



Fraunhofer-Center für Maritime Logistik
und Dienstleistungen CML
Blohmstraße 32
21079 Hamburg

dash**PORT**

Individueller Endbericht zum Forschungsprojekt

Port Energy Management Dashboard

Digitale Leitwarte zur Analyse und Steuerung von Energieflüssen
in Häfen

dashPORT

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für
Digitales und Verkehr unter dem Förderkennzeichen 19H19005C gefördert. Die Verantwortung
für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Hamburg, 31.03.2023

Julius Küchle, M.Sc.
Oliver Schmitz, M.Sc.
Alexander Klaus, B.Sc.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektverbund:

„dashPORT - Port Energy Management Dashboard Digitale Leitwarte zur Analyse und Steuerung von Energieflüssen in Häfen“

Verbundkoordinator:

Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG

Hindenburgstr. 26-30

26122 Oldenburg

Kontakt:

Dr. Matthäus Wuczkowski

Telefon: 0441-35020-613

E-Mail: mwuczkowski@NPorts.de

Verbundpartner:

Fraunhofer-Center für Maritime Logistik und Dienstleistungen CML

Am Schwarzenberg-Campus 4, Gebäude D

21073 Hamburg

OFFIS – Institut für Informatik

Escherweg 2

26121 Oldenburg

J. Müller AG

Neustadtstraße 15

26919 Brake

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung dashPORT	6
1.1	Aufgabenstellung	6
1.2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	7
1.3	Planung und Ablauf des Vorgehens	8
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde	9
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
2	Eingehende Darstellung dashPORT	11
2.1	Die Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	11
2.1.1	Arbeitspaket 1: Bestandsaufnahme/IST-Analyse	12
TAP 1.1	Strukturierung vorhandener Energie und Verbrauchsdaten	12
TAP 1.2	Identifizierung der Netzinfrastrukturen und Messpunkte beider Hafenpartner	12
TAP 1.3:	Aufnahme vorhandener Softwareschnittstellen und Mess-IT-Infrastruktur	13
2.1.2	Arbeitspaket 2: Analyse & Konzeption	13
TAP 2.1:	Bewertung der Vorhandenen Struktur für Projektzwecke	13
TAP 2.2:	Analyse und Bewertung von Hafenprozessen	13
TAP 2.3:	Clustering der Verbrauchsgruppen	15
TAP 2.4	Erstellung Gesamtkonzept notwendiger Infrastrukturmaßnahmen	15
2.1.3	Arbeitspaket 3: Umsetzung notwendiger Infrastrukturmaßnahmen	16
2.1.4	Arbeitspaket 4: Datenanalyse	16
2.1.5	Arbeitspaket 5: Ableitung von Energieeffizienz- und Flexibilisierungsmaßnahmen	21
2.1.6	Arbeitspaket 6: Prototypische Entwicklung Digitale Leitwarte	32
2.1.7	Arbeitspaket 7: Feldtest Hafen	33
2.1.8	Arbeitspaket 8: Evaluierung und Verwertung	34
2.1.9	Projektkoordination & Öffentlichkeitsarbeit	43

2.2	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	45
2.3	Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	45
2.4	Der voraussichtliche Nutzen im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes	46
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	48
2.6	Die erfolgten und geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	50
3	Literaturverzeichnis	51

Abbildung 1: Gantt Chart dashPORT	8
Abbildung 2: Projektstruktur dashPORT	11
Abbildung 3: Auszug aus Prozesskarte	14
Abbildung 4: Verbrauchercluster relevanter Verbraucher	15
Abbildung 5: Beispiel Datengrundlage für Erfassung von Prozessabhängigkeiten	18
Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung der Vor- und nachgeschalteten Verbraucher/Messstellen am Zähler P_NS_419	19
Abbildung 7: Modellhafte Darstellung Ringleitung NPorts	20
Abbildung 8: Modellhafte Darstellung Netz J.Müller	21
Abbildung 9: Verteilung der Bewertung zeitlicher Verschiebbarkeit - J.Müller	22
Abbildung 10: Verteilung der Bewertung der zeitlichen Verschiebbarkeit - NPorts	22
Abbildung 11: Ausgangssituation NPorts – Verteilung des Stromverbrauchs	23
Abbildung 12: Ausgangssituation J.Müller - Verteilung des Stromverbrauchs	24
Abbildung 13: Formulierung Lineares Optimierungsmodell in Python mit Hilfe der Bibliotheken NumPy, Pandas und PuLP	29
Abbildung 14: Ablaufdiagramm der Generierung der Handlungsempfehlungen	32
Abbildung 15: Beispiel Planungsansicht des dashPORT	42

1 Kurzdarstellung dashPORT

1.1 Aufgabenstellung

Im Projektvorhaben dashPORT sollten wesentliche Stromverbrauchsdaten sowohl des Infrastrukturbetreibers Niedersachsen Ports GmbH als auch des ansässigen Umschlagsunternehmens J.Müller AG erhoben, visualisiert und gemeinsam vorausschauend analysiert werden, um ein intelligentes Energie- und Flexibilitätsmanagement in Form der prototypischen intelligenten Energieleitwarte dashPORT umzusetzen. Konkret sollte das dashPORT die folgenden Eigenschaften vereinen:

- Datenstrommanagement und Visualisierung von Stromverbrauchsdaten (historisch und aktuell)
- Prognose von zukünftigen Lastverläufen unter Einbezug von Daten über Schiffsankünfte
- Einstufung von Stromverbrauchsdaten anhand von Benchmark-Werten
- Intelligentes Warnsystem für extreme und unnötige Verbräuche
- Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen und energetischen Prozessoptimierungen im Hafen
- Flexible Steuerung von wesentlichen Verbrauchern in Bezug auf Energieeffizienz

Das Port Energy Management Werkzeug dashPORT sollte dabei auf Basis der Zusammenführung und Verarbeitung bereits vorhandener und noch zu erhebender Daten prototypisch entwickelt werden. Dazu sollte die vorhandene Messinfrastruktur ergänzt werden, sodass der Leistungsbedarf aller wesentlichen Verbraucher des Gesamthafens einzeln erfasst wird und einer Analyse mit Big Data Methoden zugeführt werden konnte. Durch die visuelle Aufbereitung der Energieverbräuche des gesamten Hafens sollten die negativen Auswirkungen des Hafenbetriebs auf die Umwelt transparent gemacht werden, was eine systematische Reduktion der Umweltbelastung als Ganzes ermöglichen sollte. Hierzu sollten die Energieverbräuche von z.B. Schleusen, Hafeneinrichtungen, Terminals, und einzelnen Einheiten wie Krane sowohl im historischen, aktuellen und prognostizierten Verlauf dargestellt werden. Eine Besonderheit sollte dabei die Betrachtung sowohl der Verbräuche des Infrastrukturbetreibers (verantwortlich u.a. für die Infrastruktur und Straßen- bzw. Umfeldbeleuchtung) als auch des im Hafen tätigen Umschlagsunternehmens (verantwortlich für Umschlagequipment und Lagerhallen inkl. deren Beleuchtung) sein. Durch die

gesamtheitliche Betrachtung war die Erwartung, dass sich Effekte beobachten lassen, die über eine isolierte Betrachtung der derzeit im Bereich Energie komplett getrennt arbeitenden Hafenakteure nur schwer ableitbar gewesen wäre. Aufgrund der Vielzahl der zukünftig gemessenen Verbraucher mussten die Daten hierfür sinnvoll auf unterschiedlichen Ebenen verdichtet werden. In einem Benchmark sollten die Daten innerhalb gebildeter Verbrauchscluster verglichen werden, um die typischen Normverbräuche zu ermitteln. Zum anderen sollte ein System für extreme und unnötige Verbräuche integriert werden und die Benutzer bei der Analyse und der intelligenten Steuerung von Verbrauchern unterstützen. Zur Reduzierung des Energieverbrauchs sollten aus diesen Informationen Handlungsmaßnahmen abgeleitet werden. Die Daten sollten ebenfalls genutzt werden, um potentielle Flexibilität im Energiebedarf zu ermitteln und verfügbar zu machen. Dazu waren Daten einzelner Einheiten zu analysieren und die Steuerbarkeit zu bewerten. Angedachte Infrastrukturmaßnahmen wie die Einführung von E-Mobilität auf dem Hafengelände oder die Nutzung von eigenen Photovoltaikanlagen sollten dabei bereits berücksichtigt werden. Prognoseverfahren für den Leistungsbedarf des Hafens werden entwickelt, um auch zukünftige Lastentwicklungen abschätzen zu können und darauf aufbauend Handlungsempfehlungen zur Vermeidung von Lastspitzen geben zu können.

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das hier beschriebene Projekt dashPORT ist ein anwendungsorientiertes Forschungs- und Entwicklungsprojekt gemäß der Förderrichtlinie Innovative Hafentechnologien (IHATEC) des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Der zweite Förderaufruf vom 15.09.2017 nennt Zuwendungszwecke, die von dashPORT wie folgt adressiert werden:

Digitale Infrastruktur verbessern und die stärkere Nutzung von der IT in den Häfen vorantreiben

DashPORT zielt auf eine vollständige Digitalisierung der Erfassung und Überwachung der Energieflüsse im Hafen. Durch die flächendeckende Ausstattung aller relevanten Verbraucher des Infrastruktur- und Umschlagsbereichs mit digitalen Messeinrichtungen und der digitalen Übertragung der Messdaten werden die Energieflüsse des Hafens kontinuierlich sichtbar gemacht und kurzfristige Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion ermöglicht. Die erstmalige Zusammenführung der Energieverbrauchsdaten von zwei Hafenakteuren in

einem gemeinsamen IT-System ermöglicht es, Wechselwirkungen zu erkennen und Prognosen für zukünftige Verbräuche und Verbrauchsspitzen zu erstellen.

Entwicklung innovativer Hafentechnologien fördern, die zur Verbesserung des Umwelt- und Klimaschutzes beitragen

dashPORT analysiert die Hafenprozesse aus energetischer Sicht übergreifend über die beiden Hafenakteure Infrastrukturbetreiber und Umschlagunternehmen hinweg und leitet daraus Effizienzmaßnahmen und Handlungsmaßnahmen im Bereich Stromverbrauch ab. Durch die Visualisierung der Stromverbrauchsdaten und deren Wechselwirkungen sollen unnötige Verbräuche vermieden werden und Einsparpotentiale intuitiv angezeigt werden. Die Prognosefähigkeit von dashPORT ermöglicht es auch, präventiv Maßnahmen zu ergreifen und so zur Verbesserung des Umwelt- und Klimaschutzes beizutragen.

Das Projektvorhaben dashPORT ist damit dem in Nr. 4.2 der IHATEC-Förderrichtlinie genannten Schwerpunkt g) Technische Innovationen zur Steigerung der Energieeffizienz im Hafen und Verringerung der Umweltbelastung zuzuordnen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorgehens

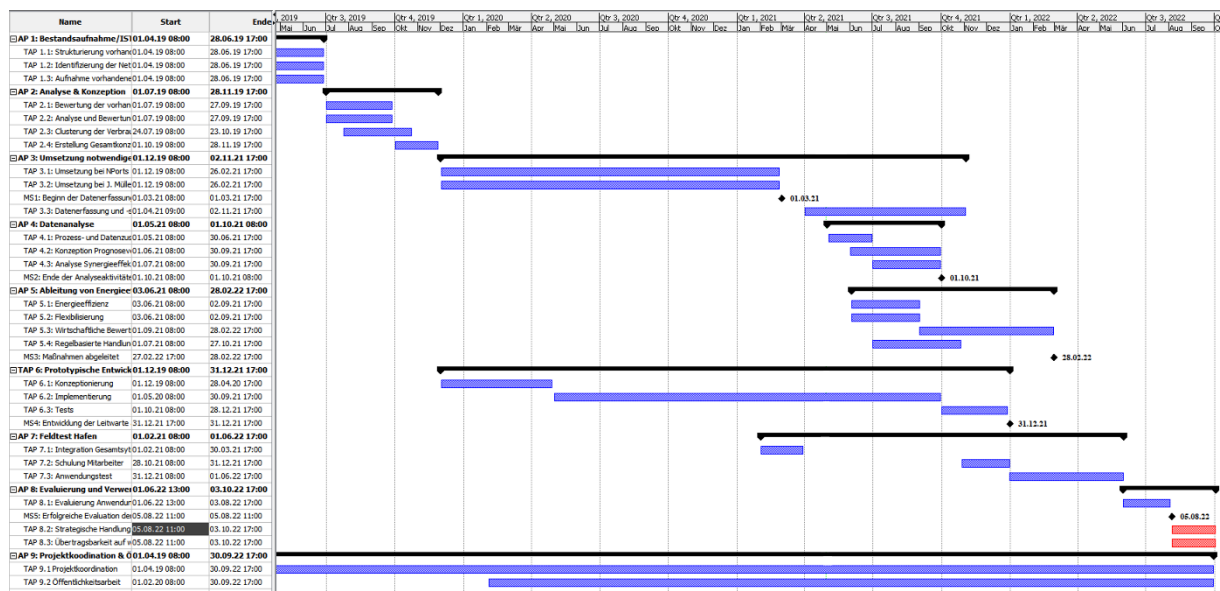


Abbildung 1: Gantt Chart dashPORT

Die Abstimmung mit den Projektpartnern verlief zielführend und kommunikativ. In den regelmäßigen monatlichen (Online)-Meetings konnte der Arbeitsstand ausgetauscht und die Planung umgesetzt werden.

Der Einbau der notwendigen Messinfrastruktur hat sich aufgrund der Pandemiesituation schwierig gestaltet: Geltende Zugangsbeschränkungen im Hafengebiet und eine geringe Verfügbarkeit von entsprechenden Dienstleistern verzögerten die Infrastrukturmaßnahmen erheblich.

Um diese Verzögerungen abzufangen, wurden Arbeitsschritte soweit möglich vorgezogen, insbesondere die Konzeption und das Design der späteren Benutzeroberfläche. Dennoch war es für das Erreichen der Projektziele notwendig, die Laufzeit des Projektes um 6 Monate zu verlängern, um genügend Daten für das Training des KI-Prognosemodells und die Entwicklung des Entscheidungsunterstützungssystems zu sammeln. Die alternative Extrapolation der Daten einzelner Monate war nicht zielführend, da Saisonalitäten und Trends so nicht erkannt hätten werden können.

Entsprechend war eine kostenneutralen Laufzeitverlängerung notwendig, durch die sich das Projektende vom 31.03.2022 um 6 Monate auf den 30.09.2022 verschob.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Bezogen sich zuvor erfolgte Ansätze des Energiemanagements in europäischen Häfen respektive der Live-Datensammlung und -auswertung zum überwiegenden Teil auf Containerterminals, sollte der Fokus mit dem Projektvorhaben dashPORT auf hafenübergreifende Energiemanagementsysteme in Multi-Purpose Terminals gelenkt werden. Diese waren und sind in der Literatur von einem nachrangigen Interesse, da Containerterminals durch die hohe Anzahl an standardisierten Vorgängen und Terminalequipment leichter zu greifendes Optimierungspotenzial bieten. dashPORT sollte vor allem die Belange von Multipurpose-Häfen wie Brake hinsichtlich ihres Energiemanagements berücksichtigen und eine Gesamtsicht auf alle Verbraucher eines solchen Hafens rollenbasiert ermöglichen.

Heilig et al. (2017) analysierten die digitale Transformation von Häfen. Die Autoren beschreiben IT-Lösungen als wesentlich, um mit den zukünftigen Herausforderungen in Häfen umzugehen. In der Veröffentlichung genannte Beispiele für Smart Ports sind u. a. der Großhafen Rotterdam oder der Containerhafen Hamburg.¹ Bei genauerer Betrachtung dieser Häfen ist hervorzuheben, dass die Themen Energie und Energiemanagement wesentliche Bestandteile der Smart Port Strategie sind (z. B. smartPORT Energy in Hamburg und Smart Energy and Industry in Rotterdam). Veröffentlichungen von Accenture und

Deloitte bestätigten dies.

Energieeffizienz und Lastspitzenreduktion werden als Ziele von Maßnahmen des Lastspitzenmanagements ausgelegt (vgl. Benetti et al., 2015, S. 126). Beide Ziele dienen in Deutschland vor allem der Netzstabilität und damit zunächst den Netzbetreibern und Energieversorgungsunternehmen zur Einhaltung gesetzlicher Regelungen (§§ 4c, 6, 11-16 EnWG).

Zur Optimierung der Energienutzung werden seit je her Optimierungsmodelle wie von Bar-Noy et al. (2009), Della Vedova & Facchinetti (2012) und Robenek et al. (2014) eingesetzt. Das vor Projektstart aufkommende Konzept der Lastvorhersage unter Einsatz von maschinellem Lernen, ermöglicht es Prozesse und Verbräuche gezielter zu steuern, um Lastspitzen in ihrem Auftreten abzuschwächen, den Verbrauch zu senken bzw. möglichst konstant zu halten (Chapaloglou et al., 2019; Chitsaz et al., 2015; vgl. Mohamed et al., 2012; Reihani et al., 2016; Uddin et al., 2018).

Eine Möglichkeit der Prävention von Lastspitzen stellen weltweit seitens der Politik eingesetzte Preismechanismen dar, die den Endnutzer dazu bewegen sollen seinen Verbrauch ausgewogen und effizient zu halten (vgl. U.S. Department of Energy, 2006). Auch heute noch in Deutschland eingesetzt sorgen Preismechanismen dafür, dass die in Anspruch genommene Höchstleistung innerhalb eines Abrechnungszeitraum gesondert betrachtet, höher bepreist wird (§17 Abs. 2 StromNEV).

Lastverläufe von Endnutzerseite aus möglichst konstant zu halten ist dementsprechend in den monetären Anreizen begründet. Am besten erreicht werden kann dies, wenn die Profile der Lasten, die es zu steuern gilt, durch Vorhersagen, basierend auf der Analyse historischer Daten, näherungsweise bekannt sind (vgl. Chapaloglou et al., 2019; vgl. Chitsaz et al., 2015; vgl. Chua et al., 2016; vgl. Kermani et al., 2019; vgl. Uddin et al., 2018).

Die Ergebnisse des Projekts tragen somit zur weiteren Ergründung der Einbindung von Lastvorhersagen in ein Energiemanagementsystem, sowie der Nutzung von fortschrittlichen Technologien wie dem maschinellen Lernen und somit zu der Verbesserung des Potentials des Lastspitzenmanagements bei.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

dashPORT wurde in Zusammenarbeit aller Projektpartner durchgeführt. Zum Konsortium zählen neben dem Fraunhofer CML die Nutzer des dashPORTs, die Hafenumschlaggesellschaft Niedersachsen Ports GmbH und die Terminalbetreiberin J.Müller AG sowie der Forschungspartner OFFIS - Oldenburger Institut für Informatik.

Zu Besprechungen und zur Bewertung der Zwischenergebnisse im laufenden Projekt sowie zur Organisation innerhalb des Vorhabens wurden monatliche Videokonferenzen unter Teilnahme der Projektpartner durchgeführt. Bei Bedarf wurden außerdem persönliche Treffen (Vor COVID Pandemie) und virtuelle Treffen (während COVID Pandemie) mit den jeweiligen Projektpartnern zum fachlichen Austausch der Projektarbeit durchgeführt. Für die effektive Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten wurde vom Fraunhofer CML ein cloudbasierter Datenraum zur Verfügung gestellt, welcher das Projektmanagement auf Distanz hinsichtlich des Austausches, der Verwaltung und der Ablage von Daten, Zwischenergebnissen, Berichten und administrativen Unterlagen wesentlich vereinfacht hat.

2 Eingehende Darstellung dashPORT

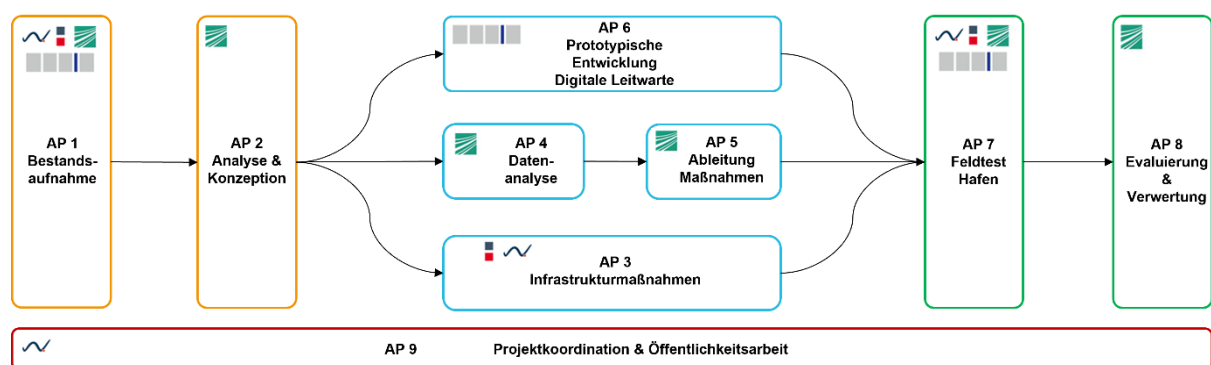


Abbildung 2: Projektstruktur dashPORT

2.1 Die Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen sowie die Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele erfolgt hier anhand der schon in der Vorhabenbeschreibung gegebenen Untergliederung im Strukturplan (Siehe Abbildung 2: Projektstruktur dashPORT).

2.1.1 Arbeitspaket 1: Bestandsaufnahme/IST-Analyse

TAP 1.1 Strukturierung vorhandener Energie und Verbrauchsdaten

Das CML hat sich im Verlauf mehrerer Arbeitstreffen und Telefonkonferenzen mit den Industriepartnern koordiniert und weitgehend unstrukturierte Verbrauchsdaten von den Industriepartnern bereitgestellt bekommen.

Diese Daten wurden nach Verbrauchergruppen und Energieintensität gruppiert, um Optimierungspotenziale sichtbar zu machen. Zähler, die zunächst namenlos waren, konnten durch Gespräche mit den technischen Leitern in ihrer Bedeutung identifiziert, verifiziert und Verbraucherclustern zugeordnet werden.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Datenlage bei den beiden Industriepartnern konnte diese erste Analyse der Daten im Falle der J.Müller AG nur bedingt Aufschluss geben, wo und wann auf der Verbraucherebene die meiste Energie genutzt wird, während sich auf Seiten Niedersachsen Ports GmbH & Co. KG (NPorts) die Netzinfrastruktur, die Verbraucher und die Stromverbräuche sehr detailliert aus Verbraucherfeinen historischen Aufzeichnungen ableiten ließen.

TAP 1.2 Identifizierung der Netzinfrastrukturen und Messpunkte beider Hafenpartner

Auf Basis des TAP 1.2 konnten die Netzinfrastrukturen von den diversen Einspeisungen bis hin zu den Verbraucherpunkten identifiziert werden. Die Identifikation der Messpunkte konnte aus den Ergebnissen des TAP 1.1 abgeleitet werden.

Die Netzinfrastruktur befand sich allerdings im Wandel: Teilweise liefen zu Projektbeginn die Netzinfrastrukturen beider Industriepartner über dieselben Einspeisungen, und Verbräuche wurden zum Monatsende untereinander abgerechnet. Dies ist jetzt durch Änderungen in der Gesetzeslage mit Berichtsaufwänden in prohibitivem Umfang verbunden, so dass im Projektverlauf auf exklusiv genutzte Einspeisungen je Industriepartner umgestellt werden musste und das Hafennetz entsprechend umstrukturiert wurde.

Während diese Änderungen vollzogen wurden, wurde sich eng unter den Partnern abgestimmt, um die veränderte Lage stets akkurat abbilden zu können.

Besonders bei der J.Müller AG wurden ganze Verbrauchergruppen nur von einzelnen

Zählern gesammelt gemessen. Dies war insbesondere in Bezug auf die Silo-Anlagen der Fall, die mit vielen, höchst unterschiedlich leistungsfähigen Verbrauchern ein hohes Optimierungspotenzial durch dashPORT bergen. Hier wurden im Projektverlauf die meisten Smartmeters durch die J.Müller AG verbaut.

TAP 1.3: Aufnahme vorhandener Softwareschnittstellen und Mess-IT-Infrastruktur

Die Aufnahme der Schnittstellen und Mess-Infrastruktur wurde unter der Leitung des OFFIS vollzogen. Das Fraunhofer CML stand bei den entsprechenden Gesprächen unterstützend zur Seite.

2.1.2 Arbeitspaket 2: Analyse & Konzeption

TAP 2.1: Bewertung der Vorhandenen Struktur für Projektzwecke

Um die Verbraucher auf ihr Optimierungspotenzial zu untersuchen, wurden mehrere qualitative und quantitative Kriterien ausgewählt die die Relevanz, Beeinflussbarkeit und Flexibilität des Verbrauchers widerspiegeln. Dazu gehören der Verbrauch (Relevanz), die Verschiebbarkeit des Einsatzes (i.e. ob der Verbraucher eingesetzt wird, um das Tagesgeschäft des Hafens zu ermöglichen/sicherheitsrelevant ist, oder ob der Einsatz zeitlich unkritisch verschoben werden kann) und die Optimierbarkeit. Letzteres ist mit der Frage verbunden ob gewisse Stromverbräuche, obwohl hoch und nicht zeitkritisch überhaupt verändert werden können. Ein Beispiel, wo das nicht der Fall ist, ist etwa der Einsatz von elektrischen Schweißgeräten in der Werkstatt.

Anhand dieser Methodik konnten ganze Verbrauchergruppen ausgeschlossen werden; die Bürogebäude und Werkstätten.

TAP 2.2: Analyse und Bewertung von Hafenprozessen

Zur Erfassung der Hafenprozesse wurde vom Fraunhofer CML zunächst eine ausgiebige Literatur-Recherche durchgeführt, die zum Ergebnis hatte, dass aus Sicht der Forschung bisher keine entsprechende Prozessketten in Vielzweckhäfen aufgenommen und veröffentlicht wurden.

Entsprechend wurde vom CML ein zweitägiger Prozessaufnahmeworkshop organisiert und durchgeführt. Dazu wurden abteilungsübergreifend Mitarbeiter:innen beider Industriepartner sowie die Projektpartner des OFFIS eingeladen. Über den Verlauf des

Workshops konnten die energierelevanten Prozesse im Detail besprochen und erfasst werden.

Im Nachgang wurden die Prozesse in einer Interaktiven Prozesskarte mit dem Tool „Mindjet MindManager 2019“ digitalisiert (Auszug siehe Abbildung 1).

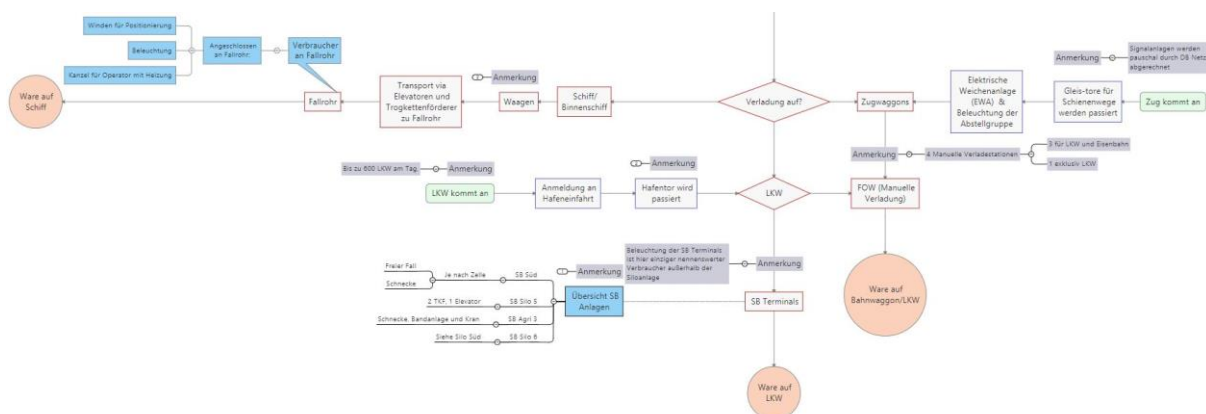


Abbildung 3: Auszug aus Prozesskarte

Die so entstandene Prozesskarte stellt entlang des Umschlagsprozesses alle Strom-nutzen-den Prozesse und Verbraucher der Hafeninfrastrukturgesellschaft sowie des Umschlagsunternehmens dar. Unter der ursprünglichen Prämisse, dass die Netze beider Industriepartner über dieselben Einspeisungen versorgt werden, lassen sich hier einige Optimierungspotenziale und Synergien ableiten. Insbesondere durch die bessere Abstimmung von energieintensiven, aber nicht zeitkritischen Prozessen (z.B. das Schleusen des Binnenhafens) mit den nicht verschiebbaren Energieeinsätzen des Umschlags (z.B. Einsatz der Heber) ließen sich hier Effizienzpotenziale heben. Während die Trennung der Netze diese Möglichkeiten der holistische Optimierung ausschließt, lassen sich aus der Prozesskarte auch partnerinterne Effizienzmaßnahmen ableiten. Beispielsweise auf Seiten J.Müllers durch Verlegung von Mahl- oder Umschichtungsprozessen des Silos in Zeiten in denen kein gleichzeitiger Umschlag stattfindet. Die Erfassung der Hafenprozesse stellte damit die Grundlage für alle weiteren Analysen dar. Sie war zum einen Basis für die Bewertung von Abhängigkeiten und Wechselwirkungen in den Makro Prozessen und zum anderen für die Zuordnung einzelner Verbraucher in die Verbrauchercluster in TAP 2.3. Darüber hinaus stellt die Prozessfassung eine Grundlage für Untersuchungen der Elektrifizierung dar, da sie neben den Prozessen die elektrische Energie nutzen, auch die Prozesse darstellt in denen aktuell noch fossile Energieträger eingesetzt werden.

TAP 2.3: Clustering der Verbrauchsgruppen

Durch die Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete wurden Verbrauchercluster gebildet die für das Projekt relevant sind. Insbesondere auf Seite des Infrastrukturbetreibers NPorts sind die hier ermittelten Verbrauchercluster nahezu 1:1 auf andere Standorte übertragbar. Im Bereich Stückgut trifft das auch bei J.Müller zu. Dahingegen ist die Anbindung der Siloanlage für Schüttgut die von J.Müller betrieben wird zwar in der Methodik übertragbar, jedoch, durch die besondere Komplexität der Siloanlagen im Hafen Brake in dieser Art und Weise wohl nahezu einzigartig.

Eine Übersicht der geclusterten Verbrauchergruppen findet sich in Abbildung 4.

Diese Verbrauchercluster bildeten die Grundlage für TAP 2.4 und sind im Gesamtkonzept der Infrastrukturmaßnahmen dokumentiert.

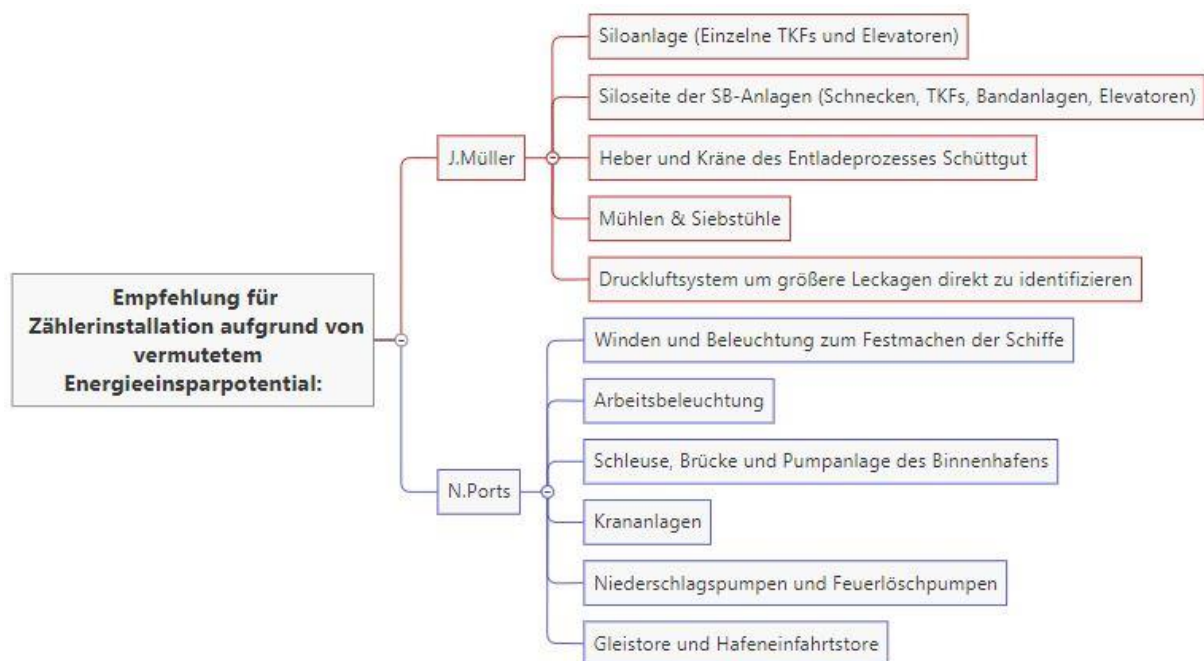


Abbildung 4: Verbrauchercluster relevanter Verbraucher

TAP 2.4 Erstellung Gesamtkonzept notwendiger Infrastrukturmaßnahmen

In TAP 2.4 wurde zunächst seitens der Industriepartner auf Basis der Ergebnisse der wissenschaftlichen Partner und in enger Abstimmung erarbeitet, welche Infrastrukturmaßnahmen notwendig sind um die relevanten Verbraucher in Echtzeit zu messen und welche Schnittstellen geschaffen werden müssen, um die Übertragung der Messdaten im Projekt zu gewährleisten.

Das finalisierte Gesamtkonzept der Infrastrukturmaßnahmen umfasst insgesamt ca. 500 definierte Messpunkte an den elektrischen Verbrauchern und Verteilern der Industriepartner. Die Messpunkte wurden basierend auf historischen Verbrauchsdaten und den erfassten Prozessen im Hafen Brake ausgewählt, die hinsichtlich ihrer Beeinflussbarkeit (zeitliche Verschiebbarkeit sowie Beeinflussbarkeit des Energieverbrauches des Prozesses) und Relevanz (Energieintensität) bewertet und kategorisiert wurden.

Die Zähler wurden je Industriepartner in einem einheitlichen Nummerierungsformat gemappt und die Zählerhierarchie (Einspeisungen, Verteiler, Individueller Verbraucher) hinterlegt, um im weiteren Projektverlauf jeden Messwert konkreten Prozessen zuordnen zu können.

Das Gesamtkonzept wurde in enger Abstimmung mit den Industriepartnern und OFFIS erstellt und dient als Grundlage für die Umsetzung der Infrastrukturmaßnahmen sowie für die spätere Datenanalyse.

2.1.3 Arbeitspaket 3: Umsetzung notwendiger Infrastrukturmaßnahmen

Die im Gesamtkonzept der Infrastrukturmaßnahmen festgelegten Verbraucher wurden von Seiten der Industriepartner mit Smart Metern (intelligenten Stromzählern) ausgestattet.

Die erfassten Daten wurden für den Verlauf des Projektes von den Industriepartnern an OFFIS übermittelt. Für das Fraunhofer CML wurde seitens OFFIS eine VPN-Verbindung eingerichtet, wodurch die entsprechenden Daten abgerufen werden können.

Schiffslisten wurden als wichtige Sekundärdatenquelle für das Prognosemodell definiert, diese wurden von J.Müller als .html-Seite zur Verfügung gestellt.

In diesem Projektschritt traten durch die Corona-bedingten Einschränkungen Verzögerungen auf, da der Zutritt zu den Anlagen und die Verfügbarkeit der Dienstleister eingeschränkt war. Um diese Verzögerungen so weit wie möglich abzufangen, wurden die Arbeiten an Front End und UI des dashPORT vorgezogen.

2.1.4 Arbeitspaket 4: Datenanalyse

Um in den folgenden Arbeitsschritten die Abstimmung zwischen OFFIS und CML

bestmöglich zu sichern, wurde ein wöchentliches Arbeitstreffen zwischen den beiden wissenschaftlichen Partnern eingerichtet in dem der jeweilige Arbeitsstand, Probleme und Implikationen für die Arbeitsschritte des jeweils anderen Partners diskutiert werden.

2.1.4.1 TAP 4.1: Prozess- und Datenzusammenführung, Festlegung des typischen Verbrauchsverhalten

Um das typische Verbrauchsverhalten der Industriepartner abzuleiten, wurde zunächst eine explorative Analyse eines Sub-sets von 3 Monaten der gesamten erfassten Verbrauchsdaten durchgeführt. Nachdem diese noch mehrfach Fehler und Lücken in der Datenerfassung offenbarte wurden diesbezüglich in Kooperation mit den Konsortialpartnern kleinteilig Probleme ermittelt und Lösungen umgesetzt. Um typische Verbrauchsverhalten abzuleiten, wurde anschließend eine deskriptive statistische Analyse des historischen Datensatzes durchgeführt. Ein besonderer Fokus wurde hierbei auf die Bestimmung sog. Off-Thresholds gelegt. Diese Off-Thresholds definieren den Stromverbrauch eines ‚ausgeschalteten‘ Verbrauchers, da ähnlich dem Stand-By-Modus in klassischen Endgeräten auch der Verbrauch von Großverbrauchern, die abgeschaltet sind, häufig nicht null beträgt. Da diese Mindestverbräuche effektiv eine Untergrenze des Optimierungspotenzials darstellen, mussten diese Verbraucherfein bestimmt werden. Dazu wurden die statistischen Minimalverbräuche jedes Verbrauchers bestimmt und in mehreren Gesprächen mit den operativen Expert:innen der Industriepartner validiert.

Von J.Müller wurden Bildschirmaufnahmen der Siloleitwarte im Terminal für die Erfassung der Abhängigkeiten von Verbrauchern innerhalb der verschiedenen Prozessketten bereitgestellt. Anhand der Screenshots wurde eine Matrix erstellt in der von jedem einzelnen zuvor erfassten Zähler der Vorgänger und Nachfolger (wenn vorhanden), innerhalb der Prozesskette maschinenlesbar festgehalten ist. Die Dokumentation der Abhängigkeiten ist notwendig, um zu gewährleisten, dass durch das Ausschalten eines Verbrauchers keine Unterbrechung einer Prozesskette stattfindet, sondern wenn dann, die gesamte Prozesskette zur Abschaltung vorgeschlagen wird. Die Komplexität der Infrastruktur spiegelte sich in dem zeitaufwendigen, manuellen Nachverfolgen des Verlaufs von digital dargestellten Rohrleitungen, Förderbändern bzw. Trogkettenförderern wider (siehe Abbildung 5: Beispiel Datengrundlage für Erfassung von Prozessabhängigkeiten). Eine besondere Herausforderung in der Erfassung stellte hier u.a. die Abbildung desselben Verbrauchers auf mehreren Screenshots in unterschiedlichen Kontexten dar. Dadurch, dass die

Prozessabhängigkeiten und -strukturen nicht aus dem Prozessleitsystem der Siloleitwarte maschinenlesbar ausgegeben werden konnten, ergaben sich Probleme in der Datenauswertung, da die Nachverfolgung der rein visuellen Darstellung eines historisch gewachsenen Systems eine große potenzielle Fehlerquelle darstellt. Um diesen Fehlern bestmöglich vorzubeugen wurden Ergebnisse in Gesprächen mit J.Müller stetig validiert.

Entsprechend konnten durch diese Arbeit die Abhängigkeiten zwischen den erfassten Verbrauchern bei dem Generieren einer Handlungsempfehlung überhaupt berücksichtigt und eine realisierbare Handlungsempfehlung ausgegeben werden (siehe Evaluation).

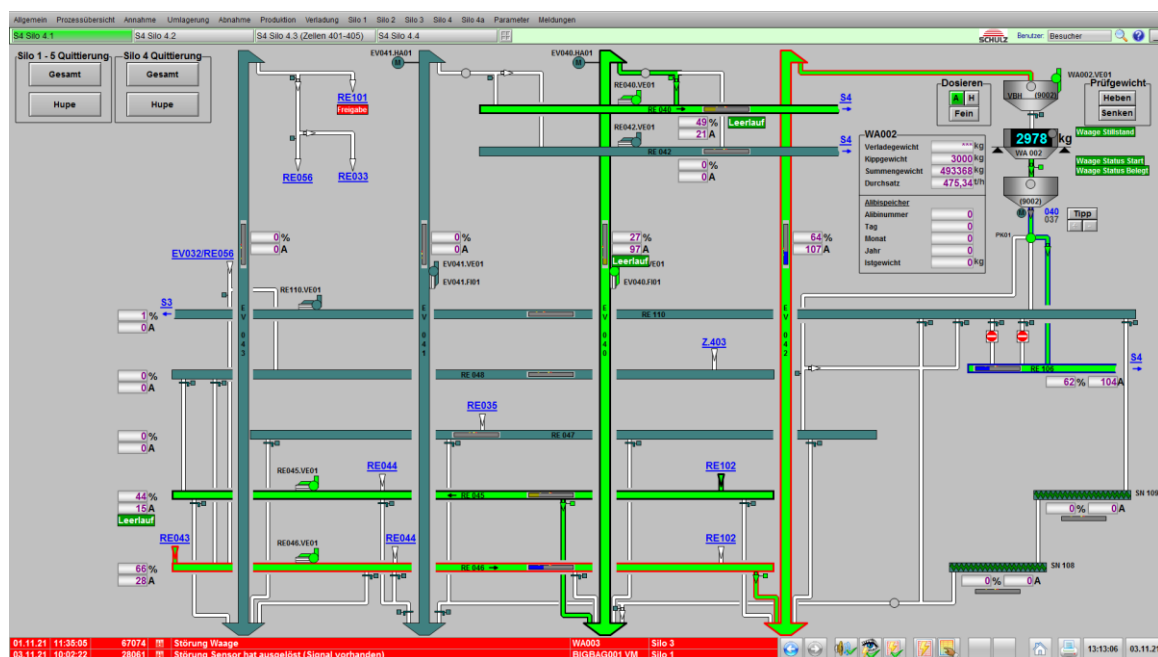


Abbildung 5: Beispiel Datengrundlage für Erfassung von Prozessabhängigkeiten

Das Ergebnis der Analyse waren je Verbraucher definierte Vektoren aus in den Prozessen vor- und nachgeschalteten Verbrauchern, die in entsprechenden Tabellen dokumentiert und den Projektpartnern zur Validierung übergeben wurden.

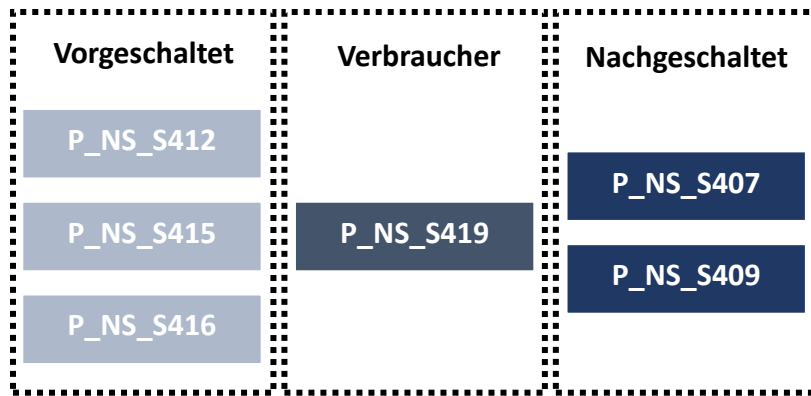


Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung der Vor- und nachgeschalteten Verbraucher/Messstellen am Zähler P_NS_419

2.1.4.2 TAP 4.2: Konzeptionierung Prognoseverfahren

Zusätzlich wurde, ebenfalls um die Prognosegenauigkeit zu erhöhen, eine vorhandene, alte AIS Antenne NPorts' vom CML wieder in Betrieb genommen, um auf diesem Wege Sekundärdaten über die aktuelle Auslastung an den Kajan des Braker Hafens aufzunehmen. In diesem Zusammenhang wurden Geofences der Liegeplätze erstellt sowie ein Programm geschrieben, das die kodierten AIS-Daten dekodiert, auf Plausibilität prüft und anschließend in einem universal lesbaren Textformat an das Produktivsystem übergibt. Eine Analyse dieser Daten lässt es zu die erfassten Verbrauchsdaten, um die Kajenauslastung zum Zeitpunkt der Datenerfassung zu ergänzen. Auf dieser Basis wurden vom Fraunhofer CML Trainingsdatensätze für das Training des Machine-Learning-Modells des OFFIS um die Anzahl der genutzten Liegeplätze erweitert.

2.1.4.3 TAP 4.3: Analyse möglicher Synergieeffekte durch ganzheitliche Hafenbetrachtung

Zu Projektbeginn wurde die elektrische Energie im Hafen Brake über ein ganzheitliches Leitungsnetz verteilt. In diesem Kontext trat NPorts als „Zwischenhändler“ zwischen dem Netzbetreiber EWE und J.Müller auf: Der Strom wurde gesammelt über die Einspeisungen am Niedersachsenkai, dem Althafen und dem Binnenhafen bezogen und über Ringleitungen an die einzelnen Verteiler und Verbrauchergruppen beider Industriepartner verteilt. Dies legte zu Projektbeginn die gesamtheitliche Optimierung der Lastkurven und Stromverbräuche nahe. So konnten auf Basis der Prozesserfassung und der Datenanalyse Potenziale für eine Optimierung

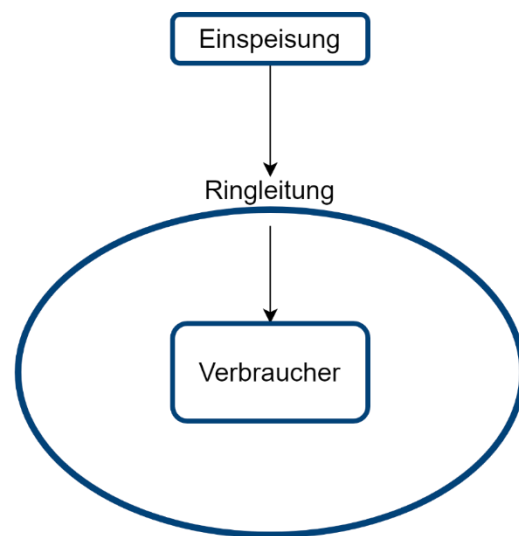


Abbildung 7: Modellhafte Darstellung Ringleitung NPorts

identifiziert werden. Wie dort beschrieben, wurden die größten Potenziale im Bereich des asynchronen Einsatzes von umschlagsrelevanten Großverbrauchern (Heber, Krane, SB-Anlagen) mit nicht umschlagsrelevanten Verbrauchern (Schleuse des Binnenhafens, Pumpwerke) gesehen. Da die Netze der Industriepartner während der Projektlaufzeit getrennt wurden. Darüber hinaus können auf Basis der durch das dashPORT prognostizierten Verbräuche, unregelmäßig durchzuführende energieintensive Prozesse so geplant werden, dass sie in Zeiten von sonst möglichst geringem Strombedarf im Hafen umgesetzt werden können (Z.B. Der Betrieb der Mühlen zur Weiterverarbeitung von gelagerten Schüttgütern oder energieintensiven Prozessen des Infrastrukturerhalts).

Dieses Vorgehen senkt die gesamtbetriebliche Lastspitze und verringert so nicht nur direkte Kosten, sondern leistet ebenfalls den eingangs beschriebenen Beitrag zur Netzstabilität. Diese Funktion wurde auf Basis dieser Analysen als kritisch bewertet und fand entsprechend Eingang in das finale System.

Wegen sich verändernder Rechtslagen, musste das beschriebene Netz schon früh im Projektverlauf dahingehend angepasst werden, dass die Netze von J.Müller und NPorts getrennt werden. Hintergrund war hier, dass die anfängliche gemeinsame Netzkonfiguration mit einer Kategorisierung der Niedersachsen Ports GmbH als

Energieversorgungsunternehmen und somit mit erheblichen Berichtspflichten einhergehend, die von einer Hafeninfrastrukturgesellschaft nicht abbildbar sind. Entsprechend wurden in der Folge die Netze des Terminalbetreibers aus dem Netz NPorts' ausgegliedert. Abgesehen von dieser Änderung, blieb das Netz von NPorts gleich strukturiert, nur die Verbraucher der J.Müller AG wurden an eigene Einspeisungen angebunden. Hier verfolgte J.Müller die Strategie, keine Ringleitung einzusetzen, sondern geografisch gruppierte Verbraucher (Heber, Silos, Hallen etc.) mit jeweils eigenen Einspeisungen zu versorgen (siehe Abbildung 8: Modellhafte Darstellung Netz J.Müller). Entsprechend konnten keine Synergieeffekte zwischen den Hafenpartnern stattfinden, und auch das theoretische gesamtheitliche absolute Optimierungspotenzial nahm ab, da eine Abstimmung der Energieverbräuche nur auf Basis einzelner Einspeisungen erfolgen kann. In Gesprächen mit weiteren Häfen wurde bestätigt, dass getrennte Netze durch die beschriebene rechtliche Lage die Norm sind/werden und mit vergleichbaren Situationen auch in anderen deutschen Häfen gerechnet werden muss. Im positiven Sinne senkt die Trennung der Netze allerdings auch die Komplexität des Optimierungsproblems in den einzelnen Einspeisungen, wodurch die Erstellung und Qualität der Handlungsempfehlungen verbessert werden konnte.

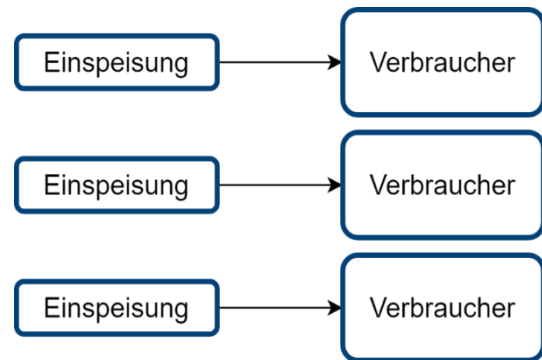


Abbildung 8: Modellhafte Darstellung Netz J.Müller

2.1.5 Arbeitspaket 5: Ableitung von Energieeffizienz- und Flexibilisierungsmaßnahmen

2.1.5.1 TAP 5.1: Energieeffizienzmaßnahmen

Die Industriepartner setzten während der Projektlaufzeit einige Maßnahmen zur effizienteren bzw. emissionsärmeren Nutzung von Energie im Hafen Brake um. Darunter fallen der Ausbau der elektrifizierten Fahrzeugflotte, die Beschaffung energieeffizienterer Geräte, die Anschaffung eigener PV Anlagen zur Stromerzeugung, sowie die Umstellung der Beleuchtung auf LEDS.

Um darüber hinaus Energieeffizienzmaßnahmen aus der Software im späteren Verlauf ableiten zu können wurde untersucht, ob die regelbasierte Erkennung von irregulären Verbräuchen im Kontext von dashPORT umsetzbar ist. Dabei musste schnell festgestellt werden, dass eine Umsetzung im Sinne einer predictive maintenance im vorhandenen zeitlichen Rahmen nicht möglich war, da sie auf zeitintensiven Analysen einzelner

Verbraucher beruhen hätte müssen. Durch die teils stark unterschiedliche Leistung der Verbraucher, je nach konkretem Einsatz, war es ebenfalls nicht möglich je Verbraucher feste Limits zu setzen die auf einen Fehler hinwiesen. Dahingegen konnte in den Gesprächen mit den operativen Mitarbeiter:innen erkannt werden, dass diese aufgrund ihrer Ausbildung/Erfahrungswerte fehlerhafte Systeme schon mit Blick auf die Lastkurve identifizieren können. Entsprechend wurde der Funktionsumfang des dashPORT um eine entsprechende Ansicht erweitert, die es nun den Mitarbeiter:innen ermöglicht auf einfache Art und Weise die Lastverläufe jeglicher Verbraucher des Hafens ortsunabhängig einzusehen und live mitzuverfolgen, um so etwaige Defekte sofort anhand der Lastkurve zu erkennen.

2.1.5.2 AP 5.2: Flexibilisierungsmaßnahmen

Um die Beobachtungen über das Verbrauchsverhalten aus der statistischen Datenanalyse zu validieren und die Ableitung der Handlungsempfehlungen final vorzubereiten wurde ein dreitägiger Workshop mit Beteiligung des gesamten Konsortiums sowie von Mitarbeitenden verschiedener zusätzlicher Gewerke und Positionen im Braker Hafen durchgeführt. Dabei wurden zum einen die Entwürfe der UX/UI vorgestellt, und im Plenum diskutiert.

Dabei wurde auch die vorhandene Einstufung der Beeinflussbarkeit von Verbrauchereinsätzen (Zeitlich sowie Intensität) vertieft in dem die Anwesenden beide Verschiebbarkeitsdimensionen auf einer Skala von 0-5 bewerteten. Auf Basis dieser Einstufung wurden Prozesse und die assoziierten Verbraucher in Kerngeschäft und Nebengeschäftsprozesse, in dringliche und weniger

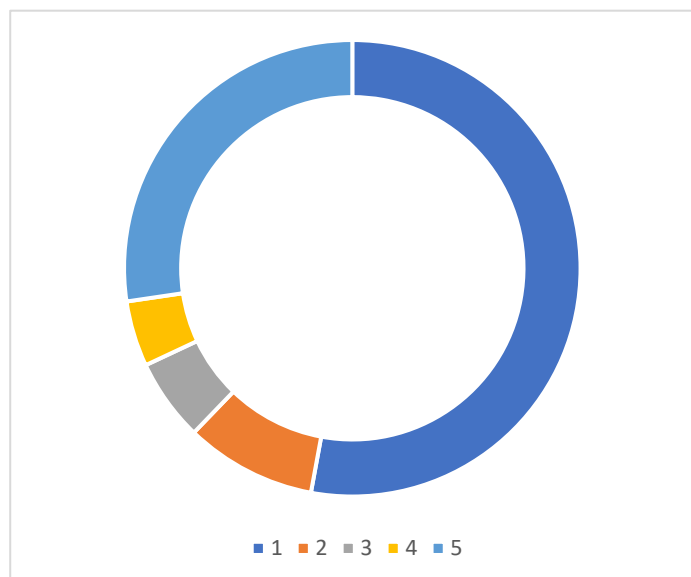


Abbildung 10: Verteilung der Bewertung der zeitlichen Verschiebbarkeit - NPorts

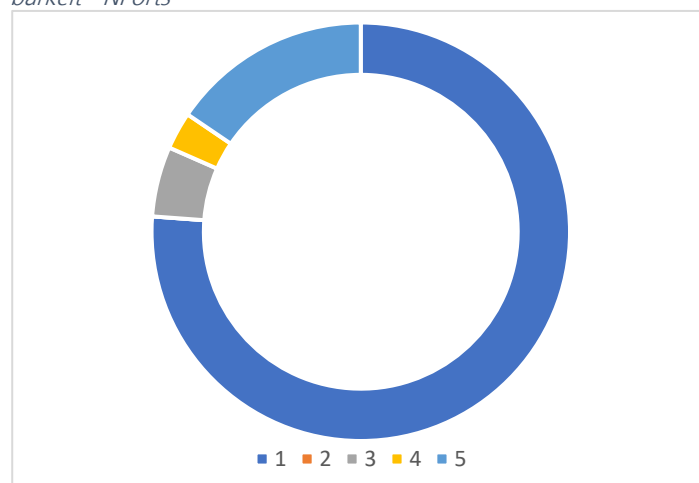


Abbildung 9: Verteilung der Bewertung zeitlicher Verschiebbarkeit - J.Müller

dringliche Prozesse sowie sicherheitsrelevante/essenzielle Prozesse unterteilt. Diese Bestimmung der Verschiebbarkeitsdimensionen wurde genutzt, um eine spätere Priorisierung von einzelnen Prozessen in der Optimierung zu ermöglichen. Während hoch priorisierte Prozesse (sicherheitsrelevante und umschlagsrelevante Prozesse) von dem entwickelten System nicht von Handlungsempfehlungen verschoben werden sollen, sollen dem entgegengesetzt niedrig priorisierte Prozesse bevorzugt zur Verschiebung vorgeschlagen werden.

Die Gespräche mit den Hafenpartnern ergaben, dass durch das dynamische Umfeld in Mehrzweckhäfen, Handlungsempfehlungen ebenso dynamisch aufgebaut sein müssen um operativ auch mittel- und langfristige Relevanz zu zeigen. Um dieser Erkenntnis gerecht zu werden, ist die Datenbasis zu den Verschiebbarkeitsdimensionen so gestaltet worden, dass operative Mitarbeiter:innen diese bei Infrastrukturellen Veränderungen in einfachen Excel Listen anpassen können.

2.1.5.3 TAP 5.3: Wirtschaftliche Betrachtung

Da sich die Netzstruktur im Hafen Brake während der Projektlaufzeit erheblich veränderte, ist keine Vergleichbarkeit der Daten zu historischen Stromverbräuchen nur höchst eingeschränkt gegeben:

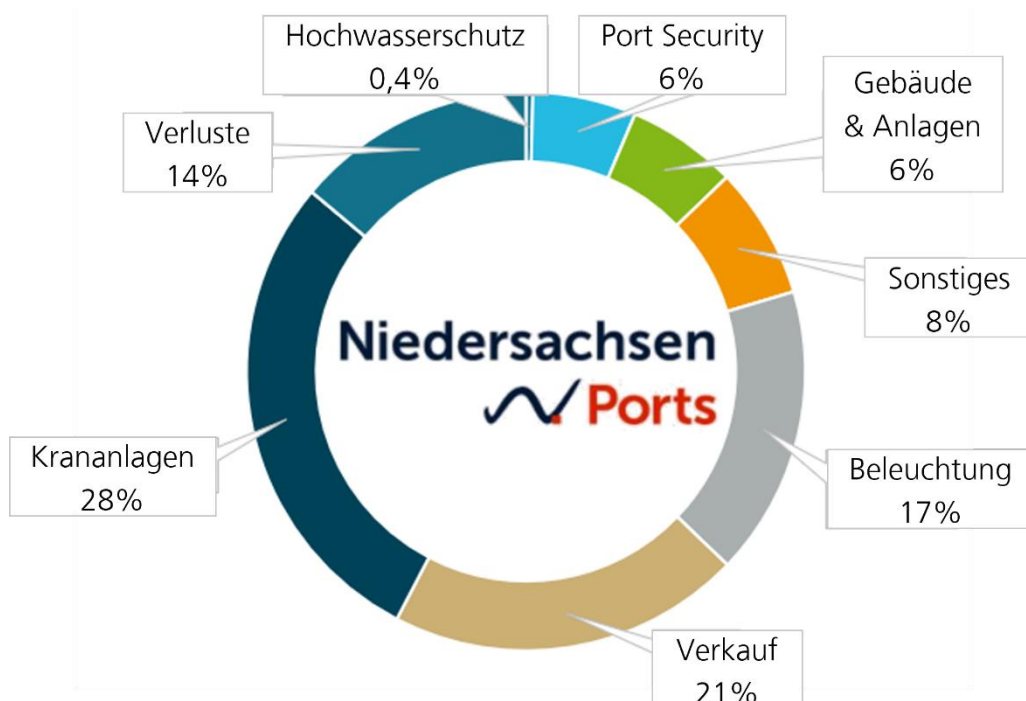


Abbildung 11: Ausgangssituation NPorts – Verteilung des Stromverbrauchs

Wie Abbildung 11 zu entnehmen entfiel zu Beginn des Projektes der Großteil (49%) auf den Verkauf von Strom und den Betrieb der Krananlagen. Dadurch das in der

ursprünglichen Netzkonfiguration die Verbräuche J.Müllers von NPorts eingekauft und die Krananlagen von NPorts gemietet wurden, repräsentiert dieser Prozentsatz weitestgehend die Verbräuche J.Müllers. Durch die Umstrukturierung entfielen diese Verbräuche für NPorts sodass anschließend das größte Optimierungspotenzial im Bereich der Beleuchtung und in den sonstigen Verbräuchen (Beispielsweise Instandhaltungsmaßnahmen) bestand. Auf dieser Basis wurde dem Umstieg der Leuchtmittel auf LEDs ein hohes Einsparpotenzial attestiert, während vor dem Hintergrund der Lastspitzenivellierung vor allem auf bessere Planung irregulärer (i.e. Sonstige) Verbräuche geachtet werden sollte.

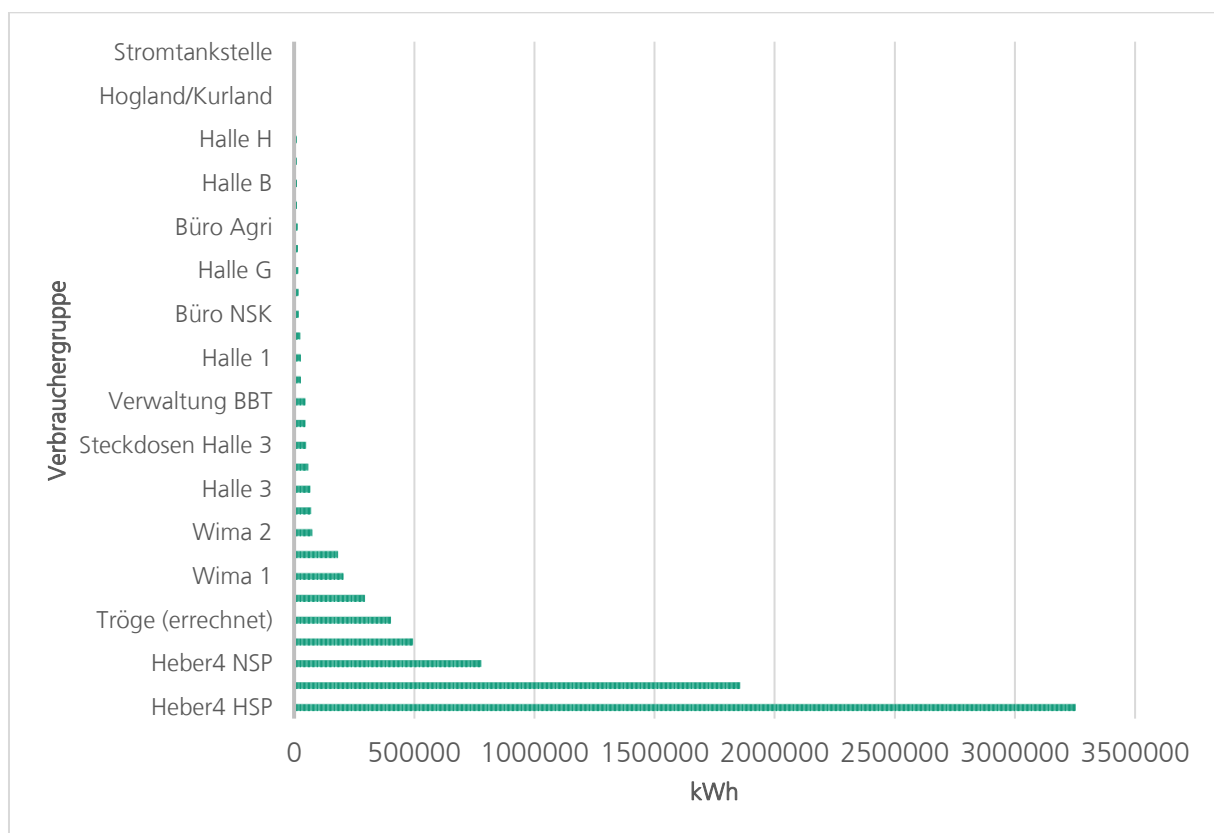


Abbildung 12: Ausgangssituation J.Müller - Verteilung des Stromverbrauchs

Im Fall J.Müllers liegt entsprechend der Analyse der Ausgangslage das größte wirtschaftliche Einsparpotenzial im Bereich der Siloanlagen, in Abbildung 12 repräsentiert durch die Verbrauchergruppen der Heber und Tröge. Da der Einsatz dieser Systeme allerdings direkt das Kerngeschäft des Terminalbetreibers betrifft, ist hier zugleich nur begrenzte Flexibilität vorhanden.

Um quantifizierbare Vergleichswerte für die Erreichung der Zielparameter des Projektes zu generieren wurden alternativ zu den oben gezeigten historischen Datensätzen

vorhandene aggregierte Datensätze auf Einspeisungsebene aus dem Jahr 2019 (nach der Trennung der Netze) für eine Abschätzung möglicher wirtschaftlicher Effekte genutzt.

Nports nutzte im Jahr 2019 an den beiden Haupteinspeisungen rund 1,9 GWh. Die in den Zielparametern des Projektes avisierte Senkung des Stromverbrauchs um 5% entspricht somit einer Senkung des Gesamtverbrauchs um ca. 95 MWh. Dies entspricht bei recherchierten Nettostrompreisen zwischen 10ct und 20ct für die Infrastrukturgesellschaft einer Einsparung von rund 10.000 – 20.000 € pro Jahr. Die für den Abrechnungszeitraum erfassten Lastspitzen lagen in Einspeisung 1 bei rund 430 kW, in Einspeisung 2 bei 276 kW. Um ein theoretisches Optimierungspotenzial zu bestimmen, wurden die je Einspeisung niedrigsten gemessenen Lastspitzen ebenfalls bestimmt und mit dem Maximum verglichen. Hier ergab sich ein theoretisches Potenzial von 205 kW oder 48%, das im Jahr 2019 einer Einsparung der Netznutzungsentgelte von rund 8000€ entspräche. Bei Einspeisung 2 fällt das Optimierungspotenzial prozentual mit 47% fast gleich aus, entspricht jedoch in absoluten Zahlen nur einer Reduktion von 132 kW Spitzenlast die rund 5000€ entsprechen. Gemessen an den aktuellen Strompreisentwicklungen ist davon auszugehen, dass die monetären Entsprechungen dieser Potenziale zukünftig stärker zu Buche schlagen.

Da im Falle J.Müllers die infrastrukturellen Änderungen weitaus umfangreicher waren und erst später abgeschlossen wurden (bzw. noch immer anhalten im Beispiel der beschafften PV Anlage) wurde entschieden spätere Abrechnungen aus dem Jahre 2021 als Basis für die Zielerreichung zu nutzen. Aufgrund der Bitte, die absoluten Energieverbräuche des Umschlagsunternehmens vertraulich zu behandeln, wird sich im Bericht auf relative Aussagen beschränkt.

Erwartungsgemäß entfiel der Großteil der Nutzlast in etwa gleichverteilt auf die Siloanlagen Silo Nord und Silo Süd, ein wesentlich kleinerer Teil (ca. 6% des Gesamtverbrauches) entfiel auf die Hallen, Werkstätte und Bürogebäude. Eine avisierte Senkung des Gesamtverbrauches von 5% über den Gesamthafen hinweg würde mit einer finanziellen Einsparung von geschätzten 80.000 – 170.000€ einhergehen, je nach Nettostrompreis. Lastspitzen variieren zwischen den Einspeisungen stark. Liegen sie im Bereich der Hallen im dreistelligen kW-Bereich, fallen in den siloanlagen Lastspitzen in der Höhe mehrerer MW an. Da die Stromverbräuche des Umschlagsbetriebs direkt abhängig sind von der Umgeschlagenen Gütermenge, ist die Vergleichsbasis für die Energieeffizienzsteigerung der

Energieeinsatz pro Tonne umgeschlagenes Gut. Dieser lag im Jahr 2021 bei 2.65 kWh/t.

2.1.5.4 TAP 5.4: Entwicklung regelbasierter Handlungsempfehlungen

Zur Erstellung von regelbasierten Handlungsempfehlungen wurde ein Optimierungsmodell konzipiert und entwickelt, um schnell für jede Situation im Hafen Brake eine Handlungsempfehlung zur Vermeidung von drohenden Lastspitzen generieren zu können.

Mit den Ergebnissen der Datenanalyse wurden die Optimierungsmodelle für J.Müller und NPorts aufgestellt. Zwei Modelle aufzustellen ist in der unterschiedlichen Komplexität der Verbraucherstrukturen begründet: Im Netz des Terminalbetreibers bestehen Abhängigkeiten innerhalb von Prozessketten, über die Flexibilitätsstufen hinaus. Dieser Umstand wird entsprechend berücksichtigt. Bei NPorts ist dies nicht der Fall, wodurch die Komplexität des Problems in diesem Fall signifikant geringer ist.

Mathematische Formulierung der Optimierungsmodelle:

- Niedersachsen Ports:

Zunächst wird die Teilmenge J gebildet: J ist die Menge aller Zähler i, der Zählermenge I, für die gilt, dass die zählerbezogene Flexibilitätsstufe f_i multipliziert mit der zählerbezogenen binären Entscheidungsvariablen x_i , für die gilt, kleiner gleich dem gesetzten Flexibilitätslimit f_{Limit} sein muss.

$$J = \{i \in I \mid f_i * x_i \leq f_{\text{Limit}}\}$$

Die Zielfunktion des Modells wird folgend definiert:

$$\text{Minimiere } Z = \sum_j x_j$$

Unter den Nebenbedingungen:

$$\sum_{j \in J} x_j * p_j \geq p_{\text{red}} \quad (1.1)$$

$$\sum_{j \in J} x_j * p_j < p_{\text{gesamt}} \quad (1.2)$$

Die Menge N_j beschreibt die Zähler, die mit dem Zähler j über ein- bzw. Ausgangsvektoren verkettet

sind. k beschreibt den Index der Zähler in der Untermenge. $k \in N_j$

$$x_j = x_k \quad \forall j \in J \text{ und } k \in N_j \quad (1.3)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (1.4)$$

p_{gesamt} wird mit „doppelter Bedeutung“ eingeführt. D.h. der Wert kann im Code aktualisiert beziehungsweise zurückgesetzt werden. Einmalig zu Beginn des Algorithmus wird p_{gesamt} als Initialwert betrachtet und auf einen unverhältnismäßig hohen Wert gesetzt (sog. Big M). Nach der ersten Ausführung des Modells wird p_{gesamt} als die zuletzt berechnete Summe aller Einsparungspotentiale definiert und aktualisiert. Ungleichung (1.2) legt fest, dass die Summe der Einzelprodukte aus p_j und x_j kleiner sein muss als p_{gesamt} . Mit dieser Ungleichung wird sichergestellt, dass es eine weitere Lösung nur dann geben kann, wenn der Wert von p_{gesamt} näher an dem Wert der benötigten Lastreduktion liegt als der, der vorherigen Lösung. Ebenso bewirkt diese Restriktion, dass dieselbe Kombination aus Zählern nie mehrmals als Lösung vorgeschlagen werden kann. (1.3) legt fest, dass die Entscheidungsvariablen der Vorgänger und Nachfolger (x_k) eines Zählers gleich x_j sein müssen. So ist sichergestellt, dass eine Prozesskette, nur in Gänze aus- beziehungsweise eingeschaltet wird.

- J.Müller

Das dynamische Setzen eines Flexibilitätslimits entsprechend des verfügbaren Gesamtpotentials innerhalb einer Flexibilitätsstufe ist in diesem Modell nicht möglich, denn wenn beispielsweise:

- die prognostizierte Lastspitze mit dem Gesamtpotential der Stufe 1 (höchste Stufe) verglichen und als ausreichend befunden wurde,
- das Flexibilitätslimit entsprechend auf Stufe 1 (höchste Stufe) gesetzt wird und alle Verbraucher mit höheren Stufen als 1 weiterhin eingeschaltet bleiben und
- danach, wie im vorherigen Modell, die Abhängigkeiten unter den Verbrauchern mit einbezogen werden und
- die Abhängigkeitsrestriktion (4) entsprechend gilt,

bleiben auch Verbraucher der Stufe 1 weiterhin eingeschaltet, obwohl sie eigentlich in

das verfügbare Gesamtpotential zu Abschaltung eingerechnet wurden. Das tatsächlich zur Verfügung stehende Gesamtpotential ist nun aber zu gering ist um die benötigte Reduktion zu erreichen. Es kann passieren, dass bereits ausgeschaltete Zähler (Zählerpotential ist null) aufgrund der Verkettung mit einem Zähler, der eingeschaltet bleibt, mit in die Lösungsmenge aufgenommen werden. Daher legt die Restriktion (2.5) fest, dass das Einsparungspotential eines Zählers p_j größer als null sein muss, damit Zähler j für eine Abschaltung überhaupt betrachtet werden kann. Dazu wird der Wertebereich von p_j in (2.5) auf den positiven reellen Zahlenraum beschränkt. Die geänderte Restriktion im vorherigen Modell zu nutzen wäre, aufgrund der nicht bestehenden Verkettung, redundant gewesen und wurde daher nicht gesetzt. Weitere Unterschiede zum vorherigen Modell lassen sich in der neuen Zielfunktion, sowie in der neu hinzugefügten Restriktion (2.3), als auch anhand der geänderten Variablenindizes erkennen. Die Teilmenge J beschreibt nun die Menge aller Zähler. In der Zielfunktion wird nun die Summe der Teilprodukte aus der Flexibilitätsstufe f_j eines Zählers mit seiner binären Entscheidungsvariable x_j gebildet, so dass eine übergreifende Verkettung zwischen Flexibilitätsstufen möglich bleibt. Gleichzeitig werden durch den zu minimierenden Zielfunktionswert die Zähler mit einer hohen Flexibilitätsstufe (kleinerer Wert von f_j) bevorzugt ausgewählt. In Nebenbedingung (2.3) wird festgelegt, dass die zählerbezogene Flexibilitätsstufe f_j maximal so groß sein darf wie das gesetzte Flexibilitätslimit f_{Limit} .

Zielfunktion:

$$\text{Minimiere } Z = \sum_j x_j * f_j$$

Unter den Nebenbedingungen:

$$\sum_{j \in J} x_j * p_j \geq p_{red} \quad (2.1)$$

$$\sum_{j \in J} x_j * p_j < p_{gesamt} \quad (2.2)$$

$$x_j * f_j \leq f_{Limit} \quad \forall j \in J \quad (2.3)$$

Die Menge N_j beschreibt die Zähler, die mit dem Zähler j über ein- bzw. Ausgangsvektoren verkettet sind. k beschreibt den Index der Zähler in der Untermenge. $k \in N_j$

$$x_j = x_k \quad \forall j \in J \text{ und } k \in N_j \quad (2.4)$$

$$p_j \in \mathbb{R}^+ \quad \forall j \in J \quad (2.5)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (2.6)$$

Die mathematische Formulierung wurde mittels der Skriptsprache Python und den Open Source Bibliotheken NumPy, Pandas und PuLP (siehe Abbildung 13) umgesetzt.

```

1  """ Model_min_meters - Minimize number of chosen meters multiplied with the meter's flexibility, with dynamic flexibility constraints
2  """
3  """This model creates a set of feasible solutions to choose from. It gives the combination of the fewest meters that produces a feasible solution,
4  then runs the analysis again while constraining the maximum total solution by the previous found solution. This is repeated until no feasible solutions can be found
5  """
6  total_hist = big_M
7  solutions_min_meters_dict = {}
8  totals_min_meters_dict = {}
9  iteration = 0
10 status_min_meters = 1
11 while status_min_meters == 1:
12     iteration += 1
13
14     model_min_meters = pl.LpProblem(name="min_meters", sense=pl.LpMinimize)
15     model_min_meters += pl.lpSum([(meter_vars[m]*slide_t[m] for m in meters)]
16                                + pl.lpSum([zero_potentials[z]*-1*slide_t[z] for z in zero_potentials.keys()]))
17     model_min_meters += pl.lpSum(potentials[m]* meter_vars[m] for m in meters) >= reduction
18
19     for i in meters:
20         model_min_meters += slide_t[i]*meter_vars[i] <= 4
21     model_min_meters += pl.lpSum(potentials[m]* meter_vars[m] for m in meters) <= total_hist
22
23     for subset in vec_order_in:
24         for y in range(0,len(subset)):
25             model_min_meters += meter_vars[subset[y]] == meter_vars[subset[y-1]]
26     for subset2 in vec_order_out:
27         for z in range(0,len(subset2)):
28             model_min_meters += meter_vars[subset2[z]] == meter_vars[subset2[z-1]]
29
30     status_min_meters = model_min_meters.solve(pl.PULP_CBC_CMD(msg=True))
31     if iteration == 1:
32         print(model_min_meters)
33     solution,total = show_solution(model_min_meters)
34     solutions_min_meters_dict[iteration] = solution
35     totals_min_meters_dict[iteration] = total
36     total_hist = total*0.999999
37
38 del solutions_min_meters_dict[iteration]
39 del totals_min_meters_dict[iteration]

```

Abbildung 13: Formulierung Lineares Optimierungsmodell in Python mit Hilfe der Bibliotheken NumPy, Pandas und PuLP

Beschreibung des Algorithmus

Zur besseren Verständlichkeit des Abschnitts sind die Definitionen verschiedener Begrifflichkeiten an dieser Stelle erneut aufgelistet.

Lastspitze: Höchster Energiebedarf innerhalb eines Abrechnungszeitraums

Flexibilitätsstufe: Gesetzter Grad der zeitlichen Verschiebbarkeit eines jeden Zählers

Flexibilitätslimit: Gesetzte Grenze der zeitlichen Verschiebbarkeit

Ziel des Algorithmus ist es eine/mehrere Handlungsempfehlungen auszugeben. Diese bestehen aus unterschiedlichen Kombinationen von elektrischen Verbrauchern, deren Abschaltung empfohlen wird. Auf diese Weise werden die Einsparungspotentiale der

übergeordneten Zähler genutzt, um die benötigte Lastreduktion zu erlangen. Aufgrund des Aufbaus des Algorithmus gibt es je nach Kombination, eine unterschiedliche Anzahl von Verbrauchern, die zur Abschaltung vorgeschlagen werden. Auf diese Weise kann die Reduktion durch die Abschaltung eines Zählers mit großem Potential oder aber auch durch die Abschaltung mehrerer Zähler mit kleinerem Potential erreicht werden. Im Optimierungsmodell sind die Entscheidungsvariablen binär. Das Problem ist somit in das Feld der ganzzahligen Optimierung (engl.: Mixed Integer Programming) und im Speziellen in den Bereich der sogenannten 0/1-Programmierung einzuordnen.

In der späteren Anwendung ist es wichtig, die dynamische Programmierung zeitoptimiert durchzuführen, damit die Handlungsempfehlungen so schnell wie möglich ausgegeben und auftretende Lastspitzen bestmöglich reduziert werden können. Deshalb wird ein Solver (engl., dt. - Löser), das heißt, ein Computerprogramm zur Lösung des mathematischen Optimierungsmodells innerhalb des Algorithmus genutzt. Je nach Größe beziehungsweise Komplexität des Problems muss überprüft werden, welcher Solver sich am besten eignet und folgend, welchen Algorithmus der Solver zur Lösung des Modells verwendet.

In diesem Fall wurde der Open-Source Solver der Stiftung „Computational Infrastructure for Operations Research“ (COIN-OR) mit Einbindung des Branch-and- Cut Algorithmus zur Lösung des Optimierungsmodells genutzt. Die Abfolge des Algorithmus ist in Abbildung 14 dargestellt und ist beschrieben wie folgt:

1. Einlesen der Prognosedaten

Die Lastprognose des kommenden 15 Minuten-Intervalls wird eingelesen. Es wird nun geprüft, ob der Prognosewert größer als die zuletzt gemessene Lastspitze ist, welche durch den höchsten Wert des gesamten vergangenen Abrechnungszeitraums definiert wird. Sollte dies der Fall sein, wird fortgefahren. Andernfalls bricht der Algorithmus ab und es wird bis zum Beginn des nächsten Prognoseintervalls gewartet.

2. Limit der einzubeziehenden Flexibilitätsstufe setzen

Für alle zu betrachtenden Zähler werden die Einsparungspotentiale mit der höchsten

Flexibilitätseinstufung summiert und überprüft, ob die nächstniedrigere Flexibilitätsstufe zusätzlich miteinbezogen werden muss, um die benötigte Reduktion zu erreichen. Anhand dessen wird das Limit der einzubeziehenden Flexibilitätsstufen gesetzt.

3. Minimierungsproblem

- a) Zielfunktion: Die Anzahl der abzuschaltenden Zähler muss minimal sein
- b) Nebenbedingungen:
 - i) Summe aller Zählerpotentiale muss mindestens so hoch wie die benötigte Lastreduktion sein
 - ii) Für jeden ausgewählten Zähler muss gelten, dass seine Flexibilitätsstufe, kleiner als das gesetzte Limit ist (vgl. Menge J)
 - iii) Für jede Lösung beziehungsweise Zählerkombination muss gelten, dass das Gesamtpotential kleiner als das der vorherigen Lösung und dennoch zulässig ist
 - iv) Für jede Entscheidungsvariable eines Zählers in dem Model muss gelten, dass sie den gleichen Wert $[0;1]$ wie ihr Vorgänger beziehungsweise ihr Nachfolger annimmt, um die Abhängigkeiten in der Prozesskette zu berücksichtigen

4. Solver löst das Modell mittels wiederholten Ausführens eines Branch-and-Cut Algorithmus

- a) Wenn eine optimale Lösung unter Berücksichtigung der Nebenbedingung iii. gefunden wurde, wird der Algorithmus neu gestartet.
- b) Wenn keine weitere optimale Zählerkombination unter Berücksichtigung der Nebenbedingung iii. gefunden werden kann, wird die Lösungsmenge der verschiedenen Zählerkombinationen als Handlungsempfehlung ausgegeben.

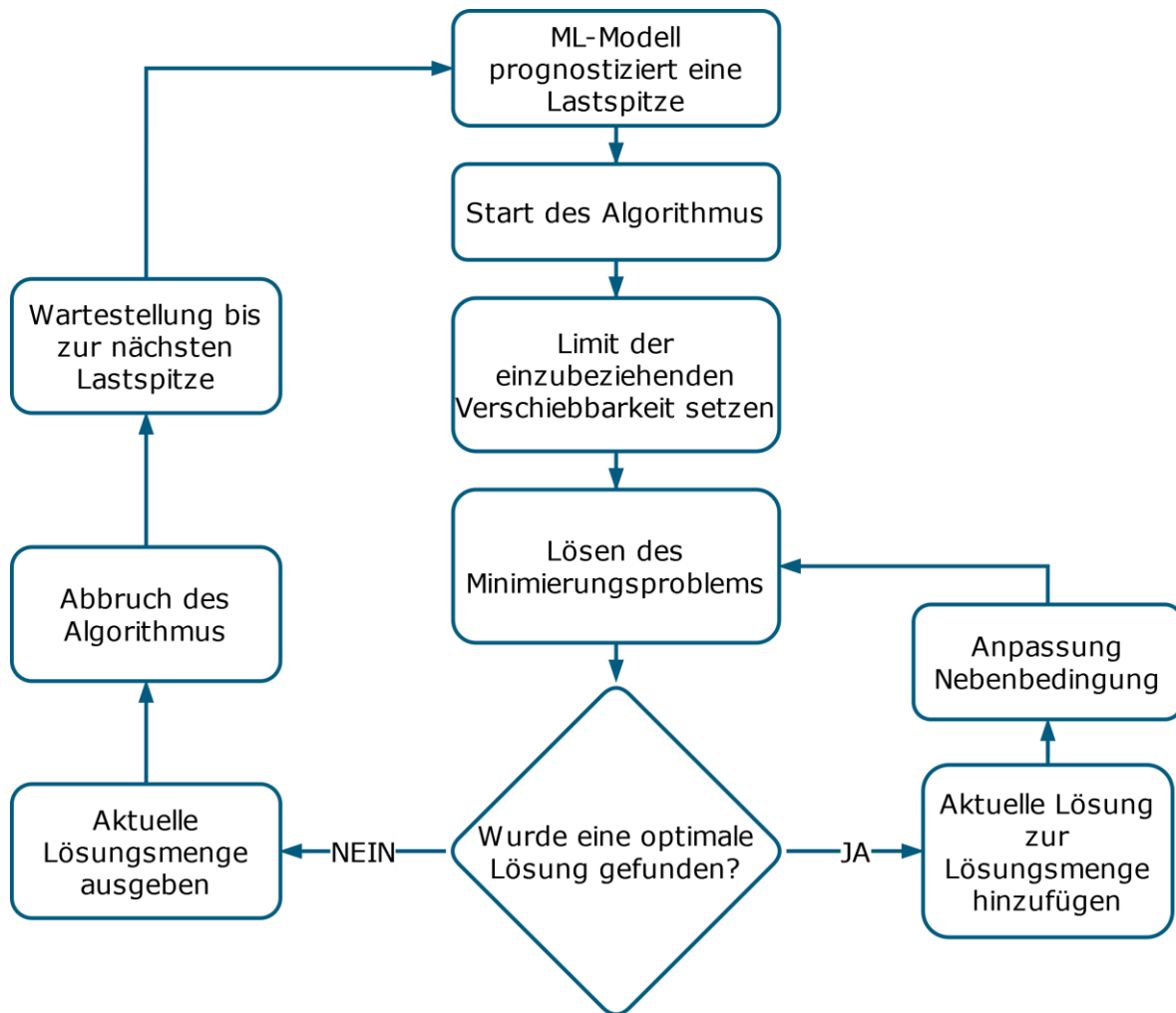


Abbildung 14: Ablaufdiagramm der Generierung der Handlungsempfehlungen

In 100 Durchläufen des Algorithmus konnte eine minimale Zeit von 1,24735 Sekunden und ein Höchstwert von 1,6975 Sekunden beobachtet werden. Der reine Zeitanteil der mathematischen Optimierung blieb immer unter einer Sekunde. Der Algorithmus wurde in Python umgesetzt und an das OFFIS zur Integration in die Software übergeben.

2.1.6 Arbeitspaket 6: Prototypische Entwicklung Digitale Leitwarte

Gemeinsam mit OFFIS wurden drei Workshops zu Features und Design der Benutzeroberfläche durchgeführt und die Ergebnisse mit den Industriepartnern abgestimmt.

Dabei wurden in einem ersten Schritt die Anforderungen der Industriepartner aufgenommen und von den Forschungspartnern validiert. OFFIS erstellte in Abstimmung mit Fraunhofer CML eine prototypische Benutzeroberfläche, die iterativ mit den Industriepartnern abgestimmt und angepasst wurde.

Fraunhofer CML entwickelte zusammen mit OFFIS weitere Anforderungen an die Nutzeroberfläche, insbesondere bzgl. Der Detailansichten der Lastverläufe, die die historische Nachvollziehbarkeit der Lastverläufe auf Prozessebene und Verbraucherebene vereinfachen sollen. Außerdem wurde ein Konzept zur Bereitstellung der zu entwickelnden Handlungsempfehlungen im dashPort entwickelt, dass dem Nutzer ermöglichen soll, seine Optionen schnell und eindeutig zu erfassen, Handlungsempfehlungen anzunehmen oder auch abzuweisen.

Weiter wurden Features, die die Übertragbarkeit des Systems sicherstellen sollen, definiert. Allen voran soll innerhalb des dashPORT ermöglicht werden, dass die im System getrackten Verbraucher jederzeit mit geringem Aufwand erweitert oder reduziert werden können.

2.1.7 Arbeitspaket 7: Feldtest Hafen

2.1.7.1 TAP 7.1: Integration Gesamtsystem

Nach einer ersten Testreihe von Seiten der wissenschaftlichen Partner OFFIS und Fraunhofer CML, die die Funktionalität des dashPORT bestätigte, wurde das prototypische System an die Industriepartner übergeben.

2.1.7.2 TAP 7.2: Schulung Mitarbeiter:innen

Diese Übergabe fand im Rahmen eines Workshops unter der Leitung von OFFIS und Fraunhofer CML mit dem avisierten Nutzerkreis der beiden Industriepartner statt. Dieser hatte zum einen den Zweck die Mitarbeiter:innen im Umgang mit diesem System zu Schulern, als auch die zu erwartenden Stärken und Schwächen des Systems zu diskutieren. Vor diesem Hintergrund wurde die Benutzeroberfläche den Teilnehmer:innen vorgestellt und die Funktionen und Funktionsweise der Software demonstriert. Anschließend wurde das System für den operativen Test im laufenden Betrieb freigegeben.

2.1.7.3 TAP 7.3: Anwendungstest

Die digitale Leitwarte wurde im Betrieb getestet. Das CML überwachte die Umsetzung von Handlungsempfehlungen und Maßnahmen, die die Leitwarte in bestimmten Situationen empfiehlt. Die Funktionalität der Software wurde im Echtbetrieb getestet. Gefundene Fehler wurden umgehend vom OFFIS behoben und Lösungen im Echtbetrieb erprobt. Die Art der vom System ausgegebenen Handlungsempfehlungen hing im Test stark

von der gewählten Einspeisung ab, die jeweils unterschiedliche Optimierungspotenziale bieten. Eine beispielhafte Beschreibung eines solchen Vorgangs ist folgend beschrieben:

Angenommen das Machine-Learning Modell prognostiziert einen Verbrauch von 399,7365 Kilowatt in den nächsten 15 Minuten. Die höchste bisherige Lastspitze betrug 381,5874 Kilowatt. Es ist somit eine Erhöhung der Lastspitze zu erwarten die verhindert werden soll. Der Algorithmus wird gestartet und die benötigte Reduktion von 18,1626 Kilowatt berechnet. Das Flexibilitätslimit wird geprüft und auf Stufe 4 gesetzt. Das Optimierungsproblem wird gelöst und als Ergebnis werden 9 möglichen Zählerkombinationen ausgegeben, von denen eine ausgewählt werden kann um die prognostizierte Lastspitze zu nivellieren. Da der Eingriff in den Betriebsauflauf möglichst minimal gehalten werden soll erzeugt der Optimierungsalgorithmus dabei zunächst Empfehlungen, die eine möglichst kleine Anzahl an Verbrauchern betreffen und die Lastspitze vermeiden könnten. Diese ersten Empfehlungen gehen mit vergleichsweise großen Reduktionen des Stromverbrauchs einher, die meist weit über der benötigten Reduktion liegt, dafür aber schnell umsetzbar ist (Meist soll nur ein einziger Verbraucher kurzfristig abgeschaltet werden). Nach und nach werden Empfehlungen generiert die zwar mehr Verbraucher umfassen, deren Gesamtreduktion näher an der Höhe der erwarteten Lastspitze liegen.

Im genannten Beispiel besitzt die erste mögliche Handlungsempfehlung ein Gesamtpotential von gerundet 27,85 Kilowatt durch nur einen zur Abschaltung vorgeschlagenen Verbraucher. Die letzte gefundene optimale Zählerkombination schlägt 11 Verbraucher mit einem Gesamtpotential von gerundet 18.16379806 Kilowatt zur Abschaltung vor. Die Diskrepanz zwischen der benötigten Reduktion und dem vorgeschlagenen Gesamtpotential beträgt nur gerundet 0,0013 Kilowatt, die zu viel abgeschaltet werden würden. Dennoch wäre eine neue Lastspitze in diesem Fall vermieden worden.

2.1.8 Arbeitspaket 8: Evaluierung und Verwertung

2.1.8.1 TAP 8.1: Evaluierung Anwendung und Maßnahmen

Zur Evaluation des Projektes wurden zunächst qualitative Interviews mit den operativen Mitarbeiter:innen beider Industriepartnern durchgeführt. Anschließend wurden die Stromrechnungen der Abrechnungszeiträume 2019 und 2022 auf Einspeisungsebene verglichen um quantitative Auswirkungen auf Stromverbrauch, Lastspitzen und Kosten über den Projektverlauf zu erfassen.

Qualitative Evaluation:

Live Monitoring

- NPorts:

Das Live Monitoring erfüllt den angedachten Zweck: Die unkomplizierte und intuitive Erkennung von fehlerhaften und irregulären Verbräuchen. Auffällige Verbräuche können auch in Verbindung mit der Reportingfunktion in einen historischen Kontext gesetzt werden. Das dashPORT unterstützt so direkt in der Lokalisierung und Behebung von Fehlern und trägt direkt zu einer effizienteren Nutzung von Energie und erhöhter operativer Resilienz bei. Ein häufig genannter Sekundäreffekt ist, dass das Live Monitoring Energieverbräuche und ihre prozesslichen Auslöser greifbar und intuitiv darstellt. Dies wird genutzt um auch nicht-technischen Mitarbeiter:innen ein Gefühl für die Nutzung von Energie im Hafen zu vermitteln und für das Thema eines bewussteren Umgangs mit elektrischen Verbräuchen zu sensibilisieren.

- J.Müller

Auch auf Seiten J.Müllers wird das Monitoring für die Identifikation und Verortung von Fehlverbräuchen erfolgreich eingesetzt. Ebenso wird hervorgehoben, dass die Visualisierung Transparenz schafft und hilft Mitarbeiter:innen die energetischen Konsequenzen ihrer Handlungen eindeutig zu kommunizieren und sie für diese Thematik zu sensibilisieren. In den Gesprächen konnte allerdings auch herausgearbeitet werden, dass weitere Informationen zu den Verbrauchern und den assoziierten Prozessen die Qualität noch erhöhen würden. Beispiele für solche Informationen sind Leistungsdaten der Antriebe sowie Charakteristika des aktuell umgeschlagenen Produkts. Diese Informationen könnten die Interpretation der Lastkurven noch vereinfachen und die Abhängigkeit von Erfahrungswissen der operativen Mitarbeiter:innen zu verringern.

Handlungsempfehlungen zu Lastspitzen

- NPorts:

Die vom dashPORT generierten Handlungsempfehlungen sind stets plausibel und es ist intuitiv eigenes Prozesswissen einzubringen, um aus den Handlungsoptionen die situativ

passende auszuwählen. Insbesondere die Visualisierung der durch die Handlungsempfehlung veränderten Lastkurve hilft die einzelnen Empfehlungen zu verstehen und zu bewerten und unterstützt die Entscheidungen direkt. Kritikpunkt ist, dass über das System nicht direkt steuernd eingegriffen werden kann. Angenommene Handlungsempfehlungen müssen zunächst aus der Leitwarte an die richtigen Mitarbeiter:innen kommuniziert und dann von diesen umgesetzt werden. Dies führt teilweise zu Verzögerungen in der Umsetzung.

- J.Müller

Während die generierten Empfehlungen in der Theorie plausibel und richtig sind, würde das System im Einsatzbereich der Siloanlage signifikant von der Anbindung an ein Prozessleitsystem und einer dynamischen Priorisierung profitieren. In diesem Hafenbereich treten momentan Handlungsempfehlungen auf, die aufgrund von operativen Zwängen (Kerngeschäft) so nicht umsetzbar sind. Beispiel für eine solche nicht umsetzbare Handlungsempfehlung ist beispielsweise das Abschalten eines Verbrauchers dessen direkte Abhängigkeit von den Hebern nicht richtig werden konnte. Hintergrund für diese Fehler ist eine historisch gewachsene und nur visuell digitalisierte Datenbasis der Verbraucherabhängigkeiten, die die korrekte Aufnahme der Interdependenzen erschwerte. Auch weil diese Abhängigkeiten je nach Prozess im laufenden Betrieb wechseln können. Durch die genannte Anbindung an ein Prozessleitsystem könnten solche Problemstellungen effektiv verhindert werden.

Reporting

- NPorts:

Die Reportingfunktion wurde auf direkten Wunsch der Industriepartner mit aufgenommen und wird entsprechend gut angenommen. Die Erstellung eines Reports über jegliche Zeiträume auf Knopfdruck ersetzt einen ehemals händischen Prozess der Berichtserstellung. Während mit dem händischen Prozess ein jährlicher Zeitaufwand von ca. 2 Personenmonaten entstand, ist dieser Aufwand durch das dashPORT auf eine Woche reduziert worden.

- J.Müller

Da J.Müller zusätzlich die Energiemanagementsoftware ACRON einführt wird die Reportingfunktion des dashPORT vor allem zur historischen Nachvollziehung der Lastspitzen eingesetzt. Direkte Vergleiche zwischen den erfassten Werten im dashPORT und der Messwerte in ACRON belegen, dass das dashPORT korrekte Messungen und Ergebnisse liefert, die historische Nachvollziehung der Lastspitzen jedoch im dashPORT intuitiver funktioniert.

Planungsfunktion

- NPorts:

Für NPorts löst die Planungsfunktion des dashPORT die schwierige Aufgabe der Planung von irregulären Energieintensiven Prozessen. So können diese Aufgaben bewusst in Zeiten niedrigen Stromverbrauchs gelegt werden, wodurch sichergestellt wird, dass auch nicht zu prognostizierbare Verbräuche keine Lastspitze auslösen. Die Darstellung von Minimal-, Maximal- und Durchschnittsverbräuchen in der aktuell prognostizierten Lastkurve ist ausreichend, um auch in Kombination mit limitiertem Erfahrungswissen den Verbrauch in ausreichender Genauigkeit abschätzen zu können.

- J.Müller

Im Falle J.Müllers ergaben die Interviews, dass Energieverbräuche für das Umschlagsunternehmen meistens umschlagsbezogen anfallen und das Kerngeschäft darstellen. Dadurch sind Verbrauchereinsätze oft zeitlich nicht verhandelbar. Entsprechend ist es oft nicht möglich die Planungsfunktion sinnvoll einzusetzen, da der Einsatz energieintensiver Verbraucher alternativlos ist. Auch hier könnte die Anbindung an ein Prozessleitsystem Verbesserungen mit sich bringen: Produktparameter (Dichte, Form, etc.) beeinflussen den Stromverbrauch der eingesetzten Systeme vergleichsweise sehr stark, wodurch die Spanne zwischen dargestelltem Maximal- und Minimalverbrauch groß, und weniger aussagekräftig wird. Könnten aktuell umgeschlagene Produkte an das System kommuniziert werden, könnten produktabhängige Statistiken erhoben werden und Eingang in die Planungsfunktion finden.

Benutzeroberfläche

Die UX/UI wurde von beiden Industriepartnern sehr gut angenommen. Die Oberfläche ist intuitiv bedienbar und hoch performant, Informationen können schnell erfasst werden, Handlungsempfehlungen, Monitoring-, Planungs- und Reportingfunktionen sind durchweg eingängig und verständlich dargestellt. Die Evaluation unterstreicht die Hypothese, dass eine intuitive und minimalistische Benutzeroberfläche die Akzeptanz von neuen IT-Lösungen erheblich steigert, da Einstiegshürden in Verbindung mit der Bedienung gar nicht erst entstehen. Stattdessen wird so Transparenz und Fachwissen vermittelt.

Quantitative Auswirkungen

Während die vielen infrastrukturellen Veränderungen im Hafen die historische Vergleichbarkeit begrenzen, kann im Sinne der definierten Zielparameter dem Projekt Erfolg attestiert werden: Auf Seiten Nports wurden 179 Messpunkte identifiziert und ausgerüstet, bei J.Müller waren es 277 Messpunkte.

Nports konnte über den Projektverlauf den Gesamtenergieverbrauch um rund 22 % senken. Rund ein Viertel dieser Senkung wurde in den Interviews den Impulsen aus diesem Forschungsprojekt sowie dem dashPORT selbst zugesprochen. Die verbleibenden Einsparungen hängen insbesondere mit dem Wechsel der Leuchtmittel zusammen.

Auch wenn die Nivellierung der Lastspitzen nicht das komplette bestimmte Potenzial ausschöpfen konnte, wurde in Einspeisung 1 eine Reduktion der Lastspitzen um 18% und an Einspeisung 2 um 26% erreicht. Im direkten Vergleich mit 2019 wurde so eine monetäre Einsparung von insgesamt rund 81.000€ erreicht, wobei davon ca. 6000€ auf die Nivellierung der Lastspitzen entfallen. Besonders hervorzuheben ist die Analyse der Varianz der Lastspitzen: Während diese zu Beginn des Projektes monatlich stark fluktuierten, war 2022 über alle Einspeisungen hinweg die monatlich höchste abgerechnete Lastspitze konstant, es traten also keine unvorhergesehenen Lastspitzen mehr auf, die Planbarkeit der maximalen Last der Infrastrukturgesellschaft und somit die Netzdienlichkeit wurde optimiert. Dies ist zum einen der Abgabe der stark variierenden Lasten des Kranbetriebs, zum anderen der Nutzung der Planungsfunktion des dashPORTs zuzuschreiben.

Während bei J.Müller der Gesamtverbrauch elektrischer Energie im Verlauf des Projektes um rund 7% zunahm ist die Energieeffizienz im Verhältnis zur Umschlagsmenge zu betrachten. Diese stieg, stärker als der Energiebedarf, um rund 20%. Im Verhältnis zur

eingesetzten Energie bedeutet dies, dass die aufgewendete Energie pro Tonne umgeschlagenes Gut von 2,65 kWh auf 2,22 kWh reduziert werden konnte. Dies entspricht einer Steigerung der Energieeffizienz von rund 16% seit Einführung des dashPORT. Da mit der gesteigerten Umschlagsmenge auf effektiv dem selben Raum eine zeitliche Verdichtung der Arbeiten einherging, war die Optimierung der Siloanlagen durch zeitliche Verschiebung von Prozessschritten nur sehr eingeschränkt möglich. Entsprechend stiegen die Lastspitzen in absoluten Zahlen. Die kleinste Zunahme im Silo Süd, lag bei nur 1%, während die größte Steigerung mit 42% im Silo Nord zu beobachten war. Nichtsdestotrotz konnten die zu zahlenden Netznutzungsentgelte um 36% und somit signifikant gesenkt werden.

2.1.8.2 TAP8.2: Strategische und operative Handlungsempfehlungen für weitere Interessensgruppen

Strategische Handlungsempfehlungen

Für die Umsetzung einer intelligenten Energieleitwarte oder vergleichbarer Systeme ist eine digitalisierte Infrastruktur eine wichtige Grundvoraussetzung. Hier ist es von Vorteil solch eine Infrastruktur, wo möglich, schon beim Bau einzuplanen, sodass keine hohen Zeit- und Kostenaufwände für eine spätere Nachrüstung entstehen.

Darüber hinaus erhöhen regelhaft ausgelöste und möglichst zentral gesteuerte Prozesse die Optimierbarkeit auch über energetische Prozesse hinaus. Idealerweise sollte ein Prozessleitsystem eingeführt werden um Informationsflüsse über Prozesse zentral steuern und an weitere Systeme weitergeben zu können. Ein solches System bietet dann die ideale Datenbasis um aufbauend algorithmische Prognosen und Optimierungen durchzuführen.

Ferner ist Energiekosteneffizienz häufig eine Frage der strategischen Energiebezugsentscheidungen. Wo möglich, sollte eigene Energie produziert und in Energiespeichersystemen, oder auch beispielsweise in Akkus einer elektrisierten Fahrzeugflotte vorgehalten werden, um Verbräuche abzufedern, auch hier bietet die Verbrauchsoptimierung über eine intelligente Energieleitwarte das Potenzial die entsprechenden Speichersysteme optimal einzusetzen und so die zu erwartenden Kostenvorteile zu maximieren.

Operative Handlungsempfehlungen

Für den operativen Betrieb ist eine zentrale Erkenntnis, dass große Veränderungen stets mit dem kleinsten Glied in der Kette beginnen. Entsprechend sollte das operative Personal geschult werden, um für Energieeffizienzthemen sensibilisiert zu werden. Das live-monitoring des dashPORT ist beispielsweise ein mächtiges Werkzeug um die energetischen Zusammenhänge eines Betriebes anschaulich und einfach verständlich zu kommunizieren. Die Folge ist häufig ein bewussterer Umgang mit Energie und, nachgelagert, die Entwicklung jeweils eigener Ideen und Verhaltensweisen zur Steigerung der Energieeffizienz die wiederum das Unternehmen als Ganzes bereichern.

Gleichzeitig sollte aus anderer Richtung ein System geschaffen werden, in dem individuell entwickelte Ideen zur Steigerung der Energieeffizienz erfasst, bewertet und belohnt werden, um diese anschließend in allgemeingültige Regelwerke oder Prozessleitlinien zu übersetzen.

Ein Beispiel für ein solches System sind die Azubi-Projekte NPorts', in denen die Auszubildenden eigene Projektideen zur Steigerung der (Energie-)Effizienz der Infrastrukturgesellschaft entwickeln und einbringen können.

2.1.8.3 TAP 8.3: Übertragbarkeit auf weitere Systeme

Der Datenerfassung voran ging eine Nachrüstung von digitalen Stromzählern in der Infrastruktur. Die anschließende Aufbereitung und Analyse der übermittelten Daten sowie das Erstellen der notwendigen Übersichten von Verbraucherstrukturen war langwierig und häufig initial fehlerbehaftet. Im Speziellen dauerte die Umsetzung der Infrastrukturmaßnahmen und die korrekte Erfassung der Abhängigkeiten innerhalb der einzelnen Prozessketten besonders lange an. In letzterem Fall mussten die Übersichten von Hand erstellt werden, da es vollständig digitalisiertes Prozesssteuerungssystem gab. Unentdeckte Fehler in der Datengrundlage können dafür sorgen, dass das Modell im späteren Verlauf suboptimale Ergebnisse liefert.

- Daher sollte für die Nutzung eines Energiemanagementsystems, während des Aufbaus der Verbraucherstrukturen, wenn möglich, eine automatische Erfassung der Prozessstrukturen genutzt werden, um spätere Fehler zu vermeiden. Auf diese Weise kann Zeit gespart und die Vollständigkeit und Richtigkeit der Daten sichergestellt werden.

In dashPORT verfolgte Kriterien bei der Auswahl des Ansatzes zur Problemlösung waren Aufwand der Implementation, Robustheit des einzusetzenden Solvers und Geschwindigkeit der Lösungsfindung.

- Im Falle von Unklarheit über die Problemgröße und -schwere kann zunächst versucht werden, Einschätzungen nach der Komplexitätstheorie über „untere und obere Schranken“ (minimal und maximaler Ressourcenbedarf) des Problems zu treffen. Des Weiteren kann versucht werden eine Kategorisierung nach der Lösbarkeit des Problems in Polynomialzeit zu treffen und so die möglichen Methoden einzuschränken.

Während ersten Simulationen im Validierungsprozess mit eigens zufällig generierten Testdatensätzen konnten erste Fehler behoben werden. Durch den darauffolgenden Einsatz von historischen Datensätzen wurden weitere Fehler korrigiert, die durch die verbesserte Realitätsnähe des Modells aufgedeckt wurden.

- Wenn bereits historische Echtdatensätze zu Beginn der Modellentwicklung bestehen, wird empfohlen, diese zu nutzen, um von Anfang an vermeidbare Fehler zu umgehen. Zusätzlich können zufällig generierte Testdatensätze die Robustheit des Modells bestätigen, wenn die Ergebnisse entsprechend des Inputs geprüft werden.

Während abschließender Tests wurden optimale Lösungen des zugrundeliegenden Optimierungsproblems erreicht.

- Sollte sich das Optimierungsproblem durch eine zu komplexe zugrundeliegende Verbraucherstruktur nicht optimal lösen lassen, könnten Heuristiken (Bspw. Genetische Algorithmen) eingesetzt werden, um zulässige, aber nicht optimale Lösungen in annehmbarer Zeit zu generieren. Diese können dann wiederum auf Validität untersucht und für die Umsetzung bewertet werden.

Die Lösungen wurden in Form von Handlungsempfehlungen ausgegeben, können durch verantwortliches Personal bewertet und anschließend von operativen Mitarbeiter:innen umgesetzt werden. Auf diese Weise kann das übergeordnete Ziel der Kostenminimierung durch Lastspitzenreduktion erreicht werden. Die Folgewirkungen des wieder Einschaltens der Verbraucher sind ebenfalls im dashPORT durch die Planungsfunktion ersichtlich. Die

sich verändernden Lastverläufe durch den durchschnittlichen und maximalen Leistungsbedarf eines einzuschaltenden elektrischen Verbrauchers werden visualisiert und von verantwortlichem Personal bewertet. Beispiele siehe Abbildung 15.

- Die Bewertung der Lastverläufe kann anhand von Vergleichswerten auch automatisch erfolgen. Allerdings ist hier auf eine umfassende Datengrundlage zu achten, damit die Prozesssteuerung auf möglichst viele Situationen entsprechend reagieren kann.



Abbildung 15: Beispiel Planungsansicht des dashPORT

Ein weiterer Aspekt des dashPORT ist dessen Analysefunktion. Laststrukturen sind dadurch besser verständlich, analysierbar und zurück verfolgbar. So können Schwachstellen der Infrastruktur oder Fehler schneller ergründet werden.

Grundsätzlich kann der Anwendungsfall auf jeden Hafen/Betrieb übertragen werden. Je nach Komplexität der Verbraucherstruktur ist die Erstellung der Datenbasis umfangreicher und das zu lösende Problem wird größer und braucht eventuell länger, um gelöst zu

werden. Dementsprechend muss auch analysiert werden, welches Prognoseintervall passend ist, sodass der Entscheidungszeitraum weiterhin groß genug ist, um die Handlungsempfehlungen in Arbeitsanweisungen umzuwandeln beziehungsweise elektrische Verbraucher rechtzeitig steuern zu können.

Nichtsdestotrotz beschränken sich die **Kriterien der Übertragbarkeit** lediglich auf die Frage ob elektrische Energie auf derselben Einspeisung mit einer großen Anzahl an Verbrauchern eingesetzt wird. Ist dies gegeben, ist das dashPORT grundsätzlich sinnstiftend einsetzbar.

Kriterien, die die Implementierung vereinfachen sind, in absteigender Reihenfolge nach Relevanz sortiert:

1. eine vorhandene digitale Messinfrastruktur,
2. ein vorhandenes Prozessleitsystem mit Schnittstelle zum automatisierten Auslesen der Prozessfolgen und involvierten Geräte,
3. aussagekräftige Sekundärdatenquellen zur Unterstützung der Prognose
4. vorhandene historische Datensätze des verbraucherfeinen Energiebedarfs
5. ein zentralisiertes System, welches das An- und Abschalten von Verbrauchern aus einer Steuerzentrale heraus ermöglicht.

Es haben bereits erste Gespräche mit interessierten Parteien aus Produktion (Airbus) und Logistik (Hamburg Port Authority, Lübecker Hafengesellschaft, Port of Sevilla) sowie Interessensverbänden in Deutschland und international (e4ports Netzwerk der NOW GmbH, Deutsches Wirtschaftsforum Andalusien, Biznaga International Services, Maritime Cluster Norddeutschland) stattgefunden, weiterer Austausch ist geplant.

2.1.9 Projektkoordination & Öffentlichkeitsarbeit

Extern fand ein Austausch mit der Lübecker Hafengesellschaft (LHG) statt, in dem das Projekt dashPORT und die angewendete Methodik vorgestellt wurden. Bei der LHG wird derzeit ein System zur historischen Nachvollziehbarkeit von Strom-, Wasser, Erdgas- und Kraftstoffverbrauch aufgebaut. Es wurde aufgezeigt, dass die von der LHG erfassten Daten über eine reine historische Abbildung der Verbräuche hinaus auch für Prognosemodelle und Entscheidungs-unterstützende Systeme wie dem dashPORT genutzt werden

könnten. Weitere besonders nennenswerte externe Kontakte fanden mit der hamburger Niederlassung der Firma Airbus sowie der Hamburg Port Authority statt, Hier wurde das Konzept und die Funktionsweise des dashPORT in einer Reihe von Workshops den Firmen vorgestellt und die zu erwartenden Herausforderungen bei der Einführung des Konzeptes bei den jeweiligen Firmen diskutiert.

Das Projekt dashPORT und die angewendete Methodik wurden darüber hinaus in zwei Vorträgen (deutsch und englisch) im wöchentlichen „Maritime Innovation Update“, einem Format des Fraunhofer CML, einer Gruppe von externen Zuschauern aus der Hafen- & Logistikwirtschaft präsentiert. Weiter wurde das Projekt im Baltic Transport Journal platziert und vorgestellt. Das Baltic Transport Journal entschied sich dazu, den vom CML verfassten Text zusätzlich in ihrem Spotlight-Format dem ‚Friday Long Read‘ zu veröffentlichen. Das Projektteam reichte das Projekt darüber hinaus für den „MCN Cup“ ein - einer Preisausschreibung für innovative Projekte die der Hafenwirtschaft zugutekommen, ausgerichtet vom Maritimen Cluster Norddeutschland. Dort konnte in der Kategorie ‚Wie können Häfen nachhaltiger gestaltet werden?‘ der erste Platz belegt werden. Folglich wurde das Projekt auf der SMM am Messestand des Maritimen Cluster Norddeutschlands als Preisträger platziert. In diesem Kontext konnten weitere Kontakte zu weiteren Interessenten aus Hafenwirtschaft und Industrie geknüpft werden.

Weiter wurde das Projekt auf der IHATEC Vernetzungskonferenz in mehreren Kurzvorträgen vorgestellt. Hier ergaben sich insbesondere im Gespräch mit dem e4ports-Netzwerk der NOW GmbH Impulse für eine weitere Kooperation: Es ist geplant die Erkenntnisse aus dem Projekt in einem einstündigen Workshop, ausgerichtet von der NOW GmbH, Hafen- und Terminalbetreibern vorzustellen (Frühjahr 2023).

Das CML berichtete außerdem regelmäßig über das dashPORT in den sozialen Medien (LinkedIn), den Institutsnewsletter sowie die eigene Website. Das CML unterstützte darüber hinaus das Projektteam bei der Erstellung von Texten und Informationsmaterialien.

Final wurde das Vorgehen und die Ergebnisse in der Abschlussveranstaltung des Projektes der interessierten Öffentlichkeit und Expert:innen aus der Hafenwirtschaft präsentiert.

2.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Diese werden im Erfolgskontrollbericht und im Verwendungsnachweis dargestellt.

2.3 Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für die Installation der notwendigen Infrastruktur und Software fallen relativ hohe Kosten an. Das Gesamtsystem dashPORT bietet auf der anderen Seite zwar theoretisch hohe Einsparpotenziale, diese waren jedoch vor Projektbeginn schwer quantifizierbar und ergeben sich erst konkret aus dem Gesamtspiel der im Projekt umzusetzenden Maßnahmen. Ein wesentliches Energieeinsparpotenzial lag im Datenaustausch zwischen den einzelnen Hafenakteuren. Erst ein sicherer unternehmensübergreifender Austausch von Daten ermöglicht es, intelligente Lösungen umzusetzen und Synergien zu heben. Für einen solchen Datenaustausch existierte vor Projektbeginn zwischen den Hafenakteuren keine technische Grundlage und keine Erfahrungswerte. Aus diesen Gründen war die Einbettung eines solchen Projekts in ein Forschungsvorhaben notwendig. Des Weiteren bestand das Risiko, dass z.B. Flexibilisierungsmaßnahmen und Lastspitzenverschiebungen auf Grund der bestehenden Hafenprozesse nur bedingt mit dem operativen Betrieb vereinbar sind. Eine Untersuchung hierzu hatte es im Braker Hafen noch nicht gegeben und war entsprechend notwendiger Bestandteil dieses Projekts.

Die Förderung begünstigte eine stringente und organisierte Projektdurchführung eines mehrjährigen Vorhabens dessen langfristige Effekte auf die Kostenstrukturen im Hafen erst in der weiteren Zukunft spürbar sein werden. Der Herausforderung der Durchführung mit mehreren motivierten Partnern aus unterschiedlichen Bereichen der Wissenschaft und der Industrie wäre - auch durch den langen Projektzeitraum - ohne Fördermittel auf allen Seiten kaum abzubilden. Die Forschungsinstitute Fraunhofer CML und OFFIS sind als Einrichtungen der öffentlichen Hand auf die Projektförderung angewiesen. Ohne eine solche Förderung können angedachte Projektideen nicht weiterverfolgt werden. Die Kooperation mit industriellen Projektpartnern in diesem Projekt steigerte die zukunftsorientierte Ausrichtung der Universitäten und die europäische sowie weltweite Wettbewerbsfähigkeit sowohl des wissenschaftlichen als auch des industriellen Standortes Deutschland. Das Fraunhofer CML hatte vor der Antragstellung andere Finanzierungsmöglichkeiten geprüft und konnte keine alternativen Fördermöglichkeiten identifizieren.

2.4 Der voraussichtliche Nutzen im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

Auf wissenschaftlich technischer Ebene haben sich kurz nach Projektabschluss bereits einige Verwertungsmöglichkeiten ergeben. Nach Projektende wird die Software als Open Source Software veröffentlicht, was es jedem ermöglicht, diese sowohl in anderen Forschungsprojekten als auch in der Wirtschaft einzusetzen. Dadurch ist gewährleistet, dass die Ergebnisse vielfältig weiterverwendet werden können.

Im Projekt dashPORT wurde gezeigt, dass es möglich ist ein Monitoring-System von Stromverbrauchsdaten, welches ebenfalls die Möglichkeit bietet, die Verbräuche zu prognostizieren, sowie Handlungsempfehlungen zur Vermeidung von Lastspitzen zu geben, zu entwickeln. Besonders in Produktionsbetrieben, die planbare Prozessabläufe haben, könnten die in dashPORT entwickelten Prognosesysteme sowie der entwickelte Optimierungsalgorithmus zur Erstellung von Handlungsempfehlungen einen erhöhten Mehrwert bieten.

Die Ergebnisse des Projektes werden in weitere Forschung des Fraunhofer CML Eingang finden, diesbezüglich wurden bereits einige vertiefende Forschungsfragen und –themen identifiziert:

- Dynamische Prozessinformationen durch Verbindung mit Prozessleitsystem

Durch die Anbindung eines Prozessleitsystems könnte das dashPORT zukünftig Prozessinformationen direkt abrufen. Dies würde potenziell ermöglichen infrastrukturelle und prozessliche Veränderungen in Echtzeit abzubilden. Da ein solches System

- Kontinuierlich lernendes Prognosemodell

Die häufigen Veränderungen in den Abläufen und der Verbraucherkonfiguration im Mehrzweckhafen legen nahe, dass das Prognosemodell regelmäßig neu trainiert werden müsste um langfristig robuste Prognosen zu produzieren. Zukünftige Weiterentwicklungen könnten entsprechend ein System Nutzen, dass die historisch erfassten Daten nutzt um sich selbst turnusmäßig neu zu trainieren wobei neuere Datensätze stärker gewichtet werden als alte Datensätze.

- Dynamische Priorisierung einzelner Prozesse und Prozessschritte

Aktuell wurden Prozesse über Experteneinschätzungen priorisiert. Während die Schwelle zur Veränderung dieser Einschätzungen absichtlich gering gehalten wurde, ist im Prototypen die Anpassung von Prioritäten im laufenden Betrieb nicht möglich. Die Evaluierung zeigte jedoch, dass, je nach Auftragslage, einzelne Prozesse abweichend kurzfristig stark priorisiert werden. In diesem Kontext steht die Frage wie eine solche kurzfristige Anpassung der Priorisierung auf sinnvolle Weise in dem System und den assoziierten Algorithmen abgebildet werden kann.

- Einbindung von landseitigen Ladungsbewegungen (LKW und Zug) in Prognose

Aktuell finden keine Sekundärdaten über landseitige Ladungsbewegungen Eingang in das System. Hier könnte eine perspektivische Anbindung an ein Terminal Operating System (TOS) oder eine vergleichbare Datenbasis helfen, die nötigen Daten zu Erfassen und so die Prognosegenauigkeit weiter zu erhöhen.

- Integration von Smart Grids/Mikro Grids in das System

Smart Grids/Mikro Grids lagen im Braker Hafen während der Projektlaufzeit nicht vor. Es stellt sich entsprechend der Frage wie ein System wie das dashPORT erweitert werden kann um neben der reinen Überwachung und Optimierung von Lastverläufen auch die eigene Produktion und/oder Mehrfachnutzung (bspw. Fernwärme) von Energie in die Optimierung einzubeziehen.

- Integration von Energiespeichersystemen zur Lastspitzenkappung

Analog zu dem vorherigen Punkt ist ein weiteres Forschungsthema die Kombination des in dashPORT demonstrierten algorithmischen Lastmanagements mit physischen Energiespeichersystemen (ESS). Während das dashPORT schon jetzt eingesetzt werden könnte um auf Basis der Prognosen und historischen Daten ESS zu dimensionieren, bietet die Einbindung eines solchen Speichers die Perspektive Ladezyklen und Einsatz der gespeicherten Energie zu optimieren.

- Integration der Erkenntnisse in Logistiksimulationen & Terminalplanungsaktivitäten

Das Fraunhofer CML betreibt und entwickelt eine Simulationsumgebung für die Planung von Terminalbauten und -prozessen. Die Erkenntnisse über die Art und Menge der

Nutzung elektrischer Energie sollen Eingang in diese Simulationsumgebung finden, um so zukünftige Planungsaktivitäten zu bereichern.

- Übertragbarkeit auf weitere Betriebe der Logistik und Industrie

Erste Untersuchungen attestieren dem dashPORT eine hohe theoretische Übertragbarkeit auf nahezu alle produzierenden oder umschlagenden Unternehmen. Diese Hypothese soll in weiteren F&E Projekten bestätigt werden, wobei das Fraunhofer CML einen Fokus auf maritime Einrichtungen legt (z.B. Werftbetriebe).

Wirtschaftliche Anschlussmöglichkeiten der Industriepartner im Projekt ergeben sich aus deren beschriebenen Verwertungsperspektiven. Darüber hinaus herrscht bereits großes Interesse seitens der Industrie an den Forschungsergebnissen und dem entwickelten Prototypen. So haben bereits erste Gespräche mit interessierten Parteien aus Produktion (Airbus) und Logistik (Hamburg Port Authority, Lübecker Hafengesellschaft, Port of Sevilla) sowie Interessensverbänden in Deutschland und international (e4ports Netzwerk der NOW GmbH, Deutsches Wirtschaftsforum Andalusien, Biznaga International Services, Maritime Cluster Norddeutschland) stattgefunden.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die weltweit geplante Umstellung auf nachhaltige Energieproduktion bringt auch für das Lastspitzenmanagement neue Herausforderungen mit sich. Beispielsweise ist die verlässliche Stromversorgung zum Ausgleich von Lastspitzen nicht mehr gewährleistet, wenn die Energieproduktion maßgeblich durch erneuerbare Energien gewährleistet wird (vgl. Bennetti et al., 2015; vgl. Chapaloglou et al., 2019; vgl. Hemmati & Saboori, 2016; vgl. Perez Linkenheil et al., 2017; vgl. Uddin et al., 2018).

Eine weit verbreitete Lösung zum Ausgleich der Energienachfrage sind Energiespeichersysteme. Aufgrund der Unsicherheit des Wetters ist nicht sichergestellt, dass die Speicher bei Nutzung von erneuerbaren Energien ausreichend oder planbar geladen werden könnten. Chaudhary et al. (2021) untersuchten die Einflüsse von erneuerbaren Energien auf unterschiedliche Arten von Energiespeichersystemen. Sie kamen zu dem Schluss, dass die zukünftige Forschung über die Anpassung von Technologien an veränderte

Rahmenbedingungen der Energieversorgung, eine wichtige Rolle spielt. Die Einbindung von Energiespeichersystemen in Häfen untersuchten Kermani et al. (2019) am Beispiel von STS-Kränen mit effizienterer Nutzung von Energie als Ergebnis. Manojkumar et al. (2021) wiesen nach, dass die durch PV-Anlagen generierte Energie in einem Microgrid mittels eines Kontrollalgorithmus effizienter genutzt wurde und somit zur Kostenreduzierung beigetragen werden konnte.

Mundaca et al. (2019) zeigten auf, dass für die effektive Umsetzung von Maßnahmen des Demand Side Managements (DSM) entsprechende Regeln und Gesetze notwendig sind, die die Investitionen in Technologien und zukünftige Projekte unterstützen. Als eine der größten Herausforderungen der zukünftigen Forschung und Entwicklung von Technologien des Lastspitzenmanagements führen Shafie-khah et al. (2019) Aspekte rund um Daten im Zeitalter der Digitalisierung, sowie des Internet of Things an: Grundlegend für die Erstellung einer umfassenden Datenbasis ist die Anbindung der Mess-Infrastruktur an das Internet of Things für den Fernzugriff und digitale Verarbeitung der erfassten Daten.

Auch Chua et al. (2020) stellten in ihrem State-of-the-Art bereits heraus, dass Lastspitzenmanagement in seinen unterschiedlichen Formen zu Vorteilen für sowohl Endnutzer als auch Netzbetreiber beiträgt. Als zukünftige Herausforderungen auf dem Gebiet des Lastspitzenmanagements stellten Chua et al. (2020) insbesondere die Konzeptionierung von Technologien wie auch deren Effizienz heraus und betonten mögliche zukünftige Verbesserungen durch verstärkte Nutzung von Algorithmen, maschinellem Lernen und der Nutzung von künstlicher Intelligenz.

In einer Simulationsstudie untersuchten Hwang et al. (2020) den Einfluss der Einbindung von Lastvorhersagen als Input in Optimierungsmodelle. Die Ergebnisse der Optimierung wurden folgend in Algorithmen zur effizienteren Nutzung von Energiespeichersystemen verwendet. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass die Nutzung von Energiespeichersystemen, umso effizienter wird, je genauer Vorhersagen über aufkommende Last sind. Des Weiteren wird impliziert, dass auch die Einbindung von sekundären Echtzeitdaten zu den Umgebungsbedingungen (beispielsweise der Temperatur) die Effizienz des Gesamtsystems erhöhen kann.

Einen anderen Ansatz verfolgten Martinez-Godoy et al. (2021), indem Sie versuchten

mehrere direkt steuerbare Lasten, durch die Weiterentwicklung eines Algorithmus von Martell-Chávez et al. (2020) basierend auf linearer Optimierung, so zu planen, dass zu Spitzenverbrauchszeiten der Gesamtbedarf möglichst konstant gehalten wird und gesetzte Limits nicht überschritten werden. Es zeigte sich, dass der Algorithmus wie gewünscht die Überschreitung des gesetzten Limits verhindern und somit die effiziente Nutzung der Energie gewährleisten konnte.

Antonopoulos et al. (2020) stellen in ihrem umfassenden Review von 160 Papern heraus, dass bis 2019 ein erhöhtes Interesse der Forschung an der Implementation von maschinellem Lernen und künstlicher Intelligenz in das Lastspitzenmanagement besteht. Außerdem werden Anwendungsfälle von maschinellem Lernen und KI in der Industrie als zukünftige Forschungsrichtung ausgewiesen, um den Ausbau der Vorteile von ML und KI weiter voranzutreiben. Chaurasia & Kamath (2021) präsentieren in ihrem Literaturüberblick 20 Studien, in denen die Auswirkungen der Implementationen von einerseits Machine Learning und andererseits künstlicher Intelligenz im Demand Side Management untersucht wurden. Zu den verschiedenen Arten der Implementation gehören unter anderem: Verarbeitung von Daten, Lastvorhersagen, Simulation von Szenarien für verschiedene Lastverläufe, halbautomatisches Durchführen von Aufgaben des Demand Response und der Verbrauchsplanung. Als Forschungsergebnis wurde in jeder einzelnen Studie ein Beitrag zu höherer Energieeffizienz nachgewiesen.

Die während der Projektlaufzeit veröffentlichte Forschung auf dem Gebiet des Lastspitzenmanagements zeigt deutlich, dass das Potential des Demand Side Managements noch nicht ausgeschöpft ist und durchaus Verbesserungsmöglichkeiten in Kombination mit neu aufkommenden Technologien vorhanden sind, wie sie in dashPORT demonstriert wurden. Während sich in der Forschung vermehrt mit der algorithmischen Optimierung von Energieverbräuchen beschäftigt wird, wird ebenfalls deutlich, dass die prototypische Demonstration eines Systems wie dem dashPORT aktuell weltweit noch einzigartig ist, und somit den State of the Art wesentlich bereichert hat.

2.6 Die erfolgten und geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses

Erfolgte Veröffentlichungen, Vorträge und Workshops:

- Fraunhofer CML Newsletter, Fraunhofer CML Webpage, Fraunhofer CML LinkedIn

(Mehrfach über die gesamte Projektlaufzeit)

- Baltic Transport Journal, 06/2020 – The Long Read: Cut a Tech Dash
- Maritime Innovation Update 12/2020: Energieverbräuche optimieren und Kosten senken
- Vorstellung der vorläufigen Projektergebnisse bei der Lübecker Hafengesellschaft, 01/2021
- MCN-Cup 2021: Einreichung und Ehrung mit erstem Preis in der Kategorie Nachhaltigkeit in Häfen 23/11/2023
- Maritime Innovation Update 05/2022: Value Creation through Peak Shaving
- SMM, Hamburg, 2022, Stand des Maritimen Clusters Norddeutschland
- IHATEC Vernetzungskonferenz 2022, Stand und Kurzvorträge
- Vorstellung der Projektergebnisse zwei gemeinsamen Workshops mit der Hamburg Port Authority und Airbus Hamburg, 16/11/2022 & 05/12/2022

Geplante Veröffentlichungen, Vorträge und Workshops:

- Transportlogistic 2023, München, Fraunhofer Stand
- Vortrag bei Port of Sevilla, Datum ausstehend.
- E4ports 05/2023, Workshop zu Energieeffizienz in Häfen, Datum ausstehend.

3 Literaturverzeichnis

Antonopoulos, I., Robu, V., Couraud, B., Kirli, D., Norbu, S., Kiprakis, A., Flynn, D., Elizondo-Gonzalez, S. & Wattam, S. (2020): Artificial intelligence and machine learning approaches to energy demand-side response: A systematic review, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130. Jg.S. 109899.

Bar-Noy, A., Johnson, M. P. & Liu, O. (2009): Peak Shaving through Resource Buffering, in: Bampis, E. & Skutella, M. (Hrsg.) *Approximation and Online Algorithms*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg S. 147–159.

Benetti, G., Caprino, D., Della Vedova, M. L. & Facchinetti, T. (2015): Electric load management approaches for peak load reduction: A systematic literature review and state of the art, in: *Sustainable Cities and Society*, 20. Jg.S. 124–141.

- Chapaloglou, S., Nesiadis, A., Iliadis, P., Atsonios, K., Nikolopoulos, N., Grammelis, P., Yiakopoulos, C., Antoniadis, I. & Kakaras, E. (2019): Smart energy management algorithm for load smoothing and peak shaving based on load forecasting of an island's power system, in: *Applied Energy*, 238. Jg.S. 627–642.
- Chaudhary, G., Lamb, J. J., Burheim, O. S. & Austbø, B. (2021): Review of Energy Storage and Energy Management System Control Strategies in Microgrids, in: *Energies*, 14. Jg., Nr. 165. 1–25.
- Chaurasia, K. & Kamath, H. R. (2021): New Approach using Artificial Intelligence-Machine Learning in Demand Side Management of Renewable Energy integrated Smart Grid for Smart City, in: *SSRN Electronic Journal*.
- Chitsaz, H., Shaker, H., Zareipour, H., Wood, D. & Amjady, N. (2015): Short-term electricity load forecasting of buildings in microgrids, in: *Energy and Buildings*, 99. Jg.S. 50–60.
- Chua, K. H., Lih Bong, H., Lim, Y. S., Wong, J. & Wang, L. (2020) The State-of-the-Arts of Peak Shaving Technologies: A Review, in: *2020 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*, IEEE. 162–166.
- Chua, K. H., Lim, Y. S. & Morris, S. (2016): Energy storage system for peak shaving, in: *International Journal of Energy Sector Management*, 10. Jg., Nr. 15. 3–18.
- Della Vedova, M. L. & Facchinetti, T. (2012) Real-time scheduling for industrial load management, in: *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON)*. Florence, Italy, 09.09.2012 - 12.09.2012, IEEE. 707–713.
- EnWG *Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz)* (2022).
- Hemmati, R. & Saboori, H. (2016): Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications – A review, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65. Jg.S. 11–23 [Online]. DOI: 10.1016/j.rser.2016.06.029.
- Heilig L, Lalla-Ruiz E, Voß S (2017a) Digital transformation in maritime ports: Analysis

and a game theoretic framework. *NETNOMICS* 18(2):227–254.

<https://doi.org/10.1007/s11066-017-9122-x>

Hwang, J. S., Rosyiana Fitri, I., Kim, J.-S. & Song, H. (2020): Optimal ESS Scheduling for Peak Shaving of Building Energy Using Accuracy-Enhanced Load Forecast, in: *Energies*, 13. Jg., Nr. 215. 5633.

Kermani, M., Parise, G., Martirano, L., Parise, L. & Chavdarian, B. (2019) Utilization of Regenerative Energy by Ultracapacitor Sizing for Peak Shaving in STS Crane, in: *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. Genova, Italy, 11.06.2019 - 14.06.2019, IEEE. 1–5.

Manojkumar, R., Kumar, C., Ganguly, S. & Catalao, J. P. S. (2021): Optimal Peak Shaving Control Using Dynamic Demand and Feed-In Limits for Grid-Connected PV Sources With Batteries, in: *IEEE Systems Journal*, 15. Jg., Nr. 4S. 5560–5570.

Martell-Chávez, F., Sánchez-Chávez, I. Y., Peña-Cruz, M. I., Pineda-Arellano, C. A. & Salgado-Tránsito, I. (2020): Power demand control algorithm for single controllable load with parametric and variable load factors, in: *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30. Jg., Nr. 2.

Martinez-Godoy, J. L., Martell-Chavez, F., Sanchez-Chavez, I. Y., Castillo-Velasquez, F. A. & Del Torres-Falcon, M. C. P. (2021): A Peak Demand Control Algorithm for Multiple Controllable Loads in Industrial Processes, in: *IEEE Access*, 9. Jg.S. 116315–116325.

Mohamed, A., Salehi, V. & Mohammed, O. (2012): Real-Time Energy Management Algorithm for Mitigation of Pulse Loads in Hybrid Microgrids, in: *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3. Jg., Nr. 4S. 1911–1922.

Mundaca, L., Ürge-Vorsatz, D. & Wilson, C. (2019): Demand-side approaches for limiting global warming to 1.5 °C, in: *Energy Efficiency*, 12. Jg., Nr. 2S. 343–362.

Perez Linkenheil, C., Kühle, I., Kuth Tobias & Huneke, F. (2017): *Flexibility needs and options for Europe's future electricity system* [Online].

- Reihani, E., Motaleb, M., Ghorbani, R. & Saad Saoud, L. (2016): Load peak shaving and power smoothing of a distribution grid with high renewable energy penetration, in: *Renewable Energy*, 86. Jg.S. 1372–1379.
- Robenek, T., Umang, N., Bierlaire, M. & Ropke, S. (2014): A branch-and-price algorithm to solve the integrated berth allocation and yard assignment problem in bulk ports, in: *European Journal of Operational Research*, 235. Jg., Nr. 2S. 399–411.
- Shafie-khah, M., Siano, P., Aghaei, J., Masoum, M. A. S., Li, F. & Catalao, J. P. S. (2019): Comprehensive Review of the Recent Advances in Industrial and Commercial DR, in: *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15. Jg., Nr. 7S. 3757–3771.
- StromNEV *Stromnetzentgeltverordnung* (2005).
- Uddin, M., Romlie, M. F., Abdullah, M. F., Abd Halim, S., Abu Bakar, A. H. & Chia Kwang, T. (2018): A review on peak load shaving strategies, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82. Jg.S. 3323–3332.
- U.S. Department of Energy (2006) *Benefits of Demand Repsonse in Electricity Market and Recommendations for Achieving them* [Online]. Verfügbar unter https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-05/demand-response_0.pdf (Abgerufen am 16 September 2022).

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Individual final report		
3. title Final Report: IHATEC dashPORT			
4. author(s) (family name, first name(s)) Kuechle, Julius Schmitz, Oliver Klaus, Alexander		5. end of project 30.09.2022	
		6. publication date 31.03.2023	
		7. form of publication electronic	
8. performing organization(s) (name, address) Fraunhofer Center for Maritime Logistics and Services CML, Blohmstraße 32, 21079 Hamburg, Germany		9. originator's report no.	
		10. reference no.	
		11. no. of pages 54	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Digitales und Verkehr Invalidenstraße 44 D-10115 Berlin		13. no. of references 26	
		14. no. of tables 0	
		15. no. of figures 16	
16. supplementary notes			
17. presented at (title, place, date)			
18. abstract This report concerns the findings and procedures from the research project dashPORT. The goal of the project was the prototypical development of an intelligent energy control center, that allows to optimize energy consumption and load management during operations based on short term prognosis of energetic demand and an optimization algorithm that provides a set of non binding recommendations for action. The Prototype was developed for the Port of Brake in Germany. The Evaluation showed, that the system is sufficient for the envisioned purpose and can help to increase energy efficiency substantially. Further directions for research were finally identified and the transferability of the findings to other companies was evaluated.			
19. keywords Energy Management, Load Management, Peak Shaving, Optimization, Prognosis, Linear Programming, Machine Learning			
20. publisher		21. price	