Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 103 (2012)
Heft: 3

Artikel: Vom Rennsport elektrisiert
Autor: Kopanakis, Alexander
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-857279

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Vom Rennsport elektrisiert

Schweizer Studenten bauen Elektro-Rennauto

Seit 2006 nimmt der Akademische Motorsportverein Zürich (AMZ) der ETH Zürich mit selbst entwickelten Rennwagen erfolgreich an internationalen, studentischen Wettbewerben teil. Bei ihrem zweiten Elektrorennwagen «Novena» kamen erstmals auch selbst entwickelte Motoren zum Einsatz.

Alexander Kopanakis

Im Rahmen des Maschineningenieurstudiums an der ETH Zürich bietet sich in einem einjährigen Projekt die Möglichkeit, Erfahrungen in der Konstruktion und Realisierung eines komplexen Produktes zu sammeln. Der AMZ wurde 2006 gegründet, um in diesem Rahmen und in Zusammenarbeit mit Studierenden mehrerer Schweizer Hochschulen einen Formelrennwagen zu bauen und damit an verschiedenen Rennen der Formula Student teilzunehmen.

Seit jeher orientiert sich der AMZ an seinem Motto «Leichter. Schneller. Effizienter.» und verbesserte die Autos Jahr für Jahr. Nach drei konventionellen Antrieben wagte man im Herbst 2009 dann den Schritt zum elektrischen Antrieb. Das Modell «Furka» erreichte in der Saison 2010 in seiner Klasse prompt den Gesamtsieg in Silverstone und die Top 5 in Deutschland und Österreich.

Das Ziel, bezüglich Geschwindigkeit mit der Klasse der konventionellen Verbrenner mitzuhalten, wurde mehr als nur erfüllt. Das Rennauto «Novena» (Bild 1) bescherte dem Verein in der Saison 2011 sein bisher erfolgreichstes Jahr.

Formula Student

Die Formula Student entstand 1982 in den USA. Seither nehmen immer mehr Universitäten aus verschiedenen Ländern an den Events teil. In Europa fand der erste Wettbewerb 1998 in England statt. In den letzten Jahren nahmen je über 100 Teams in Silverstone oder Hockenheim teil. Die Basis des Reglements orientiert sich an der Formula SAE, einem studentischen Wettbewerb, der seit 1979 von SAE International (ehem. Society of Automotive Engineers) organisiert wird.

Diverse Beurteilungskriterien

Neben der Geschwindigkeit sind Wirtschaftlichkeit und Umweltaspekte von enormer Bedeutung. Experten aus Motorsport und Industrie bewerten die Konstruktion einzelner Komponenten und des gesamten Fahrzeugs, bevor die Piloten in ihre Autos steigen dürfen, um deren dynamische Qualitäten demonstrieren zu können. Auch die graue Energie in Form der verwendeten Materialien und Fertigungsverfahren fliesst in die Punkte ein.

Die dynamischen Disziplinen bestehen aus Beschleunigungsrennen, einem Querbeschleunigungstest (Fahren einer engen Acht), einem Autocross (eine schnelle Runde) und der Königsdisziplin, dem Ausdauerrennen.

Um auf den eng gesteckten Kursen möglichst schnell zu sein, bedarf es mehr als einfach nur Leistung und Geschwindigkeit, denn hauptsächlich bei elektrischen Fahrzeugen ist mehr Leistung mit mehr Gewicht verbunden, da zusätzliche Batterien benötigt werden. Dies wirkt sich sowohl auf die Rundenzeit wie auf den Energieverbrauch negativ aus. Es gilt, ein Optimum zu finden, um die Punkteausbeute über alle Events zu maximieren.

Die Entwicklung von Novena

Im Novena kamen einerseits bewährte Komponenten zum Einsatz, andererseits wurden gewisse Komponenten von Grund auf neu entwickelt.

Batterien

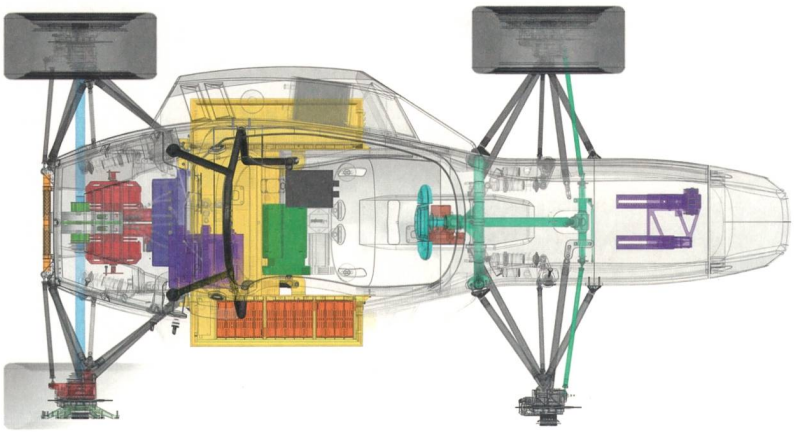
Aufgrund ihrer grossen Energie- und ausreichenden Leistungsdichte wurden Lithiumpolymerakkus schon im Furka-Modell mit Erfolg verwendet. Dieselben 144 Zellen mit einem Energieinhalt von je 13,5 Ah stellten sich als sehr wettbewerbstauglich heraus. Sie wurden unter Einbezug der Kompatibilität mit dem Wechselrichter auf Effizienz optimiert eingesetzt. Die Spannung der komplett geladenen Batterie beträgt somit rund 150 V und wird mittels einer selbst programmierten Laderoutine in 1,5 h erreicht.

Die Batterie ist mit einem BMS (Battery Management System) ausgerüstet, das die Zellen überwacht. Jede Zellspannung, 26 Temperaturen und der Gesamtstrom werden ausgelesen. Um die volle Kapazität der Zellen nutzen zu können, werden Ungleichheiten der Zellspannungen im Anschluss an den Ladeprozess automatisch kompensiert.

Natürlich spielten auch Aspekte des Packagings eine Rolle im Design der Akkubox. Mit dem Ziel eines möglichst tiefen Schwerpunktes und einer möglichst kleinen Trägheit sitzen die Akkus in U-

Andrew Hoddart

Bild 1 Das Novena-Elektrorennauto des AMZ-Teams.



AMZ

Bild 2 Packaging von Novena. Die Akkubox (gelb dargestellt) ist hinter und um die Fahrerzelle angeordnet. Der Wechselrichter (blau) und die Motoren (rot) mit Getriebe befinden sich dahinter.

Form möglichst zentral hinter und neben der Sicherheitszelle des Fahrers (Bild 2).

Elektronik und Regelung

Für die intelligente Regelung und zur besseren Abstimmung des Fahrzeuges sind zahlreiche Sensoren im Auto verteilt. Von Drehzahl- und Temperatursensoren bis hin zu Potentiometern in den Federelementen enthält das Auto insgesamt über 100 Sensoren und Aktoren. Zur Reduktion der Kabellängen wurde vermehrt auf CAN-Kommunikation gesetzt. Eine ausgeklügelte, selbst entwickelte Software auf der zentralen VCU (Vehicle Control Unit) regelt damit die Antriebs- und Sicherheitssysteme. So verfügt das Auto auch über ABS und eine Traktionskontrolle.

Die Sensordaten werden während den Testfahrten und den Rennen geloggt und ermöglichen später Optimierungen der Software, der Strategie und auch der Einstellung des Fahrwerks. Die Entwickler des darauffolgenden Jahres können so auf einen umfassenden Datensatz zur Entscheidungsfindung zugreifen.

Elektromotoren

Die DC-Bürstenmotoren, die im Furka zum Einsatz kamen, boten zwar ein ansprechendes Packaging und eine gute Leistung, bezüglich Drehmomentverlauf und Effizienz bestand aber noch Optimierungspotenzial. Aus den Daten des Jahres 2010 wurden 348 Nm pro Hinterrad errechnet, um das volle Potenzial des Reifens auszuschöpfen. Die durch die Akkus begrenzte Maximalleistung betrug 75 kW, das geforderte Maximalgewicht 12 kg. Marktlösungen konnten diese Anforderungen an Gewicht, Volumen, Effizienz und Leistung nicht erfüllen, weshalb man sich für eine Eigenentwicklung entschied. Die Beratung von Evtec war fürs Team äusserst wertvoll, um das bei einer Eigenentwicklung vorhandene Risiko zu minimieren. Man entschied sich, die Motorschnittstellen identisch mit denen des Letztjahreswagens zu definieren, damit man im Fall der Fälle die Elektromotoren innert Stunden (gefordert war ein Tag) mit denen vom Furka tauschen könnte. Dies hatte jedoch Implikationen für die physischen Ausmasse des Motors und für die Getriebestufe. Es wurde ebenfalls entschieden, je einen Motor einem Rad zuzuordnen, um ein «elektrisches Differenzial» (Torque Vectoring) zu ermöglichen.

Gestützt auf die Daten aus 2010 wurden zunächst die Abhängigkeiten des Strukturgewichts des Motors mit der Maximalleistung und mitgeführten Energie untersucht. Zudem setzte man sich mit verschiedenen Motorbauarten auseinander. So haben beispielsweise Axialflussmaschinen mit Permanentmagneten zwar eine kleinere Rotationsträgheit und enthalten kein Eisen im Kern, aber die damit verbundenen Fertigungsverfahren sind um einiges komplexer.

Bei den vorgegebenen geometrischen Einschränkungen erwiesen sich permanentmagneterregte Synchronmaschinen als Aussenläufer (Bild 3) wegen ihrer höheren Leistungsdichte und höherem möglichen Drehmoment als optimale Lösung, die noch zusätzlich optimiert wurde. Simulationen zeigten nach der Optimierung einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von 91 % (Bild 4) bei einem Gewicht der Aktivkomponenten von 6 kg.

Es resultierten AC-Aussenläufermotoren mit Permanentmagneten, die bis zu 4600 $Umin^{-1}$ ein Moment von 75 Nm liefern sowie maximal 6500 $Umin^{-1}$ und eine Spitzenleistung von 36 kW erreichen (Bild 5). Und dies bei einem Gewicht von nur je 9 kg!

AMZ

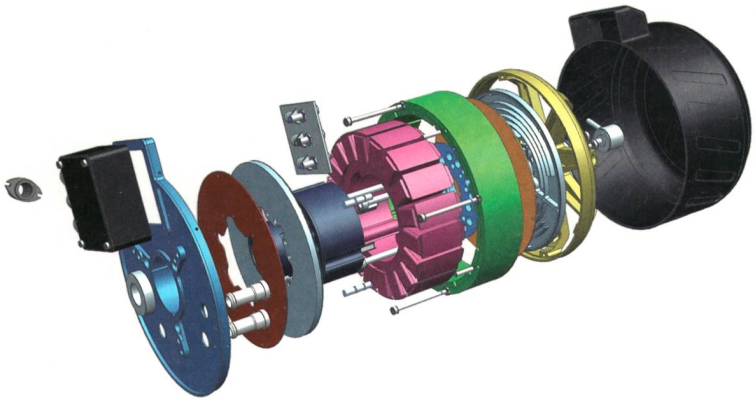


Bild 3 Explosionsdarstellung des Elektromotors. In Violett ist der Stator ohne Wicklung zu sehen, der Rotor ist in Grün dargestellt.

Erfahrungen mit dem eigenen Motor

In der Fertigungsphase stellten sich überraschende Herausforderungen, denn erst jetzt wurde bekannt, dass die benötigten Magnete mit einer Verspätung von 3 Monaten eintreffen würden. Um das Potenzial des Eigenbaumotors dennoch ausschöpfen zu können, wurde in sehr kurzer Zeit ein Ersatzrotor konstruiert, ausgelegt und gefertigt. Anstelle von segmentierten Magneten fanden in diesem Rotor leicht erhältliche Rechteckmagnete Verwendung. Um Kosten und Zeit zu

sparen, wurde der Rückschlussring aus massivem Eisen hergestellt, was zu zusätzlichen Verlusten führt. Die Form der Magnete erforderte ein Erodieren von Taschen in den Rückschlussring. Die Magnete wurden dann von Hand in den Rückschlussring geklebt. Durch das schnelle Handeln konnten zusätzliche Verzögerungen vermieden werden.

Um die Kupferverluste so gering wie möglich zu halten, wurden die Wicklungsköpfe, die die Leistung nicht erhöhen, so klein wie möglich ausgeführt. Der Stator wurde durch eine spezialisierte Firma bewickelt, um bei den bescheidenen Platzverhältnissen eine einwandfreie elektrische Isolation der Wicklungen sicherzustellen. Zur Erfüllung der Vorgaben mussten zwei parallel geschaltete Wicklungen realisiert werden – mit dem Nachteil von Kreisströmen. Die Wicklungen wurden manuell hergestellt und nach dem Verlöten intensiv geprüft.

Um die Wicklung zu schützen und die Kupferverluste mit der Kühlung besser abführen zu können, wurden die Wicklungen mit einem Vergussharz vergossen. Eine Form stellte dabei sicher, dass das Harz nur an die gewünschten Stellen floss. So konnte das Gewicht auf ein Minimum beschränkt werden.

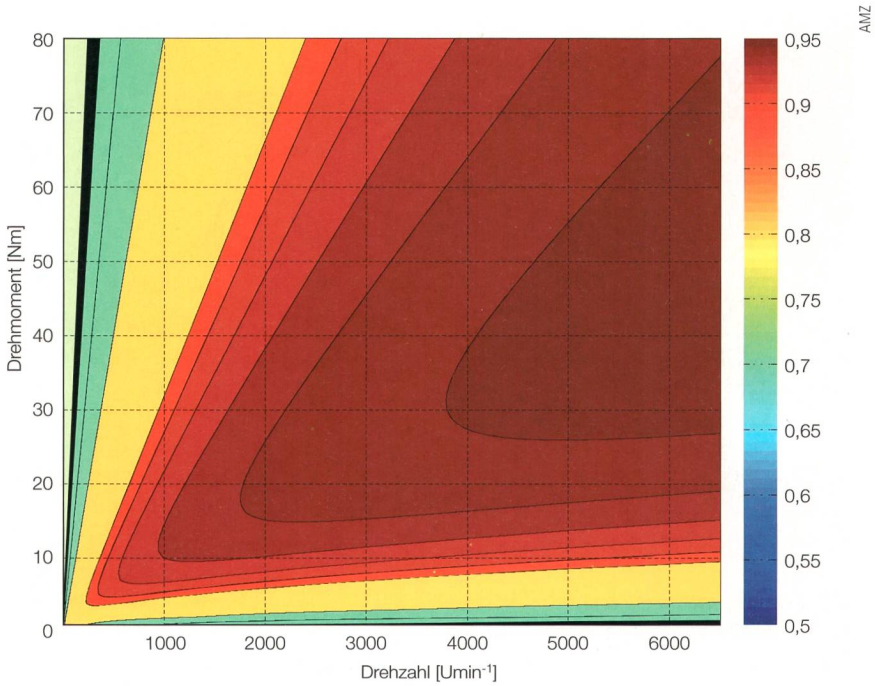


Bild 4 Simuliertes Effizienzkennfeld (ohne Feldschwächung).

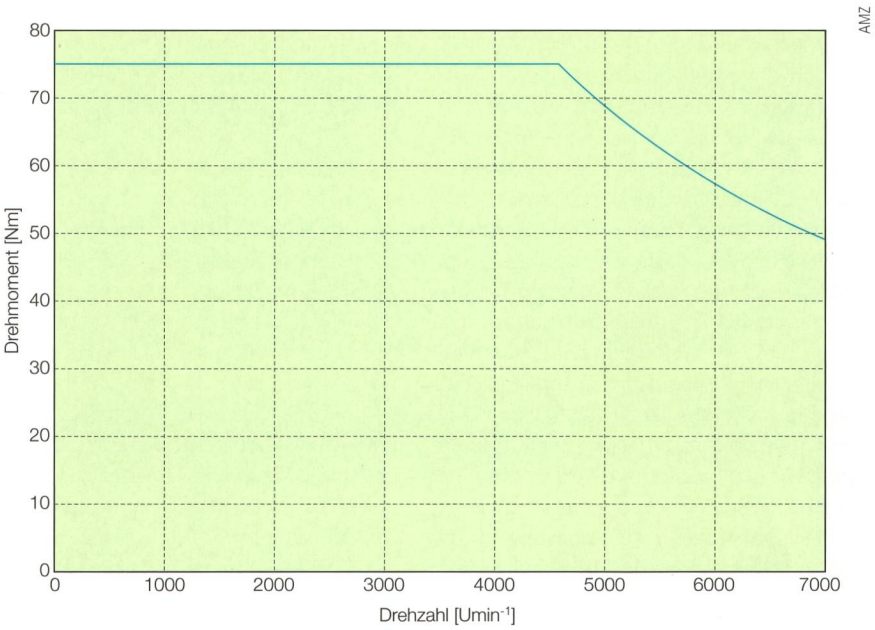


Bild 5 Drehmomentverlauf des Motors. 75 Nm bis 4600 Umin^{-1} und 36 kW Maximalleistung.

Inbetriebnahme

Die Arbeiten am Prüfstand durchliefen mehrere Phasen. Bevor die eigentlichen Messungen durchgeführt werden konnten, musste das Zusammenspiel von Motor und Umrichter stimmen und der Motor ausgewuchtet werden. Danach wurden Messungen durchgeführt, um die elektromagnetischen Simulationen zu verifizieren und eine Effizienzkarte des Motors zu erstellen. Zudem wurden auch Leistungstests der Kühlung durchgeführt, um das Gleichgewichtsverhalten analysieren zu können. Ebenfalls wurden Drehmoment- bzw. Drehzahlprofile abgefahren, um das transiente Verhalten zu untersuchen.

Während der Prüfstandarbeiten traten die ersten Probleme auf. So wurde bei einer im Fahrbetrieb häufig auftretenden Geschwindigkeit eine Resonanzfrequenz entdeckt, die in der Simulation unerkannt geblieben war. Sie führte dazu, dass sich die Magnete vom Rückschlussring lösen konnten. Dabei kam es aber zu keinen Schäden, da sich die Magnete nur in der Nut bewegen konnten. Es stellte sich heraus, dass die Auswahl des Klebers und die Behandlung der Magnete fehlerhaft gewesen war. Da sich die Lieferung des geplanten Rotors weiter verzögerte, wurden die Magnete aus dem Rückschlussring entfernt, die Nickelschicht weggeschliffen und ein spezieller Magnetkleber verwendet. Es kam während der Prüfstandarbeiten zu keinem weiteren Ausfall der Magnete – einem Einbau ins Fahrzeug stand nichts mehr im Wege. In dieser Konfiguration wurden mehrere Testfahrten durchgeführt.

Ende Juni erhielt das Team schliesslich die bestellten Rotoren. Um den Motor in der geplanten Konfiguration am ersten Wettbewerb einsetzen zu können, wurden die Rotoren getauscht. Dabei wurde festgestellt, dass sich ein Magnet bereits gelöst hatte. Aufgrund des Zeitdrucks konnte der Motor mit dem geplanten Rotor nicht auf den Prüfstand getestet werden. Bereits während der ersten Fahrt mit dem neuen und extern gefertigten Rotor verschob sich ein Magnet, wobei auch ein Kabel teilweise durchtrennt wurde.

Um den Motor dennoch einsatzbereit zu machen, entschied man sich in letzter Minute, eine Bandage über die Magnete zu legen. Mit CFK-Prepreg wurde eine

Andrew Hoddart

Bild 6 Alle Teams in Silverstone 2011: Der AMZ steht als zweites von links in der vordersten Reihe.

solche laminiert. Diese Änderung bedingte ein erneutes Auswuchten des Motors. Seither sind die Magnete sicher fixiert.

Auf der Rennstrecke wurde der Vorteil durch die eigens für den Rennbetrieb entwickelten Motoren klar sichtbar: Mit Novena erlebte der AMZ seine bisher erfolgreichste Saison. Neben etlichen Auszeichnungen belegte der AMZ in Silverstone (Bild 6) und Hockenheim je Platz 2 und konnte die Rennen in Spielberg und Barcelona für sich entscheiden (Kasten).

Ausblick

Seit September 2011 läuft bereits das nächste Projekt. Unter einer Gruppe neuer Studenten und mit der Erfahrung der altgedienten Teammitglieder entsteht das neue Auto «Umbrail», mit dem der AMZ die Ergebnisse des letzten Jahres noch einmal übertreffen möchte.

Umbrail enthält als erstes Auto des AMZ eine vollständige Aerodynamik, die nicht nur für höheren Abtrieb, sondern auch für verminderten Luftwiderstand sorgen soll. Ausserdem wird der Motor weiter verbessert und an die neuen Anforderungen angepasst. Mithilfe eines selbst entwickelten, dynamischen Prüfstandes soll die Effizienz des Antriebsstranges weiter gesteigert und die Strategie für die Rennen im Voraus besser eruiert werden. Der Weg führt auch 2012 an die legendäre Strecke in Silverstone.

Links

- www.amzracing.ch

Angaben zum Autor

Alexander Kopanakis, Maschinenbau-Student an der ETH Zürich, ist Geschäftsleiter des AMZ-Teams.
Akademischer Motorsportverein Zürich, 8092 Zürich
kopanaka@ethz.ch

Novena

Technische Daten

Antrieb: 2 AMZ AC-Motoren mit Einzelradantrieb hinten
Batterie: Lithium-Polymer-Akkumulatoren, 1,94 kAh
Leistung: 94 PS (2 x 35 kW)
Gewicht: 181 kg
Beschleunigung 0–100 km/h: 3,4 s
Maximalgeschwindigkeit: 120 km/h

Goldmedaillen:
– Overall Electric FS Austria
– Acceleration FS Austria (Weltrekord)
– Overall Electric FS Spain
– Endurance FS Silverstone
– Engineering Design FSE Germany

Silbermedaillen:
– Overall Class 1A Silverstone
– Overall FSE Germany

Résumé

Electrisés par la course automobile

Des étudiants suisses construisent une voiture de course électrique

Depuis 2006, l'association académique des sports mécaniques de Zurich (AMZ) de l'École polytechnique fédérale de Zurich participe avec succès à des concours étudiants internationaux en présentant des voitures de course qu'elle a développées elle-même. Elle a même utilisé pour la première fois des moteurs développés au sein de l'académie pour équiper sa deuxième voiture électrique « Novena ». Cet article propose un aperçu des défis lancés par la construction d'une voiture de course électrique. Des défis qui ne se sont pas uniquement circonscrits aux limites de la physique et de l'électricité, mais qui ont également concerné des retards dans la livraison des composants auxquels l'équipe a dû réagir à la fois rapidement et avec beaucoup d'imagination afin de trouver une alternative. No

ALLES IM KASTEN

WEIDMÜLLER GENERATORANSCHLUSSKÄSTEN – OPTIMAL ZUM VERBINDEN, SCHÜTZEN UND ÜBERWACHEN VON PHOTOVOLTAIK-ANLAGEN

www.weidmueller.ch

Zuverlässige Lösungen für Dach- und Freiflächenanlagen

- normgerechte Verdrahtung und anschlussfertige Lieferung
- Schutz für AC- und DC-Seite
- mit und ohne String-überwachung
- individuelle Lösungen für Großprojekte

Weidmüller