

Der Straddle Carrier als Beispiel für die Elektrifizierung von mobilen Maschinen

Dr. Armin U. Schmiegel, REFU Drive GmbH, University of Applied Science, Reutlingen

1. Einführung

Der Klimawandel und steigende Energiepreise, sowie die stetige Verbesserung der leistungselektronischen Komponenten, der Speicher- und der Antriebstechnik treiben den Wandel in die Elektrifizierung mobiler Maschinen [1], [2], [3]. Dabei erweist sich die Auslegung einer mobilen Maschine als eine komplexe Aufgabe. So müssen die verschiedenen Anforderungen an Leistungsaufnahme und -abgabe und die Anforderungen an Drehmoment und Geschwindigkeit betrachtet werden. Zusätzlich ist die Zahl der Möglichkeiten der Realisierung sehr groß. Dies beginnt bei der Wahl der Antriebstechnik, diesel-elektrisch, hybrid oder vollelektrisch, und geht dann weiter zur Wahl der Komponenten zur Auslegung von Motor und Getriebe.

Bereits in [4] hatten wir daher eine Methode vorgestellt, die es erlaubt ergebnisoffen eine schnelle Vorauswahl zu treffen. In diesem Bericht wollen wir diesen Ansatz am Beispiel der Auslegung eines Straddle Carriers durchführen. Kernelement ist dabei die Systembeschreibung über Leistungsflüsse. Mit Hilfe einer Analyse der Leistungsflüsse sind wir in der Lage einen diesel-elektrischen, einen vollelektrischen und einen hybriden Antriebsstrang auszulegen und diese miteinander zu vergleichen. Dabei nutzen wir aus, dass mit Hilfe der Leistungsflussanalyse eine geräteunabhängige Formulierung möglich ist, für die dann Einzeloptimierungen vorgenommen werden.

2. Straddle Carrier

In Abbildung 2-1 ist ein Straddle Carrier dargestellt. Es handelt sich um einen auf Stelzen fahrenden Containerkran, der je nach Ausbaustufe bis zu drei Container stapeln kann. Ebenfalls sind in Abbildung 2-1 die Komponenten für einen hybriden Antriebsstrang abgebildet. Das Fahrzeug nutzt vier elektrische Fahantriebe und einen elektrischen Antrieb für das Hubwerk. Diese Komponenten sind über einen Hochvoltzwischenkreis mit den Energiequellen verbunden. Da ein hybrider Antriebsstrang sowohl ein Dieselaggregat als auch eine Batterie enthält, ist somit auch die Auslegung eines diesel-elektrischen oder eines vollelektrischen Antriebsstranges in der Darstellung enthalten.

Der diesel-elektrische Antriebsstrang besteht aus einem Verbrennungsmotor (Combustion Engine), einem Generator und einem Gleichrichter. Dieser kann passiv oder aktiv ausgelegt werden. Bei einem passiven Gleichrichter erfolgt die Gleichrichtung über eine Diodenbrücke. Bei einem aktiven Gleichrichter (Active Rectifier) wird durch einen Wechselrichter der Wechselstrom des Generators aktiv gleichgerichtet. Dies hat den Vorteil, dass das Spannungsniveau auf dem verbindenden DC-Zwischenkreis konstant gehalten wird und nicht von der Geschwindigkeit des Verbrennungsmotors abhängt. Die Zwischenkreisspannung wird dadurch deutlich stabiler.

Die Batterie wird in Abbildung 2-1 direkt auf den Zwischenkreis geschaltet. Alternativ wäre die Verwendung eines DC/DC-Stellers denkbar. Aufgrund der Größe der Batterie und der benötigten Be- und Endladeleistung wird in dieser Betrachtung auf den DC/DC-Steller verzichtet. Dies hat allerdings zur Folge, dass alle anderen leistungselektronischen Komponenten, Wechselrichter wie auch Gleichrichter sich dem Spannungsverlauf der Batterie anpassen müssen. Was unter Umständen Einfluss auf das dynamische Verhalten der Antriebe hat.[5]

Als Verbraucher sind an der Batterie bzw. dem Generator vier Antriebsmotoren und ein Hubwerk angeschlossen. Sie beziehen ihre Energie über den DC-Zwischenkreis. Zur Vereinfachung wird hier auf eine Analyse der Hilfsantriebe Klimaanlage in der Fahrerkabine, der Hydraulikpumpe und dem 24-Volt-Bordnetz verzichtet. Für eine vollständige Auslegung sind diese Systeme natürlich ebenfalls zu betrachten.

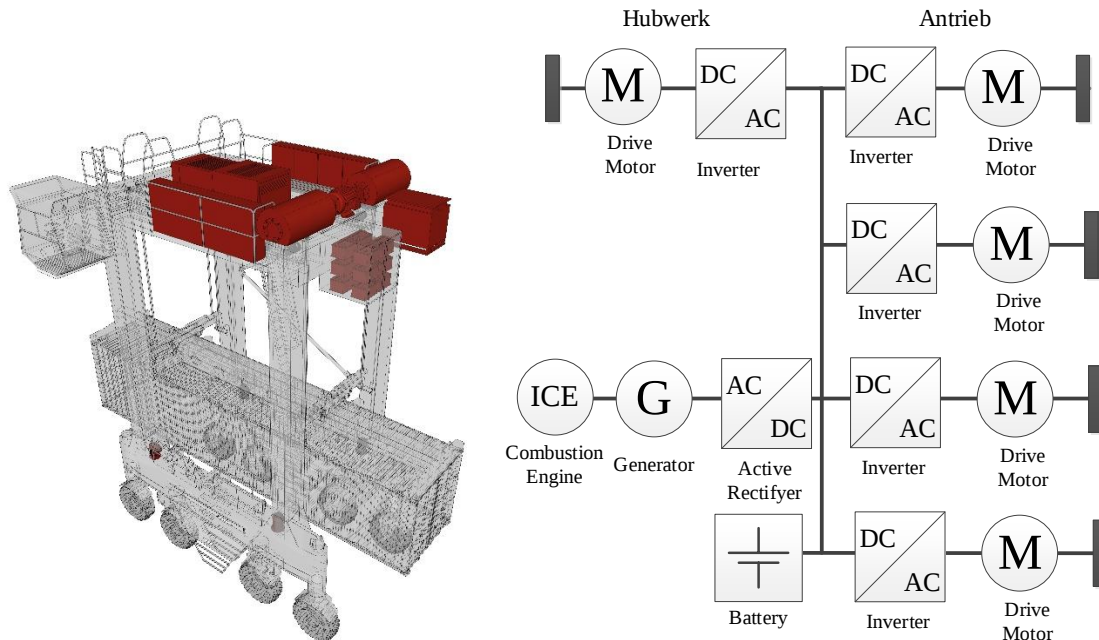


Abbildung 2-1: Darstellung eines hybrid angetriebenen Straddle Carriers (links) und seiner elektrischen Komponenten (rechts).

Für die Elektrifizierung stellt sich die Frage, welcher Ansatz am geeignetsten ist, die Anforderungen und die Zielkosten zu realisieren. Hierzu muss jedoch für jeden Ansatz eine optimale Konfiguration ermittelt werden. Mit der Analyse des Leistungsflussdiagramms[6]–[9] steht ein einfaches Werkzeug zur Verfügung, dass diese Analysen für verschiedene Realisierungen durchführen kann. Im Folgenden soll der Ansatz und die notwendigen Einzelschritte beschrieben werden.

3. Beschreibung des Straddle Carriers mit Hilfe des Leistungsflussdiagramms

Das Leistungsflussdiagramm beschreibt auf eine abstrakte Weise Energiesysteme. [6]–[9] Die Grundidee ist dabei, dass das Gesamtsystem in Leistungsquellen, -speicher und -verbraucher unterteilt wird, zwischen denen ein Leistungstransport stattfindet. Im Fall des hybriden Straddle Carriers wurde der Dieselmotor als eine Leistungsquelle, die Batterie als Speicher, das Hubwerk und die Antriebe als Verbraucher interpretiert. Um die Komplexität zu reduzieren, werden die vier Antriebsmotoren zu einem Verbrauchsknoten zusammengefasst.

In Abbildung 3-1 ist das Leistungsflussdiagramm für den Straddle Carrier dargestellt. H ist der Knoten für das Hubwerk, S der Knoten für die Batterie, A der Knoten für den Antrieb und G steht für den Generator. Die Knoten allein haben noch keinen Nutzen. Dieser entsteht erst dadurch, dass beschrieben wird, welche Leistungsflüsse erlaubt sind. Ein Leistungsfluss vom Knoten A nach B wird dabei mit A_B bezeichnet. Die Transportverluste werden durch den leistungsabhängigen Wirkungsgrad $\eta_{AB}(A_B)$ beschrieben.

Im Fall eines hybriden Antriebsstranges kann die Leistung des Generators zum Hubwerk, zum Speicher und zum Antrieb transportiert werden. Dies wird durch die Leistungsflüsse G_H , G_S und G_A beschrieben. Der Speicher kann seine Leistung zum Hubwerk S_H und zum Antrieb S_A transportieren, kann aber auch durch Rekuperation von beiden Motoren Leistungen beziehen A_S , H_S . Des Weiteren, und das ist eine Besonderheit von Speicherknoten, kann er Leistung aus der Vergangenheit beziehen, bzw. Leistung in die Zukunft verschieben $S_S(\pm\Delta)$.

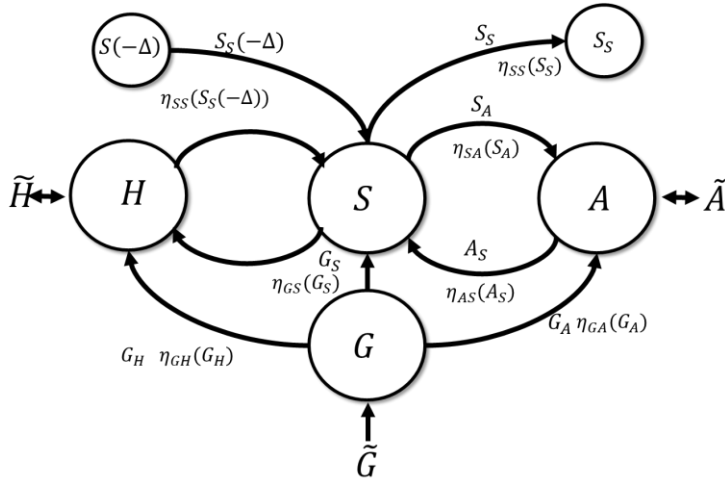


Abbildung 3-1: Leistungsflussdiagramm eines Straddle Carriers mit einem hybriden Antriebsstrang. Der Straddle Carrier wird mit Hilfe von vier Leistungsknoten beschrieben. H für das Hubwerk, A für den Antrieb, S für den Speicher und G für den Generator.

Die folgenden Gleichungen fassen die Beziehungen zwischen den Leistungsflüssen zusammen:

$$\tilde{G} = G_S + G_A + G_H$$

$$0 = \eta_{GS}G_S + \eta_{AS}A_S + \eta_{HS}H_S + \eta_{SS}S_{S(-\Delta)} - (S_A + S_H + S_S)$$

$$\tilde{A} = \eta_{SA}S_A + \eta_{GA}G_A - A_S$$

$$\tilde{H} = \eta_{SH}S_H + \eta_{GH}G_H - H_S$$

$\tilde{G}$ ist das Verbrauchsprofil des Generators und stellt eine bilanzielle Größe dar. $\tilde{A}$ und $\tilde{H}$ sind die Lastprofile des Hub- bzw. des Fahrantriebes. Diese Lastprofile müssen vorgegeben werden, damit die Lastflüsse im Gesamtsystem ermittelt werden.

Für die Auslegung des Antriebsstranges stellt sich die Frage, welche maximalen Leistungen benötigt werden. Im Lastflussdiagramm wird diese Fragestellung durch den erlaubten Wertebereiche der Leistungsflüsse und zusätzlichen Nebenbedingungen beschrieben:

$$G_S + G_A + G_H \leq G_{\max}$$

$$H_S + A_S + G_S \leq S_{\text{charge}}$$

$$S_H + G_H \leq H_{\max}$$

$$S_A + G_A \leq A_{\max}$$

Die erste Gleichung legt fest, dass die Summe der Leistungsflüsse vom Generator zu den anderen Knoten nicht größer als die Gesamtleistung des Generators sein darf. Die zweite Gleichung trifft eine ähnliche Aussage nur für den Speicher und die letzten beiden Gleichungen beschränken die Leistungsflüsse vom Hubwerk und vom Antriebsstrang.

Das Ziel der Regelung ist die Minimierung der Verluste:

$$\min Y = \left((G_S(1 - \eta_{GS}) + A_S(1 - \eta_{AS}) + H_S(1 - \eta_{HS}) + S_S(-\Delta)(1 - \eta_{SS}) + S_A(1 - \eta_{SA}) + G_A(1 - \eta_{GA}) + S_H(1 - \eta_{SH}) + G_H(1 - \eta_{GH})) \right)$$

Somit ist die Aufgabe für die Systemauslegung relativ einfach: Für jede Systemkonfiguration wird das Lastprofil abgefahren. Dabei muss zu jedem Zeitpunkt die Leistung zwischen den Knoten so verteilt werden, dass die Lasten versorgt und die Randbedingungen eingehalten sind. Wir können nun für jedes System eine Strategie formulieren, nach der dies zu erfolgen hat. Allerdings besteht dann das Risiko, dass wir versteckte Annahmen über das Systemverhalten in die Regelung einfließen lassen, die das Ergebnis verfälschen. Aus diesem Grund ist es sinnvoller die Optimierungsaufgabe zu lösen. Auf diese Weise wird jeweils der mathematisch optimale Leistungsfluss gewählt. Jede spätere Realisierung muss sich dann an dieser optimalen Lösung messen.

4. Leistungsfluss eines hybriden Straddle Carriers

In Abbildung 4-1 ist das Lastprofil eines Straddle Carriers dargestellt [10], [11]. Es fällt auf, dass die Dynamik und auch der Leistungsbedarf für die Antriebe sehr hoch sind. Die beobachteten Lastsprünge finden auf einer Zeitskala von zehntel Sekunden statt und können dabei von 350 kW auf –250 kW springen.

Das Hubwerk hat eine etwas geringere Dynamik, doch auch hier sehen wir Lastsprünge, die auf einer Zeitskala von zehntel Sekunden zu beobachten sind.

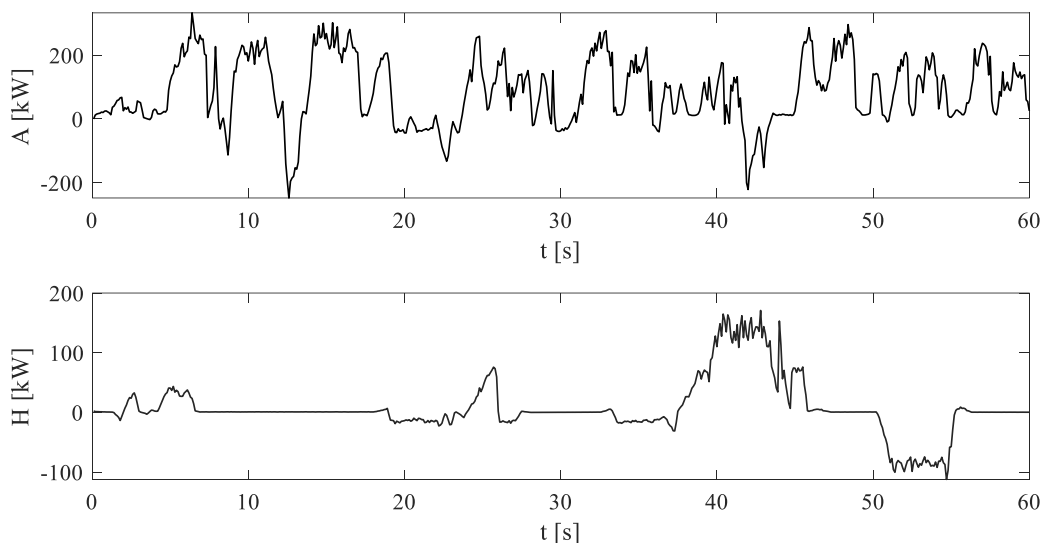


Abbildung 4-1: Lastprofil eines Straddle Carriers [10]

Neben dem Lastprofil sind die Effizienzen der Leistungsübertragung zu definieren. In Abbildung 4-2 sind diese dargestellt. Die Effizienz wird hier als Funktion der Leistung angesehen. Sie ergibt sich aus einer Betrachtung der konstanten, linearen und quadratischen Verluste [6], [7]. Die konstanten Verluste dominieren dabei den niedrigen Leistungsbereich, während bei hohen Leistungen, die quadratischen Anteile dominieren. Vereinfachend sind wir davon ausgegangen, dass $\eta_{SA} = \eta_{AS}$ und $\eta_{SH} = \eta_{HS}$ ist.

In diesen Untersuchungen gehen wir von einem maximalen Wirkungsgrad des Generators von ca. 40% aus. Dieser beinhaltet die Effizienz der Verbrenners und der elektrischen Maschine. Der Einfluss der Leistungselektronik ist hier nur gering zu bemerken. Die Batterie in Kombination mit der Leistungselektronik hat hingegen einen Wirkungsgradbereich von 80% bis 96%. Es ist daher naheliegend, dass der Speicher in dieser Anwendung immer die bevorzugte Lösung ist.

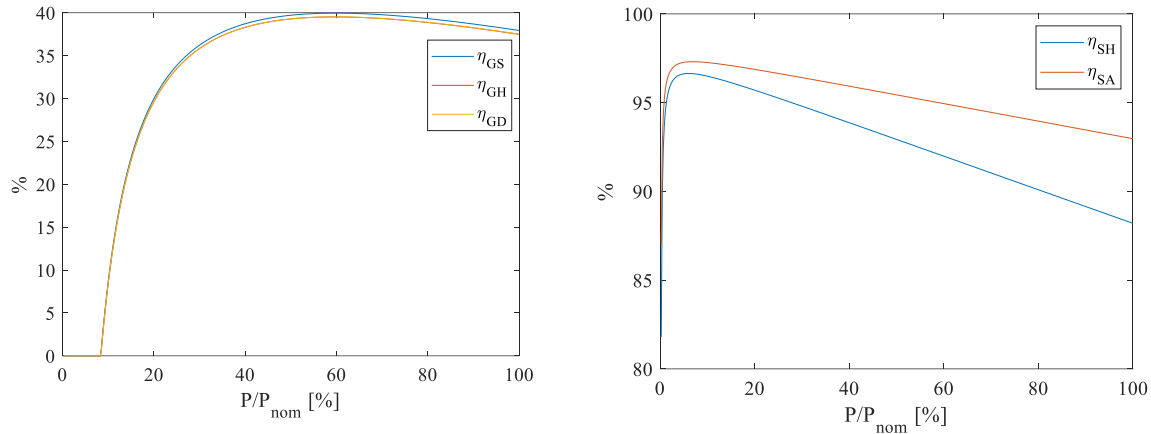


Abbildung 4-2: Verwendete Effizienzen der Leistungsflüsse.

Betrachten wir nun den in Abbildung 4-3 ermittelten Leistungsfluss der verschiedenen Komponenten. Es ist zu erkennen, dass es in dieser Konfiguration beim Antrieb zu einer Situation kommt, in der die Komponenten die Leistung nicht bedienen können. Für die Konfiguration des Systems bedeutet dies, dass die Auslegung angepasst werden muss oder diese Spitze akzeptiert wird. Weiterhin fällt auf, dass $G_A + S_A$ immer größer als die abgerufene Leistung ist. Dies betrifft insbesondere jene Bereiche, in denen der Generator aktiv ist. Hier wird die geringe Effizienz des Generators sichtbar. Denn bei der Last kommt nicht G_A sondern $G_A \cdot \eta_{GA}(G_A)$ an. Die Betriebsführung muss diese Übertragungsverluste berücksichtigen und geeignete Überkapazität bereitstellen.

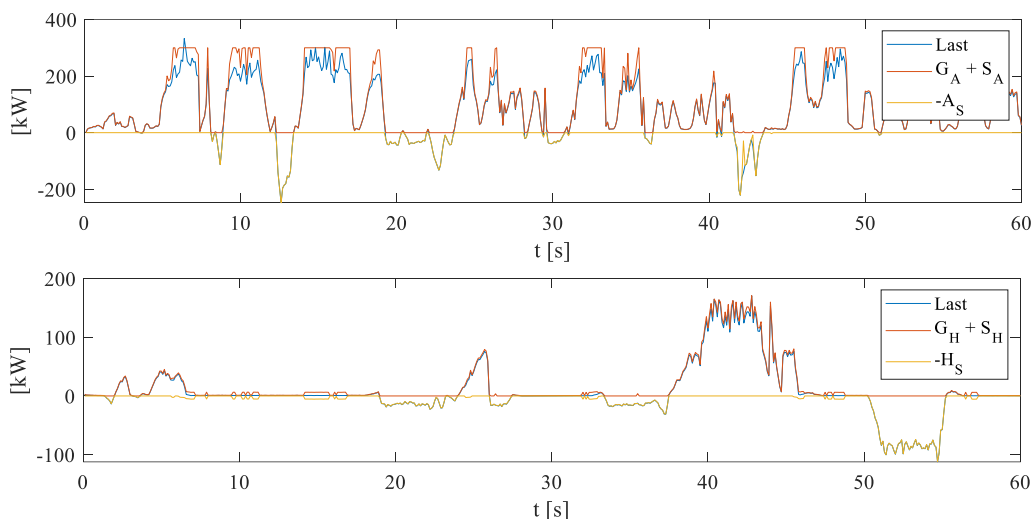


Abbildung 4-3: Leistungsflüsse für die in Abbildung 4-1 dargestellten Lastprofile.

5. Leistungs- und Energiebedarf

In diesem Abschnitt sollen die verschiedenen Antriebsstränge optimiert konfiguriert werden und die Daten miteinander verglichen werden. Dabei betrachten wir einen Betrieb von 360 s.

5.1. Diesel-elektrischer Straddle Carrier

Wir beginnen mit der Betrachtung des reinen diesel-elektrischen Fahrzeuges. In diesem Fall entfällt der Speicherknoten S und alle Leistungsflüsse, die zu diesem Knoten oder von ihm wegführen. Das Gleichungssystem vereinfacht sich entsprechend. Die Auslegungsaufgabe besteht nun darin, die Leistungsklasse für den Dieselgenerator zu wählen, die die geringsten Verluste aufweist und den Leistungsbedarf auch deckt. Dabei wird die Effizienzkurve des Generators bezogen auf die Nominalleistung skaliert. Das Maximum der Effizienz liegt dabei stets bei $60\% P_{\max}$ mit einer Effizienz von 40% und sinkt auf 38% bei $P_{\max}$ ab. Lasten unterhalb von $8\% P_{\max}$ können nicht bedient werden, da hier die Effizienz auf null zurückgeht.

In Abbildung 0-1 ist jener Anteil der Last dargestellt, der bei einer gegebenen Generatorleistung nicht mehr versorgt werden kann. Bei geringer Generatorleistung kann der Bedarf nur teilweise bedient werden. Erhöht sich die Leistung, reduziert sich dieser Anteil der nicht bedienten Lasten linear. Ab ca. 300 kW reduziert sich der Anteil erheblich, weil die nun fehlenden Lastspitzen deutlich seltener auftreten. Ab einer Generatorleistung von 450 kW kann der Generator die Leistung vollständig abdecken.

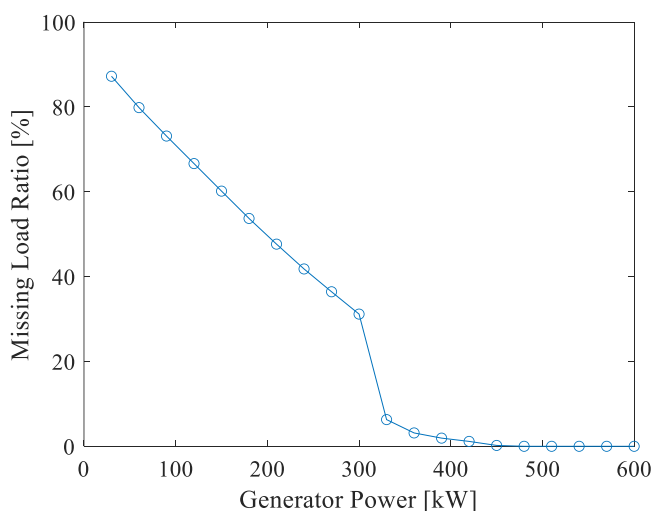


Abbildung 0-1: Anteil der nicht versorgten Last als Funktion der Generatorleistung.

Für die Bestimmung der optimalen Generatorleistung reicht es allerdings nicht aus, allein auf die Lastabdeckung zu schauen. Würden wir dies tun, läge die optimale Leistung zwischen 310 kW und 450 kW, je nachdem wie wichtig der Nutzen einer vollständigen Lastabdeckung ist. Für die Auslegung müssen wir auch die Effizienz und den Energieverbrauch betrachten. Da wir die maximale Effizienz des Generators so definiert haben, dass sie immer bei 60% der Maximalleistung liegt, kann es durchaus sein, dass eine andere Konfiguration sinnvoller ist, da sie eine höhere Gesamteffizienz und einen moderaten Verbrauch aufweist. In Abbildung 0-2 ist daher die Gesamteffizienz des Experimentes sowie der Verbrauch dargestellt.

Wie wir sehen, steigt die Effizienz bis 300 kW an. Hier sehen wir sehr schön den Effekt, dass bei höheren Leistungen auch die Effizienz des Generators in Summe höher ist. Ab 300 kW knickt die Effizienz ab. Hier wird der Generator so ausgelegt, dass er auch seltene Ereignisse gut abdecken

kann. Dies hat allerdings zur Folge, dass der Großteil der Lastabdeckung im Schwachlastbereich erfolgt. Aus Abbildung 4-2 ist allerdings bekannt, dass im Schwachlastbereich die Effizienz deutlich geringer ist, da hier die konstanten Verluste die Effizienz dominieren.

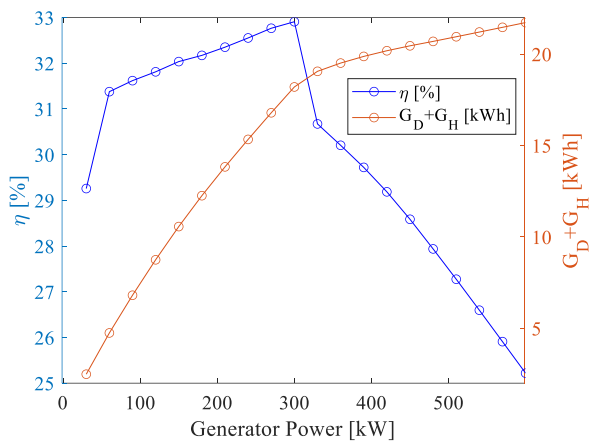


Abbildung 0-2: Gesamteffizienz über 360 s sowie die verbrauchte Primärenergie.

Wie man erkennen kann, steigt der Verbrauch ebenfalls an. Bis 300 kW liegt dies im Wesentlichen daran, dass auch mehr Energie für den Antrieb genutzt wird. Ab 300 kW dominiert der Effekt der sich verringenden Effizienz. Dies ist an der unterschiedlichen Steigung der Verkaufskurve ($G_D + G_H$) zu erkennen.

Der aus energetischer Sicht optimale Auslegungspunkt für den Generator ist die Generatorleistung bei dem diese Effekte ineinander übergehen. Dies wäre bei 300 kW tatsächlich auch der Fall. Allerdings bedeutet dies, dass der Straddle Carrier einige Lastpunkte nicht abfahren kann, wie man in Abbildung 0-3 sehen kann. Hier ist abzuwägen, ob diese Leistungseinbußen, die innerhalb von 6 Minuten zehnmal auftauchen, vertreten werden können oder ob der höhere Energiebedarf in Kauf genommen werden muss.

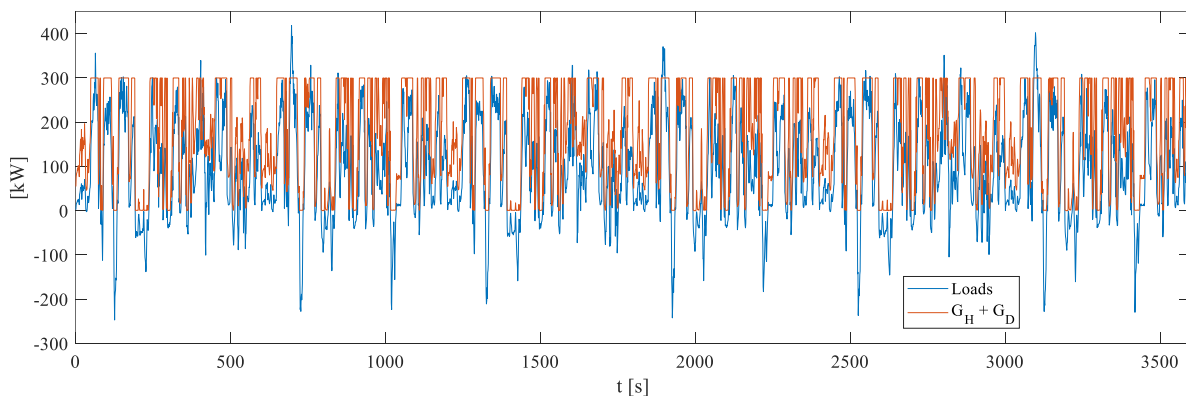


Abbildung 0-3: Lastabdeckung und Primärenergieverbrauch bei einem generatorbetriebenen Straddle Carrier am energetisch optimalen Arbeitspunkt.

5.2 Vollelektrischer Straddle Carrier

Im vollelektrischen Fall wird kein Generator verwendet. Allein die Batterie dient hier zur Versorgung des Fahrzeuges. Dies bedeutet, dass die Leistungspfade G_D , G_H und G_S nicht verwendet werden. Da wir einen Zeitraum von nur 3 Minuten betrachten, können wir die Speicherkapazität als ausreichend groß annehmen, d.h. der Leistungsfluss $S_S(\pm\Delta)$ ist von nachrangiger Bedeutung.

Bei elektrochemischen Speichern unterscheidet sich in der Regel die Laderate von der Entladerate. Bei Lithium-Ionen-Batterien, die als Kathodenmaterial Lithium-Eisenphosphat verwenden, sind Entladeraten von 2-4C möglich, während die Laderaten oftmals weiterhin auf 1C beschränkt bleiben. Um diesem Effekt Rechnung zu tragen, gehen wir davon aus, dass die Laderate der Hälfte der Entladerate entspricht.

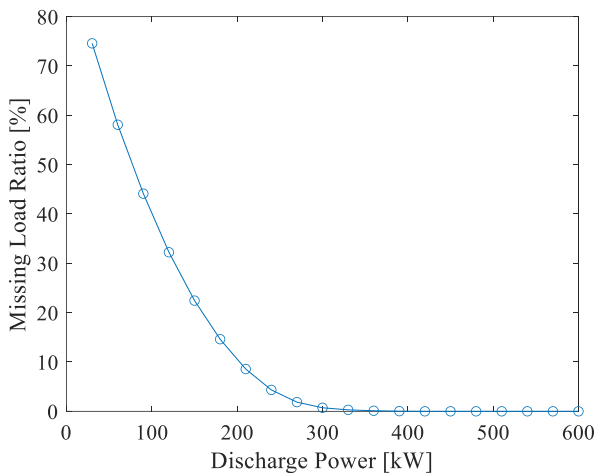


Abbildung 0-1: Anteil der nicht versorgten Last als Funktion der Entladeleistung.

Da dasselbe Lastprofil wie bei einem diesel-elektrischen Straddle Carrier verwendet wird, wird sich der Anteil der nicht versorgten Leistung ähnlich verhalten. Dies ist in Abbildung 0-1 auch zu erkennen. Allerdings verläuft diese Kurve deutlich stetiger als bei einem diesel-elektrischen System. Es zeigt sich außerdem, dass weniger Entladeleistung benötigt wird, um eine höhere Abdeckung zu gewährleisten. Bei einer Generatorleistung von 300 kW lag der Anteil der nicht versorgten Last noch bei 0,5%. Bei einem vollelektrischen Straddle Carrier ist dieser Anteil kleiner. Ursache ist der hohe Wirkungsgrad des Systems. Wie wir in Abbildung 0-2 sehen können, ist der Gesamtwirkungsgrad bereits bei 200 kW bei 94%, während bei einem diesel-elektrischen System der Wirkungsgrad bei 32% lag. Hier kommt neben dem Wirkungsgrad der Komponenten auch noch die Rekuperation als unterstützender Effekt hinzu.

Anders als beim diesel-elektrischen Fahrzeug stabilisieren sich Effizienz und der Gesamtverbrauch für höhere Entladeleistungen. Während sich die Gesamteffizienz bereits bei 150 kW mit 94% stabilisiert, ist dies beim Verbrauch erst ab 300 kW mit 10 kWh zu beobachten. Dies entspricht der Hälfte des Verbrauches des diesel-elektrisch betriebenen Fahrzeugs.

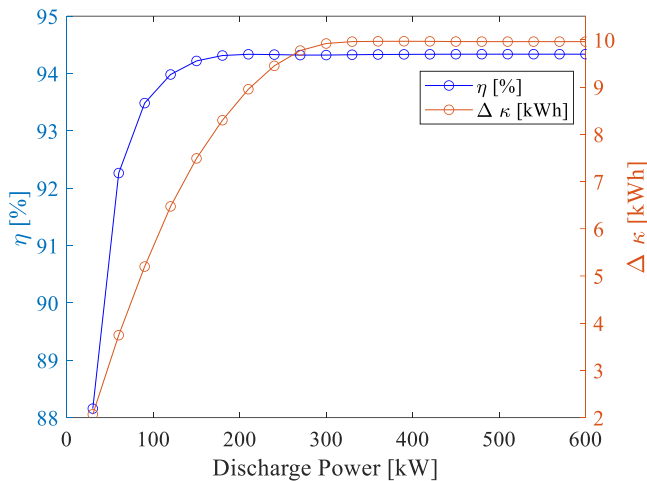


Abbildung 0-2: Gesamteffizienz und genutzte Speicherkapazität bei einem vollelektrischen Straddle Carrier bei unterschiedlicher Entladeleistung.

5.3 Diesel-hybrid betriebener Straddle Carrier

Die letzte Systemkonfiguration, die hier betrachtet werden soll, ist der diesel-hybrid betriebene Straddle Carrier (Abbildung 2-1). Hier wird das in Abbildung 3-1 dargestellte Leistungsflussdiagramm vollständig genutzt.

In unserer Betrachtung wollen wir uns auf die bereits beschriebenen Größen als Funktion der Generatorleistung und der Entladeleistung betrachten. Wie wir bereits aus den bisherigen Untersuchungen gesehen haben, reicht eine Leistung von ca. 300 kW, um den Leistungsbedarf der Anwendung zu decken. Oberhalb von 300 kW sind nur noch einzelne Bedarfspeaks zu versorgen. Aufgrund des niedrigeren Wirkungsgrades des Generators ist der Verlustanteil bei 300 kW beim diesel-elektrischen Straddle Carrier deutlich höher als beim vollelektrischen.

Beim hybriden Straddle Carrier sehen wir eine Mischung aus beiden Verhalten. In Abbildung 0-3 ist das Missing Load Ratio als Funktion der Generatorleistung und der Entladeleistung der Batterie dargestellt. Bei einer niedrigen Entladeleistung der Batterie dominiert deutlich das Verhalten des Generators. Das Missing Load Ratio ist deutlich erhöht, sinkt aber mit der Generatorleistung ab. Mit steigender Entladeleistung der Batterie nimmt das Missing Load Ratio sehr schnell ab. Dies liegt an dem hohen Wirkungsgrad der Übertragungspfade von der Batterie zu den Verbrauchern. Ab einer Entladeleistung von 200 kW und einer Generatorleistung von 100 kW ist das Missing Load Ratio verschwindend gering. Hier kommt zum Tragen, dass der Generator nun am optimalen Arbeitspunkt arbeiten kann, d.h. seine Verluste minimiert werden, während die effizientere Batterie den Restbedarf deckt.

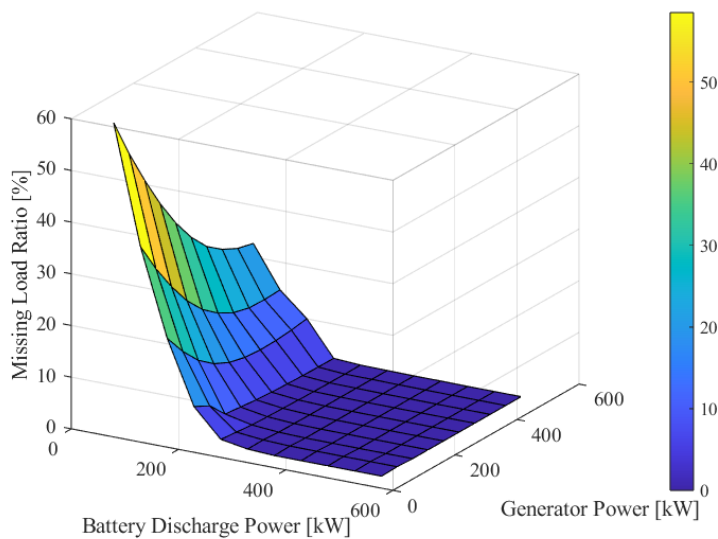


Abbildung 0-3: Missing Load Ratio eines hybrid-betriebenen Straddle Carriers als Funktion der Generatorleistung und der Entladeleistung der Batterie.

Leider schlägt sich der Vorteil der verteilten Last nicht auf den Energieverbrauch der hybriden Lösung (Abbildung 0-4) nieder. Der vollelektrische Straddle Carrier hat stets einen deutlich geringeren Energieverbrauch als der diesel-elektrische Straddle Carrier. Eine Mischung der beiden Quellen sorgt somit lediglich dafür, dass der Gesamtenergieverbrauch ansteigt. Allerdings spricht dies nicht notwendigerweise gegen einen diesel-elektrischen Straddle Carrier. Für das sechsminütige Lastprofil, dass hier untersucht wird, benötigt der vollelektrische Straddle Carrier 10 kWh, was einem Verbrauch von 800 kWh für eine 8 Stundenschicht entspricht. Legen wir die Batterie auf 200 kWh Entladeleistung aus, so reduziert sich die Speicherkapazität auf 8 kWh, was einem Schichtbedarf von 640 kWh entspricht. Bei einem Batteriesystempreis von 150€/kWh entspricht dies einem Kostenvorteil von 24.000€. Die fehlende Leistung wird durch einen Generator kompensiert, der einen Energiebedarf von 7 kWh pro sechs Minuten, also 560 kWh pro Schicht hat. Dies entspricht ca. 56l Treibstoff und damit Kosten von ca. 112€ (bei 2€/l).

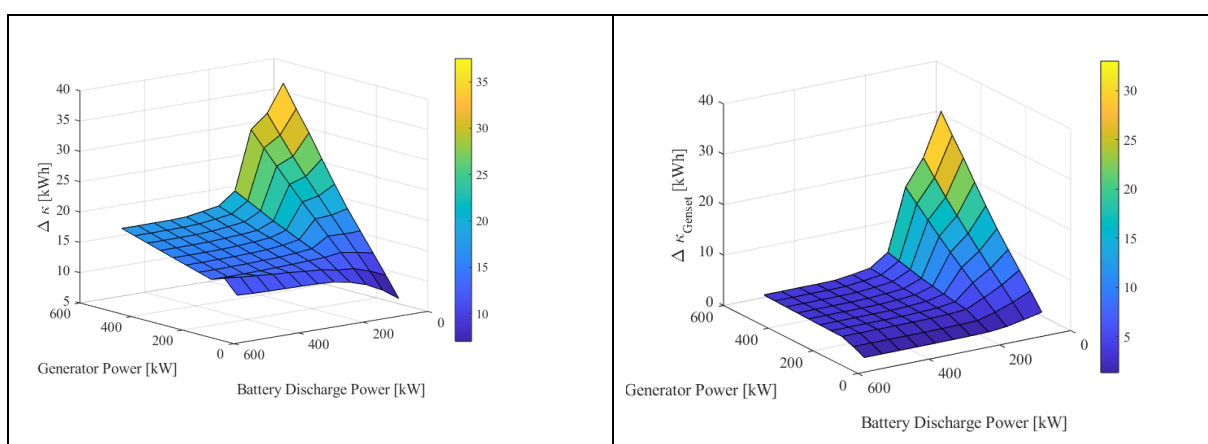


Abbildung 0-4: Energieverbrauch eines hybrid betriebenen Straddle Carriers.

Auch bei der Effizienz erwarten wir eine Mischung der beiden Einzelexperimente. Wie in Abbildung 0-5 zu erkennen ist, dominiert bei niedriger Generatorleistung die Batterie hohen Wirkungsgrad. Dieser wird anteilig durch den Generatorwirkungsgrad reduziert. Die diskutierte Kombination eines Generators mit 100 kW Leistung und eine Batterie mit 200 kW Entladeleistung erweist sich auch hier als eine sinnvolle Kombination.

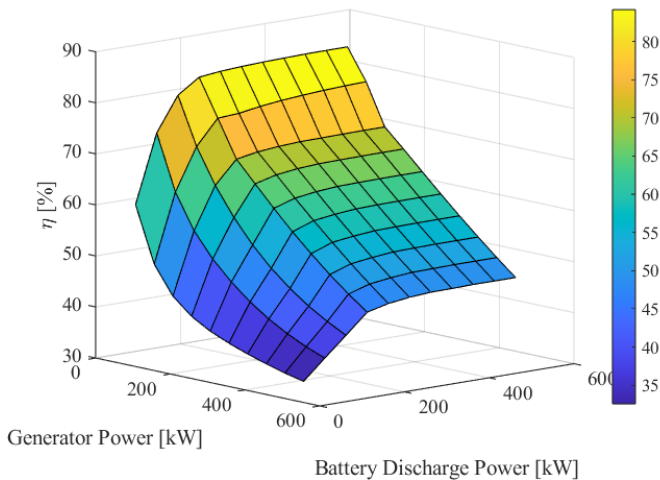


Abbildung 0-5: Effizienz des hybriden Straddle Carriers in Abhängigkeit von der Generatorleistung und der Batterie-Entladeleistung.

6. Fazit

Mit Hilfe des Leistungsflussdiagramms konnten wir für drei verschiedene Antriebsstränge optimale Systemkonfigurationen ermitteln. Diese Informationen können nun in eine betriebswirtschaftliche Vorabanalyse integriert werden, bei den Herstell- und Betriebskosten sowie zu erwartende Erträge miteinander verrechnet werden.[6], [7]

Die benötigte Spitzenleistung wurde in unserem Beispiel durch das Lastprofil vorgegeben. Hier hätte bereits eine statische Analyse des Histogramms Informationen über den Lastbedarf ausgereicht. Die Analyse liefert uns allerdings Aussagen über den Einfluss der Rekuperation und des Verbrauchs und berücksichtigt dabei die Verluste einzelner Übertragungswege.

Durch die Formulierung als nichtlineares Optimierungsproblem stecken in den Ergebnissen keine Annahmen über die Betriebsführung. Die hier gemachten Ergebnisse sind als optimale Ergebnisse einer bestimmten Realisierung anzusehen. Dies hat den Vorteil, dass bei der Entwicklung einer Betriebsführung stets eine Baseline bereits vorhanden ist, an der man sich orientieren kann.[9], [12], [13]. Allerdings wurde in der hier durchgeführten Analyse keine Prognose über den Lastverlauf integriert. Eine erweiterte Formulierung der Optimierungsaufgabe über den gesamten Zeitraum würde es erlauben die global optimale Betriebsführung zu identifizieren. Aufgrund der hohen Dynamik, die sich im Lastprofil widerspiegelt, geht dies mit einem hohen Rechenzeitaufwand einher. Es konnte aber bei anderen Systemen gezeigt werden, dass die hieraus gewonnenen Erkenntnisse aufzeigen, wie eine optimale Betriebsführung aussehen müsste.[13]

Die hier dargestellte Analyse betrachtete nur eine leistungselektronische Realisierung des Antriebsstranges aus Abbildung 2-1. Steht neben der Frage, ob ein diesel-elektrischer, hybrider oder vollelektrischer Antriebsstrang realisiert werden soll, auch die Frage nach der Komponentenauswahl, so erweitert sich die Analyse durch eine Betrachtung unterschiedlicher Wirkungsgrade $\eta_{AB,i}(A_B)$, wobei i einer Komponentenauswahl entspricht. Diese Komponentenauswahl ist dann noch um die Leistungsvorgaben $A_B \in \{0, A_B^{\max,i}\}$ zu erweitern.

Das Leistungsflussdiagramm ermöglicht uns eine einfache Bestimmung der optimalen Systemkonfigurationen und stellt damit einen ersten Schritt für eine quantitative Systemauslegung dar. Es erlaubt, verschiedene Fragestellungen parallel zu betrachten und so erst zu einem deutlichen späteren Zeitpunkt mit arbeitsintensiven Detailanalysen zu beginnen. Dies erlaubt bei der Elektrifizierung von mobilen Maschinen, die eine Vielzahl von Akteuren integriert haben, eine sinnvolle Vorauswahl.

Literaturnachweise

- [1] A. Lajunen, P. Sainio, L. Laurila, J. Pippuri-Mäkeläinen, and K. Tammi, "Overview of powertrain electrification and future scenarios for non-road mobile machinery," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 5, 2018, doi: 10.3390/en11051184.
- [2] M. Liukkonen, A. Lajunen, and J. Suomela, "Feasibility study of fuel cell-hybrid powertrains in non-road mobile machineries," *Autom Constr*, vol. 35, pp. 296–305, 2013, doi: 10.1016/j.autcon.2013.05.019.
- [3] K. Tammi, P. Sainio, and D. Student, "Hybrid and electric Non-Road Mobile Machines (NRMM) For further interest on NRMM roadmap," 2017.
- [4] Armin U. Schmiegel, "From the smoking exhaust to the clean socket Design steps from the diesel-powered mobile machine to the all-electric mobile machine Part 1 – Power and Energyconsiderations," Reutlingen, 2022.
- [5] Armin U. Schmiegel, "From the smoking exhaust to the clean socket Design steps from the diesel-powered mobile machine to the all-electric mobile machine Part 2 – The triad of battery, inverter and motorMotor," Reutlingen, 2022.
- [6] A. U. Schmiegel, *Energy Storage Systems*, vol. in Press. Oxford: Oxford University Press, 2022.
- [7] A. U. Schmiegel, *Energiespeicher für die Energiewende*. München: Hanserverlag, 2019.
- [8] A. U. Schmiegel and A. Kleine, "Upper economical performance limits for pv storage systems," in *28th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2013, pp. 1–20.
- [9] S. Ried, A. U. Schmiegel, and N. Munzke, *Efficient Operation of Modular Grid-Connected Battery Inverters for RES Integration*. 2020. doi: 10.1007/978-3-030-32157-4_10.
- [10] J. Kukkaro, "Straddle Carrier Electric Powertrain Optimization," no. August, 2016.
- [11] P. Hangga and T. SHINODA, "Study on Efficiency Measurement Technique for Container Handling Equipment – Application to Hybrid Straddle Carrier," no. JULY 2014, 2014.
- [12] A. U. Schmiegel, "Residential PV Storage Systems - storage size matters - Residential PV Storage Systems," in *Intersolar Conference*, 2013.
- [13] A. Kleine and A. U. Schmiegel, "Optimized Operation strategies for PV Storages systems - Yield limitations, optimized battery configuration and the benefit of a perfect forecast," *Energy Procedia*, vol. 46, pp. 104–113, 2014, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.163>