

■ Mark-M. Bakran  
Michael Gleißner  
Teresa Bertelshofer

# Batterien und elektrische Antriebe

Systembetrachtungen für die Elektromobilität

■ Getriebe eines Plug-In-Hybridfahrzeugs (sst).  
Kleines Foto: Aufladung eines Plug-In-Hybridfahrzeugs (sst).

Wohl jedem fällt bei der Elektromobilität sofort das Thema Batterie als prägend ein. Die Batterie bestimmt die Reichweite, ganz wesentlich die Mehrkosten und auch das Mehrgewicht gegenüber einem Verbrennerfahrzeug. Aus der Sicht des Fahrzeugantriebes ist die Batterie allerdings nur eine von vielen Komponenten des elektrischen Antriebsstranges. Als eine solche Systemkomponente muss die Batterie ganz andere Fragen beantworten als zum Beispiel aus Sicht der Elektrochemie.

Die Systemauslegung eines Fahrzeuges hat die Aufgabe, alle nur denkbaren Systemzustände eines Fahrzeuges mit verschiedensten Fahrzyklen bei unterschiedlichsten Bedingungen wie Temperaturen oder Laderegime zu betrachten und jeweils das elektrische und thermische Verhalten zu berechnen. Sie soll auch die zu erwartende Lebensdauer prognostizieren. Die Herausforderung ist dabei, dass die Modellierung über mehrere Größenordnungen in der Zeitskala erfolgen muss. Bei der Charakterisierung der Batteriezelle findet sie oft im Frequenzbereich statt. Die Systemauslegung ist hingegen auf ein im Zeitbereich anwendbares Modell angewiesen. Außerdem muss die Modellierung das elektrische und thermische Verhalten verkoppelt betrachten.

Der Lehrstuhl für Mechatronik, der am Zentrum für Energietechnik (ZET) der Universität Bayreuth mitwirkt, betrachtet die Batterie aus der Perspektive der Leistungselektronik. Diese ist bei jedem elektrisch angetriebenen Fahrzeug der Vermittler zwischen Batterie und Antriebsmotor. Hier werden die verstellbaren Spannungen für die Drehzahlsteuerung der Maschine erzeugt, aber auch die gepulsten Ströme, welche die Batterie belasten. Die Leistungselektronik ist damit bestimmend für die Batteriebelastung zum Beispiel mit hochfrequenten Strömen; gleichzeitig ist die Spannungsantwort der Batterie bestimmend

für die Antriebsauslegung, so auch für das erreichbare Drehmoment und die Drehzahl des Fahrmotors.

Diese spezielle Sicht auf die Batterie führt dazu, dass die Leistungselektronik angepasste elektrische und thermische Modelle der Batterie einsetzen muss, welche bei den besonderen Belastungsprofilen Gültigkeit besitzen.

### Elektrischer Antriebsstrang in einem Fahrzeug

Reine Elektrofahrzeuge (Battery Electric Vehicles, BEV) werden allein mit einer Batterie betrieben. Hybridfahrzeuge (Hybride Electric Vehicles, HEV) haben hingegen neben einem Elektromotor mindestens einen weiteren Antrieb. Ob ein Fahrzeug als Mild-, Full- oder Plug-In-Hybrid ausgeführt ist oder auch ein reines Elektrofahrzeug ist, bestimmt zwar wesentlich die Leistungsklasse des elektrischen Antriebes und auch die zu installierende Energie der Batterie, führt aber immer zu einer fast identischen elektrischen Antriebsstruktur (Abb. 2). Und sollte die Brennstoffzelle als Energielieferant interessant werden, so gilt auch dann, dass die elektrische Antriebsstruktur wie bei einem seriellen Hybridfahrzeug aussieht.



Abb. 1: Dipl.-Ing. Teresa Bertelshofer und Dr.-Ing. Michael Gleißner bei Messungen an einem Wechselrichter in der Versuchshalle des Lehrstuhls für Mechatronik (Foto: Christian Wiffler).

„Da bei einem batterieelektrischen Fahrzeug die Batterie die teuerste Einzelkomponente ist, lohnen sich hier Maßnahmen zur Wirkungsgradsteigerung extrem.“

Die zur Verfügung stehende elektrische Spannung an den Batterieklemmen ist Schlüsselgröße und Problem zugleich, denn der Fahrer verlangt auch noch volle Performance bei Kälte und schwacher Batterie.

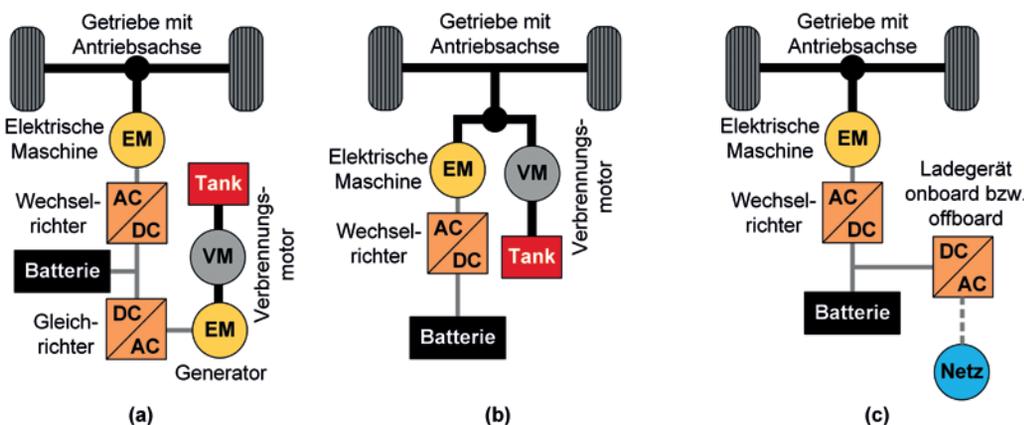
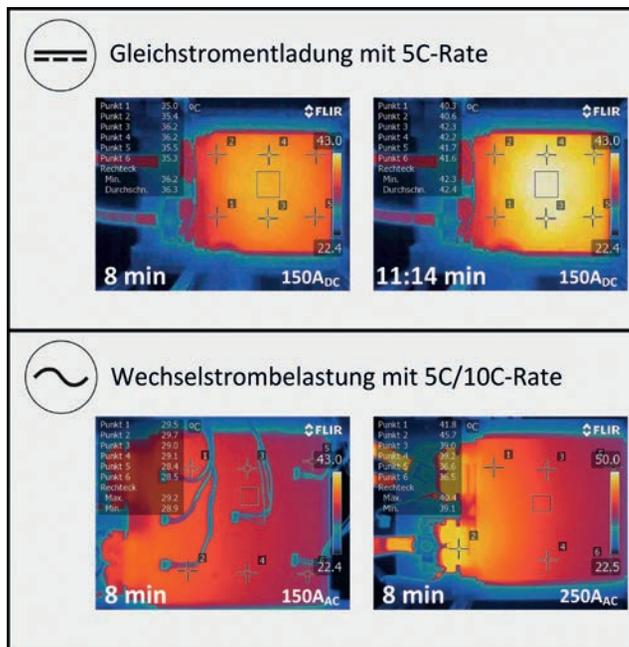
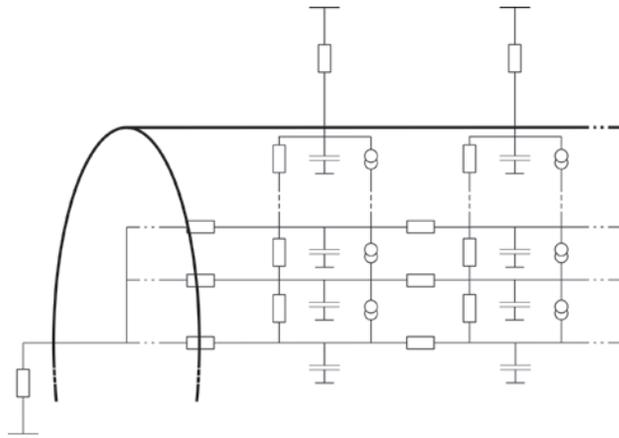


Abb. 2: Elektrische Antriebsstruktur eines a) Serial Hybrid Electric Vehicle, b) Parallel Hybrid Electric Vehicle, c) Battery Electric Vehicle (Grafik: Mark-M. Bakran / Michael Gleißner).

■ Abb. 3: Thermische Systemmodellierung: a) Repräsentatives thermisches Modell eines Batteriesystems, b) Messungen an einer Batterie mit AC- und DC-Belastung (Grafik und Bilder: Mark-M. Bakran / Michael Gleißner).



vielen Einflussgrößen und am Ende mit einem Ziel, nämlich möglichst kosteneffizient eine Funktion zu realisieren. Man muss also zum Beispiel die Frage beantworten: Soll eine kalte Batterie für bessere Performance erwärmt werden, und – wenn ja – soll dies extern geschehen oder durch die aktive Belastung der Batterie? Eine ähnliche Frage gilt für den anderen Fall, nämlich der zu warmen Batterie: Soll hier die Kühlung verbessert oder die Belastung reduziert werden (Abb. 3)? Und jeweils ist dabei zu beachten, was der Fahrer akzeptiert und was er als starke Einschränkung sieht. So könnte er sich beispielsweise in seinem gewohnten Fahrstil behindert fühlen, wenn sich das Fahrzeug nicht in der erwarteten Weise beschleunigen lässt.

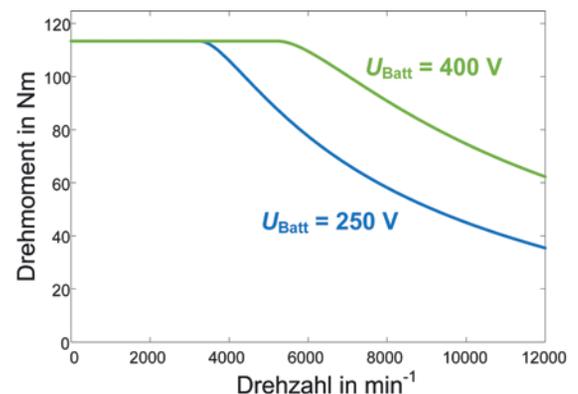
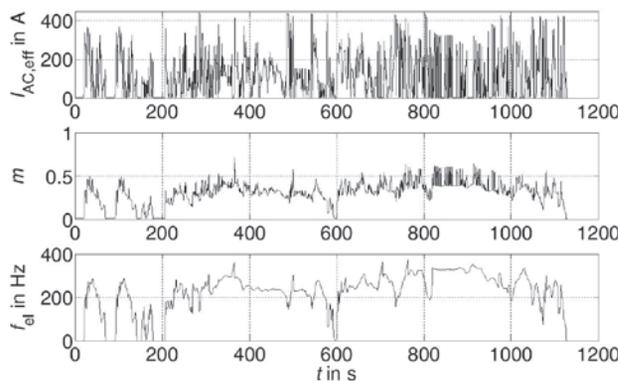
Von der Belastung der Batterie, welche typisch beim Zellhersteller zur Charakterisierung verwendet wird, unterscheidet sich das reale Fahrprofil eines Elektroautos deutlich. Man sieht zeitlich schnell veränderliche Vorgänge, Abb. 4 zeigt typische elektrische Einflussgrößen. Es ist deutlich erkennbar, dass die Strombelastung der Batterie höchst ungleichmäßig sein kann. Auf der anderen Seite erkennt man, dass das zur Verfügung stehende Antriebsmoment stark von der Batterie beeinflusst wird. Diese Momentencharakteristik ist gleichzeitig die große Stärke des Elektroautos, weil das volle Moment konstant und sofort zur Verfügung steht, bis die maximale Leistung erreicht ist. Daraus resultiert die beeindruckende Performance, wobei ein Elektroauto die meisten viel stärker motorisierten Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor an der Ampel locker stehen lässt.

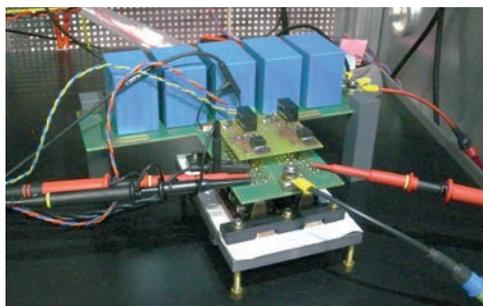
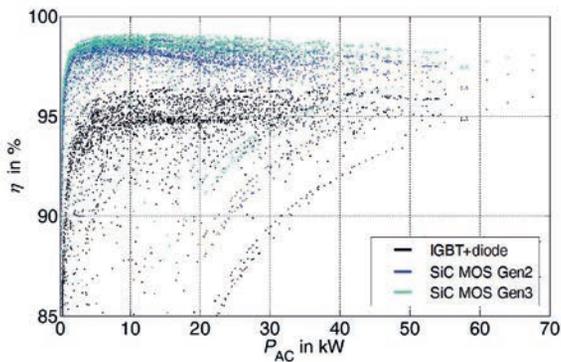
Die Systemauslegung hat also das Problem zu lösen, dass einerseits die maximale Batteriespannung die höchste elektrische Belastung für die Leistungselektronik darstellt, andererseits die minimale Batteriespannung die erreichbare Leistungsfähigkeit bestimmt. Damit sind wir bei einem typischen Problem im Ingenieursbereich, der Systemoptimierung mit

### Optimierung der Leistungselektronik für batterieelektrische Fahrzeuge

Ein weiteres grundsätzliches Thema der Systemauslegung unter Einbeziehung der Batterie ist die Effizienz. Auch wenn der Wirkungsgrad eines elektrischen

■ Abb. 4: Einflussgrößen auf die Batterieauslegung in Elektrofahrzeugen. Links: Strombelastung im Fahrspiel, rechts: Drehzahl-Drehmoment Kennlinie des Fahrmotors (Grafiken: Mark-M. Bakran / Michael Gleißner).

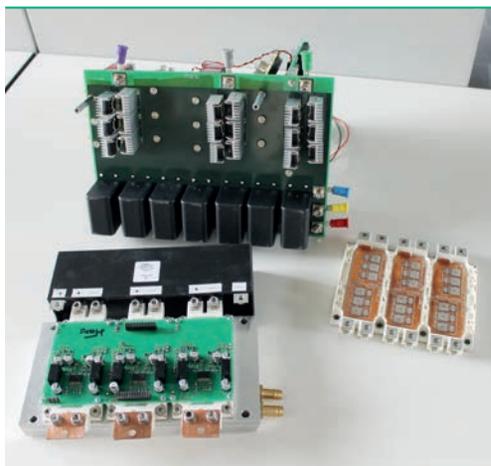




■ Abb. 5: Links: Wirkungsgradvergleich eines konventionellen Wechselrichters und eines Siliziumkarbidwechselrichters, rechts: Charakterisierungsmessplatz für einen SiC-Halbleiter (Grafik und Foto: Mark-M. Bakran / Michael Gleißner).

Antriebsstranges sehr hoch ist, entstehen natürlich auch Verluste. Hier gilt plakativ: Je weiter hinten im Antriebsstrang, also in Richtung Fahrmotor, die Verluste entstehen, desto kostspieliger sind sie. Denn die jeweils davor befindlichen Systemkomponenten müssen eine entsprechende zusätzliche Leistung zur Verfügung stellen, und dabei entstehen auch wiederum Verluste. Da bei einem batterieelektrischen Fahrzeug die Batterie die teuerste Einzelkomponente ist, lohnen sich hier Maßnahmen zur Wirkungsgradsteigerung extrem: So senkt beispielsweise ein um drei Prozent erhöhter Wirkungsgrad im Antrieb die Kosten für die Batterie um eben drei Prozent. Die Forschungsschwerpunkte in diesem Bereich konzentrieren sich aktuell vor allem auf den Einsatz neuer Halbleiter in der Leistungselektronik.

die Bauelemente etwa nur noch 1/10 so dick sein müssen. Diese dünneren Bauelemente ermöglichen dann wiederum eine deutliche Reduktion der Verluste bei der Stromführung. Am Lehrstuhl Mechatronik der Universität Bayreuth werden diese Bauelemente untersucht und auch komplette Wechselrichter für den Antrieb entwickelt. Hier kann mit realen Fahrprofilen nachgewiesen werden, um wie viel der Wirkungsgrad verbessert werden kann (Abb. 5).



■ Abb. 6: Kleine Wechselrichter für den Einsatz in der Batterieforschung (Foto: Christian Wiffler).

Hier verspricht das sogenannte Wide-Band-Gap-Material Siliziumkarbid deutliche Vorteile. „Wide Band Gap“ steht dabei für den größeren Bandabstand gegenüber normalen Silizium. Dieser erhöht die Belastbarkeit des Bauelementes mit Spannung, weshalb

### Das schnelle Laden von Batterien in Elektrofahrzeugen

Diskussionen über kürzere Ladezeiten von Elektroautos sind auch in den Medien zunehmend ein Thema. Dabei wird dann schnell von Ladeleistungen deutlich oberhalb von 150 Kilowatt gesprochen. Schon bei den heute erreichbaren Ladeleistungen von rund 100 Kilowatt ist die Batterie das limitierende Systemelement. Deshalb muss die Ladeleistung bei höherem Ladezustand stark reduziert werden, um die Batterie nicht zu schädigen.

Bei noch höheren Leistungen kommt die Herausforderung hinzu, dass diese nur bei höheren Spannungen erreicht werden können. Das heißt: Die Spannung muss von rund 400 Volt Gleichspannung, wie sie heute typisch ist, auf 800 Volt gesteigert werden, um überhaupt die dazu notwendigen Ströme über das Ladekabel noch führen zu können. Wo schon heute für ein Batteriesystem eine Serienschaltung von etwa 100 Einzelzellen notwendig ist, steigert sich diese dann auf 200. Damit steigt auch der Aufwand für den Ausgleich der Ladungsunterschiede in den einzelnen Batteriezellen, die Zellsymmetrierung, denn jede Batteriezelle hat natürlich fertigungstechnisch bedingte Toleranzen. Soll nun nicht die schwächste Zelle die gesamte Leistungsfähigkeit begrenzen, so muss mit Hilfe von Leistungselektronik symmetriert werden (Abb. 7a).

### AUTOREN



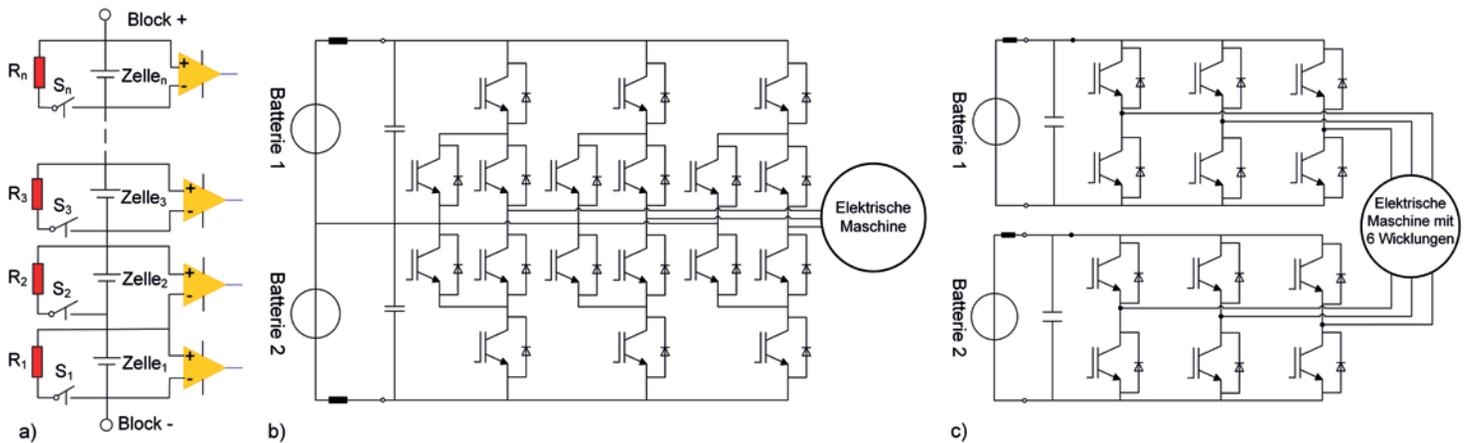
■ Prof. Dr.-Ing. Mark-M. Bakran ist Inhaber des Lehrstuhls für Mechatronik an der Universität Bayreuth.



■ Dr.-Ing. Michael Gleißner ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik.



■ Dipl.-Ing. Teresa Bertelshofer ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Mechatronik.



■ Abb. 7: Schema der Zellschaltung mit Symmetrierung durch Widerstände (a); Schema einer aufgeteilten Batterie mit Multilevelwechselrichter (b) und mit mehrphasiger Maschine (c) (Grafiken: Mark-M. Bakran / Michael Gleißner).

Auch hier muss das Zusammenspiel aus Batterie und System sehr genau charakterisiert werden, denn zu viel vorhandene Symmetrierleistung erhöht die Gesamtkosten und verringert die Effizienz. Hingegen erhöht ein zu hoher Anspruch an die Fertigungsqualität wiederum die Kosten pro Zelle. Eine Bewertung ist auch hier wieder nur aus einer Systemperspektive möglich, durch welche man zu einer vorgegebenen Fertigungstoleranz ermitteln kann, welche Symmetrierleistung vorgehalten werden muss. Auch aus der Systemperspektive muss dieses Verfahren mit alternativen Ansätzen verglichen werden. In diesem Fall wäre das zum Beispiel die Aufteilung der Komplett-Batterie in zwei Teilbatterien.

Ein solcher Ansatz ist wiederum nur möglich, wenn die Struktur des Antriebssystems entsprechend angepasst wird. Dabei gibt es wiederum zwei exemplarische Vorgehensweisen:

- Entweder man greift auf eine angepasste Leistungselektronik zurück, die in der Lage ist, eine Maschine aus zwei Teilbatterien zu speisen (Abb. 7b),
- oder man verwendet eine besondere elektrische Ausführung der Maschine, die mehrere Wicklungssysteme einsetzt (Abb. 7c).

Im ersten Fall setzt man sogenannte 3-Level- oder Mehrlevel- Wechselrichter ein, welche ein zusätzliches Potenzial bieten, den Wirkungsgrad zu erhöhen. Im zweiten Fall erreicht man ein Antriebskonzept, welches auch nach einem Fehler in einem Teilsystem in der Lage ist, den Fahrbetrieb aufrecht zu erhalten.

## Zusammenfassung

Diese beispielhafte Darstellung von Themen rund um das elektrische Antriebssystem eines Fahrzeugs hat gezeigt, dass es keine Komponente gibt, die nicht Rückwirkungen auf das gesamte Antriebssystem hat, und dass es kaum eine Systemscheidung gibt, die nicht eine Rückwirkung auf die Batterie als Systemkomponente hat. Ein Verständnis der Batterie aus der Systemperspektive ist damit der Schlüssel zum Erreichen des Gesamtoptimums. Und von diesem Optimum profitiert am Ende jeder, der künftig ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug fährt.



■ Abb. 8: Der Lehrstuhl für Mechatronik unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Mark-M. Bakran hat auch 2019 wieder das Elefant Racing-Team der Universität Bayreuth bei der Konstruktion eines elektrisch betriebenen Rennautos unterstützt (siehe rechts) (Foto: © Elefant Racing).

■ Philipp Wetzlar und Felix Krohn

# Mit Elektroantrieb voll im Rennen

Elefant Racing e.V., eine Studentische Initiative der Universität Bayreuth, hat bereits Tradition: Seit 2004 nimmt sie alljährlich mit einem selbstgebauten Rennwagen an einer weltweiten Rennserie, der „Formula Student“, teil. Schon oft hat sie dabei international sichtbare Erfolge erzielen können. Mittlerweile sind es knapp 50 Studierende aus den Ingenieurwissenschaften, der BWL und der Informatik, die mit innovativen technischen Ideen gegen studentische Teams anderer Universitäten aus dem In- und Ausland antreten.

Im Jahr 2011 hat Elefant Racing als eines der ersten „Formula Student“-Teams den Umstieg auf die Elektromobilität gewagt. Seitdem entsteht jedes Jahr auf dem Bayreuther Campus ein neues Rennauto mit elektrischem Antrieb. Die Studierenden haben sich damit einen großen Wissens- und Erfahrungsvorsprung erarbeitet. Hier ist unter anderem das Akku-packaging-Konzept zu nennen, das 2019 – aufgrund der Einführung eines Allradantriebs – grundlegend verändert werden konnte: Die bislang zweiteiligen Lithium-Polymer-Akkumulatoren wurden durch einen großen Akku im Fahrzeugumpf ersetzt. Diese Umstellung auf einen neuen Batteriekonzept führt nicht nur zu einer weiteren Gewichtsreduktion, son-

dern auch zu einer erhöhten Sicherheit. Außerdem konnten die Zellen dieses Jahr erstmalig unter Rennbelastung getestet werden.

Das Rennauto aus Bayreuth wiegt nur noch 200 Kilogramm und kann in knapp 2,5 Sekunden aus dem Stand auf 100 km/h beschleunigen. Seine Spitzengeschwindigkeit erreicht es bei 125 km/h.



■ Abb. 1: Der Rennwagen „FR 19 Loki“ des Elefant Racing-Teams 2019 (Foto: © Elefant Racing).

■ Abb. 2: Einbau der Batterie in den Rennwagen (Foto: © Elefant Racing).

## FACTSHEET

- Zellen in 6 „Cellpacks“ gegliedert.
- 280 Zellen (Pouch-Cells) 140S2P.
- 6,84 Kilowattstunden.
- 420-588 Volt.
- Entladestrom >200 Ampère.
- Ladestrom ~100 Ampère.
- Im Sicherheitssystem trennen Relais den Plus vom Minuspol des Akkus. Der Zustand der Relais wird überwacht.
- Eigenes Batteriemanagementsystem.
- IMD (Insulation-monitoring-device)-Platine zur Isolationsüberwachung zwischen High- und Low-Voltage.
- LV-System wird über zwei isolierte Spannungswandler aus dem HV-System versorgt.
- Akku wird luftgekühlt durch 6 integrierte Lüfter (~100W) und zusätzlich durch einen Sicherheitsautomatismus gesichert, der im Fehlerfall die zusätzlichen Lüftungsschlitze im Akkukasten verschließt.

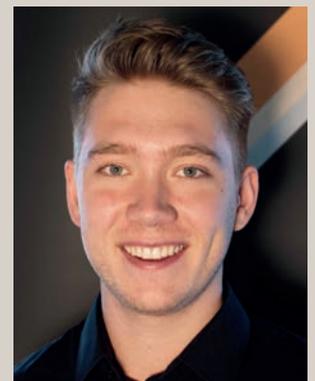
Auch 2019 erhielt das Elefant Racing-Team sowohl beim Bau als auch beim Testen des Rennwagens wieder Unterstützung von namhaften High-Tech-Unternehmen. Und ohne die enge Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Mechatronik unter der Leitung von Prof. Dr. Mark.-M. Bakran wäre der Umstieg auf den Allrad-Antrieb nicht möglich gewesen. Über die selbstentwickelten Radnabenmotoren, mit denen dieser Antrieb realisiert werden konnte, haben zwei Mitglieder des Bayreuther Teams ihre ingenieurwissenschaftlichen Masterarbeiten verfasst.

Das in Bayreuth entwickelte Konzept des neuen Elektro-Rennwagens auf ein „normales Straßenauto“ zu übertragen, ist wegen der auf den Rennbetrieb ausgelegten und dadurch sehr geringen Speicherkapazität der Batterie nicht sinnvoll. Doch ein Rückblick auf die enormen technischen Fortschritte, die seit der ersten Teilnahme an der Formula Student vor 15 Jahren erzielt wurden, stimmt optimistisch. Elektromobilität hat Zukunft, und Elefant Racing wird sie weiterhin mit kreativen Konstruktionsideen vorantreiben.

## AUTOREN



■ Felix Krohn, 1. Vorstand von Elefant Racing e.V.



■ Philipp Wetzlar, 2. Vorstand von Elefant Racing e.V.