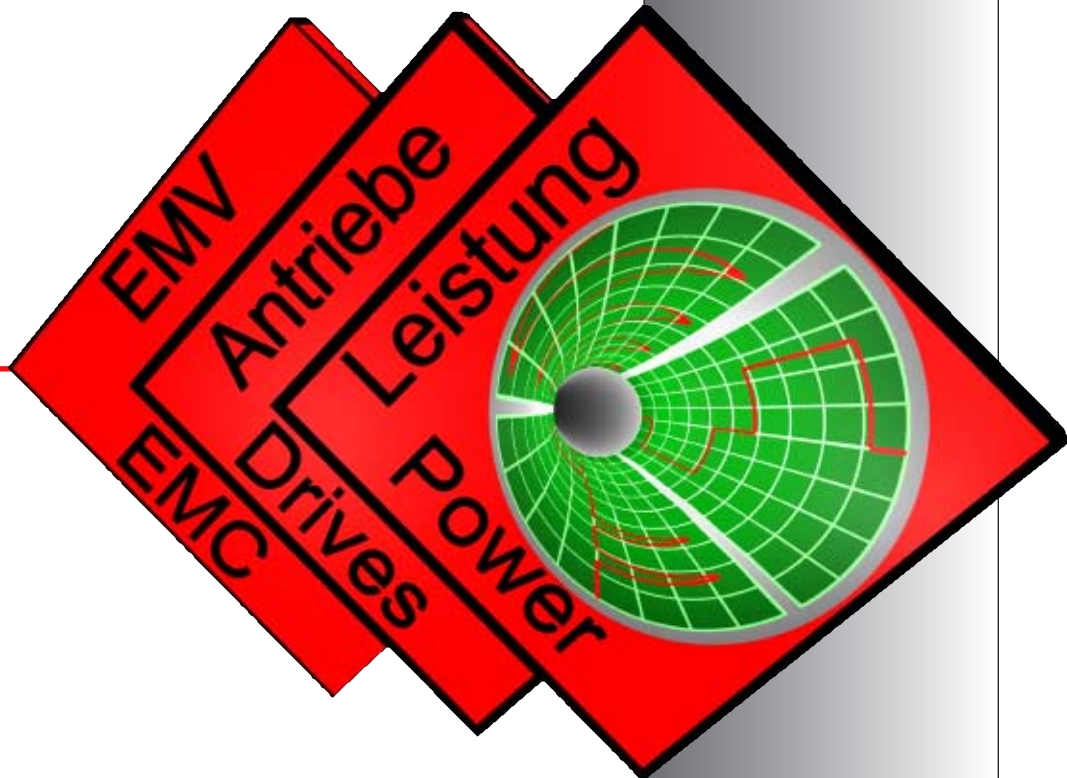




**STEINBEIS-TRANSFERZENTRUM**  
**FERTIGUNGSAUTOMATISIERUNG UND EMV**  
**GEISLINGEN**



**STEINBEIS-TRANSFERZENTRUM**  
**FERTIGUNGSAUTOMATISIERUNG UND EMV GEISLINGEN**

Südmährer Straße 13  
D-73312 Geislingen

**Leiter :** Prof. Dipl.-Ing. Ludwig Kolb

Telefon : +49/7331/961724

Telefax : +49/7331/961766

E-Mail : [info@power-e.de](mailto:info@power-e.de)

Internet : <http://www.power-e.de>





## LEM Deutschland GmbH Instrumente

Marienbergstraße 78  
D 90411 NÜRNBERG  
Telefon : +49(0)911 955 75 0  
Telefax : +49(0)911 955 75 30  
E-Mail : [postoffice.LDE@LEM.com](mailto:postoffice.LDE@LEM.com)



# Leistungsmessung an Elektromotoren, Umrichtern und Getrieben mit nur einem Gerät

HORST BEZOLD, LUDWIG KOLB

Die von Kraftwerken erzeugte Energie wandert zu einem Großteil in elektrische Antriebe. Im Rahmen der Entwicklung eines Forschungs- und Entwicklungsprüfstands (Bild 1) für Elektrofahrzeug-Antriebe muss dieser ein synchrones Erfassen von vier elektrischen und drei mechanischen Leistungen ermöglichen. Anhand eines hier vorgestellten Messsystems ist es möglich, die Einzelwirkungsgrade von Frequenzumrichter, Elektromotor und Getriebe mit einem einzigen Gerät zu analysieren.

## Vorwort

30 bis 40 Prozent aller in Europa erzeugten elektrischen Energie wird für das Antreiben von Elektromotoren benötigt. Durch eine Optimierung der Antriebe (bestehend aus Umrichter und Elektromotoren) können die Energiekosten und damit die Fertigungskosten in der Industrie gesenkt werden. Viele Motorenhersteller haben schon spezielle energieeffiziente Produkte im Programm. Für die Entwicklung dieser Antriebe spielt die Messung des Wirkungsgrads eine wichtige Rolle.

Weitere Anwendungen sind innovative elektrische Antriebe für Hilfsmotoren im Kraftfahrzeug und für die Traktion von Fahrzeugen. Bei Elektro- und Brennstoffzellen-Fahrzeugen ist die Effizienz des Antriebs weitgehend für den Erfolg des Gesamtkonzepts verantwortlich, weil hier der Gesamtwirkungsgrad von Frequenzumrichter, Elektromotor und Getriebe die Reichweite des Fahrzeugs entscheidend beeinflusst. Vor allem Kfz-Hersteller stellen hier extreme Ansprüche an ihre Zulieferer.

*Dipl.-Ing. (FH) Horst Bezold ist für die Bereiche Marketing und Vertrieb von Leistungsmesstechnik in Europa bei der LEM Instruments GmbH in 90411 Nürnberg verantwortlich. Prof. Dipl.-Ing. Ludwig Kolb lehrt elektrische Antriebstechnik, Leistungselektronik und Elektrofahrzeuge an der Fachhochschule Ulm; er ist weiterhin Leiter des Steinbeis-Transferzentrums „Fertigungsautomatisierung und EMV“ in 73312 Geislingen.*



**1: Forschungs- und Entwicklungsprüfstand für Elektromotoren, Umrichter und Getriebe am Steinbeis-Transferzentrum Geislingen**

## Wirkleistungsmessung mit digitalen Leistungsmessgeräten

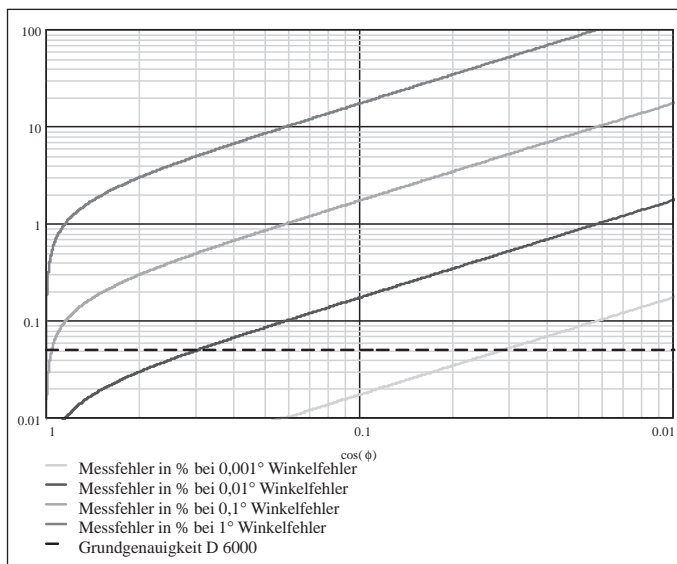
Leistungsmessgeräte für Umrichteranwendungen müssen besonderen Ansprüchen genügen. Bei digitalen Messgeräten wird die Wirkleistung aus den Abtastwerten von Strom und Spannung ermittelt. Dabei muss sichergestellt werden, dass das Abtasten von Strom und Spannung exakt zum selben Zeitpunkt geschieht. Aus den Samplewerten des zeitlich veränderlichen Stroms  $i(t)$  und der zeitlich veränderlichen Spannung  $u(t)$  wird dann ein Quasisamplewert für die elektrische Leistung  $p(t)$  berechnet.

Die arithmetische Mittelung der Quasiabtastwerte  $p(t)$  ergibt die Wirkleistung  $P$ . Eine quadratische Mittelung der Abtastwerte  $i(t)$  und  $u(t)$  ergibt den Stromeffektivwert  $I_{\text{RMS}}$  und den Spannungseffektivwert  $U_{\text{RMS}}$ . Die Multiplikation der beiden Effektivwerte  $I_{\text{RMS}}$  und  $U_{\text{RMS}}$  führt zur Scheinleistung  $S$ .

## Reale Wandler mit Winkelfehler

Winkelfehler der Eingangskanäle täuschen eine nicht existierende Phasenverschiebung vor, welche zu einer falschen Wirkleistung führt. Die gleiche Problematik tritt bei den eingesetzten Strom- und Spannungswandlern auf. Frequenzkompensierte Spannungsteiler sind dabei eher unproblematisch. Diese Teiler lassen sich inzwischen von Gleichstrom (DC) bis zu Wechselstrom im Megahertz (MHz)-Bereich mit hoher Genauigkeit fertigen. Größer ist die Problematik bei Stromwandlern. Diese sind oft in Bezug auf Amplitudengenauigkeit, Phasengenauigkeit und Frequenzbereich ungenügend für den Einsatz in einem Präzisionsmesssystem. So ist bei der Wahl des richtigen Wandlers genau auf den zu messenden Arbeitsbereich der Maschine und den dabei auftretenden Leistungsfaktor  $\cos\phi$  oder  $\lambda$  zu achten.

Bei großen Leistungsfaktoren spielt der Winkelfehler des Stromwandlers eine geringere Rolle, weil bei  $\lambda = 1$  die Cosinusfunktion nur einen geringen Einfluss hat. Bei kleinen Leistungsfaktoren jedoch ist der durch den gleichen Winkelfehler verursachte Fehler wesentlich größer, weil die Cosinusfunktion hier viel steiler ist. Darüber hinaus ist in diesem Bereich die Wirkleistung wesentlich kleiner, so dass eine durch einen Winkelfehler verursachte Änderung in der angezeigten Leistung viel stärker zum Tragen kommt. Einen Eindruck soll die Auswirkung eines Winkelfehlers von  $1^\circ$  für die Leistungsfaktoren  $\lambda = 1$  und  $0,1$  bei einer Leistungsmessung vermitteln:



**2: Einfluss des Winkelfehlers in Abhängigkeit vom Leistungsfaktor  $\lambda = \cos\phi$**

▪  $\lambda = 1: \cos\varphi = 1 \Rightarrow \varphi = 0^\circ$

Wirkleistung  $P_{\text{real}} = S \cdot \cos\varphi = S \cdot \cos(0^\circ) = S$

Winkelfehler  $\Delta\varphi = 1^\circ \Rightarrow \varphi_{\text{Anzeige}} = \varphi + \Delta\varphi = 1^\circ$

Angezeigte Leistung  $P_{\text{Anzeige}} = S \cdot \cos(1^\circ) = S \cdot 0,99985$

Resultierender Messwinkelfehler:

$(1 - 0,99985) \% = 0,015\%$

Ein Stromwandler-Winkelfehler von  $1^\circ$  hat also bei  $\lambda = 1$  praktisch keinen Einfluss auf das am Gerät angezeigte Messergebnis. Auch Wandler mit größerem Winkelfehler könnten eingesetzt werden. Anders sieht es bei einem Leistungsfaktor von  $\lambda = 0,1$  aus:

▪  $\lambda = 0,1: \cos\varphi = 0,1 \Rightarrow \varphi = 84,261^\circ$

Wirkleistung  $P_{\text{real}} = S \cdot \cos\varphi =$

$S \cdot \cos(84,261^\circ) = S \cdot 0,1$

Winkelfehler  $\Delta\varphi = 1^\circ \Rightarrow \varphi_{\text{Anzeige}} =$

$\varphi + \Delta\varphi = 85,261^\circ$

Angezeigte Leistung

$P_{\text{Anzeige}} = S \cdot \cos(85,261^\circ) = S \cdot 0,08262$

Resultierender Messwinkelfehler:

$(0,1 - 0,08262) : 0,1 = 17,38\%$

Ein Stromwandler-Winkelfehler von  $1^\circ$  führt also bei  $\lambda = 0,1$ , das heißt einer Phasenverschiebung von fast  $85^\circ$  zwischen Spannung und Strom, zu einem Fehler von über 17 % für den Anzeigewert der Wirkleistung. Das Ergebnis ist völlig unbrauchbar. Diese Fehlerquelle tritt bereits bei der Netzfrequenz von 50 Hz auf und wird durch den Frequenzgang der eingesetzten Wandler bei höheren Frequenzen noch wesentlich verstärkt. Den Zusammenhang zwischen Winkelfehler des realen Messsystems und dem daraus resultierenden Anzeigefehler für die Wirkleistung zeigt **Bild 2**.

### Induktiver Stromwandler oder Präzisionsshunt?

Mittlerweile existieren schon ausgezeichnete induktive Stromwandler mit hoher Amplitudengenauigkeit und kleinem Winkelfehler. Diese Präzisionsstromwandler (**Bild 3**) haben eine Bandbreite von bis zu 100 kHz und sind für eine Leistungsmessung an Signalen mit Frequenzanteilen bis 30 kHz gut geeignet. Vor allem bei Messungen an sehr hohen Potentialen, wie sie z. B. bei Mittelspannungsumrichtern auftreten, sind diese Wandler wegen der Möglichkeit der Potentialtrennung vorzuziehen.

Anders sieht die Sache bei hochdynamischen Motoren aus. Diese Maschinen müssen sehr schnell den Drehzahlbereich durchfahren und sind deshalb auf hohe Beschleunigungsmomente ausgelegt. Dazu sind Motoren mit kleiner Streuinduktivität notwendig. Auch haben diese Maschinen parasitäre Kapazitäten. Bei einer Speisung mit Frequenzumrichter führt dies zu einem nicht sinusförmigen Strom mit Frequenzanteilen im hohen Frequenzbereich. Um die Leistung auch in diesem hohen Frequenzbereich sicher messen zu können, sind Stromwandler oder Messshunts mit einer Bandbreite im MHz-Bereich notwendig. Diese Aufgabe ist eigentlich nur mit einem Koaxial- oder Triaxialshunt (**Bild 4**) zu lösen. Diese besitzen den von anderen Stromwandlern unerreichten Phasenwinkelfehler von weniger als  $0,002^\circ$  bei 1 kHz und  $0,1^\circ$  bei 100 kHz.

### Wirkungsgradberechnung erfordert Präzision

Um den Wirkungsgrad eines Frequenzumrichters, Motors oder Getriebes genau zu bestimmen, muss Messtechnik mit sehr hoher Präzision eingesetzt werden. Vor allem bei hohen Wirkungsgraden ist dies sehr wichtig, weil bei kleiner Verlustleistung  $\Delta P = P_{\text{in}} - P_{\text{out}}$  ein Messfehler der Leistungen  $P_{\text{in}}$  und  $P_{\text{out}}$  natürlich stärkere Auswirkungen auf das Ergebnis der Wirkungsgradbestimmung hat. Für eine Wirkungsgradberechnung von Antrieben ist deshalb sicherzustellen, dass sowohl die elektrische als auch die mechanische Leistung mit hoher Präzision gemessen wird.

### Sonderapplikation Antrieb für Elektrofahrzeuge

In Kraftfahrzeugen nehmen die leistungselektronischen Anwendungen stetig zu. Um den höheren Bedarf an elektrischer Energie vieler Aggregate sicherzustellen, wird es in Zukunft in den Fahrzeugen neben der üblichen 12-V-Spannungsversorgung eine 42-V-Versorgung geben. Dies führt zum Einsatz von leistungselektronischen DC-DC-Wandlern. Neuartige Kombinationen aus Anlasser und Lichtmaschinen mit Frequenzumrichtern verbessern den Fahrkomfort. Moderne Beleuchtungssysteme mit elektronischen Vorschaltgeräten sind heute schon in vielen Fahrzeugen im Einsatz. Elektronische Bremssysteme (brake by wire) sollen die Sicherheit erhöhen.

Der praktische Einsatz von Elektro- und Hybridfahrzeugen wird schon seit mehreren Jahren erforscht. In diesem Bereich wurden enorme Fortschritte gemacht. Die Batterien haben eine immer höhere Kapazität erreicht, und die elektrischen Antriebe werden immer kleiner und leichter. Der Zwang, Gewicht zu minimieren, führt zur Integration mehrerer Aggregate in einem Gehäuse. Bei den Elektromobilen erfolgt inzwischen die weitere Integration von Frequenzumrichter, Motor und Differentialgetriebe. Im industriellen Einsatz sind integrierte Kombinationen wie UmrichterMotoren schon häufig anzutreffen.

Aus diesem Grund kam von einem führenden Kfz-Hersteller in Deutschland die Anforderung an das Haus LEM Instruments und das Steinbeis-Transferzentrum Ulm, alle Einzelwirkungsgrade von Frequenzumrichter, Elektromotor und Differentialgetriebe sowie den Gesamtwirkungsgrad dieses Antriebs auf einem Prüfstand zu ermitteln (**Bild 5**). Dies macht es leicht möglich, die Auswirkungen einzelner konstruktiver Änderun-

gen auf das Gesamtsystem zu erforschen. Da mit dem Mess-und-Prüf-Gerät „Norma Power Analyzer D6000“ von LEM Instruments schon ein System für die Messung von bis zu sechs elektrischen und einer mechanischen Leistung verfügbar war, lag es nahe, dieses Gerät an die neuen Anforderungen anzupassen.

Das Gerät D6000 ist ein Präzisionsleistungsmessgerät mit einer Grundgenauigkeit von 0,05 % und einer sehr hohen Bandbreite von 1 MHz. Aufgrund seiner potentialfreien Eingangskanäle für elektrische Signale kann bei diesem Gerät sowohl mit induktiven Wandlern als auch mit Präzisionsbreitbandshunts gearbeitet werden. Das gleichzeitige Messen von bis zu sechs unabhängigen Leistungskanälen macht auch die Wirkungsgradberechnung eines Frequenzumrichters am Drehstromnetz möglich, weil synchron sowohl der Netzeingang als auch der Umrichter Ausgang dreiphasig erfasst werden. Im Bereich der Anwendung am Elektromobil ist eine vierphasige Konfiguration des Geräts ausreichend. Dies bedeutet, dass die Batterieversorgung und der meist dreiphasige Ausgang eines Frequenzumrichters gleichzeitig gemessen werden. Eine Berechnung der Wirkungsgrade erfolgt online im gleichen Zeitfenster wie die Messung. Neben der eigentlichen Aufgabe der Leistungsmessung und Wirkungsgradberechnung ist mit dem Gerät auch eine FFT-Analyse von Spannung, Strom und Leistung bis 32 kHz möglich. Damit können auch die Taktfrequenzen des Frequenzumrichters in Spektralform dargestellt werden. Eine Scopefunktion zeigt die Zeitfunktionen der Signale an.

Die Realisierung einer mehrfachen mechanischen Leistungserfassung geht beim Gerät D6000 über die Anforderung der Differentialtriebemessung hinaus. Dort wird die Messung von nur drei mechanischen Leistungen für die Wirkungsgradermittlung des Getriebes benötigt. Die neue Schnittstelle für die mechanische Leistungsmessung im Gerät ermöglicht die Messung von bis zu vier mechanischen Leistungen zur selben Zeit. Damit sind auch Sonderapplikationen wie z. B. ein Allradantrieb mit vier Radnabenmotoren abgedeckt. Die Form



▲ **3: Induktiver Präzisionsstromwandler mit 100 kHz Bandbreite von LEM Instruments**



▶ **4: Triaxialbreitbandshunt von LEM Instruments mit einer Bandbreite von 2 MHz und einem extrem kleinen Winkelfehler**

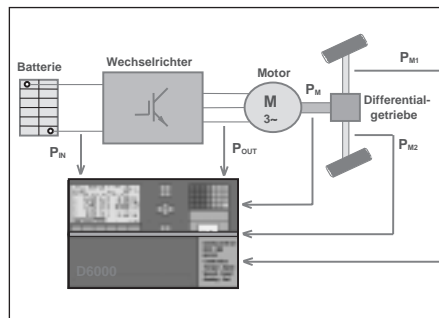
der Eingangssignale für die mechanische Leistungsmessung richtet sich dabei nach den Ausgangssignalen handelsüblicher mechanischer Drehmomentmesswellen.

Eine Besonderheit erhöht dabei die Flexibilität der neuen Messwertaufnahme wesentlich: Die acht Eingänge können wahlweise analog oder impulsförmig angesteuert werden. Normale Drehmomentmesswellen geben das Drehmoment als Analogsignal von  $-10$  bis  $+10$  V und die Drehzahl als Impuls signal mit Impulsen pro Motorumdrehung aus. Das Analogsignal hat vor allem bei sehr gestörten Umgebungsbedingungen, wie sie bei Umrichter messungen vorzufinden sind, den Nachteil, dass der Messwert durch Einstreuungen fehlerbehaftet sein kann. Einige Hersteller bieten deshalb auch Drehmomentmesswellen mit einem Frequenzgang für das Drehmoment an. Dabei bedeutet z. B. eine vorgegebene Frequenz ein Drehmoment von Null, und eine Änderung der Frequenz nach oben oder unten enthält den Betrag und das Vorzeichen des anliegenden Drehmoments.

Das Gerät D6000 kann vor Ort vom Anwender an die benötigten Ausgangssignale angepasst werden. Die zahlreichen Eingänge stehen natürlich auch für die Erfassung anderer analoger oder impulsförmiger Signale bereit. Falls wie üblich nur eine mechanische Leistung gemessen werden muss, können die anderen sechs Eingänge zur Erfassung analoger Signale, wie z. B. Temperaturen, hergenommen werden. Eine Variablenzuordnung erfolgt dabei in einem speziellen Formeleditor, der auch die weitere Berechnung der gemessenen Werte zulässt.

### Messen und Analysieren als Dienstleistung

Viele leistungselektronische Applikationen sind für die Automobilindustrie völlig neue Anwendungsgebiete. Das Know-how für diese neue Technik muss von den Kfz-Herstellern in manchen Fällen erst aufgebaut



**5: Leistungsmessgerät D6000 von LEM Instruments für die gleichzeitige Messung und Berechnung aller Wirkungsgrade von Frequenzumrichter, Elektromotor und Differentialgetriebe für ein Elektromobil**

werden. Die Anforderungen dieses Bereichs dagegen sind ausgesprochen hoch. In keinem anderen Bereich ist der Wirkungsgrad eines Antriebs von größerer Bedeutung. Deshalb wird in Zukunft neben dem Verkauf von Geräten für bestimmte Messprobleme das Anbieten der Dienstleistung Messen immer wichtiger.

Die Firma LEM Instruments arbeitet im Bereich der Leistungselektronik und Antriebstechnik mit dem Steinbeis-Transferzentrum (STZ) „Fertigungsautomatisierung und EMV“ in Geislingen zusammen. Damit kann der Industrie das Know-how aus der Hochschule für besondere Analysen zur Verfügung gestellt werden. Im STZ Geislingen ist sowohl die Messausrüstung als auch das Wissen vorhanden, komplexe Aufgaben aus dem Gebiet der Leistungselektronik und der elektrischen Antriebstechnik zu lösen. Messungen und Analysen können je nach Anforderung im Labor oder auch vor Ort durchgeführt werden. Ein Prüfbericht dokumentiert das Ergebnis. Für Messungen an Elektromotoren und Frequenzumrichtern stehen verschiedene Prüfstände zur Verfügung, wie z. B. ein Prüfstand für Antriebe mit hoher Drehzahl. Darüber hinaus sind Messungen an industriellen Umrichterantrieben bis in den Mittelspannungsbereich durchführbar.

### Zusammenfassung

Ein Großteil der von Kraftwerken erzeugten elektrischen Energie fließt in elektrische Antriebe. Eine Optimierung dieser Antriebe hilft Kosten sparen. Vor allem die Messung an Umrichterantrieben erfordert ein gewisses Know-how und geeignete breitbandige Messmittel. Durch die Erweiterung eines Mess- und Prüf-Geräts auf vier mechanische Leistungs Kanäle ergeben sich neue Möglichkeiten der Messung des Gesamtwirkungsgrads an Antrieben, die aus Frequenzumrichtern, Motoren und Getrieben bestehen.

Der Beitrag beschäftigt sich mit der Sonderlösung für einen führenden deutschen Automobilhersteller. Im Rahmen der Entwicklung eines Forschungs- und Entwicklungsprüfstands für Elektrofahrzeugantriebe benötigt dieser ein synchrones Erfassen von vier elektrischen und drei mechanischen Leistungen. Das Messgerät wurde deshalb zu einem Gerät für maximal sechs elektrische und vier mechanische Leistungen weiterentwickelt. Mit diesem Gerät ist es nun möglich, die Einzelwirkungsgrade von Frequenzumrichter, Elektromotor und Differentialgetriebe eines Antriebs mit einem einzigen Gerät zu analysieren. Im Beitrag wird weiterhin auf die Problematik der Leistungsmessung an Frequenzumrichtern eingegangen und eine Übersicht über die leistungselektronische Anwendung im Automotive-Bereich gegeben.

### Anmerkung der Redaktion

Weitere Informationen über das beschriebene Messgerät und die Dienstleistungen können von den Lesern dieser Ausgabe angefordert werden, indem sie die entsprechende Kennziffer in die Leserdienstkarte am Heftende eintragen und diese baldmöglichst an die Vertriebsunion absenden.