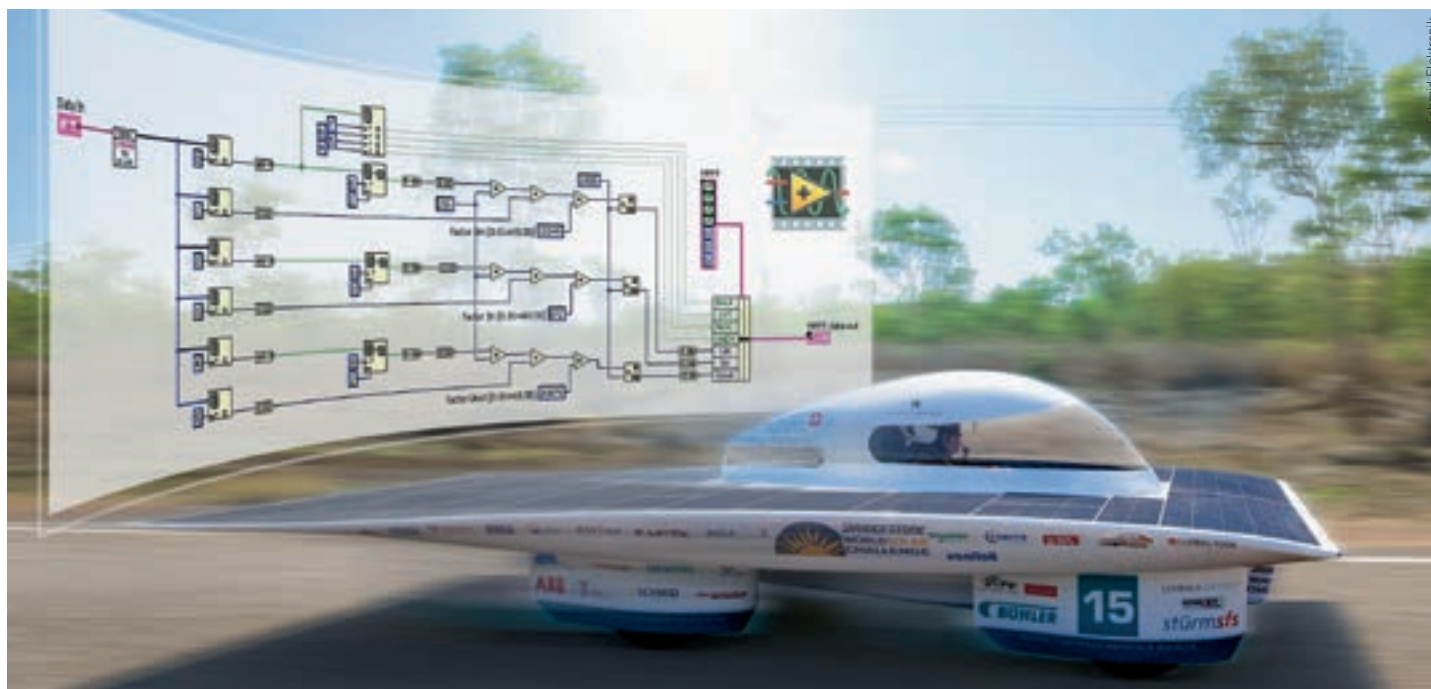


# 3000 km durchs australische Outback

Die «World Solar Challenge» in Australien ist für Solarfahrzeuge eines der härtesten Rennen der Welt. Ein Schweizer Ingenieurteam nahm zum zweiten Mal teil und klassierte sich in den Top-Five der «Challenger-Class». Damit positionieren sich die Schweizer im Bereich der Elektromobilität an vorderster Front.



Da nur Solarenergie für die Strecke von 3000 km genutzt werden durfte, mussten alle Komponenten effizient arbeiten. Die Bordelektronik inklusive Laderegler und Batterieüberwachung verbraucht knapp 5 W.

Die «World Solar Challenge» wird alle zwei Jahre auf dem öffentlichen Stuart Highway ausgetragen. Der Clou: Einzig die Sonne darf als Energiequelle genutzt werden! Die Teilnehmer demonstrieren damit den Nutzen erneuerbarer Energie. Immerhin durchqueren die Solarmobile den australischen Kontinent mit nur rund zwei Drittel der Leistung eines handelsüblichen Staubsaugers. Die «Solar Energy Racers», ein von Mitarbeitern der Firma Bühler organisiertes Rennteam, nahm 2011 zum ersten Mal teil. Heute, zwei Jahre später, trat es mit einem neuen, komplett überarbeiteten Rennmobil wieder an. Es überfuhr die Ziellinie auf dem 5. Rang – knapp hinter den vier führenden Vollzeit-Teams. Ein Spitzenresultat, das mit viel Leidenschaft, Teamwork und neuen Entwicklungsmethoden erreicht wurde.

## So funktioniert ein Solarmobil

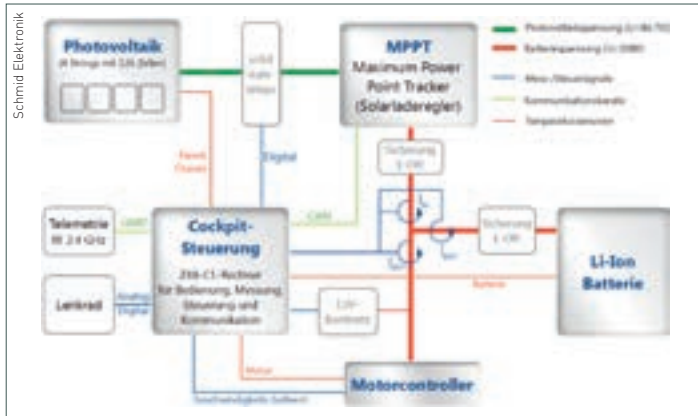
Das Herz des Fahrzeuges besteht aus drei Modulen: der Fotovoltaik, dem Solarladeregler/MPPT und der Batterie. Die Fotovoltaik-Arrays transformieren Sonnenenergie in elektrische Energie, die über Solarladeregler (Maximum Power Point Tracker, MPPT) in den Batteriekreis eingespiesen wird. An sonnigen Tagen sind es durchschnittlich 1,1 kW (108 V, 10,2 A). Dank einem effizienten Motorcontroller gelangen im Mittel 1,3 kW über das linke Hinterrad auf die Strasse. Der Differenzbetrag, in diesem Fall 200 W, wird über die anfangs vollgeladene Li-Ion-Batterie ausgeglichen. Von der Motorsteuerung nicht gebrauchte Energie fliesst in die Batterie und wird dort gespeichert. Ebenso gewinnt die Motorbremse Energie zurück (Rekuperation). Ziel der Rennstrategie ist ein opti-

maler Energiehaushalt, der über die Fahrzeuggeschwindigkeit beeinflusst wird. Alle weiteren Komponenten des Solarmobils, vom Chassis und der Karosserie über das Fahrwerk bis zur Embedded-Hardware und -Software, verfolgen dasselbe Ziel: Die gewonnene Sonnenenergie mit maximaler Wirksamkeit auf die Strasse zu bringen.

## Chassis, Karosserie, Fahrwerk

Das neue Reglement der «Challenger»-Renntklasse erforderte eine komplette Überarbeitung des Chassis, der Karosserie und des Fahrwerks. Die Rennfahrzeuge mussten neu vier anstelle von drei Rädern sowie grössere Fahrerinnen mit breiterem Sichtfeld haben. Komfort und Sicherheit des Piloten kommen damit der Praxis eines kommerziellen Elektromobils einen Schritt näher. Das Chassis und die Karosserie wurden wie

schon beim Vorgängermodell aus Carbon mit «Honeycomb»-Zwischenräumen für extremen Leichtbau bei maximaler Festigkeit konstruiert. Mit einem Leergewicht von 145 kg (225 kg mit Fahrer) hebt sich das Fahrzeug von den anderen Rennfahrzeugen klar ab. Beim Optimieren des Wirkungsgrads spielten Strömungssimulationen eine zentrale Rolle. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber anderen E-Mobilen ist der einfache Zugang zum Cockpit. Im Vergleich zum Vorgängermodell und der meisten Rennkonkurrenz kann der Pilot ohne Hilfe ein- und aussteigen. Beim Fahrwerk wurde die bisherige, übliche Dreiecksaufhängung durch eine Neukonstruktion ersetzt, die ähnlich wie das Vorderrad einer «Vespa» funktioniert. Das Ergebnis ist ein kompakteres, leichteres und vor allem zuverlässigeres Fahrwerk.



Die wesentlichen Komponenten des Rennwagens sind die Fotovoltaik, der Maximum Power Point Tracker (MPPT, Solarladeregler), die Batterie, die Motor- und die Cockpitsteuerung.

Das Rad bleibt beim Steuern und Einfedern nahezu parallel zum Fahrzeug und minimiert so Reibungsverluste. Auch auf rauer Strasse und bei Winböen blieb das Fahrzeug präzise auf Kurs und das Lenkrad ruhig.

#### Ein Cockpit wie ein Smartphone

Ähnlich der Formel 1 steuert der Pilot das Solarmobil auf dem multifunktionellen Lenkrad über Taster und Joysticks: Der «Eco/Cruise»-Modus für Durchschnittsgeschwindigkeiten zwischen 60–80 km/h wird für den grössten Teil des Rennens verwendet. Er begrenzt den Motorstrom auf 10 A, reduziert Energieverluste durch Glätten von Spitzen und benötigt so im Durchschnitt rund 16 Wh/km. Bei Überholmanövern schaltet der Pilot in den «Power»-Modus. Hier stehen 35 A und

damit Spitzengeschwindigkeiten von 100 km/h zur Verfügung. Solche «Eskapaden» verbrauchen aber 20 Wh/km und mehr. Das Bremsen erfolgt in zwei Schritten: Auf den ersten Millimetern des Bremspedals wird die Motorbremse eingesetzt. Weitere Auslenkung aktiviert die hydraulische Bremse.

#### Rechner mit niedrigem Stromverbrauch

Der grafisch programmierbare ZBrain-Messrechner Z48-C1 wurde als zentrale Steuereinheit eingesetzt. Der für Low-Power-Anwendungen ausgelegte Scheckkarten-Computer bildete das Hirn der Fahrzeugelektronik. Die Schnittstellen wurden von Schmid Elektronik auf einem Basebord entwickelt, im Rapid-Prototyping-Verfahren produziert, getestet und dem Rennteam zur Verfü-



Im Begleitfahrzeug sind alle wichtigen Betriebsdaten auf einen Blick auf dem Monitor erkennbar: die Fotovoltaik-Leistung (grün), die Batteriespannung (rot), die Motorleistung (orange) und die resultierende Fahrzeug-Geschwindigkeit (blau).

gung gestellt. Die Embedded-Anwendungssoftware wurde von RWing Solutions GmbH in der grafischen Entwicklungsumgebung Labview programmiert. Eine skalierbare Statemachine-Architektur ermöglichte jederzeit die Einbindung von neuen Ideen und Funktionen. Der objektorientierte Ansatz wiederum abstrahierte die Komplexität aller angeschlossenen Komponenten zu einfach verständlichen Modulen. Der unterlegte Multitaskingkernel führt parallel acht Tasks mit verschiedenen Laufzeiten in unterschiedlichen Intervallen und Prioritäten aus. Die grafische DSL/4GL-Programmiersprache Labview abstrahierte die Komplexität von Hardware, Software, Betriebssystem und Tools. So konnte sich der Softwareentwickler auf den Kern der Mess-/Steuer- und Bedienungsaufgabe

konzentrieren und sogar ausgefallene Ideen schnell umsetzen. Neben der Komplexität von I/O und Funktionalität spielten die Qualitätsmerkmale eine zentrale Rolle. Die Kombination von Embedded-Hard- und -Software musste «einfach funktionieren», um an der Ziellinie bei den Besten zu sein. Dabei handelt es sich u. a. um vier Merkmale: schnelle Bootzyklen, zuverlässiger Betrieb, ausfallsichere Zustandsdaten und der skalierbare Stromverbrauch.

#### Bootzeit von 1 s

Die Betriebsdaten sollten im Viersekundentakt an das Begleitfahrzeug übertragen werden. Im Fall eines Softwareabsturzes war die Vorgabe, dass der Messrechner innerhalb von 4 s wieder verfügbar ist. Hier spielte die ZBrain-Software ihr grosses Plus aus: Der NI-ANSI-

Lucerne University of Applied Sciences and Arts

**HOCHSCHULE  
LUZERN**

Technik & Architektur

## Gute Karriereaussichten

Mit einer berufsbegleitenden Weiterbildung an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Erweitern Sie Ihre Fachkenntnisse und Methodenkompetenzen – praxisnah und anwendungsorientiert zu den Themen:

- Energie & Nachhaltigkeit
- Management & Ökonomie
- Informatik & Sicherheit
- Design & Technik

Besuchen Sie die  
Info-Veranstaltungen  
am 18. Februar 2014

FH Zentralschweiz

[www.hslu.ch/wb-ta](http://www.hslu.ch/wb-ta), T +41 41 349 34 80, [wb.technik-architektur@hslu.ch](mailto:wb.technik-architektur@hslu.ch)

C-Code-Generator übersetzt das grafische Labview-Blockschaltbild inklusive Mathematik- und Signalverarbeitungs-VI's in neutralen 32-Bit-C-Code. Ein Software-Development-Kit stimmt diesen auf die unterlegte Hardware ab. Damit wurden nicht nur die Algorithmen und Bibliotheksaufrufe übersetzt, sondern die komplette Applikationslogik inklusive Multitasking und Hardwarezugriffen, welche direkt im grafischen Code implementiert waren. Der so erzeugte Applikations-C-Code wurde mit dem Quellcode eines schlanken RT-Kernels verlinkt, mit gängigen Tools (Compiler, Linker) in eine echtzeitfähige Standalone-Firmware überführt und über JTAG direkt ins Flashmemory der Zielhardware geladen. Von dort startet jetzt die Anwendung direkt ohne Betriebssystem innerhalb 1 s. Nach dem Booten geht die Embedded-Software in einen industriellen Dauerbetrieb über. Gelöst wird dies mit dem üblichen Fehlerbehandlungsschema. Im Eskalationsfall wird das System geordnet heruntergefahren und wieder gestartet (Software-Reboot). «Verhakt» sich im ungünstigsten Fall die Software komplett (Embedded-«Blue-Screen»), greift ein auf 2 Sekunden terminierter «Watchdog» ein und führt einen Kaltstart durch. In jedem Fall wird die Gesamtverfügbarkeit von 4 Sekunden eingehalten.

Bei einem ungeplanten Neustart wären alle Zustandswerte verloren gegangen, da sie sich im flüchtigen RAM befinden. Abhilfe schuf ein ausfallsicheres Filesystem auf dem schnellen, nichtflüchtigen FRAM (Ferroelectric RAM). In jedem Zyklus werden darauf die für den Betrieb benutzten Variablen abgelegt. Nach dem Booten liest die Software die Werte aus diesem Filesystem und prüft, ob sie gültig oder korrupt sind. Erst dann wird der Messbetrieb weitergeführt. Für den Pilot zeigt sich dies nur an einem leichten Flackern des Displays. Das Energiebudget legte für die Fahrzeugelektronik maximal 5 W, also 416 mA im 12-V-Board-Subnetz fest. Die Peripherie mit Solidstaterelais, Batteriemonitor, Bremsrelais und Solarladeregler konsumieren insgesamt 2,5 W. Blieben also noch rund 2,5 W für den Messrechner inklusive Baseboard-I/O und Display. Das verlangte ein dynamisches Powermanagement. Darunter fallen die Skalierung des CPU-Clocks von 50 – 500 MHz, permanentes Abschalten nicht benötigter Komponenten (z. B. Ethernet) und temporäres Ein- und Ausschalten des Temperaturmessnetzwerkes. Auch bei den Datentypen wurde Energie gespart, indem anstelle der viel praktischeren, aber rechenintensiven Fließkomma-Arithmetik die viel effizientere Fixkomma-Arithmetik gewählt wurde.

Ebenso wurde die Helligkeit des Displays über einen Lichtsensor den Verhältnissen angepasst. Dank diesen Massnahmen reduzierte sich der Energieverbrauch von Rechner und Display auf 1,9 Watt.

**Live-Rennstrategie**

Der Pilot im Cockpit hat nur begrenzte Möglichkeiten, die anfallenden Daten live zu analysieren und für die Rennstrategie eines 3000 km langen Strassenrennens Schlüsse zu ziehen. Ein zuverlässiges Telemetriesystem zwischen Solarmobil und Begleitfahrzeug spielte deshalb eine entscheidende Rolle. Während sich der Pilot auf die Strasse konzentriert, wertet das Begleitteam die Betriebsdaten aus und kombiniert sie mit meteorologischen Informationen und der Restdistanz bis zum nächsten Kontrollstopp. Die Trendkurven und Energiebilanzen wurden im Begleitfahrzeug im 4-Sekunden-Takt mit der Open-Source-Software «R» berechnet. Speziell die Leistung der Fotovoltaik und die «Gesundheit» der Batterie wurden genau überwacht. Als Ergebnis erhielt der Pilot per Funk eine neue Fahrtaktik oder eine Geschwindigkeitsanpassung.

**Verbrauchswerte des Fahrzeugs**

Bereits vor dem Rennen gewannen die Strategen aus den Leistungs- und Geschwindigkeits-

daten wichtige Erkenntnisse zum optimalen Betriebspunkt des Fahrzeugs. Der Energiebedarf liegt über einem breiten Geschwindigkeitsbereich von 60–80 km/h bei 15–16 Wh/km. Bei höheren Geschwindigkeiten nimmt der Energieverbrauch durch den zunehmenden Luftwiderstand überproportional zu.

**Kritische Batteriespannung am 5. Tag**

Die Batteriespannung zeigt nicht nur den Ladezustand, sondern ist auch ein Indikator für den Gesundheitszustand der Batterie. Bei der eingesetzten Konfiguration lag die Untergrenze bei 93 V. Gleichzeitig ist aber bereits bei Spannungen unter 98 V eine Schädigung nicht mehr ausgeschlossen. Während der «World Solar Challenge» war am fünften Renntag ab etwa 16.40 Uhr klar, dass die Batteriespannung schneller als bis anhin einzubrechen begann und plötzlich sehr starke, «ungesunde» Ausschläge nach unten auftraten. Dies führte zur Entscheidung, die Geschwindigkeit in den letzten 20 Minuten von 75 km/h auf 60 km/h zu reduzieren.

**Energiebilanz in Zahlen**

Genauere Berechnungen nach dem Rennen zeigen einen Verbrauch von 14,33 Wh/km über die Strecke von 2998 km. Ein heute übliches 1,6 t schweres Dieselfahrzeug mit einem Verbrauch von 7l/100 km hätte 2150 kWh Energie verbraucht – das 50-Fache gegenüber den 43 kWh des Solarmobils. Dass Elektromobilität sparsam, cool und schnell sein kann, zeigt der Vergleich mit dem Roadster «Tesla» Model S, der mit 220 Wh/km und einem Massenverhältnis von 10:1 nur noch 15x mehr verbraucht. ☞

Marco Schmid  
Geschäftsleitung  
Schmid Elektronik AG

Georg Russ  
Solar Energy Racers Strategy

Roland Widmer  
RWing Solutions GmbH

**Ferroelectric RAM**

Task	Funktion	Intervall [ms]	Prio	Laufzeit [ms]
Pilot	Lesen der Bedienelemente für Motorsteuerung und Signalisierung, Sollwert-Vorgabe an Motorcontroller	100	1	8
Cockpit	Anzeigen und Update des TFT's sowie Touchbedienung	200	1	50
DAQ	Lesen aller Analogeingänge, Datensatz in Ringpuffer speichern	200	1	10
MPPT	CAN-Kommunikation zu Solarladeregler	200	2	6
Telemetry	Drahtlose Kommunikation zum Begleitfahrzeug → Auslesen der Daten aus dem Ringpuffer und Senden über die 2.4-GHz-RF-Schnittstelle	200	2	20
Savedata	Abspeichern des aktuellen Datensatzes aus dem Ringpuffer in ein CSV-File auf der SD-Karte.	200	2	60
Blink	Steuern des Blinkers und Indikator im Cockpit	500	3	2
Temperatur	Einlesen aller Temperaturmesswerte über das 1-Wire-Netzwerk	1000	3	20