



Oktober 2017

# Nr. 46

## Test & Messtechnik

# Magazin

[tmi.yokogawa.com/de](http://tmi.yokogawa.com/de)

### Reportage

Optik-Würfel

Cube Optics – Seite 4

Kennfeld-Optimierung

KA-Racing-Team – Seite 12

### Hintergrund

ScopeCorder DL350 – Seite 7

Leistungsanalysator versus

DAQ-Messsystem – Seite 8

# Editorial

# Kunden- zufriedenheit

## Impressum

Das Test & Messtechnik Magazin  
erscheint vierteljährlich.  
Ausgabe 46: Oktober 2017

### Herausgeber:

Yokogawa Deutschland GmbH  
Niederlassung Herrsching  
Gewerbstraße 17  
82211 Herrsching  
Telefon 08152 9310-0  
Telefax 08152 9310-60  
info.herrsching@de.yokogawa.com  
<http://tmi.yokogawa.com/de>

### Verantwortlich für den Inhalt:

Johann Mathä  
Marketing Manager  
[Johann.Mathae@de.yokogawa.com](mailto:Johann.Mathae@de.yokogawa.com)

### Redaktion: Herbert Hönle

[hh@all-about-test.de](mailto:hh@all-about-test.de)

**Titelbild:** Formel-Rennwagen KIT 17E  
des KA-Racing-Team  
(siehe Bericht Seite 12)

© Foto: Amadeus Bramsiepe  
[www.amadeus-bramsiepe.photo](http://www.amadeus-bramsiepe.photo)

### KIT 17E Fahrzeugtyp:

Monoposto in Singlechassis-  
Monocoque Bauweise, Allradantrieb,  
Leistung: 80 kW nach Reglement.

© 2017

Yokogawa Deutschland GmbH

Printed in Germany

## Events

### PTB Seminar Leistungsmesstechnik

18. Januar 2018  
Braunschweig

### Praxis-Workshop Leistungsmessung

29. Januar bis 02. Februar 2018  
Herrsching

### Power Meter Seminar Hochschule Nürnberg

01. März 2018  
Nürnberg

Weitere Details unter:

<http://tmi.yokogawa.com/de>  
unter ÜBER ► EVENTS

3 Die Kundenzufriedenheit lässt sich als Differenz zwischen den Erwartungen und der Erfüllung der Erwartungen der Kunden darstellen. Werden die Erwartungen mehr als erfüllt, ist der Kunde zufrieden. Die Kundenzufriedenheit wird als eine wichtige Voraussetzung für langfristige und für beide Seiten profitable Kundenbeziehungen betrachtet. Soweit die Theorie.

Die Erwartungen der Kunden sind allerdings vielfältig und beziehen sich nicht nur allein auf das gekaufte Produkt und dessen Funktionalität. Vielmehr beginnt dies bereits bei einer kompetenten Beratung vor dem Kauf und geht bis hin zu einer langjährigen Unterstützung beim Einsatz, umfasst ebenso die Reparatur und Kalibrierung der Messtechnik.

Für Yokogawa hat die Kundenzufriedenheit einen sehr hohen Stellenwert, sie ist Teil der Unternehmensphilosophie und wird als eine entscheidende Grundlage für den Unternehmenserfolg angesehen. Dementsprechend setzt Yokogawa auf eine hohe Produktqualität und eine langfristige Zusammenarbeit mit seinen Kunden. Außerdem führen wir monatlich, telefonisch Kundenzufriedenheitsbefragungen durch, werten diese langjährig, statistisch aus und korrigieren bei Bedarf unsere Prozesse.

Im Vertrieb erleben wir es immer wieder, dass Kunden ganz begeistert sind, wenn sie für Geräte, die teilweise mehr als 15 Jahre alt sind, noch Unterstützung erhalten. Obwohl diese Messgeräte seit langem abgekündigt sind, können diese trotzdem oft noch repariert werden. Ermöglicht wird dies durch sehr erfahrene Service-Mitarbeiter, einem umfangreichen Ersatzteillager mit weitsichtiger Bevorratung, aber auch durch Beschaffung von seltenen Ersatzteilen.

Die Produkte von Yokogawa haben den Ruf, extrem langlebig und zuverlässig sein. Gerade dies ist in den Zeiten von kurzen Produktzyklen und immer neuen Technologien für unsere Kunden entscheidend. Sie müssen sich auf die Messtechnik verlassen können und Vertrauen in unsere Technik und unser Unternehmen haben. Unsere Kunden wissen, dass wir nicht nur regelmäßig das Gespräch suchen, um die künftigen Anforderungen unserer Kunden zu erfahren. Auch unsere Entwicklungsleiter aus Japan kommen regelmäßig, um

Kundenanforderungen direkt aufzunehmen und in aktuelle Produktentwicklungen einfließen lassen. Ebenso unterstützen wir Sie dabei, vorhandene Geräte in moderne Messhardware einzubinden, so dass auch ältere Messtechnik weiterhin genutzt werden kann.

All dies ist in der heutigen Zeit leider nicht mehr selbstverständlich, gehört für uns aber zum Kundenservice. Schließlich kann man sich keine bessere Kundenbindung vorstellen als zufriedene Kunden. Und daran arbeiten wir – täglich.

## Ihr Michael Müller-Wachter

Vertrieb – Büro Hanau  
Yokogawa Deutschland GmbH  
Niederlassung Herrsching



# Produktion von optischen Wellenlängen-Multiplexern Optik-Würfel

Cube Optics AG  
Mainz/Deutschland  
[www.cubeoptics.com](http://www.cubeoptics.com)

**Cube Optics entwickelt, fertigt und vertreibt miniaturisierte faseroptische Komponenten für den Einsatz in der Tele- und Datenkommunikation. Die Produkte basieren auf einem proprietären mechanischen Aufbau, der höchste Präzision gewährleistet.**

---

Das Unternehmen wurde im Jahr 2000 von Dr. Thomas Paatzsch und Ingo Smaglinski gegründet, die beide zuvor am Institut für Mikrotechnik Mainz (IMM) gearbeitet haben. Dort wurde unter anderem ein Verfahren entwickelt, mit der sich kleinste Strukturen kostengünstig im Spritzguss fertigen lassen. Etwa zur gleichen Zeit kam die WDM-Technologie (Wavelength Division Multiplexing – Wellenlängen-Multiplex) auf, mit der sich die Datenkapazität von Glasfasern mittels gleichzeitiger Übertragung mehrerer Kanäle deutlich erhöhen lässt. So entstand die Idee, die Spritzgusstechnik für die Herstellung optischer Komponenten zu nutzen, zuerst für Wellenleiter und etwas später für Wellenlängen-Multiplexer.

Das erste Produkt kam 2002 auf den Markt und war durch seine geringe Größe und hohe Leistungsfähigkeit einzigartig. Die anfangs rein passiven Multiplexer wurden stetig weiterentwickelt und auch mit Elektronik, wie Vorverstärkern und Transimpedanz-Verstärkern (TIA), erweitert. Außerdem kamen neue Produktgruppen und kundenspezifische Lösungen hinzu, wie Transceiver-Module sowie Spektrometer für die Mineralölindustrie. Mittlerweile beschäftigt Cube Optics rund 200 Mitarbeiter und beliefert viele namhafte Router-Hersteller. Im Jahr 2014 wurde das Unternehmen von dem Schweizer Konzern Huber+Suhner übernommen.

## Hauptanwendung 100 Gbit/s Transceiver

Wichtigstes Produkt von Cube Optics sind WDM-Multiplexer/Demultiplexer für den Einsatz in 100 Gbit/s Transceivern. Diese können mehrere Datenströme über eine Glasfaserleitung transportieren und werden von Netz- und Rechenzentrumsbetreibern in großen Stückzahlen eingesetzt. Derzeit ist der Standard 4 x 25 Gbit/s verbreitet, der eine Gesamtdatenrate von 100 Gbit/s ermöglicht. Der WDM-DeMux führt vier einzelne 25 Gbit/s Signale mit unterschiedlichen Wellenlängen

5 auf einer Glasfaser zusammen und trennt diese am Ende der Übertragungsstrecke wieder in diese einzelnen Signale auf. Die Multiplexer sind mittlerweile auch mit integrierter Elektronik erhältlich und stellen anstatt optischer, gleich elektrische Signale am Ausgang zur Verfügung. Standardmäßig enthalten die Produkte einen Ein- bzw. Ausgang und vier Aus- bzw. Eingänge. Außerdem sind kundenspezifische Lösungen mit bis zu neun Ein-/Ausgängen verfügbar. Rein passive Bauteile können in beide Richtungen, also als Multiplexer oder als Demultiplexer, eingesetzt werden.

**Aufbau eines WDM-DeMux**

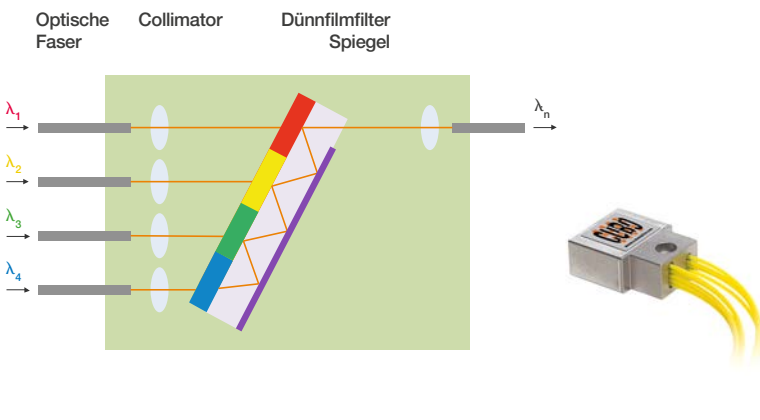
Der WDM-Multiplexer-Demultiplexer enthält vier Dünnschichtfilter (bei 4 Kanälen), die als Spiegel ausgeführt sind und nur einen Wellenlängenbereich durchlassen. Die Filter haben die Form von Würfeln mit einer Kantenlänge von 1 mm und verfügen über entsprechende Beschichtungen für die jeweiligen Wellenlängen. Der in den WDM-DeMux eingehende Lichtstrahl durchläuft zuerst einen Kollimator und wird dann mehrfach zwischen den Filterwürfeln reflektiert, wobei jeder Würfel den jeweils passenden Wellenlängenanteil durchlässt und auf eine Faser auskoppelt. Um die Verluste möglichst gering zu halten, sind die optischen Elemente sehr genau auszurichten.

**„Der Freistrahling-Eingang ist ein entscheidender Vorteil des OSAs von Yokogawa.“**

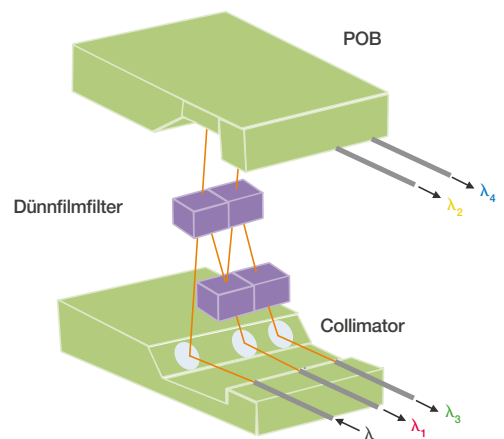
Dies wird durch einen speziellen, patentierten Aufbau erreicht. Die Filterwürfel werden auf einen Filterträger aus Metall aufgeklebt und dieser in eine Polymer Optical Bench (POB) eingesetzt. Die mechanische Haltestruktur der POB sorgt für eine präzise Ausrichtung der enthaltenen Optikbauteile bereits bei der Montage, so dass nur noch geringfügige Korrekturen erforderlich sind. Trotz der hohen Präzision, kann die POB mit einem Standard-Spritzgussverfahren hergestellt werden. Das Know-how liegt vor allem in dem patentierten Spritzguss-

Werkzeug, das die notwendige Sub-Mikrometerpräzision ermöglicht. Insgesamt gewährleistet dieser Aufbau nicht nur eine kostengünstige Fertigung, sondern ebenso eine sehr kleine Baugröße und eine zuverlässige Funktion über einen weiten Temperaturbereich von -40°C bis +85°C.

„Die Spritzguss-Maschine ist eine Standardmaschine mit guter Sensorik-Ausstattung, die genauso Joghurt-Becher herstellen könnte. Bei dieser Anlage haben wir die Fertigungskapazität lange nicht ausgelastet, inzwischen verfügen wir aber auch aus Redundanzgründen über eine zweite Maschine“, sagt Dr. Martin Popp, Leiter der Qualitätssicherung bei Cube Optics. „Die Spritzguss-Komponenten stellen wir nur in Mainz her und liefern diese dann an unseren Fertigungsdienst- >>>



Aufbau und Funktionsweise eines vierkanaligen WDM-Multiplexers.

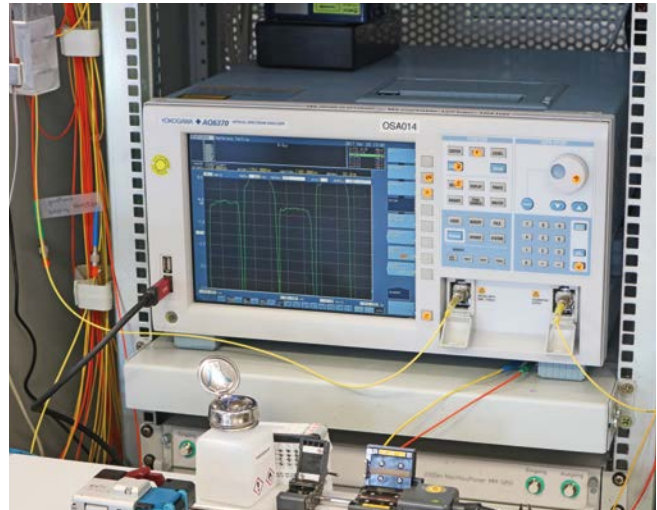


Die Polymer Optical Bench (POB) ist ein Kunststoffteil (grün), das die einzelnen optischen Komponenten fixiert und bereits beim Zusammenbau sehr genau ausrichtet.





Die Justierung der optischen Komponenten erfolgt unter dem Mikroskop.



Wichtiges Hilfsmittel bei der genauen Ausrichtung der Filter ist der optische Spektralanalysator von Yokogawa.

>>> leister in China. Dort wird der Großteil der Produkte hergestellt, während wir hier vorwiegend Prototypen und kundenspezifische Lösungen produzieren.“

### Fertigung

Beim Zusammenbau des WDM-DeMux werden die einzelnen Komponenten in die POB eingelegt und die Filter und Fasern genau aufeinander ausgerichtet. Hierzu wird das Signal einer Weisslichtquelle eingekoppelt und beobachtet, wie sich die Pegel und Kurvenform der Kanäle verhalten. Nach diesem Alignment-Prozess wird alles verklebt und anschließend in ein Metallgehäuse eingebaut. „Für die Justierung verwenden wir den optischen Spektralanalysator (OSA) AQ6370 von Yokogawa. Die Grobjustierung erfolgt mittels Pegelmessung, da diese sehr schnell ist. Die nachfolgende Feinjustierung machen wir dann mit dem OSA“, sagt Axel Bernau, Projektleiter Software-Entwicklung bei Cube Optics. „Wir haben schon Alternativen ausprobiert, aber diese Lösung war bisher stets besser. Die vorgefertigten Formteile werden durch zwei 6-Achs-Versteller gehalten und ausgerichtet. Der Fertigungsmitarbeiter geht dabei nach einem speziellen Optimierungs-Algorithmus vor und fixiert das Ganze dann mit einem UV-aushärtenden Kleber.“

Der mechanische Aufbau ist immer gleich und von der Kanalzahl unabhängig. Pro Seite lassen sich fünf Elemente unterbringen, eines davon für den Eingangsstrahl. Damit sind maximal 9 Kanäle plus Eingang möglich, es wird jeweils nur die benötigte Anzahl bestückt. Die eine Hälfte der Filterwürfel liegt oben und die andere Hälfte unten, so dass der Strahl im Zickzack durchläuft.

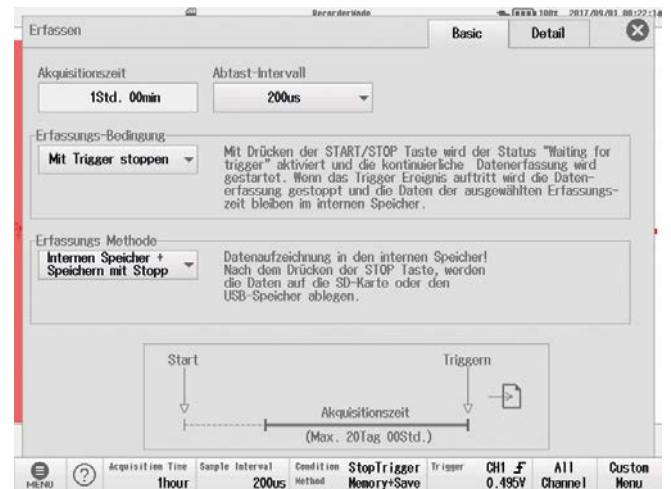
Den ersten OSA hat Cube Optics im Jahr 2001 angeschafft, damals noch von der Firma Ando. 2004 wurde Ando von Yokogawa übernommen. Heute sind im Unternehmen mehr als 30 OSAs von Yokogawa im Einsatz, beispielsweise beim Stresstest mit Temperaturzyklus und in der Endprüfung. „Ein entscheidender Vorteil der Yokogawa-Geräte ist der Freistrahleingang. Damit lassen sich nicht nur Singlemode-, sondern auch Multimode-Anwendungen bis zu einem Kerndurchmesser von 0,8 mm messen. Solche Multimode-Fasern nutzen wir bei den Spektrometer-Produkten. Dies ist zwar ein Nischenmarkt, aber wir können somit alles mit einem Messgerät abdecken“, meint Martin Popp.

Von: Anna Krone, Produktspezialistin  
ScopeCorder und Oszilloskope

7



ScopeCorder DL350 mit Touchscreen.



Einstell-Fenster mit den Funktionen „Stop on Trigger [Mit Trigger stoppen]“ und „Memory + Save on Stop [Interner Speicher + Speichern mit Stopp]“.

## Neue Funktion im Rekorder-Modus des ScopeCorders DL350 Dem Pre-Trigger aus dem Weg gehen

**Im letzten Heft haben wir die neue Modell-Variante der ScopeCorder Familie, den portablen DL350 mit Akku vorgestellt. Dieser bietet Vorteile, wenn es um längere Messzeiten in Verbindung mit einem Trigger-Ereignis geht.**

Beim Start des DL350 stehen zwei Messmodi zur Auswahl: Scope-Modus und Rekorder-Modus. Beide Modi sind für die jeweilige Bedien-Philosophie des jeweiligen Gerätes zugeschnitten und ermöglichen so dem Anwender den idealen Messeinstieg.

Im Rekorder-Modus bietet die Funktion „Stop on Trigger [Mit Trigger stoppen]“ eine lange Erfassungszeit ohne Totzeit des Pre-Trigger Bereiches, wie es bei einem reinen Oszilloskop der Fall ist. Wird in einem Oszilloskop die Trigger-Position auf 100 % gesetzt, benötigt es auch 100 % der eingestellten Messdauer, um für eine Triggerung „scharf“ gestellt zu sein. Erst danach ist das Oszilloskop bereit, einen möglichen Trigger-Fall zu erfassen. Läge die Messdauer nun bei einer Stunde, würde das Scope eine Stunde benötigen, um aktiv für einen Trigger zu sein und diesen erfassen zu können.

Mit der Funktion „Stop on Trigger“ im Rekorder-Modus ist die Trigger-Erkennung sofort mit Drücken der „START“ Taste, und somit mit Beginn der Messung aktiv. Bei der Konfiguration der Messaufzeichnung wählt man die gewünschte Aufnahmedauer, in diesem Beispiel eine Stunde, die der DL350 aufzeichnen soll. Nach Auftreten des definierten Trigger-Ereignisses wird die Erfassung automatisch gestoppt und die Daten im internen Speicher abgelegt.

Tritt nun der Trigger vor Ablauf der eingestellten Messdauer auf, dann werden die Daten bis zu dieser Zeit abgelegt. Und genau das ist der Vorteil gegenüber dem reinen Scope, denn in diesem Fall wäre das Scope noch nicht „scharf“. Aber auch im anderen Fall, wenn der DL350 mehrere Stunden aktiv ist und erst dann ein Trigger-Ereignis eintritt, werden alle Daten der letzten Stunde bzw. von der eingestellten Messdauer im internen Speicher abgelegt. In Kombination mit der Funktion „Memory + Save on Stop [Interner Speicher + Speichern mit Stopp]“, speichert das Gerät die Messdaten auch direkt nach dem Stoppen der Messung an den gewünschten Speicherort wie USB-Stick, SD-Karte oder FTP-Server.

# Auf die Messkette kommt es an

# Leistungsanalysator versus DAQ- Messsystem

Von: Matthias Schöberle  
Business Development Manager  
Leistungsmesstechnik

**Wie genau muss Wirkleistung gemessen werden? Eine beliebte Antwort ist „so genau wie möglich“. Einschlägige Normen fordern eine Genauigkeit von  $\pm 0,2\%$  bei der Netzfrequenz. Auf den ersten Blick scheint das keine große Herausforderung zu sein, da Präzisions-Leistungsanalysatoren Genauigkeiten von bis zu  $\pm 0,04\%$  bieten.**

---

Praktische Anwendungen weichen allerdings meist von den Idealbedingungen ab und erfordern die Berücksichtigung zusätzlicher Unsicherheitsbeiträge. Bereichsaussteuerungen unter 100 %, Leistungsfaktoren kleiner 1 und zusätzlich benötigte Wandler für hohe Ströme können die Messgenauigkeit merklich reduzieren.

Ungünstig ist, wenn eine Messlösung aus mehreren Komponenten besteht. Bereits die Messunsicherheitsbetrach-

tung für eine einzelne Komponente einer Messkette kann schwierig sein. Besonders, wenn deren Spezifikation verschiedene Einflussgrößen definiert und der Anwender die Gesamt-Messunsicherheit selbst bestimmen muss. Hier findet man Begriffe wie Verstärkungsgenauigkeit, Linearität, Drift, Langzeitstabilität und Temperatureinfluss. Sind wichtige Größen gar nicht oder nur „typisch“ spezifiziert, ist eine Berechnung praktisch unmöglich.

Wie sich die Unsicherheiten mehrerer Komponenten einer Messkette fortpflanzen, lässt sich sehr einfach an zwei fiktiven Messketten aufzeigen.

## Leistungsmessung mit Präzisions-Leistungsanalysator

Am besten hat man die Messgenauigkeit einer Messkette im Griff, wenn sie kurz ist und die Spezifikation eines einzelnen „Kettengliedes“ bereits möglichst viele Einflussgrößen berücksichtigt. Dies trifft bei Einsatz eines Präzisions-Leistungsanalysators von Yokogawa zu. Hier besteht die Messkette nur aus dem Messgerät selbst und eventuell einem Präzisions-Nullflusswandler für hohe Ströme.



9

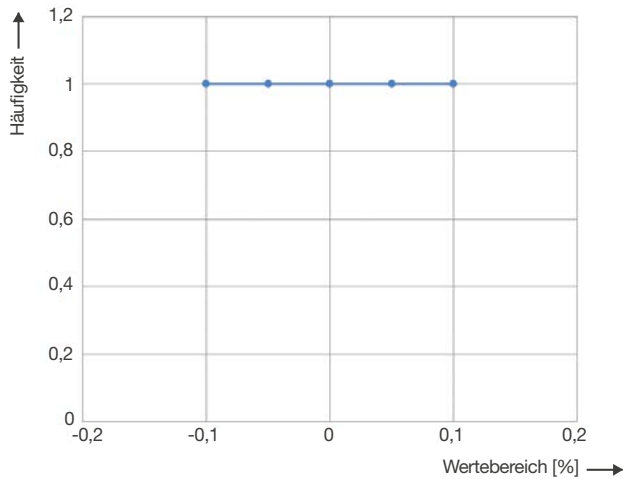


Bild 1: Gleichverteilung von -0,1 % bis +0,1 %.

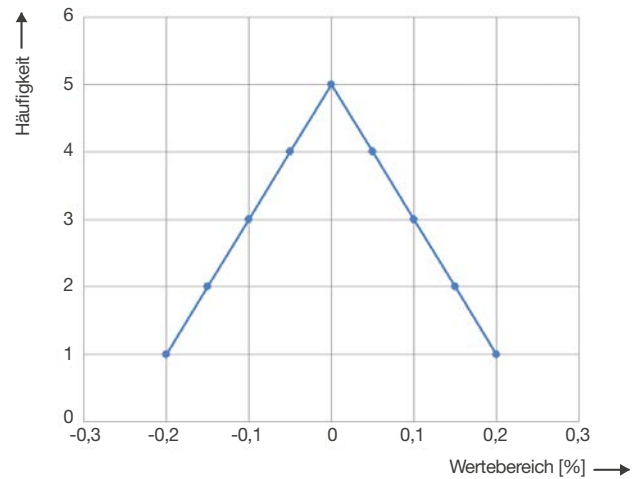


Bild 2: Kombination zweier Gleichverteilungen nach Bild 1.

Nehmen wir an, die Messunsicherheit für Leistungsanalysator und Stromwandler ist jeweils mit  $\pm 0,1\%$  spezifiziert. Überschlägig lässt sich die Messunsicherheit (MU) der Messkette durch eine einfache Addition bestimmen:  
 MU Leistungsmessung = MU Leistungsanalysator + MU Stromwandler =  $\pm 0,2\%$

Bei Anwendung anerkannter statistischer Methoden<sup>1)</sup> wird der Wert noch etwas kleiner. Wenn keine Information zur Wahrscheinlichkeitsverteilung vorliegt, wird bei den beiden Eingangsgrößen von Gleichverteilung ausgegangen (Bild 1). In der dargestellten Funktion sind fünf Einzelwerte hervorgehoben. Kombiniert man die gleich verteilten Messunsicherheiten der beiden Kettenglieder mit gleich großen Beträgen von  $\pm 0,1\%$ , so führt dies in Summe zu einer Dreieckverteilung (Bild 2).

Die Kombinationen  $-0,2\%$  und  $+0,2\%$  gibt es genau einmal, während sich bei der Kombination „0 %“ eine Häufung ergibt. Dies liegt daran, dass sich positive und negative Abweichungen der beiden Kettenglieder aufheben können. Das passiert z.B. bei der Kombination von  $+0,05\%$  und

$-0,05\%$ . Betrachtet man anstatt weniger Einzelwerte kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen, so gibt es für „0 %“ unendlich viele Kombinationsmöglichkeiten. Deshalb liegt es nahe, nicht mit den unwahrscheinlichen Kombinationen  $\pm 0,2\%$  zu rechnen, sondern einen definierten Vertrauensbereich zu betrachten. üblicherweise wird dieser mit 95 % definiert. Dies entspricht einer (theoretischen) uberschreitungswahrscheinlichkeit von 5 %.

Die Berechnung der zweigliedrigen Messkette ist in diesem Beispiel sehr einfach:

**(1)** Zuerst ist die **Standardmessunsicherheit** der beiden Eingangsgrößen zu bestimmen. Der Umrechnungsfaktor ist bei Gleichverteilung  $1/\sqrt{3}$ .

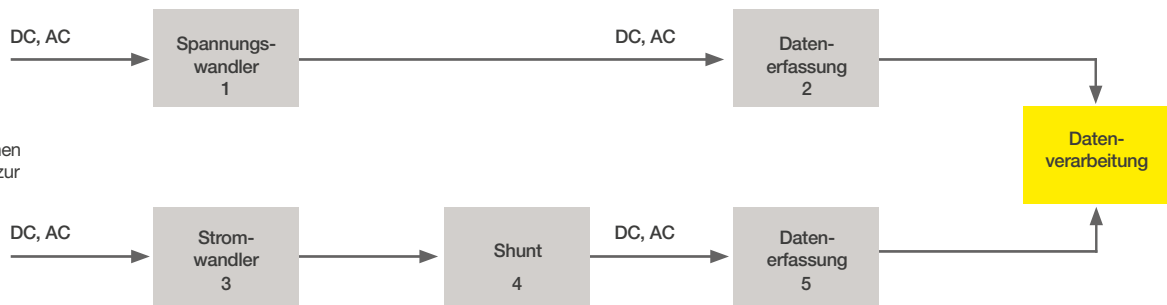
Standardmessunsicherheit:  $\pm 0,1\% / \sqrt{3} = \pm 0,0577\%$

**(2)** Die beiden Standardmessunsicherheiten werden anschließend geometrisch zur **kombinierten Standardmessunsicherheit** addiert.

Kombinierte Standardmessunsicherheit:  
 $\pm \sqrt{0,0577^2 + 0,0577^2}\% = \pm 0,0816\%$

**(3)** Für einen Vertrauensbereich von 95 % wird dieser Wert nun noch mit einem **Erweiterungsfaktor** multipliziert. >>>

Bild 3:  
Aufbau eines typischen  
DAQ-Messsystems zur  
Leistungsmessung.



>>> Dieser ist bei Dreieckverteilung 1,90. Das Ergebnis ist die gesuchte **erweiterte Messunsicherheit**.  
 Erweiterte Messunsicherheit:  $\pm 0,0816\% \times 1,90 = \pm 0,155\%$   
 -> gerundet auf zwei signifikante Stellen  $\pm 0,16\%$   
 Handelt es sich bei den gleich verteilten Eingangsgrößen um verlässliche Garantiewerte, so bewegt man sich mit der Wahl eines Vertrauensbereichs von 95 % auf der sicheren Seite. Dies setzt allerdings voraus, dass die Eingangsgrößen unabhängig voneinander sind. Systematische Zusammenhänge sind anders zu bewerten.

**Leistungsmessung mit DAQ-Messsystem und Präzisions-Stromwandler**

Es gibt viele Messlösungen, die im Kern ein DAQ-Messsystem (Datenerfassungssystem) beinhalten und aus einer mehrgliedrigen Messkette bestehen. DAQ-Messsysteme nutzen zur Datenerfassung häufig standardisierte Spannungseingänge, z. B. mit einem Messbereich von  $\pm 10\text{ V}$ . Die Messkette zur Bestimmung von Leistungswerten erfordert dann zusätzlich einen Spannungswandler, einen Stromwandler und häufig auch einen Shunt – siehe Bild 3.

In diesem Beispiel gibt es fünf Komponenten, die einen Einfluss auf die Genauigkeit der Messkette haben. Dabei kann es sich auch um eine Kombination von Grundgerät, Einschubmodulen und externen Wandlern handeln. Gehen wir wieder davon aus, dass die einzelnen Messunsicherheiten mit  $\pm 0,1\%$  spezifiziert und gleichverteilt sind. Die einfache Addition der fünf Beiträge zu einer Gesamt-Messunsicherheit ergibt  $5 \times \pm 0,1\% = \pm 0,5\%$ . Diese Vorgehensweise ist hier nicht zielführend, weil diese Grenzfälle

noch unwahrscheinlicher als im vorherigen Beispiel mit nur zwei Kettengliedern sind. Diese Messkette ist somit zwingend nach statistischen Methoden zu rechnen:  
**(1)** Wie im ersten Rechenbeispiel, ist die Standardmessunsicherheit der Eingangsgrößen  $\pm 0,0577\%$   
**(2)** Die fünf Standardmessunsicherheiten werden geometrisch addiert:  
 Kombinierte Standardmessunsicherheit:  
 $\pm \sqrt{5 \times 0,0577^2}\% = \pm 0,1290\%$   
**(3)** Für einen Vertrauensbereich von 95 % wird dieser Wert mit dem Erweiterungsfaktor 1,96 multipliziert, der für Normalverteilung gilt.  
 Erweiterte Messunsicherheit:  $\pm 0,1290\% \times 1,96 = \pm 0,253\%$   
 -> gerundet  $\pm 0,25\%$

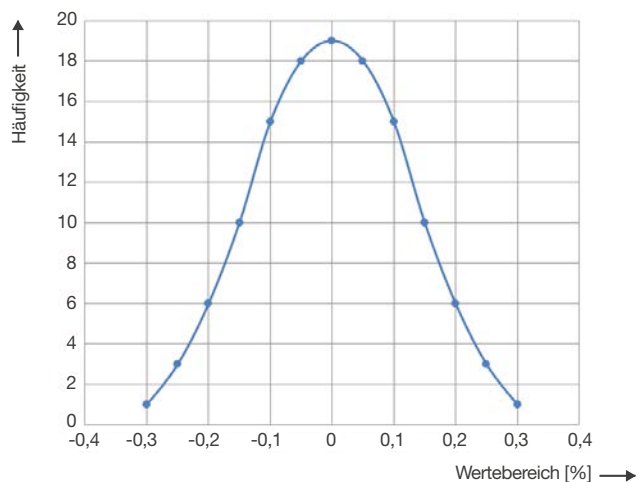


Bild 4:  
Die Kombination dreier Gleichverteilungen entspricht fast der Normalverteilung.

- 11** Warum wurde jetzt Normalverteilung angenommen?  
Dieses Beispiel kombiniert fünf Gleichverteilungen mit gleichen Beträgen. Bereits bei drei gleichen Eingangsgrößen kann mit guter Näherung von Normalverteilung ausgegangen werden (Bild 4).

Zur Vereinfachung wird meist ein etwas größerer Vertrauensbereich von 95,45 % gewählt, denn dann ist der Erweiterungsfaktor bei Normalverteilung exakt 2,0.

### Präzisions-Leistungsanalysatoren und DAQ-Messsysteme im praktischen Einsatz

Mit Präzisions-Leistungsanalysatoren von Yokogawa lassen sich höchste Genauigkeitsanforderungen erfüllen. Die sehr wichtige Voraussetzung einer kurzen Messkette ist grundsätzlich gegeben. Zudem sind in der Genauigkeitsspezifikation bereits alle wichtigen Einflussgrößen enthalten und für einen großen Temperaturbereich gültig.

In praktischen Anwendungen werden Präzisions-Leistungsanalysatoren vor allem für Messaufgaben bei stationären Betriebspunkten eingesetzt. Dies hängt damit zusammen, dass meist auch Harmonische ermittelt werden sollen, um sowohl die Grundschwingungsleistung als auch Verluste bei höheren Frequenzen präzise zu bestimmen. Zu diesem Zweck führen Präzisions-Leistungsanalysatoren simultane Fast Fourier Transformationen (FFTs) durch. FFTs sind aber prinzipiell nur auf periodische Signale anwendbar, nicht jedoch auf dynamische Vorgänge oder gar Transienten.

DAQ-Messsysteme erfassen Rohdaten und berechnen daraus Leistungswerte. Nach der Datenerfassung setzen DAQ-Messsysteme komplett auf Software-Lösungen. So ist auch keine Hardware vorgesehen, um Leistungsmessungen auf die Grundschwingung zu synchronisieren und eine stabile Referenzfrequenz für eine Harmonischen Analyse abzuleiten. Die Berechnungen werden entweder online mit Hilfe von DSPs oder zu einem späteren Zeitpunkt offline durchgeführt. Offline-Berechnungen bieten sich insbesondere an, um dynamische Vorgänge und kurzzeitige Ereignisse aus einer großen Datenmenge zu extrahieren und zu analysieren.

Mit der Genauigkeit eines Präzisions-Leistungsanalysators können DAQ-basierende Messsysteme allerdings nicht konkurrieren. Da die Komponenten der Messkette voneinander unabhängige Einzelspezifikationen haben, werden sie i.d.R. auch vollkommen unabhängig voneinander abgeglichen und kalibriert. Messunsicherheitsbeiträge wie den Einfluss des Leistungsfaktors wird man hier vergeblich suchen. Relativ groß ist der Aufwand für eine Messunsicherheitsberechnung. Er besteht darin, die relevanten Einflussfaktoren eines jeden Kettengliedes zu bestimmen und korrekt zu bewerten. Ein ganz besonderes Augenmerk sollte man hierbei der DC-Leistungsmessung schenken. Der in Bild 3 dargestellte Aufbau zeigt vier voneinander unabhängige Baugruppen, bei denen mit einem DC-Offset gerechnet werden muss.



WT1800E mit integrierter Versorgungseinheit für 6 Nullfluss-Stromwandler (oben).

Da ein DC-Offset eine systematisch mit der Temperatur driftende Größe ist, hat er besonders großen Einfluss. Die vorher beschriebenen Verteilungsfunktionen sind nicht anwendbar. Deshalb profitiert man insbesondere bei der DC-Leistungsmessung von einer kurzen Messkette und temperaturstabilem Hardware-Design.

Vergleichen Sie doch einfach mal die Spezifikationen. Die Messlatte hängt hoch: WT1800E garantiert eine DC-Leistungsmessgenauigkeit von 0,125 % (bei 100 % nominaler Bereichsaussteuerung, 12 Monate, 23 ±5°C).

1) Siehe „Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)“

Entwicklung von Elektromotoren für Formula Student

# Kennfeld-Optimierung

Mit Leidenschaft und großem Ehrgeiz entwickelt, konstruiert, fertigt und testet das KA-Racing-Team des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) jedes Jahr für den Formula Student Konstruktionswettbewerb zwei neue Rennwagen: einer mit Verbrennungsmotor, der andere mit Elektroantrieb und seit diesem Jahr zusätzlich ein autonomes Rennfahrzeug. Die für den Antrieb benötigten Elektromotoren werden für jede Saison neu entworfen und komplett von Hand gefertigt und anschließend auf einem Prüfstand getestet. Die permanent erregten Synchronmotoren der aktuell dritten Generation bringen 30 kW Dauerleistung, 40 kW Spitze, 30.000 Umdrehungen und ein Drehmoment von 17 Nm. Obwohl ein Motor nur 4 kg wiegt, macht dies bei vier Stück bereits einen beträchtlichen Anteil am Gesamtgewicht des Rennwagens von nur 180 kg aus. Die meisten der 150 elektrisch fahrenden Formula Student Teams nutzen Radnabennmotoren, KA-Racing hat sich dagegen für ein anderes Konzept entschieden. Bernhard Baier vom KA-Racing-Team erzählt: „Bei uns sitzen die Motoren unter dem Mono-coque und reichen weit in die Fahrzeugmitte hinein, um die schweren Massen tief nach unten zu bekommen. Zusätzlich sind es ja auch gefederte Massen, beides gewährleistet ein sehr gutes Fahrzeugverhalten“.

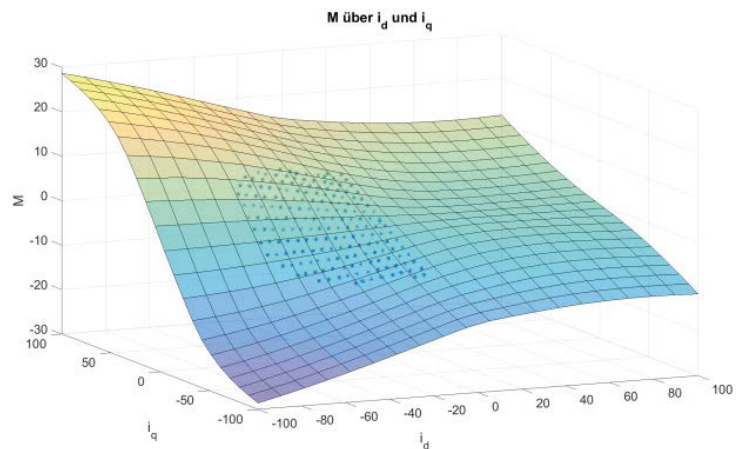
In der aktuellen Saison 2017 wurden, am ebenfalls selbst entwickelten Prüfstand, die Phasenspannungen, Ströme sowie Drehmoment und Drehzahl mit einem WT3000E von Yokogawa gemessen und anschließend das komplette Kennfeld errechnet. Mit dem vierten, freien Leistungschanal des Leistungsanalysators wurde die jeweilige Rotorposition bestimmt. Der zweite Eingang des vierten Leistungsmesskanals wurde ebenfalls kreativ als Trigger für die Messdatenaufzeichnung genutzt.

Um das Maximum aus den Maschinen herauszuholen, muss auch der Wirkungsgrad der Leistungselektronik maximiert werden. Die verwendete MTPA-Regelung (Maximum Torque per Ampere) erzeugt mit einem möglichst geringen Strom das höchste Moment. Mit dem WT3000E wurden diese Punkte aus dem Kennfeld ausgemessen. Der gemessene Wirkungsgrad der Motoren lag deutlich über 95 % und im Spitzenbereich bei 98 %.

Der Formel-Rennwagen kann in nur 2,5 Sekunden auf 100 km/h beschleunigen und erreicht eine durch die Endübersetzung begrenzte Höchstgeschwindigkeit von 121 km/h.



Fahrer Timo Lorenz, Bernhard Baier (links) erklären Johann Mathä (Yokogawa) die Besonderheiten des Fahrzeugs (Bild: KA-Racing e.V.).



Die Sterne im Drehmomentkennfeld zeigen die mit dem WT3000E gemessenen Punkte. Aus diesen können die Punkte mit maximalem Moment beim minimalem Strom berechnet werden.



Als Antrieb des auf dem Titelbild gezeigten Fahrzeugs KIT17E dient ein selbstentwickelter, permanenterregter Synchronmotor mit eigenem Ölkühlkreislauf.