

Case Study

Präzise Leistungs-
analysen steigern
die Reichweite und
Geschwindigkeit von
Solar-Rennwagen



©Martina Katselar

Solar Team Twente

Die ultimative Herausforderung für rein solarbetriebene Rennwagen ist die zweijährliche Bridgestone World Solar Challenge. In dieser treten Teams aus Ingenieuren und Rennfahrern auf einer 3.000 km langen Strecke von Darwin im Norden von Australien nach Adelaide im Süden mit dem gleichen Ziel gegeneinander an: Die Strecke in der schnellstmöglichen Zeit zu fahren, in speziell dafür entwickelten Autos, die nur eine Energiequelle besitzen – das Sonnenlicht.

Das Grunddesign der Autos der verschiedenen Teams im Rennen ist dabei gleich: Alle besitzen aerodynamische Flügelformen, die mit Platten aus Photovoltaik-Modulen bedeckt sind. Der damit durch das Sonnenlicht erzeugte elektrische Strom wird anschließend direkt dem Antriebsmotor der Räder zugeführt. Überschüssige Energie, die der Motor nicht direkt verbraucht, wird in einer kleinen Batterie zwischengespeichert.

Dabei werden von den Teams die höchsten Platzierungen erzielt, welchen es gelingt die verschiedenen Elemente, wie das Fahrzeugdesign, die Aerodynamik, das Stromerzeugungssystem, den Motor und auch das Traktionssystem, bestmöglich zu optimieren.

Auch die Strategie spielt eine wichtige Rolle, denn der Fahrer sollte im Idealfall so schnell wie möglich, jedoch nicht so schnell fahren, dass die Batterie vollständig entladen wird, sobald er sich nicht mehr im direkten Sonnenlicht befindet.

Eines der erfahrensten Teams, welches 2019 am Rennen teilgenommen hat, war das Solar Team Twente. Gleich mit der ersten Teilnahme am Rennen im Jahre 2005 erreichte das Team mit dem Rennwagen „SolUltra“ den 9. Platz und war damit der bestplatzierte Neuzugang. Seitdem hat Solar Team Twente an jeder World Solar Challenge teilgenommen und fuhr 2019 mit dem „RED E“ sein bisher technologisch fortschrittlichstes Fahrzeug.

Die technischen Errungenschaften vom Solar Team Twente sind angesichts der Tatsache, dass das Team nicht vom Know-how und den Ressourcen eines etablierten Fertigungsunternehmens profitiert, beeindruckend: Tatsächlich führen und betreiben es 19 Studenten. Dieses junge Team aus Aerodynamikern, Elektroingenieuren, Maschinenbau-Studenten sowie Statikern stammt von der University of Twente und der Saxion University of Applied Sciences in den Niederlanden.

Eine der wichtigsten technischen Herausforderungen für das Rennen besteht darin, die Effizienz des Motors und des Batteriemanagement-Systems zu optimieren. Hierbei profitiert das Solar Team Twente von den Messungen mit einem WT5000 Präzisions-Leistungsanalysator, welcher den Studenten von Yokogawa gestiftet wurde. Im nachfolgenden Beitrag wird berichtet, wie präzise Leistungsmessungen die „RED E“-Designer und das Team dabei unterstützt haben, in der Bridgestone World Solar Challenge seine bisher höchste Durchschnittsgeschwindigkeit zur erreichen.



Die Herausforderung

Hintergrund

Um die World Solar Challenge zu gewinnen, muss ein Rennauto so viel Solarenergie wie möglich produzieren und die erzeugte Energie mit maximaler Effizienz in mechanische Leistung umwandeln bzw. über die Räder auf die Straße bringen. Im gleichen Zuge müssen aber auch Energieverluste auf ein Minimum reduziert werden: So achten Rennteams minutiös auf das aerodynamische Design, um den Luftwiderstand auf ein Minimum zu reduzieren. Im Fall von „RED E“ entspricht beispielsweise der gesamte Luftwiderstand des Rennwagens dem des Außenspiegels eines herkömmlichen Autos.

Auch die Entwickler der Technik im Rennwagen streben nach höchsten Wirkungsgraden von mehr als 99 % in den verschiedenen elektrischen Systemen. Dabei sind vor allem folgende vier Komponenten des Solar-Rennwagens von Bedeutung:

- Die Solarpanele und deren Anordnung
- Die Batterie und das Batteriemanagementsystem
- Der Wechselrichter, welcher den durch die Solarpanele erzeugten Gleichstrom in einen dreiphasigen Wechselstrom für den Motor umwandelt
- Der Motor selbst

Aus diesem Grund verwendet das Solar Team Twente bereits seit 2013 selbstentwickelte Motoren und übertrifft damit die Effizienz von Standardmotoren. Um sich für die Solar World Challenge 2019 einen weiteren Vorteil zu verschaffen, entschied sich das Team außerdem dazu, weg von den kommerziellen Umrichtern, welche nach wie vor überwiegend von der Konkurrenz genutzt werden, hin zu einem von Grund auf selbst entwickelten, robusteren und deutlich effizienteren Umrichter für ihren Rennwagen.

Ein weiterer Punkt der Rennstrategie des Teams erforderte eine höchst präzise Regulierung des Ladezustands der Batterie. Denn letztendlich ist das Ziel von jedem Team, den Gesamtenergieverbrauch des Rennwagens so einzustellen, dass die höchstmögliche Geschwindigkeit über die größte

Distanz gefahren werden kann und die Batterie erst am Ende des Rennens einen Batteriestand von null anzeigt.

Je präziser also der Ladezustand der Batterie gemessen werden kann, desto besser kann auch die maximal mögliche Geschwindigkeit in der Geschwindigkeitsregelungsanlage in Abhängigkeit der Wetterlage, der Batteriekapazität, sowie der Leistung der anderen Wettbewerber und noch anderen Faktoren, eingestellt werden.

Die Herausforderung

Dazu musste das Entwicklungsteam von „RED E“ wiederholt Leistungsanalysen (gleichzeitige Spannungs- und Strommessungen) durchführen, um den Wirkungsgrad des selbst entwickelten Motors unter verschiedenen Betriebsbedingungen zu ermitteln. Der Entwicklungsprozess selbst umfasste dabei mehrere Durchläufe, bei welchem jedes Mal die Veränderungen des Systemdesigns im Hinblick auf die Effizienz neu bewertet wurde. Ziel war es, mindestens den Wirkungsgrad des zuvor verwendeten serienmäßigen Motorsystems, welchen auch viele andere Teams noch aktiv einsetzen und welcher bereits eine hohe Effizienz aufweist, zu erreichen.

So erzählt der Elektroingenieur Rob Kräwinkel: „Wir waren auf der Suche nach einer Möglichkeit, den Wirkungsgrad um 1 % zu verbessern und uns damit einen Vorteil gegenüber den anderen Rennwagen zu verschaffen. Wenn man allerdings bereits eine Systemeffizienz von mehr als 95 % erreicht hat, ist es sehr schwierig, diese weiter zu verbessern und noch bestehende Verluste zu eliminieren. Dazu muss man in der Lage sein, sich im Detail auch kleinste Spannungs- und Stromschwankungen anzusehen und dafür wird ein wirklich präziser und hochauflösender Leistungsanalysator benötigt.“

Die gleiche Anforderung an die Messgenauigkeit gilt auch für das Batteriemanagementsystem: Bereits Zehntel von einem Prozentpunkt an zusätzlicher Genauigkeit bei der Messung des Ladezustands können darüber entscheiden, ob man im Rennen gewinnt oder verliert.



©Martina Keitel

“Eine der wichtigsten technischen Herausforderungen bestand darin, die Effizienz der Motor- und Batteriemangement-Systeme zu optimieren.”

Die Lösung

Anwendungsanforderung

Folgende zwei Hauptanwendungen wollte das Solar Team Twente mit dem Präzisions-Leistungsanalysator lösen:

- Das Leistungsmessgerät sollte die Genauigkeit der verbauten "Kraftstoffanzeige" (ein Bordsensor) validieren, mit welcher fortlaufend der Ladezustand der Batterie gemessen wird. Die Aufgabe des Bordsensors ist es dabei, die Stromflüsse in die Batterie (von den Solarpanelen) und aus der Batterie (zum Umrichter/Motor) zu messen. Durch Subtraktion der ausgehenden Stromflüsse von den eingehenden kann die Restladung in der Batterie berechnet werden. Um den Gesamtenergieverbrauch des Rennwagens bestmöglich einzustellen, müssen die verschiedenen Stromflüsse daher extrem genau und kontinuierlich gemessen werden.
- Eine weitere Hauptanforderung an den Leistungsanalysator bestand darin, die Systemeffizienz in jedem Entwicklungsschritt hochpräzise zu ermitteln. Dazu war die Messung der Ausgangsleistung an das Motorsystem, bestehend aus Wechselrichter und Motor, und der Eingangsleistung aus den Solarpanelen nötig. Über die Division von Ausgangsleistung durch Eingangsleistung sollte der Wirkungsgrad für jede Änderung am Rennwagen ermittelt und aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen die Konstruktion anschließend schrittweise angepasst und verbessert werden. Nur durch eine extrem genaue Leistungsanalyse mit hoher Abtastfrequenz ließen sich die bereits sehr effizient arbeitenden Systeme weiter optimieren.

Messlösung

Um die für das Systemdesign des Rennwagens und die Validierung der verbauten Komponenten erforderliche Genauigkeit und Präzision zu erreichen, entschied sich das „RED E“-Team für den WT5000 Präzisions-Leistungsanalysator von Yokogawa – und damit für den genauesten Präzisions-

Leistungsanalysator der Welt. Der WT5000 ermöglicht Messungen mit einer garantierten Basisgenauigkeit von $\pm 0,03\%$. Spannungen können bis Frequenzen von 10 MHz und Ströme bis 5 MHz gemessen werden. Die Wirkleistungsbandbreite ist außerdem im Handbuch mit garantierter Genauigkeit bis 1 MHz spezifiziert.

Mit der maximalen Abtastrate von 10 MS/s der 18-bit A/D-Konverter lieferte der WT5000 Präzisions-Leistungsanalysator dem Solar Team Twente sogar eine höhere Abtastrate zur Validierung des Bordsensors als benötigt. Sowohl numerische als auch grafische Messergebnisse von bis zu 7 elektrischen Leistungen und vier Drehmoment-/Drehzahlensignalen lassen sich dabei gleichzeitig vom WT5000 übersichtlich auf einem 10,1 Zoll-Touchscreen darstellen oder auf einen Computer übertragen.

Bereits bei der ersten Testmessung mit dem WT5000 durch die Elektrotechniker, erzählt Rob Kräwinkel vom Solar Team Twente, stellten sie fest, dass die verwendeten Stromsensoren zur Messung des erzeugten Eingangsstroms der Solarpaneele einen zuvor unentdeckten Offset verursachen. Aufgrund dessen war die Ladezustandsmessung der Batterie von vorneherein ungenau.

„Die bisher genutzte Sensorik zum Erfassen der Eingangsströme wies bereits eine Genauigkeit von mehr als 99 % auf – aber wir wollten eine noch höhere Genauigkeit erzielen. Erst durch die Analyse des Stromwandlers mit dem WT5000 Präzisions-Leistungsanalysator waren wir in der Lage, den vom Wandler verursachten Offset zu kompensieren und die Ausgabe der Messergebnisse so anzupassen, dass eine höchstmögliche Genauigkeit erreicht wird.“

Mit dem dadurch gewonnenen Extra an Vertrauen an die jetzt hochpräzise Ladezustandsmessung wurde dem Fahrer eine wichtige zusätzliche Reichweite von 1 - 2 km bei gleichbleibender Geschwindigkeit verschafft. Ohne diese Optimierung und Validierung hätten wir uns nicht sicher sein können, ob diese zusätzlichen Kilometer möglich sind“, sagt Kräwinkel.



©Leirone Wassenaar



©Martina Keijer

Ergebnisse

Optimierter Batterie- und Motorantrieb sorgt für hervorragende Rennleistung

Der ultimative Test für die technischen Entwicklungsarbeiten von Rob Kräwinkel und seinem Team fand während der Teilnahme mit dem Rennwagen „RED E“ im Oktober 2019 an der World Solar Challenge statt. Im Rennen würde sich zeigen, ob das Solar Team Twente im Vergleich zur Konkurrenz ein noch effizienteres Motorsystem entwickelt hatte und ob die „Kraftstoffanzeige“ bzw. der Bordsensor wirklich so genaue Messdaten liefert, wie das Team glaubte.

Bereits nach mehr als der Hälfte des Rennens lag „RED E“ mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 89,7 km/h an der Spitze und war auf dem Weg zum Sieg, als Mutter Natur eingriff. Der Rennwagen wurde irreparabel beschädigt, als eine sehr starke Seitenwindböe das Auto von der Straße und einen Hang hinunterdrückte, wo es sich letztendlich überschlug.

Das Rennen im Jahre 2019 wurde daher vom Team Agoria aus Belgien mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 86,6 km/h gewonnen. Ohne den Unfall, und vorausgesetzt, dass „RED E“ seine überragende Leistung beibehalten hätte, wäre nicht nur der Wagen der Sieger des Rennens geworden, sondern das Team hätte auch eine Steigerung der Durchschnittsgeschwindigkeit von annähernd 19 % im Vergleich zur World Solar Challenge 2017 erreicht. Auch wenn diese enorme Steigerung vor dem Unfall von „RED E“ teilweise auf das bessere Wetter in 2019 zurückzuführen ist, waren auch die technischen Entwicklungen des Autos für eine wesentliche Leistungsverbesserung verantwortlich.

WT5000 Präzisions-Leistungsanalysator

Der WT5000 Präzisions-Leistungsanalysator kombiniert die weltweit höchste Messgenauigkeit mit Langzeitstabilität, Störfestigkeit und Flexibilität in einer modularen Bauform und bietet dem Anwender damit eine erweiterbare Messplattform für hochgenaue Leistungsanalysen. Die hohe Leistungsmessgenauigkeit kann im eigenen Kalibrierlabor in der Yokogawa Europazentrale in Amersfoort durch eine ISO 17025-Kalibrierung oder auch in jedem anderen Kalibrierlabor nachgewiesen werden.

Für die Messung selbst stehen Eingänge zum gleichzeitigen Messen von bis zu 7 Leistungen und 4 Drehmoment-/Drehzahlensignalen zur Verfügung. Die numerischen und grafischen Messergebnisse können am WT5000 übersichtlich auf dem 10,1“ großen Touchscreen dargestellt und die Anzeige entsprechend der individuellen Bedürfnisse des Anwenders eingestellt werden.

Zudem bietet der WT5000 Präzisions-Leistungsanalysator erweiterte Filtertechnik, wie:

- Synchronisationsfilter
- Erweiterter Frequenzfilter
- Digitale Parallelpfad-Filter

Der WT5000 ermöglicht durch die flache Menüstruktur sowohl über den Touchscreen, die Tasten an der Gerätefront, als auch über eine angeschlossene Tastatur und Maus eine intuitive Bedienung des Gerätes. Dies bestätigt auch Rob Kräwinkel: „Der WT5000 lässt sich sehr gut bedienen. Er ist intuitiv und man findet sich schnell in den Einstellungen zurecht. Auch die Anzeige des Bildschirms lässt sich einfach und individuell anpassen, sodass genau die Messparameter angezeigt werden, an denen man interessiert ist. Beispielsweise hatten wir die Ansicht so konfiguriert, dass der signifikant bessere Wirkungsgrad unseres Wechselrichters im Vergleich zum Standardumrichter klar erkennbar war.“

Weitere Informationen zum WT5000 Präzisions-Leistungsanalysator finden Sie unter: tmi.yokogawa.com/de



© Jerome Wassenari



Yokogawa Test- & Messtechnik

Yokogawa entwickelt seit 100 Jahren Messlösungen und stellt den Forschungs- und Entwicklungsteams seit dieser Zeit stets geeignete Werkzeuge für ihre Test- und Mess-Herausforderungen zur Verfügung. Das Unternehmen gehört zu den Pionieren im Bereich der genauen Leistungsmessung und ist heute Marktführer bei digitalen Leistungsanalysatoren.

Die Messgeräte von Yokogawa sind bekannt für eine hohe Präzision und eine sehr lange produktive Nutzungsdauer, die weit über die vergleichbarer Geräte hinausgeht. Nach Ansicht von Yokogawa sind präzise und effektive Messungen eine wichtige Voraussetzung für erfolgreiche Innovationen.

Das Unternehmen konzentriert daher seine Forschung und Entwicklung auf die Bereitstellung von Werkzeugen, mit denen die Forscher und Ingenieure große und kleine Herausforderungen meistern können.

Yokogawa ist stolz auf seinen Ruf für höchste Qualität, sowohl bei den Produkten als auch bei Kundenservice und Beratung. Oft werden neue Funktionen aufgrund spezieller Kundenanforderungen hinzugefügt, wodurch sich Messstrategien selbst für anspruchsvollste Aufgaben realisieren lassen.

Da das Unternehmen an seinem europäischen Hauptsitz in den Niederlanden ein eigenes nach ISO 17025 akkreditiertes Kalibrierlabor mit entsprechenden Standards unterhält, kann Yokogawa eine garantierte Genauigkeit und Präzision für seine Instrumente auf höchstem Niveau gewährleisten. Dieses Labor kann weltweit als einzige industrielle Einrichtung (d.h. nicht-staatliche oder nationale), eine akkreditierte, rückführbare Leistungskalibrierung von Leistungsmessgeräten für Frequenzen bis zu 100 kHz anbieten. Die ISO17025 Akkreditierung zeigt die herausragende, internationale Kompetenz des Labors.



YOKOGAWA 

Yokogawa Deutschland GmbH

Test- und Messtechnik

Niederlassung Herrsching, Gewerbestr. 17, D-82211 Herrsching, tmi.yokogawa.com/de

Tel. +49 8152 9310-0, E-mail: info.herrsching@de.yokogawa.com

