

Effiziente Energierecuperation in dieselektrischen Hafenmobilkranen

Prof. Dr.-Ing. Michael Beitelschmidt, Dipl.-Ing. Robert Schimke, cand. Ing. Conny Tempelhahn (Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik, TU Dresden, Deutschland)

Dr.-Ing. Jörg Müller, Dipl.-Ing. Johannes Reiß (Gottwald Port Technology)

In the context of rigorous CO₂-regulation and rising fuel prices increasing the fuel efficiency of mobile machines is in the focus of interest. This paper is dealing with the investigation of the application of energy storage on a mobile harbour crane, whose drive topology is a serial diesel electric system. The integration of the energy storage in the power circuit offers the possibility to regain potential energy while lowering the load and kinetic energy during the deceleration of inertias. The share of the resumed energy, which has been “wasted” in the braking resistor, can be used for traction purposes now (recuperation). Additionally, the energy storage offers the possibility to buffer peak loads. This might enable the manufacturer to apply a smaller diesel engine, which can additionally decrease fuel consumption (downsizing). In this article the choice of the optimal storage configuration depending on the operation strategy of the system is discussed. This was done with respect to the possible fuel consumption reduction and the applicable effort.

1 Einleitung

Die Firma Gottwald Port Technology, eine Tochter der Demag Cranes AG, ist einer der führenden Hersteller für Hafenmobilkrane (HMK). Ein HMK ist eine selbstfahrende Arbeitsmaschine zum Laden und Löschen von Schiffen. Dank seiner gummibereiften Räder kann er jede erreichbare Position im Hafen anfahren und ist damit sehr flexibel einsetzbar. Als Energiequelle kommt in der Regel ein Dieselmotor-Generatorsatz zum Einsatz. Durch gesetzliche Vorgaben und Restriktionen der Hafentreiber sind diese Maschinen strikten Emissionsgrenzen in den Bereichen Lärm, Licht und Abgas (CO₂ und Schadstoffe) unterworfen. Zusätzlich zu den Emissionsgrenzen zwingen die absehbar steigenden Preise für Dieselmotorkraftstoff zur Ausreizung der vorhandenen Einsparpotentiale.

Elektrische Energiespeicher werden bereits erfolgreich in vielen Anwendungsbereichen eingesetzt, beispielsweise zur Rekuperation von Bremsenergie bei Straßenbahnen ([1], [2]) und Stadtbussen ([3], [4]), als Motorstartsysteme (z. B. Start/Stopp-Anwendungen) oder in Form von hybriden Antriebskonzepten im Automobilbereich [5]. In der Vergangenheit wurden bereits Speicherkonzepte bei einer ähnlichen Applikation, Portalkranen, getestet. Die Angaben über die mögliche Einsparung reichen von 35 Prozent [6] bis zu 70 Prozent [7]. Sowohl die Auswahl des Speichertyps als auch die Speicherauslegung sind

abhängig vom vorliegenden Fahrzeug und dessen Einsatzzweck. Durch die Analyse des betrachteten Systems mit Hilfe der Simulation kann die Bestimmung der Anforderungen an den Speicher erheblich vereinfacht werden.

2 Energieflussanalyse Kran

Bei dem in dieser Arbeit untersuchten Fahrzeug handelt es sich um einen Hafenmobilkran mittlerer Leistungsklasse (G HMK 6407). Mit diesem Kran können Lasten von bis zu 100 t gehoben und Ausladungen von bis zu 51 m erreicht werden. Von Containern über Schüttgut bis hin zu Stückgut können alle denkbaren Güterarten umgeschlagen werden. Der eingesetzte 12-Zylinder-Turbodieselmotor, welcher den Dreiphasen-Synchrongenerator antreibt, verfügt über eine Maximalleistung von 895 kW.

Für die Nutzung des Energiespeichers liegt der Schwerpunkt auf der Untersuchung des Umschlagbetriebs, das Verfahren des Krans bleibt unberücksichtigt. Daher sind nur die drei Hauptantriebe Hubwerk, Drehwerk, Wippwerk und der Anteil des Lastaufnahmemittels für die weiteren Untersuchungen von Bedeutung. In Bild 1 ist das Energieflussschema des Krans mit Energiespeicher dargestellt.

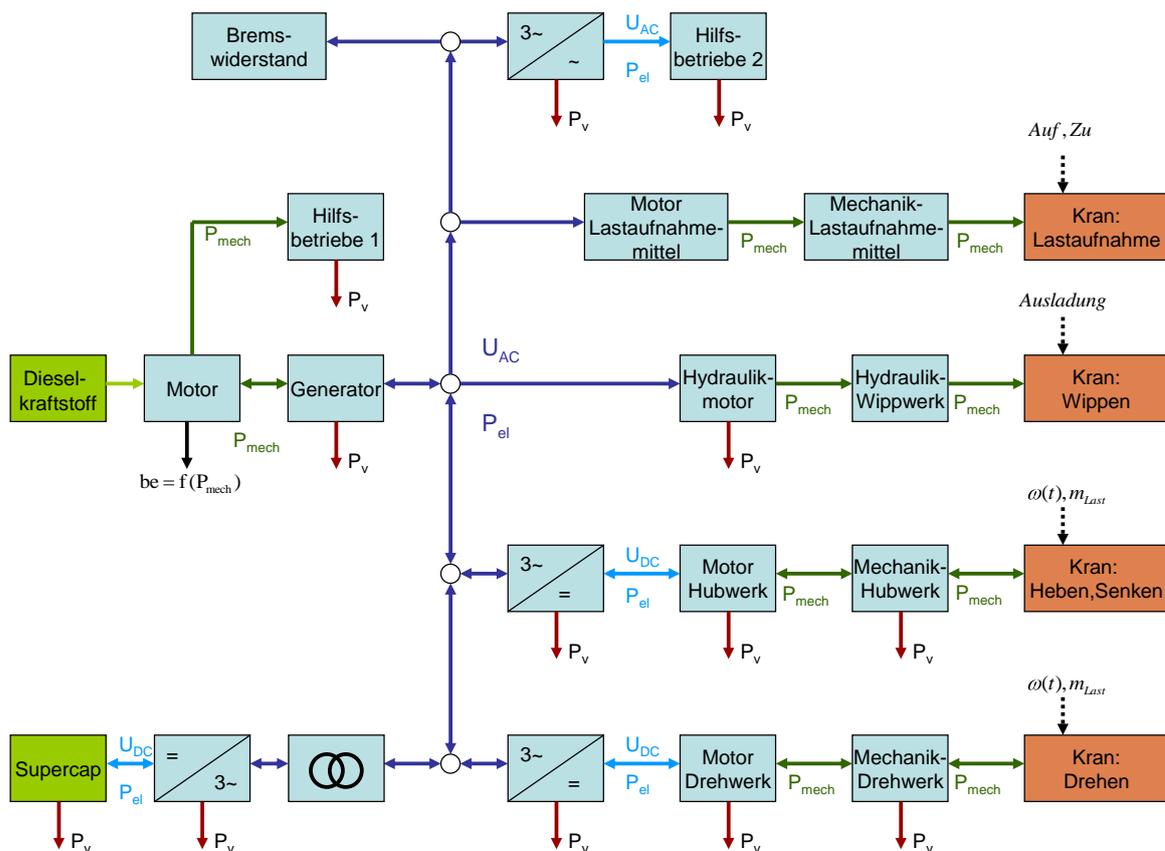


Bild 1: Energieflussschema des Prototypsystems

Neben diesen Antrieben wird als weiterer Verbraucher eine konstante Grundlast (Beleuchtung, Lüfter, Pumpen, etc.) definiert. Eine Energierückspeisung aus dem hydraulischen Kreislauf in das elektrische Netz war nicht Teil dieser Untersuchung. Daher werden für die Energierückgewinnung nur Hubwerks- und Drehwerksantrieb betrachtet. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Hauptverbraucher und ihre Leistungen.

Tabelle 1: Übersicht der Hauptverbraucher

	Hauptantriebe		
Bezeichnung	Hubwerk	Drehwerk	Wippwerk
Leistungsaufnahme	300 kW (nenn)	90 kW (nenn)	200 kW (nenn)

3 Lastprofil und Speicherauswahl

Von entscheidender Bedeutung für die Auswahl eines Speicherkonzepts sind die während des Kranbetriebs auftretenden Leistungen, die rekuperierbaren Energiemengen und die Zyklusdauer, mit der sich typischerweise die Lade- und Entladevorgänge abwechseln. In diesem Zusammenhang wurden von Gottwald zur Verfügung gestellte Lastprofile untersucht. Die Bewegungen der Hauptantriebe treten meist überlagert auf (siehe Bild 2). Wird von einem Antrieb Leistung in das Bordnetz rückgespeist, so kann diese durch andere Verbraucher direkt rekuperiert werden. Der Speicher muss also in der Regel nicht die gesamte Rekuperationsenergie des Hubwerks bzw. Drehwerks aufnehmen.

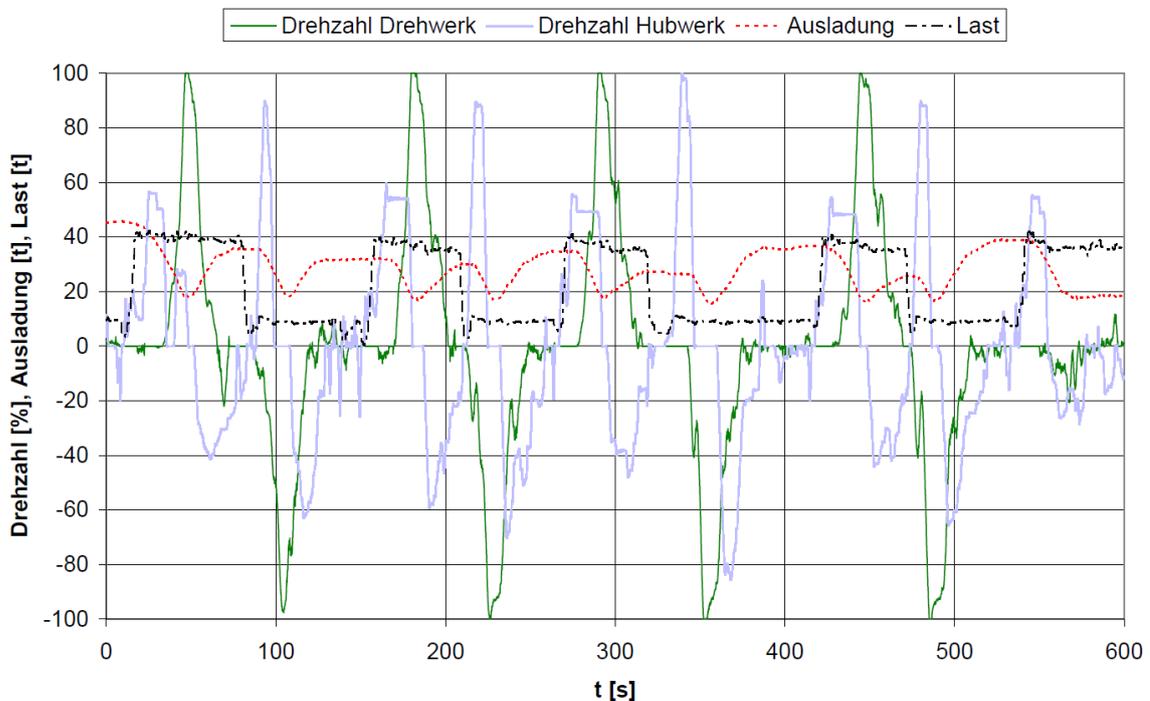


Bild 2: Lastprofil der Hauptantriebe

Bild 3 stellt die aus einem Lastprofil berechneten Leistungen der Hauptantriebe dar. Während jeder Senkbewegung arbeitet zusätzlich das Wippwerk und nutzt dabei teilweise die zurückgespeiste Leistung des Hubwerks. Die rekuperierbare Energie aus dem Drehwerk ist gegenüber der des Hubwerks wesentlich geringer. Während des Hebens einer Last wird sich in der Regel eine positive und während des Senkens eine negative Gesamtleistung einstellen.

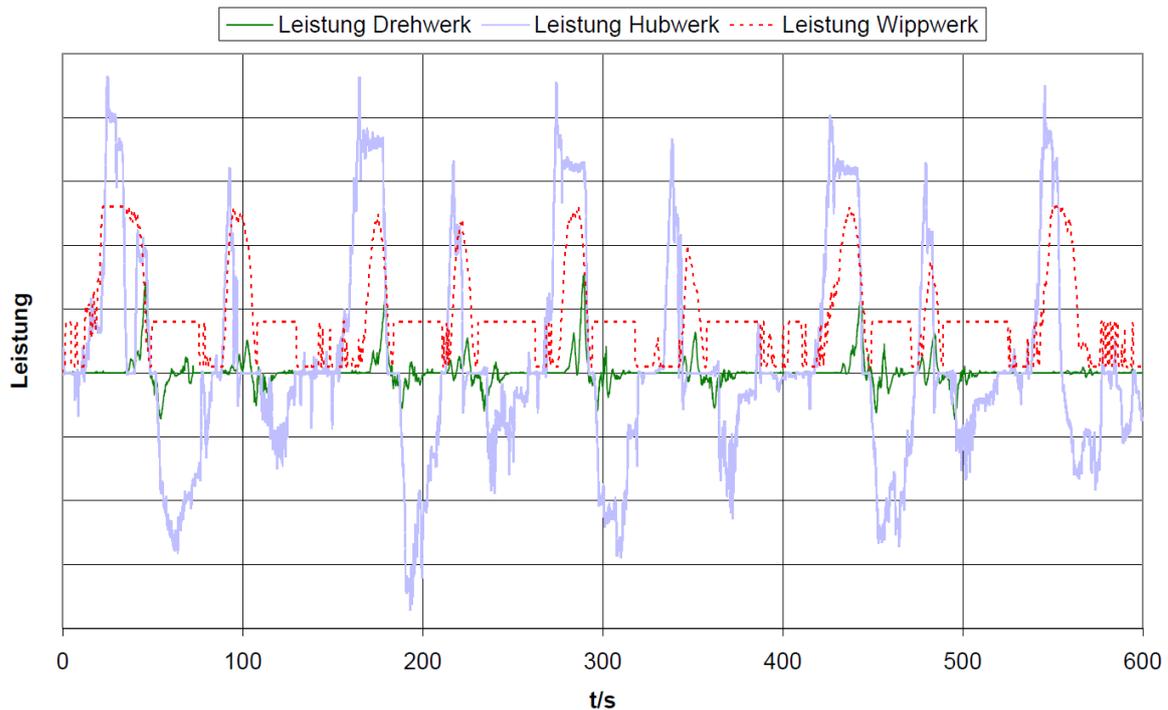


Bild 3: Berechnete Leistungen der Hauptantriebe

Für den Energiespeicher bedeutet dies, dass er die gesamte Rekuperationsenergie eines Zyklus innerhalb von nur 20 bis 25 s aufnehmen muss. Die zu rekuperierende Energie während eines Ladezyklus aller vorliegenden Lastspiele beträgt maximal 800 Wh.

Aufgrund der sehr kurzen Zykluszeiten und der entsprechend hohen Leistungen vor allem beim Laden ist eine Verwendung konventioneller Batterien ausgeschlossen. Die mechanischen Beanspruchungen, welche während des Betriebs auf den Energiespeicher einwirken, schließen den Einsatz eines Schwungmassenspeichers wegen der Anfälligkeit seiner relativ empfindlichen Magnetlagerung aus. Die Auswahl zwischen den Alternativen Hochleistungsbatterien mit Li-Ionen-Technologie und Doppelschichtkondensatoren (DSK) wird im Folgenden erläutert.

Li-Ionen-Batterien haben eine andere Energie-Leistungsrelation als DSK. Während DSK binnen sehr kurzer Zeit ihren kompletten Energieinhalt abgeben können, benötigen vergleichbare Li-Ionen-Batterien etwa 100 mal länger. Die Folge ist eine Überdimensionierung des Batteriespeichers, was die Kosten signifikant erhöht. Die

erreichbare Entladetiefe (DOD, englisch Depth Of Discharge) ist bei beiden Speichertypen vergleichbar. Wird allerdings ein hoher DOD während des Betriebs zugelassen, sinkt die Zyklenlebensdauer von Li-Ionen-Batterien im Gegensatz zu DSK drastisch. Durch die wesentlich höhere Lebenserwartung bei einem großen nutzbaren Arbeitsbereich stellen sich die DSK als das für diese Anwendung geeignetere Konzept heraus.

Für die Studie werden im Folgenden Doppelschichtkondensatoren in Modulbauweise betrachtet. Ein Modul besteht aus einer Reihenschaltung von 50 Zellen zu je 2,5 V. Es besitzt eine Kapazität von 63 F und stellt damit einen nutzbaren Energiegehalt von 102,5 Wh zur Verfügung. Durch Reihen- und Parallelschaltung sind diese anschlussfertigen Module frei skalierbar im Hinblick auf die Energie- und Leistungsdichte.

4 Simulationsprogramm

Gesamtmodell

Um eine Aussage über die möglichen Einsparpotentiale in Verbindung mit einer gewählten Speicherkonfiguration und der dafür eingesetzten Betriebsstrategie machen zu können, wurde eine Effect-Cause-Simulation durchgeführt. Hierzu wurde ein energiestromflussbasiertes Modell des Kranes (siehe Bild 4) erstellt, welches Verlustpfade und Wirkungsgrade berücksichtigt. Dabei wird die Rückwirkung des Systems (Effect) auf ein vorliegendes Lastprofil (Cause) durch eine Simulation im Zeitbereich bestimmt. Die hinterlegten physikalischen Modelle und Kennfelder sind quasistationär.

Das Modell des DSK-Speichers ist so gestaltet, dass es Aussagen zu allen relevanten elektrischen und thermischen Größen liefert. Weiterhin wurde ein Leistungskordinator für die Speichersteuerung implementiert. Dieser steuert die Leistungsaufnahme bzw. -abgabe des Energiespeichers und die Leistungsaufnahme des Senkbremswiderstands. Durch Bilanzierung aller Einzelleistungen stellt sich eine resultierende Leistungsanforderung an den Dieselmotor-Generatorsatz ein. Der Synchrongenerator ist über ein Wirkungsgradkennfeld abgebildet. Mit der so ermittelten mechanischen Leistungsanforderung an den Dieselmotor wird über ein Verbrauchskennfeld schließlich der Kraftstoffverbrauch ermittelt.

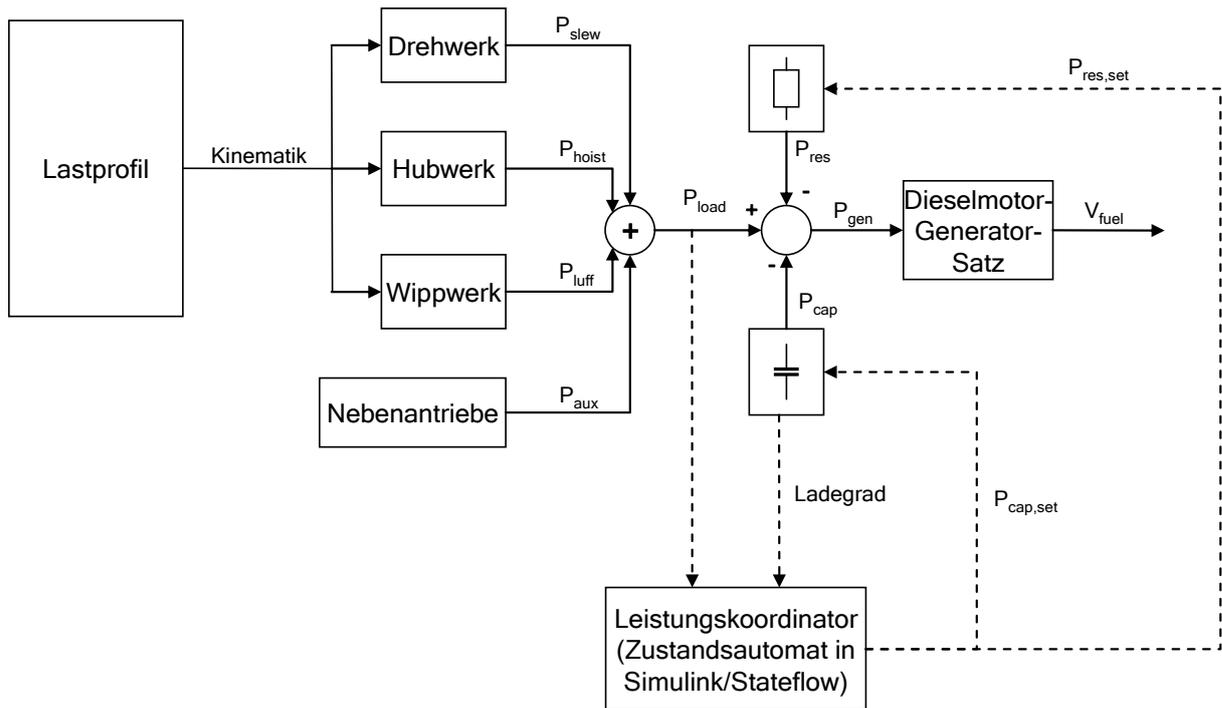


Bild 4: Energieflussmodell

Ersatzschaltbild des Energiespeichers

Für die Implementierung in MATLAB/Simulink wird das folgende, vereinfachte Ersatzschaltbild verwendet.

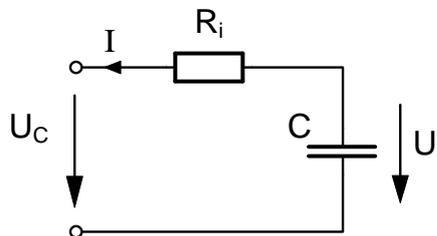


Bild 5: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines DSKs

Lebensdauer

Die erreichbare Lebensdauer von DSK hängt von folgenden Faktoren ab:

- maximale und minimale Betriebsspannung
- Effektivwert des Stroms
- maximale Ströme oder Leistungen
- Umgebungstemperatur, Übertemperatur
- Zyklenzahl

Der Hersteller garantiert mindestens eine Lebensdauer von 1.000.000 Entladezyklen. Das Ende der Lebensdauer ist mit einer Verdopplung des Innenwiderstandes und einer Verringerung der Kapazität auf 80% definiert. Die DSK-Module erfüllen somit

die durch die Anwendung definierten Bedingungen. Die Lebensdauerabschätzung erfolgt über ein einfaches konzentriertes thermisches Modell.

Leistungskordinator

Der Leistungskordinator wird in MATLAB/Stateflow über einen Zustandsautomaten abgebildet (Bild 6).

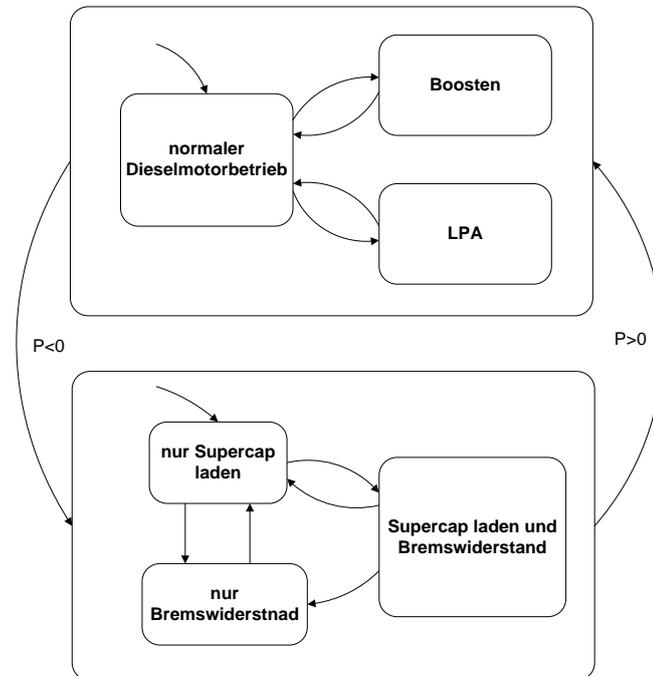


Bild 6: Leistungskordinator als Zustandsautomat

Mit dem Einsatz eines Energiespeichers wird ein zusätzlicher Freiheitsgrad in das System gebracht. Es ergeben sich damit eine Reihe neuer Betriebszustände. Beim normalen Dieselmotorbetrieb müssen alle Leistungsanforderungen durch den Dieselmotor-Generatorsatz gedeckt werden. Der Energiespeicher ist in diesem Zustand inaktiv. Wird der Verbrennungsmotor durch den Energiespeicher gestützt (Boosten), so wird Energie aus dem Speicher ins System zurückgespeist. Die Leistungsanforderung an den Generatorsatz sinkt um die entsprechende Entladeleistung. Neben der normalen Energierekuperation beim regenerativen Bremsen können die DSK auch über den Generatorsatz aufgeladen werden. Der Dieselmotor muss also neben der Leistungsaufnahme der Antriebe auch die Ladeleistung für die DSK bereitstellen. Sollte der Fall eintreten, dass die rückgespeiste Energie nicht vollständig vom Speicher aufgenommen werden kann, so wird der Rest im Bremswiderstand dissipiert.

In den einzelnen Zuständen wird die Sollleistung für den Energiespeicher und den Bremswiderstand berechnet. Daraus folgt eine resultierende Leistungsanforderung für den Generatorsatz. Die Zustandsübergänge sind über Variablen definiert, welche

je nach Betriebsstrategie angepasst werden können. Es handelt sich hierbei um leistungs- und ladegradbezogene Schaltbedingungen.

5 Mögliche Betriebsstrategien

Die Betriebsstrategie bestimmt die Parametrierung des Leistungskoordinators. Im Allgemeinen sind folgende Betriebsstrategien denkbar, von denen jedoch nicht alle für den HMK einsetzbar sind.

Energierückgewinnung

Ziel eines solchen Betriebes ist die Rückgewinnung der kompletten Energiemenge während des Bremsens. Die Leistung während der Energieabgabe sollte so gering wie möglich gehalten werden, damit der Speicher in seinem optimalen Wirkungsgradpunkt arbeitet. Jedoch soll der Speicher so weit entleert werden, dass er die komplette Bremsenergie im nächsten Zyklus wieder aufnehmen kann.

Verkleinerung des Verbrennungsmotors

Soll die Möglichkeit bestehen, die Größe des Dieselmotor-Generatorsatzes zu minimieren, muss der Speicher so betrieben werden, dass er jederzeit in der Lage ist, Belastungsspitzen auszugleichen. Es ist daher ein gewisser Ladegrad vorzuhalten. Wenn dieser bei Belastung unterschritten wird, sollte der Speicher danach über die Lastpunktanhebung (LPA) wieder über auf diesen Ladegrad gebracht werden. Durch Variation dieses Wertes wird das Rückgewinnungspotential für das regenerative Bremsen beeinflusst.

Lastpunktanpassung

Mit der Verwendung eines entsprechend groß dimensionierten Speichers kann der Dieselmotor in einem festen Lastpunkt betrieben werden. Damit ist z. B. der Betrieb des Dieselmotors in seinem wirkungsgradoptimalen Lastbereich möglich, wenn in diesem die mittlere Leistungsanforderung abgedeckt werden kann. Liegt die aktuelle Leistungsanforderung über diesem Lastpunkt, deckt der Speicher die Differenz ab. In Phasen geringer Leistungsanforderung kann der Speicher durch den Dieselmotor wieder aufgeladen werden. Da bei Dieselmotoren mit Festdrehzahl das Wirkungsgradmaximum nahe der maximalen Leistungsabgabe liegt, wird diese Strategie jedoch nicht verfolgt.

Motor-Start/Stop

Wegen der Unvorhersehbarkeit von Lastanforderungen, der benötigten konstanten Motordrehzahl für den Generatorbetrieb und der Tiefe der Eingriffe ins System wird die Möglichkeit der Nutzung einer Motor-Start/Stop-Strategie bei einer Krananwendung nicht betrachtet.

Vorausschauendes Fahren

Vorausschauende Fahrstrategien haben sich besonders in der Schienenfahrzeugtechnik verbreitet. Dabei wird mit Hilfe des jetzigen Fahrzustandes und der Kenntnis über den weiteren Belastungsverlauf (Strecke) bzw. die angestrebte Fahrtrajektorie (Fahrplan, Signale) versucht, das Lastspiel für einen definierten Zeitraum vorauszusagen. Die Betriebsstrategie kann dynamisch so optimiert werden, dass vorgegebene Zielfunktionen bestmöglich erfüllt werden. Aufgrund der Unvorhersehbarkeit der Lastanforderungen im Kranbetrieb wird diese Strategie nicht benutzt.

6 Ergebnisse der Simulation

Es wurden zahlreiche Simulationsreihen mit verschiedenen parametrisierten Betriebsstrategien und Speicherkonfigurationen durchgeführt. Um die Ergebnisse abzusichern, wurden verschiedene Lastprofile simuliert und die Speicheralterung berücksichtigt. Ergebnisse der Simulation sind die Zeitverläufe der System- und Speichergrößen und charakteristische Ergebnisgrößen (z. B. Kraftstoffeinsparung, Speicherwirkungsgrad). Es folgt ein Überblick der wichtigsten Ergebnisse und Aussagen.

Rekuperationsstrategie

Als erstes wird die Auswirkung verschiedener Speichergößen auf die mögliche Kraftstoffeinsparung unter Verwendung einer Rekuperationsstrategie untersucht. Für den betrachteten Fall ist eine Parallelschaltung einzelner DSK-Module nicht zweckmäßig, da sich durch das niedrige Spannungsniveau ein sehr großer Summenstrom einstellt, welcher vom AC/DC-Steller beherrscht werden muss. Im Weiteren wird deshalb lediglich die Reihenschaltung von Modulen betrachtet. Bild 7 zeigt die mögliche Kraftstoffeinsparung in Abhängigkeit der verwendeten Modulanzahl.

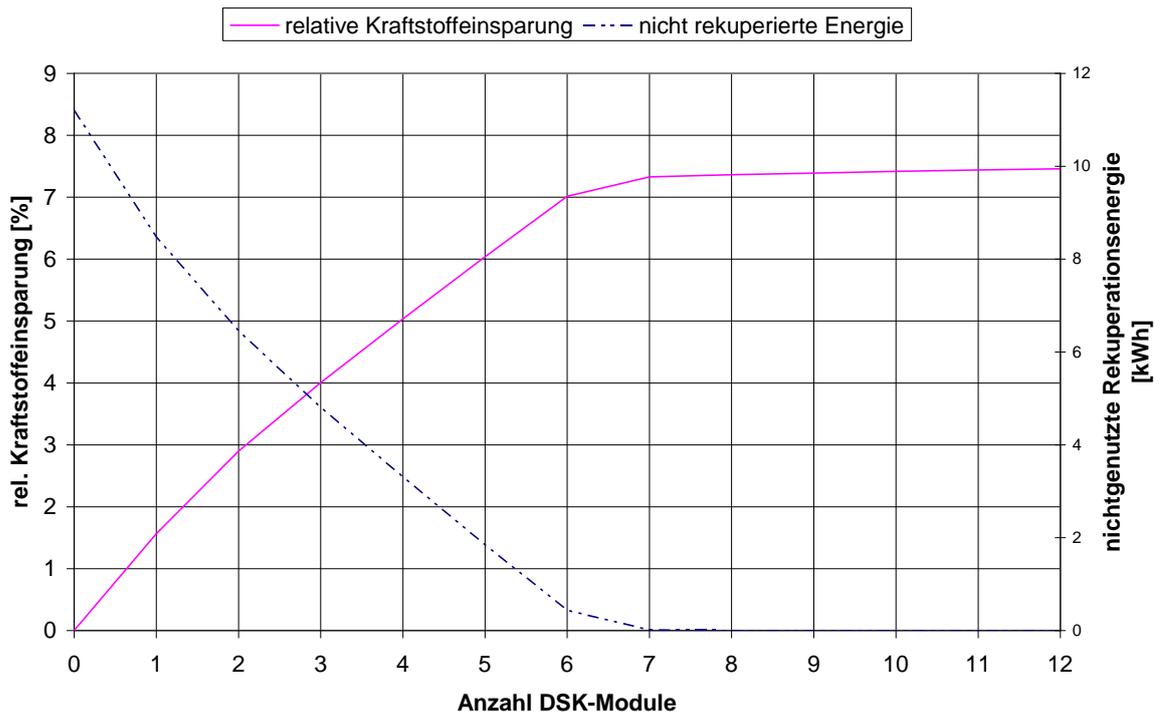


Bild 7: Kraftstoffeinsparung bei Verwendung der Rekuperationsstrategie

Ab einer Reihenschaltung von sechs DSK-Modulen ist keine nennenswerte Steigerung der erreichbaren Einsparung mehr zu beobachten, da nur noch eine kleine Energiemenge im Senkbremswiderstand dissipiert wird. Ab acht Modulen kann die volle Energie beim regenerativen Bremsen durch den Energiespeicher aufgenommen werden, sodass keine Energie im Bremswiderstand dissipiert wird.

Die steigende Modulzahl wirkt sich ebenfalls günstig auf den Speicherwirkungsgrad aus, da mit zunehmender Spannung die Ströme kleiner werden und damit geringere Verluste hervorrufen. Das wiederum führt zu einer deutlichen Reduzierung der resultierenden Modulübertemperatur (siehe Bild 8) und damit zu einer Verlängerung der Lebensdauer.

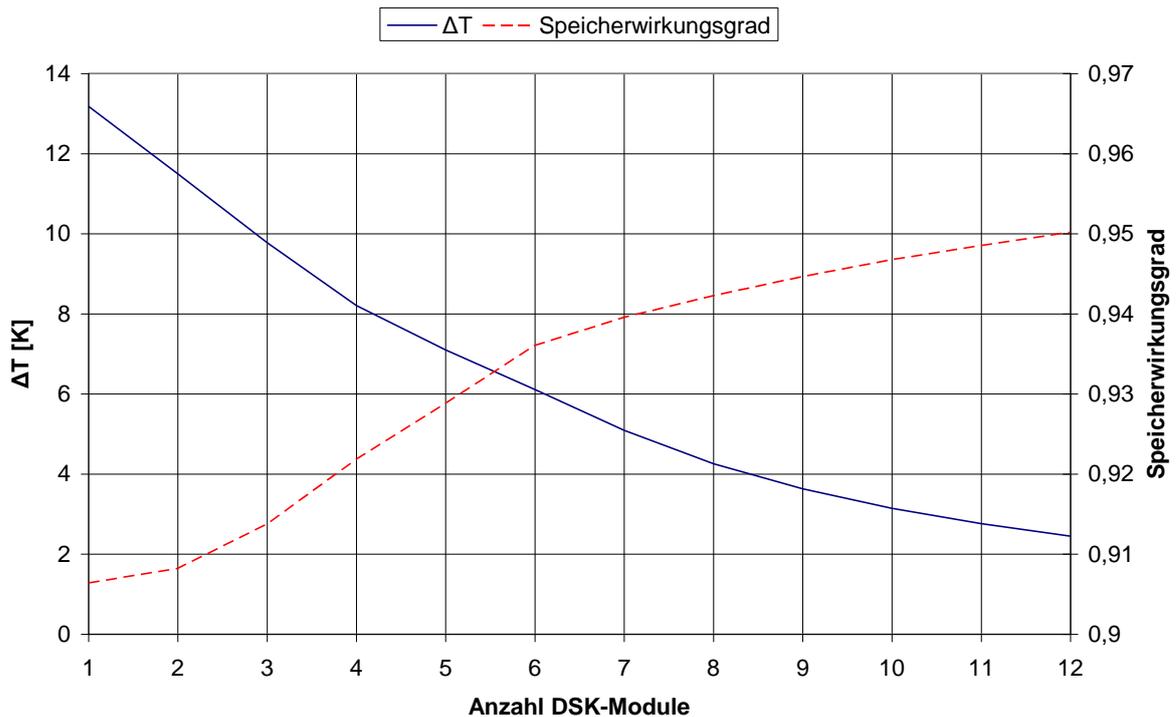


Bild 8: Übertemperatur und Speicherwirkungsgrad bei Verwendung der Rekuperationsstrategie

Downsizing-Strategie

Als nächster Schritt wurde über die Simulation eine passende Speicherkonfiguration ermittelt, welche die maximale Leistungsanforderung an den Dieselmotor um etwa 37 % senken kann. Mit dieser geringeren Maximalleistung lässt sich ein Dieselmotor mit halb so großem Hubraum (15 l statt 30 l) einsetzen.

Zusätzlich zur Einsparung mittels Rekuperation von Bremsenergie kann beim Motordownsizing die verlustärmere Energiewandlung zwischen der im Kraftstoff gespeicherten chemischen Energie und der an der Kurbelwelle abgeforderten mechanischen Energie genutzt werden. Der spezifische Kraftstoffverbrauch des kleineren Dieselmotors ist in den angefahrenen Lastpunkten geringer. Ursache ist die Parallelverschiebung der beiden Verbrauchskurven, was den um ca. 4 l/h differierenden Leerlaufverbrauch durch erhöhte Reibungsverluste in den Lagern und Kompressionsverluste repräsentiert [8].

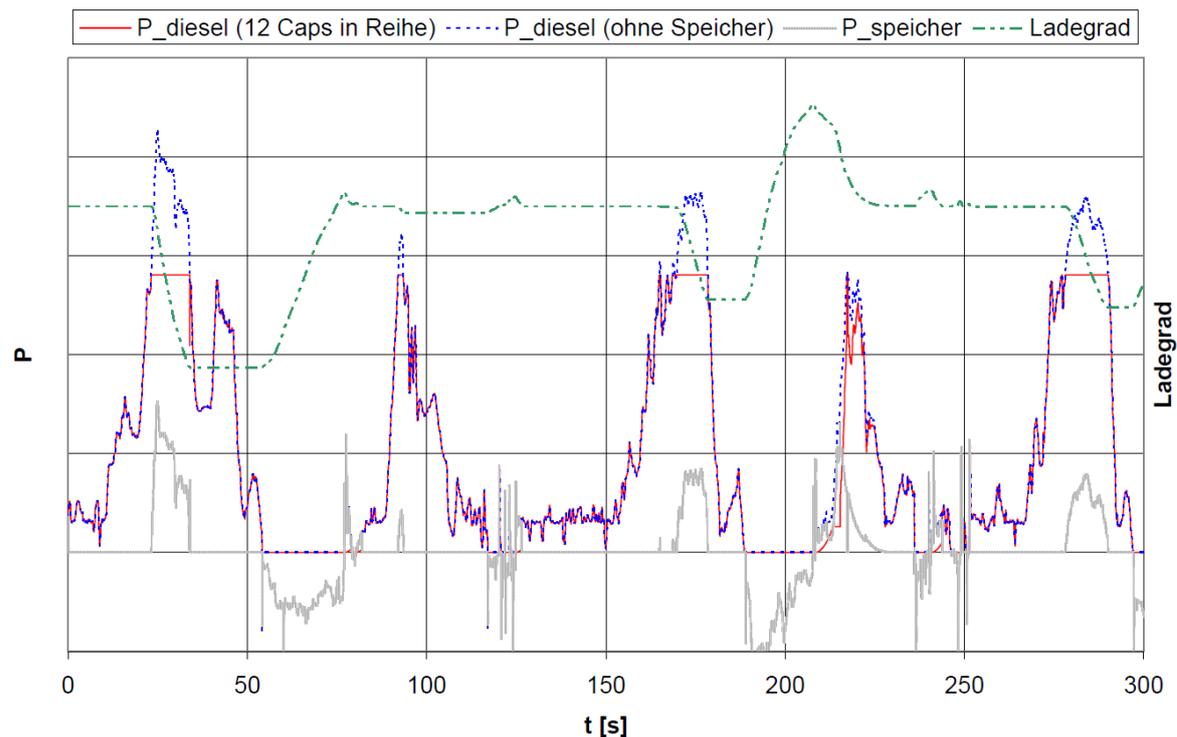


Bild 9: Simulationsergebnisse Downsizingstrategie (12 DSK-Module)

Bild 9 zeigt den Einfluss der Leistungsbegrenzung durch den Energiespeicher. Bei Erreichen der Maximalleistung des Dieselmotors übernimmt der Speicher die Leistungsdifferenz. Bei Verwendung von zwölf DSK-Modulen ist eine Reserve gegen unerwartet auftretende Leistungsanforderungen und alterungsbedingte Kapazitätsverluste berücksichtigt. Eine Lastpunktanhebung wird bei dieser Konfiguration in Verbindung mit dem betrachteten Lastprofil nicht benötigt, da die durch das Senken zur Verfügung gestellte Rekuperationsenergie ausreicht, um Spitzenlasten abzudecken. Bei Szenarien mit geringem Rekuperationspotential muss der Speicher entsprechend über den Generatorsatz aufgeladen werden.

Mit der Verkleinerung des Dieselmotors und der Rekuperation sämtlicher regenerativer Energie kann mit der Downsizing-Strategie die Verbrauchseinsparung gegenüber der Rekuperationsstrategie mehr als verdoppelt werden.

7 Fazit

Mit dem entwickelten Simulationsprogramm kann die Kraftstoffeinsparung unter Nutzung verschiedener Speicherkonfigurationen und Betriebsstrategien ermittelt werden. Dafür können in der Simulation beliebige Kranbewegungen (Lastprofile) vorgegeben werden, um das Einsparpotential für unterschiedliche Einsatzfelder (Container-, Schütt- oder Stückgutumschlag) zu ermitteln.

Neben der Information über den eingesparten Dieselkraftstoff, können weitere Aussagen zur Lebensdauer des Energiespeichers und zu den elektrischen Anforderungen an den nötigen AC/DC-Steller getroffen werden.

Mit Hilfe der Analyse wurde ein Prototyp hinsichtlich Speicherkonfiguration und Betriebsstrategie ausgewählt und von Gottwald implementiert. Die Messungen im Feld bestätigen die Realisierbarkeit des Systems und die vorausgesagte Kraftstoffeinsparung.

8 Literatur

- [1] Bombardier Transportations: Bombardier Mitrac Energy Saver, Datenblatt, www.bombardier.com, 2008.
- [2] Rechenberg, K.; Gaudenz, M.: Ultracaps - Energiespeicher für Traktionsanwendungen, ZVEI Workshop UltraCaps, Frankfurt am Main, 2004.
- [3] NEOMAN Bus Gruppe: Premiere in Helsinki: MAN Lion's City Hybrid-Stadtbuss der neuesten Generation, Presse-Information, www.neoman.de, 2007.
- [4] MAN Aktiengesellschaft: Neue Hybrid-Fahrzeuge für den Personennah- und Güterverteilverkehr, Presse-Information, www.man.eu, 2007.
- [5] Muta, K.; Yamazaki, M.; Tokieda, J.: Development of New Generation Hybrid System THS II - Drastic Improvement of Power Performance and Fuel Economy, Toyota Motor Corporation, SAE Technical Paper Series, 2004.
- [6] Kim, S.; Sul, S.: Control of rubber tyred gantry crane with energy storage based on supercapacitor bank, Seoul National University, IEEE transactions on power electronics, vol. 21, 2006.
- [7] Railpower: RAILPOWER'S ECOCRANE HYBRID POWER PLANTS CONFIRM IMPRESSIVE 70% FUEL ECONOMY ON RUBBER TYRE GANTRY CRANES AT TERMINAL SYSTEMS INC (TSI), Presseinformation, Montreal, 2008.
- [8] Cummins Power Generation: QSX15-G9, QST30-G3, Datenblätter, <http://www.cumminspower.com>, 2010.