

Vom rauchenden Auspuff zur sauberen Steckdose

Entwurfsschritte von der dieselbetriebenen mobilen Arbeitsmaschine zur vollelektrischen Lösung

Teil 2 – Der Dreiklang aus Batterie, Motor und Wechselrichter

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

1. Einführung

Die Elektrifizierung von mobilen Maschinen leistet einen deutlichen Beitrag zur Reduzierung der Umweltbelastung. Treiber dieser Entwicklung sind nicht nur der Klimawandel, sondern auch die Beobachtung, dass durch die Elektrifizierung die Effizienz und Präzision der Maschinen und Prozesse verbessert werden kann und die Digitalisierung zusätzlich unterstützt wird. In [1] haben wir die ersten Designschritte für eine Elektrifizierung beschrieben. Dabei ging es vor allem um die Fragestellung, welche Systemtopologie die richtige für eine konkrete Anwendung ist. In weiteren Studien haben wir diese Methodik für verschiedene Anwendungen dargestellt [2], [3].

In dieser Studie wollen wir uns mit der Fragestellung befassen, wie Batterie, Motor und Wechselrichter aufeinander abgestimmt werden. Die Batterie ist die Energiequelle, der Motor verbraucht diese Energie, um eine bestimmte Arbeit zu verrichten. Sei es der Transport von Waren oder der Transport der Maschine an sich, die dann an einem anderen Ort Arbeit verrichtet. Der Wechselrichter ist hier ein Vermittler, er wandelt die elektrische Energie, die in der Batterie gespeichert wurde, in ein elektrisches Feld um, das dafür sorgt, dass der Motor bei einer bestimmten Geschwindigkeit ein Drehmoment bereitstellt.

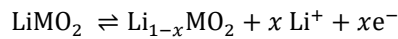
2. Batterietechnologie

Batterien sind elektrochemische Speicher. Ihre Grundfunktion basiert darauf, dass eine Spannung angelegt wird und dadurch eine Redoxreaktion stattfindet [4], [5]. Es gibt eine Reihe von Reaktionen, die für eine Speicherung geeignet sind. In Tabelle 1 sind einige mit ihren Wirkungsgraden η_r dargestellt. In der Elektrifizierung von mobilen Maschinen sind die Lithium-Ionen-Batterien am verbreitetsten. Daher wollen wir kurz auf Lithium-Ionen-Batterien eingehen.

Tabelle 1: Wirkungsgrade verschiedener elektrochemischer Speicher [4]

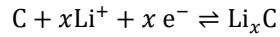
Chemistry	η_r
lead acid	82%
lithium ion (NMC/LMO)	92%
lithium ion (LFP)	86%
lithium ion (Titanate)	96%
lithium ion (NCA)	92%
high temperature (NAS)	80%
redox flow (Vanadium)	70%
redox flow (ZnBr)	70%

Bei Lithium-Ionen-Batterien handelt es sich um eine Familie an elektrochemischen Zellen, deren Grundreaktion sehr ähnlich ist. Das Kathodenmaterial besteht aus einem Lithium-Metall-Oxid, beim Lade- bzw. Entladevorgang werden einige Lithiumionen aus diesem Material herausgelöst und dabei Elektronen frei.



Dabei ist x die Zahl der bei der Reaktion genutzten Lithium-Ionen.

Die frei gewordenen Elektronen müssen über die Anschlüsse der Zelle zur Anode wandern, während die Lithium-Ionen sich durch den Separator zur Anode bewegen. Dort werden Lithium-Ionen und Elektronen eingelagert.



In diesem Beispiel besteht das Anodenmaterial aus Kohlenstoff C.

Bei Lithium-Ionen-Batterien bestimmt die Auswahl des Metalloxids und des Anodenmaterials ihre Eigenschaften. Es hat sich eingebürgert die Technologie anhand des Metalloxids zu beschreiben. Lithium-Eisenphosphat-Batterien, kurz LFP, nutzen Eisenphosphat als Metalloxid. Nickel-Mangan-Cobalt, kurz NMC, verwenden Nickel-Mangan-Cobalt als Metalloxid.

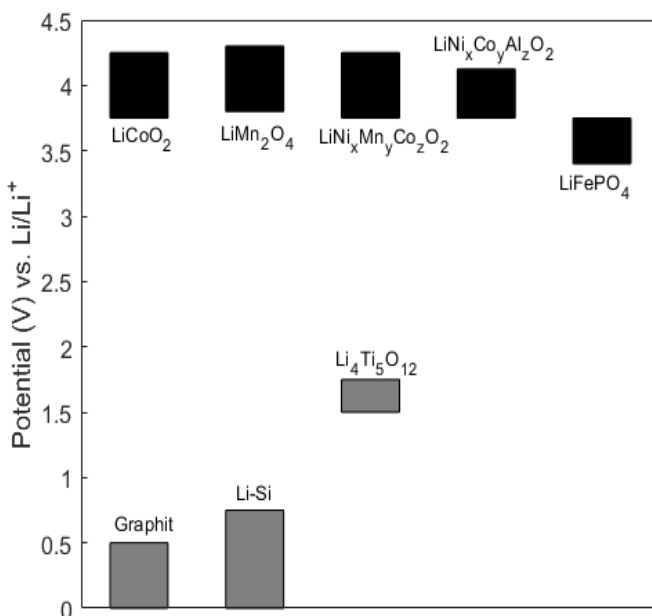


Abbildung 1: Potentiale verschiedener Metalloxide und Anodenmaterialien.[4], [6]

Unterschiedliche Metalloxide und Anodenmaterialien führen dazu, dass die Eigenschaften und die Spannungen der Zellen unterschiedlich sind. In Abbildung 1 sind die elektrochemischen Potentiale von Lithiummetalloxiden und Anodenmaterialien dargestellt. Die Differenz zwischen dem Potential des Anodenmaterials und dem Lithiummetalloxid entspricht dem Spannungsbereich der Zellen. Wie man aus Abbildung 1 erkennen kann, liegen die Spannungsbereiche je nach Kombination bei ca. 2V – 3V oder 3V – 4V. Was deutlich höher als die elektrischen Potentiale anderer elektrochemischer Zellen ist.

Wie wir in Abschnitt 4 noch sehen werden, benötigen Antriebsanwendungen bei mobilen Maschinen in der Regel eine deutlich höhere Spannung. Um diese zu erreichen, werden mehrere Zellen miteinander verschaltet. Hier gibt es zwei Möglichkeiten: Es können Zellen parallel oder seriell verschaltet werden. Die serielle Verschaltung dient der Erhöhung des Spannungsniveaus. Allerdings tritt hier ein Problem auf, dass in Abbildung 2 für NMC- und LFP-Zellen dargestellt ist.

Zwar erhöht sich die Spannung der verschalteten Zellen mit jeder zusätzlichen Zelle, allerdings weitet sich auch das Spannungsfenster auf. Sind beispielsweise 200 NMC-Zellen in Reihe geschaltet, liegt das Spannungsfenster zwischen 600V und 850V, je nachdem ob die Zellen be- oder entladen sind. Bei LFP-Zellen läge die Spannungsfenster bei 510 V und 725 V. Es besteht also die Möglichkeit durch eine serielle Verschaltung die Spannung der Batterie zu erhöhen. Allerdings wird auch das Spannungsfenster größer.

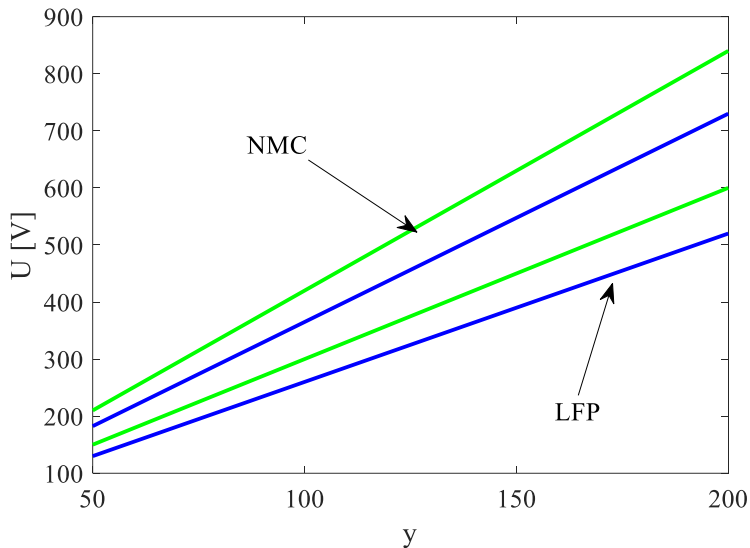


Abbildung 2: Spannungsfenster einer Lithium-Ionen-Batterie auf Basis von NMC bzw. LFP als Kathodenmaterial für unterschiedliche 1pys Verschaltungen.

Die Spannung wird durch die Zellchemie bestimmt. Die maximale Leistung und Energie einer Zelle hängen von dem aktiven Material ab. Wie wir gesehen haben, werden beim Be- und Entladen Lithiumionen aus einem Lithiummetalloxid entnommen und im Anodenmaterial gespeichert. Die Menge an aktivem Material bestimmt somit die Zahl der Ionen, die für den Speichervorgang zur Verfügung stehen, ihre Beweglichkeit den maximalen Be- und Endladestrom. Beides ist limitiert. Durch eine parallele Verschaltung der Stränge, kann aber der Strom erhöht werden. Auch eine Erhöhung der Energiemenge wird hierdurch ermöglicht.

Man beschreibt die Verschaltung als xpy s Verschaltung. Dabei steht y für die Zahl der in Serie geschalteten Zellen und x für die parallel geschalteten Stränge aus y Zellen.

Für die Auslegung eines Batteriesystems sind also 3 Größen aufeinander abzustimmen. Das Spannungsfenster, der Be- und Endladestrom und die Gesamtzahl der Zellen, also der Energieinhalt der Batterie.

3. Invertertechnologie

Die meisten Inverter in der Antriebstechnik basieren auf der B6-Topologie (Abbildung 3). Diese Topologie besteht aus drei Halbbrücken, die jeweils eine Phase anregen. Mit dem Schalter auf der oberen Hälfte der Halbbrücke wird die obere Halbwelle des Wechselstroms erzeugt, mit dem Schalter auf der unteren Hälfte der Halbbrücke die untere Halbwelle.

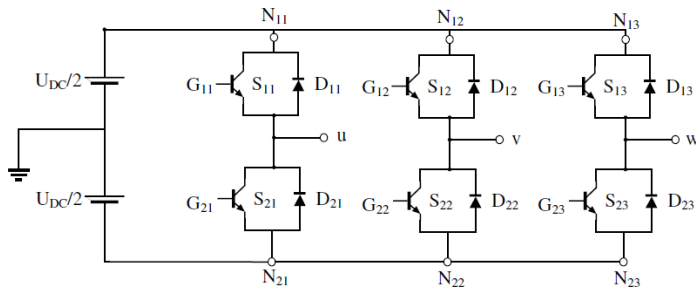


Abbildung 3: Inverterschaltung mit Hilfe einer B6-Topologie. Drei Halbbrücken werden mit einem DC-Zwischenkreis verschaltet. In diesem Beispiel erfolgt der Abgriff der DC-Spannung mittig. [4], [7]

Die Aufgabe des Inverters besteht darin die Gleichspannung der Batterie in eine Wechselspannung zu wandeln. Die Wechselspannung soll dabei so beschaffen sein, dass der angeschlossene Elektromotor in die Lage versetzt wird bei einer bestimmten Geschwindigkeit ein bestimmtes Drehmoment zu erzeugen. Die Limitierung im Wechselrichter besteht dabei in der maximal erlaubten DC-Spannung und dem maximal erlaubten Strom. Weiterhin unterscheidet man zwischen dem Dauerstrom und dem Spitzenstrom, der kurzzeitig auch eine höhere Strombelastung der Bauteile erlaubt. Betrachtet man die Lastprofile von mobilen Maschinen fällt auf, dass im Vergleich zu PKWs kurzzeitige Spitzenbelastungen deutlich häufiger auftreten [2], [3], [8]–[10]. Daher sollte bei der Auswahl des Wechselrichters hierauf geachtet werden, um eine Überdimensionierung und damit Mehrkosten zu vermeiden.

4. Motorregelung

Kernstück der Wechselrichtersoftware ist die Regelung. Sie enthält die Logik, nach der die Schalter der B6-Brücke geschaltet werden, um die drei Ströme $i_u(t)$, $i_v(t)$, $i_w(t)$ einzustellen. Im statischen Fall, wenn konstante Wechselströme anliegen, beschreiben diese vier Größen. Die Amplituden der Wechselströme $\hat{i}_u$, $\hat{i}_v$, $\hat{i}_w$ und die Zeit t . Geht man davon aus, dass die Summe der drei Wechselströme sich zu Null addieren, kann man die Zahl der beschreibenden Größen auf 3 reduzieren. Wechselt man nun auf ein Koordinatensystem, dass sich mit dem elektrischen Feld im Motor mit dreht, kann die Zahl auf 2 reduziert werden. Dieses Koordinatensystem wird als d, q -System beschrieben.

In dieser Studie betrachten wir das Verhalten von permanent erregten Synchronmotoren mit vergrabenen Magneten [11]. Diese Motoren zeichnen sich durch eine hohe Energiedichte aus und werden in verschiedenen Traktionsanwendungen verwendet.

Um die Aufgabe der Motorregelung zu verstehen, betrachten wir zunächst die mathematische Beschreibung des Motors im d, q -System mit dem Stator als Bezugspunkt. $u_{s,d} = R_s i_{s,d} + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega_e \psi_q$

$$u_{s,q} = R_s i_{s,q} + \frac{d}{dt} \psi_q + \omega_e \psi_d$$

$$\psi_d = L_d i_{s,d} + \psi_m$$

$$\psi_q = L_q i_{s,q}$$

$\psi_{d,q}$ sind die magnetischen Flüsse, die sich durch einen Stromfluss $i_{d,q}$ und der Motorinduktivität $L_{d,q}$ ergeben. Zusätzlich wird der magnetische Fluss in d -Richtung durch den magnetischen Fluss der Magnete ψ_m beeinflusst.

Die Spannung $u_{s,(d,q)}$ werden durch den magnetischen Fluss und seiner zeitlichen Änderung beeinflusst, der zeitunabhängige Einfluss hängt dabei von der Geschwindigkeit des Motors ω_e ab. Weiterhin beeinflusst der ohmsche Widerstand R_s die Spannung.

Für den Antrieb sind zwei Größen relevant. Die Geschwindigkeit ω_e und das Drehmoment T . Die Geschwindigkeit kann durch die Regelung über eine Anpassung der Schaltvorgänge eingestellt werden. Das Drehmoment des Motors hingegen wird durch die Interaktion zwischen den Strömen und dem magnetischen Fluss eingestellt:

$$T = \frac{3}{2}p(\psi_d i_{s,q} - \psi_q i_{s,d})$$

Man sieht, dass es nicht direkt von der Geschwindigkeit abhängt, jedoch verschiedene Paare von i_d und i_q dasselbe Drehmoment einstellen können.

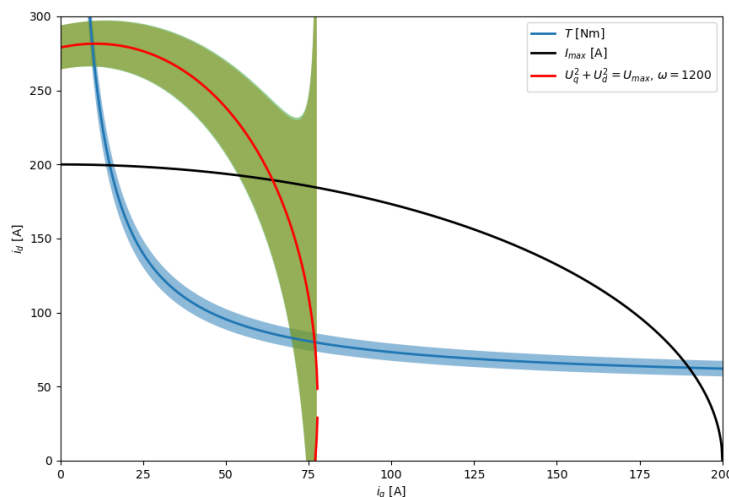
Soll bei einer bestimmten Geschwindigkeit ein bestimmtes Drehmoment eingestellt werden, besteht die Aufgabe der Regelung darin, die Verluste so gering wie möglich zu halten und zwei Randbedingungen einzuhalten:

$$i_{s,d}^2 + i_{s,q}^2 \leq I_{\max}^2$$

$$u_{s,d}^2 + u_{s,q}^2 \leq U_{\max}^2$$

Die erste Randbedingung ist die Strombegrenzung des Wechselrichters und des Motors. Die zweite Randbedingung beschreibt die Spannungsgrenze, die durch die Zwischenkreisspannung vorgegeben ist.

In Abbildung 4 sind für einen Beispielmotor die Spannungs- und die Stromgrenze, sowie die Drehmomentkurve eingetragen. Die Strombegrenzung entspricht in ihrer Form einem Kreis im d, q -Koordinatensystem. Die Spannungsbegrenzung einer Ellipse. Die Drehmomentkurve einer Hyperbel. Spannungsbegrenzung und Drehmomentkurve hängen von den Motorparametern ab. Zur Veranschaulichung der Unschärfe dieser Größen, die sich bei einer Varianz von 5% in den Größen L_q, L_d und ψ_m ergeben, wurde in Abbildung 4 ein Band gelegt. Man sieht, dass die Unschärfe in der Spannung deutlich höher als im Drehmoment ist und stark ansteigt, wenn der Rand der Ellipse



erreicht wird.

Abbildung 4: Wahl des d -Stroms i_d als Funktion von i_q für ein vorgegebenes Drehmoment, sowie der Unschärfereich, wenn L_q, L_d und ψ_m mit einem 5% Fehler behaftet sind. Weiterhin ist der maximale Strom eingetragen. Sowie die Spannungsgrenze und deren Unschärfe bei einem 5% Fehler.

Für die Regelung besteht die Aufgabe darin, bei einem gegebenen Drehmoment genau jenes i_d, i_q -Paar zu finden, bei dem der Gesamtstrom am geringsten ist. Geometrisch ist dies gleichbedeutend mit der Frage, welcher i_d, i_q -Punkt den kürzesten Abstand vom Nullpunkt hat. Diese Art der Regelung wird als „Maximum Torque per Amp“ (MTPA) bezeichnet. Im linken Bild von Abbildung 5 ist dieser Regelungsfall dargestellt.

In Abbildung 5 wurde die Geschwindigkeit des Motors jeweils erhöht. Wie man sieht, hängt der Radius der Spannungsellipse von der Geschwindigkeit ab. Je höher die Geschwindigkeit, desto kleiner wird der Radius. Dies liegt an dem $\pm\omega_e\psi_d$ -Term in den Spannungsgleichungen.

Im mittleren Bild ist Geschwindigkeit zu hoch, dass der für die MTPA gefundene Punkt nicht mehr innerhalb der Ellipse liegt. Würde die Regelung weiterhin den MTPA-Punkt ansteuern, würde die Spannung ihren Grenzwert übersteigen und der Wechselrichter in Störung gehen. Die Regelung versucht daher einen Punkt zu finden, mit dem sie das geforderte Drehmoment liefert und dennoch die Spannungsbegrenzung einhält. Ein solcher Punkt existiert in der dargestellten Konstellation. Man spricht bei dieser Art der Regelung von Feldschwächung, weil durch einen höheren i_d das vom Motor erzeugte elektrische Feld abgeschwächt wird.

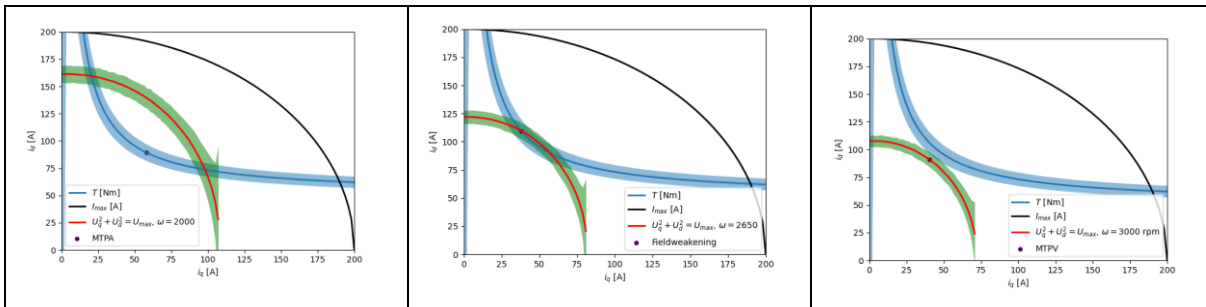


Abbildung 5: Bei der Regelung muss zwischen drei Fällen unterschieden werden. MTPA (links), Feldschwächung (Mitte) und MTPV (rechts).

Im rechten Bild von Abbildung 5 taucht nun der Fall auf, dass die Geschwindigkeit des Motors so groß ist, dass der Radius der Spannungsellipse so klein ist, dass die Drehmomentkurve diese nicht mehr schneidet. Es gibt keinen i_d, i_q -Punkt der das Drehmoment erfüllt und die Spannungsbegrenzung einhält. In einem solchen Fall versucht die Regelung jenen Punkt zu finden, der am Rand der Spannungsellipse liegt und das größte Drehmoment erzeugt. Man spricht hier von einer „Maximum Torque per Volt“ (MTPV) Regelung.

Der Radius der Spannungsellipse hängt nicht nur von der Geschwindigkeit und anderen Motorparametern, sondern auch von der Batteriespannung ab. Wie wir gesehen haben, verfügen Batteriesysteme nicht über eine konstante Spannung, sondern haben ein Spannungsfenster, das vom Ladezustand der Batterie abhängt (Abbildung 2). Dies hat zur Folge, dass auch die Ellipse der Spannungsgrenze sich nicht nur mit der Geschwindigkeit, sondern auch mit der Batteriespannung verändert. In Abbildung 6 sind diese für eine LFP-Batterie dargestellt. Das Spannungsfenster liegt bei dieser Batterie zwischen 450V und 650 V. Bei einer vollgeladenen Batterie besteht für die Regelung keine Schwierigkeit das gewünschte Drehmoment abzurufen. Bei einer (fast) entladenen Batterie hingegen ist es nicht mehr möglich.

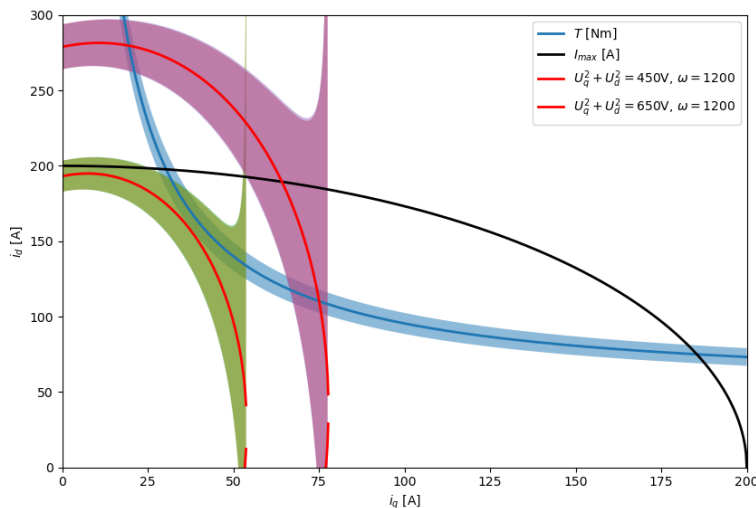


Abbildung 6: Spannungsgrenzbereiche bei unterschiedlicher Batteriespannung und Unschärfe. Bei einer niedrigen Batteriespannung ist das Drehmoment im Unschärfebereich der Spannungsgrenze.

Welche Auswirkungen diese Ladezustandsabhängigkeit hat ist in Abbildung 7 gut zu erkennen. In dieser Darstellung wurden für jede Geschwindigkeit die Betriebsgrenzen des Motors ermittelt. Dabei wurde die Batteriespannung variiert. In beiden Fällen kann bis $\omega = 2000$ rpm das maximale Drehmoment erreicht werden. Bei einer niedrigen Batteriespannung muss die Regelung bereits hier auf eine MTPV-Regelung wechseln. Ist die Batteriespannung bei 850 V kann das maximale Drehmoment noch bis $\omega = 3000$ rpm bereitgestellt werden.

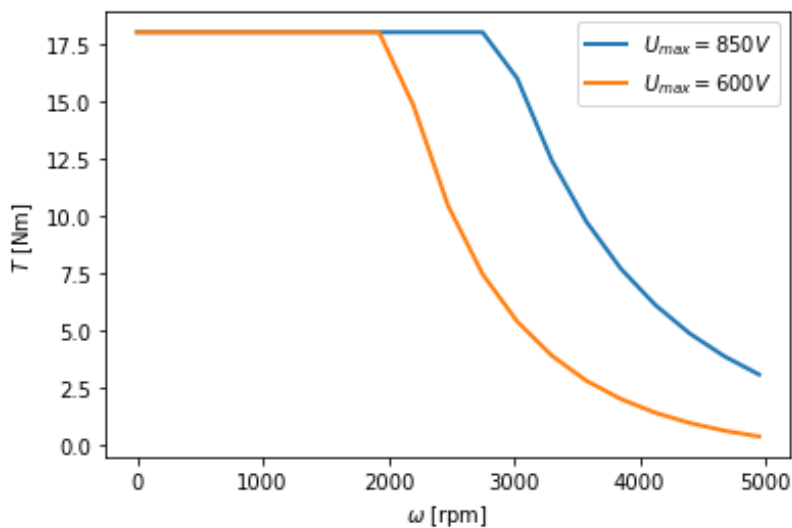


Abbildung 7: Betriebsgrenzen des Beispielmotors bei unterschiedlicher Batteriespannung.

5. Der hybrid betriebene Antriebsstrang

Bei der Auslegung des Antriebsstranges muss daher entschieden werden, ob eine Leistungsminderung bei niedriger Batteriespannung akzeptiert werden kann oder ob das System auf die minimale Batteriespannung ausgelegt wird. Es gibt verschiedene Möglichkeiten mit diesem spannungsabhängigen Leistungsunterschied umzugehen. So kann der Motorstrang so ausgelegt werden, dass er sich auf die niedrige Batteriespannung bezieht. Oder man betrachtet anhand von Lastprofilen die Häufigkeit des hohen Drehmoments und der Geschwindigkeiten und legt das System so aus, dass es auch bei niedriger Batteriespannung gut genug funktioniert. Für mobile Maschinen ist eine solche Leistungsbeschränkung nicht immer sinnvoll, da hohe Leistungen erheblicher häufiger vorkommen als bei anderen mobilen Anwendungen.

Da die Batteriespannung das begrenzende Element ist, kann alternativ ein DC/DC-Steller zwischen Batterie und Wechselrichter den Effekt kompensieren. In Abbildung 8 sind die beiden möglichen Antriebsstränge dargestellt. Der DC/DC-Steller ist in der Lage die Batteriespannung auf die maximale Spannung anzuheben. Die Zwischenkreisspannung ist daher immer konstant. Die Spannungsellipse hängt somit nur noch von der Geschwindigkeit ab. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Batteriechemie geändert werden kann, ohne das Verhalten des Fahrzeuges zu ändern. Ist der DC/DC-Steller galvanisch trennend, entfallen teilweise technische Sicherheitsmaßnahmen, die das Gesamtsystem verteuern und die Komplexität erhöhen.

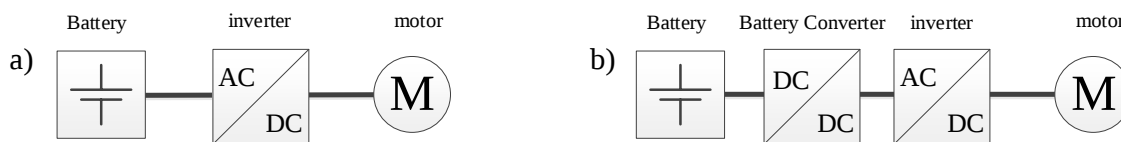


Abbildung 8: Mögliche Realisierung von Antriebssträngen

Der Nachteil dieser in Abbildung 8 dargestellten Alternative besteht darin, dass zum einen ein DC/DC-Steller Mehrkosten bedeutet und dass ein DC/DC-Steller Verluste erzeugt, die eventuell den Gesamtwirkungsgrad reduzieren. Im Folgenden wollen wir uns mit dem Aspekt des Gesamtwirkungsgrades befassen, da jede Effizienzverbesserung die Reichweite des Fahrzeuges erhöht und die Kosten der teuersten Komponente, der Batterie, reduzieren kann.

Um die Effizienz zu beschreiben, benötigen wir ein einfaches Modell für die Verluste der drei Komponenten. In den bisherigen Studien hatten wir im Rahmen der Systembeschreibung durch das Leistungsflussdiagramm ein lineares Verlustmodell verwendet. Die Verlustleistung $P_L(P)$ wurde durch drei Verlustkoeffizienten beschrieben:

$$P_L = a + b P + c P^2$$

Dieser Ansatz erlaubte eine einfache, aber quantitative Gegenüberstellungen verschiedener Systemlösungen. Um die Verluste von Motor, Wechselrichter und DC/DC-Steller besser zu beschreiben, erweitern wir diesen Ansatz auf zwei Freiheitsgrade. Die Verlustleistung $P_L(x, y)$ hängt nun von x und y ab. Im Fall des Motors handelt es sich um Drehmoment und Geschwindigkeit. Beim Wechselrichter und DC/DC-Steller um Spannung und Strom. Auch hier arbeiten wir mit Verlustkoeffizienten:

$$P_L(x, y) = a + b_x x + b_y y + b_{x,y} xy + c_x x^2 + c_y y^2$$

In Abbildung 9 sind für DC/DC-Steller, Wechselrichter und Motor die zweidimensionalen Wirkungsgrade dargestellt. In ihrer Struktur entsprechen sie realen Kennfeldern. Allerdings wurden in diesen Darstellungen die Leistungsgrenzen nicht berücksichtigt. In Tabelle 2 sind die in dieser Studie verwendeten Verlustkoeffizienten dargestellt. Sie orientieren sich an Werten handelsüblicher Komponenten.

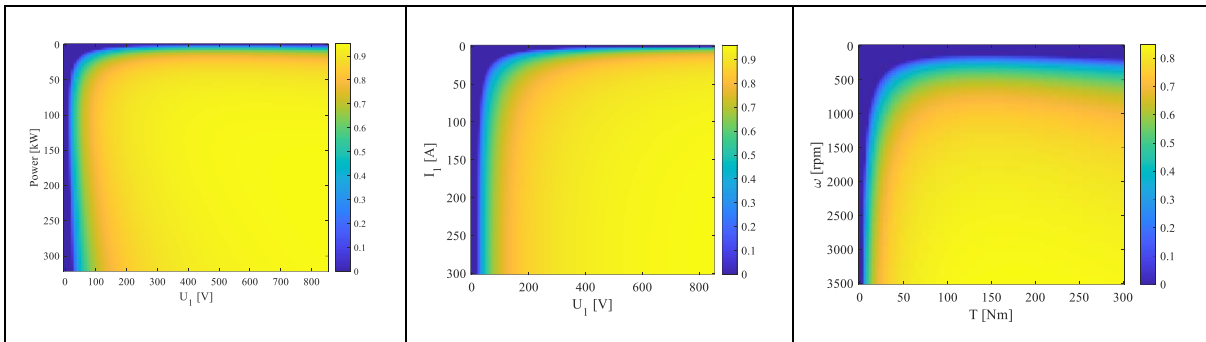


Abbildung 9: Beispiele für Wirkungsgrade von DC/DC-Steller, Wechselrichter und Motor.

Tabelle 2: Verlustkoeffizienten für DC/C-Steller, Wechselrichter und Motor

$\eta_{\text{DC/DC}}$	$\eta_{\text{DC/AC}}$	η_{Motor}
$U_1^{\max} = 850 \text{ V}$	$U_1^{\max} = 850 \text{ V}$	$T^{\max} = 300 \text{ Nm}$
$I_1^{\max} = 300 \text{ A}$	$I_1^{\max} = 300 \text{ A}$	$\omega^{\max} = 4500 \text{ rpm}$
$a_0 = 1020 \text{ W}$	$a_0 = 153 \text{ W}$	$a_0 = 5775 \text{ W}$
$b_U = 2,82 \cdot 10^{-5}$	$b_U = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ A}$	$b_T = 5,984 \text{ rpm}$
$b_I = 0,0074$	$b_I = 23,93 \text{ V}$	$b_\omega = 0 \text{ Nm}$
$b_{U,I} = 0$	$b_{U,I} = 0,0023$	$b_{T,\omega} = 0,0464$
$c_U = 0,0084 \frac{\text{A}}{\text{V}}$	$c_U = 0,00026 \frac{\text{A}}{\text{V}}$	$c_T = 0,0594 \frac{\text{rpm}}{\text{Nm}}$
$c_I = 0,0227 \frac{\text{V}}{\text{A}}$	$c_I = 0,00097 \frac{\text{V}}{\text{A}}$	$c_\omega = 0,0043 \frac{\text{Nm}}{\text{rpm}}$

Um den Gesamtwirkungsgrad $\eta(T, \omega, U_B)$ zu ermitteln gehen wir so vor, dass wir zunächst die motorischen Verluste bei einem bestimmten Arbeitspunkt (T, ω) ermitteln.

Die motorische Leistung, die benötigt wird, lautet

$$P_{\text{IM}} = T\omega$$

Die Leistung, die der Wechselrichter bereitstellen muss, ergibt sich zu:

$$P_{\text{inv}} = \frac{P_M}{\eta_M(T, \omega)}$$

Der hierfür benötigte Strom auf der Primärseite des Wechselrichters ist

$$I_{AC,1} = \frac{P_M}{\eta(T, \omega) U_B}$$

Verwenden wir einen DC/DC-Steller, wäre der benötigte Strom auf der Primärseite des Wechselrichters:

$$I_{AC,1} = \frac{P_M}{\eta(T, \omega) U_{DC}}$$

Wobei U_{DC} die für den Wechselrichter optimale Zwischenkreisspannung darstellt.

In Abbildung 10 sind für drei Arbeitspunkte die Wirkungsgrade mit und ohne DC/DC-Steller dargestellt. Ohne DC/DC-Steller erkennt man ein deutliches Abfallen des Wirkungsgrads um ca. 2% über den gesamten dargestellten Spannungsbereich. Betrachtet man die Spannungsfenster von LFP oder NMC so ist der Abfall geringer, allerdings immer noch deutlich zu erkennen. Und es darf hier nicht vergessen werden, dass bei niedrigerer Spannung nicht mehr alle Arbeitspunkte betrieben werden können.

Verwendet man einen DC/DC-Steller, so erkennt man in Abbildung 10, dass der Wirkungsgrad konstant bleibt. Bei den hohen Spannungen ist die Verwendung des DC/DC-Stellers etwas schlechter. Da dann die Verluste des DC/DC-Stellers noch hinzukommen. Berücksichtigt man, dass mit der Verwendung eines DC/DC-Stellers auch der Arbeitsbereich des Motors unabhängig vom Batterieladezustand wird, spricht in diesem Fall einiges für die Verwendung eines DC/DC-Stellers.

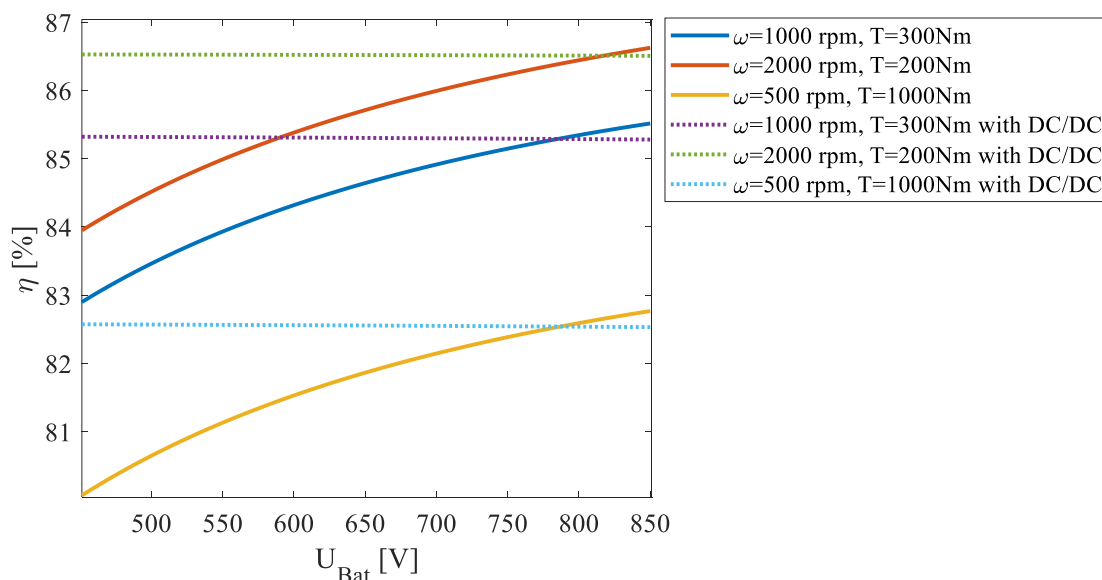


Abbildung 10: Gesamteffizienz des Antriebsstranges bei unterschiedlichen Arbeitspunkten mit und ohne DC/DC-Steller.

6. Zusammenfassung

In dieser Studie haben wir uns mit dem Dreiklang aus Batterie, Wechselrichter und Motor befasst. Wir haben gesehen, dass die Wahl der Batterie einen Einfluss auf die Performanz des Motors hat. Dabei haben wir Aspekte, wie die maximale Be- und Entladerate oder Batteriealterung nicht genauer betrachtet. Auch diese haben einen Einfluss auf das Design des Gesamtsystems. Insbesondere die Zyklenalterung und kalendarische Alterung der Batterie haben einen deutlichen Einfluss auf die total cost of ownership [4], [6], [12], [13].

Bei der Regelung des Motors kann zwischen drei Betriebsarten unterschieden werden: Maximum Torque per Amp, Feldschwächung und Maximum Torque per Volt. Welche Regelung genutzt wird hängt bei einem permanent erregten Motor von der Geschwindigkeit und der Batteriespannung und weiteren Motoreigenschaften ab.

Wir haben weiterhin zeigen können, dass durch die Integration eines DC/DC-Stellers dieser Dreiklang abgeschwächt werden kann. Die Leistungsbereitstellung des Wechselrichters wird unabhängig von der Batteriespannung. Wir konnten weiterhin zeigen, dass die zusätzlichen Verluste nicht so hoch sein müssen und der Nutzen des Gesamtsystems höher sein kann.

Für die Elektrifizierung mobiler Maschinen bedeuten diese Ergebnisse, dass nach einer Betrachtung des Leistungsflussdiagrammes und ersten Topologieentscheidungen, die Eigenschaften des Antriebsstrangs genauer betrachtet werden müssen. Und dass hier sowohl auf System- als auch auf Komponentenebene große Einsparpotentiale identifiziert werden können.

Literaturnachweise

- [1] 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.
- [2] A. U. Schmiegel, "Design consideration for a hybrid Fuel cell truck," 2022.
- [3] Armin U. Schmiegel, "The Straddle Carrier as an example for the electrification of mobile machines," Reutlingen, 2022.
- [4] A. U. Schmiegel, *Energy Storage Systems*, vol. in Press. Oxford: Oxford University Press, 2022.
- [5] A. A. Akhil *et al.*, "DOE / EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA," no. July, 2013.
- [6] A. U. Schmiegel, *Energiespeicher für die Energiewende*. München: Hanserverlag, 2019.
- [7] B. Erickson, "Introduction to Power Electronics," in *Computer Engineering*.
- [8] 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*, vol. 11, no. 5. MDPI AG, 2018. doi: 10.3390/en11051184.
- [9] A. Lajunen, J. Suomela, J. Pippuri, K. Tammi, T. Lehmuspelto, and P. Sainio, "Electric and hybrid electric non-road mobile machinery-present situation and future trends," Jun. 2016, [Online]. Available: <http://www.rocla.com>
- [10] J. Kukkaro, "Straddle Carrier Electric Powertrain Optimization," no. August, 2016.
- [11] C. Capitan, "Torque Control in Field Weakening Mode," Aalborg University, 2009.
- [12] D. Hoog *et al.*, "Aging phenomena for Lithium-Ion batteries," 2014.
- [13] P. Keil and A. Jossen, "Aging of lithium-ion batteries in electric vehicles:," *Dissertation*, vol. 7, no. 1, pp. 41–51, 2017.