

# Elektromobilität in Paderborn

## Kerntechnologien für Automobile von morgen

Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker, Dipl.-Ing. Tobias Huber, Dipl.-Ing. Christoph Romaus, Dipl.-Ing. Andreas Specht

**Das Thema der Elektromobilität genießt derzeit starke Aufmerksamkeit in der Öffentlichkeit. Dieser Begriff steht für einen Paradigmenwechsel in der Antriebstechnologie des Automobils. Statt verbrennungsmotorischer Antriebe, welche auf Kohlenwasserstoffe als Energieträger angewiesen sind, sollen durch Nutzung elektrischer Energie Emissionen von Schadstoffen und CO<sub>2</sub> verringert und fossile Energiereserven geschont werden. Damit elektrische Fahrzeuge diesen Ansprüchen gerecht werden können, ist freilich noch eine Vielzahl von Problemen zu überwinden.**

Elektrische Fahrzeuge lagen vor hundert Jahren gegenüber verbrennungsmotorischen teilweise vorn. Erst die Erfindung des elektrischen Anlassers gab kurioserweise den Verbrennungsmotoren eine entscheidende Starthilfe. Abbildung 1 zeigt den so genannten Lohner-Porsche auf der Weltausstellung in Paris im Jahre 1900, den der damals bei der Firma Lohner tätige 25-jährige Konstrukteur Ferdinand Porsche entwickelt hatte. Dieses Batteriefahrzeug war bereits mit Radnabenmotoren ausgerüstet, in einer Rennversion sogar alle vier Räder. Heute sind Batteriefahrzeuge wieder Gegenstand aktueller Forschung und Entwicklung (Abbildung 2). Ein Batteriefahrzeug ist zwar völlig emissionsfrei; in Bezug auf die Bilanz der gesamten Energieerzeugungskette ist es einem verbrennungsmotorischen Fahrzeug aber nicht grundsätzlich überlegen. Über die elektrische Energie gelingt jedoch die Nutzung regenerativer Quellen wie z. B. Wind- oder Wasserkraft. Durch gesteuertes Laden können tageszeitlich sonst nicht verwertbare Kapazitäten, ggf. auch



Abb. 1: Elektrofahrzeug 1900: Der Lohner-Porsche mit Radnabenmotoren auf der Weltausstellung 1900 in Paris, 50 km/h Höchstgeschwindigkeit, ca. 50 km Reichweite.



**Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker** leitet seit 2003 das Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik (LEA) an der Universität Paderborn. Er studierte Elektrotechnik an der TU Berlin und promovierte dort 1988. Zwischen 1988 und 2001 arbeitete er zunächst im AEG Forschungsinstitut und später in der Daimler Konzernforschung in Berlin, wo er im dortigen Labor für Antriebstechnik und Leistungselektronik die Gruppe Regelungstechnik leitete.

solche aus konventionellen Quellen, sinnvoll genutzt werden.

Das lange propagierte Brennstoffzellenfahrzeug schneidet bezüglich der Energie-Prozesskette und der aufwändigen Infrastruktur für Wasserstoff ungünstiger ab als das Batteriefahrzeug und steht bei vielen Fahrzeugherstellern daher nicht mehr primär im Fokus.

Neben den reinen Elektrofahrzeugen werden in Hybridfahrzeugen elektrische Antriebe mit dem klassischen Verbrennungsmotor kombiniert und verbessern auf diese Weise die Energieeffizienz und Performanz. Hier haben sich mittlerweile vielfältige Strukturen entwickelt: Die Spanne reicht vom Micro-Hybrid in der Struktur eines Parallel-Hybrids (Abbildung 3) mit einem kleinen Elektroantrieb, der als Starter und Bordnetzgenerator fungiert und ggf. auch ein wenig das



Abb. 2: Elektrofahrzeug 2009: Mini-E, Batterie 35 kWh, 150 kW Asynchronmotor, 152 km/h Höchstgeschwindigkeit, ca. 170 km Reichweite.

Quelle: BMW

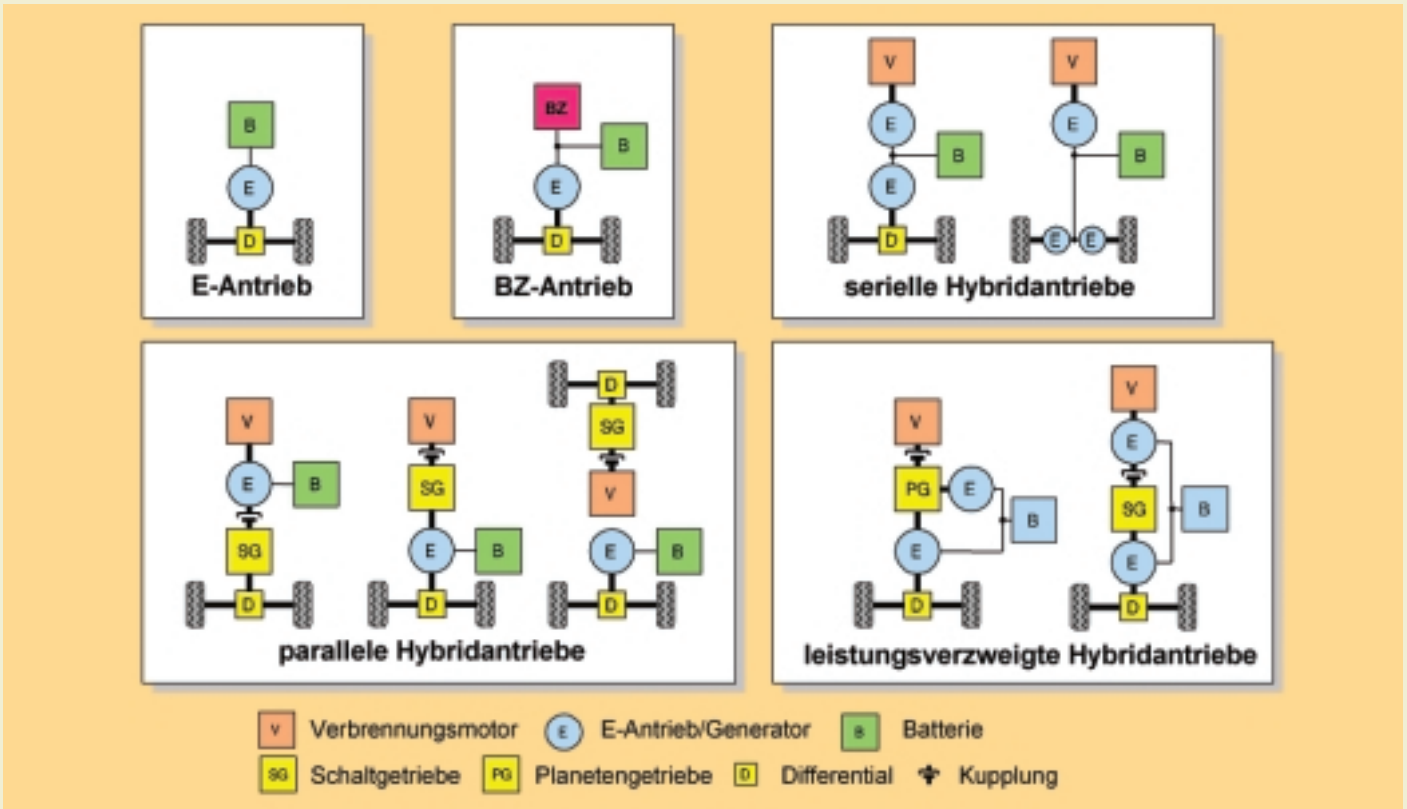


Abb. 3: Strukturen elektrischer und hybrider Antriebssysteme.

Anfahren unterstützt, über den Full-Hybrid in Parallel- oder leistungsverzweigter Struktur, der teilweise auch rein elektrisch fahren kann, bis hin zum anderen Extrem, dem Range Extender in Serienhybrid-Struktur, bei dem ein kleiner Verbrennungsmotor lediglich der Reserve für den Fall einer erschöpften Batterie dient. In Nutzfahrzeugen erlauben Hybridantriebe neue konstruktive Lösungen wie die relativ einfache Verteilung der Antriebsleistung auf mehrere Achsen mittels einer Serienhybrid-Struktur (z. B. in Gelenkbussen). Allen diesen neuartigen Konzepten ist gemein, dass es auf höchste Effektivität und Effizienz ankommt. Obwohl viele der einzelnen Fragestellungen nicht grundsätzlich neu sind – als Beispiel seien bewährte elektrische Flurförderfahrzeuge genannt – zeigt sich, dass vorhandene Standardlösungen für die speziellen Anforderungen der Straßenfahrzeuge suboptimal sind. Die Systeme und Komponenten müssen genau für die Bedürfnisse des Straßenfahrzeugs optimiert werden. In diesem Kontext seien zwei Schwerpunkte der Forschungsarbeiten im Fachgebiet LEA näher erläutert:

### Elektrischer Antrieb

Bei der Auswahl des geeigneten elektrischen Motors für automobiler Anwendungen spielen mehrere Kriterien eine Rolle: Der Wirkungsgrad ist neben der Leistungs- und Drehmomentendichte von entscheidender Bedeutung. Im Vergleich mit einem vollen Benzintank ist der Energieinhalt einer Batterie sehr knapp bemessen, sodass alle elektrischen Komponenten mit maximaler Effizienz arbeiten und gleichzeitig auch möglichst leicht sein müssen. Die elektrische Maschine als eine der schwersten und leistungsstärksten Einzelkomponenten ist davon im Besonderen betroffen.

Hinzu kommt, dass insbesondere im Antriebsstrang hybrider Fahrzeuge wenig Bauraum zur Verfügung steht, sodass eine hohe Leistungsdichte nicht nur bezüglich des Gewichts, sondern auch bezogen auf das Volumen gefordert wird. Weitere Kriterien, die in automobilen Anwendungen allgemein eine Rolle spielen, sind Kosten, Zuverlässigkeit und Geräuschentwicklung. Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren ist hier das Ziel, möglichst leise, akustisch unauffällige Antriebe zu entwickeln.

Die Gleichstrommaschine wird zwar für Kleinantriebe, auch im Automobil, noch vielfach eingesetzt, als Traktionsmaschine ist sie aufgrund der mechanischen Kommutator, der resultierenden Baugröße und des Wartungsbedarfs kein ernsthafter Kandidat. Durch die Verfügbarkeit moderner leistungselektronischer Wechselrichter konnten sich stattdessen die Drehstromantriebe etablieren. Tabelle 1 stellt die einzelnen Maschinentypen GM (Gleichstrommaschine), ASM (Asynchronmaschine), GRM (geschaltete Reluktanzmaschine) sowie PMSM (permanent-erregte Synchronmaschine) dar.

Aktuell ist die PMSM der favorisierte Maschinentyp. Das hängt vor allem mit den großen Fortschritten bei den Permanentmagnetmaterialien zusammen. Moderne Seltenerd-magnete bestehen aus einer Legierung aus Neodym, Eisen und Bor oder auch aus Samarium-Kobalt und können sehr hohe magnetische Feldstärken erzeugen. Mithilfe dieser Magnete ist die Konstruktion sehr kompakter, leistungsfähiger und effizienter Synchronmaschinen möglich. Hierbei bietet die Einbettung der Magnete in die Rotorstruktur (Interior Permanent Magnet Synchronous Machine, IPMSM) gegenüber der Oberflächenmontage ein günstigeres Drehmoment-Drehzahl-Verhalten sowie produktionstechnische Vorteile. Auch

|   | GM  | ASM | GRM | PMSM |
|---|-----|-----|-----|------|
| Kosten  | 🔴🔴  | 🟢   | 🟢   | 0    |
| Leistungs- und Drehmomentdichte               | 🔴🔴  | 0   | 0/🟢 | 🟢    |
| Wirkungsgrad                                  | 0/🟢 | 0   | 🟢   | 🟢    |
| Robustheit (Temperatur, Vibrationen, Schmutz) | 🔴   | 🟢   | 🟢🟢  | 0    |
| Geräusche                                     | 0   | 🟢   | 🔴🔴  | 0    |
| Stromrichteraufwand                           | 🟢   | 0   | 🔴🔴  | 0    |
| Regelungsaufwand                              | 🟢   | 🟢   | 🔴🔴  | 0    |

Tabelle 1: Vergleich verschiedener elektrischer Antriebe.

die Ausführung der elektrischen Wicklung als Einzelzahnwicklung (diese Wicklungsart findet man auch bei der geschalteten Reluktanzmaschine) kommt einer kompakten Bauform und einem einfachen Produktionsprozess entgegen. Auf diese Weise können Mehrkosten aufgrund des Permanentmagnetmaterials teilweise kompensiert werden. Die Vorteile der hohen Leistungsdichte und der Effizienz der IPMSM überwiegen die Nachteile. Diese liegen insbesondere im deutlich komplizierteren Betriebsverhalten beispielsweise im Vergleich mit der Asynchronmaschine. Die Regelung (Abbildung 4) wird entsprechend aufwändiger und benötigt folglich einen höheren Rechenaufwand und damit mehr Prozessorleistung.

Die Aufgabe der Regelung besteht darin, ein gewünschtes Drehmoment  $T^*$  bei verschiedenen Motordrehzahlen bzw. Fahrgeschwindigkeiten schnell und präzise einzustellen (der Stern bezeichne im Folgenden jeweils den gewünschten Wert, den Sollwert, den die tatsächliche Größe (ohne Stern) annehmen möge).

Die Funktionsweise solch einer IPMSM-Regelung hat dabei im Prinzip Ähnlichkeit mit der Regelung eines fremderregten Gleichstrommotors. Dabei wird ein Strom-Sollwert berech-

net, der beim gegebenen Motor das gewünschte Soll-Drehmoment bewirkt und daher mittels einer unterlagerten Stromregelung im Motor einzuprägen ist. Die Stromregelung vergleicht dazu ständig den gemessenen Motorstrom mit dem Strom-Sollwert und erhöht oder verringert dementsprechend die am Motor angelegte Spannung. Dadurch werden die Ströme und damit auch das Drehmoment auf ihre Sollwerte eingeregelt und auch unter Einfluss von Störungen weitestgehend gehalten.

Während Ströme und Spannungen beim Gleichstrommotor als Gleichgrößen vorliegen und somit mit klassischen Regelungsansätzen einfach behandelt werden können, hat man es bei der dreiphasigen IPMSM mit Wechselgrößen zu tun. Die Regelung von Wechselgrößen ist aufgrund der begrenzten Schnelligkeit klassischer Regelungen schwierig, weshalb man sich eines mathematischen Tricks bedient: Durch Abbildung (Koordinatentransformation) der elektrischen Statorgrößen (abc) in ein sich mitdrehendes rotorfestes Koordinatensystem (dq) ändert sich die Perspektive auf das elektrische System des IPMSM, wodurch ein Übergang von Wechsel- zu Gleichgrößen ermöglicht wird. Die Stromregelung kann dann völlig analog zu der des Gleichstrommotors in diesem Koordinatensystem aufgebaut werden. Anschließend müssen die durch den Regler berechneten Spannungen wieder in das statorfeste Koordinatensystem zurückgerechnet und an den Klemmen des Motors angelegt werden. Die sinnvolle Wahl des Sollstromes bzw. des Arbeitspunktes  $i_d^*, i_q^*$ , mit dem ein gewünschtes Drehmoment  $T^*$  gestellt werden kann, ist bei der IPMSM im Gegensatz zum Gleichstrommotor jedoch nicht so trivial, was hauptsächlich auf elektrische Asymmetrien (Sättigungseffekte, Induktivitätsverteilung) im Motor zurückzuführen ist. In der Regel wird durch Vermessung der IPMSM ein Motorkennfeld generiert, auf dessen Basis die Arbeitspunktwahl realisiert werden kann. Abbildung 5 zeigt ein solches Kennfeld. Man kann anhand der Linien des konstanten Drehmoments (grün) erkennen, dass die Abbildung des Drehmoments  $T$  auf den

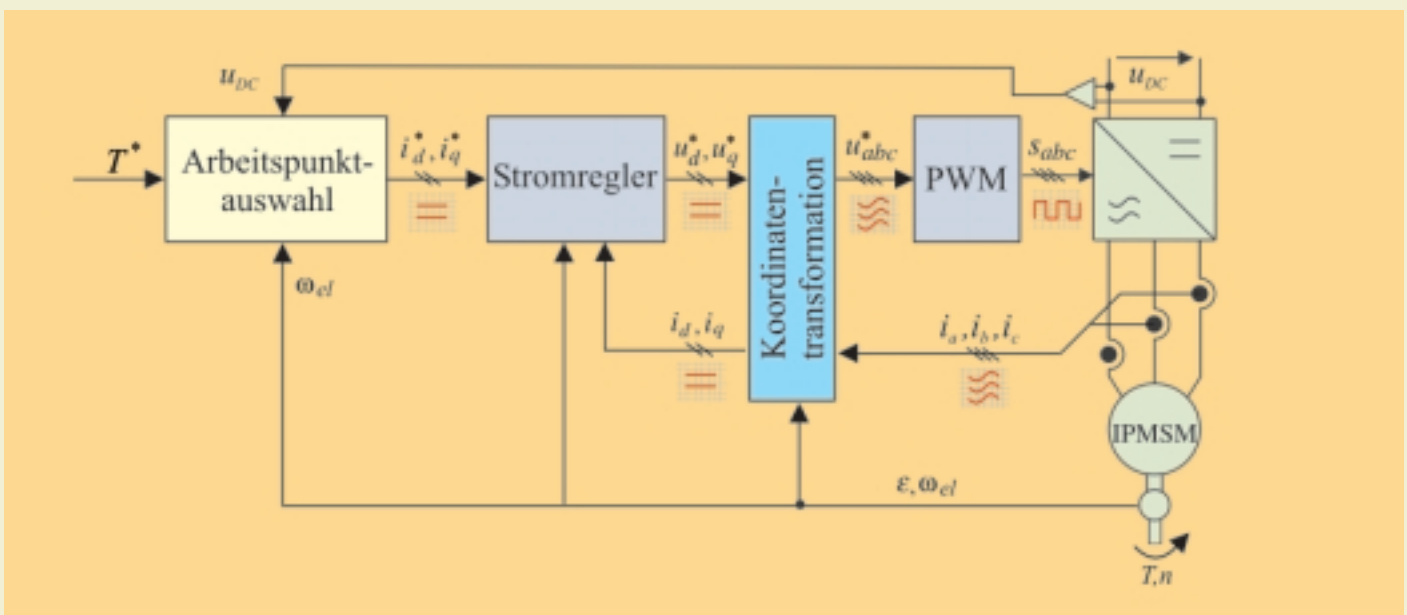


Abb. 4: Schematische Regelungsstruktur für einen IPMSM.

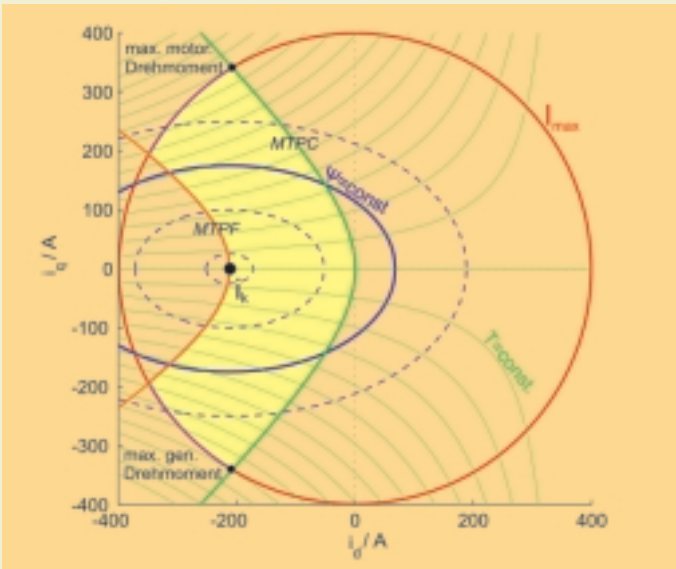


Abb. 5: Kennfelder einer IPMSM in dq-Stromkoordinaten.

Arbeitspunkt  $i_d$ ,  $i_q$  nicht eindeutig ist. Es können also unterschiedliche Arbeitspunkte ausgewählt werden, um das gewünschte Drehmoment zu stellen. Dieser Freiheitsgrad wird genutzt, um unter Berücksichtigung der gegebenen Strom- und Spannungsgrenzen (rot und lila) einen „optimalen“ Arbeitspunkt  $i_d$ ,  $i_q$  innerhalb eines sinnvollen Betriebsbereichs des Motors (gelb) auszuwählen. Hierzu muss eine Zielfunktion als Optimierungskriterium festgelegt werden, z. B. die Minimierung der Stromwärmeverluste. Auf diese Weise ergibt sich dann ein eindeutig festgelegter Arbeitspunkt.

Das Einprägen der Sollströme  $i_d^*$ ,  $i_q^*$  im Motor wird durch die der Arbeitspunktwahl nachgeschaltete Stromregelung gewährleistet. Dazu werden die Sollströme mit den Messwerten der in dq-Koordinaten transformierten Motorströme  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  verglichen und entsprechende Stellsignale in Form von Sollspannungen  $u_d^*$ ,  $u_q^*$  berechnet.

Abbildung 6 zeigt einen typischen Anregelvorgang der Motorströme  $i_d$ ,  $i_q$  bei Aufschalten eines Sollwertsprungs  $i_d^*$ ,  $i_q^*$  durch die Arbeitspunktwahl. In nur zwei bis drei Millisekunden werden die neuen Stromsollwerte und damit auch

das neue Drehmoment eingestellt.

Die Sollspannungen  $u_d^*$ ,  $u_q^*$  werden nun wieder auf statorfeste abc-Größen abgebildet und einer Pulsweitenmodulation (PWM) zugeführt. Die PWM generiert aus den Spannungssollwerten  $u_a^*$ ,  $u_b^*$ ,  $u_c^*$ , binäre Steuersignale  $s_a$ ,  $s_b$ ,  $s_c$ , deren zeitliche Mittelwerte wieder genau den Spannungssollwerten entsprechen. Diese Steuersignale steuern die nur schaltend betriebenen Transistoren des leistungselektronischen Stellgliedes, des Wechselrichters, welcher auf diese Weise die von der Traktionsbatterie bereitgestellte Gleichspannung  $u_{DC}$  in die für den Elektromotor benötigte Drehspannung umformt.

### Energiespeicher

Der Energiespeicher ist die teuerste und momentan die limitierende Komponente in Elektrofahrzeugen. Er ist entscheidend für die Reichweite, die Leistungsfähigkeit und das Gewicht des Fahrzeugs.

Typischerweise wird heute ein reiner Batteriespeicher in Nickel-Metallhydrid- (NiMH) oder Lithium-Ionen-Technologie (Li-Ion) eingesetzt. Batterien zeichnen sich unter den elektrischen Energiespeichern durch die Fähigkeit aus, vergleichsweise große Energiemengen speichern zu können. Ihre Energiedichte ist allerdings verglichen mit chemischen Treibstoffen immer noch etwa zwei Größenordnungen geringer. Nachteilig ist, dass Leistung und Zyklenfestigkeit von Batterien durch die zugrundeliegende elektrochemische Form der Energiespeicherung sehr begrenzt sind (Abbildung 7). Wird eine Batterie bezüglich des Energieinhalts bewusst sparsam bemessen (z. B. für einen Zweitwagen mit beschränkter Reichweite oder für ein Hybridfahrzeug), steht daher auch nur eine geringe elektrische Leistung zur Verfügung.

Eine Hybridisierung des Energiespeichers mittels Doppelschichtkondensatoren (DLC) kann hier Abhilfe schaffen. Kondensatoren speichern die elektrische Energie in einem elektrostatischen Feld und zeichnen sich im Gegensatz zu Batterien durch eine hohe spezifische Leistung und hohe Zyklenfestigkeit aus, können jedoch nur geringe Energiemengen speichern. Beide Speicher können also ideal zu einem hybriden Energiespeichersystem kombiniert werden,

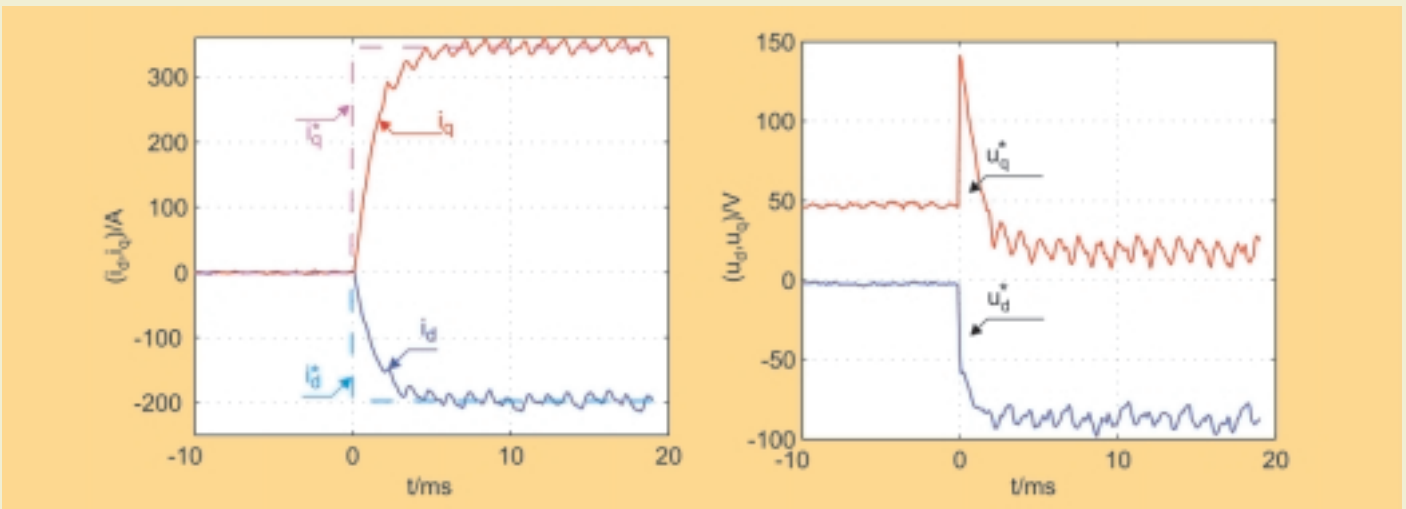


Abb. 6: Anregelvorgang bei Aufschalten eines Sollwertsprungs  $i_d^*$ ,  $i_q^*$ .

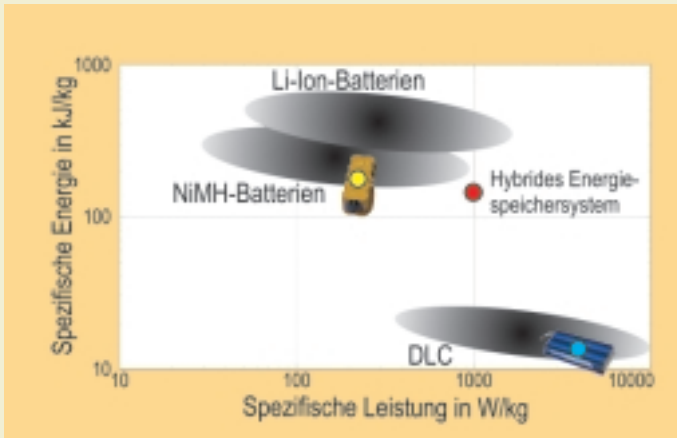


Abb. 7: Energie und Leistung verschiedener elektrischer Speicher.

das sowohl eine adäquate Reichweite als auch eine hohe Leistungsfähigkeit und damit Beschleunigungsvermögen des Fahrzeugs ermöglicht. Die sich ergebende Struktur ist in Grafik 8 dargestellt.

Durch die hybride Struktur des Energiespeichersystems ergeben sich zwei Fragestellungen:

1. Wie sind Batterie und Doppelschichtkondensator ideal zu dimensionieren?
2. Wie ist die Antriebsleistung des Fahrzeugs im Betrieb ideal auf beide Speicher zu verteilen?

Da die Auslegung des Energiespeichersystems und die Betriebsstrategie einen direkten Einfluss aufeinander haben, müssen im Prinzip beide gleichzeitig optimiert werden. Ziel ist dabei in beiden Fällen, die Verluste des Energiespeichers zu minimieren und damit den Wirkungsgrad zu optimieren.

Die erste Frage kann zum Beispiel mithilfe der Dynamischen Programmierung gelöst werden, einem Optimierungsverfahren, das eine optimale Betriebsstrategie unter Kenntnis des kompletten Fahrzyklus bestimmt. Hierzu wurden Fahrprofile im städtischen und stadtnahen Umfeld von Paderborn per GPS aufgezeichnet und anschließend über eine Simulation der Leistungsbedarf des Fahrzeugs bestimmt. Als Referenz diente eine Antriebsbatterie, die ein Gewicht von 400 Kilogramm aufweisen muss, um die notwendige Spitzenleistung von 90 Kilowatt bereitstellen zu können.

Für das hybride Energiespeichersystem hingegen wurde die Batterie als Langzeitspeicher ausschließlich auf Basis der gewünschten Reichweite von 60 Kilometer dimensioniert.

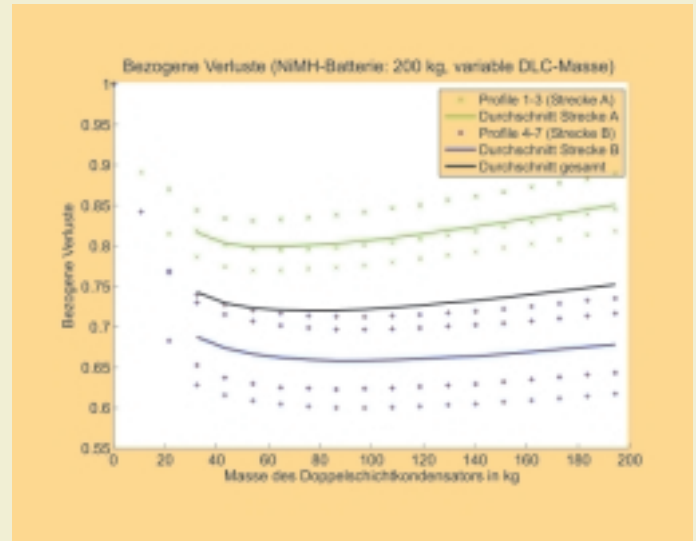


Abb. 9: Parameterstudie über die Abhängigkeit der Verluste von der Größe des Doppelschichtkondensators.

Die notwendige Größe des Doppelschichtkondensators, der die Leistungsspitzen puffern soll, wurde dann über eine Parameterstudie bestimmt (Abbildung 9).

Eine Nickel-Metallhydridbatterie von 200 Kilogramm und ein Kondensator von 54 Kilogramm ermöglichen eine Reduktion der Verluste im Speichersystem zwischen 17 und 39 Prozent. Durch das verringerte Gewicht kann der Verbrauch des Fahrzeugs weiterhin um sechs Prozent gesenkt werden.

Die zweite Frage nach der Aufteilung der Antriebsleistung auf die Speicher im Betrieb kann nur mittels suboptimaler Betriebsstrategien gelöst werden, die robust gegenüber den auftretenden Störungen sind. Insbesondere der zukünftige Leistungsverlauf unterliegt stochastischen Einflüssen des Straßenverkehrs, wie z. B. Überholvorgängen, roten Ampeln oder gar unterschiedlichen Streckenverläufen. Um diese optimal berücksichtigen zu können, wurde das verwendete Optimierungsverfahren zur Stochastischen Dynamischen Programmierung erweitert. Diese verwendet anstelle des exakten Leistungsprofils nur die stochastischen Eigenschaften vergangener Fahrten, um vom aktuellen Fahrzustand auf zukünftige Zustände zu schließen und hierfür die erwarteten Verluste zu minimieren. Dieses Verfahren ist online auf einem Fahrzeug einsetzbar. In Testsimulationen konnten die Verluste gegenüber dem Referenzsystem insbesondere auf Fahrzyklen mit hohem Anteil an Bremsleistung um bis zu 31

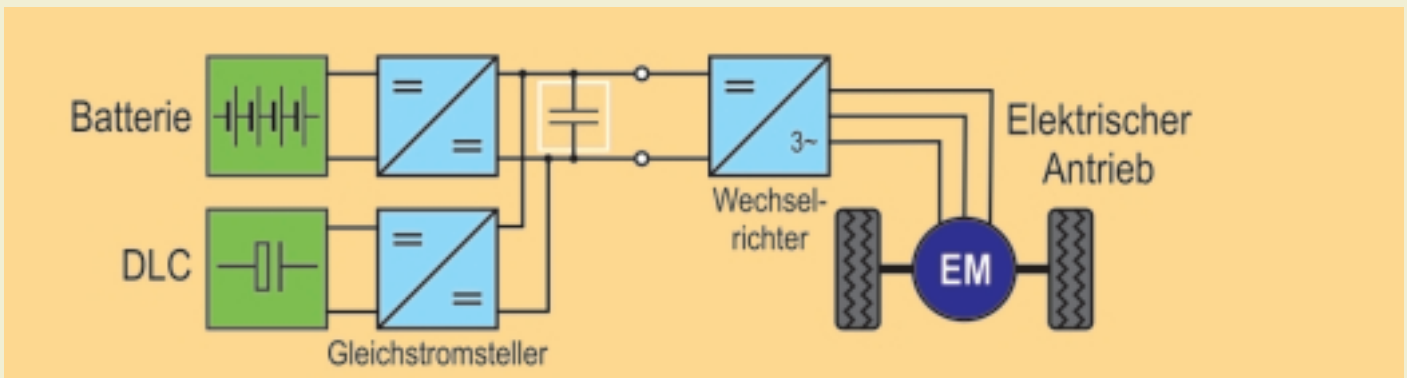


Abb. 8: Struktur des hybriden Energiespeichersystems.



Abb. 10: Elektrofahrzeug mit hybridem Energiespeichersystem (Studentenprojekt).

Prozent reduziert werden.

Diese dargestellten Forschungsarbeiten und andere, in dieser Übersicht nicht erwähnte Aspekte elektrischer und hybrider Fahrzeugantriebe sind derzeit Gegenstand mehrerer Projekte am Fachgebiet, die aus verschiedenen Quellen finanziert werden (DFG, Fördermittel des Landes NRW, Direktaufträge aus der Industrie).

Die Studenten werden im Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik nicht nur durch Bachelor- und Master-Arbeiten, sondern auch in Form von Projektseminaren an relevante Themen herangeführt. Auch das hybride Energiespeichersystem wurde in einem solchen Projektseminar in einem kleinen Elektrofahrzeug durch eine Studentengruppe in die Praxis umgesetzt (Abbildung 10).

### Literatur

D. SCHRÖDER, „ELEKTRISCHE ANTRIEBE – REGELUNG VON ANTRIEBSSYSTEMEN“, 3. AUFLAGE, SPRINGER, 2009.

T. KNOKE, „OPTIMALER ENTWURF UND BETRIEB HYBRID-ELEKTRISCHER FAHRZEUGANTRIEBE AM BEISPIEL VON ABFALLSAMMELFAHRZEUGEN“, DISSERTATION, UNIVERSITÄT PADERBORN, 2010.

S. MORIMOTO, Y. TAKEDA, T. HIRASA, K., TANIGUCHI, „EXPANSION OF OPERATING LIMITS FOR PERMANENT MAGNET MOTOR BY CURRENT VECTOR CONTROL CONSIDERING INVERTER CAPACITY“, IEEE TRANS. IND. APPL., VOL. 26, NO. 5, SEPT./OCT. 1990.

M. MEYER, „WIRKUNGSGRADOPTIMIERTE REGELUNG HOCH AUSGENUTZTER PERMANENTMAGNET-SYNCHRONMASCHINEN IM ANTRIEBSSTRANG VON AUTOMOBILEN“, DISSERTATION, UNIVERSITÄT PADERBORN, 2010.

M. MEYER, J. BÖCKER, „OPTIMUM CONTROL FOR INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS (IPMSM) IN CONSTANT TORQUE AND FLUX WEAKENING RANGE“, 12TH INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS AND MOTION CONTROL CONFERENCE (EPE-PEMC), AUGUST 2006, PORTOROZ, SLOWENIEN.

C. ROMAUS, K. GATHMANN, J. BÖCKER, „OPTIMAL ENERGY MANAGEMENT FOR A HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM FOR

ELECTRIC VEHICLES BASED ON STOCHASTIC DYNAMIC PROGRAMMING“, VEHICLE POWER AND PROPULSION CONFERENCE (VPPC), SEPT. 2010, LILLE/FRANKREICH.

C. ROMAUS, J. BÖCKER, K. WITTING, A. SEIFRIED, O. ZNAMENSHCHYKOV, „OPTIMAL ENERGY MANAGEMENT FOR A HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM COMBINING BATTERIES AND DOUBLE LAYER CAPACITORS“, ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION (ECCE), SEPT. 2009, SAN JOSE, USA.



**Dipl.-Ing. Tobias Huber** ist seit Mai 2009 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik an der Universität Paderborn tätig. Schwerpunktmäßig befasst er sich hier mit der Modellierung und Regelung von permanent-erregten Synchronmotoren. Seine Diplomarbeit schloss Tobias Huber an der Universität Karlsruhe im Bereich der nichtlinearen Querdynamikregelung von KFZ ab.



**Dipl.-Ing. Christoph Romaus** ist seit September 2010 Akademischer Rat im Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik. Er studierte Elektrotechnik und Informationstechnik an der RWTH Aachen. Danach war er seit 2005 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet LEA und erforschte selbstoptimierende Regelungsstrategien für das Energiemanagement eines hybriden Energiespeichersystems aus Batterien und Doppelschichtkondensatoren.



**Dipl.-Ing. Andreas Specht** ist seit Oktober 2007 am Fachgebiet Leistungselektronik und Elektrische Antriebstechnik als Wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Sein Forschungsschwerpunkt liegt auf der Temperaturmodellierung von permanent-erregten Synchronmotoren. Sein Studium der Elektrotechnik hat Andreas Specht an der TU Dresden abgeschlossen.

### Kontakt

**Prof. Dr.-Ing. Joachim Böcker**

**Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik**

**Institut für Elektrotechnik und Informationstechnik**

**05251 60-2209**

**boecker@lea.upb.de**