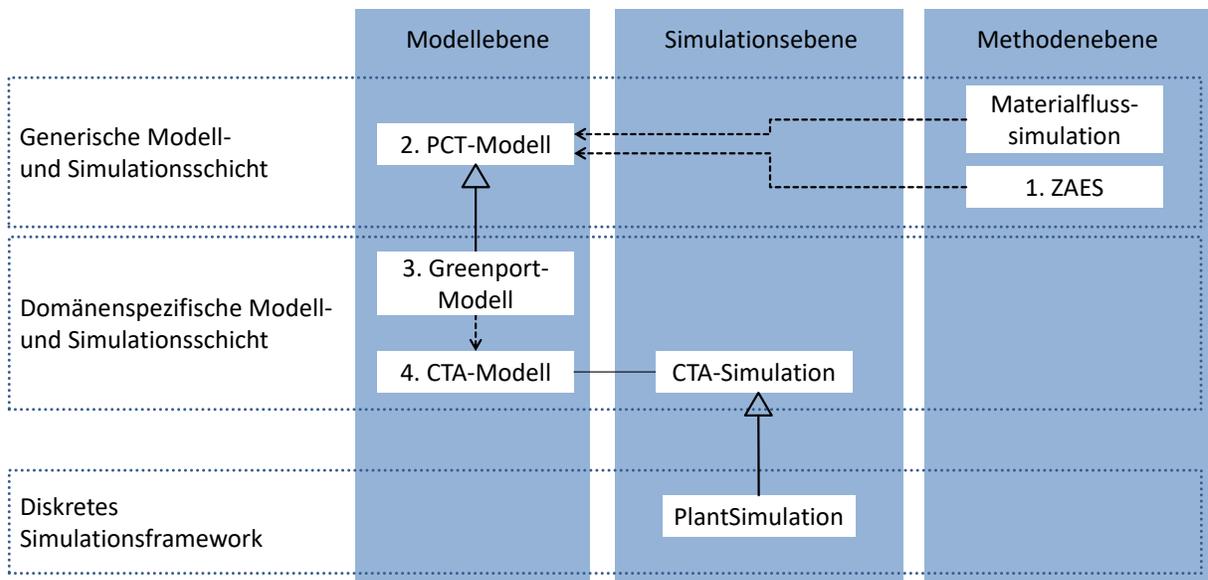


Abbildung 25: Abstraktionsschichten

Zur Erstellung der Modelle wird ein von Rabe et al. (2008) entwickeltes Vorgehensmodell verwendet. Hierbei handelt es sich um ein Vorgehensmodell, welches expliziert für die Durch-

7 Simulationsbasierte Energiebedarfsprognose

führung von Simulationsstudien entwickelt wurde. Das Vorgehensmodell stellt prinzipiell die Abfolge zur Bearbeitung der einzelnen Phasen der Modellentwicklung dar. Rücksprünge und Iterationen sind aufgrund von fehlerhaften Zwischenergebnissen oder erweiterten Annahmen jederzeit möglich. Abbildung 26 führt die einzelnen Phasen der Modellentwicklung als Ellipsen auf. Für ein Simulationsprojekt lässt sich das Vorgehensmodell grob in die Definitions- und Durchführungsphase unterteilen. In der Definitionsphase folgt die Zielbeschreibung der Simulationsstudie, welche bereits in Abschnitt 1.2 erfolgt ist. Während der Durchführungsphase sind die Phasen der Modellbildung Systemanalyse, Modellformalisierung und Implementierung abzuwickeln. Eingehend mit der Systemanalyse (siehe Abschnitt 2) wird in einem ersten Schritt ein Konzeptmodell erstellt. Dies ist ein rein deskriptives Modell, welches der ersten noch nicht formalen Beschreibung der abzubildenden Realität dient. In diesem sind sowohl die Systemgrenzen als auch die grundsätzlichen Systemfunktionen mit ihren Wechselwirkungen enthalten.

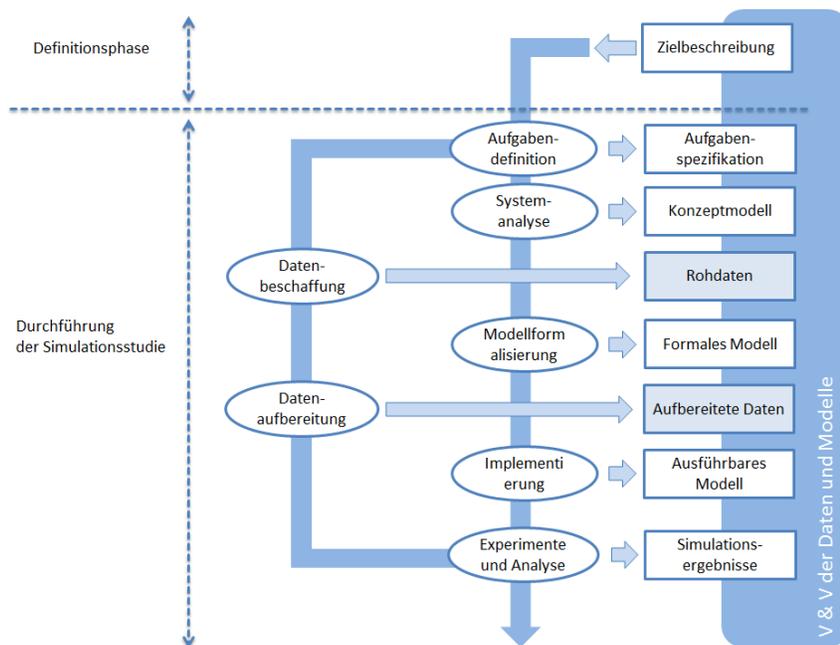


Abbildung 26: Vorgehensmodell nach (Rabe, Spieckermann, und Wenzel 2008)

Durch das formale Modell werden die im Konzeptmodell beschriebenen Sachzusammenhänge formalisiert. Zeitlich parallel und streng vernetzt zur Modellerstellung werden die auf der Aufgabenspezifikation basierenden Datenbeschaffung und Datenaufbereitung erfolgen. Nach Wenzel et al. (S. Wenzel u. a. 2008) sollte dieser Prozess nicht in der Modellbildung subsumiert, sondern separat betrachtet werden. Im Anschluss an die Phasen der Modellbildung erfolgt die Planung und die Durchführung der Experimente und Analyse der Ergebnisse in Be-

zug auf die formulierte Zielbeschreibung. Nach Wenzel sollte jeder Simulationslauf auf einer konkreten Modellstruktur mit einem definierten Parametersatz über eine repräsentative Zeitdauer erfolgen. Zum Abschluss müssen die Ergebnisse auf Plausibilität überprüft werden. Die Zielbeschreibung ist bereits in Kapitel 6 erfolgt. Im Folgenden wird nun die Beschreibung des Konzeptmodells und des formalen Modells erfolgen. Die Schritte der Datenbeschaffung und Aufbereitung, Experimente sowie die Validierung des Prognosemodells werden am Beispiel des CTA-Modells in Kapitel 8 erfolgen.

7.1 Zustandsbasierte Abbildung von Energieverbrauchsprozessen in ereignisdiskreten Simulationen (ZAES)

Die in Abschnitt 6 aufgeführten Ansätze zur Simulation von Energieverbrauchsprozessen haben den Nachteil, dass Ressourcenenergien, allgemeine Verbraucher und äußere Faktoren bei der Abbildung von Leistungsaufnahmeprozessen nicht berücksichtigt werden. Hieraus folgend ergeben sich drei zu schließende Lücken, um die Leistungsaufnahme eines Container-Terminals zu simulieren.

1. **Allgemeine Verbraucher:** In einem Container-Terminal macht die Leistungsaufnahme der allgemeinen Verbraucher (Beleuchtung, Stromverbrauch in Bürogebäude, IT-Infrastruktur, etc.) einen Anteil von bis zu 20% der Systemenergie aus (siehe Abschnitt 2.2). Aufgrund des hohen Anteils der durch die allgemeinen Verbraucher erzeugten Leistungsaufnahme ist diese nicht vernachlässigbar, um eine möglichst ganzheitliche energetische Betrachtung eines Container-Terminals zu erreichen.
2. **Ressourcenenergie:** Um eine differenzierte Betrachtung der Leistungsaufnahme zu erlangen, ist auch die Betrachtung von Ressourcenenergie von Bedeutung. Insbesondere dann, wenn die Ressourcenenergie eines elektrischen Verbrauchers einen hohen Anteil an der Gesamtleistungsaufnahme besitzt.
3. **Äußere Faktoren:** Äußere Einflüsse auf die Leistungsaufnahme werden nicht berücksichtigt. Jedoch hat z.B. das Gewicht einer Ladeeinheit bei einem Hebevorgang Einfluss auf die Leistungsaufnahme. Dies muss im Modell berücksichtigt werden.

Um diese Lücken zu schließen, wird im Folgenden ein Ansatz vorgestellt, welcher allgemeine Verbraucher, Ressourcenenergie und äußere Faktoren berücksichtigt. Das hier vorgestellte Modell geht dabei über die gestellten Anforderungen an ein Prognosemodell zur Vorhersage der Leistungsaufnahme in einem Container-Terminal hinaus. Somit ist es übertragbar auf andere Problemfelder der Produktion und Logistik und kann insbesondere in Materialflusssimulationen Anwendung finden. Hierdurch werden die in Abschnitt 6 aufgezeigten Defizite der bisher veröffentlichten Methoden geschlossen.

7 Simulationsbasierte Energiebedarfsprognose

Die Grundidee der vorgestellten Ansätze, Energieverbräuche in Abhängigkeit des Betriebszustands eines Verbrauchers zu betrachten, wird beibehalten. Als ein Verbraucher wird im Folgenden jede Maschine verstanden, die einen Energietyp (elektrische Leistung, Wasser, Gas...) zur Durchführung einer Tätigkeit benötigt. Jedoch wird die direkte Kopplung zwischen Betriebszustand und Energieverbrauch aufgelöst. Dies bedeutet, dass die Leistungsaufnahme nicht direkt aus dem Betriebszustand ermittelt wird, sondern auf Grundlage der aktuellen Betriebs-, Prozess- und Ressourcenzustände eines Verbrauchers. Jeder Verbraucher verfügt hierfür über eine fest definierte Anzahl von möglichen Betriebs-, Prozess- und Ressourcenzuständen, wobei diese jeweils den Zustand *aktiv* oder *nicht aktiv* einnehmen können.

Jeder Verbraucher verfügt über unterschiedliche Betriebsmodi (*OperationalMode*), welche durch einen Zustand (*state*) beschrieben werden. Um die einzelnen Subverbraucher eines Verbrauchers zu berücksichtigen, verfügt dieser über eine bestimmte Anzahl an Ressourcen (*Resource*). Abbildung 27 zeigt den allgemeinen Aufbau eines Verbrauchers.

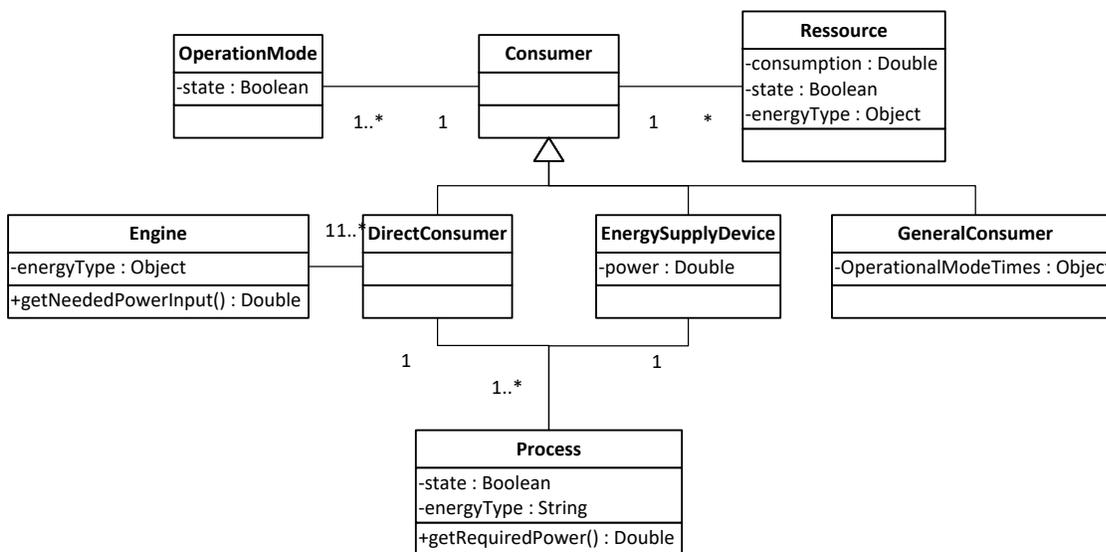


Abbildung 27: Klassendiagramm eines Verbrauchers

- Betriebsmodi repräsentieren den allgemeinen Zustand eines Verbrauchers. Je nach Betriebsmodus werden unterschiedliche Ressourcen aktiviert. Für die Durchführung eines bestimmten Prozesses kann ein bestimmter Betriebsmodus als Voraussetzung gelten. So kann eine Containerbrücke z.B. einen Container nur dann heben, wenn diese sich im Betriebsmodus „Betriebsbereit“ befindet. Ob ein Betriebsmodus aktiv oder nicht aktiv ist, wird durch den Betriebszustand (*state*) beschrieben.

- Ressourcen bezeichnen Komponenten eines Verbrauches, welche benötigt werden, um einen bestimmten Prozess durchzuführen. Hierbei kann es sich z.B. um Sensoren oder Aktoren handeln. Ressourcen nehmen ebenfalls einen der Zustände „Aktiv“ oder „Nicht Aktiv“ ein. Bei eingeschaltetem Zustand (*state*) wird eine bestimmte Energiemenge verbraucht.

Die Gruppe der Verbraucher unterteilt sich weiter in die Spezialisierungen Direkte Verbraucher (*DirectConsumer*), Allgemeine Verbraucher (*GeneralConsumer*) und Objekte zur Energiebereitstellung (*EnergySupplyDevice*). Direkte Verbraucher repräsentieren Anlagen die für die Durchführung eines spezifischen Prozesses Energie benötigen.

- Prozesse einer Containerbrücke wären z.B. „Container heben“ und „Container senken. Jeder Prozess nimmt zu jeder Zeit einen der Prozesszustände (*state*) „Aktiv“ oder „Nicht Aktiv“ ein. Es können durchaus unterschiedliche Prozesse zur selben Zeit durchgeführt werden und somit den Prozesszustand „Aktiv“ einnehmen.

Die benötigte Energie für die Durchführung eines Prozesses stellt ein oder mehrere Motoren (*Engine*) bereit. Prozesse benötigen zur Durchführung eine spezifische Menge Energie von einem speziellen Energietyp (*energyType*). Die benötigte Menge der Energie wird durch die Methode *getRequiredPower()* bestimmt. Diese kann für jeden Prozess einen fest definierten Verbrauchswert zurückgeben oder auf Grundlage verschiedener Attribute den Verbrauch analytisch bestimmen. Hierfür können Attribute, wie etwa das Gewicht einer Ladeinheit, definiert werden, auf deren Grundlage die benötigte Energiemenge bestimmt wird.

Ein Sonderfall stellt die Gruppe der Energieversorgungskomponenten (*EnergySupplyDevices*) dar. Diese beziehen nicht nur eine Energieform, sondern stellen diese auch den spezifischen Verbrauchern einer Simulation zur Verfügung.

Allgemeine Verbraucher (*GeneralConsumer*), wie etwa die Flutlichtbeleuchtung eines Container-Terminals, verfügen über eine Liste von Zeitpunkten, welche den Betriebszustand des allgemeinen Verbrauchers ändern.

Ein Verbraucher bezieht immer dann elektrische Leistung, wenn ein Prozess durchgeführt wird oder verschiedene Ressourcen aktiviert sind. Die Leistungsaufnahme wird sich immer dann ändern, wenn ein Prozess- oder Ressourcenzustand verändert wird. Anschließend muss die Leistungsaufnahme neu bestimmt werden. Abbildung 28 zeigt den Ablauf zur Bestimmung der Leistungsaufnahme eines Verbrauchers.

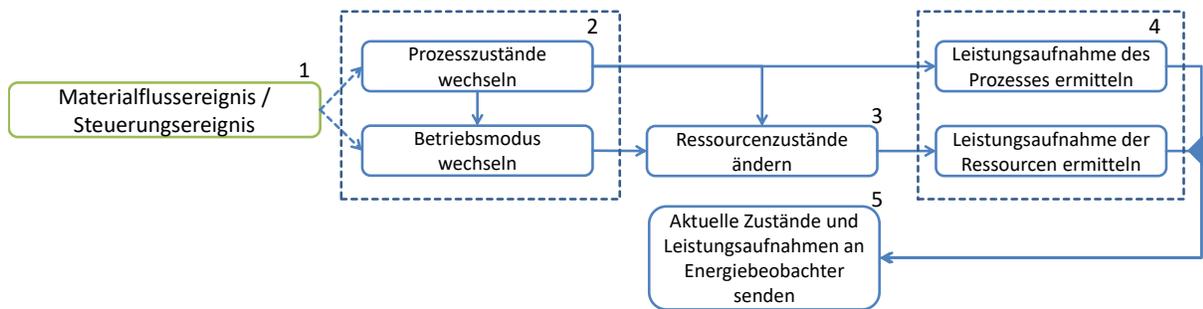


Abbildung 28: Ablauf zur Bestimmung der Leistungsaufnahme eines Verbrauchers

Ein Prozess eines Verbrauchers kann durch ein Materialflussereignis oder durch ein Steuerungssignal eines übergeordneten Managementsystems ausgelöst werden (1). Ein Materialflussereignis wäre z.B. das Eintreffen eines Werkstücks an einer Maschine, welche anschließend die automatische Durchführung des notwendigen Prozesses startet. Ein Steuerungssignal startet einen Prozess unabhängig vom Materialfluss. Dies ist z.B. der Fall, wenn eine Containerbrücke vom Terminal Operating System den Befehl bekommt, sich an einer bestimmten Position der Kaimauer zu positionieren, um dort auf eine Schiffsankunft zu warten.

Auf Grundlage des durchzuführenden Prozesses werden die Prozesszustände gesetzt und eventuell der Betriebsmodus des Verbrauchers verändert (2). Der Betriebsmodus wird immer dann verändert, wenn ein bestimmter Betriebsmodus zur Durchführung eines Prozesses notwendig ist. So muss z.B. eine Containerbrücke zum Umschlag eines Containers den Betriebszustand „Betriebsbereit“ einnehmen, wodurch automatisch verschiedene Subverbraucher, wie etwa das Hydrauliksystem und die Umgebungsbeleuchtung, eingeschaltet werden. Diese Subverbraucher werden solange elektrische Leistung beziehen, bis sie durch einen Wechsel des Betriebsmodus deaktiviert werden. Zusätzlich zu den aktivierten Ressourcen durch den aktuellen Betriebszustand einer Anlage können aber auch Prozesse zusätzliche Ressourcen benötigen, um durchgeführt zu werden. Neben der Änderung des Betriebsmodus durch eine Prozesszustandsänderung kann der Betriebsmodus auch durch ein übergeordnetes Managementsystem geändert werden.

Nachdem der Betriebsmodus und die Prozesszustände gesetzt wurden, müssen die verschiedenen Ressourcen aktiviert, bzw. deaktiviert werden (3). Dies wird durch eine Überfunktionsfunktion realisiert, die z.B. in Form einer Tabelle implementiert werden kann. Hierzu werden für jeden Betriebsmodus die Zustände der Ressourcen der Anlage definiert. Abbildung 29 verdeutlicht den Vorgang der Ressourcenzustandsänderung bei einem Wechsel des Betriebsmodus.

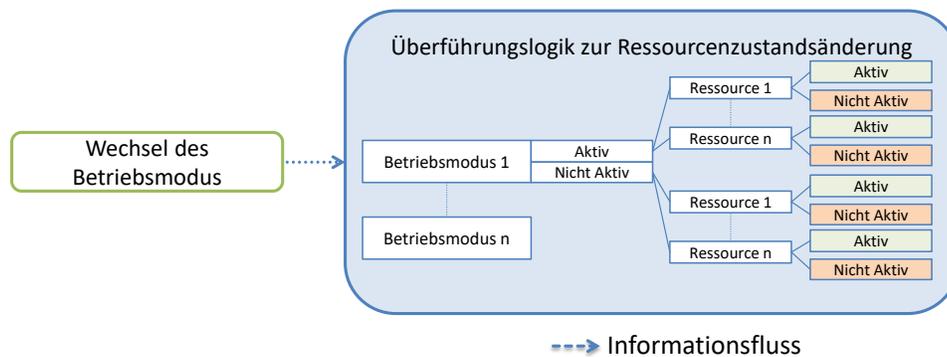


Abbildung 29: Überführungslogik der Ressourcenzustandsänderung bei einem Wechsel des Betriebsmodus (3)

Die Zustandsänderungen von Ressourcen durch einen Prozess können ebenfalls durch eine Tabelle realisiert werden. Hierbei ist zu beachten, dass Ressourcen aktiviert durch einen Wechsel des Betriebsmodus nicht durch einen Prozesszustandswechsel geändert werden können. Durch einen Prozesszustandswechsel können also lediglich zusätzliche Ressourcen aktiviert werden, jedoch keine deaktiviert werden. Diese zusätzlichen Ressourcen werden nach Durchführung des Prozesses wieder deaktiviert, wobei der Betriebszustand erhalten bleibt.

Nach dem Setzen der Ressourcenzustände muss die Leistungsaufnahme der Anlage bestimmt werden (4). Diese setzt sich aus der benötigten Leistung der Ressourcen und der benötigten Prozesslast zusammen. Die benötigte Leistungsaufnahme zur Durchführung eines Prozesses kann entweder durch einen festen Wert beschrieben werden oder aber auch von äußeren Faktoren abhängen und muss in diesem Fall analytisch bestimmt werden. Jede Ressource verbraucht ab dem Zeitpunkt ihrer Aktivierung ebenfalls eine feste Leistungsaufnahme, wobei ebenfalls die Möglichkeit gegeben ist, einen fixen Leistungsaufnahmewert zu hinterlegen oder diesen analytisch zu bestimmen. Auf diese Art und Weise können auch äußere Faktoren, wie z.B. Wittereinflüsse, berücksichtigt werden. Neu ist an dem hier vorgestellten Ansatz die Berücksichtigung externer Einflüsse bei der Bestimmung der Leistungsaufnahme. So können Faktoren wie etwa die Außentemperatur oder der Typ eines Containers zur Bestimmung der Leistungsaufnahme berücksichtigt werden. Hierzu verfügt jeder Verbraucher über mindestens eine Klasse „Motor“, welche Attribute und Methoden bereitstellt, die aktuelle Leistungsaufnahme zu bestimmen. Hierbei können Attribute der Materialfluss-BEs oder weitere äußere Faktoren berücksichtigt werden.

Nach der Ermittlung der aktuellen Leistungsaufnahme wird diese an eine Energiebeobachter-Komponente übermittelt (5). Je nachdem ob ein Prozess- und oder ein Betriebszustand geändert wurde, werden unterschiedliche Informationen übermittelt. Handelt es sich um einen Betriebszustandswechsel, ändert sich lediglich die Ressourcenenergie. In diesem Fall werden die

7 Simulationsbasierte Energiebedarfsprognose

Verbraucherklasse, der Verbraucher, die beteiligten Ressourcen, die Simulationszeit und die aktuelle Leistungsaufnahme übermittelt. Die Verbrauchsklasse identifiziert einen Ressourcen- oder Verbrauchertyp, etwa eine Containerbrücke. Der Verbraucher ist die übermittelnde Instanz einer Verbrauchsklasse. Etwa Containerbrücke 12. Die Simulationszeit ist die Zeit, zu welcher eine Zustandsänderung und folglich ein Leistungsaufnahmewechsel eintritt. Die Leistungsaufnahme stellt den ermittelten Leistungsbezug in Kilowatt dar. Bei der Übermittlung der Daten an die Energiebeobachter-Komponente, hervorgerufen durch einen Prozesszustandswechsel, wird zusätzlich der aufrufende Prozess übermittelt. Dies ermöglicht die konkrete Zuordnung von Prozessen zu Verbrauchern. Dies ermöglicht u.a. die Identifizierung verbrauchsintensiver Prozesse. Abbildung 30 verdeutlicht den Vorgang der Datenübertragung.

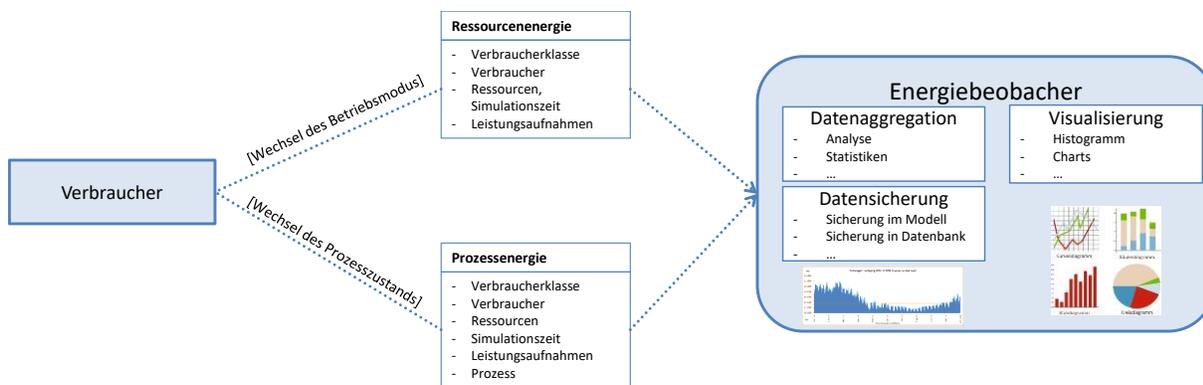


Abbildung 30: Übermittlung der aktuellen Leistungsaufnahme an die Energiebeobachter-Komponente durch einen direkten Verbraucher (5)

Die Kernaufgabe des Moduls ist die Aggregation, Analyse und die Erstellung von Statistiken der elektrischen Leistungsaufnahme. Hierzu wird jede Zustands- und Lastveränderung protokolliert. Aus der Simulationszeit und der übermittelten Leistungsaufnahme kann so im Nachhinein die errichtete elektrische Arbeit für jeden Verbraucher berechnet werden. Weiter werden durch die Energiebeobachter-Komponente Methoden und Klassen zur Visualisierung der Verbrauchsprozesse zur Verfügung gestellt. Zudem stellt das Modul Funktionalitäten bereit, Verbrauchsdaten über die Simulationsausführung hinaus zu speichern. Dies dient der Möglichkeit einer späteren Analyse und Bewertung der Leistungsaufnahmeprozesse.

Durch die vorgestellte Methode werden nun äußere Faktoren bei einer Energiesimulation berücksichtigt. Auch die Betrachtung von Ressourcen bei der Leistungsaufnahme ist möglich, wodurch eine detaillierte Betrachtung der Leistungsaufnahme möglich wird. Zuletzt muss es also noch ermöglicht werden, allgemeine Verbraucher abzubilden, was im Folgenden geschehen soll.

Allgemeine Verbraucher verhalten sich ähnlich wie direkte Verbraucher, verfügen im Gegensatz zu diesen jedoch über keine Prozesse, sondern lediglich über eine bestimmte Anzahl an Ressourcen und Betriebszuständen. Im Regelfall sind dies lediglich die Betriebszustände „Ein“ und „Aus“. Die Aktivierung eines allgemeinen Verbrauchers kann zyklisch oder ereignisbezogen erfolgen. Bei einem zyklischen Verfahren werden zum Simulationsstart feste Einschalt- und Abschaltzeitpunkte der einzelnen Betriebszustände festgelegt und die Ereignisse werden dem Ereignisverwalter hinterlegt. Bei einem ereignisorientierten Verfahren werden die einzelnen Betriebszustände des Verbrauchers durch ein spezifisches Ereignis ausgelöst. Die geplanten Zeiten der Zustandsänderung müssen vor der Simulationsdurchführung gespeichert werden.

Allgemeine Verbraucher, wie etwa die Beleuchtung oder die Heizungsanlage einer Werkshalle, wirken unabhängig von Produktions- oder Logistikprozessen und werden zu diskreten Zeitpunkten hinzu- oder abgeschaltet. Wie bei direkten Verbrauchern wird nach jedem Betriebszustandswechsel die aktuelle Leistungsaufnahme bestimmt und zusammen mit den weiteren Informationen „Verbrauchsklasse“, „Verbraucher“ und „Simulationszeit“ an die Energiebeobachter-Komponente übermittelt. Abbildung 31 zeigt das Schema der Datenübertragung an den Energiebeobachter.

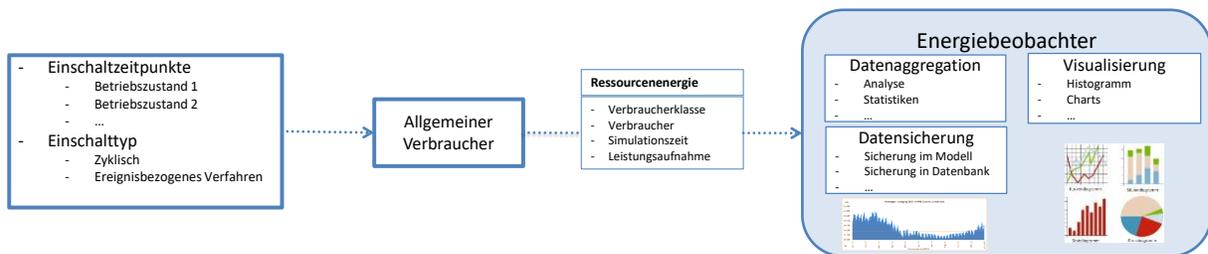


Abbildung 31: Übermittlung der aktuellen Leistungsaufnahme an die Energiebeobachter-Komponente durch einen allgemeinen Verbraucher

Zur Beschreibung der einzelnen Verbraucher im Terminal wird ein Beschreibungsschema eingesetzt, welches die hierfür benötigten Daten und Informationen in einer zweckmäßigen Art und Weise bereitstellt. Grundlage hierfür bildet die von (Christiansen u. a. 2013) vorgestellte Erweiterung der formalisierten Prozessbeschreibung (FPB), welche der Beschreibung von Energieverbräuchen in Prozessen dient. Hierbei werden Prozessen und den beteiligten technischen Ressourcen Leistungsverbräuche zugeordnet. Die vorgestellte Prozessebene wird in dem hier vorgestellten Ansatz um eine technische Ebene und eine Verbrauchsebene erweitert. Abbildung 32 stellt den generellen Aufbau des Beschreibungsmodells dar.

7 Simulationsbasierte Energiebedarfsprognose

Auf der technischen Ebene wird der Verbraucher genannt und diesem Ressourcen (1), Prozesse (2) und Betriebszustände (3) zugeordnet. Ressourcen bilden dabei die an einem Prozess beteiligten Komponenten ab, deren Leistungsaufnahme nicht direkt durch diesen beeinflusst wird, deren Aktivierung aber für die Durchführung eines Prozesses notwendig ist. Jede Ressource benötigt einen Energietyp (Elektrisch, Diesel, etc.), welcher zu benennen ist. Prozesse beschreiben die möglichen Prozessdurchführungen eines Verbrauchers, etwa das Heben oder Senken eines Containers. Ein Verbraucher kann unterschiedliche Betriebszustände einnehmen, sich jedoch immer nur in einem Betriebszustand zur selben Zeit befinden. Betriebszustände beschreiben den allgemeinen Zustand eines Verbrauchers, etwa „Standby“, „Off“ oder „Betriebsbereit“. Mit dem Wechsel eines Betriebszustandes geht immer die Aktivierung oder Deaktivierung verschiedener Ressourcen einher. Für jeden Betriebszustand werden die zu aktivierenden und zu deaktivierenden Ressourcen benannt (4).

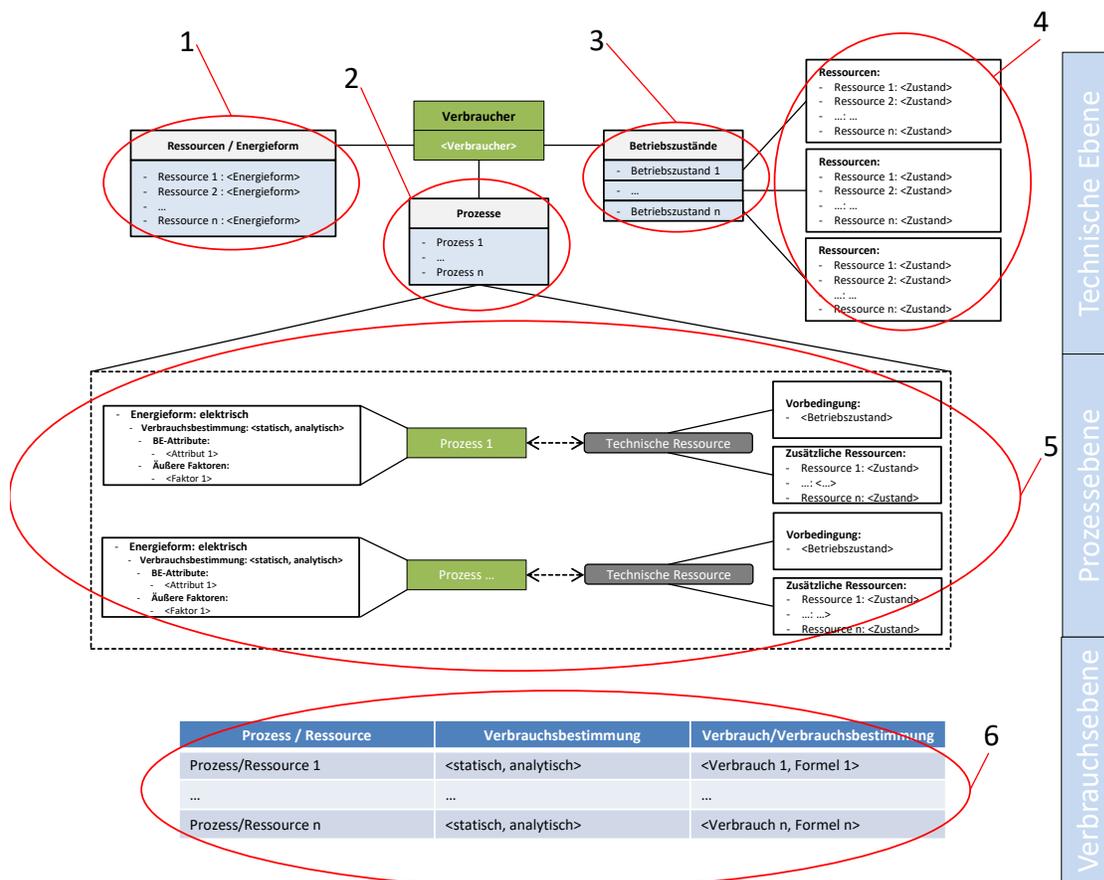


Abbildung 32: Aufbau eines Beschreibungsschemas eines Verbrauchers

Auf der Prozessebene werden für jeden Prozess die zur Durchführung notwendigen Energietypen beschrieben. Im Falle dieser Arbeit wird lediglich der Energietyp elektrische Energie betrachtet, jedoch können auch andere benötigte Energieformen, wie etwa Gas oder Wasser, zugeordnet werden. Für jeden Prozess und jeden Energietyp wird die Art und Weise der Verbrauchsbestimmung aufgeführt. Diese kann dynamisch oder analytisch erfolgen. Bei einer statischen Verbrauchsbestimmung erfolgt eine konstante Leistungsaufnahme solange der Prozess aktiv ist, unabhängig von äußeren Einflussfaktoren. Bei einer analytischen Verbrauchsbestimmung wirken äußere Faktoren auf die Leistungsaufnahme ein. Dies können Umwelteinflüsse oder BE-spezifische Werte wie etwa das Gewicht eines Containers sein. Alle notwendigen Umwelteinflüsse und BE-Attribute zur Bestimmung der Leistungsaufnahme werden ebenfalls im Beschreibungsmodell berücksichtigt. Für jeden Prozess wird die beteiligte technische Komponente genannt, welche für die Prozessdurchführung zuständig ist.

Im Falle einer Containerbewegung wäre dies z.B. der Kranmotor einer Containerbrücke. Im Falle einer Kranbewegung der Fahrmotor. Weiter wird als Vorbedingung der notwendige Betriebszustand aufgeführt, welcher für die Durchführung eines Prozesses notwendig ist (5). Als letztes werden zusätzliche benötigte Ressourcen genannt, welche bei einer Prozessdurchführung beteiligt sind, jedoch nicht bereits durch den benötigten Betriebszustand aktiviert worden sind. Hierbei könnte es sich z.B. für die Prozessdurchführung benötigte Sensoren handeln. Im Fall von allgemeinen Verbrauchern fällt die Prozessebene weg, da diese über keine Prozesse, sondern nur über unterschiedliche Betriebszustände verfügen.

Durch die Verbrauchsebene werden die konkreten Verbräuche beschrieben. Im Falle einer dynamischen Verbrauchsbestimmung handelt es sich um eine einfache Konstante. Im Falle einer analytischen Verbrauchsbestimmung wird die mathematische Funktion zur Berechnung der Leistungsaufnahme erläutert.

7.1.1 Zusammenfassung

Die vorgestellte Methode kann dazu genutzt werden, Energieverbräuche in ereignisdiskreten Simulationen abzubilden, wobei Energieverbräuche von direkten Verbrauchern und Ressourcenenergie berücksichtigt wird. Auch allgemeine Verbraucher und äußere Faktoren werden in Form von Ladeinheit-Attributen berücksichtigt. Das Modell ist generisch und kann allgemein, insbesondere auf das Konzept von Materialflusssimulationen, übertragen werden und somit in einer Vielzahl von Simulationen eingesetzt zu werden.

7.2 Power Consumption Terminal Modell

Im Folgenden wird das *Power Consumption Terminal* Model beschrieben, welches eine integrierte Betrachtung von Logistik- und Energieverbrauchsprozessen im Container-Terminal ermöglicht. Hierzu werden die benötigten Entitäten und Abläufe beschrieben, die notwendig sind, die Logistik- und Energieverbrauchsprozesse eines Container-Terminals gemäß den Anforderungen abzubilden. Zusätzlich werden die Verbraucher gemäß dem in Abschnitt 7.1 vorgestellten Beschreibungsschema beschrieben.

7.2.1 Entitäten des PCT-Modells

Es folgt nun die Beschreibung der unterschiedlichen Entitäten, bevor im Abschnitt 7.3 die Prozesse und der Ablauf der Simulation beschrieben werden. Bei der Beschreibung wird sich auf die wichtigsten Entitäten und Prozesse, welche zum Verständnis der Simulation notwendig sind, beschränkt. Zur Beschreibung werden Struktur- und Verhaltensdiagramme der Unified Modeling Language eingesetzt.

7.2.1.1 Allgemeiner Aufbau des Modells

Um die Logistikprozesse eines Container-Terminals abzubilden, müssen die vier Kernbereiche Schiffsankunftsbereich (*Quay Area*), Lagerbereich (*Storage Area*), Horizontaltransportbereich (*Yard Truck Area*) und die Hinterlandanbindung (*Hinterland Connection*) abgebildet werden.

Ein Schiffsankunftsbereich verfügt über mindestens eine Kaimauer, an dem ankommende Containerschiffe positioniert werden können. Weiter verfügt dieser Bereich über Containerbrücken (*QuayCrane*), welche an den Kaimauern positioniert werden und die Be- und Entladung der Containerschiffe durchführen. Im Schiffsankunftsbereich befinden sich zudem Containerschiffe, die an der Kaimauer festmachen, um Container zu laden oder zu löschen. Im Lagerbereich befinden sich die Containerlager (*ContainerYard*) und ein Reefer-Manager, welcher die Ein- und Auslagerungen von Kühlcontainer überwacht. Im Horizontaltransportbereich (*YardtruckArea*) werden die Container terminalintern durch Transportfahrzeuge (*YardTruck*) transportiert. Die Energieversorgung der Transportfahrzeugflotte wird durch *EnergySupply-Device*-Objekt repräsentiert. In der Hinterlandanbindung erfolgt der An- und Abtransport der Container per LKW und Bahn.

Neben den Kernbereichen benötigt ein Container-Terminalmodell weiter ein Layout (*Layout*), welches die verschiedenen Entitäten auf dem Terminal positioniert, eine Terminalsteuerung (*TerminalOperatingSystem*), Generatoren (*ArrivalGenerators*), welche ankommenden Schiffe LKWs und Züge generieren und Verbraucher (*GeneralConsumer*), welche terminal-

übergreifende Verbraucher wie etwa die Beleuchtung repräsentieren. Abbildung 33 zeigt den allgemeinen Aufbau des PCT-Modells. Im Folgenden werden die Entitäten der einzelnen Bereiche beschrieben.

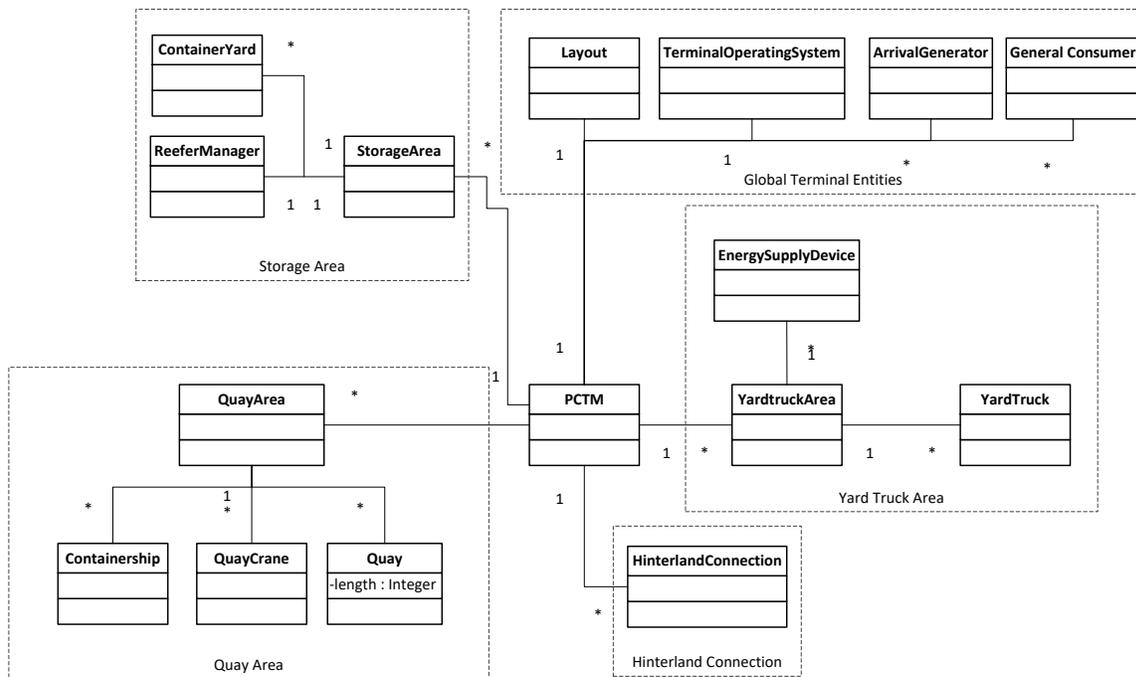


Abbildung 33: Allgemeiner Aufbau des PCT-Modells

7.2.1.2 Allgemeine Entitäten

Es folgt nun die Beschreibung der allgemeinen Entitäten *Layout*, *TerminalOperatingSystem*, *ArrivalGenerator* und *GeneralConsumer*.

7.2.1.2.1 Layout

Das grundlegende Layout eines Container-Terminals wird durch einen gerichteten Graphen mit Mehrfachkanten (Multigraph) und Kantengewichten dargestellt. Ein Graph G ist ein geordnetes Paar (E, K, p) , wobei E eine nicht leere Menge von Knoten (*Vertex*), K eine Menge von Kanten (*Edge*) und p die Inzidenzabbildung bezeichnet. Es gilt:

$$f(p) : K \rightarrow E \times E$$

7 Simulationsbasierte Energiebedarfsprognose

Eine Kante p ist also ein gerichtetes Paar $(x, y) \in K$ und dient der Information über die Entfernung von zwei Knoten (Knauer 2001). Abbildung 34 zeigt ein Beispiel eines gerichteten Graphen mit Mehrfachkanten und Kantengewichtungen.

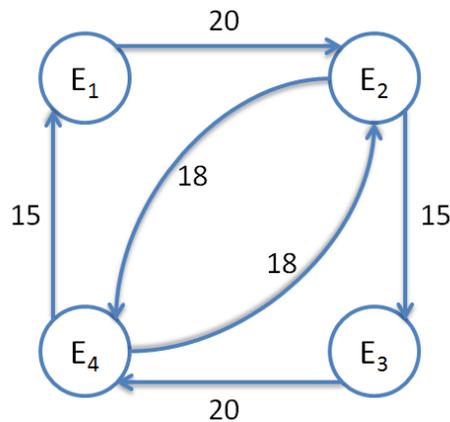


Abbildung 34: Beispiel eines gerichteten Graphen mit Mehrfachkanten und Kantengewichtungen.

$$E = \{A, B, C, D\}$$

$$P = \{(A, B, 20), (B, C, 15), (C, D, 20), (D, A, 15), (B, D, 18), (D, B, 18)\}$$

Ein Graph kann durch die Angabe der Menge der Knoten E und der Kanten P beschrieben werden. Eine Kante wird dabei als ein Tripel $p_i = (\text{Startknoten}, \text{Endknoten}, \text{Entfernung})$ verstanden. Abbildung 35 zeigt das Klassendiagramm eines Layouts. Dieses besteht aus einer endlichen Anzahl von Knoten. Jeder Knoten wiederum verfügt über eine endliche Anzahl von Kanten, wobei die Variable *endVertex* den Zielknoten der Kante und die *distance* die Länge der Kante beschreibt.

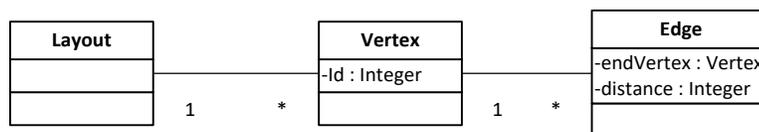


Abbildung 35: Klassendiagramm des Layouts

Ein Container-Terminallayout kann nun aus Knoten und Kanten beschrieben werden. Abbildung 36 zeigt ein beispielhaftes Layout eines kleinen Terminals mit zwei Blocklagern im Westen und einer Kaimauer im Osten sowie einem Wegenetzwerk, auf welchem sich Transport-

fahrzeuge bewegen können. Kanten stellen dabei Strecken und Knoten des Wegenetzwerks dar, auf welchem sich Transportfahrzeuge bewegen können. Weitere Terminalkomponenten, wie etwa Containerlager, Containerbrücken oder Batteriewechselstationen, können so nicht direkt auf dem Layout platziert werden, sondern müssen in diese integriert werden. Hierzu müssen für alle auf dem Terminalgelände befindlichen Objekte Übergabeknoten definiert werden, welche die Anbindung ans Wegenetzwerk der Transportfahrzeuge darstellen. Im aufgeführten Beispiel sind die Knoten E_1 und E_2 Übergabeknoten für das Blocklager 1.

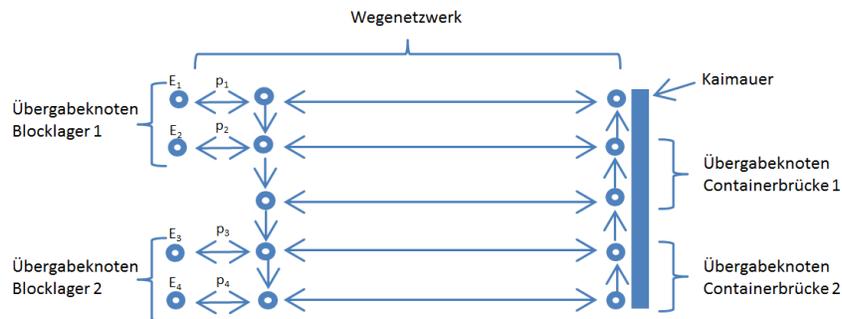


Abbildung 36: Beispiellayout eines Container-Terminals

Die Knoten E_3 und E_4 stellen Übergabeknoten des Blocklagers 2 dar. Dies bedeutet, dass Transportfahrzeuge, welche sich auf diesen Knoten befinden, von den jeweiligen Portalkränen der Blocklager bedient werden können. Es ist zu beachten, dass sich Übergabeknoten bestimmter Terminalobjekte zur Laufzeit ändern können. So ändern sich z.B. die Übergabeknoten einer Containerbrücke, sobald diese eine neue Position an der Kaimauer einnimmt. Über die Variable *distance* einer Kante wird die Länge einer Strecke beschrieben. Hierdurch wird die geforderte räumliche und zeitliche Differenzierung (Anforderung 1) erreicht.

7.2.1.2.2 Terminal Operating System

Das Terminal Operating System (TOS) steuert die unterschiedlichen Vorgänge im Terminal. Dazu stehen Module zur Verfügung, welche die verschiedenen Planungsprobleme im Terminal lösen. Abbildung 37 zeigt den schematischen Aufbau des TOS. Je nach Fragestellung bzw. Betrachtungsweise können weitere Sub-Planungssysteme integriert werden. Die verschiedenen Module kommunizieren über eine gemeinsame Schnittstelle (*Messaging System*)

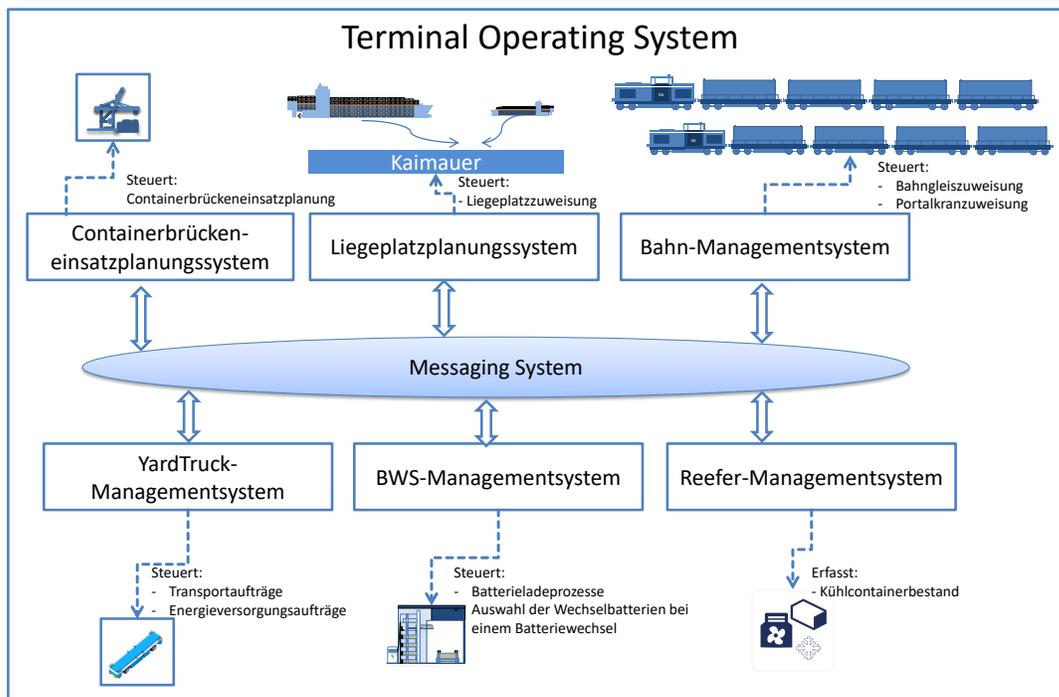


Abbildung 37: Schematischer Aufbau des Terminal Operating Systems

7.2.1.2.3 Arrival Generators

Grundlage für einen Simulationslauf ist die sogenannte Segelliste (SL). Diese enthält Datensätze aller zukünftigen und zurückliegender Schiffsankünfte. Ein Datensatz einer Schiffsankunft besteht dabei mindestens aus den in Tabelle 6 aufgeführten Informationen. Die Angaben über die an Bord befindlichen Import- und Exportcontainer beziehen sich auf die Container, welche im betrachteten Terminal be- und entladen werden sollen und nicht auf die Gesamtanzahl der an Bord befindlichen Container. Die zur Erstellung der Segelliste notwendigen Informationen sind in unterschiedlichen Subsystemen des TLS zu finden und müssen vor der Simulationsdurchführung zusammengeführt werden. Da jeder Terminalbetreiber unterschiedliche TLS-Systeme einsetzt und oftmals auch Eigenentwicklungen genutzt werden, soll an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen werden, aus welchen Systemen die einzelnen Informationen zu beziehen sind. Zur Erstellung der Segelliste muss für jedes abzubildende Terminal eine Individuallösung geschaffen werden.

Tabelle 6: Zusammensetzung eines Datensatzes der Segelliste

Attribut	Beschreibung	Typ
CSJSNR	Eindeutige ID des Containerschiffs	Integer
CSName	Name des Containerschiffs	String
CS _{Type}	Typ des Schiffes (Seeschiff, Feeder, Kahn)	String
CS _{length}	Schiffslänge	Integer
CS _{arr}	Sollankunftszeit	Long
CS _{dep}	Sollabgangszeit	Long
CS _{startwork}	Geplante Startzeit des Be- und Entladevorgangs	Long
CImp	Anzahl Importcontainer	Integer
CIExp	Anzahl Exportcontainer	Integer

Liegt keine Anbindung an das Terminal Operating System des Terminals vor und existieren keine historischen Daten, um Segellisten zu generieren, können Segellisten durch einen *Ship-Generator* generiert werden. Der *ShipGenerator* muss dabei Segellisten mit den in Tabelle 6 Informationen erstellen. Dies kann z.B. durch einen Zufallsgenerator realisiert werden.

7.2.1.2.4 Allgemeiner Verbraucher

Allgemeinen Verbrauchern (*GeneralConsumer*), wie etwa der Beleuchtung, wird ein konstanter Energieverbrauchswert zugeordnet. Zu den allgemeinen Verbrauchern eines Container-Terminals zählen die Beleuchtung und die It-Infrastruktur. Allgemeine Verbraucher können ein- oder ausgeschaltet werden, wobei für beide Zustände eine feste Leistungsaufnahme angenommen wird.

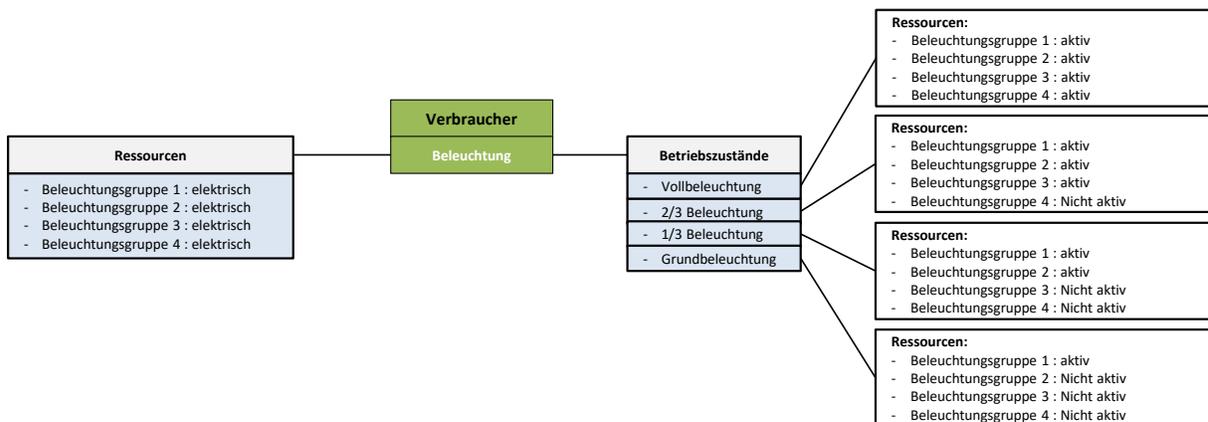


Abbildung 38: Beschreibung der Beleuchtung als Verbraucher im Greenport Modell

In domänenspezifischen Modellen können weitere Zustände definiert werden, um z.B. die Zuschaltung einzelner Beleuchtungsgruppen zu simulieren.

7.2.1.3 Schiffsankunftsbereich

Im Folgenden werden die Entitäten Kaimauer (*Quay*), Containerschiff (*Containership*) und Containerbrücke (*QuayCrane*) des Schiffankunftsbereichs beschrieben.

7.2.1.3.1 Kaimauer

Ein Schiffsankunftsbereich besitzt mindestens eine Kaimauer (*Quay*), der wiederum in eine bestimmte Anzahl von Schiffs Liegeplätzen (*BerthPlace*) unterteilt ist. Auf Grundlage der Länge der Kaimauer (*length*) und den Startpositionen (*startPos*) der einzelnen Schiffs Liegeplätze kann die Liegeplatzzuweisung ankommender Containerschiffe durchgeführt werden. Abbildung 39 zeigt das Klassendiagramm einer Kaimauer.

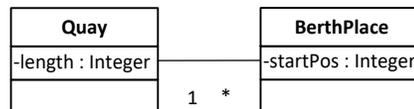


Abbildung 39: Klassendiagramm einer Kaimauer

7.2.1.3.2 Containerschiff

Ein Containerschiff wird durch das Objekt *Containership* repräsentiert. Ein Containerschiff wird durch die eine eindeutige ID (*CSId*), Schiffsname (*CSName*), Schiffslänge (*CSLength*), Ankunftszeit (*CSArr*), geplante Zeit des Arbeitsbeginns (*CSStartWork*) und die geplante Abfahrtszeit (*CSDep*) beschrieben. Wie in Abschnitt 2 beschrieben, verfügt ein Containerschiff über eine feste Anzahl an Bays, in welchen Container verstaut werden. Zusätzlich wird zwischen den Schiffstypen Feeder, Panamax und Post Panamax Containerschiff unterschieden. Abbildung 40 zeigt das Klassendiagramm eines Containerschiffs.

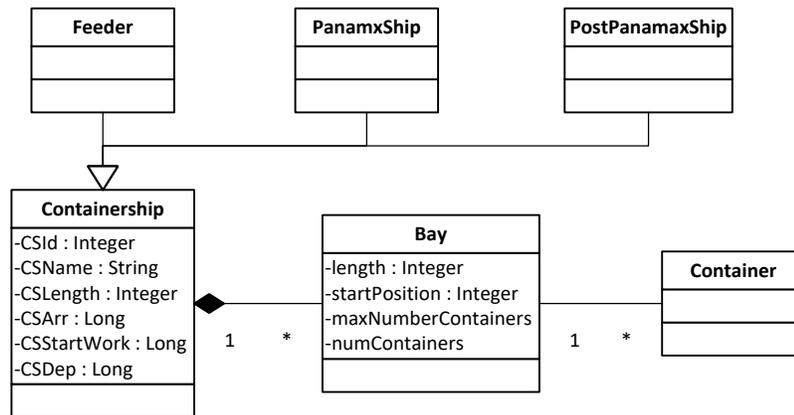


Abbildung 40: Klassendiagramm eines Containerschiffs

7.2.1.3.3 Container

Im Modell müssen unterschiedliche Containertypen berücksichtigt werden. Zunächst wird zwischen Import- und Exportcontainern unterschieden und anschließend nach dem Typ, wobei zwischen Import- und Exportcontainer unterschieden wird. Eine weitere Unterteilung erfolgt in 20 und 40 Fuß-Container. Diese Unterscheidung ist wichtig, da nicht jeder Containertyp von jedem Transportfahrzeug im Terminal transportiert werden kann. Auch können die Spreader der Hebevorrichtungen von Containerbrücken, Portalkränen oder aktive Flurförderfahrzeuge nicht jeden Typ Container heben. Abbildung 41 zeigt das Klassendiagramm eines Containers.

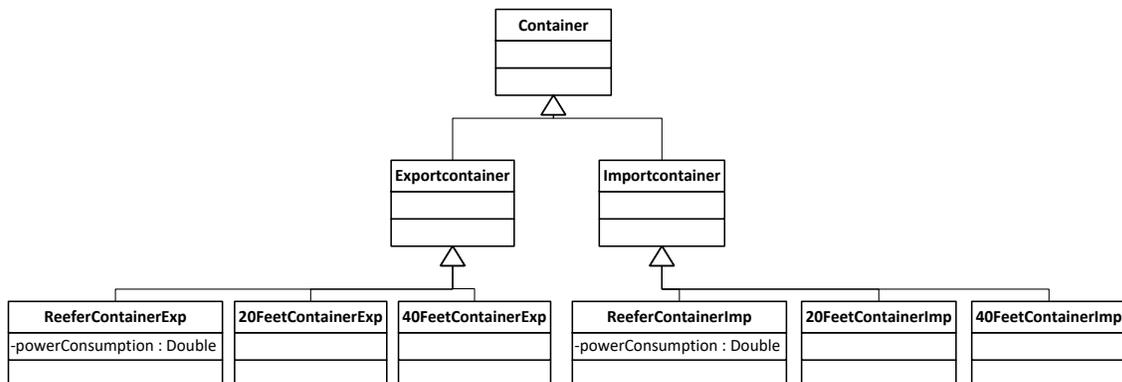


Abbildung 41: Klassendiagramm Container

Eine Besonderheit bildet zusätzlich die Gruppe der Kühlcontainer, da diese mit der Einlagerung in den Lagerbereich des Terminals beginnen, elektrische Leistung zu beziehen. Im ein-

fachsten Fall ist dies eine durchschnittliche Leistungsaufnahme, welche durch die Variable *powerConsumption* beschrieben wird. In domänenspezifischen Modellen kann die Bestimmung der Leistungsaufnahme auch analytisch, unter Berücksichtigung äußerer Faktoren wie z.B. der Temperatur erfolgen.

7.2.1.4 Containerbrücken

Eine Containerbrücke besitzt Ressourcen zur Kühlung des Motors und zum Aufbau des Hydraulikdrucks der Containerkatze. Zusätzliche Ressourcen werden benötigt, um die Flutlicht und Umgebungsbeleuchtung zu aktivieren. Um Belade- und den Entladevorgänge zu simulieren, müssen die Prozesse „Container laden“ und „Container löschen“ implementiert werden. In domänenspezifischen Modellen können weitere Prozesse ergänzt werden, um z.B. die einzelnen Teilprozesse eines Containerumschlags (Heben, Senken und Horizontaler Containertransport) ebenfalls abzubilden. Die für die Durchführung der Prozesse notwendige Energie wird durch einen Kranmotor bereitgestellt. Um eine Containerbrücke an der Kaimauer zu bewegen, verfügt diese weiter über einen Prozess „Containerbrücke bewegen“, wobei die hierfür notwendige Energie vom Fahrmotor der Containerbrücke bereitgestellt wird. Schichtwechsel werden durch den Prozess „Schicht Wechseln“ durchgeführt. Eine Containerbrücke kann einen der Betriebszustände „Betriebsbereit“, „Standby“ oder „Aus“ einnehmen, welche die jeweiligen in Abbildung 42 beschriebenen Ressourcen aktivieren. Um einen Container zu laden oder zu löschen, muss eine Containerbrücke den Betriebszustand „Betriebsbereit“ einnehmen, welche sämtliche Ressourcen aktiviert. Eine Bewegung am Kai ist in den Betriebszuständen „Standby“ und „Betriebsbereit“ möglich, da hierfür weder eine aktive Motorkühlung noch das Hydrauliksystem des Spreaders benötigt wird. Im Normalfall wird eine Containerbrücke im Betriebsmodus „Betriebsbereit“ bewegt werden. Lediglich die erste Bewegung an der Kaimauer, bevor ein neuer Job begonnen wird, wird im Betriebszustand „Standby“ durchgeführt.

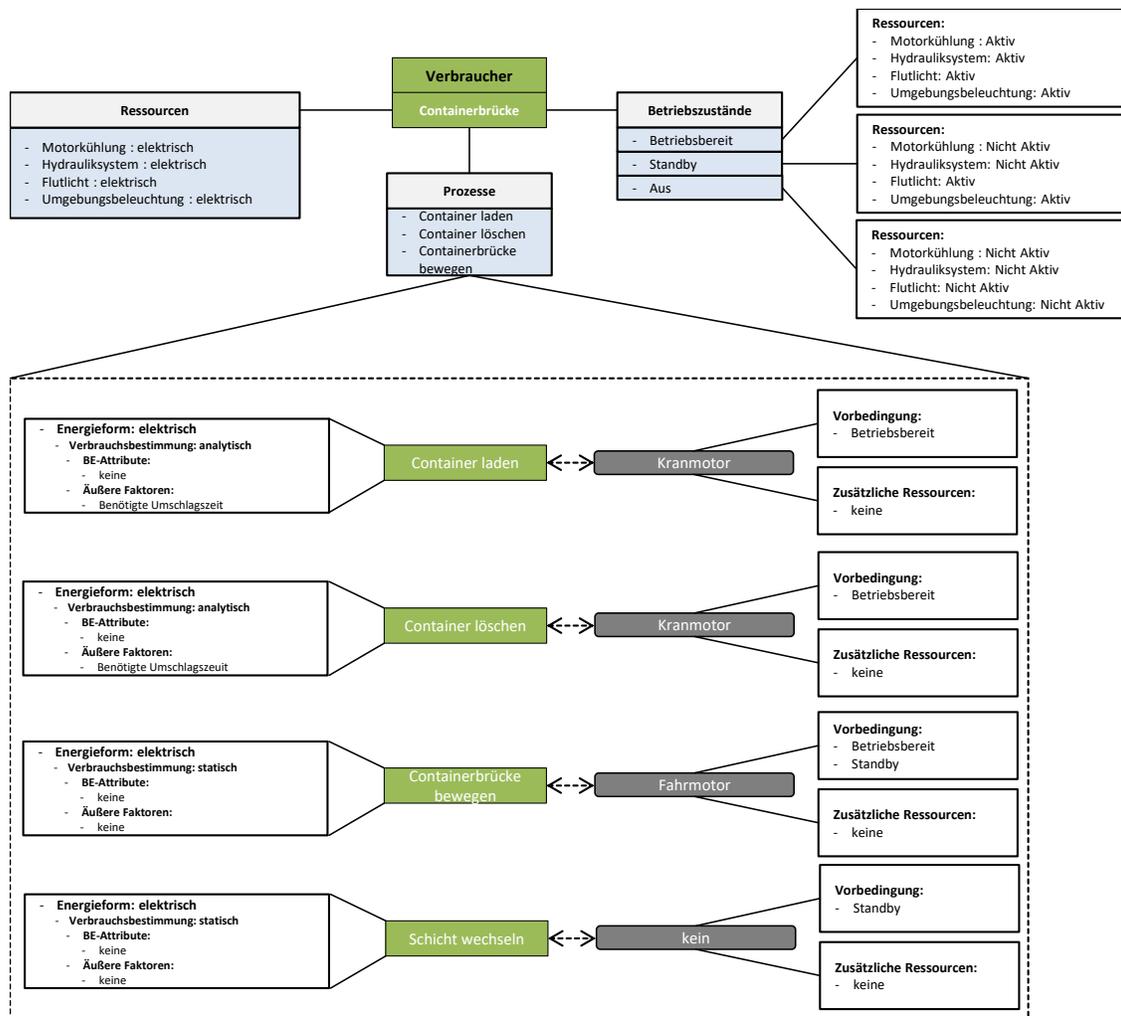


Abbildung 42: Beschreibung einer Containerbrücke als Verbraucher

Zum Beginn eines Schichtwechsels wechselt eine Containerbrücke in den Betriebsmodus „Standby“, wobei während der Durchführung eines Schichtwechsels keine Containerumschläge oder Bewegungen am Kai vorgenommen werden können. Neben den beschriebenen Ressourcen (*AuxiliaryConsumer*), einem Fahrmotor und einem Kranmotor verfügt eine Containerbrücke über Übergabeknoten des Layouts (*Vertex*). Diese beschreiben die möglichen Übergabepunkte eines Containers an ein Transportfahrzeug. Die Übergabeknoten ändern sich dynamisch zur Laufzeit und müssen bei einem Positionswechsel einer Containerbrücke neu bestimmt werden. Die Funktion der Containerbrückenbewegung am Kai und der Bestimmung der Übergabepunkte wird durch die Funktion *move()* realisiert. Zum Umschlag von Containern verfügt eine Containerbrücke weiter über eine Hebevorrichtung (*LiftingDevice*), deren Funktion in Abschnitt 7.2.1.5 erläutert wurde. Die Position einer Containerbrücke an der Kaimauer

wird durch die Variable *pos* beschrieben. Die Variable *width* gibt die Breite einer Containerbrücke an, durch welche die Anzahl an Bays bestimmt wird, welche eine Containerbrücke gleichzeitig bedienen kann. Die durch eine Containerbrücke blockierten Bays können von anderen Containerbrücken nicht erreicht werden. Die aktuell erreichbaren Bays einer Containerbrücke werden im Objekt *Bays* gespeichert. Das Objekt *ImportContainer* enthält eine Auflistung sämtlicher zu entladender Importcontainer und das Objekt *ExportContainer* eine Auflistung sämtlicher zu entladender Exportcontainer, wenn sich eine Containerbrücke im Einsatz befindet. Die Listen sind notwendig, um die exakte Be- und Entladereihenfolge festzulegen. Die Funktion *changeOfShift* führt einen Schichtwechsel der Containerbrückenbesetzung durch. Abbildung 43 zeigt das Klassendiagramm einer Containerbrücke.

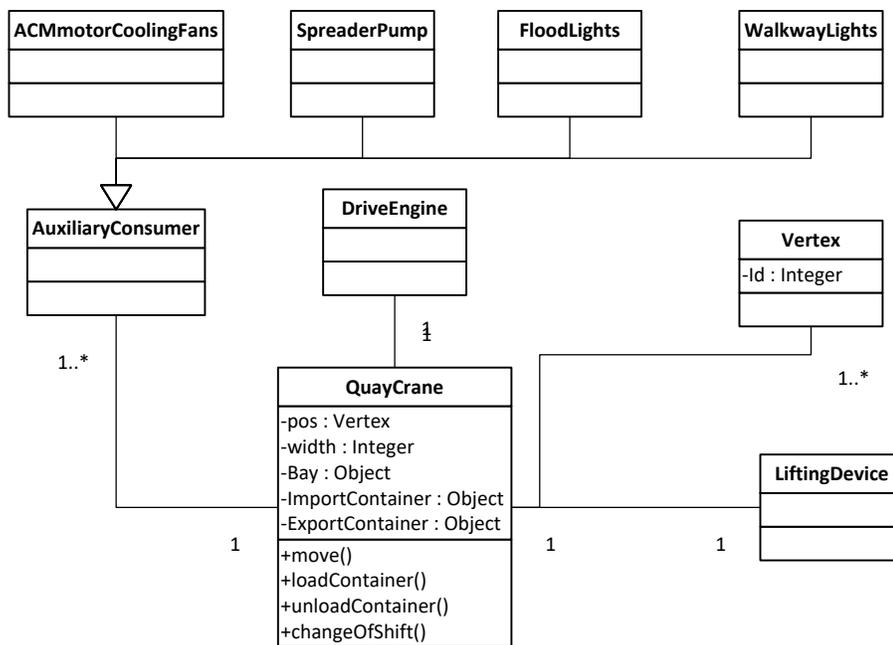


Abbildung 43: Klassendiagramm Containerbrücke

7.2.1.5 LiftingDevice

Der Kranausleger (*Lifting Device*), sprich die Hebevorrichtung einer Containerbrücke, wird durch dieses Objekt repräsentiert. Aber auch Portalkräne und aktive Flurförderfahrzeuge verfügen über Hebevorrichtungen. Ein *LiftingDevice* besitzt ein oder mehrere *Spreader* sowie den für Containerumschlagsprozesse notwendigen Kranmotor (*LiftingEngine*). Der *Spreader* dient der Typsicherheit und sorgt dafür, dass nur Container, für welche der Spreader geeignet ist, gehoben werden können. So werden z.B. für das Heben von OOG Containern spezielle Spreader benötigt. Die *LiftingEngine* stellt die notwendigen Methoden zur Berechnung der Leis-

tungsaufnahme bei einem Containerumschlag zur Verfügung. Eine *LiftingEngine* verfügt mindestens über die Methode *getPowerConsumption*, welcher die benötigte Energie zum Umschlag eines Containers zurückgibt. Abbildung 44 zeigt das Klassendiagramm einer Hebevorrichtung.

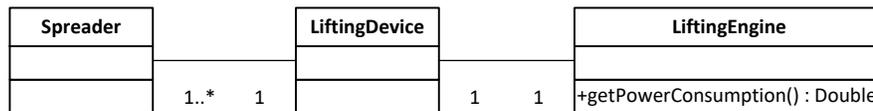


Abbildung 44: Klassendiagramm Lifting Device

7.2.1.6 Zwei-Katz-Containerbrücke

Eine Zwei-Wege-Containerbrücke ähnelt im Aufbau und Funktionsweise einer normalen Containerbrücke. Jedoch verfügt sie über zwei unabhängig agierende Kranausleger und eine Laschplattform (*StoragePlatform*) zwischen den Kranauslegern. Diese dient der Zwischenlagerung von Containern, um die Übergabe eines Containers vom wasserseitigen Kranausleger zu dem landseitig befindlichen Kranausleger zu realisieren. Die Kranausleger arbeiten unabhängig voneinander und verfügen auch über jeweils eigene Motoren. Aus diesem Grund werden die benötigten Prozesse zum Umschlag eines Containers im Gegensatz zur normalen Containerbrücke erweitert. Es wird nun zwischen dem Umschlag eines Containers an der Seeseite und eines Containers an der Landseite unterschieden. Die notwendige elektrische Leistung für einen seeseitigen Containerumschlag wird durch den Kranmotor 1 bereitgestellt, während die benötigte Energie für einen landseitigen Containerumschlag durch den Kranmotor 2 bereitgestellt wird. Dies ist auch dadurch begründet, dass die verschiedenen Kranausleger sowohl unterschiedliche Arbeitsgeschwindigkeiten als auch über unterschiedliche Leistungsaufnahmen verfügen können. Abbildung 45 zeigt die energierelevanten Prozesse einer Zwei-Katz-Containerbrücke.

7 Simulationsbasierte Energiebedarfsprognose

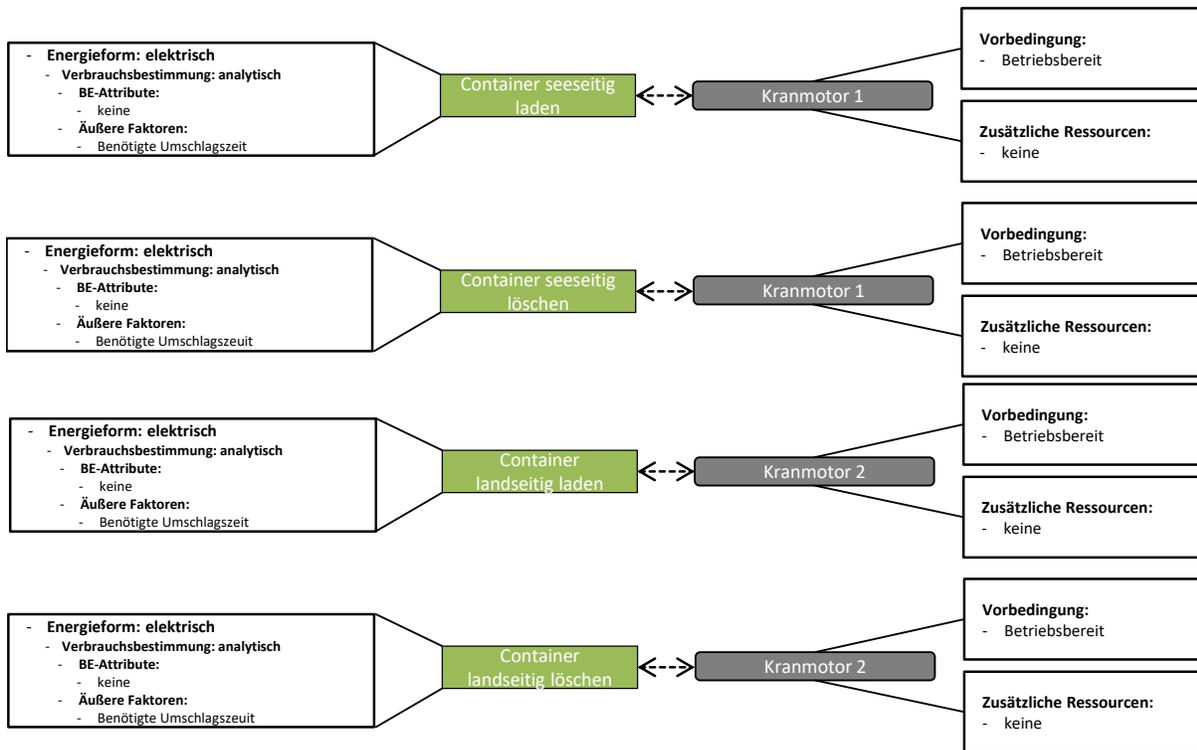


Abbildung 45: Energierelevante Prozesse einer Zwei-Katz-Containerbrücke

Abbildung 46 zeigt das Klassendiagramm einer Zwei-Katz-Containerbrücke. Bei der Zwei-Katz-Containerbrücke handelt es sich um eine Ableitung einer einfachen Containerbrücke. Um zwischen wasser- und landseitigen Containerumschlägen zu unterscheiden, werden die Funktionen „loadContainerSeeside“, „unloadContainerSeeside“, „loadContainerLandside“ und „unloadContainerLandside“ ergänzt.

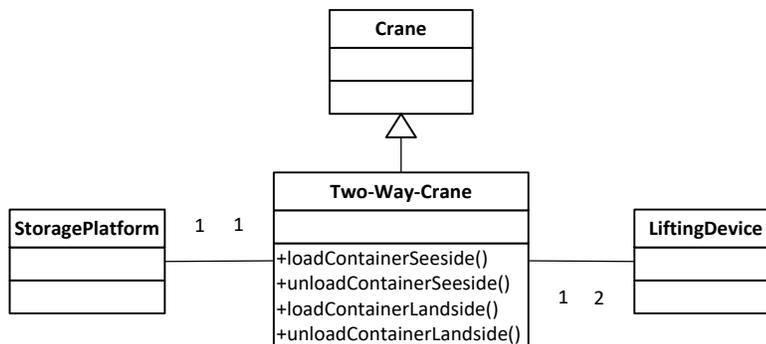


Abbildung 46: Klassendiagramm 2-Katz-Containerbrücke

Neben den Standardobjekten einer Containerbrücke besitzt die Zwei-Kat-Containerbrücke zwei Kranausleger sowie eine Laschplattform.

7.2.1.7 Lagerbereich

Im Folgenden werden die Entitäten Lager (*YardStorage*) und ReeferManager des Lagerbereichs beschrieben.

7.2.1.7.1 Blocklager

Blocklager werden durch das Objekt *ContainerYard* repräsentiert. Hauptbestandteil eines Blocklagers sind die unterschiedlichen Stacks, in welchen Container gestapelt werden können. Je nach domänenspezifischer Fragestellung kann ein Blocklager in unterschiedlichen Detailgraden modelliert werden. Im simpelsten Fall verfügt ein Blocklager nur über einen Stack, welcher unendlich viele Container aufnehmen kann. Dieser Detailgrad ist bereits für die Beantwortung vieler Fragestellungen ausreichend. Steht jedoch gerade die Funktionsweise eines Blocklagers im Mittelpunkt der Fragestellung, muss auch dieses detailliert modelliert werden. Ein Beispiel einer solchen Fragestellung wäre z.B. die Frage nach einer energieeffizienten Strategie zur Ein- und Auslagerung von Containern. Die genaue Anzahl der Container, welche in einen Stack eingelagert werden können, wird durch die Variable *stackSize* definiert. Die Position eines Stacks innerhalb eines Blocklagers wird durch die Variablen *posX* und *posY* beschrieben. Die booleschen Variablen *Import*, *Export* und *Reefer* geben an, welcher Typ Container im entsprechenden Stack zwischengelagert werden darf. Blocklager verfügen über eine feste Anzahl an LKW-Fahrspuren (*TruckLane*), welche von terminalexternen Transportfahrzeugen genutzt werden, um Container anzuliefern oder abzuholen und über eine feste Anzahl an Fahrspuren für die Ein- und Auslagerung von Containern durch terminalinterne Transportfahrzeuge (*YardTruckLane*). Zur Definierung der Übergänge zwischen den Fahrspuren und dem Terminallayout verfügen die Spuren über je einen Verbindungspunkt (*Edge*). Der letzte wichtige Bestandteil eines Blocklagers sind ein oder mehrere Portalkräne, welche die Ein- und Auslagerung von Containern durchführen. Ein Portalkran ist ein Spezialfall einer Containerbrücke. Der Unterschied besteht darin, dass ein Portalkran keine direkte Verknüpfung zum Wegenetzwerk besitzt, sondern sich nur im Bereich des Blocklagers bewegen kann. Die Position eines Portalkrans wird relativ im Blocklager durch die Koordinaten *posX* und *posY* beschrieben. Abbildung 47 zeigt das Klassendiagramm eines Blocklagers.

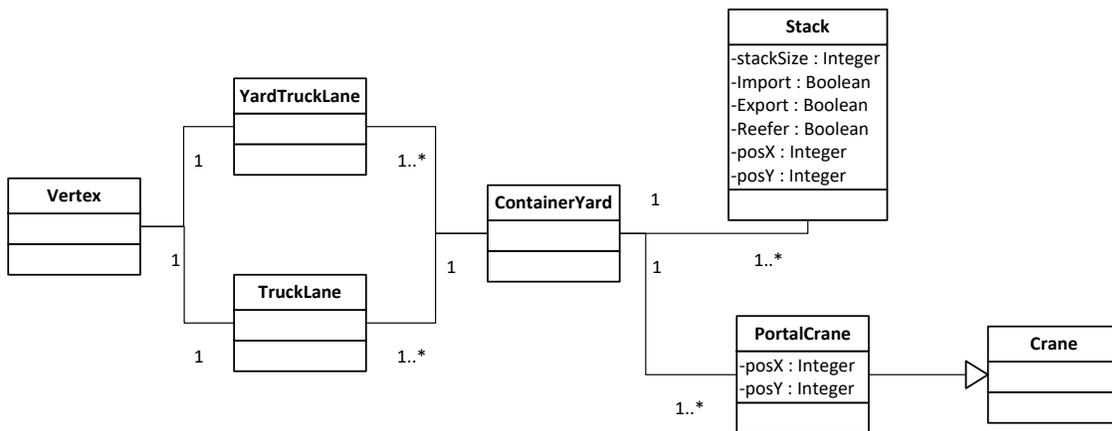


Abbildung 47: Klassendiagramm eines Blocklagers

Das Blocklager selbst benötigt keine elektrische Leistung. Jedoch benötigen die Portalkräne elektrische Leistung für die Ein- und Auslagerung von Containern. Auch eingelagerte Kühlcontainer können eine elektrische Leistungsaufnahme erzeugen. Die Beschreibung eines Portalkrans als Verbraucher gleicht der einer Containerbrücke (siehe Abbildung 43), lediglich die Prozesse „Schicht wechseln“ und „Containerbrücke bewegen“ entfallen, da Portalkräne vollautomatisch arbeiten, über keine Brückenbesetzung verfügen und den ihnen zugewiesenen Blocklagerbereich nicht verlassen.

7.2.1.8 Horizontaltransportbereich

Im Folgenden werden die Entitäten Transportfahrzeug (*YardTruck*) und Energieversorgung der Horizontaltransportflotte (*EnergySupplyDevice*) beschrieben.

7.2.1.8.1 Transportfahrzeug

Es muss zwischen passiven und aktiven Transportfahrzeugen unterschieden werden. Zu den aktiven Transportfahrzeugen zählen etwa das AGV oder ein LKW-Chassis. Zu den aktiven beispielsweise der Reach Stacker oder Straddle Carrier. Transportfahrzeuge verfügen über eine Ressource Motorkühlung, welche in den Betriebszuständen „Betriebsbereit“ und „Standby“ aktiv ist. Im Betriebszustand „Aus“ ist auch diese deaktiviert.

Passive Transportfahrzeuge verfügen lediglich über einen Prozess „Fahren“, da Container nicht selbstständig aufgenommen werden, sondern diese durch externe Umschlaggeräte aufgeladen werden müssen. Eine Besonderheit an dieser Stelle ist eine Berücksichtigung der verfügbaren elektrischen Leistung der Batterie, bevor ein Fahrprozess durchgeführt werden kann.

Bevor ein Fahrprozess durchgeführt wird, muss überprüft werden, ob genügend elektrische Leistung vorhanden ist, um das Ziel zu erreichen.

Da aktive Transportfahrzeuge Container selbstständig aufnehmen können, verfügen diese zusätzlich über die Prozesse „Container aufnehmen“ und „Container ablegen“. Abbildung 48 zeigt die Beschreibung eines Transportfahrzeugs als Verbraucher. Es wird dabei zwischen passiven und aktiven Transportfahrzeugen unterschieden.

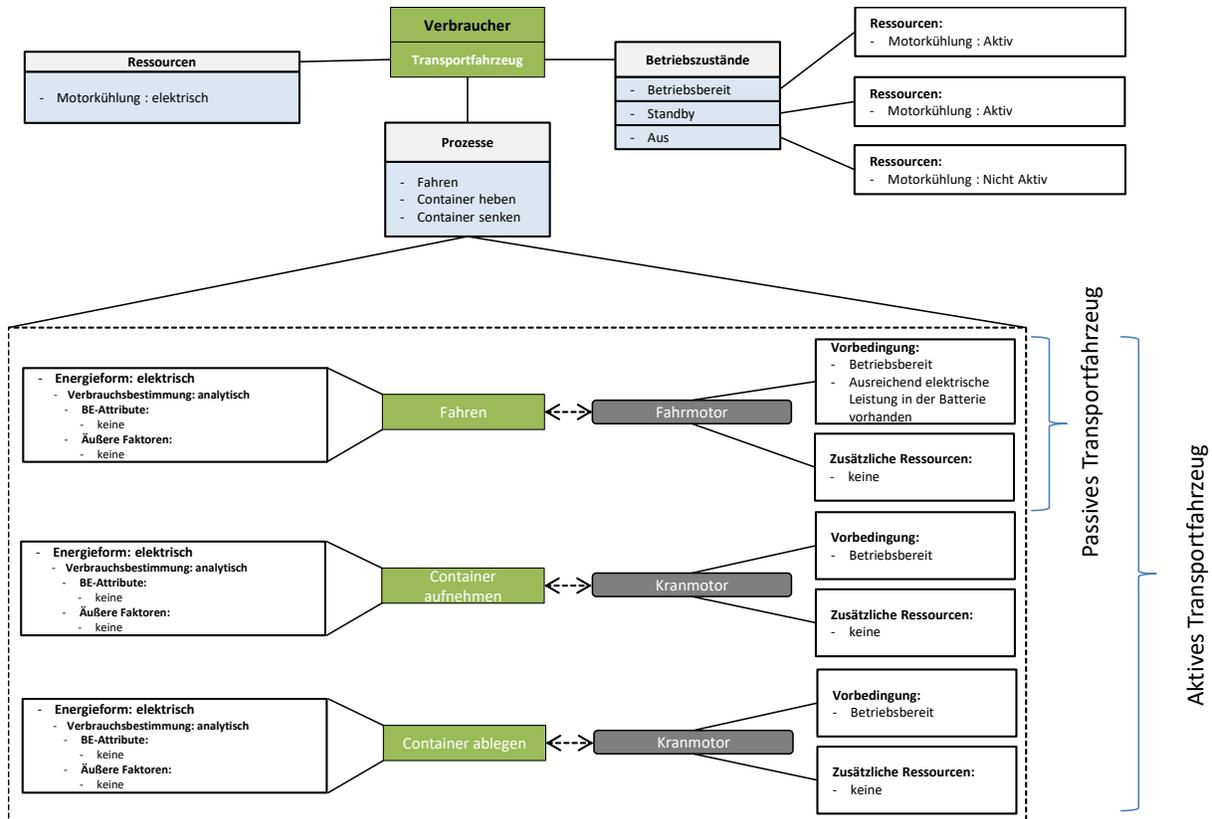


Abbildung 48: Beschreibung eines Transportfahrzeugs als Verbraucher. Es wird zwischen aktiven und passiven Flurförderfahrzeugen unterschieden.

Ein Transportfahrzeug verfügt über eine feste Anzahl von Ladeplätzen (*LoadSpace*). Diese können 20 Fuß Container (*20FeetContainerSlots*), 40 Fuß Container (*40FeetContainerSlots*), Übergrößencontainer (*OOGContainerSlots*), Batterien (*BatterySlots*) oder Flüssigkeiten (*VolumeLimitedLoadSpace*) aufnehmen. Eine Spezialisierung eines Behälters für Flüssigkeiten wäre ein Treibstofftank (*FuelTank*). Ein Batteriefach verfügt aus Gründen der Typsicherheit über eine Klasse (*BatteryConnector*), welche dafür zuständig ist, dass nur eine passende Batterie in ein Fahrzeug gelagert werden kann, sofern unterschiedliche Batterietypen im Terminal

7 Simulationsbasierte Energiebedarfsprognose

eingesetzt werden. Neben den Ladeplätzen zur Aufnahme unterschiedlicher Güter verfügt ein Fahrzeug über einen oder mehrere Fahrmotoren (*DrivingEngine*), welche die notwendige Antriebsenergie zur Fortbewegung bereitstellen. Abbildung 49 zeigt das allgemeine Klassendiagramm eines Fahrzeugs.

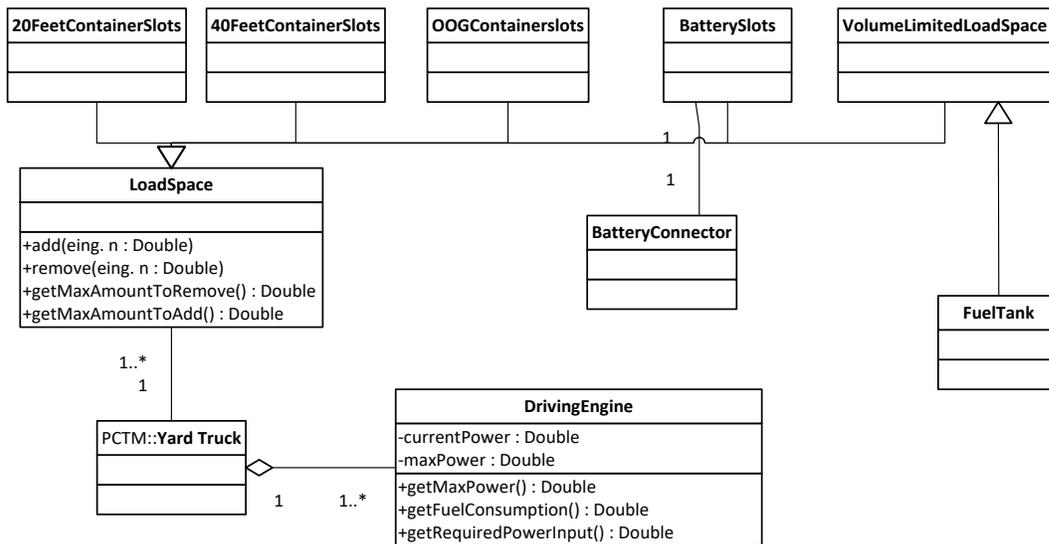


Abbildung 49: Klassendiagramm Fahrzeug

Dieser Aufbau ist bereits ausreichend zur Abbildung eines passiven Transportfahrzeugs. Aktive Fahrzeuge verfügen zusätzlich über eine Hebevorrichtung, welche aktiv Container heben oder senken kann.

7.2.1.8.2 Energieversorgung der Horizontaltransportflotte

Bei der Energieversorgung der Horizontaltransportflotte wird zwischen kabelgebundenen (*CableConnection*) und kabellosen (*Wireless*) Versorgungseinrichtungen unterschieden. Jede Versorgungseinrichtung verfügt über einen Knoten (*Vertex*), welcher die genaue Position auf dem Terminallayout definiert. Im Folgenden werden der Aufbau einer Batteriewechselstation, einer Ladesäule und einer Tanksäule beschrieben. Da induktives Laden bisher lediglich in Modellversuchen erprobt wird, wird auf eine genaue Beschreibung an dieser Stelle verzichtet. Unter Vernachlässigung der technischen Komponenten ist der Unterschied zu einer Ladesäule jedoch lediglich die fehlende physische Verbindung zwischen Ladegerät und Fahrzeug.

Eine Batteriewechselstation verfügt über mindestens ein Batterieregal (*BatteryShelf*), welches eine feste Anzahl an Batteriefächer (*StorageCompartment*) enthält. Ein Batterielagerfach dient

als Lagerfach für Wechselbatterien und kann auch als Pufferplatz im Falle eines Batteriewechsels genutzt werden. Ein Batterielagerfach kann zu einem Batterieladefach werden, indem ein Ladegerät (*Charger*) hinzugefügt wird. Das Ladegerät übernimmt in diesem Fall auch die Funktionalitäten eines „Motors“ und stellt die benötigten Funktionen zur Verbrauchsbestimmung und zum Laden einer Wechselbatterie bereit. Ein Ladegerät wiederum kann über mehrere Stecker (*Connector*) verfügen, welche die physische Verbindung zu einer Batterie aufbauen. Diese dienen der Typsicherheit und stellen sicher, dass eine Wechselbatterie nur von einem geeigneten Ladegerät geladen werden kann. Ein Batteriewechselvorgang wird durch ein Regalbediengerät (*ExchangeApparatus*) durchgeführt. Die Anzahl der Fahrzeuge, welche gleichzeitig in eine Batteriewechselstation einfahren können, wird durch die Anzahl der Wechselspuren (*ChangingLanes*) begrenzt. Es muss beachtet werden, dass eine Wechselspur nur von bestimmten Regalbediengeräten bedient werden kann. Die erreichbaren Wechselspuren eines Regalbediengeräts werden in einem Array (*ChangingLanes*) des Regalbediengeräts gespeichert. Fahrzeuge, welche einen Batteriewechsel benötigen, aber nicht in die BWS einfahren können, weil diese blockiert ist, werden in einer Warteschlange (*Queue*) eingereiht. Abbildung 50 zeigt das Klassendiagramm einer Batteriewechselstation.

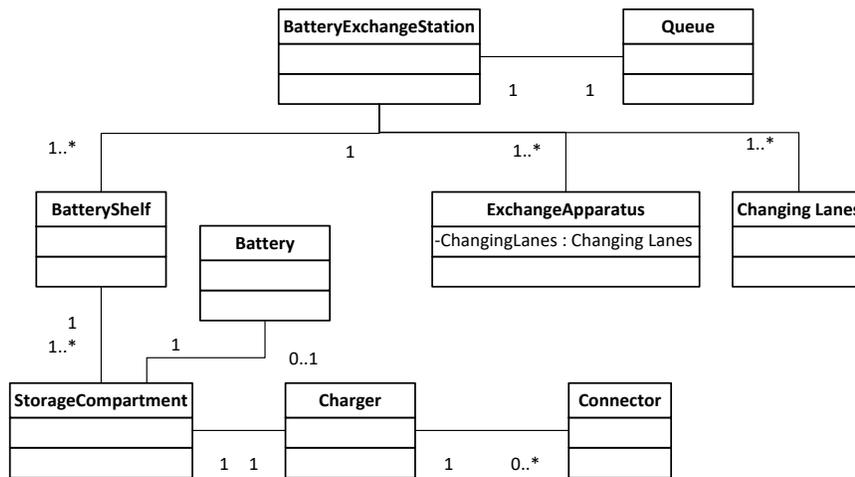


Abbildung 50: Klassendiagramm Batteriewechselstation

Ladesäulen (*ChargingPole*) und Tanksäulen (*FuelStation*) ähneln sich im Aufbau. Eine Ladesäule verfügt über ein Ladegerät (*Charger*), welche für den Transport elektrischer Energie zuständig ist. Dieser stellt die benötigten Funktionen zur Verbrauchsbestimmung und zum Laden einer Wechselbatterie zur Verfügung. Tanksäulen hingegen verfügen über eine Benzinpumpe (*FuelPump*), welche für den Transport flüssiger Energietypen zuständig ist. Die Variab-

7 Simulationsbasierte Energiebedarfsprognose

le *capacity* gibt dabei an, wie viel Liter in der Minute transferiert werden können. Abbildung 51 zeigt das Klassendiagramm einer Lade- und Tanksäule.

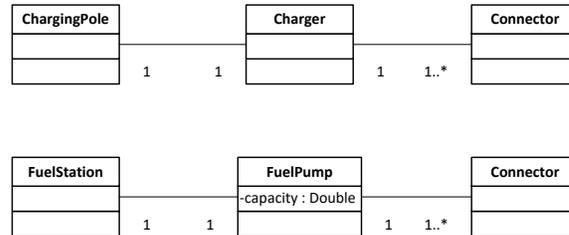


Abbildung 51: Klassendiagramm einer Lade- und einer Tanksäule

7.2.1.9 Hinterlandanbindung

Die Hinterlandanbindung stellt die Schnittstelle zum landseitigen Container An- und Abtransport dar. Ein Gate stellt den Übergang für LKWs dar, um das Terminalgelände zu betreten. Ein Gate verfügt über eine feste Anzahl von Übergängen, welche je eine Fahrspur repräsentieren (*EntryStreets*). Jede diese Fahrspuren liegt auf einem Verbindungsknoten des Terminals (*Edge*). Die Variable *waitingTime* des Gates definiert die Zeit, welche benötigt wird, das Terminal zu betreten oder zu verlassen. In dieser Zeit melden die LKW-Fahrer ihre Fracht an und bekommen die nötige Auskunft, welcher Lagerplatz anzufahren ist. Weiter befindet sich in der Hinterlandanbindung der Übergangsbereich für Güterzüge. In diesem Bereich (*TrainArea*) befinden sich eine feste Anzahl von Gleisen und Portalkränen. Der Güterzugbereich wird wie ein Blocklager behandelt. Containerbrücken können sich innerhalb dieses Bereichs frei bewegen und jedes Gleis erreichen. Die letzten Bestandteile der Hinterlandanbindung sind die Elemente *TrainGenerator* und *TruckGenerator*. Diese dienen dazu, Züge und Container zu fest definierten Zeitpunkten zu erzeugen. Dabei können externe Lieferlisten eingelesen werden, welche die Informationen über LKW- und Zugankünfte enthalten oder aber auch LKW und Züge per Zufallsgenerator erstellen. Abbildung 52 zeigt das Klassendiagramm der Hinterlandanbindung.

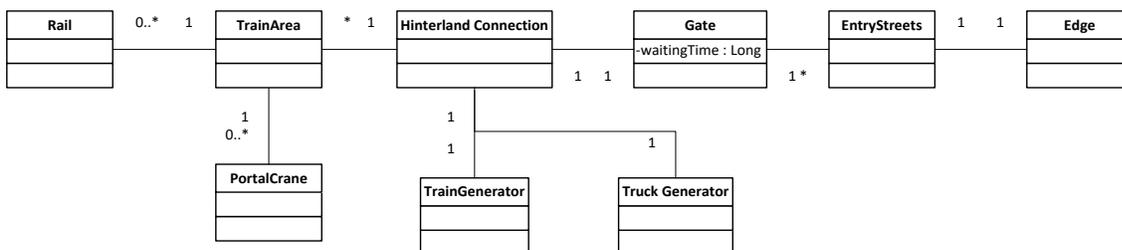


Abbildung 52: Klassendiagramm der Hinterlandanbindung

7.3 Prozessbeschreibungen

Im Folgenden werden die relevanten Prozesse und Abläufe des Modells beschrieben.

7.3.1 Ablauf der Simulation

Im folgenden Abschnitt wird der grundlegende Ablauf einer Terminalsimulation erläutert. Abbildung 53 gibt eine Übersicht über den allgemeinen Ablauf der Simulation. Grundlage der Simulation stellen die Segellisten dar, welche Informationen über die zukünftigen Schiffsankünfte enthalten. Zu den durch die Segelliste definierten Schiffsankunftszeiten werden Objekte des Typs *Containership* instanziiert.

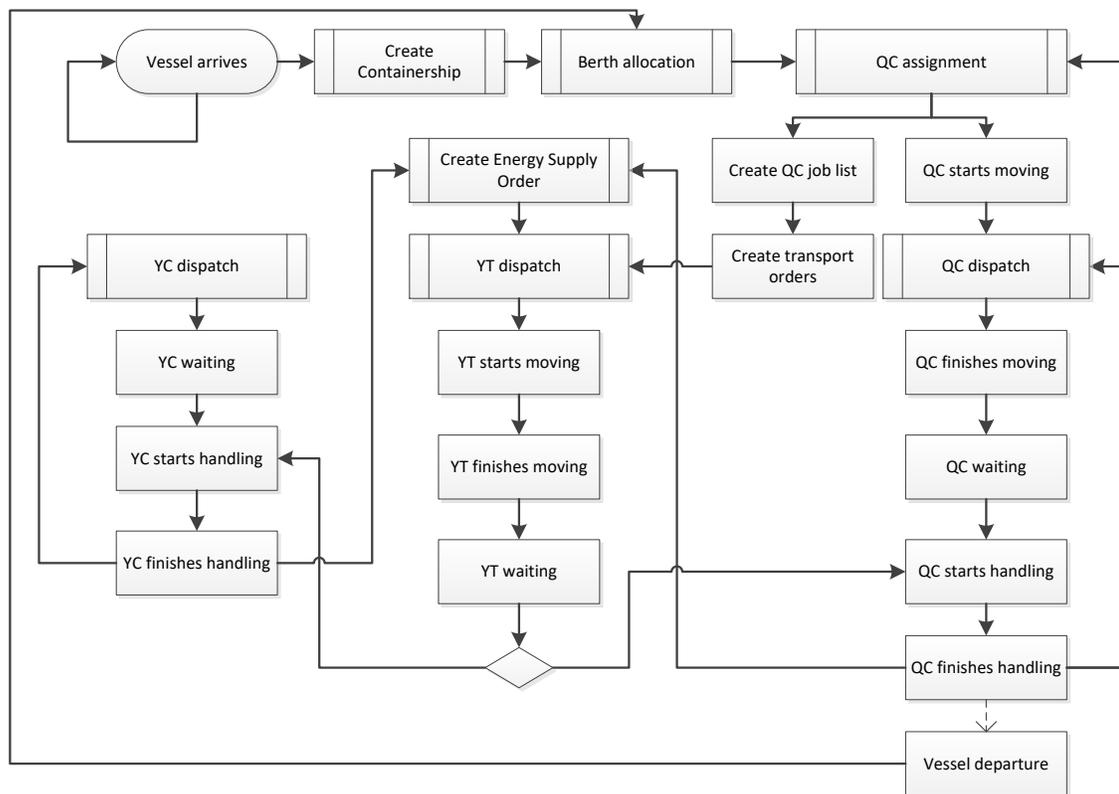


Abbildung 53: Allgemeiner Ablauf der Logistiksimulation

Im Anschluss wird diesen ein Liegeplatz (*Berth allocation*) zugewiesen und den Schiffen Containerbrücken zugeordnet (*QC assignment*). Die zugewiesenen Containerbrücken bewegen sich entlang der Kaimauer Richtung Zielschiff (*QC starts moving*). Nachdem eine Containerbrücke ihren Zielort erreicht hat (*QC finishes moving*), wird die Ladereihenfolge der Container

(*QC dispatch*) bestimmt. Diese beschreibt die exakte Reihenfolge, in der Container umgeschlagen werden. Mit dem Beginn der Containerumschläge wird so lange gewartet (*QC waiting*), bis ein YardTruck zur Be- oder Entladung bereitsteht. Nach der Umlagerung eines Containers (*QY finishes handling*) wird ggf. die Reihenfolge der nächsten umzulagernden Container angepasst (*QC dispatch*) und die Containerbrückenzuweisung (*QC assignment*) erneut ausgeführt. Dies ist notwendig, um einer Containerbrücke, nachdem alle erreichbaren Container an ihrer Position umgeschlagen wurden, eine neue Aufgabe zuweisen zu können. Auch kann es in bestimmten Situationen sinnvoll sein, Containerbrücken von einem aktiven Auftrag abzuziehen. Die Bestimmung der Be- und Entladereihenfolge eines Lagerkrans erfolgt durch die Lagerkransteuerung (*YC dispatch*).

Zeitgleich mit dem Start der Containerbrückenbewegung wird die Jobliste erstellt (*Create QC job list*), welche Informationen über alle von einem Kran umzuschlagenden Container enthält. Aus diesen Informationen werden Transportaufträge (*Create Transport orders*) für alle durchzuführenden Containerumschläge der betreffenden Containerbrücke erstellt. Die Zuweisung von Transportaufträgen wird von Auftragszuordnung übernommen (*YT dispatch*). Wurde einem Yard Truck ein Transportauftrag zugewiesen, begibt sich dieser Richtung Zielort (*YT starts moving*). Mit der Ankunft am Zielort (*YT finishes moving*) wartet der YardTruck (*YT waiting*). Je nachdem ob es sich um einen Import- oder Exporttransportauftrag handelt, startet nun der entsprechende Portalkran oder Containerbrücke den Umschlagvorgang eines Containers (*QC starts handling, YC starts handling*). Nach der Durchführung eines Containerumschlags (*QC finishes handling, YC finishes handling*) werden Energieversorgungsaufträge erstellt (*Create Energy Supply Order*). Die Bedingung, wann ein Energieversorgungsauftrag erstellt wird, ist ein eigenes Planungsproblem. In diesem Schritt werden lediglich Energieversorgungsaufträge generiert und nicht ausgeführt. Nach der Erstellung der Energieversorgungsaufträge wird die Auftragszuweisung ausgeführt. Sind sämtliche Container eines Schiffes umgeschlagen, verlässt dieses das Terminal (*Vessel departure*).

Für die einzelnen Planungsprobleme (*Berth allocation, QC assignment, QC dispatch und YC Dispatch, Create Energy Supply Order*) müssen individuelle Strategien implementiert werden, welche der Beantwortung der domänenspezifischen Fragestellung dienlich sind. Diese Arbeit hat zum Ziel die Leistungsaufnahme in einem Container-Terminal zu prognostizieren. Aus diesem Grund werden die implementierten Strategien den im realen Einsatz verwendeten Strategien möglichst ähnlich sein. Für andere Fragestellungen, wie z.B. der Frage nach einer geeigneten Liegeplatzplanung wäre es z.B. dienlich, etablierte Strategien für die einzelnen Planungsbereiche zu implementieren und im Anschluss unterschiedliche Strategien für die Liegeplatzplanung zu implementieren, zu testen und zu vergleichen.

Der hier vorgestellte Ablauf ist für die Verwendung von Online-Planungsstrategien geeignet, welche auch vornehmlich in Container-Terminals eingesetzt werden. Bei der Verwendung von Offline-Strategien wird die Auftragsplanung nicht durch die Beendigung eines Auftrags aufgerufen, sondern durch die festgelegten Durchführungszeitpunkte der Transportaufträge (siehe Abschnitt 7.3.3). Es kann auch eine Mischung von Offline und Online Verfahren genutzt werden. So können z.B. Transportaufträge online zugeordnet bzw. vervollständigt werden, während Energiebeschaffungsaufträge offline geplant werden können.

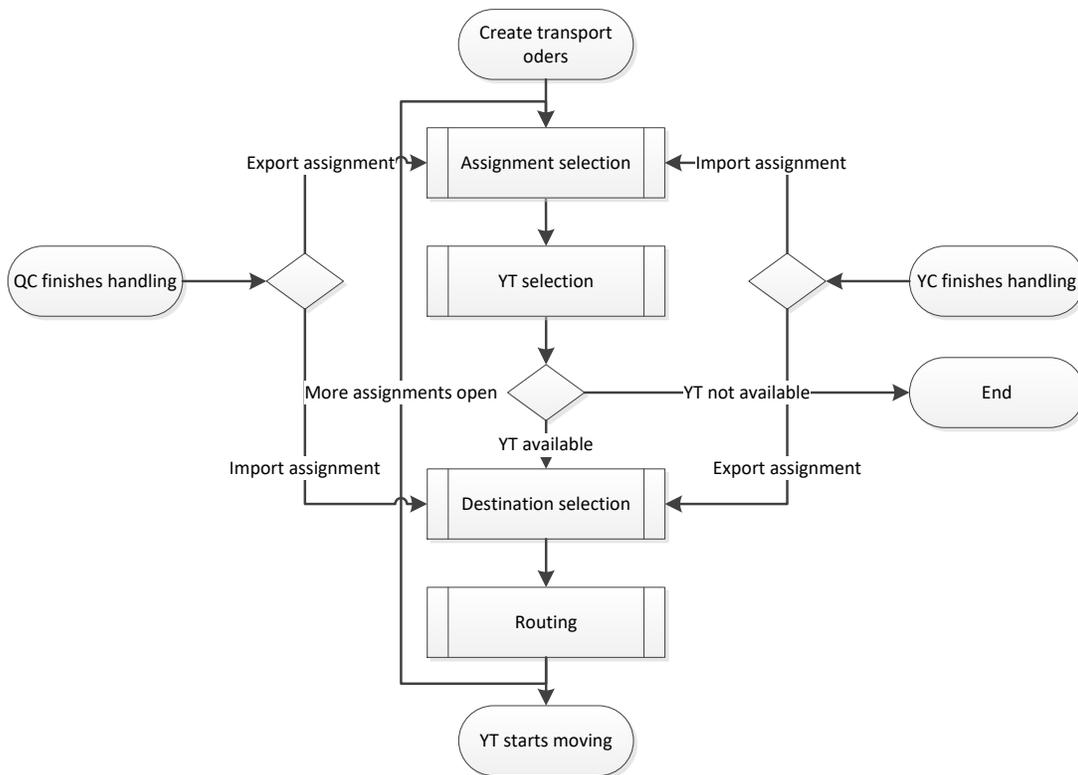


Abbildung 54: Ablauf der Transportauftragszuweisung (YT Dispatch)

Im Folgenden soll das Planungsproblem der Auftragszuordnung (*YT dispatch*) näher erläutert werden. Abbildung 54 zeigt den generellen Ablauf der Auftragszuordnung. Diese wird aufgerufen, wenn ein Teilprozess eines Auftrags abgeschlossen wurde oder neue Transportaufträge erstellt wurden. Normalerweise endet ein Teilprozess immer mit einem Containerumschlag eines Portalkrans oder einer Containerbücke. Durch die Auftragszuordnung (*Assignment selection*) wird ein aktuell noch nicht in der Ausführung befindlicher Auftrag ausgewählt und versucht, diesem einen verfügbaren YardTruck zuzuordnen (*YT selection*). Wurde ein Auftrag einem Fahrzeug zugewiesen, wird das nächste anzufahrende Ziel bestimmt (*Destination Selection*). Je nach verwendeter Strategie (online oder offline) wird das Ziel ad hoc bestimmt oder

bereits bei der Erstellung der Aufträge festgelegt. Im zweiten Fall wird das Ziel aus dem aktuell in Arbeit befindlichen Transportauftrag vorgegeben. Anschließend wird ein Routingverfahren eingesetzt, um die zu nutzende Route zu bestimmen. Bevor das Fahrzeug nun seine Fahrt antritt, wird überprüft, ob es weitere offene Aufträge gibt, welche vergeben werden können. So kann es sein, dass durch einen Aufruf der Auftragszuordnung mehrere Aufträge gleichzeitig vergeben werden. Dies macht z.B. dann Sinn, wenn eine Containerbrücke mit der Arbeit an einer neuen Position beginnt. In diesem Fall ist es sinnvoll, direkt mehrere Fahrzeuge an die Containerbrücke zu schicken. Anschließend starten das Transportfahrzeuge ihre Fahrt (*YT starts moving*).

7.3.2 An und Abtransport der Container in der Hinterlandanbindung

Für die Simulation der Anlieferungen und Abholungen von Containern per LKW wird eine Transportliste benötigt, welche Informationen darüber enthält, welcher LKW zu welchem Zeitpunkt einen Container anliefert oder abholt. Tabelle 7 zeigt ein Beispiel einer Transportliste für den LKW-Transport der Hinterlandanbindung. Das Attribut LKW beschreibt das ankommende Fahrzeug. Das Attribut „Typ“ gibt an, ob ein Container geliefert oder abgeholt wird. Der Zeitpunkt des Erscheinens des LKWs am Gate des Terminals wird durch das Attribut „Zeitpunkt“ beschrieben. Die Container ID beschreibt die ID des Containers, welcher angeliefert wird oder abgeholt werden soll. Eine Lieferliste kann als CSV-Datei vorgegeben werden. Die LKWs werden dann gemäß der Lieferliste vom *TrainGenerator* erzeugt. Alternativ kann der *TrainGenerator* auch eine Transportliste per Zufall generieren.

Tabelle 7: Beispiel einer Transportliste der LKW-Transporte im Terminal

LKW	Typ	Zeitpunkt	Container ID
LKW 1	Anlieferung	02.04.2015 14:12:50	125541
LKW 2	Abholung	02.04.2015 14:13:42	125541
LKW 3	Abholung	02.04.2015 14:13:57	255841
...

Zugankünfte werden ebenfalls durch eine Transportliste erzeugt. Tabelle 8 zeigt ein Beispiel einer Transportliste der Zugankünfte. Im Gegensatz zu einem LKW kann ein Zug eine Vielzahl von Containern transportieren, wobei ebenfalls zwischen Export- und Importcontainern unterschieden wird.

Tabelle 8: Beispiel einer Transportliste der Zugankünfte im Terminal

ZUG	Typ	Zeitpunkt	Container ID
Zug 1	Exportcontainer	02.04.2015 14:12:50	125541
Zug 1	Importcontainer		125541
...
Zug 3	Exportcontainer	02.04.2015 14:13:57	255841

Mit dem Eintreffen eines Zuges wird diesem ein Gleis im Terminal zugewiesen und Containerbrücken starten mit dem Laden und Entladen der Container. Der Transport von Containern zwischen Bahn und Lagerplätzen erfolgt durch terminaleigene Transportfahrzeuge.

7.3.3 Durchführung von Transportaufträgen

Im Folgenden soll näher auf die Art der durchzuführenden Aufträge eingegangen werden, da deren Aufbau und Funktionsweise für das Verständnis der folgenden Abschnitte wichtig ist. In bisher veröffentlichten Modellen wurden lediglich Transportaufträge, also der Transport von Containern zwischen zwei Zielen, behandelt. Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch auch die Energieversorgung der Horizontaltransportflotte betrachtet werden soll, muss ein neuer Typ von Auftrag definiert werden, welcher nicht das Ziel hat einen Container zu transportieren, sondern dazu dient, den Energievorrat eines Transportfahrzeugs wiederherzustellen. Daher wird im Folgenden zwischen Transport- und Energiebeschaffungsaufträgen unterschieden. Im Folgenden sollen diese beiden Arten von Aufträgen näher erläutert werden.

Transportaufträge dienen dem Transport von Containern zwischen zwei Zielen. Sie können in Import- und Exportaufträge unterteilt werden. Bei einem Importauftrag wird ein Container von einem Schiff zu einem Lagerplatz transportiert, während bei einem Exportauftrag ein Container von einem Lager zu einem Schiff befördert wird. Transportaufträge sind immer eine Aneinanderreihung einzelner Teilaufträge. Bei einem Importauftrag wird während dem ersten Teilauftrag eine Containerbrücke angefahren, um dort einen Container aufzunehmen. Anschließend wird der Container zu einem Lagerplatz transportiert. Nachdem der Container dort abgeladen wurde, wird dem Fahrzeug entweder ein neuer Auftrag zugeordnet oder es fährt zu einem freien Wartebereich im Terminal. Bei Exportaufträgen ist die Reihenfolge der Ziele umgekehrt. Ein Spezialfall eines Transportauftrags ist der Transport zwischen zwei Lagerblöcken. In diesem Fall sind beide Ziele Lagerplätze.

7 Simulationsbasierte Energiebedarfsprognose

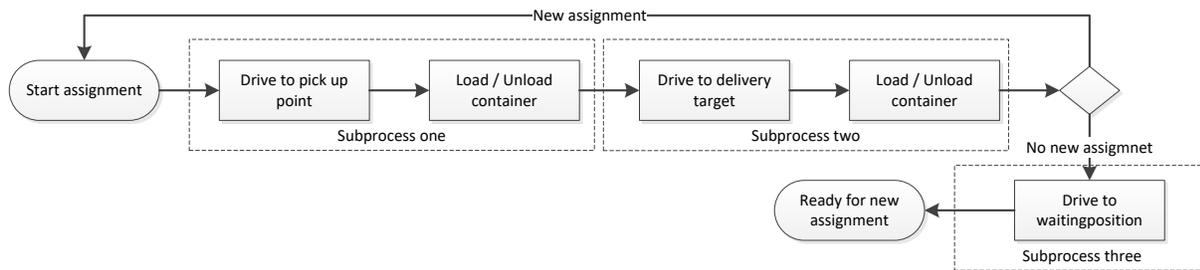


Abbildung 55: Ablaufdiagramm eines Transportauftrags

Bei der Erstellung eines Transportauftrags muss zwischen online und offline Verfahren unterschieden werden. Bei einem offline Verfahren werden der Durchführungszeitpunkt, das ausführende Transportfahrzeug sowie die Ziele bereits bei der Erstellung definiert. Bei einem online Verfahren muss bei der Erstellung von Transportaufträgen zwischen Import- und Exportcontainern unterschieden werden. Bei der Erstellung eines Importauftrags werden lediglich die anzufahrende Containerbrücke (Abholpunkt) und der Typ des Auftrags definiert. Der Durchführungszeitpunkt wie auch der anzusteuernde Lagerbereich (Zielpunkt) werden ad hoc bestimmt. Bei einem Exportauftrag werden direkt zu Beginn der Abholpunkt und Zielpunkt bestimmt. Tabelle 9 zeigt die notwendigen Informationen, einen Transportauftrag zu beschreiben.

Tabelle 9: Beispiel des Aufbaus eines Transportauftrags wobei zwischen einem Transportauftrag bei einem Offline und einem Online Verfahren unterschieden wird.

	ID	Abholpunkt	Zielpunkt	Startzeitpunkt	Beendigungszeitpunkt	Aktiv	YT Truck	Typ	Container ID
Offline Verfahren	1	QC 2	YC 3	12:10:00	12:18:52	Fal-se	AGV 12	Im-portauf-trag	125541
Online Verfahren Import	1	QC 2				Fal-se		Im-portauf-trag	125541
Online Verfahren Export	2	YC 3	QC 4			Fal-se		Ex-portauf-trag	255841

Zur vollständigen Beschreibung eines Transportauftrags gehören zusätzlich die Informationen, welcher Container transportiert werden soll und der Beendigungszeitpunkt des Auftrags. Als letztes definiert ein Boolean „Aktiv“, ob ein Transportauftrag bereits durchgeführt wird. Bei der online Erstellung eines Importauftrags muss nicht zwingend angegeben werden, welcher Container an einer Containerbrücke abgeholt werden soll. Auch diese Entscheidung kann ad

hoc an der Containerbrücke getroffen werden. Dies ist z.B. der Fall, wenn Fahrzeuge nur disponiert werden, z.B. bei der festen Zuweisung von einer bestimmten Anzahl von Fahrzeugen an eine Containerbrücke. In diesem Fall nimmt das betreffende Fahrzeug immer den nächsten Container auf.

Energieversorgungsaufträge dienen dem Wiederherstellen der Fahrzeugenergie (Diesel, elektrischer Strom, etc.). Hierbei wird lediglich als Ziel ein Versorgungsknoten Energie angegeben. Dies kann eine Batteriewechselstation, eine Ladesäule oder auch eine Tanksäule sein. Nachdem der Energiewiederherstellungsprozess durchgeführt wurde, kann das Fahrzeug direkt einen neuen Auftrag übernehmen oder eine Warteposition im Terminal anfahren. Abbildung 56 zeigt den Ablauf eines Energieversorgungsauftrags.

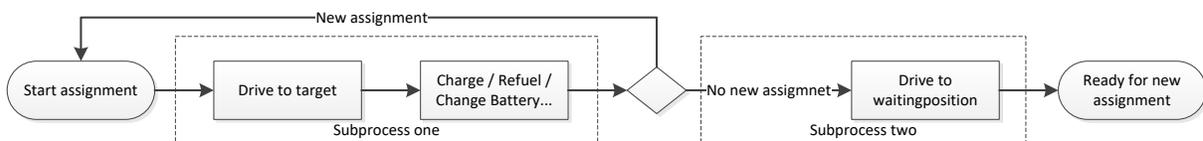


Abbildung 56: Ablaufdiagramm eines Energiebeschaffungsauftrags

Von besonderem Interesse sind insbesondere die Zeitpunkte der Durchführung von Energiebeschaffungsaufträgen. Ein Energiebeschaffungsauftrag wird immer einem konkreten Transportfahrzeug zugeordnet und kann logischerweise von keinem anderen Fahrzeug übernommen werden.

7.3.4 Ein- und Auslagerung von Kühlcontainern Kühlcontainer

Mit der Einlagerung eines Kühlcontainers in den Lagerbereich des Terminals beginnt auch die damit verbundene Leistungsaufnahme. Bei der Auslagerung eines Kühlcontainers aus dem Lagerareal fällt dessen Leistungsaufnahme weg. Die aggregierte Leistungsaufnahme aller zum Zeitpunkt t im Lager befindlichen Kühlcontainer gibt die Leistungsaufnahme der Kühlcontainerlager im Terminal an.

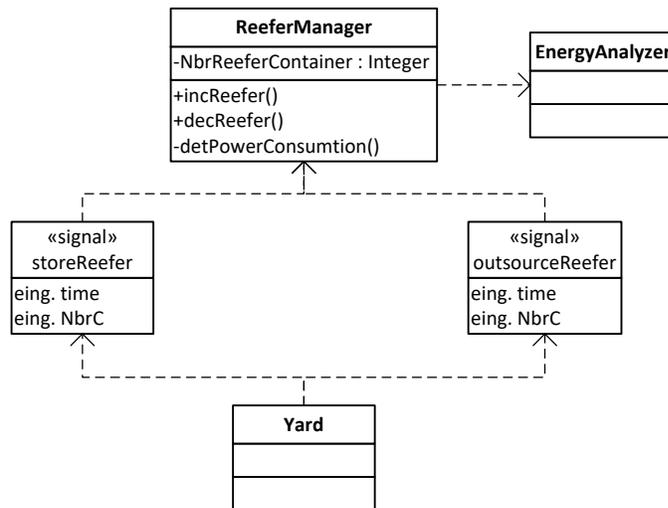


Abbildung 57: Nachrichtenübertragung bei Ein- und Auslagerung eines Kühlcontainers an seine endgültige Position.

Sobald ein Kühlcontainer in ein Kühlcontainerlager eingelagert wurde (seine endgültige Position erreicht hat), wird von der Instanz des entsprechenden Lagers ein Signal (*storeReeper*) an den *ReeperManager* gesendet. Durch das Signal wird die Methode *incReeper()* aufgerufen, welches die aktuelle Anzahl aller im Lager befindlichen Kühlcontainer um *NbrReeperContainer* inkrementiert. *NbrC* gibt Auskunft darüber, wie viele Container eingelagert wurden. Bei der Auslagerung eines Kühlcontainers wird entsprechend ein *outsourceReeper* Signal übermittelt und die Funktion *decReeper()* aufgerufen, welche die Anzahl der im Lager befindlichen Kühlcontainer um *NbrReeperContainer* dekrementiert. Nach einem Ein- oder Auslagerungssignal und der Erhöhung oder Verminderung des Containerbestandes wird die Methode *detPowerConsumption()* ausgeführt, welche die Gesamtleistungsaufnahme aller in den Lagern befindlichen Kühlcontainer bestimmt (P_{total}).

$$P_{total} = C_{Ref}P * NbrReeperContainer$$

Die Gesamtleistungsaufnahme wird anschließend dem *EnergyAnalyzer* übermittelt, welcher auf Grundlage der Veränderung der Leistungsaufnahme die verrichtete elektrische Arbeit bestimmt.

7.3.5 Durchführung eines Batteriewechsels

Im folgenden Abschnitt soll der Ablauf eines Batteriewechsels beschrieben werden. Nachdem ein Fahrzeug in eine Batteriewechselstation eingefahren ist, wird die aktuell im Fahrzeug be-

findliche Batterie entfernt (*Remove Battery*). Im Anschluss wird gemäß einer implementierten Auswahlstrategie eine voll- oder teilgeladene Batterie ausgewählt (*Select Battery*) und in das Fahrzeug eingesetzt (*Insert Battery*). Abbildung 58 stellt den Prozess eines Batteriewechsels dar.

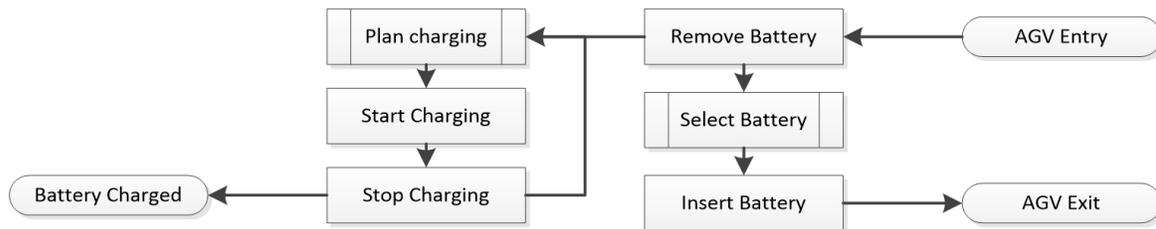


Abbildung 58: Ablauf eines Batteriewechsels

Nach der Entnahme einer Batterie aus einem Fahrzeug wird diese in ein Batterieladefach eingelagert und gemäß der hinterlegten Ladestrategie (*Plan charging*) geladen. Je nach domänenspezifischer Fragestellung können beliebige Ladeverfahren implementiert werden.

7.3.6 Beleuchtung

Zum Sonnenauf- bzw. Sonnenuntergang wird die Leistungsaufnahme innerhalb einer Dreiviertelstunde um drei Stufen gesenkt bzw. erhöht (Siehe Abbildung 59).

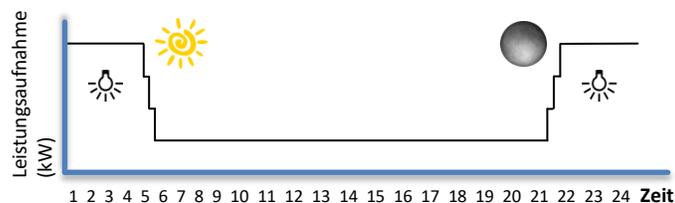


Abbildung 59: Allgemeiner Verbraucher Beleuchtung

Die vier unterschiedlich hohen Leistungsaufnahmen werden durch unterschiedliche Betriebszustände repräsentiert, die jeweils andere Beleuchtungsgruppen hinzu- oder abschalten.

7.3.7 Zusammenfassung

Das vorgestellte PCT-Modell ist dazu geeignet, Logistik- und Energieverbrauchsprozesse in einem Container-Terminal kombiniert abzubilden. Insbesondere werden auch die Wechselwir-

kungen zwischen Energiebereitstellung und Verbrauch berücksichtigt. Das Modell kann dazu genutzt werden, unterschiedliche Fragestellungen zu beantworten. So könnte das Modell z.B. dazu genutzt werden, unterschiedliche Infrastrukturauslegungen im Bereich der Energieversorgung zu testen und zu bewerten. Hierzu können z.B. die Anzahl der Wechselbatterien oder die Anzahl der Batteriewechselstationen variiert werden, um den Einfluss auf die Logistikprozesse zu untersuchen. Durch einfache Erweiterungen wäre es aber auch möglich, zusätzliche Batterieladestrategien zu implementieren und diese auf ihre Praxistauglichkeit hin zu überprüfen. Zusammenfassend wurde ein universelles Werkzeug geschaffen, um Lösungen für unterschiedliche energietechnische Planungsprobleme zu testen und zu evaluieren.

7.4 Greenport

Im Folgenden wird eine domänenspezifische Erweiterung (*Greenport*) des Power Consumption Container-Terminal Modells vorgestellt, welches zum Ziel hat, die Leistungsaufnahme eines Container-Terminals zu prognostizieren. Hierzu werden Entitäten und Prozesse des PCTM- Modells erweitert und um zusätzliche Simulationskomponenten erweitert.

7.4.1 Aufbau Greenport

Abbildung 60 zeigt die notwendige Architektur für die Durchführung einer simulationsbasierten Lastgangprognose. Der zentrale Baustein stellt die Greenport-Simulation dar, welche die Logistik- und Energieverbrauchsprozesse eines Container-Terminals kombiniert abbildet. Diese wird über einer Schnittstelle mit dem Terminal Operating System (TOS) verbunden. Das TOS stellt die für die Prognose notwendigen Informationen der zukünftigen Schiffsankünfte und Containeranlieferungen per Bahn in Form von Segel- und Lieferlisten bereit. Darüber hinaus werden durch das TOS zum Simulationsstart zusätzliche Informationen bereitgestellt, um den Simulationsstartzustand gegenüber dem realen Zustand möglichst genau abzubilden. Hierzu gehören Informationen über die eingelagerten Kühlcontainer, die Ladezustände der Batterien in Transportfahrzeugen, ggf. Batteriewechselstationen und die Standortdaten der Fahrzeuge. In einer Datenbank werden die für die Simulationsdurchführung notwendigen Attribute der unterschiedlichen Containerumschlaggeräte hinterlegt. Hierzu gehören Attribute wie die Geschwindigkeit von Fahrzeugen, Umschlagszeiten von Containerbrücken und die entsprechenden Energieverbräuche. Außerdem dient die Datenbank der Sicherung und Archivierung der Simulationsergebnisse. Auf Grundlage dieser Daten können zu einem späteren Zeitpunkt Energieverbräuche ausgewertet und mit aktuellen Ergebnisse verglichen werden, um neue Kenntnisse über die Energieverbrauchsprozesse im Terminal zu erlangen.

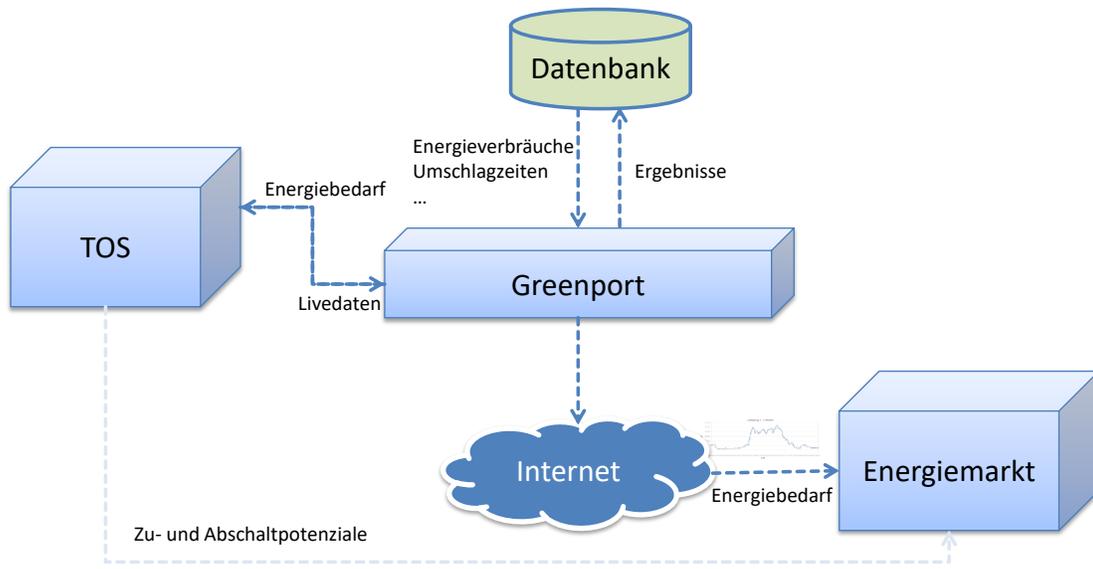


Abbildung 60: Architektur des Prognoseprozesses

7.4.2 Verbraucher

Im Folgenden wird die Bestimmung der Leistungsaufnahme und der Containerumschlagszeiten von Containerbrücken und Portalkränen beschrieben.

7.4.2.1 Containerbrücken und Portalkräne

Für die Leistungsaufnahme eines Containerumschlags wird ein fester Energieverbrauchswert in kWh ($p_{C_{avr}}$) angenommen, wobei für diesen zwischen 20 und 40 Fuß Container unterschieden wird. Die Umschlagszeit (t) wird durch eine diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung abgebildet. Dafür werden aufgezeichnete Umschlagszeiten pro Containerumschlag in Klassen (K_i) von je fünf Sekunden eingeordnet. Die Wahrscheinlichkeit, eine Umschlagszeit $t(x)$ aus einer der Klassen zu ziehen, ist dann durch Formel 1 gegeben.

$$t(x) = \frac{|M = \{x | x \in K_i\}|}{Anz_{Gesamt}} \quad (1)$$

Anz_{Gesamt} beschreibt die Gesamtanzahl der beobachteten Containerumschläge. Bei der Bestimmung der Umschlagzeiten wird zwischen den Containerschiffstypen Kahn, Feeder und Seeschiff unterschieden, da die Umschlagszeiten eines Containers bei diesen beiden Schiffsklassen signifikant voneinander abweichen. Die elektrische Leistungsaufnahme (P_c) für einen Containerumschlag ist dann abhängig von der Zeit und wird definiert durch:

$$P_c = \frac{pC_{avr}}{t} * 3600 \quad (2)$$

Tabelle 10 gibt eine Übersicht der Leistungsaufnahmebestimmung einer Containerbrücke, unterteilt nach Prozessen und Ressourcen.

Tabelle 10: Leistungsaufnahmebestimmung des Objekts Containerbrücke und Portalkran

Prozess / Ressource	Überführungstyp	Verbrauch/Verbrauchsbestimmung
Container laden	Analytisch	$p = \frac{pC_{avr}}{t} * 3600$
Container löschen	Analytisch	$p = \frac{pC_{avr}}{t} * 3600$
Ressourcen	Statisch	x kW

Für alle Ressourcen einer Containerbrücke gilt, dass diese über eine fest definierte Leistungsaufnahme verfügen, welche nicht von äußeren Einflüssen beeinflusst wird. Zu beachten ist, dass an Containerbrücken Schichtwechsel der Brückenbesatzung durchgeführt werden. Zu diesen Zeiten werden von den Containerbrücken keine Umschläge durchgeführt und somit nur die Basisleistung aufgenommen, welche im Betriebszustand „Standby“ bezogen wird.

7.4.3 Prozesse Greenport

Im Folgenden werden die die verschiedenen Prozesse des Greenport Modells erläutert.

7.4.3.1 Create Containership

Bestimmende Ereignisse eines Simulationslaufs sind die Ankünfte von Containerschiffen, welche zum Zeitpunkt $t = (CS_{arr}(x)|x \in SL)$ ausgelöst werden, wobei die Variable t die Simulationszeit beschreibt. Abbildung 61 zeigt die Prozesskette, welche durch dieses Ereignis ausgelöst wird. Als Erstes wird das Objekt *Containership* erzeugt, anschließend werden Import- und Exportcontainer erzeugt.



Abbildung 61: Prozesskette, welche durch das Ereignis „Ankunft eines Containerschiffes“ ausgelöst wird.

7.4.3.1.1 Create Vessel

Zum Zeitpunkt t wird ein Containerschiff als Objekt erstellt gemäß der in der Segelliste (SL) hinterlegten Daten. Entscheidend ist die Anzahl der Bays eines Containerschiffs, welche von der Länge des Schiffs abhängt. Die Anzahl der Bays (Nbr_{Bays}) kann ermittelt werden, indem die Länge einer Bay durch die Gesamtlänge eines Schiffes geteilt wird. Es gilt:

$$Nbr_{Bays} = \left\lfloor \frac{CS_{length}}{Bay_{length}} \right\rfloor \geq 1$$

- $Num_{Bays} = \text{Anzahl der Bays eines Containerschiffes.}$
- $Bay_{length} = \text{Länge einer Bay}$

Die Variable *startPosition* der Klasse *Bay* definiert die Position (Bay_{Pos}) einer Bay auf dem Containerschiff entlang dessen Länge. Es gilt:

$$Bay_0.startPosition = 0$$

$$Bay_i.startPosition = Bay_{i-1}.startPosition + Bay_{length}$$

7.4.3.1.2 Create Import Container

Nach der Generierung des Objekts *Containership* werden die zu entladenden Container als Objekte generiert und zufällig auf die Containerbays verteilt, wobei eine gleichmäßige Aufteilung der Container auf die Bays erfolgt. Dies bedeutet, dass sich in jeder Bay ungefähr die gleiche Anzahl an Containern befinden sollte, wobei durchaus in einer Bay mehr 20 Fuß Importcontainer als 40 Fuß Importcontainer oder Kühlcontainer vorkommen können. Die Verteilung der Containertypen ist zufällig zu erfolgen. Die Gesamtanzahl der Exportcontainer (C_{total}) an Bord eines Containerschiffes ist gegeben durch:

$$C_{total} = (C_{Imp_{20}}(x_i) + C_{Imp_{40}}(x_i) + C_{Imp_{Ref}}(x_i) | x_i \in SL \wedge t_{arr}(x_i) = t)$$

Die Anzahl der Container in den Bays ($Nbr_{C_{Bay_i}}$) 1 bis $i-1$ ist dann gegeben durch:

$$Nbr_{C_{Bay_1, \dots, Bay_{i-1}}} = \left\lfloor \frac{C_{total}}{Nbr_{Bays}} \right\rfloor$$

Die Anzahl der Container in der letzten Bucht des Containerschiffes kann von der Anzahl der in den anderen Buchten befindlichen Container abweichen und ist gegeben durch:

$$Nbr_{C_{Bay_i}} = C_{total} - Nbr_{Bays} - 1 * Nbr_{C_{Bay_1}}$$

7.4.3.1.3 Create Export Container

Nach der Erstellung des Objekts *Containership* und der Zuweisung des Schiffes zu einem festen Liegeplatz an der Kaimauer werden die für das Schiff bestimmten Exportcontainer als Objekte generiert.

Dabei kommt das gleiche Schema wie bei der Erstellung der Importcontainer zum Zuge. Bei der Instanziierung der Exportcontainer müssen die Variablen *CSJSNR* und *CSBay* gesetzt werden. *CSJSNR* ist die ID des Containerschiffes, für welches der Container bestimmt ist. *CSBay* beschreibt die Bay, in welche der Container eingelagert werden soll. Wie bei Importcontainern sind die Exportcontainer gleichmäßig auf die Bays zu verteilen. Die Zuweisung der Container zu ihrem Stellplatz (Blocklager, Regallager, etc.) erfolgt nach einem nutzerspezifischen System, welches auf dem jeweils abzubildenden Container-Terminal angepasst ist.

Nachdem das Objekt *Containership* erstellt wurde und die dazugehörigen Exportcontainer instanziiert wurden, wird eine Prozesskette zur Be- und Entladung des Schiffs in Gang gesetzt. Um die Umschlagvorgänge zu simulieren, müssen unterschiedliche Planungsprobleme (siehe Abschnitt 2.3) gelöst werden. Lösungen für die Planungsprobleme werden durch Entscheidungsprozesse gefunden, wobei hier jeweils nutzerspezifische Lösungen zu implementieren sind. Vorgänge im Hinterlandbereich werden hierbei nicht berücksichtigt, da diese unabhängig von den Schiffsankünften geschehen. Eine Beschreibung der Prozesse in diesem Bereich findet in Abschnitt 7.2.1.9 statt.

7.4.4 Ablauf der Simulation

Abbildung 62 zeigt den generellen Ablauf einer simulationsbasierten Energiebedarfsprognose. Als erster Schritt werden die zukünftigen Segellisten (enthalten die zukünftigen Schiffsankünfte) erstellt.

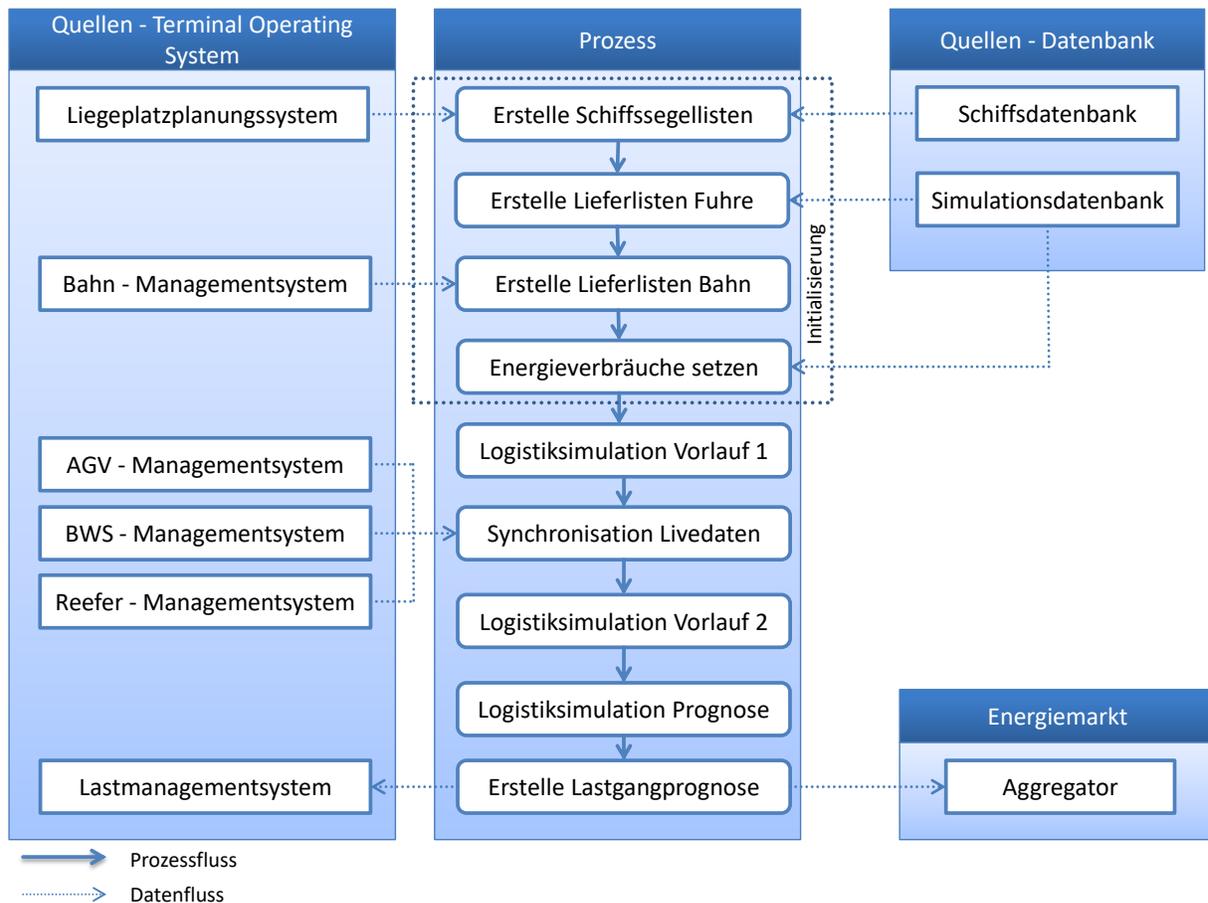


Abbildung 62: Ablauf der Durchführung einer Energiebedarfsprognose

7.4.4.1 Initialisierung der Simulation

Die Initialisierung der Simulation fasst die Prozesse *Erstelle Schiffssegellisten*, *Erstellte Lieferlisten Fuhre*, *Erstelle Lieferlisten Bahn* und *Energieverbräuche setzen* zusammen.

Zuerst werden die Schiffssegellisten erstellt, welche die notwendigen Informationen über zukünftige Schiffsankünfte enthalten. Die hierfür notwendigen Informationen stammen aus dem Liegeplatzplanungssystem des TOS. Fehlende oder fehlerhafte Informationen des Systems werden auf Grundlage vergangener Schiffsankünfte ergänzt. Fehlende Informationen können dabei sein:

- Die geplante Startzeit der Be- und Entladeprozesse, sofern diese zum Simulationsstartzeitpunkt noch nicht geplant wurden.

- Fehlende Anzahl der an Bord befindlichen Export- und Importcontainer sowie deren Ausprägungen (20 Fuß, 40 Fuß, etc.). Neben den in Abschnitt 7.3.1 beschriebenen Attributen einer Segelliste werden die in Tabelle 11 beschriebenen Attribute ergänzt. Sofern diese nicht verfügbar sind, wird die Verteilung der Container gemäß einer Wahrscheinlichkeitsverteilung generiert. Insbesondere ist eine Unterscheidung zwischen 20 und 40 Fuß Containern wichtig, da bei deren Umschlag eine jeweils andere durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme bezogen wird. Ebenfalls von Bedeutung ist die Anzahl der an Bord befindlichen Kühlcontainer, da diese bei ihrer Einlagerung elektrische Leistung beziehen.

Tabelle 11: Ergänzung der Segelliste

Attribut	Beschreibung	Typ
...
CS _{startwork}	Geplante Startzeit des Be- und Entladevorgangs	Long
C _{Imp20}	Anzahl der 20 Fuß Importcontainer	Integer
C _{Imp40}	Anzahl der 40 Fuß Importcontainer	Integer
C _{Exp20}	Anzahl der 20 Fuß Exportcontainer	Integer
C _{Exp40}	Anzahl der 40 Fuß Exportcontainer	Integer
C _{Impref}	Anzahl der Import Kühlcontainer	Integer
C _{Expref}	Anzahl der Export Kühlcontainer	Integer

- Schiffstyp und Länge. Es wird zwischen den Schiffstypen Kahn, Feeder und Seeschiff unterschieden. Fehlen diese Werte, werden diese automatisch ergänzt, wobei einem Seeschiff die Länge 300 Meter, einem Feeder die Länge 150 Meter und einem Kahn die Länge 100 Meter zugewiesen wird. Ist der Schiffstyp nicht angegeben, wird diese in Abhängigkeit der an Bord befindlichen Container bestimmt.

Nachdem die Segellisten erstellt worden sind, werden Lieferlisten für die Containeranlieferungen für die Bahn erstellt. Die hierzu notwendigen Informationen stammen aus dem Bahn-Managementsystems des TOS.

Für den Simulationsablauf sind die Ankünfte der Schiffe durch die Segelliste beschrieben. Für die Anlieferungen und Abholungen von Containern auf der Landseite stehen keine Daten zur Verfügung. Daher bleibt die Frage nach einer geeigneten Methode, Transportlisten für LKW-Lieferungen zu generieren. Bei der Betrachtung historischer Daten der Transportumschläge im Hinterlandbereich des CTA aus dem Jahr 2013 ist eine klare Abhängigkeit zwischen Transportaufkommen und Wochentag erkennbar. Als Verfahren zur Bestimmung der Transportlisten der LKW Transporte wird daher ein Vergleichstagverfahren verwendet (siehe Abschnitt 4.2.1),

welches auf Grundlage des historischen Transportaufkommens die zukünftigen Containertransporte prognostiziert.

Anschließend werden die notwendigen Umschlagszeiten und Energieverbräuche der Containerumschlagsgeräte gesetzt. Die hierfür notwendigen Daten stammen aus der Simulationsdatenbank. Nach diesem Schritt sind sämtliche Vorbereitungen für den Start der Energiebedarfsprognose abgeschlossen und der Simulationsvorlauf kann beginnen.

7.4.4.2 Logistiksimulation Vorlauf 1

Auf Grundlage der Segelliste kann der benötigte Simulationszeitraum bestimmt werden, welcher zur Erstellung einer Lastgangprognose simuliert werden muss. Es ist zu unterscheiden zwischen dem Durchführungszeitpunkt der Simulation (t_1) und dem Startzeitpunkt des Simulationslaufs (t_0). Der Durchführungszeitpunkt beschreibt den Zeitpunkt, zu welchem die eigentliche Simulation, also die Energiebedarfsprognose, gestartet wird, um eine Lastgangprognose des Folgetages zu erstellen. Der Durchführungszeitpunkt hängt von dem angestrebten Geschäftsanwendungsfall ab (siehe Abschnitt 1). Für die Geschäftsanwendungsfälle *Bereitstellung von Minutenreserve* oder *Bezugspreisoptimiertes Laden* ist z.B. ein definierter Zeitpunkt gegeben, zu welchem Angebote übermittelt werden müssen (10 und 12 Uhr des Vortages). Der Zeitpunkt der Simulationsdurchführung muss also so gewählt werden, dass genügend Zeit zur Verfügung steht, die Simulation durchzuführen, Angebote zu erstellen und diese zu übermitteln. Der Startzeitpunkt des Simulationslaufs beschreibt den Zeitpunkt, ab welchem das Logistikgeschehen des Terminals simuliert werden muss. Die Zeitpunkte t_1 und t_0 können nicht gleich sein, da eine Prognose ansonsten lediglich zukünftige Schiffsankünfte berücksichtigen würde und bereits im Terminal stattfindende Umschlagsprozesse somit nicht berücksichtigt werden. Es gilt:

$$t_0 \leq t_1$$

Ziel ist es, den Startzeitpunkt des Simulationslaufs so zu wählen, dass zum Zeitpunkt t_1 ein realistischer Systemzustand existiert. Dies wird erreicht, indem ein Teil der zurückliegenden Logistikprozesse des Terminals simuliert werden, da sich zum Zeitpunkt der Simulationsdurchführung bereits Containerschiffe im Terminal befinden und Logistikprozesse stattfinden. Um die Prozesse, die durch diese Schiffe ausgelöst werden, abzubilden, wird der Startzeitpunkt des Simulationslaufs so gewählt, dass dieser gleich der frühesten Ankunftszeit aller im Terminal befindlichen Containerschiffe ist. Somit werden sämtliche Prozesse durch die im Terminal befindlichen Schiffe abgebildet und ein realistischer Systemzustand zum Zeitpunkt t_1 erreicht. Zur Bestimmung des Startzeitpunktes des Simulationsvorlaufs (t_0) müssen also alle zum Zeitpunkt t_1 im Terminal befindlichen Schiffe erfasst werden. M_{t_1} ist somit die Men-

7 Simulationsbasierte Energiebedarfsprognose

ge aller Segellisteneinträge, welche ein Schiff beschreiben, welches sich zum Zeitpunkt t_1 im Terminal befindet. Für M_{t_1} gilt:

$$M_{t_1} = \{x \in SL \mid CS_{arr}(x) \leq t_1 \wedge CS_{dep}(x) \geq t_1\}$$

Der Startzeitpunkt des Simulationslaufs t_0 ist dann die früheste Ankunftszeit (t_{arr}) der in der Menge M_{t_1} befindlichen Schiffe.

$$t_0 = \min(t_{arr}(x_i) \mid x_i \in M_{t_1})$$

Abbildung 63 verdeutlicht den Ablauf eines Simulationsdurchlaufs. Zum Zeitpunkt t_1 wird die Simulation gestartet. Als erster Schritt wird nun der Startzeitpunkt des Simulationslaufs (Simulationszeit) bestimmt. Ab dem Zeitpunkt t_0 wird das Logistik- und Energiegeschehen im Terminal simuliert. Zum Zeitpunkt t_1 ist nun ein realistischer Systemzustand erreicht. Ab diesem Zeitpunkt werden zukünftige Prozesse im Terminal abgebildet. Da gemäß den Anwendungsfällen die Leistungsaufnahme erst ab 0 Uhr des Folgetages der Simulationsdurchführung relevant ist, wird diese Phase als Simulationsvorlauf 2 bezeichnet.

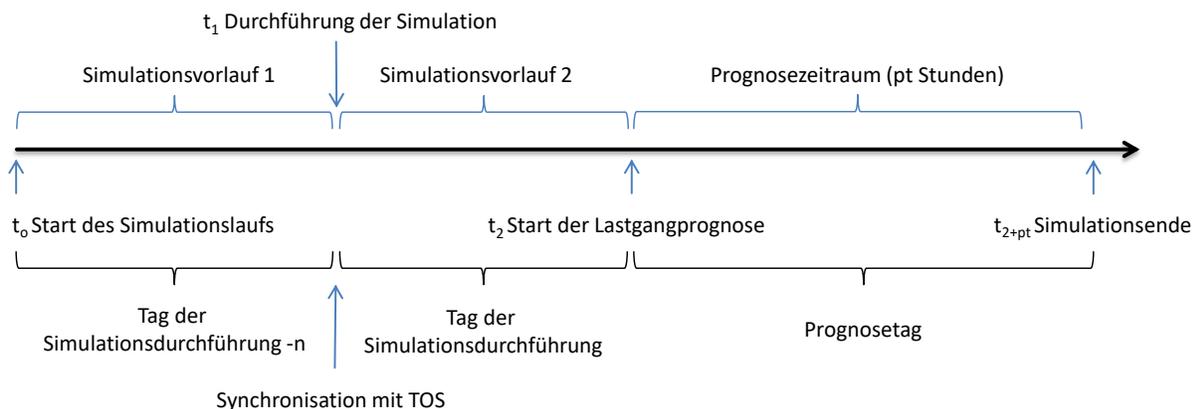


Abbildung 63: Zeitlicher Ablauf einer Energiebedarfsprognose

Mit Abschluss dieser Phase und dem Erreichen des Zeitpunkts t_2 werden für pt Stunden (Simulationszeit) die Logistikprozesse weiter simuliert, um die Logistik- und Energieverbrauchsprozesse im Terminal zu prognostizieren. Nach den in Abschnitt 1 vorgestellten Geschäftsanwendungsfällen beträgt der Prognosezeitraum mindestens 24 Stunden. Zum Zeitpunkt t_1 werden zusätzlich Livedaten des Terminals abgerufen und in die Simulation übertragen.

7.4.4.3 Synchronisation Livedaten

Zum Zeitpunkt t_1 werden zusätzliche Informationen des TOS abgerufen, um einen möglichst realistischen Systemstartzustand zu erreichen. Abbildung 64 gibt einen Überblick über die zu synchronisierenden Daten.

Aus dem AGV-Managementsystem des TOS werden die aktuellen Positionsdaten der Fahrzeuge abgerufen und diese mit den Daten der Simulation synchronisiert. Dies ist notwendig, da der Standort Auswirkungen auf das zukünftige Transportumschlagsvolumen der Fahrzeuge hat. So könnte es z.B. sein, dass im Realsystem eine Mischflotte aus Diesel- und Batteriefahrzeugen eingesetzt wird. Befinden sich im Realsystem zum Zeitpunkt t_1 ein Großteil der Batteriefahrzeugflotte in einem bestimmten Bereich des Terminals, wird die Auslastung der Fahrzeuge stark von der Auslastung der Containerbrücken in diesem Bereich abhängen. Befinden sich in diesem Bereich des Terminals keine aktiven Containerbrücken, werden den Batteriefahrzeugen wahrscheinlich nur wenig oder eventuell auch gar keine Transportaufträge zugeordnet, da das AGV-Managementsystem immer die Fahrzeuge mit dem kürzesten Anfahrtsweg zu einer Containerbrücke auswählen wird. In diesem Fall werden Batteriefahrzeuge im Realsystem nur eine geringe Auslastung haben. Werden die Fahrzeuge in der Simulation zufällig positioniert, könnte es jedoch sein, dass eine große Anzahl von Batteriefahrzeugen in einem Bereich des Terminals positioniert werden, in welchem eine hohe Auslastung der Containerbrücken vorherrscht. In diesem Fall wird die Simulation einen hohen elektrischen Verbrauch der Fahrzeuge prognostizieren, welcher in der Realität nicht eintreten wird. Um diese Wechselwirkungen zwischen Containerbrücken- und Transportfahrzeugauslastung zu berücksichtigen, ist es notwendig, die Positionsdaten der Fahrzeuge mit dem Livesystem zu synchronisieren. Weiter werden die Ladezustände der Batterien innerhalb der Fahrzeuge mit dem Realzustand synchronisiert und die korrekte Zuordnung der Batterien zu den Fahrzeugen gesetzt.

Aus dem Reefer-Managementsystem wird die Anzahl der aktuell im Lager befindlichen Kühlcontainer abgerufen, da die Anzahl der eingelagerten Kühlcontainer einen hohen Einfluss auf den Gesamtlastgang ausübt. Neben der Anzahl der aktuell eingelagerten Kühlcontainer kann zusätzlich auch die aggregierte Leistungsaufnahme der Kühlcontainerlager abgerufen werden. Auf dieser Grundlage kann die durchschnittliche Leistungsaufnahme eines Kühlcontainers berechnet werden. Hierdurch werden z.B. saisonale Einflüsse, wie etwa die Durchschnittstemperatur, berücksichtigt.

7 Simulationsbasierte Energiebedarfsprognose

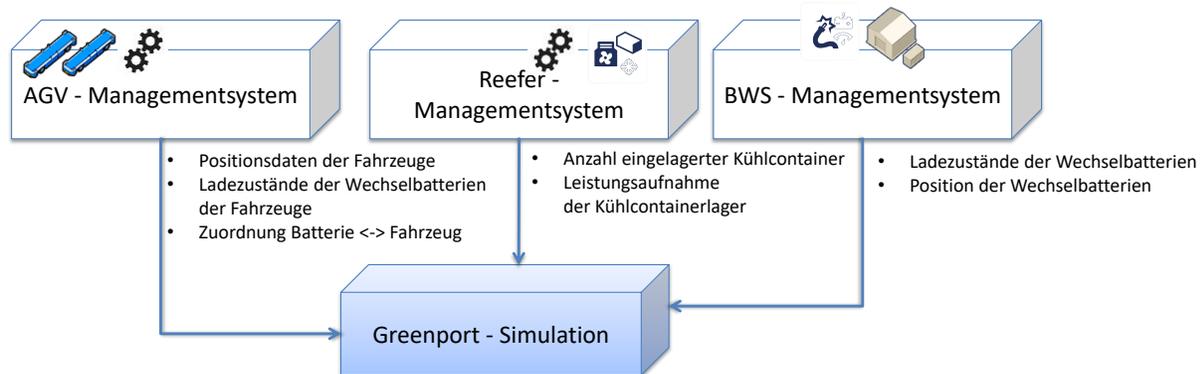


Abbildung 64: Synchronisation der Simulationskomponenten mit dem Livesystem

Im letzten Schritt werden die Daten der Batteriewechselstationen synchronisiert. Hierzu werden die Positionen der einzelnen Batterien den Lade- und Wechselfächern der BWS zugeordnet und deren Ladezustände entsprechend dem realen Zustand angepasst.

7.4.4.4 Logistiksimulation Vorlauf 2

Nach der Synchronisation zwischen TOS und Simulationskomponente werden die zukünftigen Abläufe und Energieverbräuche des Terminals prognostiziert, jedoch ist gemäß den in Abschnitt 1 vorgestellten Geschäftsanwendungsfällen eine so kurzfristige Lastgangprognose nicht von Relevanz. Aus diesem Grund wird die Simulation des folgenden Zeitabschnitts als Simulationsvorlauf 2 bezeichnet. Es gilt natürlich zu beachten, dass weitere Geschäftsanwendungsfälle identifiziert oder entwickelt werden können, für welche auch eine unmittelbare Vorhersage der elektrischen Leistungsaufnahme Relevanz besitzt. Gemäß den in dieser Arbeit vorgestellten Anwendungsfällen beginnt die Lastgangprognose um 0 Uhr des Folgetages.

7.4.4.5 Logistiksimulation Prognose

Nach Beendigung des Simulationsvorlaufs 2 beginnt der Zeitraum, ab welchem die Vorhersage der Leistungsaufnahme gemäß den in Abschnitt 1 vorgestellten Geschäftsanwendungsfällen relevant ist. Dieser zeitliche Abschnitt der Simulation wird daher als Prognosezeitraum bezeichnet. Der Zeitraum für welchen die Leistungsaufnahme prognostiziert werden soll, muss durch die Simulation dargestellt werden. Die konkrete Dauer ist dabei vom jeweiligen Geschäftsanwendungsfall abhängig.

7.4.5 Zusammenfassung

Im vorangegangenen Kapitel wurden zwei Modelle vorgestellt. Das *Power Consumption Terminal Model* und das *Greenport Model*.

Beim *Power Consumption Terminal Model* handelt es sich um ein Modell, welches in der Lage ist die Logistik- und Energieverbrauchsprozesse eines Container-Terminals kombiniert abzubilden. Auch wenn der Fokus dieser Arbeit nicht auf der Bestimmung geeigneter Energiebereitstellungsstrategien oder der Bestimmung geeigneter Infrastrukturauslegungen (Anzahl Wechselbatterien, Anzahl BWS, etc.) liegt, kann das Modell durch domänenspezifische Erweiterung sehr wohl dazu genutzt werden, um Fragen dieser Art zu beantworten. Im Rahmen des *PCT-Modells* wurde auch eine Methode entwickelt und vorgestellt, welche allgemeine Verbraucher, Ressourcenenergie und äußere Einflussfaktoren bei der Bestimmung der Leistungsaufnahme berücksichtigt. Die Methode wurde allgemein gehalten und ist dadurch auch auf die Simulation weiterer intermodaler Containerumschlagsplätze geeignet.

Das *Greenport Modell* erweitert das *PCTM* und stellt vor, wie eine simulationsbasierte Lastgangprognose ablaufen kann. Im folgenden Abschnitt wird das *Greenport-Modell* gemäß den Anforderungen getestet und evaluiert werden.

8. Evaluierung

Im vorangegangenen Kapitel wurde ein Simulationsmodell (Greenport) zur Abbildung und Prognose der Logistik- und Energieverbrauchsprozesse eines Containerterminals vorgestellt. Das Modell wurde prototypisch am Beispiel des Container-Terminals Altenwerder umgesetzt und in Plant Simulation implementiert. Der entstandene Prototyp wird in diesem Kapitel evaluiert. Die Evaluation verfolgt nachstehende Ziele:

1. Bestimmung der Anforderungs- und Zielerfüllung
2. Demonstration der Anwendbarkeit
3. Bewertung der Prognosegüte des simulationsbasierten Verfahrens

Um die Zielerfüllung der Gesamtenergiebedarfsprognose hinsichtlich der Anforderungen zu evaluieren, wird als Fallbeispiel der Energiebedarf des Container-Terminals Altenwerder (CTA) in Hamburg mittels des vorgestellten Verfahrens prognostiziert. Hierzu wurde ein Modell des CTA entworfen und in der Materialflusssimulationsumgebung Plant Simulation implementiert. Das Modell wurde in einem ersten Schritt dazu genutzt, den Gesamtenergiebedarf des Terminals zu prognostizieren und in einem zweiten Schritt den Energiebedarf einer Batteriewechselstation vorherzusagen. Das simulationsbasierte Prognoseverfahren wird dabei mit einem etablierten Verfahren zur Zeitreihenprognose, dem Vergleichstagverfahren, verglichen. Die Bewertung der Prognoseverfahren erfolgt anhand einer Ex-post-Evaluierung, welche den erzeugten Lastprognosen die tatsächlich beobachteten Werte gegenüberstellt. Zur quantitativen Bewertung der Prognosegüte werden die in Abschnitt 4 aufgeführten Kennzahlen verwendet.

8.1 Modell des Container-Terminals Altenwerder

Im Folgenden wird der Aufbau des CTA- sowie die Modellentwicklung und Umsetzung in Plant Simulation erläutert.

8.1.1 Aufbau

Abbildung 65 zeigt den schematischen Aufbau des Container-Terminals Altenwerder. Im Schiffsankunftsbereich befindet sich eine 1400 Meter lange Kaimauer, an welcher 14 Zwei-Katz Containerbrücken positioniert sind. Die Kaimauer ist in vier 350 Meter lange Liegeplatzabschnitte eingeteilt, in welche Containerschiffe disponiert werden. Neben den 14 Zwei-Katz Containerbrücken existiert im nördlichen Bereich der Kaimauer eine zusätzliche Feeder-Containerbrücke. Aufgrund der kleineren Ausmaße dieser Containerbrücke kann diese lediglich Container an Feederschiffen und Kähnen umschlagen.

8 Evaluierung

Im Horizontaltransportbereich befinden sich 86 AGVs im Einsatz, wobei 76 Fahrzeuge mit einem diesel-elektrischen Antrieb ausgestattet sind. 10 Fahrzeuge verfügen über einen batterie-elektrischen Antriebsstrang und nutzen Wechselbatterien. Transponder definieren auf dem Horizontaltransportbereich ein virtuelles Streckennetz, welches die Fahrzeuge nutzen. Der Aufbau des Streckennetzes ist der Abbildung 65 zu entnehmen. Im nördlichen Teil des Bereichs befindet sich eine prototypenhafte Batteriewechselstation, welche über 10 Batterieladepunkte verfügt. Im Blocklagerbereich befinden sich 26 Blocklager, welche jeweils von zwei Portalkränen bedient werden. Auf der Landseite verfügt jeder Lagerblock über 7 Anlieferungspositionen für LKW und terminalinterne Transportfahrzeuge, die für den Transport von Containern zwischen Bahnkran und Lagerblock zuständig sind. Seeseitig besitzt jedes Blocklager 4 Spuren für AGVs. Fünf der Blocklager verfügen über elektrische Anschlüsse und sind in der Lage, Kühlcontainer aufzunehmen. Im Hinterlandbereich des Terminals existieren sieben Bahnschienen, welche von insgesamt 4 Portalkränen bedient werden.

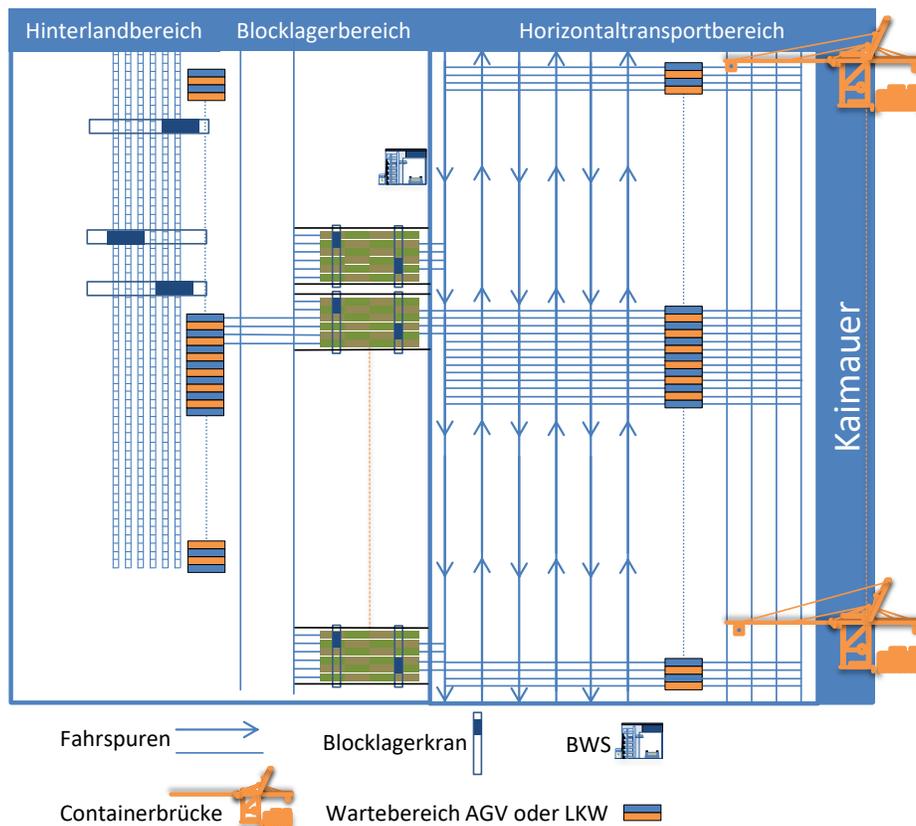


Abbildung 65: Schematischer Aufbau des Container-Terminals Altenwerder

Zum Test des Systems wurde eine Instanz des Greenport Modells in Plant Simulation entwickelt, welches das CTA abbildet. Abbildung 66 zeigt 4 Screenshots des CTA-Modells in Plant

Simulation. Es ist ein Ausschnitt des Horizontaltransportbereichs zu sehen, in welchem das Streckennetz sowie AGVs zu erkennen sind. Auf der rechten Seite befinden sich zwei aktive Kai Kräne (zu erkennen an den grünen Punkten) und auf der linken Seite sind vier der 26 Blocklager zu erkennen. Im oberen rechten Bereich ist die Batteriewechselstation mit den einzelnen Ladefächern zu erkennen. Der untere Teil des Bildes zeigt einen Ausschnitt aus der Hinterlandanbindung in Form der Bahngleise, auf welchen zwei Züge zu erkennen sind sowie einen Ausschnitt aus dem Schiffsankunftsbereich. Hier ist ein Teil eines Containerschiffs sowie zwei Containerbrücken zu erkennen.

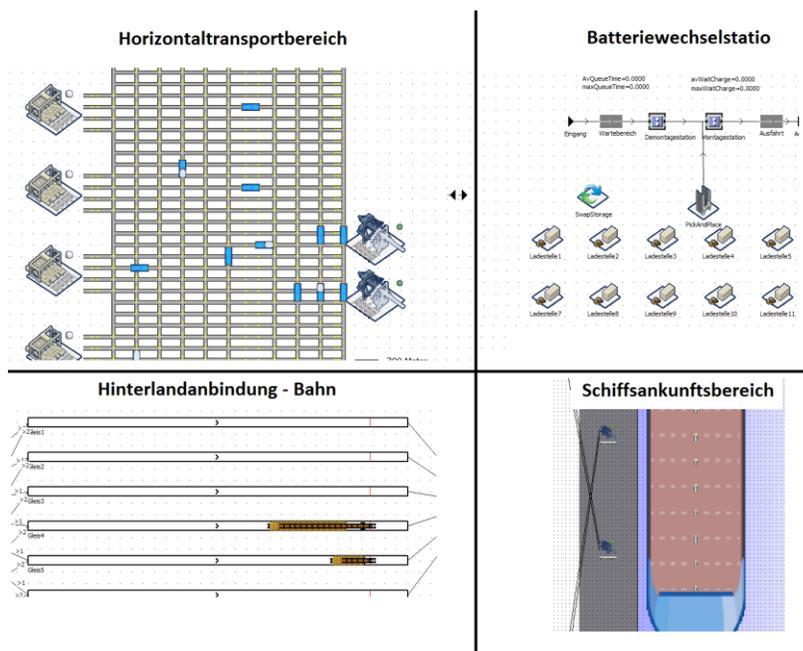


Abbildung 66: Screenshots der CTA-Simulation implementiert in Plant Simulation

8.1.2 Energieverbrauchsdaten

Um eine simulationsbasierte Prognose des Energieverbrauchs im CTA durchzuführen, müssen die Leistungsaufnahmen und Bearbeitungszeiten der unterschiedlichen Containerumschlagsgeräte im Terminal definiert werden. Im folgenden Abschnitt wird beschrieben, wie die benötigten Leistungsaufnahmewerte und Umschlagszeiten im Rahmen dieser Arbeit ermittelt wurden. Alle in dem Kapitel aufgeführten Werte entsprechen nicht den im Rahmen des Feldtests ermittelten Werte, sondern sie wurden absichtlich nach oben verfälscht. Dies geschieht zur Wahrung der Betriebsgeheimnisse.

8 Evaluierung

Zur Bestimmung der Leistungsaufnahmewerte von Containerbrücken und Portalkränen wurden über einen Zeitraum von mehreren Wochen die Containerumschläge einzelner Kräne überwacht und die Anzahl der umgeschlagenen Container sowie die dabei verrichtete elektrische Arbeit stundenweise erfasst. Zusätzlich wurde die Anzahl der umgeschlagenen TEU und der prozentuale Anteil der Leergut-, OOG-, IMO- und Kühlcontainer am Gesamtcontainerumschlag aufgezeichnet. Als letzte relevante Komponente wurde der Schiffstyp erfasst, von welchem Container in der betreffenden Stunde umgeschlagen wurden. Hierbei wurde zwischen den Schiffstypen Seeschiff, Feeder und Kahn unterschieden. Ein exemplarischer Auszug der aufgezeichneten Werte einer Containerbrücke ist der Tabelle 12 zu entnehmen.

Tabelle 12: Format der aufgezeichneten Containerumschläge einer Containerbrücke.

Zeit	Schiffstyp	Box	TEU	kWh	Leeranteil	Anteil OOG	Anteil IMO	Anteil Reefer
10.06.2014 11 Uhr	Seeschiff	12	18	56,366	50	0	0	5
10.06.2014 12 Uhr	Seeschiff	33	33	120,829	84,8	0	0	0
10.06.2014 13 Uhr	Seeschiff	23	42	89,798	8,7	0	0	15
...

(Die hier aufgezeigten Werte dienen lediglich der Veranschaulichung und entsprechen nicht den tatsächlich aufgezeichneten Werten).

Bei einem Containerumschlag einer Containerbrücke ist davon auszugehen, dass sämtliche Ressourcen des Krans eingeschaltet sind und eine elektrische Leistungsaufnahme in Form einer Basislast erzeugen. Zusätzlich wird während des Umschlags eines Containers zusätzliche Prozesslast bezogen, welche benötigt wird, einen Container zu bewegen. Zusammenfassend setzt sich die elektrische Leistungsaufnahme also aus einer Grundlast α_0 und einer Prozesslast α_1 zusammen. Die aufgezeichneten Daten beinhalten die verrichtete elektrische Arbeit pro Stunde sowie die Anzahl der im selben Zeitraum umgeschlagenen Container. In einem ersten Schritt gilt es, die Grundlast in kWh und die zu verrichtende elektrische Arbeit zum Umschlag eines Containers zu bestimmen. Hierzu wird die benötigte elektrische Arbeit $f(x)$ für den Umschlag eines Containers als lineare Funktion

$$f(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x$$

definiert, wobei α_0 die Grundlast in kWh und α_1 die benötigte elektrische Arbeit zum Umschlag eines Containers darstellt. Die Variable x gibt die Anzahl der im Zeitraum t umgeschlagenen Container an. Es gilt nun eine Approximation der linearen Funktion $f(x)$ zu finden, bei welcher der Abstand zum jeweils gemessenen Energieverbrauch möglichst gering ist. Hierzu wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet, wobei die unbekannt Parameter

α_0 und α_1 der Funktion $f(x)$ gesucht werden. Hierbei handelt es sich um ein mathematisches Standardverfahren zur Ausgleichsrechnung, bei welcher zu einer Datenpunktwolke eine Funktion gesucht wird, welche möglichst nahe an den Datenpunkten verläuft. Es gilt:

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

und

$$\alpha_0 = \bar{y} - \alpha_1 \bar{x}$$

,wobei \bar{x} das arithmetische Mittel der verrichteten Containerumschläge pro Stunde bezeichnet und \bar{y} das arithmetische Mittel der dabei verrichteten elektrischen Arbeit. Es gilt:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \text{ und } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

Abbildung 67 zeigt exemplarisch den Energieverbrauch einer Containerbrücke in Abhängigkeit der getätigten Containerumschläge innerhalb einer Stunde. Der X-Achse ist die Summe der getätigten Umschläge einer Stunde zu entnehmen und der Y-Achse die dabei verrichtete elektrische Arbeit. Die Modellfunktion repräsentiert die approximierte Funktion $f(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x$ mit den Parametern $\alpha_0 = 89 \text{ kWh}$ und $\alpha_1 = 3,11 \text{ kWh}$, welche durch Anwendung der Methode der Kleinsten Quadrate bestimmt wurden. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass es sich bei der verwendeten Methode um eine Annäherung an die realen Verbrauchswerte handelt. Die tatsächliche Grundlast und Prozesslast kann von den hier bestimmten Werten abweichen. Die Grundlast einer Containerbrücke, wobei sämtliche Ressourcen eingeschaltet sind, beträgt also 89 kW. Für jeden zusätzlich umgeschlagenen Container werden 3,11 kWh benötigt. Die benötigte elektrische Leistungsaufnahme zum Umschlag eines Containers kann nun in Abhängigkeit der Zeit berechnet werden.

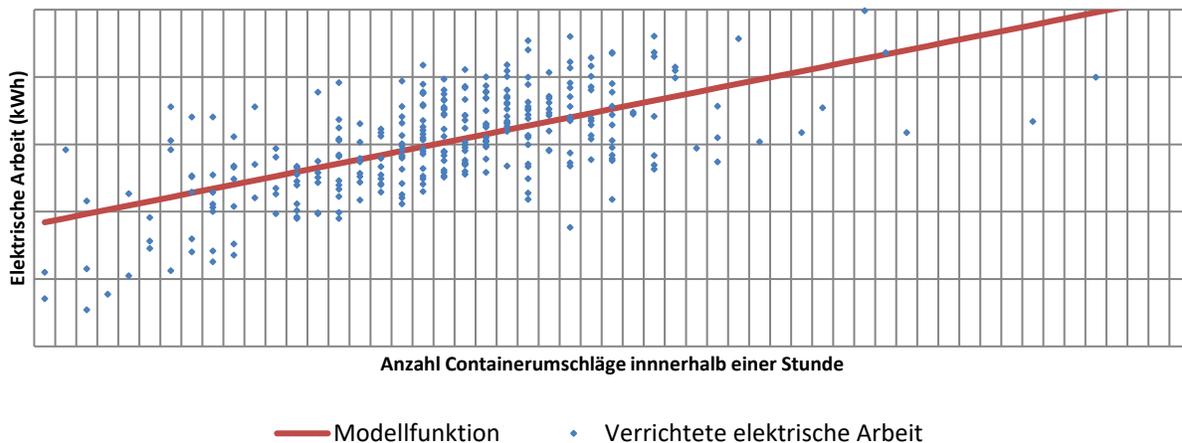


Abbildung 67: Stündlicher Energieverbrauch einer Containerbrücke in Abhängigkeit der Containerumschläge

Auffallend ist, dass es Stunden gibt, in welchen die verrichtete elektrische Arbeit unterhalb des Basisverbrauchs liegt (siehe Anzahl der Containerumschläge zwischen 1 und 10). Dies kann dadurch erklärt werden, dass nicht sämtliche Verbrauchsgruppen einer Containerbrücke über den gesamten Zeitraum eingeschaltet waren. So ist es wahrscheinlich, dass die Containerbrücke in den betreffenden Stunden nach Beendigung der Containerumschläge in einen anderen Betriebszustand versetzt wurde und bestimmte Verbrauchsgruppen deaktiviert wurden oder die Containerbrücke komplett abgeschaltet wurde. Auf Grundlage der Gesamtleistungsaufnahme kann nun die anteilige Leistungsaufnahme der einzelnen Verbrauchsgruppen bestimmt werden. Das hier aufgeführte Verfahren wurde auch angewendet, um die Leistungsaufnahme eines Containerumschlags differenziert nach den Schiffstypen Seeschiff, Feeder und Kahn zu bestimmen. Es wurden jedoch keine signifikanten Unterschiede festgestellt, weshalb für jeden Schiffstyp die gleiche Energiemenge zum Umschlag eines Containers angenommen wird. Tabelle 2 zeigt den prozentualen Anteil der einzelnen Verbraucher am Gesamtverbrauch sowie die berechnete Leistungsaufnahme, welche bezogen wird, solange der entsprechende Verbraucher eingeschaltet ist. Der prozentuale Anteil der einzelnen Verbraucher am Gesamtverbrauch wurde dabei der von (Johanson 2010) veröffentlichten Studie zur Leistungsaufnahme von Containerbrücken entnommen.

Tabelle 13: Leistungsaufnahme der einzelnen Verbraucher einer Containerbrücke

Zeit	Prozentualer Anteil an Basisleistungs- aufnahme	Leistungsaufnahme bei eingeschaltetem Verbraucher
Umgebungsbeleuchtung	12,3 %	20,95 kW
Flutlichtbeleuchtung	43,9 %	49,01 kW
Hydrauliksystem	26,3 %	33,41 kW
Motorkühlung	17,5 %	25,58 kW
Kumuliert	100 %	129 kW

Die Methode der kleinsten Quadrate wurde ebenfalls angewendet, um die Basis- und Prozesslast der Blocklagerkräne und der Bahnkräne zu bestimmen. Tabelle 14 zeigt die Ergebnisse für die unterschiedlichen Krantypen, wobei α_0 die Basislast und α_1 die benötigte elektrische Arbeit für den Umschlag eines Containers darstellt.

Tabelle 14: Approximierte Werte für α_0 und α_1 für Portalkräne und Containerbrücken

	Containerbrücken	Blocklagerkran klein	Blocklagerkran Groß	Bahnkran
α_0	99,00 kW	53,61 kW	54,28 kW	36,30 kW
α_1	4,11 kWh	2,50 kWh	2,41 kWh	3,17 kWh

Zur Bestimmung der Umschlagszeiten einer Containerbrücke wurden die tatsächlich benötigten Umschlagszeiten pro Container erfasst. Zusätzlich wurden die Verkehrsrichtung (Importcontainer oder Exportcontainer), das Leer-Voll-Merkmal und die Größe des Containers aufgezeichnet. Tabelle 15 zeigt exemplarisch einen Auszug der aufgezeichneten Daten. Da es sich bei den im Container-Terminal Altenwerder verwendeten Containerbrücken um Zwei-Katz-Kräne handelt, wurden die Umschlagszeiten der Hauptkatze (HK) und der Portalkatze (PK) einzeln erfasst. Nicht erfasst wurden eventuell notwendige Umstapler von Containern zum Erreichen des Zielcontainers durch die Containerbrücke. In den erfassten Zeiten sind diese somit bereits enthalten.

8 Evaluierung

Tabelle 15: Beispieldatensatz aufgezeichneter Containerumschlagszeiten einer Containerbrücke.

Zeit	Verkehrsrichtung	Leer—Voll-Merkmal	Größe	Umschlagszeit HK	Umschlagszeit PK
10.06.2014 11 Uhr	Import	Voll	20	01:53	1:45
10.06.2014 11 Uhr	Import	Leer	40	1:41	1:34
10.06.2014 12 Uhr	Export	Voll	40	1:58	1:46
...

(Die hier aufgezeigten Werte dienen lediglich der Veranschaulichung und entsprechen nicht den tatsächlich aufgezeichneten Werten).

Auf Grundlage dieser Daten konnten Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die benötigte Zeit eines Containerumschlags generiert werden. Gemäß dem in Abschnitt 7.4.2.1 beschriebenen Vorgehen wurden die Umschlagszeiten in Klassen von je 5 Sekunden eingeteilt und deren Häufigkeit bestimmt. Hierbei wurde wie auch bei der Bestimmung der Energieverbräuche zwischen den Schiffstypen Seeschiff, Feeder und Kahn unterschieden, wobei signifikante Unterschiede der benötigten Zeit festgestellt wurden. Abbildung 68 zeigt exemplarisch die ermittelte Häufigkeitsverteilung für den Umschlag eines Containers durch die Hauptkatze an einem Seeschiff. Gut zu erkennen ist die Häufung der Umschlagszeit zwischen 80 und 120 Sekunden. Weiter können viele Containerbewegungen beobachtet werden, welche eine wesentlich größere Zeit zur Durchführung benötigt haben. Würde an diesem Beispiel lediglich die durchschnittliche benötigte Zeit eines Containerumschlags in der Simulation genutzt werden, würden diese „Ausreißer“ die Zeit erheblich beeinflussen. So liegt diese bei 117 Sekunden für das gezeigte Beispiel, wodurch im Durchschnitt ein wesentlich längerer Zeitraum für den Umschlag eines Containers benötigt würde. Extreme Ausreißer wie z.B. 380 Sekunden können z.B. durch verkeilte Container entstehen, welche zuvor von der Bordbesatzung aufgelöst werden müssen oder aber auch durch eine schlechte Stauplanung, wodurch viele Umstapler innerhalb des Schiffes notwendig waren.

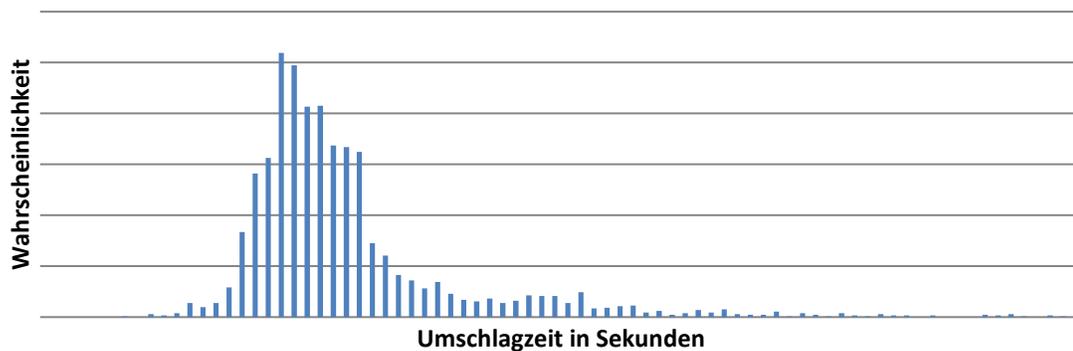


Abbildung 68: Beispiel einer Häufigkeitsverteilung der benötigten Umschlagszeit von einem Container durch eine Containerbrücke bei einem Seeschiff

8.1.3 An und Abtransport der Container in der Hinterlandanbindung

Gemäß dem in Abschnitt 7.4.4 vorgestellten Verfahren wird zur Generierung der Containerankünfte per LKW ein Vergleichstagverfahren eingesetzt. Insgesamt wurden 40 unterschiedliche Ausprägungen des Vergleichstagverfahrens evaluiert, um eine optimale Prognose zu gewährleisten. Jeweils 20 dieser Ausprägungen verwendeten als Tagesdifferenz den Wert 1 als auch den Wert 7. Für die Tagesanzahl wurden jeweils Werte zwischen 1 und 20 verwendet. Es wurde zwischen den Anlieferungen und Abholungen von Containern unterschieden.

Bezüglich der Anlieferungen von Containern an das Terminal und der stundenweise Betrachtung ist das Verfahren VTV(7,18) aufgrund des geringsten MAEs von 18,12 am besten zu bewerten. Dies bedeutet, dass zu jeder Einzelstunde die Prognose der angelieferten Container um ca. 18 Container von der tatsächlichen Anlieferungszahl abwich. Aufgrund des positiven MPEs werden in dieser Ausprägung des Verfahrens tendenziell mehr Containeranlieferungen prognostiziert als tatsächlich angeliefert wurden. Tabelle 16 zeigt exemplarische Ergebnisse der Studie.

Tabelle 16: Auswertung des Vergleichstagverfahrens: Anlieferung (stundenweise)

Bezeichnung	MPE	MAE	MAPE	RMSE	RMSPE
VTV (1,1)	72,63%	34,40	127,23%	46,52	48,00%
VTV (1,15)	84,31%	27,80	118,54%	35,57	45,94%
VTV (7,1)	39,24%	23,75	87,53%	32,69	25,67%
VTV (7,18)	40,26%	18,12	64,94%	24,71	20,17%

8 Evaluierung

Bei der Prognose der Containerabholungen aus dem Terminal ist das VTV(7,19) mit einem MAE von 22,80 am besten zu bewerten. Auch bei den Abholungen werden tendenziell mehr Containerabholungen prognostiziert als tatsächlich ausgelagert wurden. Tabelle 17 zeigt die Ergebnisse der Studie.

Tabelle 17: Auswertung des Vergleichstagverfahrens: Auslieferungen (stundenweise)

Bezeichnung	MPE	MAE	MAPE	RMSE	RMSPE
VTV (1,1)	110,95%	39,03	164,15%	51,06	78,92%
VTV (1,15)	103,62%	32,04	140,85%	39,19	60,93%
VTV (7,1)	75,71%	30,48	120,83%	40,04	46,76%
VTV (7,19)	85,81%	22,80	110,80%	29,37	40,25%

Abbildung 69 zeigt den Zusammenhang zwischen der verwendeten Tagesanzahl der beiden Verfahren. Es ist klar erkennbar, dass mit einer steigenden Anzahl der Tagesanzahl auch der Mittlere absolute Fehler abnimmt.

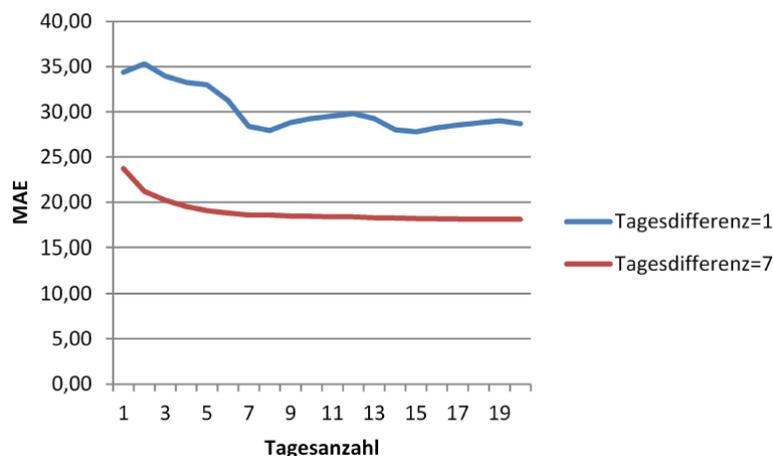


Abbildung 69: Zusammenhang zwischen MAE und der relevanten Tagesanzahl der Vergleichstagverfahren bei der Anlieferung.

Auf Grundlage der Ergebnisse der durchgeführten Studie wird ein Vergleichstagverfahren mit einer Tagesanzahl von 19 verwendet, um das landseitige Transportaufkommen zu prognostizieren. Da die Methode das stündliche Transportaufkommen prognostiziert, aber viertelstündliche Werte bei der Berechnung der Gesamtleistungsaufnahme benötigt werden, wird der prognostizierte Wert durch vier geteilt. Hierdurch ergibt sich die Anzahl der viertelstündlichen

Containeranlieferungen und –abholungen. Der *TruckGenerator* generiert nun aus diesen Werten eine Transportliste für LKWs, wobei der exakte Liefertermin innerhalb einer Viertelstunde zufällig gewählt wird.

Ankünfte von Zügen sind normalerweise genauso wie die zukünftigen Schiffsankünfte bekannt, sodass hier Transportlisten genutzt werden können.

8.1.3.1 Bestimmung der Basisleistungsaufnahme

Die Basisleistungsaufnahme des Container-Terminals setzt sich aus der Grundlast des Terminals und der Leistungsaufnahme der zum Simulationsstartzeitpunkt eingelagerten Kühlcontainern zusammen. Die Implementierung einer Anbindung an das Terminal Operating System des Container-Terminals gemäß des in Abschnitt 7.4.4.3 beschriebenen Vorgehens konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht realisiert werden. Aus diesem Grunde wird zur Evaluierung eine Methode zum Schätzen der Basislast genutzt.

Hierfür wird zusätzlich zum eigentlichen Prognosetag die Leistungsaufnahme des Vortages der Simulationsausführung auf Grundlage der historischen Daten prognostiziert. Der Vortag wird daher gewählt, da zum Zeitpunkt der Simulationsausführung die Leistungsaufnahmewerte des Vortages bereits vorliegen. Auf Grundlage der historischen Leistungsaufnahme und der simulationsbasierten Leistungsaufnahme kann die Basislast kalibriert werden. Die Simulation zur Bestimmung der Basislast wird mit einem festen Wert für die Grundlast und einem festen Wert für die Anzahl der eingelagerten Kühlcontainer durchgeführt. Dabei ist eine obligatorische Über- oder Unterschätzung der Basislast zu erwarten. Nachdem die Simulationsergebnisse vorliegen, wird die Basislast so bestimmt, dass der MAPE zur Bewertung der Prognosegüte zwischen Simulation und Realsystem minimal wird. Es gilt:

$$\text{Basislast} = \min(\text{MAPE}(\text{Leistungsaufnahme} + y) | y \in] - \infty, \infty [$$

Die Simulation wird dabei mit einer Basislast von 500 kW gestartet. Dieser Wert wird nach Abschluss eines Simulationslaufs um den Wert y verändert, sodass der MAPE der Prognose minimal wird. Das Verfahren ist nicht dazu geeignet, zwischen den einzelnen Verbrauchern der Grundlast und den Verbräuchen der Kühlcontainer zu unterscheiden. Jedoch kann die Gesamthöhe der Basislast relativ gut abgeschätzt werden, da diese innerhalb weniger Tage nur leicht variiert.

8.2 Studie 1: Gesamtenergiebedarfsprognose

Im Folgenden soll die Prognosegüte bezüglich der Prognose des Gesamtenergiebedarfs bestimmt und bewertet werden. Hierzu werden auf Grundlage historischer Segellisten sowie

LKW- und Bahnlieferlisten aus den Jahren 2011 – 2013 das Terminalgeschehen simuliert und Lastgangprognosen der einzelnen Tage angefertigt. Für ein Jahr werden also jeweils 365 Simulationen durchgeführt und jeweils der Lastgang eines Tages (24 Stunden) prognostiziert.

Um die Güte der simulationsbasierten Prognoseergebnisse zu verifizieren, sollen diese mit einem etablierten Verfahren zur Lastgangprognose verglichen werden. Als Prognosemethode wird hierfür das in Abschnitt 4.2.1 beschriebene Vergleichstagverfahren genutzt.

Um die optimale Anzahl an Referenztagen zu ermitteln, wurde das Vergleichstagverfahren dazu genutzt, den Energiebedarf des Jahres 2013 zu prognostizieren. Aufgrund der Besonderheit von Feiertagen wurden diese zur Bestimmung der optimalen Anzahl von Referenztagen nicht berücksichtigt. Abzüglich der Feiertage Pfingsten, Ostern, Tag der Arbeit, Weihnachten und Neujahr wurde der Lastgang für insgesamt 353 Tage prognostiziert. Für diese Tage wurde die genutzte Tagesanzahl zur Bestimmung des Durchschnitts von 1 bis 20 iteriert und anhand des MAPE bewertet. Als Tagesdifferenz wurden sieben Tage verwendet. Hierzu wurde der durchschnittliche, der maximale und minimale MAPE der Prognosetage bestimmt. Abbildung 70 zeigt die Ergebnisse der Studie. Der durchschnittlich minimale MAPE sinkt zuerst mit der Anzahl der Referenztage. Bei der Verwendung eines Referenztages beträgt dieser 13,1 Prozent. Das Minimum von 10,4 Prozent wird bei einer Anzahl von 6 Referenztagen erreicht. Anschließend steigt der durchschnittliche MAPE leicht und pendelt sich bei einem Wert von etwa 11 Prozent ein. Ähnlich verhält sich die Entwicklung des Maximums, welches mit steigender Anzahl der Referenztage abnimmt und sein Minimum von 48,6 bei vier Referenztagen erreicht. Anschließend ist das Maximum nahezu gleichbleibend. Bei der Verwendung von 6 Referenztagen wird ein Maximum von 48,9 Prozent erreicht. Das Minimum schwankt um den Wert drei und weist keinen eindeutigen Trend auf. Die ebenfalls mit der Anzahl der Referenztage sinkende Standardabweichung hat einen maximalen Wert von 9,3 Prozent bei der Verwendung eines Referenztages und einen Wert von 6,7 bei der Nutzung von 6 Referenztagen. Die insgesamt niedrige Varianz weist darauf hin, dass es sich bei den Maxima um Ausreißer handelt und der MAPE insgesamt um etwa um 69 Prozent um den Wert 10,4 Prozent schwankt.

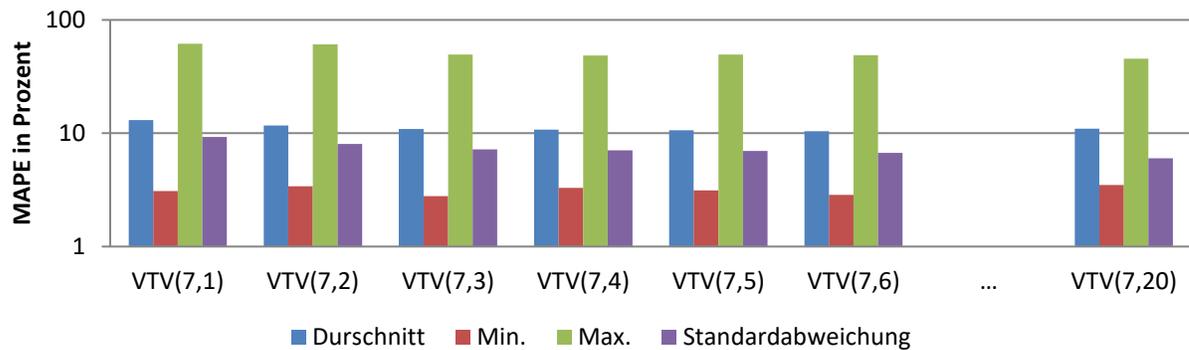


Abbildung 70: MAPE für die Lastprognose des Jahres 2013 durch das Vergleichstagverfahren (7,t)

Auf Grundlage der Untersuchung wird entschieden, dass das VTV (7,6) als Referenzverfahren eingesetzt wird, da hierbei der geringste durchschnittliche MAPE-Wert erreicht wird. Bei der Prognose des Lastverlaufs an Feiertagen greift das Verfahren auf entsprechende historische Messdaten von Feiertage zurück.

8.2.1 Gesamtenergiebedarfsprognose 2013

Für das Jahr 2013 wurde für insgesamt 353 Tage der Lastverlauf simulationsbasiert und durch die Nutzung des Vergleichstagverfahrens (7,6) prognostiziert. Feiertage wurden in diesem ersten Evaluationsschritt nicht berücksichtigt. Als Grundlage der Simulation dienten die historischen Schiffsankunftszeiten sowie die geplanten Zeiten für den Beginn der Beladevorgänge an einem Schiff. Für die Anlieferungen und Abholungen von Containern per Bahn standen ebenfalls die historischen Ankunftszeiten zur Verfügung. Da für die Anlieferungen der Container durch LKW keine Vorhersagelisten existieren, wird zur Prognose der LKW Ankünfte ein Vergleichstagverfahren verwendet, welches die Ankünfte auf Grundlage der historischen Daten bestimmt.

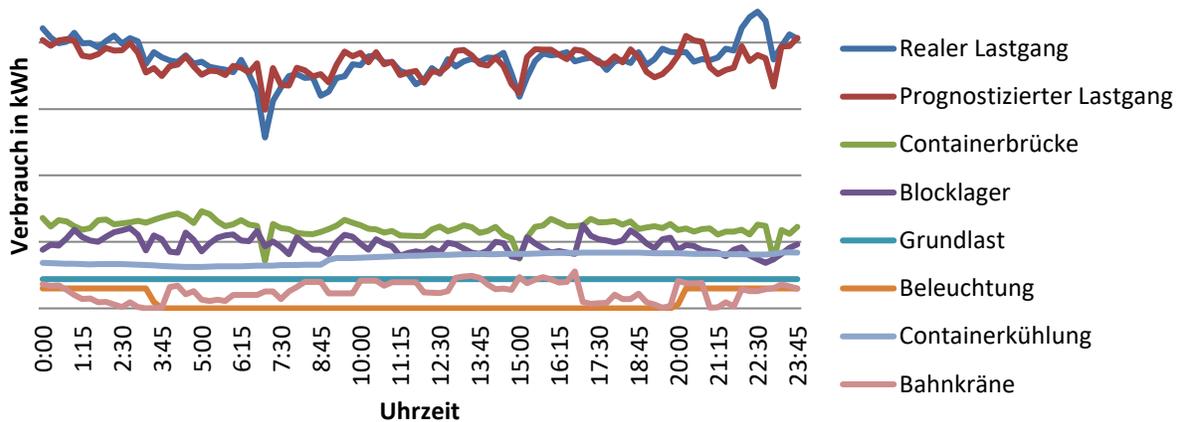


Abbildung 71: Beispiel einer Lastgangprognose

Das simulationsbasierte Verfahren generiert auf Grundlage der prognostizierten Logistikvorgänge den Energieverbrauch der einzelnen Verbraucher. Die aggregierte Leistungsaufnahme aller Verbraucher ergibt die Gesamtleistungsaufnahme. Abbildung 71 zeigt ein exemplarisches Ergebnis einer Energiebedarfsprognose für einen Tag. Es sind die Verbräuche der einzelnen Verbrauchsgruppen sowie der prognostizierte Gesamtlastverlauf (rot) zu erkennen. Zusätzlich wurde der tatsächliche Lastverlauf (blau) in die Grafik hinzugefügt. Die Verbräuche werden in kWh pro Viertelstunde angegeben.

Im Folgenden werden die Prognoseergebnisse in Form von Monatsergebnissen verglichen und bewertet. Dies bedeutet nicht, dass der Gesamtenergieverbrauch für jeweils einen kompletten Monat prognostiziert wurde, sondern für jeden Tag des Monats eine einzelne Lastgangprognose durchgeführt wurde. Die Monatsergebnisse geben also den Durchschnitt der einzelnen Lastgangprognosen für jeden einzelnen Tag des Monats an. Es ist anzumerken, dass im Rahmen dieser Studie keine Batteriefahrzeuge und BWS simuliert werden, da diese in den Jahren 2011 – 2013 noch nicht im operativen Betrieb beteiligt waren. Eine Studie, welche Batteriefahrzeuge berücksichtigt, wird in Abschnitt 8.3 durchgeführt.

Der Vergleich zwischen der simulationsbasierten Vorhersage und dem durch das Vergleichstagverfahren erzeugten Lastgang fällt eindeutig zu Gunsten der simulationsbasierten Methode aus. Die Prognose des Logistikgeschehens und der darauf aufbauenden Energiebedarfsprognose erzielt ein besseres Ergebnis als das einfache Fortschreiben von Vergangenheitswerten. Abbildung 72 stützt diese Aussage mit der Gegenüberstellung der MAPE-Werte der Monate Januar bis Dezember. Der prognostizierte Lastgang durch die Nutzung der Simulationsmethode erzielt für jeden Monat ein durchschnittlich besseres Ergebnis als das Vergleichstagverfahren

(7,6). Der durchschnittliche Wert des MAPE liegt im gesamten Jahr bei etwa 8,4 für die simulationsbasierte Methode und bei ca. 10,4 für das Vergleichstagverfahren.

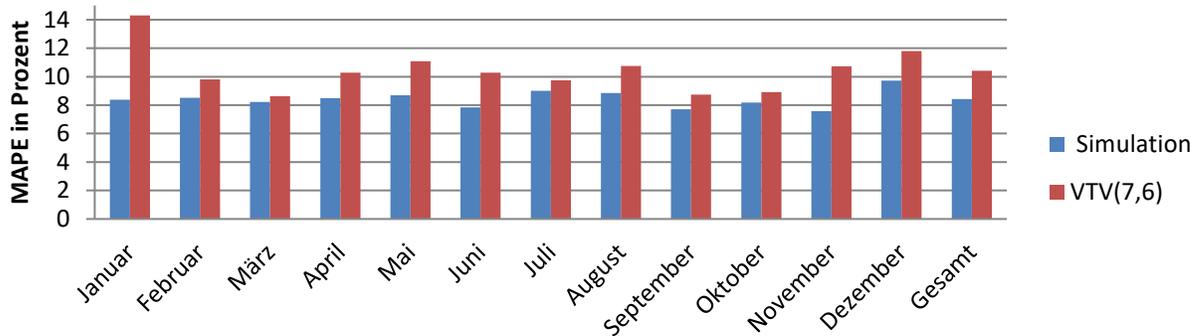


Abbildung 72: Durchschnittlicher MAPE des Gesamtlastverlaufs durch Simulation - 2013

Liegen die durchschnittlichen Werte des MAPE zwischen Vergleichstagverfahren und Simulation noch nahe beieinander, liegt der maximale MAPE des Vergleichstagverfahrens wesentlich höher als der des simulationsbasierten Verfahrens. Dies lässt auf eine wesentlich größere Standardabweichung beim Vergleichstagverfahren schließen. Der maximale MAPE bei der Bewertung eines Einzeltages durch Simulation wird im August erreicht und liegt bei 26,1 Prozent. Der maximale MAPE des Vergleichstagverfahrens liegt hingegen bei 48,9 und ist damit fast doppelt so hoch. Abbildung 73 zeigt die maximal erreichten Werte des MAPE für die Monate Januar bis Februar.

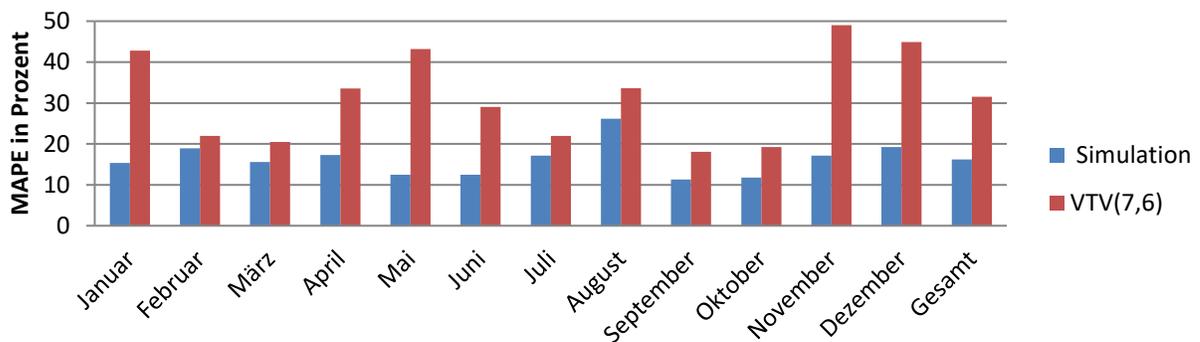


Abbildung 73: Maximaler MAPE des Gesamtlastverlaufs durch Simulation - 2013

Da der durchschnittliche MAPE sowie auch der maximale MAPE der Simulationsergebnisse in jedem Monat niedriger ist als die Werte des Vergleichstagverfahrens, ist es auffallend, dass

8 Evaluierung

bei der Betrachtung des minimalen MAPE pro Monat durchweg das Vergleichstagverfahren bessere Ergebnisse erzielt. Lediglich im Monat Januar trifft dieser Fall nicht ein. Abbildung 74 zeigt den minimalen MAPE der Monate Januar bis Dezember sowie den Gesamtdurchschnitt.

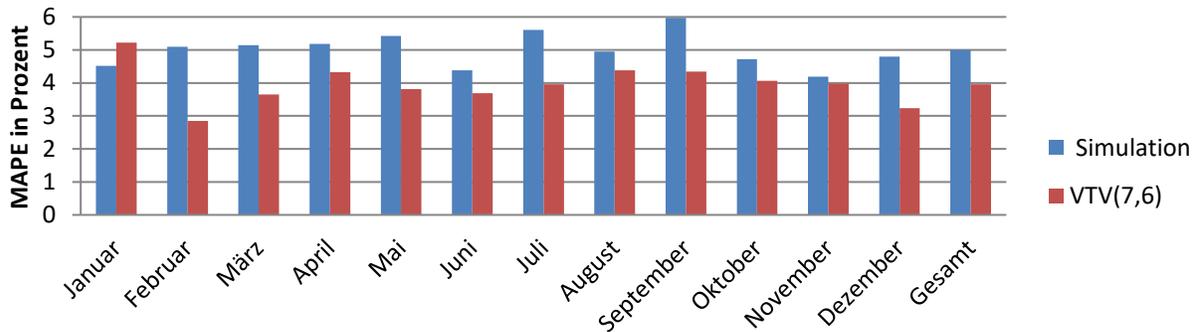


Abbildung 74: Minimaler MAPE des Gesamtlastverlaufs durch Simulation und VTV (7,6) – 2013

Ebenfalls bessere Ergebnisse als das Vergleichstagverfahren erzielte die simulationsbasierte Prognose im Bereich der Vorhersage der Wendepunkte des Lastgangs. Im Mittel wurden 52% der Wendepunkte durch das simulationsbasierte Verfahren korrekt vorhergesagt, während durch das Vergleichstagverfahren lediglich 14% der Wendepunkte korrekt prognostiziert wurden. Abbildung 75 vergleicht die Determinationskoeffizienten der beiden Verfahren für die Monate Januar bis Dezember.

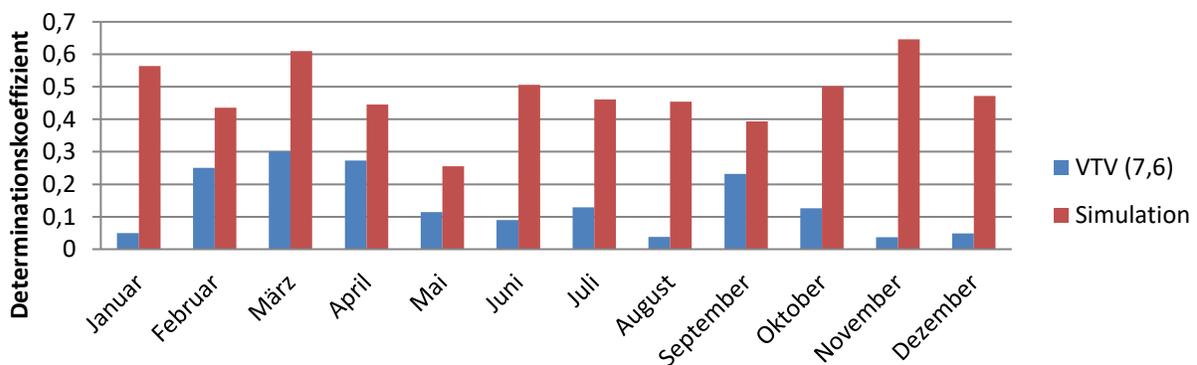


Abbildung 75: Vergleich des Determinationskoeffizienten für die Monate Januar bis Dezember des Jahres 2013

Zuletzt werden die simulierten Schiffsabfertigungszeiten mit den tatsächlichen Schiffsabfertigungszeiten verglichen. Dabei werden die Abweichungen der benötigten Zeiten für die Be- und Entladung eines Containerschiffes zwischen realem und simuliertem Logistikgeschehen

verglichen. Eine Abweichung kann dabei sowohl positiv als auch negativ sein. Eine negative Abweichung bedeutet, dass ein Schiff in der Simulation schneller be- und entladen wurde als dies in der Realität der Fall war. Eine positive Abweichung hingegen bedeutet, dass in der Simulation die Be- und Entladung eines Schiffes schneller als in der Realität durchgeführt wurde. Abbildung 76 zeigt die durchschnittlichen, maximalen und minimalen Abweichungen der Schiffsabfertigungszeiten für die Monate Januar bis Dezember.

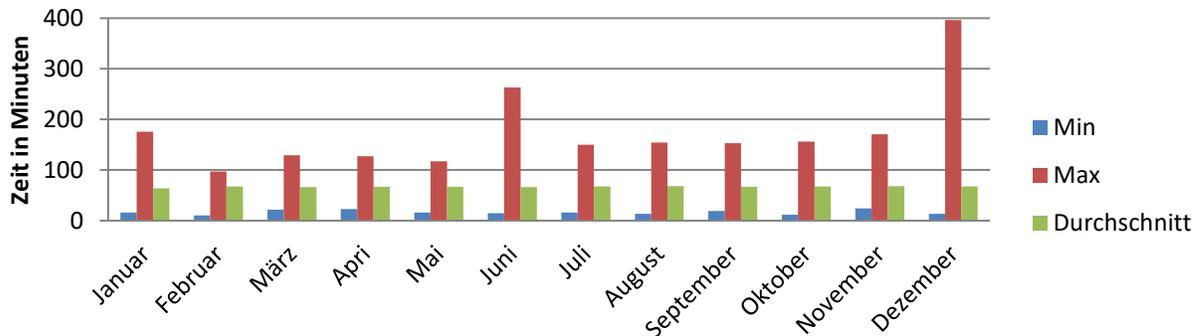


Abbildung 76: Durchschnittliche Abweichung zwischen realen und simulierten Schiffsabfertigungszeiten

Die durchschnittliche Abweichung zwischen prognostizierten und realen Schiffsabfertigungszeiten liegt bei 67 Minuten. Es fällt auf, dass eine hohe Abweichung bei der Be- und Entladung eines Schiffes nicht automatisch auf eine schlechte Lastgangprognose bedeutet. So wäre im Dezember aufgrund einer maximalen Abweichung von 396 Minuten auch mit einer entsprechend schlechten Prognose zu rechnen. Betrachtet man jedoch den maximalen MAPE des Monats Dezember, liegt dieser bei 16,2 Prozent und somit nicht höher als in Monaten mit niedrigen maximalen Abweichungen bei der Schiffsabfertigungszeit. Tatsächlich ist der Lastgang an dem entsprechenden Tag (7. Dezember) mit einem MAPE von 6,2 gut prognostiziert worden, obwohl für die Beladung eines Schiffes in der Simulation 396 Minuten länger als im Realsystem benötigt wurde. Allerdings handelte es sich dabei um einen Feeder, welcher keine Containerbrücke zugewiesen bekommen hat, da diese bereits vollständig mit Aufträgen belegt waren. Der Feeder hatte nur wenige Container geladen, wodurch der Einfluss auf den Gesamtlastgang minimal war. Abweichungen zwischen prognostizierten und realen Schiffsabfertigungszeiten haben also nicht automatisch einen Einfluss auf den Gesamtlastgang. Einen signifikanten Einfluss auf den Gesamtlastgang hat also nur, wenn an dem entsprechenden Schiff auch eine gewisse Anzahl an Container umgeschlagen werden soll. Dies ist eine wichtige Erkenntnis für die Auswirkungen von verspäteten Ankünften von Schiffen im Terminal auf die Prognose des Gesamtlastgangs. Schiffsverspätungen von kleinen Schiffen, deren prognostizierte Ankunftszeit im Hafen oft von der realen Ankunftszeit abweicht, haben nur einen klei-

nen Einfluss auf die Gesamtlastgangprognose. Schiffverspätungen von großen Containerschiffen haben so einen wesentlich signifikanteren Einfluss auf die Lastgangprognose, wobei die Schiffsankunftszeit von Seeschiffen wesentlich besser prognostiziert wird als dies bei Feeder-schiffen und Kähnen der Fall ist. Eine genauere Untersuchung dieses Phänomens hierzu findet in Abschnitt 8.2.4 statt.

8.2.2 Prognoseauswertung der Jahre 2011 bis 2013

Im folgenden Experiment wurde die Stichprobe erhöht und der Lastgang tagesweise für die Jahre 2011 bis 2013 prognostiziert. Feiertage wurden hierbei nicht berücksichtigt. In allen Jahren hat die simulationsbasierte Lastgangvorhersage bessere Prognoseergebnisse erzielt als das Vergleichstagverfahren. Abbildung 77 zeigt die MAPE-Werte und den Determinationskoeffizienten R^2 für die Jahre 2011 bis 2013. Eine Beobachtung ist, dass die Prognoseergebnisse für die Jahre 2012 und 2011 einen höheren MAPE-Wert besitzen als die Lastgangprognose des Jahres 2013. Deutlich besser abgeschnitten als das Vergleichstagverfahren hat die Simulation bei der Prognose der Wendepunktfehler. Die Simulation prognostiziert zwischen 41 und 53 Prozent der Vorzeichenwechsel des Lastgangs korrekt, während durch das Vergleichstagverfahren lediglich 14 bis 22 Prozent korrekt vorhersagt werden.

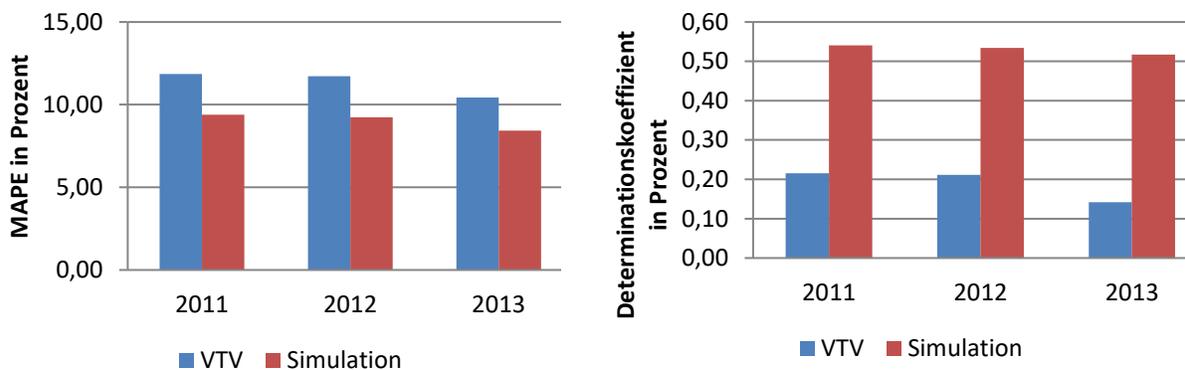


Abbildung 77: MAPE und Determinationskoeffizient der Jahre 2011 bis 2013

Abbildung 78 zeigt die Gütemaße MPE und RMSPE für die Jahre 2011 bis 2013. Auch bei Bewertung diese Kennzahlen erzielt das simulationsbasierte Verfahren bessere Ergebnisse als das Vergleichstagverfahren.

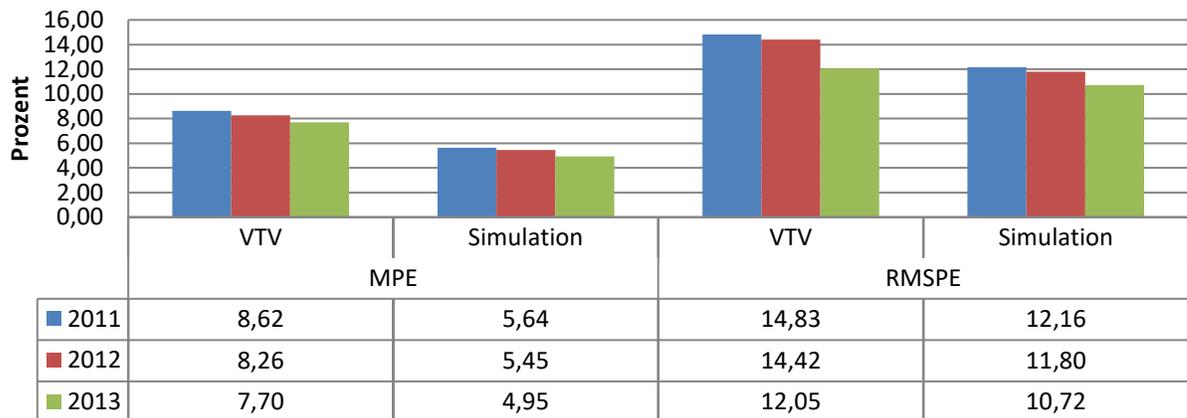


Abbildung 78: MPE und RMSPE für die Jahre 2011 bis 2013

Bei der Auswertung der Gütemaße MAE und RMSE fällt auf, dass durchaus eine Abweichung vom tatsächlichen Lastgang bei beiden Verfahren gibt. Da der BIAS bei beiden Verfahren nahezu bei 0 liegt, kann davon ausgegangen werden, dass keine systematische Unter- oder Überschreitung der Werte vorliegt. Der durchschnittlich höhere RMSE im Vergleich zum MAE des entsprechenden Jahres deutet auf Ausreißer in den Prognosewerten hin, welche stark von den Durchschnittswerten abweichen. Somit wird gleichverteilt eine zu geringer bzw. ein zu hoher Energieverbrauch prognostiziert. Abbildung 79 zeigt den MAE und RMSE für die Jahre 2011 bis 2013.

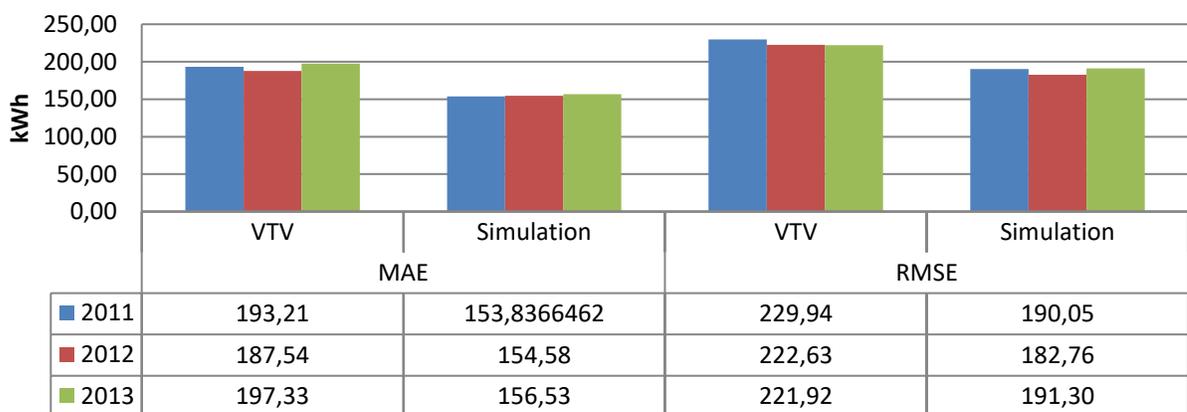


Abbildung 79: MAE und RMSE für die Jahre 2011 bis 2013

Zuletzt wurde der prognostizierte Gesamtverbrauch der einzelnen Jahre mit dem realen Verbrauch verglichen. Gemäß des BIAS nahe 0 fällt auch die prozentuale Abweichung bei beiden

Verfahren sehr niedrig aus. Abbildung 80 zeigt die prozentuale Abweichung zwischen prognostiziertem Gesamtenergieverbrauch und dem realen Energieverbrauch.

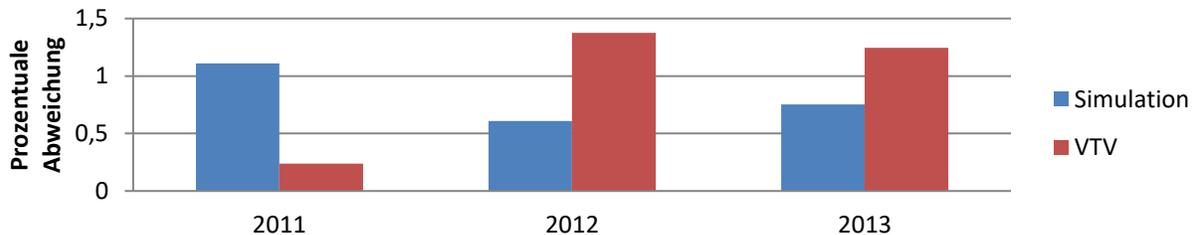


Abbildung 80: Prozentuale Abweichung zwischen prognostiziertem Gesamtverbrauch des Jahres und den realen Werten in Prozent

Sowohl das Vergleichstagverfahren als auch die simulationsbasierte Prognose erzielen sehr gute Ergebnisse mit einer maximalen Abweichung von unter 1,5 Prozent.

8.2.3 Prognose des Energieverbrauchs von Feiertagen

In den vorangegangenen Untersuchungen wurde die Prognose des Energiebedarfs an Feiertagen nicht berücksichtigt. Dies wird im nun folgenden Abschnitt geschehen.

Die Prognose des Energiebedarfs an Feiertagen stellt besondere Anforderungen an die Vorhersage. An Feiertagen werden keine Container umgeschlagen und sämtliche nicht erforderlichen Arbeiten im Terminal eingestellt. Es kann durchaus vorkommen, dass sich Containerschiffe über Feiertage im Terminal befinden. An diesen Schiffen werden jedoch keine Container umgeschlagen. Die Arbeiten stoppen zu einem fest definierten Zeitpunkt, nämlich dann, wenn die letzte Arbeitsschicht die Arbeit einstellt. Es kann auch vorkommen, dass Containerschiffe während eines Feiertages das Terminal erreichen und an der Kaimauer festmachen. In diesem Fall wird jedoch nicht sofort mit der Entladung der Container begonnen, sondern erst dann, wenn der Terminal seinen offiziellen Betrieb wieder aufnimmt. Dies geschieht mit dem Eintreffen der ersten Arbeitsschicht nach einem Feiertag. Diese Besonderheiten haben große Auswirkungen auf den Energiebedarf. Aufgrund der wegfallenden Containerumschläge, die den Hauptanteil des Energieverbrauchs ausmachen, ist der Lastverlauf sehr gleichmäßig. Abbildung 81 zeigt den Lastverlauf an Neujahr für die Jahre 2011, 2012 und 2013. Zu erkennen ist der sehr gleichmäßige Energieverbrauch, sobald die letzte Schicht vor oder an dem Feiertag endet.

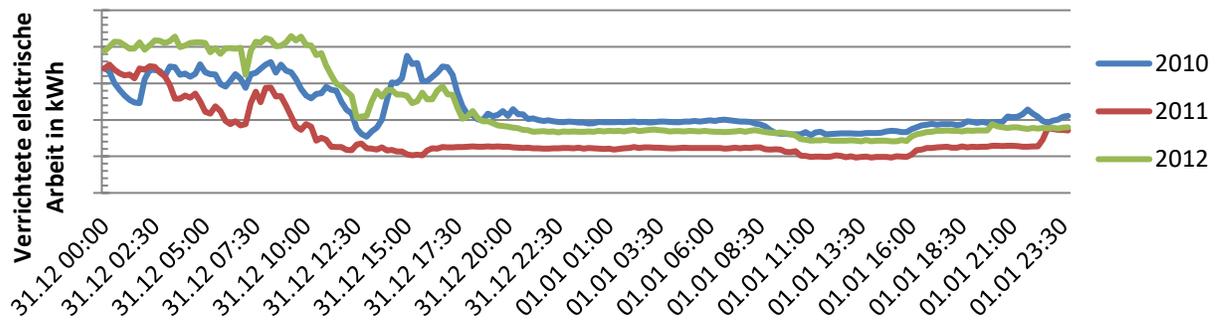


Abbildung 81: Lastverläufe des CTA Neujahr in den Jahren 2010 bis 2012

Im Folgenden wurde der Logistikbetrieb und der daraus resultierende Energiebedarf für Feiertage aus den Jahren 2011 bis 2013 prognostiziert. Relevante Feiertage im Terminal Altenwerder sind Neujahr, Ostern, Tag der Arbeit, Pfingsten und Weihnachten. Dies sind die einzigen Tage im Terminal, an denen nicht notwendige Arbeiten eingestellt werden. Die Feiertage an Neujahr wurden hierbei nicht berücksichtigt, da für das Jahr 2010 keine Segellisten vorlagen. Da die Zeiten der Arbeitspause nicht absolut mit den kalendarischen Zeiten der Feiertage übereinstimmen, gibt Tabelle 18 einen Überblick über die Feiertage der Jahre 2011, 2012 und 2013. Für die hier angegebenen Zeiträume wurden die Containerumschläge jeweils um 15 Uhr (Ende der zweiten Arbeitsschicht) eingestellt. Ein Vergleich der Prognosegüte findet wiederum mit einem Vergleichstagverfahren statt. Jedoch wurde als Referenz nicht der Durchschnittslastgang der vergangenen Tage genutzt, sondern der Energieverbrauch des entsprechenden Feiertags von einem Jahr zuvor.

Tabelle 18: Feiertage im Container-Terminal Altenwerder in den Jahren 2011 bis 2013

Feiertag	2011	2012	2013
Neujahr	31.12.2010 – 01.01.2011	31.12.2011 – 01.01.2012	31.12.2012 – 01.01.2013
Ostern	23.04.2011 – 24.04.2011	07.04.2012 – 08.04.2012	30.03.2013 – 31.03.2013
Tag der Arbeit	30.04.2011 – 01.05.2011	30.04.2012 – 01.05.2012	30.04.2013 – 01.05.2013
Pfingsten	11.06.2011 – 12.06.2011	26.05.2012 – 27.05.2012	18.05.2013 – 20.05.2013
Weihnachten	24.12.2011 – 26.12.2011	24.12.2012 – 26.12.2012	24.12.2013 – 26.12.2013

Abbildung 82 zeigt die Prognosegüte in Form der Mittleren absoluten prozentualen Abweichung (MAPE). Es ist zu erkennen, dass die Prognosegüte im Vergleich zur Prognose eines normalen Arbeitstages schlechter ausfällt. Dies trifft auf die Prognose mittels Vergleichstagverfahren ebenso zu wie auf die simulationsbasierte Prognose des Energiebedarfs.

8 Evaluierung

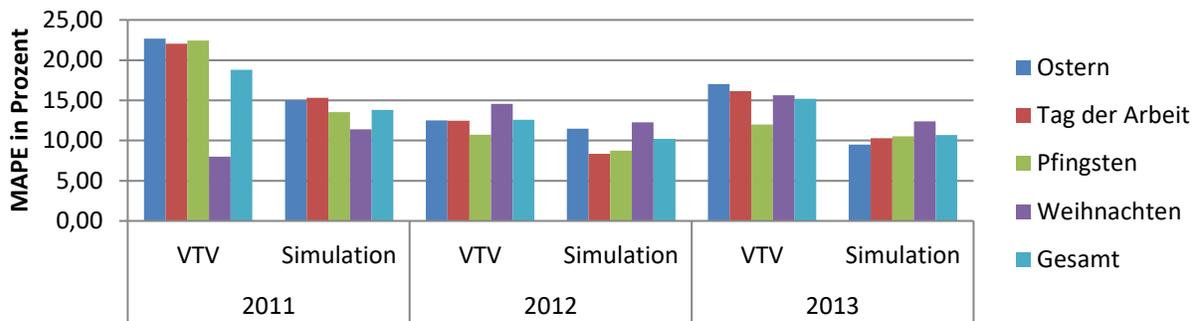


Abbildung 82: Vergleich des MAPE zwischen VTV und simulationsbasierter Prognose für Feiertage der Jahre 2011 bis 2013

Die simulationsbasierte Lastgangprognose erzielt mit einer durchschnittlichen Abweichung von ca. 10 Prozent bessere Ergebnisse als das Vergleichstagverfahren, dessen durchschnittliche Abweichung bei ca. 15 Prozent liegt. Interessant ist, dass die simulationsbasierte Prognose im Jahr 2011 deutlich schlechtere Ergebnisse liefert als für die Jahre 2012 und 2013. Dies ist dadurch zu erklären, dass in diesem Jahr die Arbeiten im Terminal nicht gegen 15 Uhr eingestellt wurden. Teilweise wurden die Arbeiten bereits wesentlich früher, teils aber auch wesentlich später eingestellt. Das Prognoseergebnis könnte an dieser Stelle deutlich verbessert werden, wenn die Planzeiten der einzelnen Schichten in die Simulation einfließen. Dies kann durch einen zusätzlichen Parameter realisiert werden, welcher die exakte Uhrzeit angibt, zu welchem sämtliche Arbeiten im Terminal eingestellt werden.

Die größte Schwierigkeit bei der Prognose des Energieverbrauchs an Feiertagen ist die Bestimmung der Basislast, welche sich hauptsächlich durch die Anzahl der eingelagerten Kühlcontainer ergibt. Da eine Liveanbindung ans Terminal im Rahmen dieser Arbeit nicht realisiert werden konnte, um die notwendigen Daten abzugreifen und auch keine historischen Daten hierfür zur Verfügung standen, wurde die Höhe der Basislast geschätzt. Hierbei wurde diese über- bzw. unterschätzt, wodurch die relativ hohen MAPE Werte zu erklären sind. Die Über- und Unterschätzung trifft ebenfalls bei der Verwendung des Vergleichstagverfahrens auf, wie Abbildung 81 zeigt. Abbildung 83 zeigt dies durch Darstellung der BIAS Werte.

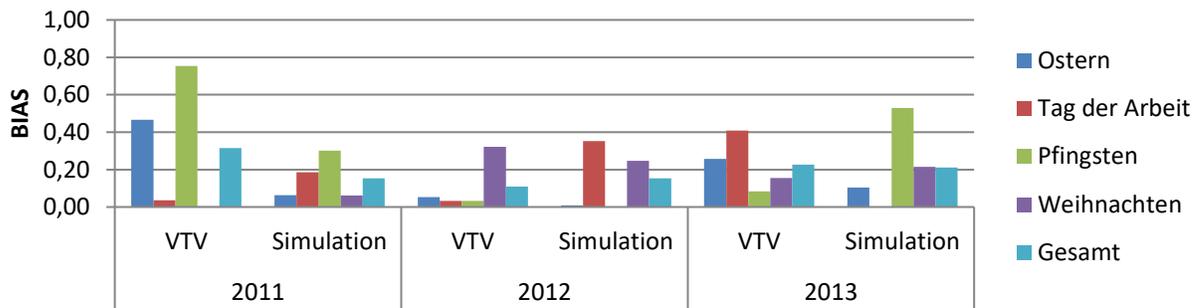


Abbildung 83: BIAS-Vergleich zwischen Simulation und Vergleichstagverfahren der Prognose von Feiertagen

Die relativ hohen BIAS-Werte im Vergleich zu den BIAS-Werten einer Lastgangprognose eines normalen Arbeitstages deuten ebenfalls auf eine systematische Unter- bzw. Überschätzung des Energiebedarfs hin. Es ist anzunehmen, dass die Vorhersage des Energiebedarfs an Feiertagen deutlich verbessert werden kann, wenn eine Anbindung ans TOS des Terminals existiert, wodurch die Basislast wesentlich genauer abgeschätzt werden kann.

Wie zu erwarten, wurden sowohl durch das Vergleichstagverfahren als auch durch die simulationsbasierte Lastgangprognose die Wendepunkte gut prognostiziert. Dies ist auf Grundlage der geringen Gesamtanzahl an Wendepunkten zurückzuführen. Abbildung 84 zeigt die Ergebnisse.

Zusammenfassend lässt sich erwähnen, dass die Prognosegüte der Lastgangvorhersage eines Feiertages im Wesentlichen vom Zeitpunkt der Einstellung der Arbeiten im Terminal als auch von der Basislast abhängen. Durch eine Anbindung ans TOS und durch die Definition eines zusätzlichen Parameters zur Festlegung von Arbeitsschichten kann die simulationsbasierte Prognose wahrscheinlich verbessert werden.

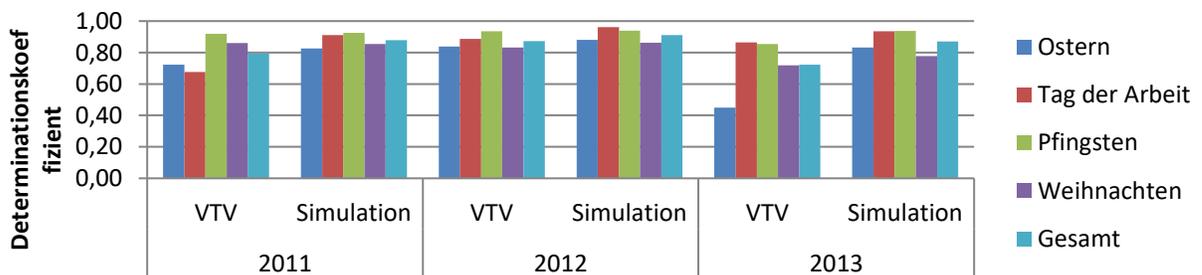


Abbildung 84: Determinationskoeffizient bei der Prognose des Energiebedarfs an Feiertagen für die Jahre 2011 bis 2013

8.2.4 Verwendung von prognostizierten Schiffsankunftszeiten

In den vorangegangenen Studien waren die tatsächlichen Schiffsankunftszeiten im Terminal sowie die korrekte Anzahl an Export- und Importcontainern im Terminal bekannt. In der Realität ist es jedoch so, dass die prognostizierten Schiffsankunftszeiten, also die geplanten Schiffsankunftszeiten zum Zeitpunkt der Erstellung der simulationsbasierten Lastgangprognose, von den tatsächlich eintretenden Schiffsankunftszeiten abweichen. Die Höhe dieser Abweichungen und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Prognosegüte sollen in diesem Abschnitt betrachtet werden. Dazu wurden in einem ersten Schritt prognostizierte Schiffsankunftszeiten über einen Zeitraum von 18 Tagen mit den tatsächlich eingetretenen Zeiten verglichen und die Abweichungen ausgewertet. Tabelle 19 zeigt den Aufbau einer prognostizierten Segelliste.

Tabelle 19: Aufbau einer prognostizierten Segelliste

Attribut	Beschreibung
JSNR	Jahresschiffsnummer
Schiffname	Name des Containerschiffs
Schiffstyp	Typ des Containerschiffs (Kahn, Feeder, Seeschiff)
Sollankunftszeit	Geplante Ankunftszeit des Containerschiffs im Terminal
Sollabgangszeit	Geplante Abgangszeit des Containerschiffs im Terminal
Arbeitszeitbeginn	Geplanter Beginn der Containerumschläge am Schiff
Anzahl Lader	Die Anzahl der geplanten Exportcontainer, welche das Containerschiff aufnehmen soll
Anzahl Löscher	Die Anzahl der an Bord befindlichen Importcontainer

Die Prognose der Schiffsankunftszeiten wurde täglich um 10 Uhr angefertigt und enthält alle Schiffsankünfte der folgenden Tage. Da die Prognose der Schiffsankünfte zu diesem Zeitpunkt genau für die Energiebedarfsprognose des Folgetages genutzt wird, wurden die Abweichungen ab dem Zeitpunkt der Erstellung der Prognosesegelliste zum Ende des Prognosetages (der Folgetag) erfasst.

Abbildung 85 zeigt die durchschnittlichen Abweichungen zwischen prognostizierten Ankunftszeiten, Abfahrtszeiten und den geplanten Startzeitpunkten der Containerumschläge, wobei zwischen den Schiffsklassen Kahn, Feeder und Seeschiff unterschieden wurde. Es ist zu erkennen, dass Containerschiffe sowohl verfrüht als auch verspätet im Terminal ankommen. Seeschiffe tendieren prinzipiell zu einer verspäteten Ankunft im Terminal. Die durchschnittliche Abweichung liegt bei plus minus 100 Minuten. Im Bereich der Seeschiffe muss gesagt werden, dass die Ankunftszeiten wesentlich besser prognostiziert wurden als dies bei Feeder

und Kähnen der Fall war. Die hohe durchschnittliche Verspätung ist auf einen Ausreißer zurückzuführen, welcher eine extrem verspätete Ankunft zu verzeichnen hatte. Nach Rücksprache mit Experten der HHLA wurde bestätigt, dass die Ankunftszeiten von Seeschiffen normalerweise sehr gut prognostiziert werden. Dies liegt an der besonderen Lage des Container-Terminals Altenwerder. Seeschiffe können diesen nur bei einem hohen Tidenstand erreichen, wodurch von Reedereien sehr darauf geachtet wird, dieses Zeitfenster einzuhalten. Trifft ein Seeschiff verspätet ein, muss es auf den nächsten hohen Tidenstand abwarten, um in den Hafen einzufahren. Hierdurch entstehen zwangsläufig hohe Wartezeiten, die von den Schiffsinhabern unbedingt vermieden werden wollen. Bei dem Zeitpunkt der Abfahrt der Schiffe liegen die prognostizierten und tatsächlichen Werte weiter auseinander. Allerdings bedeutet dies nicht, dass der benötigte zeitliche Aufwand für die Abfertigung eines Schiffes falsch geplant wurde. Vielmehr können Containerschiffe auch nach der Abfertigung noch einen gewissen Zeitraum im Hafen liegen, bevor dieser verlassen wird. Die wohl relevanteste Prognosegröße ist daher der geplante Zeitpunkt des Arbeitsbeginns an einem Containerschiff. Diese muss nicht zwangsläufig mit der geplanten Ankunft eines Containerschiffs zusammenfallen, sondern kann auch zu einem späteren Zeitpunkt stattfinden. Hier ist insbesondere bei Seeschiffen eine nur geringe Abweichung zwischen prognostiziertem und tatsächlichem Beginn zu verzeichnen.

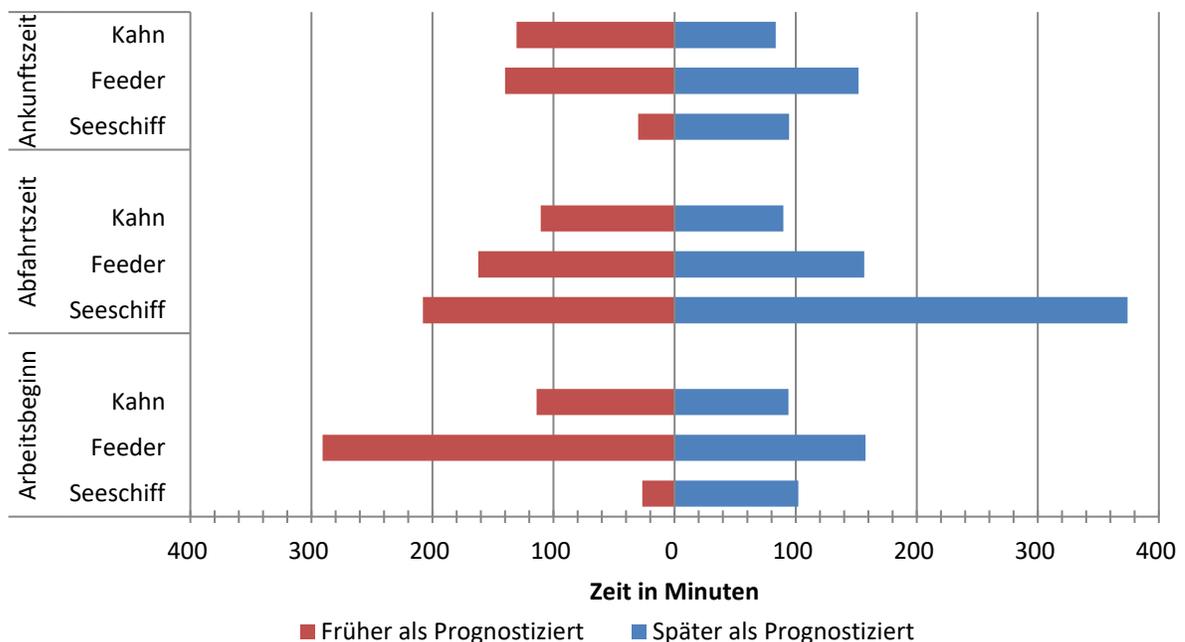


Abbildung 85: Differenzen Schiffsankunftszeit, Schiffabfahrtszeit und Arbeitsbeginn Real / Prognose

8 Evaluierung

In einem zweiten Schritt wird die Abweichungen zwischen der prognostizierten Anzahl von Importcontainern und Exportcontainern ausgewertet, wobei ebenfalls zwischen den Schiffsklassen Kahn, Feeder und Seeschiff unterschieden wird. Es ist zu erkennen, dass tendenziell weniger Exportcontainer auf ein Schiff geladen werden als prognostiziert wurde. Bei Importcontainern ist ein gegenläufiger Trend zu verzeichnen. Hier finden tendenziell mehr Containerumschläge statt als prognostiziert wurden. Abbildung 86 zeigt die durchschnittlichen Abweichungen zwischen prognostizierten und tatsächlichen Containerumschlägen. Die größte absolute Abweichung ist bei der Prognose der Containerumschläge für Seeschiffe zu erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese im Gesamtverhältnis auch am meisten Container transportieren, verglichen mit den Schiffstypen Kahn und Feeder.

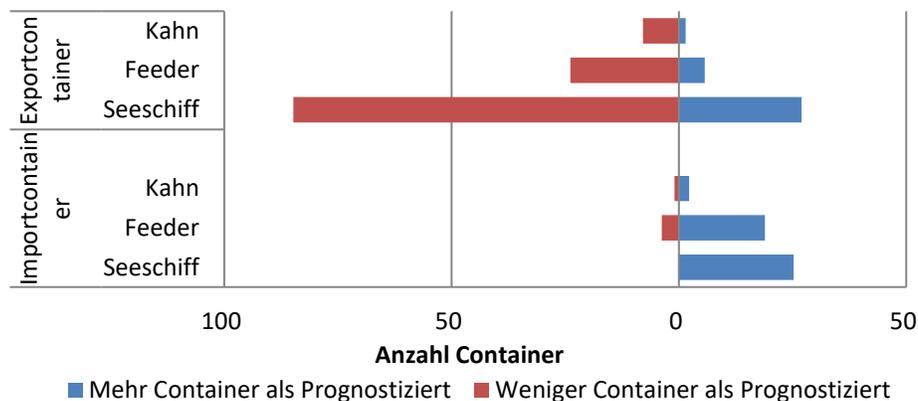


Abbildung 86: Absolute Containerabweichung

Um ein besseres Verständnis für die Prognosegüte der Anzahl von Import- und Exportcontainern zu bekommen, zeigt Abbildung 87 die durchschnittliche prozentuale Abweichung zwischen prognostizierten und tatsächlichen Containerumschlägen. Insbesondere bei den Schiffsklassen Kahn und Feeder tritt eine hohe prozentuale Abweichung auf. Setzen wir diese jedoch in Beziehung mit der absoluten Containeranzahl, fällt auf, dass lediglich bis zu 20 Container falsch prognostiziert werden. Insbesondere bei Seeschiffen ist die Prognose sehr präzise. Hier beträgt die Abweichung lediglich bis zu zwei Prozent.

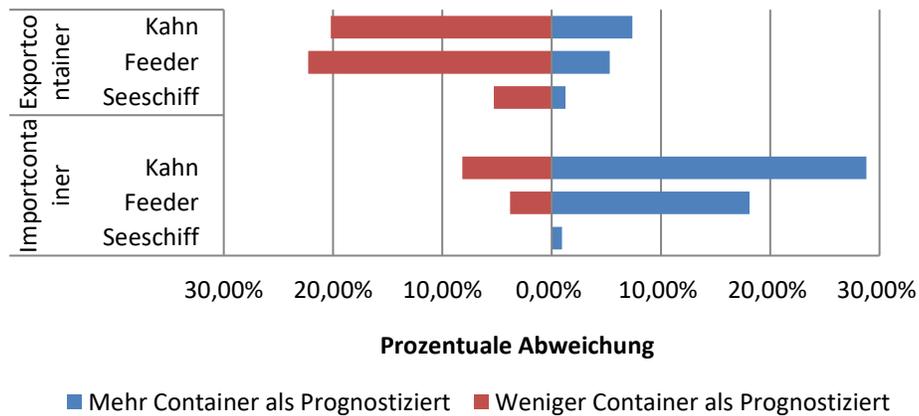


Abbildung 87: Prozentuale Abweichung zwischen realem und prognostiziertem Containerumschlag

In einem letzten Schritt wurden die Auswirkungen dieser Abweichungen auf die Prognosegüte des Gesamtlastgangs evaluiert. Hierzu wurden Simulationsläufe mit den prognostizierten Segellisten durchgeführt und mit Segellisten, welche die tatsächlichen Schiffsankunftszeiten und Anzahl der Export- und Importcontainer enthielten. Die Bewertung der Prognosegüte erfolgt anhand des mittleren absoluten prozentualen Fehlers. Abbildung 88 zeigt die Ergebnisse.

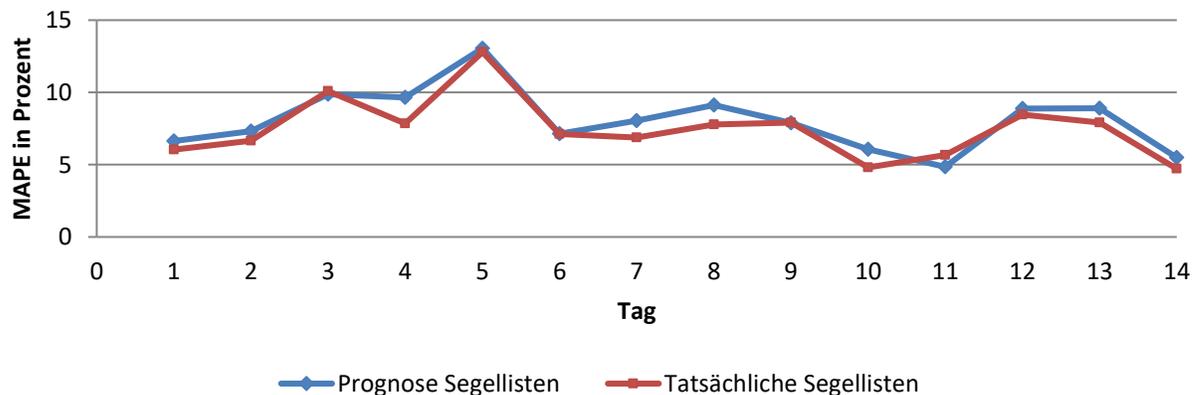


Abbildung 88: Vergleich der Prognosegüte der simulationsbasierten Lastgangprognose bei der Verwendung prognostizierten und tatsächlich eingetretenen Schiffsankunftszeiten.

Es fällt auf, dass die Ergebnisse bei der Verwendung der tatsächlichen Schiffsankunftszeiten im Schnitt 0,5 bis 1 Prozent besser ausfällt als bei der Verwendung der prognostizierten Zeiten. Allerdings sind die Auswirkungen auf die Prognosegüte als insgesamt gering einzuschätzen.

8.2.5 Zusammenfassung

Es wurden insgesamt 1095 Einzelprognosen angefertigt und die Prognosegüte anhand statistischer Kennzahlen bewertet. Im direkten Vergleich mit einem Vergleichstagverfahren erzielt die simulationsbasierte Energiebedarfsprognose durchgängig bessere Ergebnisse. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine bessere Abschätzung der Basislast zu einer weiteren Verbesserung der Prognosegüte des simulationsbasierten Verfahrens führt. Ebenfalls wurde die Auswirkung von Prognosefehlern bei der Ankunft von Containerschiffen im Terminal untersucht und festgestellt, dass eine Verbesserung dieser Prognose keinen signifikanten Einfluss auf die Lastgangprognose hätte. Um die Prognosegüte zu verbessern, sollten daher eher Anstrengungen unternommen werden, das Greenport-Modell zu erweitern und zu verbessern.

8.3 Energiebedarfsprognose der BWS

Im folgenden Abschnitt wird die Prognose der Batteriewechselzeitpunkte und der daraus entstehenden Lastverschiebungspotenziale untersucht. Da eine Anbindung an das Terminal-Operating System im Rahmen dieser Arbeit nicht realisiert werden konnte und historische Daten über Batteriewechselzeitpunkte nicht vorliegen, können an dieser Stelle die Prognose der Batteriewechselzeitpunkte und das daraus entstehende Lastverschiebungspotenzial nicht evaluiert werden. Daher wird an dieser Stelle eine Machbarkeitsstudie und Potenzialanalyse erfolgen. Um diese durchzuführen, wurde das Simulationsmodell Altenwerder um eine Batteriewechselstation (BWS) und 10 Batteriefahrzeuge ergänzt. Die für die Simulation notwendigen Verbrauchsdaten der Fahrzeuge und Kapazitätsdaten der Batterien wurden dem Abschlussbericht „Forschung und Entwicklung batteriebetriebener Schwerlastfahrzeuge (AGV) und deren Erprobung in einem Feldversuch im Container-Terminal Altenwerder in Hamburg“ (Wieschemann und Wulff 2011) entnommen. Die Konfiguration der Fahrzeuge lautet wie folgt:

- Fahrverbrauch eines AGV: 47,1 Ampere
- Basisverbrauch eines AGV: 1,4 Ampere
- Batteriekapazität eine Bleisäure-Batterie: 400 Amperestunden
- Spannung einer Bleisäure-Batterie: 720 Volt
- Batteriereserve: 120 Amperestunden (40% der Gesamtkapazität)

Die Batteriereserve gibt an, ab welchem Batterieladezustand ein AGV vom AGV-Managementsystem die Anweisung bekommt, einen Batteriewechsel durchzuführen. Wird also ein Ladezustand von 120 Amperestunden unterschritten, wird das betreffende AGV die Anweisung bekommen, zur Batteriewechselstation zu fahren und einen Batteriewechsel durchzu-

führen. Fällt das Ladezustandslevel unter den Reservewert, während das Fahrzeug dabei ist, einen Transportauftrag durchzuführen, wird dieser zuerst vollständig ausgeführt, bevor der Batteriewechselauftrag durchgeführt wird. Die Konfiguration der Batteriewechselstation lautet wie folgt:

- 10 Ladefächer
- 1 Wechselfach
- Laderate: 1/5 C (80 Ampere)
- Ein Regalbediengerät
- Eine Tauschspur

Zum Start der Simulation befindet sich in jedem Ladefach genau eine Batterie, wobei der Batterietyp der gleiche wie der der Fahrzeuge ist. Mit dem Batterieladevorgang wird begonnen, sobald eine Batterie aus einem Fahrzeug entnommen und in ein Batterieladefach eingelagert wurde. Als Batterieauswahlstrategie wird eine FIFO-Strategie verwendet. Es wird also immer die am längsten in der Station befindliche Batterie für einen Batteriewechsel ausgewählt. Ist die Tauschspur der Batteriewechselstation belegt, werden weitere Fahrzeuge so lange in einer Warteschlange vor der BWS eingereiht, bis die Tauschspur wieder freigegeben wird.

Simuliert wurde über einen Zeitraum von einer Woche der Logistikverkehr im Terminal, wobei die Auslastungsstufen niedrig, mittel und hoch unterschieden wurden. Je nach Auslastungsstufe gilt es, eine unterschiedliche Menge an Containern innerhalb der Woche umzuschlagen. Die Auslastungen sind wie folgt definiert:

- Niedrige Auslastung: 32130 Containerumschläge
- Mittlere Auslastung: 38539 Containerumschläge
- Hohe Auslastung: 70105 Containerumschläge

Der Zeitpunkt der Auslagerung einer Batterie aus der Station, die Ladezeiten sowie der Ladezustand bei Eintreffen einer Batterie in der Station werden protokolliert und aufgezeichnet. Auf Grundlage dieser Werte kann das zukünftige Lastverschiebungspotenzial bestimmt werden. Abbildung 89 zeigt exemplarisch Wechselzeitpunkte und Ladezeiten von 15 Batterien über einen Zeitraum von einer Woche.

8 Evaluierung



Abbildung 89: Visualisierung der Batteriewechsel- und Ladezeiten

Grüne Balken geben die Ladezeit einer Batterie an, wobei diese abhängig vom Ladezustand beim Eintreffen einer Batterie in der Station ist. Rote Balken visualisieren die Liegezeit einer Batterie innerhalb der Station. In dieser Zeit ist die betreffende Batterie bereits vollgeladen und liegt ungenutzt im Ladefach. Weiße Balken repräsentieren die Einsatzzeit einer Batterie in einem Fahrzeug. Von Interesse sind die Zeiten, in welchen Batterien vollgeladen, aber ungenutzt im Ladefach liegen. Diese Zeiten können dazu genutzt werden, Lasten zu verschieben, z.B. indem der Ladeprozess nicht sofort bei Einlagerung einer Batterie gestartet wird. Der Ladeprozess kann auch zu einem späteren Zeitpunkt gestartet werden, sofern er spätestens dann abgeschlossen ist, sobald die Batterie benötigt wird. In einem ersten Schritt wird untersucht, inwiefern sich die unterschiedlichen Auslastungen des Terminals auf die Batteriewechselzeitpunkte und die daraus resultierenden Lastverschiebungspotenziale auswirken. Dabei wurde die durchschnittliche, maximale und minimale Einsatzzeit eines Fahrzeugs ermittelt. Abbildung 90 zeigt die Ergebnisse. Es ist zu erkennen, dass die durchschnittliche Einsatzzeit mit der Auslastung des Terminals und damit auch der durchschnittlichen Transportleistung der einzelnen Fahrzeuge korreliert. Bei einer niedrigen Auslastung des Terminals befindet sich ein Batteriefahrzeug durchschnittliche 45 Stunden im Einsatz bis ein Batteriewechsel notwendig wird. Bei einer hohen Auslastung befindet sich ein AGV lediglich ca. 10 Stunden im Einsatz bis ein Austausch der Batterie notwendig wird. Dies ist dadurch zu erklären, dass sich bei der hohen Auslastung sämtliche Fahrzeuge permanent in Bewegung befinden und Transportaufträge durchführen, während bei der niedrigen oder auch mittleren Auslastung Fahrzeuge auch durchaus über größere Zeiträume keinerlei Transportaufträge durchführen.

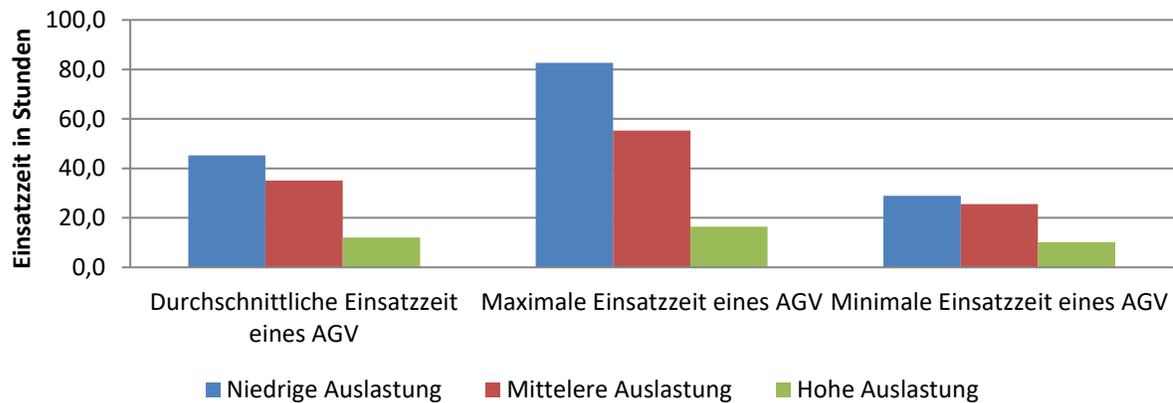


Abbildung 90: Durchschnittliche, maximale und minimale Einsatzzeit eines AGV bis zu einem Batteriewechsel

Wie auch die Einsatzzeit der Fahrzeuge korreliert die Aufenthaltszeit einer Batterie in der Batteriewechselstation mit der Auslastungsstufe des Terminals. Bei einer niedrigen Terminalauslastung befindet sich eine Wechselbatterie durchschnittlich 55 Stunden in der Station, wobei die durchschnittliche Ladezeit der Batterie in diesem Beispielszenario bei lediglich 3,1 Stunden liegt. Bei einer hohen Auslastung wird sich eine Wechselbatterie lediglich 12 Stunden in der Station befinden, bevor diese wieder benötigt wird. Interessant an dieser Stelle sind die minimalen Aufenthaltszeiten einer Batterie in der Station. Diese liegt bei einer niedrigen Auslastung bei 40 Stunden und bei einer hohen bei 4,8. Diese Zeiten können dazu genutzt werden, das Lastverschiebungspotenzial anzugeben. So kann diese Zeit abzüglich der benötigten Ladezeit genutzt werden, den Batterieladezeitpunkt zu verschieben und die daraus entstehenden Potenziale zu vermarkten oder zum internen Lastmanagement zu nutzen. Die Nutzung der simulationsbasierten Vorhersage der Batteriewechsel kann die unterschiedlichen Auslastungen des Terminals auf Grundlage der zukünftigen Containerumschläge sehr genau vorhersagen und sehr detailliert die unterschiedlichen Aufenthaltszeiten der Batterien prognostizieren. Auch ist eine einfache Anpassung des Modells möglich, sollte z.B. der Schwellenwert eines Batteriewechsels geändert werden. Abbildung 91 zeigt die Batterieaufenthaltszeiten der verschiedenen Szenarien.

8 Evaluierung

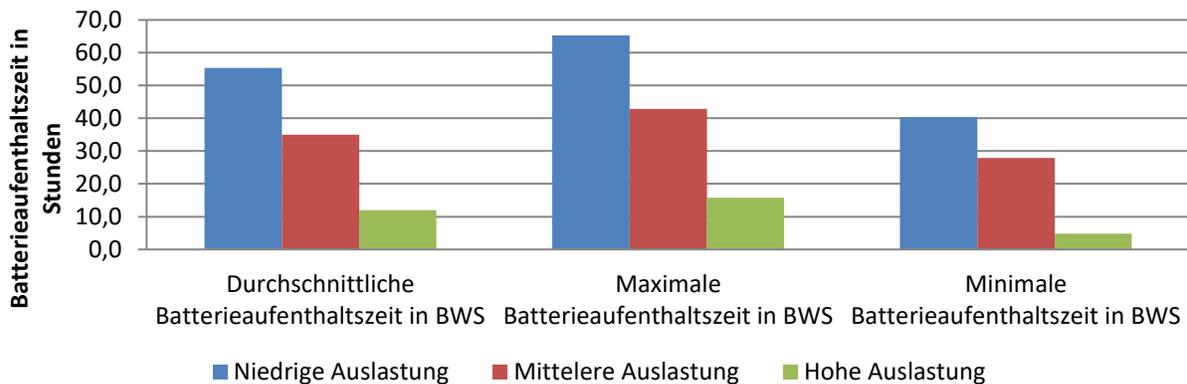


Abbildung 91: Durchschnittliche, maximale und minimale Aufenthaltszeiten einer Wechselbatterie in der Batteriewechselstation.

In einem letzten Schritt wurde der prozentuale Anteil der BWS am Gesamtenergieverbrauch des Terminals untersucht. Auch dieser korreliert mit der Gesamtauslastung des Terminals. Bei einer niedrigen Auslastung macht der Energieverbrauch der BWS lediglich 2 Prozent des Gesamtverbrauchs aus. Bei einer mittleren Auslastung bereits 3 Prozent und bei einer hohen Auslastung bereits 7 Prozent. Werden in Zukunft entsprechend mehr Batteriefahrzeuge eingesetzt, wird auch der prozentuale Anteil am Gesamtenergiebedarf steigen. Abbildung 92 zeigt den prozentualen Anteil der einzelnen Verbraucher im Terminal unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Auslastungsszenarien.

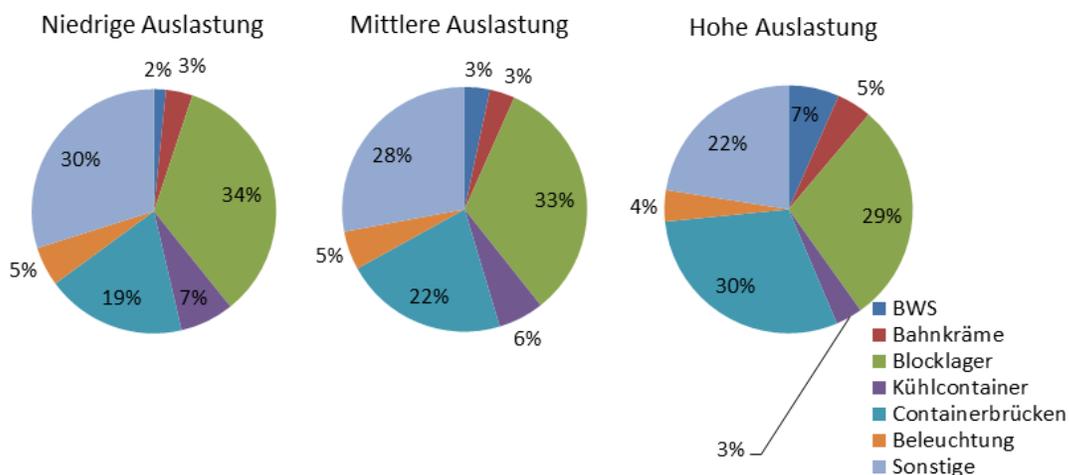


Abbildung 92: Prozentualer Anteil der elektrischen Leistungsaufnahme durch die Batteriewechselstation am Gesamtverbrauch

8.3.1 Zusammenfassung

Es wurde aufgezeigt, dass die durchschnittliche Einsatzzeit eines Transportfahrzeugs stark von der Auslastung des Terminals abhängt. Die simulationsbasierte Prognose scheint dazu geeignet, die Auslastung auf Grundlage der zukünftigen Schiffsankünfte differenziert und genau zu prognostizieren. Auf Grundlage der durchschnittlichen Einsatzzeit und der Aufenthaltszeit einer Batterie in der BWS können die zukünftigen Lastverschiebungspotenziale somit abgeschätzt werden. Es ist anzunehmen, dass durch eine Anbindung an das TOS und die Synchronisation der Batterie- und Fahrzeugdaten die Einsatzzeit sehr genau vorhergesagt und somit auch das Lastverschiebungspotenzial bestimmt werden kann. Allerdings konnte dies im Rahmen dieser Arbeit nicht sicher evaluiert werden.

8.4 Evaluationsbewertung

Dieser Abschnitt fasst die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Abschnitten zusammen. Insbesondere wird der Erfüllungsgrad der Ziele dieser Arbeit diskutiert. Zusätzlich werden einige Probleme behandelt, welche während der Simulationsläufe aufgetreten sind.

Z.1 Entwicklung einer Methode zur zustandsbasierten Abbildung von Energieverbrauchsprozessen in ereignisbasierten Simulationen

Es wurde eine Methode entwickelt, welche dazu geeignet ist, Energieverbräuche in ereignisbasierten Simulationen abzubilden. Die Methode wurde erfolgreich in das PCT-Modell integriert und genutzt.

A.1-3 Direkte Verbraucher, allgemeine Verbraucher und Ressourcenenergie. Direkte Verbraucher sowie die Leistungsaufnahme unterschiedlicher Ressourcen wurden berücksichtigt, ebenso wie der Energiebedarf des allgemeinen Verbrauchers Beleuchtung. Die Anforderung gilt als erfüllt.

A.4 Energierrelevante Einflussfaktoren. In Abhängigkeit der Schiffsklasse sowie des Containertyps wird die benötigte Umschlagszeit und darauf beziehend, die Leistungsaufnahme bestimmt. Die dafür benötigten Informationen wurden als Attribute in der Ladeinheit Container berücksichtigt. Weitere Faktoren wie etwa Containergewichte wurden aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt, können aber auf einfache Art integriert werden. Die Anforderung gilt als erfüllt.

A.5 Integrierte Betrachtung der Energieverbrauchsprozesse. Energiebereitstellungsaufträge werden in einem Simulationsdurchlauf berücksichtigt und haben direkten Einfluss auf Ein-

satzdauer und damit das Transportumschlagvolumen der betreffenden Transportfahrzeuge. Die Anforderung kann als erfüllt angesehen werden.

Z.2 Entwicklung eines Simulationsmodells zur kombinierten Betrachtung von Logistik und Energieverbrauchsprozessen eines Container-Terminals

A.6 Räumliche und zeitliche Differenzierung. Das Terminallayout des CTA wurde erfolgreich übernommen und in die Simulation integriert. Das Layout wurde dabei manuell auf Grundlage von Satellitenbildern und Experteninterviews erstellt. Eine mögliche Erweiterung des Modells wäre eine Komponente zur automatischen Generierung des Layouts zu integrieren, um den Einrichtungsaufwand der Simulationskomponenten zu minimieren. Die Anforderung kann als erfüllt angesehen werden.

A.7 Verbrauch. Im Rahmen der Evaluierung wurde lediglich eine Verbrauchsfunktion implementiert, welche zwischen Fahr- und Standverbrauch unterscheidet. Es ist anzunehmen, dass weitere Verbrauchsfunktionen, wie etwa polynomiale Funktionen zur Berücksichtigung des Luft- und Rollwiderstandes, integriert werden können. Doch konnte die Anforderungserfüllung im Rahmen dieser Arbeit nicht bestätigt werden.

A.8 Kapazität. Die Kapazität wurde in den Szenarien fest vorgegeben. Eine Modellierung der Kapazität in Abhängigkeiten von unterschiedlichen Umweltbedingungen wurde mangels verfügbarer Batteriemodelle nicht durchgeführt. Da die Batterie aber denselben Prinzipien folgt wie der Verbrauch der Transportfahrzeuge, kann angenommen werden, dass die geforderten Modellierungsmöglichkeiten integriert werden können. Die Anforderungserfüllung konnte nicht bestätigt werden.

A.9 Energiebereitstellung der Horizontaltransportflotte. Die Energiebereitstellung wurde in Form einer Batteriewechselstation implementiert und die Auswirkungen unterschiedlicher Terminalauslastungen auf die Energiebereitstellung untersucht. Die geforderte Flexibilität wurde allerdings nicht in den Szenarien adressiert (z.B. Induktionsschleifen oder Tanksäulen). Durch die Verwendung unterschiedlicher Abstraktionsschichten der Modelle ist zu vermuten, dass diese Umsetzung jedoch durchführbar ist. Dennoch kann die Erfüllung der Anforderungen nicht bestätigt werden.

A.10 Abbildung energierelevanter Prozesse. Relevante Verbrauchsgruppen wurden im Container-Terminal identifiziert und modelliert. Das Modell ist in der Lage, detaillierte Auskunft über den prozentualen Anteil der Verbraucher am Gesamtstromverbrauch wiederzugeben (siehe Abbildung 71). Die Anforderung gilt als erfüllt.

Z.3 Prognose des Gesamtenergiebedarfs eines Container-Terminals

In Abschnitt 8 wurde gezeigt, dass die simulationsbasierte Energiebedarfsprognose eine geeignete Methode ist, den Energiebedarf eines Container-Terminals mit einer bestimmten Prognosegüte zu prognostizieren. Das Verfahren wurde mit einer etablierten Methode zur Lastprognose, dem Vergleichstagverfahren, verglichen. Unter Berücksichtigung der verwendeten Gütemaße erzielte die simulationsbasierte Lastgangprognose in allen Bereichen durchgängig bessere Ergebnisse.

A.11 Simulation des zukünftigen Logistikgeschehens. Das Greenport-Modell wurde erfolgreich genutzt, um die Logistikprozesse des Terminals erfolgreich vorherzusagen. Dies zeigen vor allem die in Abschnitt 8.2.1 ermittelten Differenzen zwischen simulierten und prognostizierten Schiffsabfertigungszeiten. Die Abweichungen bewegen sich in einem nur schmalen Band. Die Anforderung kann als erfüllt angesehen werden.

A.12 Datenvervollständigung. Fehlende Informationen der Segelliste wurden durch die Simulation automatisch ergänzt. Die Anforderung kann als erfüllt angesehen werden.

A.13 Realistischer Systemstartzustand. Ein Problem ergab sich durchgängig durch eine Unter- oder Überschätzung der Basislast, welche sich aus verschiedenen allgemeinen Verbrauchern und der Anzahl der eingelagerten Kühlcontainer ergibt. Die in der Arbeit vorgestellte Methode zur Schätzung dieser hat nicht immer optimale Ergebnisse erzielt. Es ist davon auszugehen, dass durch die Synchronisation der Daten des Terminal Operating Systems mit den Simulationsdaten die Basislast wesentlich besser abgebildet werden kann, wodurch die Ergebnisse der Lastprognose verbessert werden können. Die Anforderung konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht evaluiert werden.

A.14 Feiertage. Das Modell berücksichtigt die Besonderheiten, welche an Feiertagen auftreten. Die Prognosegüte an Feiertagen ist leicht schlechter als dies an normalen Tagen der Fall ist. Durch eine Verbesserung der Prognose der Basislast kann jedoch angenommen werden, dass sich die Prognosegüte signifikant verbessern lässt. Die Anforderung gilt als erfüllt.

Sonstige

A.15 Operative Kennzahlen. Zur Bewertung der Energiebedarfsprognose wurden operative Kennzahlen integriert. Es war ohne Probleme möglich, diese in das Modell zu integrieren. Die Anforderung ist erfüllt.

Das Hauptziel der Arbeit, ein Modell zur simulationsbasierten Energiebedarfsprognose eines Seehafen-Container-Terminals zu erstellen, wurde erfüllt. Die Evaluation des CTA-Modells

8 Evaluierung

hat ergeben, dass die Prognosegüte bei ca. 90% liegt. Dies bedeutet, dass pro prognostiziertem Verbrauch einer Viertelstunde die Abweichung vom realen Energieverbrauch ungefähr 10 Prozent beträgt. Es ist anzunehmen, dass durch eine Anbindung der Simulation an das Terminal Operating System die Prognosegüte durch eine bessere Bestimmung der Basislast verbessert werden kann. Alternativ könnte auch eine verbesserte Methode zur Schätzung der Basislast entwickelt werden.

Bei der Implementierung des CTA-Modells hat sich herausgestellt, dass insbesondere der zeitliche Aufwand für die Konfiguration und „Kalibrierung“ des Modells hoch ist.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeit verfolgte das Ziel, eine Methode zur simulationsbasierten Energiebedarfsprognose eines Seehafen-Container-Terminals zu erstellen und bezüglich der Prognosegüte zu bewerten. Dazu wurden gemäß den Anforderungen eine Methode zur Abbildung der Leistungsaufnahme in ereignisdiskreten Simulationen vorgestellt. Weiter wurde ein allgemeingültiges Modell eines Container-Terminals erstellt, welches die unterschiedlichen Verbrauchsgruppen und die Energiebereitstellung der Horizontaltransportflotte eines Terminals berücksichtigt und zusätzlich wurde vorgestellt, wie dieses Modell zur simulationsbasierten Lastgangprognose genutzt werden kann. Der folgende Abschnitt fasst den Beitrag der Arbeit zusammen und zeigt mögliche Ansatzpunkte für weiterführende Entwicklungen auf.

9.1 Zusammenfassung

In Kapitel 5 wurden unterschiedliche Modelle multimodaler Umschlagsanlagen mit Bezug zum Kontext Container-Terminal untersucht. Die Auswertung hat ergeben, dass die meisten Modelle weder elektrische Energieverbräuche noch die Energiebereitstellung berücksichtigen. Die vorgestellten Modelle, welche die elektrische Leistungsaufnahme berücksichtigen, beschränken sich auf die Betrachtung von Teilbereichen eines Container-Terminals. Eine ganzheitliche Betrachtung ist nach Kenntnis des Autors bisher nicht erfolgt. Insbesondere allgemeine Verbraucher, die Leistungsaufnahme von Kühlcontainern und die Energiebereitstellung werden in keiner der erwähnten Arbeiten berücksichtigt.

In Kapitel 6 wurden verschiedene Ansätze zur Simulation von Energieverbrauchsprozessen in ereignisdiskreten Simulationen untersucht. Die Auswertung hat ergeben, dass der Fokus bisheriger Arbeiten auf der alleinigen Betrachtung von Prozessenergie liegt. Es wurde aufgezeigt, dass für eine detaillierte Energiebetrachtung die Aufteilung zwischen Prozess- und Ressourcenenergie ebenso notwendig ist wie die Betrachtung der Leistungsaufnahme von allgemeinen Verbrauchern und der Energiebereitstellung.

Um die aufgezeigten Lücken zu schließen, wurde in Kapitel 7 eine Methode (*Zustandsbasierte Abbildung von Energieverbrauchsprozessen in ereignisdiskreten Simulationen*) entwickelt, welche es ermöglicht, die elektrische Leistungsaufnahme differenziert nach Ressourcen- und Prozessenergie zu betrachten. Ebenso berücksichtigt die Methode die Leistungsaufnahme allgemeiner Verbraucher und die elektrische Energiebereitstellung und schließt somit die in Abschnitt 6 aufgezeigten Defizite. Zusätzlich wurde mit dem *Power-Consumption-Terminal-Modell* ein Modell entwickelt, welches die Verbraucher in intermodalen Umschlagsanlagen berücksichtigt und die entwickelte Methode ZAES nutzt die Leistungsaufnahmen integriert

abzubilden. In einem letzten Schritt wurde auf Grundlage des *PCTM* das *Greenport* Modell entwickelt, welches dazu in der Lage ist, den Energiebedarf eines Seehafen Container-Terminals zu prognostizieren.

Die simulationsbasierte Energiebedarfsprognose wurde anhand des Fallbeispiels Altenwerder evaluiert und die Prognoseergebnisse mit denen eines etablierten Verfahrens verglichen. Insgesamt wurde verifiziert, dass die entwickelte Methode die Anforderungen dieser Arbeit erfüllt.

9.2 Ausblick

Die Evaluation hat bestätigt, dass die simulationsbasierte Lastvorhersage geeignet ist, die Ziele und Anforderungen dieser Arbeit zu erfüllen. Dennoch haben sich modellbezogene Erweiterungspotenziale ergeben, die im Folgenden aufgezeigt werden sollen.

Realistischer Systemstartzustand. Im Rahmen dieser Arbeit konnte keine Anbindung an das Terminal-Operating-System realisiert werden. Aus diesem Grund wurde ein Verfahren vorgestellt, die Basislast auf Grundlage des historischen Verbrauchs zu bestimmen. Es wird angenommen, dass durch eine Anbindung an das TOS die Energiebedarfsprognose verbessert werden kann. Inwiefern oder ob eine Steigerung der Prognosegüte möglich ist, gilt es in zukünftigen Arbeiten zu untersuchen.

Verbrauch. Das PCT-Modell zeigt, dass unterschiedliche Verbrauchsverläufe in das Modell integriert werden können. Es hat sich gezeigt, dass die Verwendung einer linearen Verbrauchsfunktion geeignet scheint, den durchschnittlichen Energieverbrauch der Transportfahrzeuge abzubilden. Um das Modell auch zur Beantwortung weiterer Fragestellung bzgl. der Energieversorgung und des Verbrauchs zu nutzen, müssen weitere Verbrauchsfunktionen implementiert werden, die z.B. den Luft- und Rollwiderstand von Fahrzeugen berücksichtigen.

Kapazität. Zur realistischen Abbildung der Batterieladezustände müssen weitere Batteriemodelle integriert und evaluiert werden, um weitere Effekte wie etwa die Außentemperatur zu berücksichtigen.

Energiebereitstellung. Bei der Energiebereitstellung wurde lediglich ein konstantes Ladeverfahren implementiert, welches für die durchschnittliche Prognose der Batterieladezeiten ausreichend ist. Soll das Modell jedoch dazu genutzt werden, etwa neue Transportauftragsvergabe-strategien unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs zu berücksichtigen, müssen weitere Ladeverfahren, wie etwa das IU oder IUa (Heinemann 2007) (Gallo u. a. 2013), implementiert werden.

Übertragbarkeit. Im Rahmen der Arbeit wurde ein Ansatz aufgezeigt, wie eine Materialflusssimulation dazu genutzt werden kann, den Energieverbrauch eines geschlossenen Logistikbetriebs zu prognostizieren. Für die Umsetzung des Ansatzes wurde dabei eine Methode zur zustandsbasierten Abbildung von Energieverbrauchsprozessen in ereignisdiskreten Simulationen entwickelt.

- Zustandsbasierte Abbildung von Energieverbrauchsprozessen in ereignisdiskreten Simulationen (ZAES).

Die Methodik wurde in der Materialflusssimulationsumgebung Plant Simulation umgesetzt. Die Anwendbarkeit in anderen Materialflusssystemen konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht gezeigt werden. Da die vorgestellte Methode jedoch unabhängig von einer konkreten Programmiersprache entwickelt wurde, kann sie auch in weitere Materialflusssimulationsumgebungen integriert werden, insofern diese eine Erweiterung durch eigene Simulationsbausteine zulassen. Beißert und Fuss (Fuss und Beißert 2014) zeigen in einer Veröffentlichung, dass die Mehrheit der auf dem Markt verfügbaren Simulationsumgebungen aufgrund ihrer ähnlichen Softwarestruktur und offenen Programmierung das Potential zur Erweiterung bieten. Explizit werden folgende Umgebungen genannt:

- Tecnomatix Plant Simulation 11, Siemens AG (im Rahmen dieser Arbeit verwendet)
- Dosimis-3, SDZ GmbH
- Any Logic 7, AnyLogic Company
- FlexSim, FlexSim Software Products Inc.
- SIMUL8, SIMUL8 Corporation
- Witness 13, Lanner Group
- Enterprise Dynamics 9, INCONTROL Simulation Solutions
- ExtendSIM 8, Imagine That Inc.
- AutoMod, Applied Materials

Die Integration des Ansatzes ermöglicht es, detaillierte Informationen über den allgemeinen Energieverbrauch von beliebigen Produktions- und Logistikbetrieben zu erlangen. Voraussetzung ist, dass die Modellierung der Leistung aus approximierten Leistungs-Zeit-Verläufen, der einzelnen Energiezustände, möglich ist. Die erlangten Informationen können dazu genutzt werden, um z.B. eine Verringerung des absoluten Energieverbrauchs zu erreichen oder entstehende Lastspitzen zu glätten. Um diese Ziele zu erreichen, kann die Materialflusssimulation dazu genutzt werden

- eine energieorientierte Optimierung der Maschinenbelegung zu planen.
- den Planungshorizont eines Fertigungsbetriebs unter Berücksichtigung energiewirtschaftlicher Gesichtspunkte zu erhöhen.
- eine Variation von Anlagen- und Prozessparametern der Produktionsanlagen zu untersuchen, um den absoluten Energiebedarf zu senken.
- ein in Echtzeit arbeitendes Spitzenlastmanagementsystems zu entwickeln und dessen Funktionalität umfangreich zu testen.

Der Einsatz der Methodik eignet sich insbesondere für stromintensive Branchen wie der Aluminium-, Chemie-, Stahl-, Papier- und Zementindustrie. Die genannten Ziele geben nur einen knappen Überblick über mögliche Einsatzzwecke der Methodik. Weitere domänenspezifische Probleme können durch die detaillierte Berücksichtigung energetischer Einflussfaktoren gelöst werden. Neben der Implementation der Methodik in einer Materialflusssimulation ist auch die Umsetzung in einem beliebigen ereignisdiskreten Simulationsframework denkbar.

Neben der Methodik zur Abbildung von Energieverbrauch- und Bereitstellungsprozessen wurden zwei Modelle zur Modellierung eines Containerterminals entwickelt, welche die wichtigsten energetischen Einflussfaktoren berücksichtigen.

1. Power Consumption Terminal Model (PCTM).
2. Simulationsbasierten Lastgangprognose eines Seehafen Container-Terminals (Greenport).

Mit dem Power Consumption Terminal Model wurde ein übertragbares Containerterminalmodell zur Verfügung gestellt, welches die wichtigsten elektrischen Energieverbräuche eines Containerterminals berücksichtigt. Das Modell kann spezialisiert und in einer Materialflusssimulationsumgebung umgesetzt werden, um die Logistik- und Energieverbrauchsprozesse unterschiedlicher Containerterminals abzubilden. Durch die Ähnlichkeit des Aufbaus und der Abläufe in verschiedenen Terminals können auch trimodale Binnenterminals oder aber auch bimodale Terminals abgebildet werden. Das Modell kann dazu genutzt werden, neue Betriebsabläufe unter energiewirtschaftlichen Gesichtspunkten zu erproben oder bereits etablierte Strategien zu optimieren. Durch die verringerte Einsatzdauer von Elektrofahrzeugen im Gegensatz zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen besteht insbesondere ein Entwicklungsbedarf von neuen Dispositionsstrategien, welche die Fahrzeugeinsatzpläne unter energiewirtschaftlichen Gesichtspunkten optimieren und die Batterieladezeiten mit den zukünftigen Transportaufkommen koordiniert.

Im letzten Schritt der Arbeit wurde aufgezeigt, wie eine Materialflusssimulation dazu genutzt werden kann, den Energieverbrauch eines Seehafen-Containerterminals zu prognostizieren.

Dieser Ansatz kann auf weitere geschlossene Logistikbetriebe übertragen werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Betrachtung diskreter Zeitabschnitte ausreichend ist. Es kann sogar davon ausgegangen werden, dass die Prognose des Energiebedarfs noch genauer ausfallen wird, wenn die zukünftigen Produktionsabläufe planbarer als in einem Container-Terminal sind und nicht vielen stochastischen Einflussfaktoren unterliegen. Genannt sei hier z.B. eine Produktionsanlage, welche zu festen Zeiten arbeitet und nicht auf die schwer planbare Ankunft von Fertigungsmaterialien (in diesem Fall Container) angewiesen ist.

10. Literaturverzeichnis

- Ahlers, Eric, Yvonne Aniol, und Benjamin Scholz. 2013. „BDEW-Roadmap Realistische Schritte zur Umsetzung von Smart Grids in Deutschland“.
- Apel, Rolf, Thomas Aundrup, Bernd Michael Buchholz, Hans-Peter Domels, Stephan Funke, Thomas Gasing, Thomas Glaunsinger, u. a. 2012. „VDE-Studie - Demand Side Integration - Lastverschiebungspotenziale in Deutschland“. Energietechnische Gesellschaft im VDE.
- „APM Terminals’ Maasvlakte II to Pioneer Container Automation Technology“. 2012. *Port Technology International*.
http://www.porttechnology.org/news/apm_terminals_maasvlakte_ii_to_pioneer_container_automation_technology.
- Arnold, Dieter, Heinz Isermann, Axel Kuhn, und Horst Tempelmeier. 2002. *Handbuch Logistik*. Berlin: Springer.
- Axsen, Jonn, Kenneth S. Kurani, und Andrew Burke. 2010. „Are batteries ready for plug-in hybrid buyers?“ *Transport Policy* 17 (3): 173 – 182.
- Bamberg, Günther, Franz Baur, und Michael Krapp. 2012. *Statistik*. München: Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Beyer, Joachim. 2010. „Energiebedarfsarme intelligente Produktionssysteme“. In *1. Internationales Kolloquium des Spitzentechnologiecluster eniPROD*. Chemnitz.
- Bichler, Klaus, Ralf Krohn, Guido Riedel, und Frank Schöppach. 2010. *Beschaffungs- und Lagerwirtschaft: Praxisorientierte Darstellung der Grundlagen, Technologien und Verfahren*. 9.Aufl. Wiesbaden: Gabler.
- Bielli, Maurizio, Azedine Boulmakoul, und Mohamed Rida. 2006. „Object Oriented Model for Container Terminal Distributed Simulation“. *European Journal of Operational Research* 175 (3): 1731–51.
- Bishop, Kirsten. 2009. „Electric Ship to Shore Cranes: Costs and Benefits“. Palo Alto: EPRI (Electrical Power Research Institute).
- Brinkmann, Birgitt. 2005. *Seehäfen: Planung und Entwurf*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Buchholz, Peter. 2011. „Modellgestützte Analyse und Optimierung“. Systeme und Modelle. Lehrstuhl für Praktische Informatik, Technische Universität Dortmund. http://www4.cs.uni-dortmund.de/Lehre/0641127/Folien/MAO_1.pdf.

- Bühler, Jochen, Matthias Resch, Johannes Wiemann, und Jochen Twele. 2015. „Lebenszyklusanalyse von Großbatterien am deutschen Regelenergiemarkt“. In *IEWT 2015*. Wien.
- Cartení, Armando, Giulio Erberto, und Stefano de Luca. 2005. „A simulation model for a container terminal“. In *PROCEEDINGS OF ETC 2005*. STRASBOURG.
- Christiansen, L., T. Linnenberg, A. Fay, C. Seitz, und A.W. Müller. 2013. „Energietechnische Beschreibung fertigungstechnischer Prozesse zur Bewertung der Energieeffizienz“. *Tagungsband „Automation 2013“*.
- Clesle, Frank-Dieter, und Gerhard Saller. 2007. Verfahren und System zur Prognose der benötigten Energiemengen eines, insbesondere industriellen Verbrauchers von einem Energieversorger oder Energielieferanten sowie Vorrichtung zur Energiebedarfsprognose. 1748529, filed 29. Juli 2005, und issued 22. März 2007.
- Consult, Arepo. 2012. *Befreiungen der energieintensiven Industrie in Deutschland von Energieabgaben*. Berlin.
- Crone, Sven F. 2010. *Neuronale Netze zur Prognose und Disposition im Handel*. Herausgegeben von Karl-Werner Hansmann, Manfred Layer, Dietmar Preßmar, und Kai-Ingo Voigt. 60.Aufl. Wiesbaden: Springer-Verlag.
- Dai, Jim, Wujin Lin, Rajeeva Moorthy, und Chung-Piaw Teo. 2008. „Berth Allocation Planning Optimization in Container Terminals“. In *Supply chain analysis*, 69–104.
- Deutsch, Andreas. 2013. *Verlagerungseffekte im containerbasierten Hinterlandverkehr: Analyse, Bewertung, Strategieentwicklung*. Bamberg: Univ. of Bamberg Press.
- Dietmair, A., A. Verl, und M. Wosnik. 2008. „Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile - Eine Methode zur effizienten Erfassung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen“. *Werkstattstechnik online* 7/8 (98): 640–45.
- Eisenbach, Dominik. 2005. „Künstliche Neuronale Netze zur Prognose von Zeitreihen“. *Westfälische Wilhelms-Universität, Münster*.
- Ertel, Wolfgang. 2013. *Grundkurs Künstliche Intelligenz: Eine praxisorientierte Einführung*. Wiesbaden: Springer-Verlag.
- Feinberg, Eugene A., und Dora Genethliou. 2005. „Load forecasting“. In *Applied mathematics for restructured electric power systems*, 269–285. Springer US.
- Fuss, Emanuel, und Ulrike Beißert. 2014. „Beitrag zur Energie- und Materialflusssimulation in Produktion Und Logistik“. In *Magdeburger Logistiktage »Sichere und nachhaltige Logistik«*, herausgegeben von Michael Schenk, Hartmut Zadek, Gerhard Müller, Klaus Richter, und Holger Seidel, 40–47.

- Gallo, Daniele, Carmine Landi, Mario Luiso, und Rosario Morello. 2013. „Optimization of Experimental Model Parameter Identification for Energy Storage Systems“. *Energies* 6 (9).
- Gellings, Clark W., und John H. Chamberlin. 1987. *Demand-Side Management: Concepts and Methods*. Lilburn, GA, USA: The Fairmont Press, Inc.
- Gobmaier, Thomas, Dominik Bernhard, und Serafin von Roon. 2012. „Märkte für Demand Side Management“. In *1st international European demand response center (EDRC) workshop*. Graz.
- Grundmeier, Nico, Axel Hahn, Norman Ihle, Serge Runge, und Claas Meyer-Barlag. 2014. „A simulation based approach to forecast a demand load curve for a container terminal using battery powered vehicles“. In *Neural Networks (IJCNN), 2014 International Joint Conference on*, 1711–1718. IEEE.
- Guan, Yongpei, und Raymond K. Cheung. 2004. „The berth allocation problem: models and solution methods“. *OR Spectrum* 26 (1): 75–92.
- Günther, Hans-Otto, und Kap-Hwan Kim. 2006. „Container terminals and terminal operations“. *OR Spectrum* 28 (4): 437–45.
- Heinemann, Detlef. 2007. „Strukturen von Batterie- und Energiemanagementsystemen mit Bleibatterien und Ultracaps“. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Hermann, Hauke, Ralph Harthan, und Charlotte Loreck. 2011. *Ökonomische Betrachtung der Speichermedien*. Berlin.
- Herrmann, C., S. Thiede, S. Kara, und J. Hesselbach. 2011. „Energy Oriented Simulation of Manufacturing Systems – Concept and Application“. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60 (1): 45–48.
- Hochhaus, Karl-Heinz. 1996. „Entwicklungen im Seetransport von Kühlgütern in Kühlcontainern“. In *Jahrbuch Der Schiffbautechnischen Gesellschaft* 98. Hamburg.
- Hoerstebroek, Tim. 2014. „Strategische Analyse der Elektromobilität in der Metropolregion Bremen/Oldenburg: Multi-Agenten basierte Simulation alternativer Antriebssysteme“. Oldenburg: Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.
- Höft, Christoph. 2005. „Bewertung von Verfahren zur Prognose der elektrischen Last – eine empirische Analyse“. *Technische Universität Dresden*.
- Horn, Ursula. 2015. „Integralkühlcontainer“. November 3. <http://de.wikipedia.org/wiki/Integralcontainer>.

- Hui, Guo, Liang Tao, Juergen Moser, und Holger Mueller. 2014. „Smart Grids für zukünftige Häfen - Herausforderungen und Potenziale“. In *VDE-Kongress 2014 Smart Cities - Intelligente Lösungen für das Leben in der Zukunft*. Frankfurt/Main: VDE Verlag GmbH.
- Ihle, Norman, Runge Serge, Nico Grundmeier, Claas Meyer-Barlag, und H.-J. Appelrath. 2014. „Development of an IT-architecture for the usage of flexible loads in a container terminal“. In *EnviroInfo*, 357–64.
- International Energy Agency. 2003. *The Power to Choose: Demand Response in Liberalised Electricity Markets*. Paris: OECD Publishing.
- Johanson, Frederik. 2010. „Efficient use of energy in container cranes“, *Port Technology International*, 48: 51–54.
- Jossen, Andreas. o. J. „Ladung von elektrochemischen Akkumulatoren-Grundlagen, Kennlinien, Alterung“. *BaSyTec GmbH*.
- Jünemann, Reinhardt. 1989. *Materialfluss und Logistik systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen*. Berlin: Springer Berlin, Heidelberg.
- Kaffka, Jan, Uwe Clausen, und Zoran Miodrag. 2015. „Allokation von Emissionswerten auf Behälterebene in multimodalen Umschlagsanlagen mittels Simulation“. In *Simulation in Production and Logistics 2015*, herausgegeben von Markus Rabe und Uwe Clausen, 565–74.
- Kaffka, Jan, Uwe Clausen, und Sandra Stein. 2014. „Revealing gaps in the material flow of inland port container terminals alongside the danube with simulation“. In *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*, 1807–1818. IEEE Press.
- Kamper, Andreas. 2009. „Dezentrales Lastmanagement zum Ausgleich kurzfristiger Abweichungen im Stromnetz“. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Keller, Fabian, G. Reinhart, D. Ataby, R. Dornmair, und T. Hamacher. 2014. „Flexibilisierung des Stromverbrauchs in Fabriken“. In *13. Symposium Energieinnovation*, 12:2014.
- Kester, Walt, und Joe Buxton. 1998. „Battery chargers“. In *Practical design techniques for power and thermal management*.
- Kley, Fabian. 2011. „Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge Entwicklung einer Ausbaustrategie auf Basis des Fahrverhaltens“. Stuttgart: Fraunhofer ISI and Karlsruhe Institute of Technology.
- Klobasa, Marian. 2007. „Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten“. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich.

- Knauer, Ulrich. 2001. *Diskrete Strukturen - kurz gefasst*. Spektrum, Akad. Verlag.
- Kohler, Stephan. 2010. „Dena-Netzstudie II“. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).
- Kruse, Rudolf, Christian Borgelt, Frank Klawonn, Christian Moewes, Matthias Steinbrecher, und Pascal Held. 2013. *Computational Intelligence*. Texts in Computer Science. London: Springer London.
- Kuck, Jochen. 2014. „Das Ende der Netzentgeltbefreiung für stromintensive Letztverbraucher“ *Umweltmagazin* (Januar/Februar): 48–49.
- Kulus, Dennis, Daniel Wolff, und Stefan Dreher. 2011. „Energieverbrauchssimulation als Werkzeug der Digitalen Fabrik“. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 585–89.
- Larek, Roland, Ekkard Brinksmeier, Daniel Meyer, Thorsten Pawletta, und Olaf Hagendorf. 2011. „A discrete-event simulation approach to predict power consumption in machining processes“. *Production Engineering* 5 (5): 575–579.
- Le, Kim. 2012. „Analysing electric yard cranes with simulation“. *Port Technology International* (53).
- Legato, Pasquale, Rina Mary Mazza, und Roberto Trunfio. 2010. „Simulation-Based Optimization for Discharge/loading Operations at a Maritime Container Terminal“. *OR Spectrum* 32 (3): 543–67.
- Lehmann, Matthias. 2006. „Einsatzplanung von Fahrerlosen Transportsystemen in Seehafen-Containerterminals“. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Lenze, Burkhard. 1997. *Einführung in die Mathematik neuronaler Netze*. Logos Verlag. <http://www.ulb.tu-darmstadt.de/tocs/54983851.pdf>.
- Levine, Daniel S. 2000. *Introduction to Neural and Cognitive Modeling*. Mahwah (US): Psychology Press.
- Li, Bin, und Wen-feng Li. 2010. „Modeling and simulation of container terminal logistics systems using Harvard architecture and agent-based computing“. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, 3396–3410.
- Liebe, Andrea, und Matthias Wissner. 2015. „Der flexible Verbraucher–Potenziale zur Lastverlagerung im Haushaltsbereich“. *Studie für Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg und Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Bad Honnef*.

- MacCarley, C. Arthur. 2000. „A Review of Battery Exchange Technology for Refueling of Electric Vehicles“. In *Proceedings of SAE Future Car Conference 2000: Washington, DC*.
- Martin, Heinrich. 2004. *Transport-und Lagerlogistik: Planung, Aufbau und Steuerung von Transport-und Lagersystemen; mit 49 Tabellen*. 5. Aufl. Wiesbaden: Springer-Verlag.
- Meier, L. Hendrik. 2009. *Koordination interdependenter planungssysteme in der logistik*. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler.
- Meisel, Frank, und Christian Bierwirth. 2006. „Integration of berth allocation and crane assignment to improve the resource utilization at a seaport container terminal“. In *Operations Research Proceedings 2005*, 105–110. Bremen: Springer.
- Mertens, Peter, und Susanne Rässler, Hrsg. 2012. *Prognoserechnung*. Heidelberg: Physica-Verlag HD.
- Müller, Leonhard. 2001. *Handbuch der Elektrizitätswirtschaft: Technische, wirtschaftliche und rechtliche Grundlagen*. 2. Auflage. Springer-Verlag.
- Neusser, Klaus. 2011. *Zeitreihenanalyse in den Wirtschaftswissenschaften*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- „Next Kraftwerke“. 2015. April 14. <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/strommarkt/day-ahead-handel>.
- Pacino, Dario, Alberto Delgado, Rune Møller Jensen, und Tom Bebbington. 2011. „Fast generation of near-optimal plans for eco-efficient stowage of large container vessels“. In *Computational Logistics*, 286–301. Springer.
- Peffer, Ken, Tuure Tuunanen, Marcus A. Rothenberger, und Samir Chatterjee. 2007. „A Design Science Research Methodology for Information Systems Research“. *Journal of Management Information Systems* 24 (3): 45–77.
- Petersen, Marcel. 2014. (Interview) Funktionsweise des TLS im Containerterminal Altenwerder, Hamburg.
- Rabe, Markus, Sven Spieckermann, und Sigrid Wenzel. 2008. *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin: Springer Science & Business Media.
- Raffel, Wolf-Ulrich. 2005. „Agentenbasierte Simulation als Verfeinerung der Diskreten-Ereignis-Simulation unter besonderer Berücksichtigung des Beispiels fahrerloser Transportsysteme“. Freie Universität Berlin, Germany.

- Roon, Serafin von, und Thomas Gobmaier. 2010. „Demand Response in der Industrie - Status und Potenziale in Deutschland“. Endbericht. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
- Runge, Serge, Norman Ihle, Claas Meyer-Barlag, Nico Grundmeier, Axel Hahn, und Hans-Jürgen Appelrath. 2014. „Herausforderungen für Demand-Side-Integration mit Elektrofahrzeugen in geschlossenen Logistiksystemen („Battery-to-Market“)“. In *VDE-Kongress 2014*. VDE VERLAG GmbH.
- Sapina, Rafael. 2013. „Report on Port Container Terminals Energy Profile“. <http://www.greencranes.eu/M2Report.pdf>.
- Sauerbier, Thomas. 1999. *Theorie und Praxis von Simulationssystemen*. Wiesbaden: Springer.
- Schieck, Arno. 2008. *Internationale Logistik : Objekte, Prozesse und Infrastrukturen grenzüberschreitender Güterströme*. München: Oldenbourg Verlag.
- Schlegel, Andreas, Johannes Stoldt, und Matthias Putz. 2013. „Erweiterte Integration energetischer Betrachtungen in der Materialflusssimulation“. *Simulation in Produktion und Logistik 2013*, 187–96.
- Schlittgen, Rainer. 2015. *Angewandte Zeitreihenanalyse mit R*. Berlin: Walter de Gruyter GmbH.
- Schwab, Adolf J. 2012. *Elektroenergiesysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-21958-0>.
- Solding, Petter, und Damir Petku. 2005. „Applying energy aspects on simulation of energy-intensive production systems“. In *Proceedings of the 37th conference on Winter simulation*, 1428–1432. Winter Simulation Conference.
- Sonnenschein, Michael, Barbara Rapp, und Jörg Bremer. 2010. „Demand Side Management und Demand Response“. In *Handbuch Energiemanagement*. Bd. 3. Handbuch Energiemanagement. Heidelberg.
- Stahlbock, Robert, und Stefan Voß. 2007. „Operations Research at Container Terminals: A Literature Update“. *OR Spectrum* 30 (1): 1–52.
- Steenken, Dirk, Thomas Winter, und Uwe T Zimmermann. 2001. „Stowage and Transport Optimization in Ship Planning“. In *Online optimization of large scale systems*, 731–45. Springer.
- Sun, Zhuo, Loo Hay Lee, Ek Peng Chew, und Kok Choon Tan. 2012. „MicroPort: A General Simulation Platform for Seaport Container Terminals“. *Advanced Engineering Informatics* 26 (1): 80–89.

- Swider, Derk Jan. 2006. *Handel an Regenerie- und Spotmärkten Methoden zur Entscheidungsunterstützung für Netz- und Kraftwerksbetreiber*. München: Springer.
- Tran, Thanh Khanh. 2012. „Study of Electrical Usage and Demand at the Container Terminal“. Melbourne: Deakin University.
- URS, und AECOM. 2012. „North Carolina Maritime Strategy - Planned Utility Demands for Container Terminal Market Scenarios“. North Carolina: North Carolina Department of Transportation.
- VDE Verband. o. J. „Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen. DIN EN 62196“. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2012).
- Verbeeck, Jef, und Fred Kuijper. 2013. „Application of Smart Energy Networks - part I Summary results of the individual company demand response audits in the Port of Antwerp“.
- Vetter, J., P. Novák, M.R. Wagner, C. Veit, K.-C. Möller, J.O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler, und A. Hammouche. 2005. „Ageing mechanisms in lithium-ion batteries“, *Journal of Power Sources*, 147 (1): 269–81.
- Vis, Iris FA, und Rene De Koster. 2003. „Transshipment of containers at a container terminal: An overview“. *European journal of operational research* 147 (1): 1–16.
- Vogel, Jürgen. 2015. *Prognose von Zeitreihen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-06837-0>.
- Voß, Stefan, Robert Stahlbock, und Dirk Steenken. 2004. „Container terminal operation and operations research - a classification and literature review“. *OR Spectrum* 26 (1): 3–49.
- Warrier, D., J. Osborne, und Y. Odama. 2009. *The race for the electric car: A comprehensive guide to battery technologies and market development*. San Francisco.
- Wawer, Tim. 2007. „Förderung erneuerbarer Energien im liberalisierten deutschen Strommarkt“ 9.
- Weber, René. 1998. „Statische und dynamische Evaluation von Prognosen“. *ZA-Information / Zentralarchiv für Empirische Sozialforschung*, 111–23.
- Wenzel, Heinz, und Wedigo Wedel. 2015. „Blei-Batterien vs. Li-Ionen-Batterien: Leistung, Haltbarkeit, Sicherheit“. März 16. http://www.energiespeichernds.de/fileadmin/Arbeitskreise/Workshops/speicheranw._Gebaeude-Energiemanagement/Wedigo_Wenzel_Next_Energy_EFZN.pdf.

- Wenzel, Sigrid, Matthias Weiß, Simone Collisi-Böhmer, Holger Pitsch, und Oliver Rose. 2008. *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik - Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Wieschemann, Armin, und Boris Wulff. 2011. „Abschlussbericht zum Vorhaben Forschung und Entwicklung batteriebetriebener Schwerlastfahrzeuge (AGV) und deren Erprobung in einem Feldversuch im Container-Terminal Altenwerder in Hamburg“.
- Wietschel, Martin, Sebastian Schraven, und Fabian Kley. 2011. „Induktives Laden von Elektromobilen – Eine techno-ökonomische Bewertung“. *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 35 (3): 209–19.
- Wild, Ing Yves. 2004. „Statistische Auswertung des E-Verbrauchs von Kühlcontainern auf fahrenden Schiffen“. *Jahrbuch Der Schiffbautechnischen Gesellschaft* 98.
- Winter, Thomas, und Uwe Zimmermann. 1998. „Discrete online and real-time optimization“. In *IFIP Congress: Fundamentals-Foundations of Computer Science*, 31–48.
- Wolff, Daniel, Dennis Kulus, und Stefan Dreher. 2012. „Simulating Energy Consumption in Automotive Industries“. In *Use Cases of Discrete Event Simulation - Appliance and Research*, 59–86. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Xin, Jianbin, Rudy R. Negenborn, und Gabriël Lodewijks. 2014. „Energy-Aware Control for Automated Container Terminals Using Integrated Flow Shop Scheduling and Optimal Control“. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 44 (Juli): 214–30.
- Zeilinger, Franz Xaver, und Alfred Einfalt. 2011. „Simulation der Auswirkung von Demand Side Management auf die Leistungsaufnahme von Haushalten“. *7. Internationale Energiewirtschaftstagung 2011*.
- Zeng, Qingcheng, und Zhongzhen Yang. 2009. „Integrating Simulation and Optimization to Schedule Loading Operations in Container Terminals“. *Computers & Operations Research* 36 (6): 1935–44.
- Zhu, Minghua, Xiumin Fan, Huanhong Cheng, und Qichang He. 2010. „Modeling and Simulation of Automated Container Terminal Operation“. *Journal of Computers* 5 (6). <http://www.academypublisher.com/ojs/index.php/jcp/article/view/954>.
- Zhu, Y, und A Lim. 2006. „Crane scheduling with non-crossing constraint“. *Journal of the Operational Research Society* 57 (12): 1464–71.

11. Glossar

Die nachfolgende Auflistung ist nicht vollständig. Sie konzentriert sich auf die wichtigsten Begriffe, insbesondere solche, die an mehreren verschiedenen Stellen in dieser Arbeit verwendet werden.

Automated Guided Vehicle (AVG): Vollautomatisches führerloses Fahrzeug, welches Container zwischen den Containerbrücken an der Wasserseite und Lagerbereich bewegt.

Basislast: Beschreibt die Leistungsaufnahme der >Grundlastverbraucher und der elektrischen Leistungsaufnahme von Kühlcontainern.

Batteriewechselstation: Als Batteriewechselstation werden Ladestationen bezeichnet, an denen die Batterien nicht im betreffenden Fahrzeug geladen werden, sondern gegen bereits geladene Batterien getauscht werden.

Blocklager: Automatisierte Blocklager nutzen Portalkräne zur kompakten Stapelung von Containern.

Containerbrücke: Krananlage zum Be- und Entladen von Containerschiffen. Unterschieden werden Panamax-, Post-Panamax- und Super-Post-Panamax Containerbrücken, die für Abfertigung der entsprechenden Schiffsgrößen geeignet sind.

Containertrucking: Transport von Containern per LKW. Bei Transporten innerhalb eines Hafens spricht man von Umfuhren.

Day Ahead: Ein Zeitraum für eine Vereinbarung (z.B. ein Swap), der nur den nächsten Tag umfasst.

Exportcontainer: Container, der vom Lager auf das Schiff gebracht werden soll.

Feeder, Feederschiff: Zubringerschiff, welches kleinere Mengen von Containern in Häfen transportiert, die nicht direkt von Großcontainerschiffen angefahren werden.

Flurförderfahrzeuge: Fahrzeuge die Güter an Land transportieren, stapeln und umschlagen können. Siehe auch >Reachstacker oder >Van-Carrier.

Grundlast: Beschreibt die kontinuierliche Leistungsaufnahme verschiedener Basisverbraucher, welche sich über die Zeit nicht ändert. In einem Container-Terminal gehört hierzu z.B. die Leistungsaufnahme der elektrischen Beleuchtung oder der IT-Infrastruktur.

Importcontainer: Container, der vom Schiff ins Lager transportiert werden soll.

Intermodal bzw. Intermodalsysteme: Transport unter Nutzung mehrerer Verkehrsträger (Schiff, Bahn, LKW), der die jeweils spezifischen Vorteile der Verkehrsträger kombiniert.

Kai: Ein Kai ist ein Uferdamm im Hafen. Er ist durch Mauern befestigt und dient dazu, dass Schiffe im tiefen Fahrwasser an Land festgemacht werden können, um gelöscht oder geladen zu werden.

Korrelation: Eine Maßzahl (zwischen -1 und 1), welche die Beziehung zwischen Variablen in Bezug auf ihren Gleichauf beschreibt.

Kühlcontainer, Reefer-Container: Container, die über ein integriertes Kühlsystem verfügen.

Last: Die in Anspruch genommene Leistung wird im elektrizitätswirtschaftlichen Sprachgebrauch als „Last“ bezeichnet. Sie kann die Summe der momentanen Leistungsaufnahme unterschiedlicher Verbrauchsgruppen.

Leistung, elektrische: Elektrische Leistung im physikalischen Sinne als Produkt von Strom und Spannung.

Löschen: Als „Löschen“ bezeichnet man das Entladen eines Schiffes.

Modell: Ein Modell ist eine vereinfachte Darstellung eines realen Sachverhalts, das dazu dient, für eine bestimmte Zielgruppe die Kommunikation, die Analyse oder das Verständnis zu fördern.

Move: Einheit, mit welcher die Anzahl der von einer Containerbrücke bewegten Container gezählt werden.

Panamax-Klasse: Containerschiffe von einer Größe, die maximal durch die Schleusen des Panamakanals passt. Sie können bis zu 5.000 Standardcontainer an Bord nehmen, während auf den größeren Schiffen der Post-Panamax-Klasse mehr als 18.000 Standardcontainer passen.

Portalkräne: Krananlagen, die ihren Arbeitsbereich (z.B. im >Blocklager) wie ein Portal überspannen.

Reachstacker: Flurförderfahrzeuge, die mit einem schrägen Teleskoparm bis zu zwei Container gleichzeitig aufnehmen und über andere Container hinwegheben bzw. stapeln können.

Seehafen: Ein Seehafen ist ein Hafen, der von Seeschiffen angelaufen werden kann. Seehäfen können an der Küste, an Kanälen und an Flüssen liegen, also nicht nur direkt am Meer. Es gibt sowohl große als auch kleine Seehäfen.

Referenztage: Die Anzahl der Zeitreihenwerte, welche bei einem Vergleichstagsverfahren dazu genutzt werden den zukünftigen durchschnittlichen Energieverbrauch einer Viertelstunde zu bestimmen.

Simulation: Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.

Standardcontainer: siehe >TEU

Stückgut: Stückgut ist alles, was sich am Stück transportieren lässt, also z.B. Kisten, Kabel-Papier oder Stahlrollen.

Stückgut-Terminal: Auf einem Stückgut-Terminal wird alles verladen, was sich am Stück transportieren lässt, also Kisten, Kabel-, Papier-, Blechrollen oder Stahlröhren. Dazu zählen auch Güter, die aufgrund ihrer Größe für den Transport im Container ungeeignet sind. Das können z. B. Maschinen, Bauteile oder große Fabrikteile sein. Diese werden als Projekt- und Schwergut bezeichnet.

Tagesdifferenz: Beschreibt bei einem Vergleichstagsverfahren die Anzahl der Tage welche in die Vergangenheit zurückgegangen wird, um einen Referenzwert für die Prognose zu finden.

Teillast: Eine Erzeugungseinheit wird mit Teillast betrieben, wenn ihre Leistung zwischen Mindestleistung und Dauerleistung liegt.

Terminal: Bezeichnet in der Transportbranche ein Gelände mitsamt Infrastruktur, an welchem Güter zwischen verschiedenen Verkehrsträgern umgeschlagen werden können.

TEU (Twenty Foot Equivalent Unit): Genormter Standardcontainer, der weltweit als Maßeinheit zur einheitlichen Zählung von Containermengen Verwendung findet. Ein 20-Fuß-Container ist 6,1 Meter lang, 2,44 Meter breit und 2,59 Meter hoch.

Trimodal: Beschreibt die vorhandene Anbindung einer Logistikanlage an die drei Verkehrsträger Schiene, Straße und Wasserweg.

Umfuhr: Transport von Containern innerhalb eines Terminals oder Hafens.

Van-Carrier (Auch Straddle Carrier): Portalhubstapler zum Transport von Containern auf dem Terminal.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt habe.

Nico Grundmeier