© Monash Motorsport

Auf dem Weg zum ersten elektrischen Rennauto von Monash Motorsport

AUTOR

Patrick Graham

ist Powertrain-Ingenieur bei Monash Motorsport in Melbourne (Australien).

Seit 2000 nimmt Monash Motorsport jedes Jahr am Wettbewerb Formula Student Australasia (FSAE-A) teil. Die Ergebnisse können sich sehen lassen – der Bolide mit Verbrennungsmotor hat bei acht der letzten neun Wettbewerbe den ersten Platz belegt. Nun soll ein Elektromodell die Geschichte fortsetzen.

FORMULA STUDENT UND MONASH MOTORSPORT

Jedes Jahr nehmen mehr als 600 Universitätsteams und Tausende Studierende an zahlreichen Formula-Student-Wettbewerben weltweit teil. Dabei müssen die teilnehmenden Teams einen Rennwagen-Prototypen im Stil der Formel-Serie entwickeln. Die Leistung des Boliden wird bei den Wettbewerben in acht verschiedenen Disziplinen bewertet. Für jede Disziplin werden nach einem eigenen System Punkte vergeben. Die Punktezahlen der einzelnen Disziplinen werden summiert und Gewinner ist, wer die höchste Gesamtpunktzahl erreicht hat.

Im Jahr 2015 entschloss sich das Monash-Motorsport-Team dazu, ein vollelektrisches Rennauto zu entwickeln. Nach einem Jahr Forschung und Entwicklung wurde Anfang 2017 mit dem

Prototypenbau begonnen. Es war ein besonderes Jahr, denn zum ersten Mal sollte sich die Vision „ein Team, zwei Autos“ erfüllen – und dieses Unterfangen war von Erfolg gekrönt: In der Formula Student Australasia (FSAE-A) 2017 belegten sowohl der Rennwagen mit Verbrennungsmotor (M17-C) wie auch der E-Bolide (M17-E) in ihren jeweiligen Kategorien den ersten Platz.

2018, nach mehreren Designverfeinerungen und einer umfangreichen Testphase, erhielt das Team Startplätze für die Teilnahme an den Wettbewerben Formula Student UK (FSUK), Formula Student Austria (FSA) und Formula Student Germany (FSG). Trotz starker Konkurrenz belegte der M17-C mit dem Verbrennungsmotor den ersten, zweiten und sechsten Gesamtplatz, und der M17-E, der erste E-Rennwagen von Monash, den dritten, vierten und sechsten Gesamtplatz.

M17-E

Das Beeindruckendste an der Europa-Saison 2018 war wohl der Erfolg des ersten vollelektrischen Fahrzeugs des Teams. Anfang 2016 hatte eine Machbarkeitsstudie, die auch die Vorjahresergebnisse unter die Lupe nahm, ergeben, dass nur 11 % aller erstmals elektrisch angetriebenen Teams es geschafft hatten, bei den FSAE-A- und FSG-Wettbewerben alle Teilwettbewerbe in den einzelnen Disziplinen zu absolvieren.

Rückblickend wurde klar, dass mit dem M17-E nicht nur alle Einzelwettbewerbe abgeschlossen wurden, sondern sogar bei jedem einzelnen eine Platzierung unter den Top 10 erzielt wurde. So machte sich die einfache und pragmatische Bauweise des Rennwagens bezahlt. Eine der größten Herausforderungen bei der Entwicklung dieses Wagens war die Umsetzung

eines vollelektrischen Antriebsstrangs. Wie das Team dieses Problem lösen konnte, wird im Folgenden beschrieben.

ENTWICKLUNG UND TEST EINES ELEKTRISCHEN ANTRIEBSSTRANGS

Im Kern des M17-E befindet sich ein Einzelmotor, der über einen Kettenantrieb mit den Rädern verbunden ist. Ein Antriebscontroller (Drehstromwechselrichter) wandelt den Gleichstrom (DC) aus einem großen Batteriepack für den Antrieb des Motors in dreiphasigen Wechselstrom (AC) um. Eine Motorsteuerungseinheit (ECU) verarbeitet die Vorgaben des Fahrers und koordiniert die Elemente des Antriebsstrangs, um das gewünschte Ergebnis zu erreichen.

Zweieinhalb Jahre lang wurde an Auswahl, Tests und Integration der Bauteile gearbeitet. 2016 stand im Zeichen einer umfangreichen Konstruktionsphase. 2017 wurden Bau und Test des Systems abgeschlossen. In der ersten Jahreshälfte 2018 folgten Modifikationen, um den Antriebsstrang entsprechend zu optimieren.

Hinter jeder Entwicklungsphase stand das Bestreben nach möglichst einfachen Lösungen. Es wurde weitgehend davon ausgegangen, dass einfache und robuste Lösungen zu mehr Zeit und Qualität beim Testen führen würden und zugleich weniger Zeit für die Behebung von Mängeln und Pannen eingeplant werden müsse.

AKKUMULATOR

Zu Beginn wurden verschiedene Lösungen für ein integriertes Akkumulatorsystem geprüft. Allerdings gab es am Markt nur wenige Standardlösungen, die den Anforderungen gerecht wurden. Daher stellte das Team einen eigenen leistungsstarken Batteriepack zusammen, der genau auf die Anforderungen des Autos zugeschnitten war.

Der letztendlich im M17-E eingebaute Batteriepack verfügt über eine Speicherkapazität von 8,76 kWh und kann für maximal 10 s eine Höchstleistung von 200 A bei 500 V erbringen. Die Entscheidung für einen großen Batteriepack wurde in Anbetracht der Länge der Testzeit getroffen. Für einen ganzen Testtag war die durch einen kleinen Pack verfügbare Testzeit nicht ausreichend.

Der Batteriepack besteht aus 120 Lithium-Ionen-Zellen mit einer Höchstspannung von 4,15 V. Die Zellen bilden sechs

TABELLE 1 Tabelle zur Prüfung der Motorenalternativen (© Monash Motorsport)

Charakteristik	DC-Motor mit Bürsten	PMSM	Induktion	Variabler Widerstand
Effizienz	~75 %	>90 %	~88 %	~88 %
Kühlung	Schwierig	Einfachst	Einfach	Einfach
Service-Faktor	Lager/Bürsten	Lager	Lager	Lager
Kosten	Gering	Hoch	Mittel	Mittel
Leistungsgewicht	Gering	Am höchsten	Mittel	Hoch

Blöcke, jeder mit 1P20S-Konfiguration. Jeder Block hat eine Gesamthöchstspannung von 83 V. Die einzelnen Blöcke sind seriell geschaltet. Bei voller Ladung ergibt sich eine Spannung von 498 V für den gesamten Pack.

Um ein hohes Sicherheitsniveau zu gewährleisten und die Entwicklungszeit zu minimieren, wurden für die Überwachung von Spannung und Temperatur teils Standardkomponenten und teils Spezialanfertigungen eingesetzt. Eigens gefertigte Spannungsüberwachungsplatinen leiten die Spannungen der Zellen über Sicherungen (600 V, 1 A) im SMT-Format an ein Orion Battery Management System (BMS) für 144 Zellen von Ewert Energy Systems weiter. Die Standardlösung von BMS bietet verlässlichen Schutz vor Überspannung, Überstrom und Unterspannung.

Die Temperatur jeder einzelnen Zelle wird durch ein vom Team entwickeltes separates Masterboard mit speziell programmiertem Mikrocontroller überwacht. Dieses ist auch mit den übrigen Sicherheitseinrichtungen des Fahrzeugs über Schnittstellen verbunden. Jeder Akkublock hat eine speziell angefertigte Platine mit Multiplex-Schaltung für 16 Thermistor-Eingänge. Der Mikrocontroller liest die Temperatur der einzelnen Zellen nacheinander über die Multiplexer aus und überwacht so Übertemperaturen.

Ein Hauptproblem bei der Konstruktion des Akkus waren die Verpackung und die Montage. Ursprünglich hatte das Team geplant, die einzelnen Zellen für die Montage der Zellblöcke des Batteriepacks mit einer Kupfer-Stromschiene zu verschrauben. In dem Fall hätte die Kupfer-Stromschiene wiederum auf der Spannungsüberwachungsplatine befestigt werden können. Das wäre zwar ein robustes Konzept gewesen, hätte jedoch einiges an Zusatzgewicht verursacht und auch die Komplexität des Montageprozesses erhöht: Jede Zelle hat zwei Klemmen, demnach werden für 120 Zellen 240 Schrauben benötigt.

Aus diesem Grund beschloss das Team, innovative Wege zu suchen, wie die Zel-

len elektrisch miteinander verbunden und die Spannungsniveaus gemessen werden könnten. Die letztlich umgesetzte Konstruktion sieht leitfähige Federn vor, die an der Unterseite der Spannungsüberwachungsplatine montiert sind. Diese Federn werden bei der Montage mit nur wenigen Schrauben auf jeder Klemme komprimiert angebracht. Die Überwachungseinrichtung enthält auch Aussparungen zur Montage von Thermistoren, mit denen die Temperatur der einzelnen Zellen überwacht wird. So war die Entwicklung eines Batteriepacks mit einem Gewicht von nur 89,1 kg möglich.

MOTOR UND MOTORCONTROLLER

Während der Konstruktionsphase wurden viele Motortopologien geprüft. Dabei wurden der Motortypus (AC synchron, AC asynchron und DC) und auch die Controller-Hardware berücksichtigt, die für den Antrieb benötigt werden. Auch spielte die Anzahl der Motoren und ihr Einbauort im Fahrzeug eine Rolle. Schlussendlich fiel die Wahl aus zwei Gründen auf einen einzelnen, induktivitätsarmen Axialfluss- und Permanentmagnet-Synchronmotor (PMSM).

Der erste Grund war, dass das Implementieren eines zentralen Antriebsstrangs (Einzel- und nicht Doppel- oder Vierfachantrieb) für mehr Ähnlichkeiten zwischen M17-C und M17-E sorgen würde. Das hat den Vorteil, dass ähnliche aufrechte Konstruktionen und Antriebsstrangkonstruktionen verwendet werden können, wodurch Skalierungseffekte erzielt und die Teammitglieder flexibler bei den unterschiedlichen Fahrzeugen eingesetzt werden können.

Zweitens wurde erwartet, dass die Verwendung eines PMSM zu überdurchschnittlicher Leistung führen würde. PMS-Motoren wiesen im Vergleich die höchste Drehmomentdichte pro Kilogramm und den höchsten Wirkungsgrad für die im Fahrzeug zu erwartenden Betriebsbedingungen auf, **TABELLE 1**.

BILD 1 Typisches Ergebnis aus der Beschleunigungssimulation, Echtdaten über die prognostizierten Leistungsdaten gelegt (© Monash Motorsport)

Der Nachteil dieser Wahl waren die höheren Kosten und die Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Suche nach einem kompatiblen Motorcontroller für den benötigten Betriebsbereich. Deshalb wurden umfangreiche Untersuchungen angestellt, um einen Motor und einen Motorcontroller zu finden, deren Zusammenspiel gut funktioniert.

Die Wahl fiel schließlich auf einen 100 kW/240 Nm Enstroj Emrax 228 PMS-Motor und einen Drehstromwechselrichter Unitek Bamocar D3, der als Motor-

controller fungiert. Der gewählte Motor war in drei Ausführungen verfügbar: Niederspannung (24 bis 150 V, 900 A maximal), Mittelspannung (50 bis 450 V, 340 A maximal) und Hochspannung (50 bis 600 V, 240 A maximal).

Um dem Team eine gute Entscheidungsgrundlage zu bieten, wurde ein Simulink-Modell erstellt, um die Motorleistung unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu analysieren. Die Simulation zeigte, dass die Wahl der Hochspannungsvariante zur Entstehung einer

früheren Gegen-EMK führt, wodurch das vorhandene Drehmoment begrenzt wird, wenn der Motor bei höheren Geschwindigkeiten betrieben wird. Aus diesem Grund wurde die Mittelspannungsversion des Motors gewählt.

Der gewählte Wechselrichter besteht aus drei IGBT-Halbbrücken. Durch einen digitalen Signalprozessor (DSP) von Texas Instruments wird ein feldorientierter Steueralgorithmus implementiert, der sich zu jedem Moment an der Winkellage der Läuferwelle orientiert. Um diese Informationen über die räumliche Lage zu liefern, wurden verschiedene Feedbacksensoren in Erwägung gezogen. Da das Team einen kosteneffizienten und mechanisch robusten Sensor benötigte, der Informationen über die absolute Lage liefern konnte, entschloss sich Monash Motorsport zum Kauf eines Resolvers vom Tamagawa.

Antriebsstrangversuche am Prüfstand und auf der Rennstrecke wurden im Laufe des Jahres 2017 durchgeführt. Im Zuge dieser Tests stellte sich heraus, dass das maximale Drehmoment, das der Motor tatsächlich erzielte (170 Nm), deutlich unter dem Nenndrehmoment lag (240 Nm).

Gemäß Analysen lag dies daran, dass der Batteriepack und der Wechselrichter nicht imstande waren, ausreichend Strom zum Erreichen des Maximums bereitzustellen. Aus diesem Grund wechselte das Team Anfang 2018 zur Hochspannungsversion desselben Motors. Diese Entscheidung gründete auf dem Wissen, dass weniger Strom zur Erreichung des maximalen Drehmoments benötigt würde. Mit dieser Wahl verbunden war auch die Entscheidung, einen früheren Gegen-EMK-Grenzmoment in Kauf zu nehmen.

ANTRIEBSSTRANG

Eine frühere Gegen-EMK-Grenze machte die Wahl des endgültigen Übersetzungsverhältnisses des Antriebsstrangs zu einer wichtigen Aufgabe. Das Team musste einen Kompromiss zwischen der Traktionsleistung bei niedriger Geschwindigkeit und der vom Fahrzeug erreichbaren Höchstgeschwindigkeit finden. Um das Übersetzungsverhältnis des Antriebs korrekt zu wählen, wurde eine Beschleunigungssimulation durchgeführt, **BILD 1**. Dieses Simulationswerkzeug wurde mit Daten aus den Streckenversuchen validiert, um sicherzustellen, dass der Output korrekt

BILD 2 Der Permanentmagnet-Synchronmotor Emrax 228 am Prüfstand (© Monash Motorsport)

Komponente	Masse (kg)
Grundmotor	12,3
Motorbeschläge	1,9
Abschirmbleche	2,1
Motorwelle	0,59
Zahnkränze	0,51
Kette	0,64
Differenzial	3,2
Beschläge	0,6
Halbwellen-zusammenbau	1,1
Schrauben	0,1
Stahlkäfig	2,9
Gesamt	27,4

TABELLE 2 Aufschlüsselung der Antriebsstrang-Komponenten (© Monash Motorsport)

war. Mit dem Beschleunigungssimulator konnte das Team ein paar Untersetzungsverhältnisse in die engere Wahl nehmen, von denen die erwünschte Leistung des Rennwagens erwartet werden konnte.

Um die Wahl für eine Option zu erleichtern, wurde beachtet, in welchem Betriebsbereich der Emrax den höchsten Wirkungsgrad aufweisen würde, **BILD 2**. Mithilfe von Prüfstandergebnissen und der Daten aus dem Streckenversuch konnte ein endgültiges Untersetzungsverhältnis von 3,412 als das angemessenste identifiziert werden.

Eine große Herausforderung beim M17-E war die Montage des Enstroj Emrax 228 auf das Fahrwerk. 27 Iterationen von Motoraufhängungen wurden im CAD-Werkzeug NX konstruiert und

mit Ansys Mechanical simuliert. Viel wurde unternommen, um diese Aufhängungen so leicht wie möglich zu konstruieren und doch ihre Belastbarkeit und Stabilität zu gewährleisten. Letztendlich wiegt die Baugruppe Antriebsstrang einschließlich des 12,3 kg schweren Emrax-Motors nun insgesamt nur 27,4 kg, **TABELLE 2** und **BILD 3**.

ENGINE CONTROL UNIT (ECU)

Die Engine Control Unit (ECU) erleichtert die stimmige Integration jeder Einzelkomponente des Powertrainsystems.

Ursprünglich hatte das Team von Monash Motorsport eine einfache ECU auf der Basis eines Mikrocontrollers gebaut. Diese konnte die vom Rennwagen benötigten Basisfunktionen erfüllen und wurde im Wettbewerb Australasia 2017 eingesetzt. Anfang 2018 erwarten die Motorsportler eine ECU vom Typ Motec M150 als Ersatz für das bestehende System. Seither können Streckendaten deutlich besser aufgezeichnet und daraus interessante Erkenntnisse abgeleitet werden.

Durch die Verwendung der Motec M150 konnten auch komplexere Optimierungen der Fahrzeugleistung vergleichsweise einfach vorgenommen werden. Ein Beispiel war die Entwicklung eines PI-Startregelalgorithmus, der die Beschleunigung des Wagens um 0,2 s verbesserte. Ein weiteres Beispiel ist die Implementierung eines Algorithmus zur Leistungsreduzierung in Abhängigkeit vom Ladezustand, der die vom Fahrer bereitgestellten Drehmomentanforderungen mit der Temperatur des Batteriepacks vergleicht und die an den Wech-

BILD 3 Enstroj Emrax 228 im M17-E-Chassis verbaut (© Monash Motorsport)

selrichter geschickten Drehmomentanforderungen dynamisch anpasst, um eine Überhitzung zu verhindern.

DIE ZUKUNFT IST ELEKTRISCH

Derzeit werden Studien zu den Möglichkeiten der künftigen Implementierung eines Wechselrichters auf der Basis von Siliziumkarbid im Rennwagen durchgeführt. Das Team, **BILD 4**, hat auch mit Untersuchungen zu kompatiblen, leichten und leistungsstarken Axialflussmotoren für Doppel- oder Vierfachantriebe im Außenboarder-Design begonnen. Außerdem beschäftigt sich Monash Motorsport nach dem Erfolg mit den Boliden aus der C- und E-Klasse derzeit auch mit der Konstruktion und Fertigung eines fahrerlosen Rennwagens. Der Projektabschluss ist für 2019 geplant.

DIESER BEITRAG IST IM E-MAGAZIN VERFÜGBAR UNTER:

www.emag.springerprofessional.de/atz

BILD 4 Das Team von Monash Motorsport (© Monash Motorsport)