

Vom rauchenden Auspuff zur sauberen Steckdose

Entwurfsschritte von der dieselbetriebenen mobilen Arbeitsmaschine zur vollelektrischen Lösung

Teil 1 – Leistungs- und Energiebetrachtungen

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

1. Einführung

In den letzten Jahren ist die Elektrifizierung von Fahrzeugen immer weiter vorangeschritten. Treiber für diesen Wandel ist neben dem Klimawandel und steigenden Energiekosten auch die stetige Verbesserung von Komponenten, sowohl in ihrer Leistung als auch in ihrem Preis. Dies ist insbesondere bei batteriebetriebenen PKWs zu beobachten, deren Marktanteile deutlich gestiegen sind.

Nicht ganz so deutlich, oder weniger in der Wahrnehmung der Konsumenten, ist der Trend zur Elektrifizierung bei mobilen Maschinen und kommerziellen Fahrzeugen. Dabei ist gerade in diesem Bereich ein hoher Mehrwert zu erzielen, da mobile Maschinen und kommerzielle Fahrzeuge nicht nur von dem besser abrufbaren Drehmoment und der genaueren Steuerung, sondern auch von der höheren Effizienz profitieren. [1][2][3]

Dabei sind die Anforderungen an das Design und die Auslegung einer mobilen Maschine komplex: Zum einen gibt es eine Vielzahl von Aktoren, die von der Energiequelle bedient werden müssen. So besitzt beispielsweise ein Straddle Carrier vier Antriebe, sowie ein Hubwerk. Hinzukommen Hilfsantriebe für hydraulische Komponenten, Air Condition und andere Hilfssysteme. Darüber hinaus besteht oftmals die Anforderung nach einer sehr hohen Verfügbarkeit. Gleichzeitig gibt es eine Reihe von möglichen Lösungen und Topologien, die für die Elektrifizierung in Frage kommen und die bewertet werden müssen.

In dieser Serie von Whitepaper wollen wir verschiedene Aspekte der Elektrifizierung Mobiler Maschinen beleuchten. Ziel dieser Serie ist es, den Lesern Einblicke in die Fragestellungen und Verfahren zur Lösung dieser Fragestellungen zu geben. Wir beginnen mit allgemeinen Betrachtungen zum Leistungs- und Energiebedarf dieser Anwendungen.

Danach betrachten wir verschiedene Lösungsansätze und zeigen auf, wie mit allgemeinen Betrachtungen der Leistungsflüsse bereits wichtige Designbetrachtungen technologieunabhängig durchgeführt werden können.

2. Leistungs- und Energiebedarf

Eine elektrifizierte Maschine ist im Grunde ein fahrendes elektrisches Energiespeichersystem. Das Speichermedium kann ein fossiler Brennstoff, ein Wasserstofftank oder eine Batterie sein. Diese gespeicherte Energie wird in elektrische Energie umgewandelt, die dann in Bewegungsenergie gewandelt wird. Die zentrale Frage bei der Auslegung ist, wie viel Energie wir speichern und wie viel Leistung wir bereitstellen müssen.

Betrachten wir zunächst den Leistungs- und Energiebedarf von mobilen Arbeitsmaschinen im Vergleich zu anderen Anwendungen elektrischer Speichersysteme.

In Abbildung 2-1 ist der Bedarf verschiedener Anwendungen dargestellt. Unter „mobile Devices“ werden hier Anwendungen verstanden, bei denen elektrische Energie genutzt wird, um ohne Netzanschluss agieren zu können. Beispielanwendungen sind hier der elektrische Schraubenzieher, der Laptop oder das Mobiltelefon, sowie batteriebetriebene Werkzeuge.

Wir sehen, dass der Leistungsbereich bis maximal 1 kWh und auch die Leistung gerade bis 1kW reicht. Am oberen Ende der Skala sind die stationären Energiespeicheranwendungen zu sehen. Sie beginnen bereits bei wenigen Kilowattstunden und einer Leistung von wenigen Kilowatt. Dies sind typische Heimspeicheranlagen zur Zwischenspeicherung von Solarstrom. Sie können aber bis in den Megawattbereich reichen. Hier handelt es sich dann um Großspeicher, die für den Leistungs- und Energiemarkt genutzt werden.

Zwischen diesen beiden Polen befinden sich die Mobilitätsanwendungen. Wir haben in Abbildung 2-1 im Bereich „eMobility“ zwischen Mobilitätsanwendungen, wie eBikes, eRoller und Automobilen und den mobilen Maschinen unterschieden.

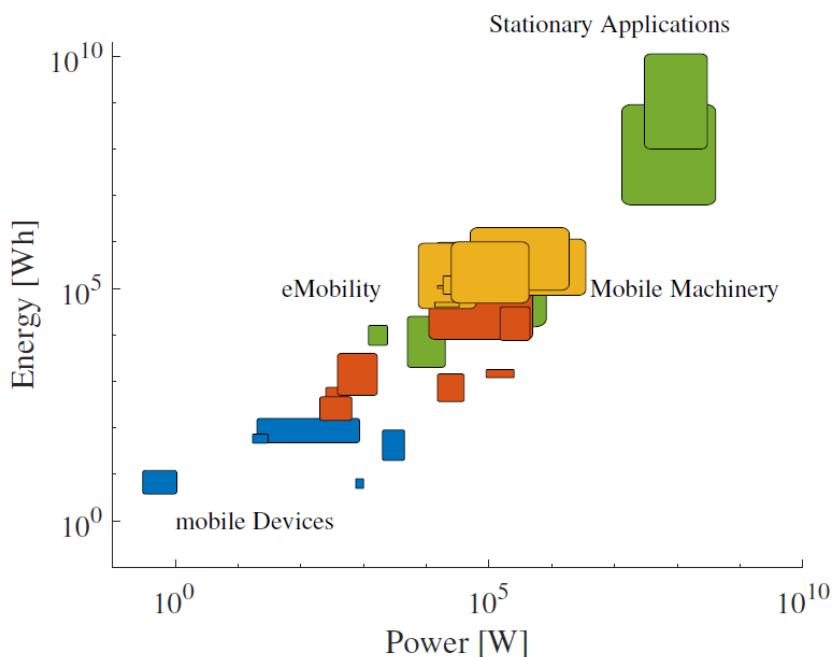


Abbildung 2-1: Energie- und Leistungsbedarf verschiedener Energiespeicheranwendungen. [4]

Bei elektrischen Speichersystemen unterscheidet man zwischen Energie- und Leistungsanwendungen. Die E-Rate dient hier als Unterscheidungskriterium. Die E-Rate ergibt sich aus dem Verhältnis aus Leistung P und installierter Speicherkapazität κ .

$$E = \frac{P \cdot 1h}{\kappa [\text{Wh}]}$$

Wenn wir einen Speicher mit einer Kapazität von $\kappa = 5 \text{ kWh}$ haben und diesen über eine Stunde mit 1 kW entladen, liegt die E-Rate bei $\frac{1}{5}$. Dies wäre eine typische Energieanwendung. Wenn wir den Speicher mit 20 kW entladen, liegt die E-Rate hingegen bei 4. Dies wäre eine Leistungsanwendung.

Die Unterscheidung zwischen Energie- und Leistungsanwendung ist für das Design des Speichersystems relevant. Leistungsanwendungen benötigen hohe Ströme. Bei elektrochemischen und chemischen Speichersystemen wird eine große Kathoden- oder Anodenoberfläche benötigt, damit ein großer Ladungsträgeraustausch auch erfolgen kann. Bei Energieanwendungen ist es hingegen notwendig, dass der Speicher viel aktives Material besitzt.

In Abbildung 2-2 sind die E-Raten für verschiedene mobile Arbeitsmaschinen dargestellt. Wir sehen, dass ein Großteil dieser Anwendungen deutlich oberhalb von 1 liegen, es handelt sich also um Leistungsanwendungen und nicht um Energieanwendungen. Einzige Ausnahme ist der Wheelloader, der eine E-Rate von $\frac{1}{2}$ hat.

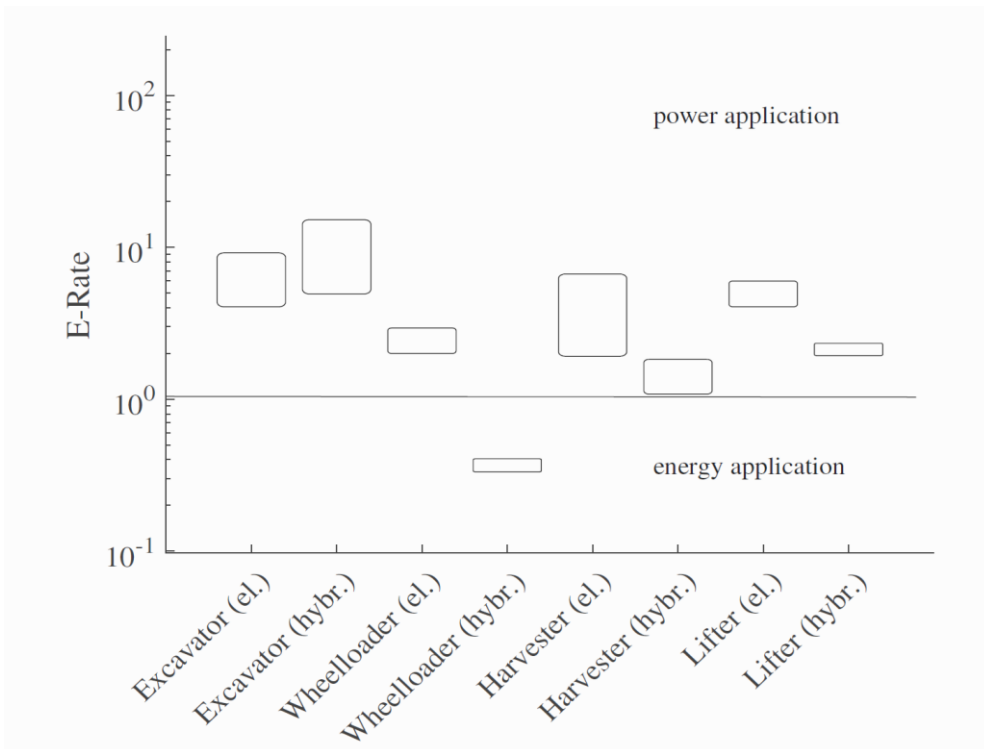


Abbildung 2-2: E-Raten einiger Anwendungen von mobilen Arbeitsmaschinen. [4]

3. Auslegungskriterien

Für die Elektrifizierung von mobilen Maschinen gibt es eine Vielzahl von möglichen Antriebslösungen, in Tabelle 3-1 sind einige Lösungen dargestellt. Zur besseren Übersicht wurde die Verwendung eines Getriebes und die damit verbundenen zusätzlichen Freiheitsgrade nicht betrachtet.

Ein Kriterium für die Bewertung der verschiedenen Antriebslösungen ist der Wirkungsgrad. Dieser definiert sich über das Verhältnis von gespeicherter Energie und verbrauchter Energie.

$$\eta = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}$$

Haben wir beispielsweise eine Antriebslösung, die einen Wirkungsgrad von 33% hat, bedeutet dies, dass von einer Kilowattstunde gespeicherter Energie lediglich 330 Wh genutzt werden. Würden wir also einen Liter Treibstoff transportieren, würde wir davon lediglich ein Drittel in Bewegungsenergie wandeln. Die restlichen zwei Drittel werden als Abwärme oder Reibungsverluste verloren gehen. Das dazugehörige Gewicht, bzw. Volumen wird zwar mittransportiert, wird aber nicht in Arbeit umgewandelt.

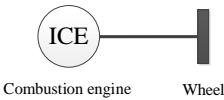
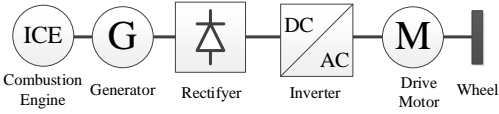
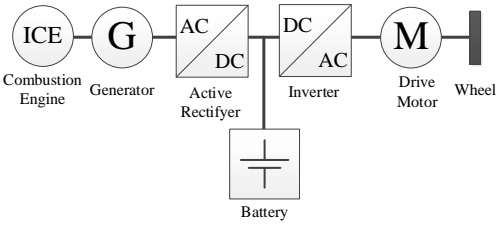
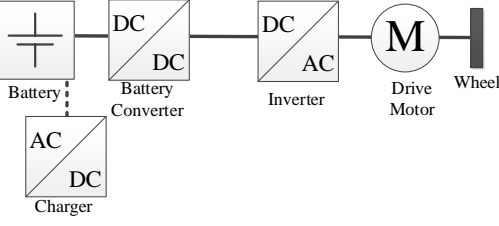
Verbrennungsmotor	 <p>ICE Combustion engine Wheel</p>	$\eta = \eta_{ICE} = 30\%$
Diesel-elektrischer Antrieb	 <p>ICE G Rectifier DC/AC M Wheel Combustion Engine Generator Inverter Drive Motor</p>	$\eta = \eta_{ICE} \cdot \eta_G \cdot \eta_R \cdot \eta_{Inv} \cdot \eta_M$ $= 45\% \cdot 96\% \cdot 97\% \cdot 95\% \cdot 92\%$ $= 36\%$
Diesel-Hybrid-Antrieb	 <p>ICE G AC/DC DC/AC M Wheel Combustion Engine Generator Active Rectifier Inverter Drive Motor</p> <p>Battery</p>	$\eta = \eta_{ICE} \cdot \eta_G \cdot \eta_{AFE} \cdot \eta_B \cdot \eta_{Inv} \cdot \eta_M$ $= 45\% \cdot 96\% \cdot 97\% \cdot 92\% \cdot 95\% \cdot 92\%$ $= 33\%$
Vollelektrischer Antrieb	 <p>Battery DC/DC DC/AC M Wheel Battery Converter Inverter Drive Motor</p> <p>Charger</p>	$\eta = \eta_c \cdot \eta_B \cdot \eta_{Inv} \cdot \eta_M$ $= 98\% \cdot 92\% \cdot 95\% \cdot 92\% = 78\%$

Tabelle 3-1: Verschiedene Antriebsarten und deren mittlere Effizienz.

Betrachten wir die in Tabelle 3-1 dargestellten Antriebsarten im Einzelnen. Die Baseline ist der Verbrennungsmotor, hier wird ein Treibstoff über einen Verbrennungsvorgang in thermische Energie und danach in kinetische Energie umgewandelt. Der Wirkungsgrad kann nicht größer als die des Carnot-Prozesses liegen, also bei ca. 45%. In der Realität ist dieser Wirkungsgrad schlechter, da der Wirkungsgrad vom Arbeitspunkt und von der übersetzenden Mechanik beeinflusst wird. Daher sind Wirkungsgrade von über 30% selten zu beobachten.

Bei einem diesel-elektrischen Antrieb wird die im Verbrennungsmotor gewonnene kinetische Energie in elektrische Energie umgewandelt, die danach über einen Wechselrichter und einem elektrischen Motor in Bewegungsenergie umgewandelt wird. Die zusätzlichen Energiewandlungsstufen reduzieren mit ihren Wirkungsgraden den Gesamtwirkungsgrad, da aber hier der Arbeitspunkt des Verbrennungsmotors optimiert werden kann, lässt sich ein höherer Wirkungsgrad erzielen.

Der Nachteil bei einem diesel-elektrischen Antrieb ist, dass der Energiefluss nur vom Dieselmotor zum Verbraucher geht. Bremsvorgänge, bei denen prinzipiell der elektrische Antrieb die Bewegungsenergie in elektrische Energie übertragen kann, können nicht optimiert werden. Dies wird mit einem Diesel-Hybrid-Antrieb prinzipiell möglich. Auch hier wird der Generator in einem optimierten Arbeitspunkt betrieben. Es gibt jedoch eine Batterie, die von dem Generator und durch Rekuperation geladen werden kann. Im direkten Vergleich mit dem diesel-elektrischen System ist der Wirkungsgrad ein wenig geringer, was daran liegt, dass die Energie eine weitere Wandlungsstufe durchläuft.

Die letzte Stufe ist der vollelektrische Antriebsstrang. Hier wird der Verbrennungsmotor durch eine Batterie ersetzt. Die Gesamteffizienz innerhalb des Fahrzeuges ist hier am höchsten, da sich elektrische Energieformen mit sehr hohem Wirkungsgrad wandeln lassen. Jedoch müssen auch Ladeverluste und die beim Laden entstehenden Energiekosten berücksichtigt werden.

Bei einer solchen Vielzahl von Antriebssträngen, die zusätzlich noch unterschiedliche Parameter haben, ist die Auslegung eines Antriebsstranges relativ komplex. Man müsste für jede Antriebsart die Parameter der verschiedenen Wandlungsstufen berücksichtigen und variieren. Diese Komplexität kann durch Verwendung einer zusätzlichen Abstraktionsstufe erheblich reduziert werden und mündet in die Anwendung von Leistungsflussdiagrammen, zur Beschreibung von elektrischen Speichersystemen [4]–[7]. Diese werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

4. Leistungsflussdiagramme

Die Grundidee der Verwendung von Leistungsflussdiagramm besteht darin, dass jedes elektrische Speichersystem dazu verwendet wird, gespeicherte Energie in elektrische oder kinetische Leistung umzuwandeln. In Abbildung 4-1 ist ein Leistungsflussdiagramm für einen diesel-elektrischen Antriebsstrang dargestellt. Das Diagramm besteht aus Leistungsknoten zwischen denen Leistung transportiert wird. Es gibt drei Arten von Knoten: Quellen, Senken und der Speicher. Wenn Leistung von einem Knoten A zu einem Knoten B fließt, erfolgt dies mit Hilfe des Leistungsflusses A_B . Da ein solcher Leistungsfluss nicht ideal ist, müssen die Verluste eingerechnet werden. Hierzu ist jeder Leistungsknoten mit einer Effizienz $\eta_{AB}(A_B)$ versehen. [4], [6]–[8].

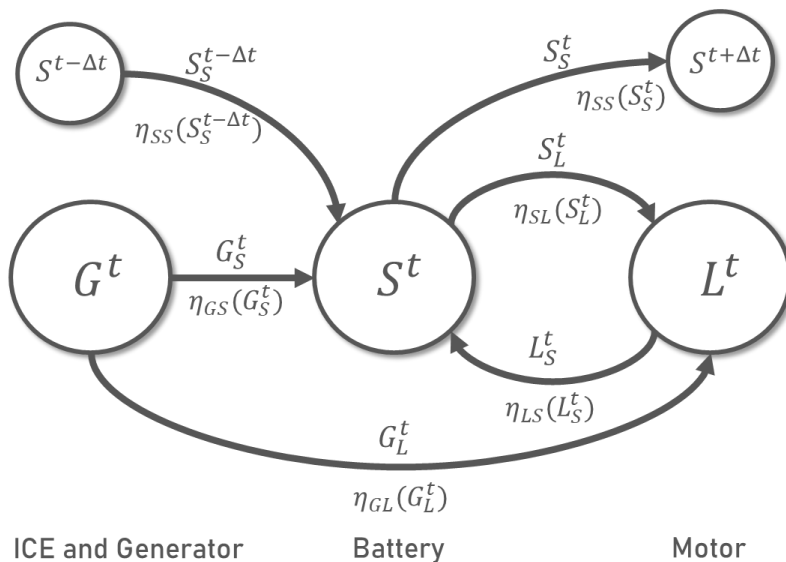


Abbildung 4-1: Beispiel für das Leistungsflussdiagramm eines diesel-elektrischen Antriebsstrangs.

Der Vorteil dieser Beschreibung ist nun, dass sich jede technische Realisierung lediglich darin unterscheidet, welchen Wertebereich A_B einnehmen kann und welche Verluste $\eta_{AB}(A_B)$ die dahinter liegende Technologie hat.

Eine Besonderheit stellt noch der Speicherknoten dar, der gespeicherte Leistung aus der Vergangenheit bezieht und ungenutzte Leistung in die Zukunft transportiert.

Betrachten wir den Leistungsfluss von der Batterie zur Last. In unserem Beispiel ist die Last ein Drehmoment T , was bei einer bestimmten Geschwindigkeit ω erzeugt werden soll. Der Leistungsfluss, der diesen Vorgang beschreibt, ist S_L , der mit der Effizienz $\eta_{SL}(S_L)$ verknüpft ist. Die Gesamteffizienz des Leistungsflusses ergibt sich aus den Effizienzen der Einzelkomponenten:

$$\eta_{\text{tot}}(T, \omega) = \eta_{\text{inv}}(U, I) \cdot \eta_{\text{motor}}(T, \omega)$$

Abbildung 4-2 zeigt die einzelnen Effizienzen und die kombinierte Effizienz an einem Beispiel.

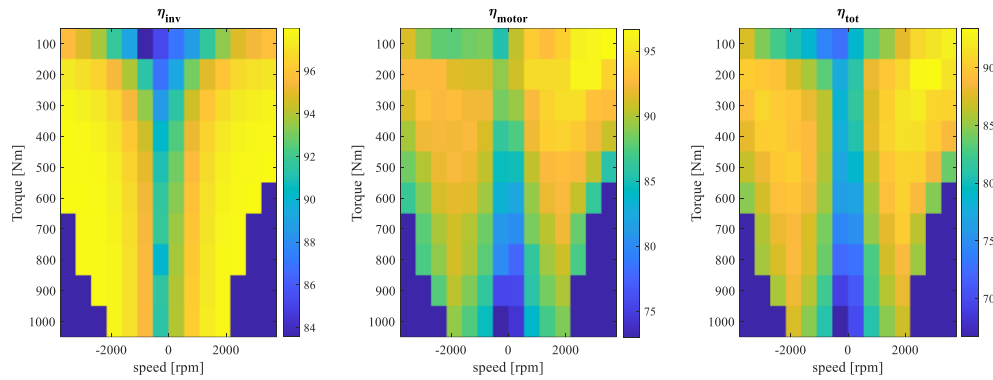


Abbildung 4-2: Beispiel für die Ermittlung der Effizienz $\eta_{SL}(S_L)$ anhand von Komponentenwirkungsgraden

Leider stehen für die Lastprofile, die beschreiben, wie das Fahrzeug genutzt werden soll nicht immer Zeitreihen für Drehmoment und Geschwindigkeiten zur Verfügung. Um eine vereinfachte, für die Systemanalyse aber im ersten Schritt hinreichende Analyse durchführen zu können, ist es sinnvoll η_{WR} und η_{motor} als Funktion der Leistung darzustellen. In unserem Beispiel nehmen wir die maximale Effizienz bei der gegebenen Leistung und erhalten so eine Beschreibung, die allein von der Leistung abhängt.

5. Beispielhafte Auslegung eines hybriden Brennstoffzellentrucks

Im Folgenden wollen wir nun zeigen, wie mit Hilfe eines Leistungsflussdiagrammes Auslegungsentscheidungen vorgenommen werden können. Hierzu betrachten wir das Beispiel eines hybriden Brennstoffzellentrucks. Dieser soll mit einer Lithium-Ionen-Batterie ausgestattet werden, die für die Rekuperation genutzt wird. Wir wollen in dieser Analyse den schädlichen Einfluss von Leistungsfuktuationen auf die Brennstoffzelle nicht betrachten. Die Auslegung der Batterie zur Bedämpfung dieser Fluktuationen wird in [9] eingehender untersucht.

In Abbildung 5-1 ist sowohl eine technische Realisierung als auch das Leistungsfluss-Diagramm dargestellt. In der hier betrachteten technischen Realisierung ist sowohl die Brennstoffzelle als auch die Batterie über einen eigenen DC/DC-Steller mit dem DC-Zwischenkreis verbunden. Dieser versorgt den Antriebsmotor.

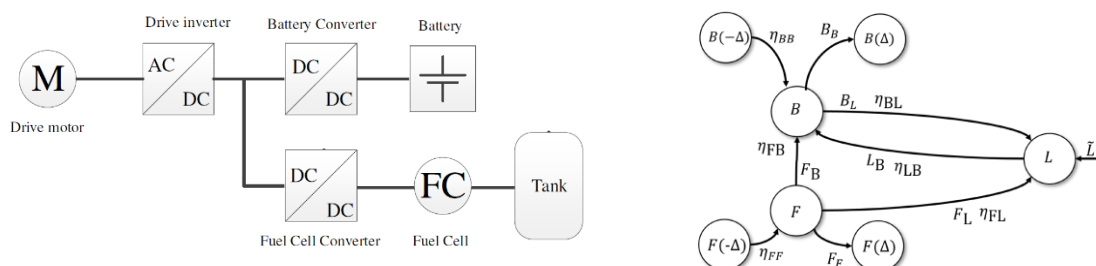


Abbildung 5-1: : Beispielanwendung eines hybriden Brennstoffzellentruck mit einer Batterie als Zwischenspeicher. Sowie dem dazugehörigen Leistungsflussbild [4]

Das Leistungsflussdiagramm des hybriden Brennstoffzellentrucks abstrahiert das Gesamtsystem. Es teilt das System in drei Leistungsknoten auf. Den Knoten für die Brennstoffzelle F , die Batterie B und der Traktionslast L . Die Informationen über die verwendeten leistungselektronischen Komponenten werden durch die Übertragungseffizienzen abgebildet [4], [9]

Das beschreibende Gleichungssystem lautet dann:

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

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

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

Die erste Gleichung beschreibt die Leistungsflüsse zur und von der Lithium-Ionen-Batterie. Die 2. Gleichung beschreibt die Leistungsflüsse der Brennstoffzelle und die 3. Gleichung den Leistungsfluss zur und von der Last. Dabei ist \tilde{L} das Lastprofil der Anwendung. Es ist zu beachten, dass die beiden Speicherknoten, die Brennstoffzelle F und die Lithium-Ionen-Batterie B , auch Leistungsflüsse aus der Vergangenheit und in die Zukunft aufweisen.

Diese Auslegung eines hybriden Brennstoffzellentrucks mit Hilfe des Leistungsflussdiagramms vollzieht sich in mehreren Schritten. Ausgangspunkt ist ein Lastprofil \tilde{L} , welches die Nutzung des Fahrzeuges beschreibt. In Abbildung 5-2 ist ein solches Lastprofil dargestellt.

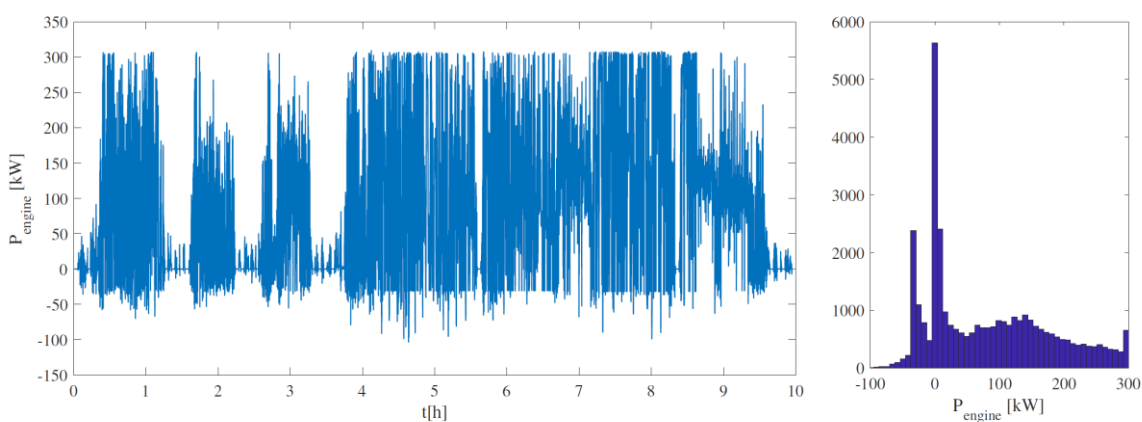


Abbildung 5-2: Lastprofil des hybriden Brennstoffzellentrucks [4]

Als nächstes wird die technische Umsetzung und die verwendeten leistungselektronischen Komponenten beschrieben. Im Leistungsflussdiagramm bedeutet dies, dass die Übertragungseffizienzen $\eta_{BB}, \eta_{BL}, \eta_{LB}, \eta_{FB}, \eta_{FL}$ und η_{FF} definiert werden. Dies kann durch eine einfache skalare Größe oder durch eine, wie in Abbildung 4-2 dargestellte, Funktion umgesetzt werden.

Da weder Motoren, noch Batterien oder Umrichter beliebig hohe Leistungen übertragen können, müssen die maximalen Übertragungsleistungen festgelegt werden. Für jeden Leistungstransfer von A nach B, A_B gilt dann:

$$A_B \in [0, A_B^{\max}]$$

Der letzte Schritt ist die Festlegung eines Optimierungskriteriums. Dies beschreibt das Ziel unseres Designs. Bei mobilen Maschinen ist ein naheliegendes Kriterium die Reduzierung der Verluste. Da ein Verlust an übertragender Leistung durch mitgeführte, gespeicherte Energie kompensiert werden muss. (Wir erinnern uns, dass wir bei einem Verbrennungsmotor mehr als die Hälfte der gespeicherten Energie nicht für die Bewegung nutzen, sondern in Form von Verlustwärme abgeben. Wir müssen also im Fahrzeug doppelt so viel Energie speichern, als wir eigentlich benötigen.)

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

Die Aufgabe besteht nun darin für jeden Punkt des Lastprofils den optimalen Leistungsfluss zu ermitteln. Dies kann heuristisch über eine definierte Strategie oder über die Lösung der Optimierungsaufgabe erfolgen [10]–[13].

In diesem Beispiel haben wir mit einer einfachen heuristischen Strategie gearbeitet [4]. Die Lithium-Ionen-Batterie hat immer den Vorrang. Reicht die in der Batterie gespeicherte Leistung nicht, so wird die Brennstoffzelle verwendet.

Wir wollen uns nun mit der Fragestellung befassen, wieviel Kapazität wir für die Batterie benötigen. Uns stehen drei unterschiedliche Typen von Zellen zur Verfügung. Diese unterscheiden sich in der maximalen Laderate, ausgedrückt als E-Rate. Die E-Rate reicht von 1E bis 4E. Bei 1E können wir eine Batterie mit 4kWh Speicherkapazität mit 4kW laden. Bei 4E können wir die Batterie mit 4kWh mit 16kW laden.

Wir gehen nun so vor, dass wir die Speicherkapazität der Batterie variieren. Die E-Rate der Batterie geht in die Leistungsflüsse F_B und L_B ein. Wenn wir davon ausgehen, dass die Leistungselektronik entsprechend ausgelegt ist, definiert die maximale Ladeleistung der Batterie auch die maximale Größe dieser Leistungsflüsse.

$$F_B, L_B \in \left[0, \frac{\kappa \cdot E}{1h}\right]$$

Wir wollen quantitativ bestimmen, wie gut eine bestimmte Batterieart mit einer bestimmten Kapazität die Rekuperation unterstützt. Hierzu definieren wir die Rekuperationsrate. Diese stellt das Verhältnis aus der Rekuperationsrate bei unendlicher Leistung und Kapazität R_∞ und der tatsächlich gemessenen Rekuperation $R_{\kappa,E}$ dar.

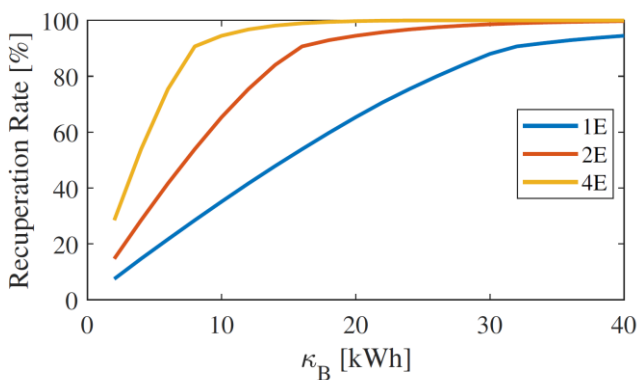


Abbildung 5-3: Rekuperationsrate in Abhängigkeit von Batteriekapazität und E-Rate [4]

In Abbildung 5-3 sind die Ergebnisse dieser Berechnung gezeigt. Wie zu erwarten war, steigt die Rekuperationsrate mit der Kapazität der Batterie und der E-Rate an. Die Kurven haben dabei ein charakteristisches Verhalten. Bei kleinen Kapazitäten steigt die Rekuperationsrate linear und schnell an. Dies liegt daran, dass jede zusätzliche Kilowattstunde auch für die Rekuperation genutzt wird. Ab einer Leistung von ca. 30kW flacht die Kurve deutlich ab. Jede weitere Kilowattstunde erhöht die Rekuperationsrate geringfügig. Das dies so sein muss, deutet sich bereits in der Betrachtung des Leistungshistogramms in Abbildung 5-2 an. Auch hier können wir sehen, dass Rekuperationen mit einer Leistung von mehr als 30kW seltener vorkommen.

Mit Hilfe dieser Daten können wir nun ermitteln, wie groß die Batterie sein muss. Wenn wir davon ausgehen, dass wir nicht 100%, sondern nur 90% der Rekuperationsleistung speichern wollen, beläuft sich die benötigte Speicherkapazität bei 32kWh, 16kWh oder 8kWh. Je nachdem ob wir eine 1E, 2E oder 4E Zelle verwenden wollen. Sind wir daran interessiert 98% der Rekuperationleistung zu speichern, benötigen wir hingegen 52kWh, 28kWh oder 14kWh.

6. Fazit

Für die Auslegung von Speichersystemen und mobile Nutzfahrzeuge stellt die Verwendung des Leistungsflussdiagramms eine einfache Möglichkeit dar, verschiedenen technischen Realisierungen mit geringem Aufwand zu bewerten.

Da diese Analyse nur auf der Ebene der Leistung und der gespeicherten Energie erfolgt, können selbstverständlich nicht alle Fragestellungen, die bei der Auslegung eines solchen Systems von Interesse sind, auch beantwortet werden. Insbesondere das Zusammenspiel von Batterie, Wechselrichter und Elektromotor bei verschiedenen Arbeitspunkten benötigt eine einhergehende Betrachtung. Hierauf gehen wir in Teil 2 genauer ein.

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] A. U. Schmiegel, *Energy Storage Systems*, vol. in Press. Oxford: Oxford University Press, 2022.
- [5] A. U. Schmiegel, "Residential PV Storage Systems - storage size matters - Residential PV Storage Systems," 2013.
- [6] A. U. Schmiegel, *Energiespeicher für die Energiewende*. München: Hanserverlag, 2019.
- [7] 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.
- [8] 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>
- [9] A. U. Schmiegel, "Design consideration for a hybrid Fuel cell truck," 2022.
- [10] J. Kukkaro, "Straddle Carrier Electric Powertrain Optimization," no. August, 2016.
- [11] P. Hangga and T. Shinoda, "Motion-Based Energy Analysis Methodology for Hybrid Straddle Carrier Towards Eco-Friendly Container Handling System," *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 11, no. 0, pp. 2412–2431, 2015.
- [12] D. Chen, W. Niu, W. Gu, and N. Schofield, "Game-based energy management method for hybrid RTG cranes," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 18, 2019, doi: 10.3390/en12183589.
- [13] *Energy management for vehicular electric power systems*.