

Auslegung eines hybriden Antriebsstrangs aus Batterie und Brennstoffzelle

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 sind die Anforderungen an mobile Maschinen teilweise andere als bei Personenfahrzeugen. So werden Nutzfahrzeuge in der Regel über einen längeren Zeitraum dauerhaft genutzt, wohingegen Personenfahrzeuge zum größten Teil stehen. Ebenso haben die Lastprofile für mobile Maschinen eine andere Struktur, da Nutzfahrzeuge höhere Leistungen über einen längeren Zeitraum benötigen. Gleichzeitig weisen die Lastprofile stärkere Schwankungen auf.

Als ein Beispiel für die Komplexität der Auslegung haben wir uns in [4] anhand eines Straddle Carriers mit der Fragestellung befasst, wie hoch die Leistung eines Generators oder einer Batterie bei einem Straddle Carrier gewählt werden muss. Dabei wurden drei mögliche technische Umsetzungen des Antriebsstrangs, diesel-elektrisch, hybrid und vollelektrisch, jeweils einzeln optimiert.

In diesem Whitepaper wollen wir uns nun mit einem anderen System befassen. Einem Fernlasttransporter, der mit einer Brennstoffzelle und einer Lithium-Ionen-Batterie ausgestattet ist. Die Verwendung von Brennstoffzellen als Hauptenergiequelle wurde in [2] für verschiedene Systemtopologien betrachtet. Vergleichbar zu den Arbeiten in [4] und [5] wurde hier das Lastprofil eines ein Straddle Carriers betrachtet. Fokus der Betrachtungen war die Auslegung der Brennstoffzellen-Hybrid-Antriebsstränge bezüglich ihrer Leistung. In [6] wurde eine hybrid-betriebene Straßenbahn betrachtet. Bei der Kombination von unterschiedlichen Energiequellen ist es notwendig, eine Betriebsstrategie zu definieren. Die gewählten Ansätze reichen von der Verwendung von Modellprädiktiven Ansätzen und Fuzzy Regelungen, bis zu globalen Optimierungsstrategien und zustandsmaschinenbasierter Steuerung [7]. Da die Strategie auch stets Auswirkung auf die Auslegung hat, wäre hier ein von der technischen Realisierung unabhängiger Lösungsansatz sinnvoll. Bereits in [8]–[11] konnte gezeigt werden, dass die Systembeschreibung durch Leistungsflussdiagramme mit der sich daraus ergebenden einfachen Optimierungsaufgabe ein Ansatz ist, die Frage nach der optimalen Strategie mit der Frage nach einer optimalen Auslegung zu kombinieren. Bei diesem Ansatz erfolgt die Auswahl der Strategie allein einem Optimierungskriterium, welches beispielsweise den Ertrag, oder die Verluste optimiert. Wird dieses Problem bei voller Kenntnis der Produktions- und Lastprofile verwendet, besteht die Möglichkeit eine global optimale Strategie zu identifizieren, die damit die bestmögliche Realisierung beschreibt.

2. Der hybrid-betriebene Antriebsstrang

In Abbildung 2-1 ist der hybride Antriebsstrang dargestellt. Der elektrische Antrieb ist mit einem DC-Bus verbunden, an dem eine Batterie und eine Brennstoffzelle angeschlossen sind. Da die Spannungsniveaus der Batterie und der Brennstoffzelle unterschiedlich sind, sind beide über einen DC/DC-Steller mit dem Zwischenkreis verbunden.

Alternativ könnte man hier auch eine Topologie wählen, bei dem die Batteriespannung die Spannung des DC-Buses festlegt.

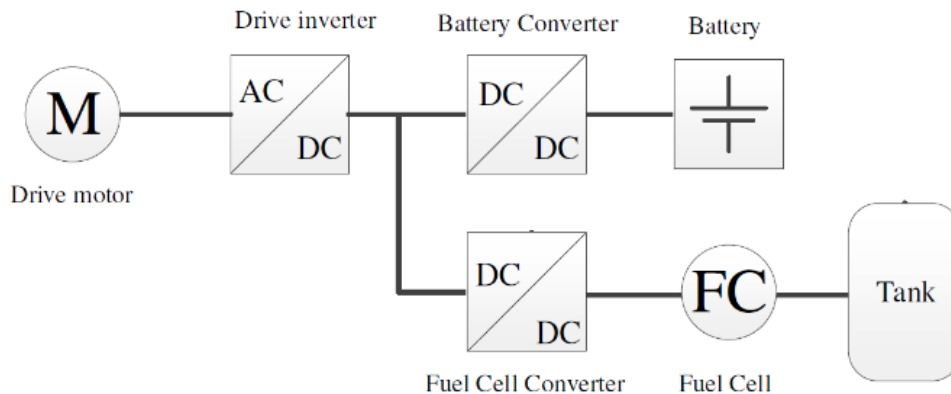


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung eines hybriden Antriebstrangs aus Batterie und Brennstoffzelle.

Für die Auslegung dieses Systems stellt sich die Frage, welche Energiemenge in der Batterie und welche in der Brennstoffzelle gespeichert werden sollen. Die Batterie hat den Vorteil, dass sie sowohl durch die Brennstoffzelle als auch durch Rekuperation geladen werden kann. Die Brennstoffzelle hat hingegen den Vorteil, dass die zur Verfügung stehende Energiemenge durch die Größe des Wasserstofftanks bestimmt wird und dieser skaliert werden kann. Die Ladezeiten für einen Wasserstofftank sind – im Vergleich zur Batterie – deutlich kürzer.

Im Gegensatz zu Lithium-Ionen-Batterien sind Brennstoffzellen nicht in der Lage auf hohe oder schnelle Leistungsschwankungen zu reagieren [12]. Der Grund ist darin zu sehen, dass für den Betrieb einer Brennstoffzelle an der Membran ein Gleichgewicht zwischen Reaktanten und Ladungsträgern benötigt wird. Bei starken oder schnellen Leistungsschwankungen ist dieses Gleichgewicht gestört [8]. Dies kann zum einen zu einem Überschuss an Wasser (Flooding) oder eine Unterversorgung an Wasserstoff (Dehydration) führen. Dieser Effekt ist umso stärker je mehr Stacks in Serie durchströmt werden [13].

Ist zu viel Wasser im Stack kann kein Austausch über die Membranwand durchgeführt werden, da Wasserstoff und Sauerstoff nicht mehr durch die Membran reagieren können. Fehlt Wasserstoff reduziert sich die Reaktionsrate, was zu einer erhöhten Polarisation führt, die die Membran schädigt, da der Sauerstoff nun mit dem Material der Membran reagiert.

Eine geeignete Strategie besteht darin, die Batterie mit der Brennstoffzelle kontinuierlich zu laden, so dass die Entladeleistung der Brennstoffzelle keinen starken Fluktuationen unterliegt und stets genug Energie in der Batterie enthalten ist.

3. Beschreibung des hybriden Antriebstrangs mit Hilfe des Leistungsflussdiagramms

Um den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Performance des Gesamtsystems zu analysieren, verwenden wir eine Systembeschreibung des Fahrzeugs im Leistungsflussdiagramm. In dieser Darstellung werden die verschiedenen Komponenten auf Leistungsquellen, -speicher und -senken abstrahiert. Zwischen diesen Leistungsknoten kann Leistung übertragen werden. Die technologischen Randbedingungen unterschiedlicher Realisierungen werden dann durch den Wirkungsgrad und Einschränkungen im Leistungstransport beschrieben.

In Abbildung 3-1 ist das Leistungsflussbild des Fahrzeugs dargestellt. Es besteht aus zwei Speicherknoten, der Brennstoffzelle F und der Batterie B , die die Last L versorgen. Wir beschreiben den Speichervorgang dadurch, dass wir Leistung in die Zukunft zum Zeitpunkt $t + \Delta$ übertragen, bzw. Leistung aus der Vergangenheit vom Zeitpunkt $t - \Delta$ erhalten. Wobei wir hier mit einer zeitdiskreten Beschreibung mit einem Zeitinkrement Δ arbeiten. Beide Speicherknoten können also Leistung aus der Vergangenheit beziehen $B(-\Delta), F(-\Delta)$ oder Leistung zu einem Knoten in der Zukunft übertragen $B(\Delta), F(\Delta)$. Der Leistungsbedarf des Fahrzeuges wird über ein Lastprofil $\tilde{L}$ abgebildet, welches für jeden Zeitpunkt definiert wieviel Leistung der Antrieb benötigt.

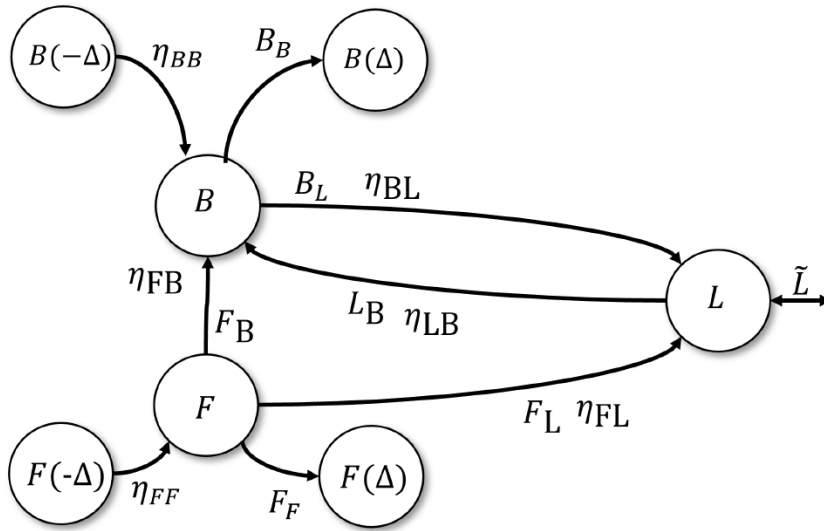


Abbildung 3-1: Leistungsflussbild eines hybriden Brennstoffzellentrucks mit einer Batterie als Zwischenspeicher.

Das System wird über Flussgleichungen beschrieben, die sich aus der Energieerhaltung bzw. den Anforderungen ergeben. Das beschreibende Gleichungssystem lautet dann:

$$0 = \eta_{LB} L_B + \eta_{FB} F_B + \eta_{BB} B(-\Delta) - (B_B(\Delta) + B_L)$$

$$0 = \eta_{FF} F(-\Delta) - (F_F(\Delta) F_B + F_L)$$

$$\tilde{L} = \eta_{BL} B_L + \eta_{FL} F_L - L_B$$

Die erste Gleichung beschreibt die Leistungsflüsse zur und von der Lithium-Ionen-Batterie. Die zweite Gleichung beschreibt die Leistungsflüsse der Brennstoffzelle und die dritte Gleichung den Leistungsfluss zur und von der Last.

Neben die Flussgleichungen müssen noch weitere Randbedingungen hinzugefügt werden. Zum einen gilt, dass die Gesamtleistung der Brennstoffzelle auf $F_{\max}$ begrenzt ist. Die Summe aus der zur Batterie übertragenen Leistung F_B und der zur Last übertragenen Leistung F_L muss also in Summe kleiner als die maximale Leistung $F_{\max}$ sein:

$$F_B + F_L \leq F_{\max}$$

Auch die Antriebsleistung ist auf $L_{\max}$ begrenzt. Batterie und Brennstoffzelle zusammen können nicht mehr als diese Leistung bereitstellen. Dabei betrachten wir nicht die von der Brennstoffzelle und der Batterie übertragene Leistung, sondern nur jene Leistung, die nach Abzug der Verluste an der Last „ankommt“.

$$\eta_{FL} F_L + \eta_{BL} B_L \leq L_{\max}$$

Weiterhin darf die maximale Ladeleistung der Batterie $B_{\max}^{\text{charge}}$ nicht überschritten werden.

$$\eta_{FB} F_B + \eta_{LB} L_B \leq B_{\max}^{\text{charge}}$$

Auch hier wird die Höhe der übertragenen Leistung durch die Übertragungsverluste korrigiert.

Wir wollen die Leistungsschwankungen, die auf die Brennstoffzelle wirken, limitieren. Dies bilden wir dadurch ab, dass wir die Differenz zwischen der Entladeleistung von vorherigen Zeitpunkt $-\Delta$ mit der Entladeleistung des aktuellen Zeitpunktes auf $\Delta F_{\max}$ limitieren:

$$|(F_B(-\Delta) + F_L(-\Delta)) - (F_B + F_L)| \leq \Delta F_{\max}$$

Dadurch, dass wir die Änderung der Leistung der Brennstoffzelle limitieren, ist der Antrieb darauf angewiesen, dass immer genug Leistung durch die Batterie bereitgestellt wird. Daher ist sicherzustellen, dass der Ladezustand der Batterie nicht unterhalb einer bestimmten Schwelle fällt. Dies drücken wir durch die folgende Relation aus:

$$B_B \geq \frac{\kappa}{\Delta t} c_B$$

Wobei $c_B \in [0,1]$ den Anteil der Speicherkapazität beschreibt, der mindestens vorhanden sein soll.

Die bisher beschriebenen Gleichungen stellen ein Ungleichungssystem dar. Ein solches System können wir als Optimierungsproblem ansehen. Um dies zu lösen, benötigen wir eine Zielfunktion, d.h. ein Maß, das es uns ermöglicht eine gute Lösung von einer schlechten Lösung zu unterscheiden. In unserem Fall fokussieren wir uns auf die Aufgabe die Verluste zu minimieren.

$$\min Y : (1 - \eta_{BL}(B_L))B_L + (1 - \eta_{LB}(L_B))L_B + (1 - \eta_{FB}(F_B))F_B + (1 - \eta_{FL}(F_L))F_L$$

In der Definition von Y haben wir darauf verzichtet die Verluste durch Selbstentladung mit zu berücksichtigen. Bei beiden Speichermedien sind diese bezogen auf einen Tag gering.

Mit diesen Gleichungen sind die Leistungsflüsse des Systems beschrieben. Im nächsten Schritt muss die Systemkonfiguration festgelegt werden. Wir müssen festlegen, welche Randbedingungen sich aus der Technologie heraus ergeben.

4. Systemkonfiguration

Das Leistungsflussdiagramm beschreibt, wie Leistung von einer Komponente zur nächsten übertragen wird. Die technologische Umsetzung spiegelt sich bisher in dem Wertebereich dieses Leistungstransfers wider. Aber auch die Effizienz wird durch die Wahl der leistungselektronischen Komponenten beeinflusst. Wir beschreiben diese über die Transferverluste. Wenn wir einen Transfer von A nach B , also A_B , haben, kommt lediglich die Leistungsmenge A'_B an:

$$A'_B = A_B - (a_{AB} + b_{AB} A_B + c_{AB} A_B^2)$$

Dabei sind a_{AB}, b_{AB}, c_{AB} Verlustkoeffizienten, die durch die jeweilige technologische Realisierung festgelegt sind. Die Effizienz ergibt sich dann zu:

$$\eta_{AB} = 1 - \left(\frac{a_{AB}}{A_B} + b_{AB} + c_{AB} A_B \right)$$

Der Vorteil dieser Beschreibung ist, dass die Verlustkoeffizienten einfach experimentell zugänglich sind. In unserer Untersuchung verfolgen wir einen anderen Ansatz. Für die Ermittlung der Koeffizienten legen wir die Effizienz an drei Punkten fest:

1. Wo liegt die maximale Effizienz?
2. Wie hoch ist die maximale Effizienz?
3. Wie hoch ist die Effizienz bei Maximalleistung?

In Tabelle 1 sind diese Angaben für die verschiedenen leistungselektronischen Komponenten angegeben. Wir beziehen diese Angaben immer auf die Maximalleistung der Komponenten, d.h. wir gehen davon aus, dass die Effizienzkurve entsprechend der Maximalleistung skaliert. Die sich aus diesem Ansatz ergebenden Effizienzkurven der vier Leistungselektronischen Komponenten sind in Abbildung 4-1 abgebildet.

Tabelle 1: Definition der Effizienzen der leistungselektronischen Komponenten des FCT

Component	$\eta(P_{\max})$	P_{opt}	$\eta(P_{\text{opt}})$
Drive	75%	40% $P_{\max}$	85%
Drive inverter	98%	25% $P_{\max}$	95%
Battery Converter	94%	35% $P_{\max}$	92%
Fuel Cell (incl. Converter)	80%	40% $P_{\max}$	85%

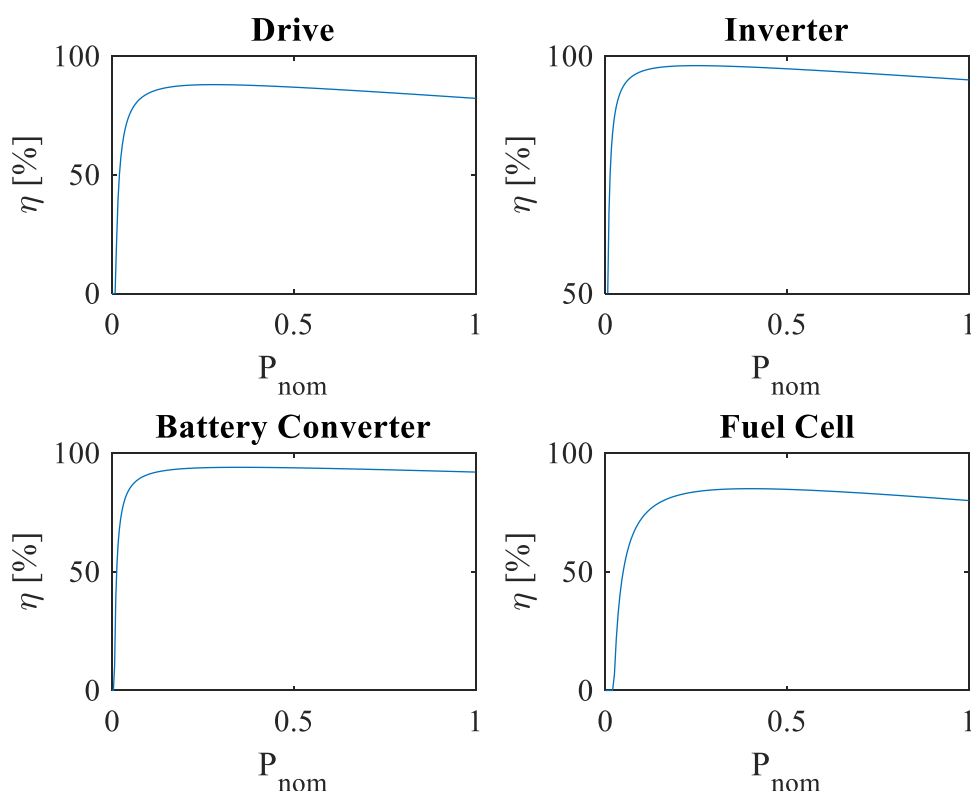


Abbildung 4-1: Verwendete Effizienzen der Einzelkomponenten. Bei der Brennstoffzelle wurden die Verluste von Brennstoffzelle und Fuel Cell Converter zusammen betrachtet.

Die Effizienzen der leistungselektronischen Komponenten entsprechen noch nicht den Effizienzen des Leistungstransfers von einem Knoten zum anderen. Hierzu müssen die verschiedenen Stufen kombiniert betrachtet werden. So müssen bei einem Leistungstransfer von der Brennstoffzelle zum Antrieb zunächst die Verluste des Fuel Cell Converters, dann des Drive Inverters und danach des Motors ermittelt werden. Diese verschiedenen Schritte können dann zu einer Effizienzkurve

zusammengefasst werden. In Abbildung 4-2 sind die Effizienzkurven für Batterie und Brennstoffzelle zur Last dargestellt. Man erkennt, dass die resultierende Effizienz für einen Leistungstransfer niedriger ist als die Effizienz der einzelnen Komponente. Dies ist zu erwarten, so würde bei einem Leistungstransfer von der Brennstoffzelle zur Batterie die Leistung zunächst durch die Brennstoffzelle, dann durch den Fuel Cell Converter und dem Battery Converter übertragen werden. Alle drei Komponenten reduzieren durch ihre Verluste die Gesamteffizienz.

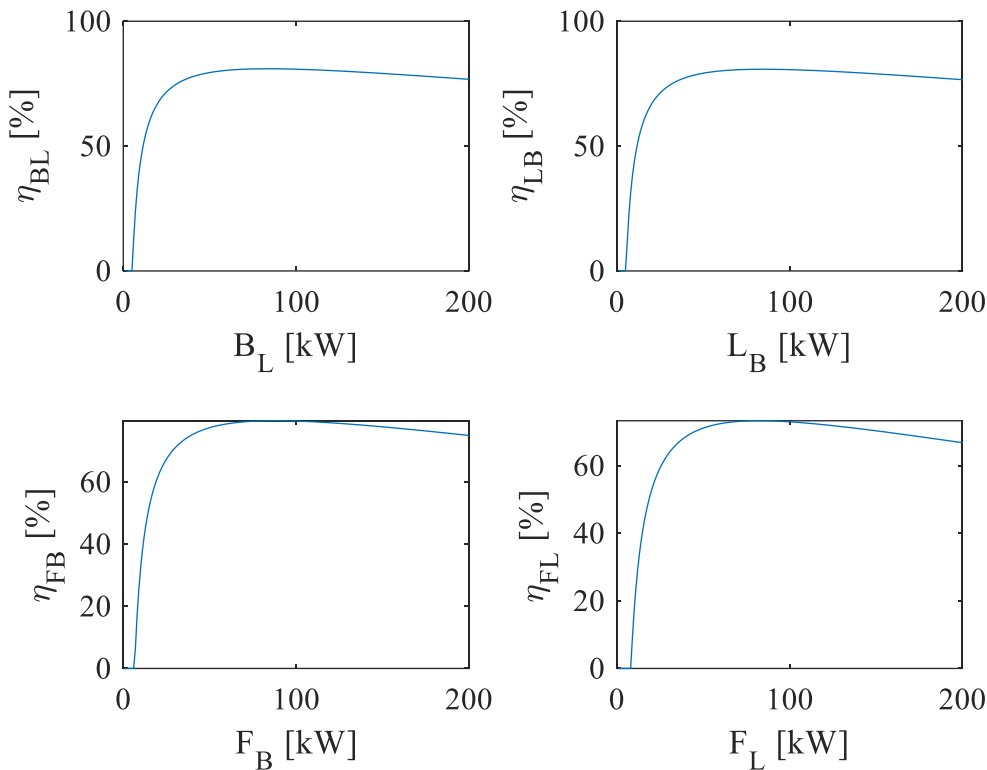


Abbildung 4-2: Effizienzkurven der vier Leistungstransfers zwischen der Brennstoffzelle F , der Batterie B und der Last L .

5. Leistungsfluss eines Nutzfahrzeuges

Für die Auslegung und die Bewertung unterschiedlicher Konfigurationen benötigen wir ein Lastprofil $\tilde{L}$. Das Lastprofil stellt den Leistungsbedarf über die Zeit dar. Wir gehen dabei davon aus, dass es keine Interaktion zwischen der Leistungsbereitstellung und dem Leistungsbedarf gibt, d.h. wir schließen den Regelkreis nicht. Dies stellt eine Vereinfachung dar, denn in der Realität würde der Fahrer sein Fahrverhalten der Leistungsbereitstellung von Brennstoffzelle und Batterie anpassen. Wenn eine bestimmte Spitzenleistung gefordert werden würde, die nicht bereitgestellt werden kann, würde das Fahrzeug länger beschleunigen oder der Fahrer ein Überholmanöver abbrechen. Diese Interaktionen werden hier nicht betrachtet. Das Ziel der Verwendung des Leistungsflussdiagramms besteht darin, mit relativ geringem Aufwand verschiedene technische Lösungsansätze quantitativ zu vergleichen.

In dieser Studie betrachten wir das Leistungsprofil eines Fernlasttransporters (long-haul transporter) [8][14]. In Abbildung 5-1 ist das Lastprofil und sein Histogramm dargestellt. Das Lastprofil ist geprägt von Abschnitten mit einer längeren Fahrt und einer Phase kleineren Fahrten und Stillstandzeiten. In unserer Betrachtung wollen wir davon ausgehen, dass während dieser Zeit keine externe Lademöglichkeit besteht, d.h. das Fahrzeug muss seine Energie zu Beginn der Fahrt geladen haben.

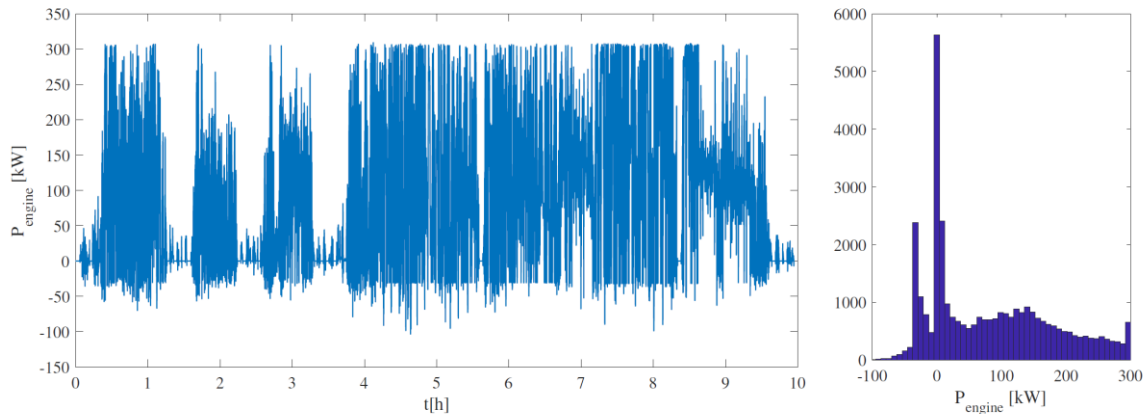


Abbildung 5-1: Lastprofil des hybriden Brennstoffzellentrucks [8]

Die Systembetrachtung erfolgt nun folgendermaßen: Zunächst wird eine Systemkonfiguration definiert. Danach wird zu jedem Zeitpunkt das Optimierungsproblem gelöst, d.h. es wird zu jedem Zeitpunkt geschaut, mit welchen Leistungsflüssen die Verluste minimiert und dennoch der geforderte Leistungsfluss bereitgestellt werden kann. In Abbildung 5-2 ist eine beispielhafte Lösung dargestellt. Man kann erkennen, dass die Leistungsflüsse teilweise höher sind als die Last. Dies liegt daran, dass die Transferverluste mitberücksichtigt werden müssen. Wenn eine Leistung P vom Antrieb benötigt wird, muss eine Leistung $\frac{P}{\eta}$ übertragen werden.

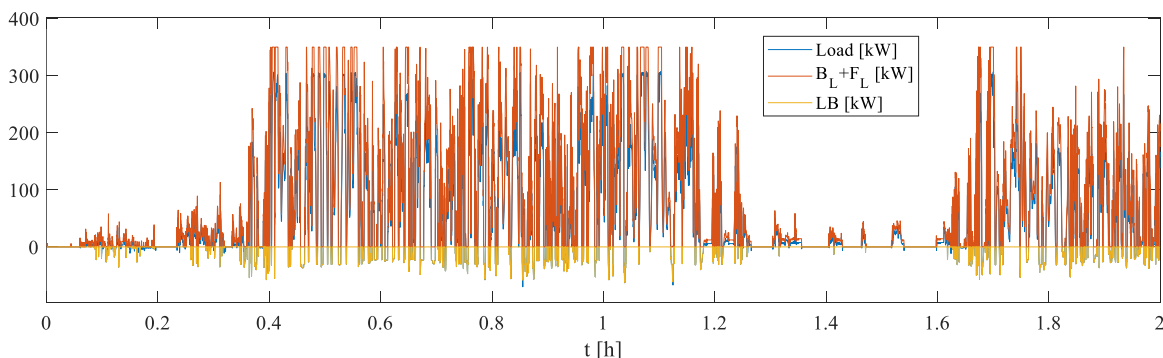


Abbildung 5-2: Lastprofil (Load) und Lastflüsse einer Beispielkonfiguration.

6. Systemauslegung

Die Frage, wie die Brennstoffzelle genutzt wird, hängt von der Fragestellung ab, wie hoch die erlaubten Leistungsgradienten sind, die der Brennstoffzelle erlaubt werden soll. Betrachten wird zunächst den Fall eines kleinen maximalen Leistungsgradient von $\Delta F_{\max} = 0,05 \frac{\text{kW}}{\text{s}}$. Hier wäre das Ziel die Brennstoffzelle möglich dauerhaft zu betreiben. Daher wird $c_B = 50\%$ gewählt, d.h. sobald die Batteriekapazität unterhalb von 50% fällt, fängt die Brennstoffzelle an zu laden. In Abbildung 6-1 (links) ist deutlich zu erkennen, wie die Entladung der Brennstoffzelle langsam ansteigt. Dieser Anstieg ist jedoch nicht schnell genug, so dass die Batterie für einen kurzen Moment komplett entladen ist. Dieser Effekt ist beim großen Gradienten nicht zu beobachten (Abbildung 6-1 (rechts)). Die Brennstoffzelle fängt bereits sehr früh mit ihrer Endladung an, lädt aber auch nicht die Batterie, da deren Ladezustand noch oberhalb des Schwellwertes liegt.

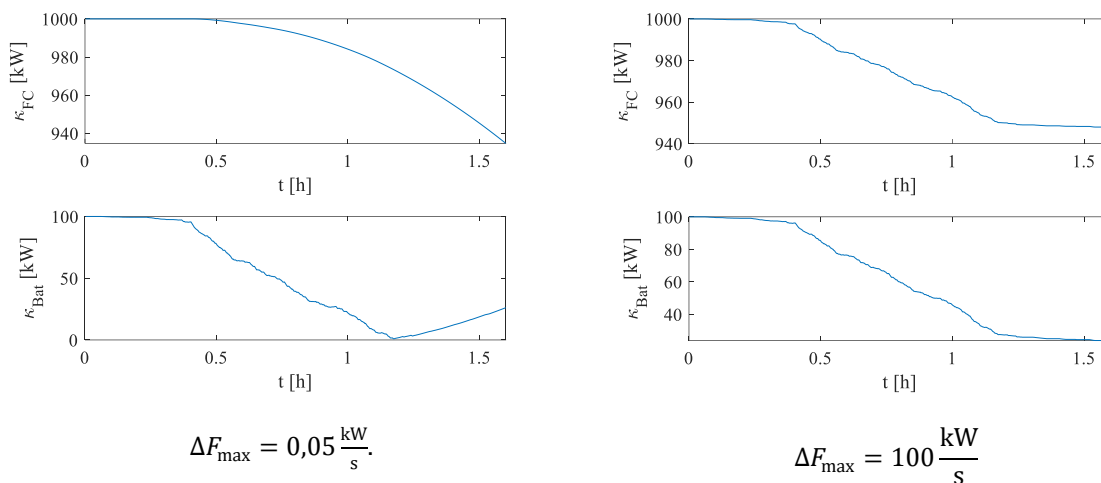


Abbildung 6-1: Kapazitätsverlauf bei einem kleinen Gradienten von $\Delta F_{\max} = 0,05 \frac{\text{kW}}{\text{s}}$ und einem großen Gradienten von $\Delta F_{\max} = 100 \frac{\text{kW}}{\text{s}}$ dargestellt. Der Schwellwert für das Laden der Batterie liegt bei 50% beim kleinen Gradienten und 5% beim großen Gradienten.

Die Leistungsflüsse dieser beiden Konfigurationen sind ebenfalls unterschiedlich. In Abbildung 6-2 sind die Leistungsflüsse beider Konfigurationen dargestellt. Wie der Kapazitätsverlauf der Brennstoffzelle bei einem kleinen Gradienten vermuten lässt, steigt der Leistungsfluss linear an. Es gibt einen kleinen Bereich, in dem die Leistung von der Brennstoffzelle auch für die Deckung der Last genutzt wird, allerdings fließt der Großteil der Leistung hier in die Batterie.

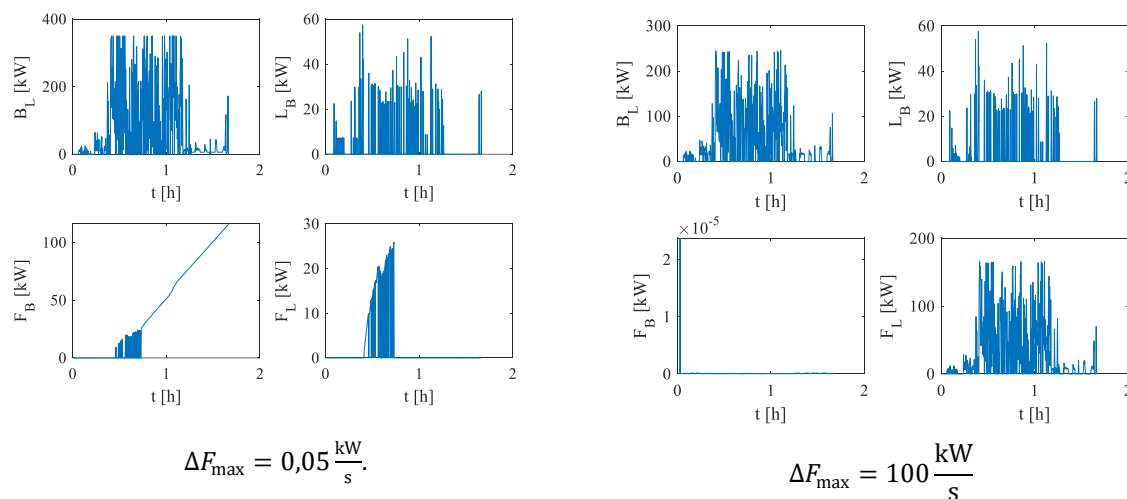


Abbildung 6-2: Leistungsflüsse für einen Antriebsstrang mit einem kleinen Gradienten und einem großen Gradienten. Der Schwellwert für das Laden der Batterie liegt bei 50% beim kleinen Gradienten und 5% beim großen Gradienten.

Bei einem großen Gradienten sehen wir, dass keine Leistung in die Batterie übertragen wird. Stattdessen wird die Brennstoffzelle, zusammen mit der Batterie für die Deckung der Last genutzt.

Da beim Laden der Batterie höhere Verluste entstehen, als wenn die Last direkt gedeckt werden würde, macht diese Aufteilung Sinn.

In Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2 haben wir einen kurzen Ausschnitt des Lastprofils aus Abbildung 5-1 verwendet. Wir wollen nun versuchen mit Hilfe geeigneter Messgrößen eine optimale Konfiguration zu ermitteln. Dabei betrachten wir vier Größen, die sich aus vier Anforderungen ableiten.

Wir wollen sicherstellen, dass die Last stets versorgt ist, mit Hilfe des Missing Load Ratios M beschreiben wir dabei den Anteil der Leistungspunkte im Lastprofil $\tilde{L}$, die in dem Zeitlauf nicht abgedeckt werden:

$$M = \frac{\tilde{L} - (\eta_{FL} F_L + \eta_{BL} B_L)}{\tilde{L}}$$

In unserer Simulation haben wir keine Rückkopplung zwischen dem Fahrer und dem Lastprofil, d.h. eine Unterdeckung der Last hat keine Auswirkungen auf den weiteren Fahrverlauf. Dies vereinfacht den Rechenaufwand, damit die Ergebnisse trotzdem sinnvoll sind, sollte M nicht zu groß sein.

Des Weiteren betrachten wir die Gesamteffizienz η des Leistungsflusses, da die Zielfunktion Y das Ziel hat, die Verluste zu vermeiden.

$$\eta = 1 - \frac{\sum_{t=0}^{t=T_{\text{end}}} Y}{\sum_{t=0}^{t=T_{\text{end}}} B_L + L_B + F_B + F_L}$$

Um die Lebensdauer der Brennstoffzelle zu verlängern, haben wir die Beschränkung des Leistungsgradienten eingeführt. Als weitere Maßzahl betrachten wir den mittleren Leistungsgradienten ΔF_{rms} . Dieser gibt an, welcher Gradient im Mittel für die gesamte Fahrt beobachtet wird.

$$\Delta F_{\text{rms}} = \frac{1}{T_{\text{end}}} \sqrt{\sum_{t=0}^{t=T_{\text{end}}} (\Delta F)^2}$$

Die letzte Kennzahl ist der Gesamtenergieverbrauch κ , der für das Durchfahren des Lastprofils benötigt wird. Wir gehen davon aus, dass der Wasserstofftank sehr groß ist. Das Fahrzeug führt immer genug Energie mit sich, um seine Tour zu beenden. Aus der Füllmenge, die am Ende im Tank noch verblieben ist, können wir somit den Verbrauch ermitteln.

Im Folgenden betrachten wir den Einfluss von ΔF_{max} auf diese vier Größen. Dabei arbeiten wir mit einer Batteriekapazität von 100 kWh. Anders als in [9] beschränken wir hier nicht die Be- und Entladeleistungen. Dies bedeutet, dass die Lithium-Ionen-Batterie mit einer maximalen Entladeleistung von 4C genutzt werden kann. Was bei modernen Zellen für kürzere Zeitpunkte möglich ist.

Wir variieren ΔF_{max} über einen Wertebereich von $0,01 \frac{\text{kW}}{\text{s}}$ bis $10 \frac{\text{kW}}{\text{s}}$ und betrachten die beschriebenen Größen. In Abbildung 6-3 ist das Ergebnis dieses Experimentes dargestellt. Aufgrund des großen Wertebereiches wählen wir eine logarithmische x-Achse.

Das Missing Load Ration M zeigt, dass bereits bei einem sehr kleinen Wert für ΔF_{max} lediglich 1-1,5% der Lastwerte nicht erfüllt sind. Da wir mit einem sehr großen Wasserstofftank arbeiten, sind diese Verluste lediglich auf die Trägheit der Brennstoffzelle zurückzuführen. Also auf jene Fälle, wo die Brennstoffzelle noch nicht genug Leistung beisteuert. Dieser „Trägheitseffekt“ hält bis zu einem Wert von ca. $1 \frac{\text{kW}}{\text{s}}$ an. Von da an fällt M ab.

Der Wirkungsgrad η variiert im gesamten Wertebereich des Experimentes zwischen 74% und 75,5%. Auffällig ist der Abfall ab ca. $0,4 \frac{\text{kW}}{\text{s}}$. In diesem Bereich arbeitet die Brennstoffzelle als Range

Extender deutlich besser, wie wir aus den Betrachtungen zu M wissen, d.h. die eingespeiste Leistung entspricht dem Bedarf der Batterie besser als bei einer trägen Einstellung. Dies hat zur Folge, dass die von der Brennstoffzelle bereitgestellte Leistung über eine zusätzliche Wandlungsstufe in die Batterie übertragen wird, was den Gesamtwirkungsgrad reduziert. Reduzieren wir die Trägheit der Brennstoffzelle, indem wir $\Delta F_{\max}$ weiter erhöhen, kommt es zu einem Übergang, bei dem die Brennstoffzelle nicht mehr als Range Extender, sondern als Leistungsquelle für die Last dient. In diesem Fall wird die von der Brennstoffzelle bereitgestellte Leistung effizienter genutzt, was wir durch den Anstieg der beobachteten Effizienz beobachten können.

Der Anstieg der Effizienz macht sich auch im Verbrauch κ bemerkbar. Bei einer trägen Brennstoffzelle ist der Verbrauch mit 1400 kWh im Vergleich zu einer Konfiguration mit einem hohen $\Delta F_{\max}$ 16% höher. Bei einem Wert von $\Delta F_{\max} \approx 2 \frac{\text{kW}}{\text{s}}$ erreicht dieser sein Maximum.

Überraschenderweise steigt der Verbrauch bei einem noch höheren Wert wieder an. Dies liegt daran, dass sich dann auch der Anteil der Brennstoffzelle bei der Versorgung der Last erhöht und dadurch die Verluste der Brennstoffzelle steigen.

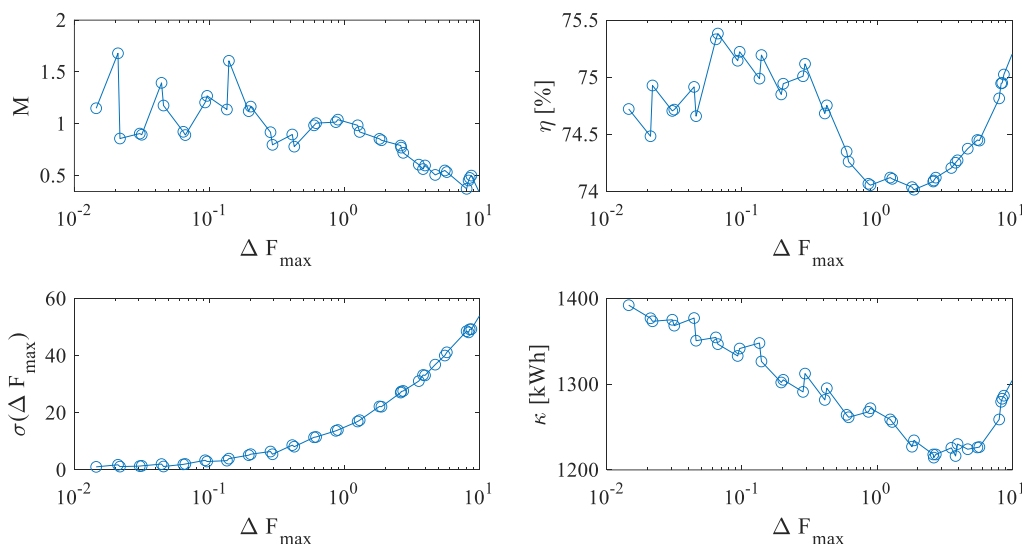


Abbildung 6-3: Auswertung der Fahrten mit unterschiedlichem maximalem Gradienten $\Delta F_{\max}$ bei einer Batteriekapazität von 100 kWh.

Diese Experimente zeigen, dass bei dem hier betrachteten Lastprofil ein Gradient von $\Delta F_{\max} = 2 \frac{\text{kW}}{\text{s}}$ für die Effizienz des Systems optimal ist.

7. Fazit

Mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge sind technisch anspruchsvolle, komplexe Energiespeichersysteme deren Auslegung mit der Analyse unterschiedlicher Fragestellungen einher geht. Für eine schnelle Analyse verschiedener technischer Realisierungen kann das Leistungsflussdiagramm eine einfache Hilfe sein. In diesem Aufsatz haben wir die Methode für die Auslegung eines Lastwagens mit einem hybriden Antrieb aus Batterie und Brennstoffzelle betrachtet. Der Fokus bestand hier in der Fragestellung, mit welcher Limitierung des Leistungsgradienten gearbeitet werden muss und welche Auswirkung seine Einschränkung auf unterschiedliche Kennzahlen hat. Im Bezug auf den Energieverbrauch zeigte sich dabei, dass wir den Verbrauch um 15% reduzieren können, wenn wir einen Leistungsgradienten von $\Delta F_{\max} = 2 \frac{\text{kW}}{\text{s}}$ zulassen. Ursache ist, dass die Verwendung der Brennstoffzelle als Range Extender durch die zusätzliche Wandlungsstufe zusätzliche Verluste erzeugt.

Die hier gewählte Methode erlaubt weitere Analysen, die für die Auslegung relevant sein können. So haben wir hier die Eigenschaften der Leistungselektronik nicht variiert und die Auswirkung von unterschiedlichen Schaltungstopologien oder die Bewertung unterschiedlicher Batteriezelltechnologien betrachtet. Auch das Optimierungsproblem wurde nur zu jeweils einem Zeitpunkt und nicht über einen längeren Zeitbereich gelöst. Dies würde zusätzliche Erkenntnisse über das Leistungsvermögen der bestmöglichen Betriebsführung erlauben.

Dennoch konnte diese Studie zeigen, wie mit einfachen, experimentell zugänglichen Daten und Parametern eine erste quantitative Einschätzung der optimalen Auslegung realisiert werden kann.

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, "The Straddle Carrier as an example for the electrification of mobile machines," Reutlingen, 2022.
- [5] J. Kukkaro, "Straddle Carrier Electric Powertrain Optimization," no. August, 2016.
- [6] P. Garcia, L. M. Fernandez, C. A. Garcia, and F. Jurado, "Fuel Cell-Battery Hybrid System for Transport Applications," no. November, 2009, doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382685.
- [7] Md. R. Habib *et al.*, *Recent Progress in Energy Management System for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle*, no. February 2022. Springer Singapore, 2022. doi: 10.1007/978-981-16-4321-7_60.
- [8] A. U. Schmiegel, *Energy Storage Systems*, vol. in Press. Oxford: Oxford University Press, 2022.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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>
- [12] P. Pei and H. Chen, "Main factors affecting the lifetime of Proton Exchange Membrane fuel cells in vehicle applications: A review," *Appl Energy*, vol. 125, pp. 60–75, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.03.048.
- [13] F. B. Weng, C. Y. Hsu, and C. W. Li, "Experimental investigation of PEM fuel cell aging under current cycling using segmented fuel cell," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 8, pp. 3664–3675, 2010, doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.01.065.
- [14] N. R. E. Laboratory., "NREL DriveCAT - Chassis Dynamometer Drive Cycles," 2022. <http://www.nrel.gov/transportation/drive-cycle-tool> (accessed May 01, 2022).