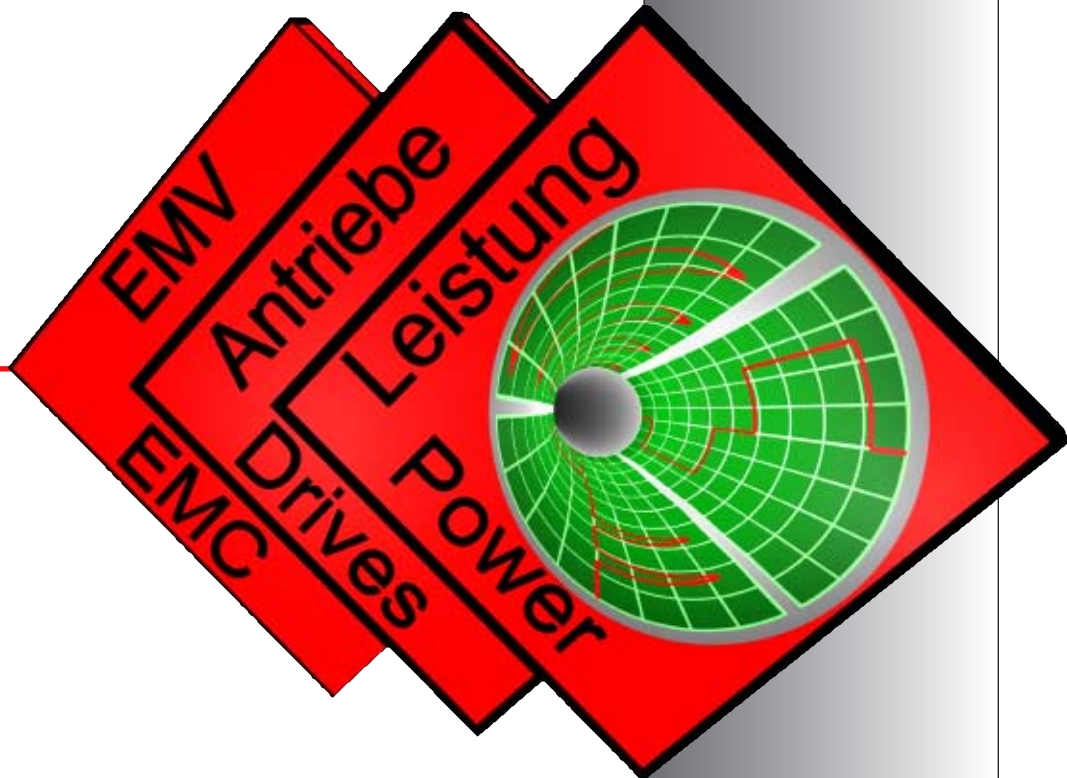




**STEINBEIS-TRANSFERZENTRUM**  
**FERTIGUNGSAUTOMATISIERUNG UND EMV**  
**GEISLINGEN**



**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)



# Präzise Wirkungsgradberechnung an Frequenzumrichter betriebenen Elektromotoren

KLAUS MEIER, HORST BEZOLD

**Elektrische Antriebe und neuartige Generatoren spielen unter anderem in Kraftfahrzeugen eine immer wichtigere Rolle. Eine Optimierung dieser Komponenten hilft Kosten und unersetzbare Rohstoffreserven zu sparen. Der Beitrag stellt die notwendigen Komponenten und Verfahren zur Bestimmung der elektrischen und mechanischen Leistung von Elektromotoren als Grundlage für die genaue Berechnung von Verlustleistung und Wirkungsgrad vor. Der Aufbau eines Prüfstands zur Ermittlung der Verlustleistung von elektrischen Maschinen wird dabei anhand des Beispiels „Kurbelwellen-Startergenerator“ dargestellt.**

## 1 Einleitung

Nahezu alle namhaften Kraftfahrzeug(Kfz)-Hersteller bzw. deren Zulieferbetriebe arbeiten derzeit an einer Reihe von Entwicklungen und Konzepten für das künftige Bordnetz im Kfz. Die Anzahl der Verbraucher wächst – auch wegen des Ersatzes von bisher mechanisch oder hydraulisch realisierten Funktionen wie Servolenkung, Ventiltrieb oder Bremsen durch elektrische Komponenten – stetig weiter. Der mittlere Leistungsbedarf gut ausgerüsteter Fahrzeuge wird in einigen Jahren bis zu 4 kW betragen. In einem gut ausgestatteten Oberklassefahrzeug bedeutet dies einen zusätzlichen Kraftstoffverbrauch von mehr als 2,5 Liter pro Hundert Kilometer, der alleine für die Stromerzeugung aufgewendet werden muss.

Eine zentrale Rolle in der ökonomischen und ökologischen Weiterentwicklung von Kfz-Bordnetzen ist deshalb die Optimierung von Gewicht und Wirkungsgrad der Komponenten, bei denen elektrische Energie in mechanische (Elektromotoren) bzw. mechanische in elektrische Energie (Gene-



**1: Drehmomentmessflansch des Typs T10F mit direkt angeflanschter Gelenkwelle**

ratoren) umgesetzt wird. Mit jeder Verbesserung kann der Kraftstoffverbrauch gesenkt bzw. die Reichweite des Kfz erhöht werden.

Der Beitrag beschreibt die notwendigen Komponenten und Verfahren zur Bestimmung von elektrischer und mechanischer Leistung an Elektromotoren als Grundlage für die genaue Berechnung von Verlustleistung und Wirkungsgrad. Der Aufbau eines Prüfstandes zur Ermittlung der Verlustleistung von elektrischen Maschinen wird dabei anhand des Beispiels „Kurbelwellen-Startergenerator“ dargestellt.

## 2 Problemstellung und Lösungsansatz

Im Folgenden werden die Fehlerursachen bei der Verlustleistungsberechnung mittels Differenzmessung und den aus diesen Kenntnissen resultierenden Lösungsansatz aufgezeigt.

### 2.1 Problematik der Verlustleistungsberechnung

Moderne mehrkanalige Leistungsanalysatoren bieten oft die Möglichkeit der Verlustleistungsberechnung eines Verbrauchers als Differenzmessung aus Eingangs- und Ausgangsleistung. Das Problem dieser Berechnungsart ist, dass die Genauigkeit des Ergebnisses von der Effizienz des Verbrauchers abhängig ist. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen. Es soll die Verlustleistung

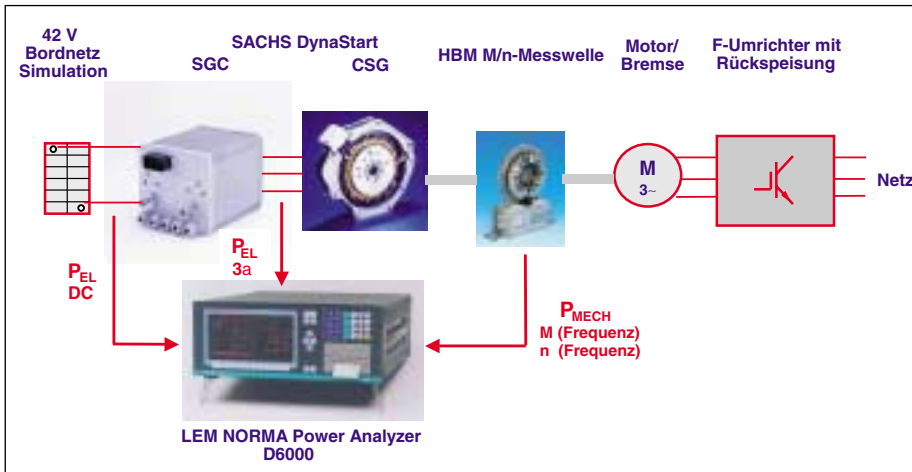
zweier Verbraucher mit einem Leistungsmessgerät der Genauigkeitsklasse 0,1 durch Differenzmessung bestimmt werden (**Tabelle**). Der erste Verbraucher hat dabei einen Wirkungsgrad von 50 %, der zweite von 95 %. Die Eingangsleistung soll 100 W betragen. Die Leistung wurde in beiden Fällen mit einer Abweichung von 0,2 W ermittelt. Bezogen auf die tatsächlichen Verluste entspricht dies bei Verbraucher 1 einer Genauigkeit des Ergebnisses von 0,4 % und bei Verbraucher 2 von 4 %. Die Genauigkeit der Verlustleistungsberechnung ist also vom Wirkungsgrad abhängig. In der Leistungselektronik und der Antriebstechnik sind heute eher Wirkungsgrade von 90 oder 95 % realistisch. Dies bedeutet, dass bei Bestimmung der Verbraucherverluste durch Differenzmessung mit einem Messgerät höchster Genauigkeit gearbeitet werden sollte.

### 2.2 EMV-verseuchte Umgebung erschwert Messungen

Neben den herkömmlichen elektrischen Verbrauchern, wie z. B. Gebläsen oder Anlassern, werden im Automobil immer mehr leistungselektronisch geregelte Elektroantriebe eingesetzt. So ist damit zu rechnen, dass demnächst Klimaanlage und Gebläse von Frequenzumrichter motoren angetrieben werden. An der elektrischen Lenkung (Power-Steering) und der elektrischen Bremse (Break-By-Wire) wird ebenfalls gearbeitet. All diese Verbraucher sind Antriebsstränge, welche aus Frequenzumrichter und Elektromotor bestehen. Die Einzelwirkungsgrade der Komponenten sind hoch. Das Problem der Messung der elektrischen Leistung am Eingang und am Ausgang von Frequenzumrichtern ist mittlerweile gelöst. LEM bietet beispielsweise mit dem Wide Band Power Analyzer des Typs D6000 schon einige Jahre ein Gerät mit einer Grundgenauigkeit von 0,1 % an, welches auch an sehr breitbandigen und verzerrten Signalen präzise die elektrische Wirkleistung erfassen kann. Die Effizienz des Umrichters kann damit einfach und komfortabel bestimmt werden. Auf die

| Mess- bzw. Berechnungsdaten | Verbraucher 1      |                 | Verbraucher 2      |                 |
|-----------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
|                             | tatsächliche Werte | gemessene Werte | tatsächliche Werte | gemessene Werte |
| Eingangsleistung in [W]     | 100                | 100,1           | 100                | 100,1           |
| Ausgangsleistung in [W]     | 50                 | 49,9            | 95                 | 94,9            |
| Verluste in [W]             | 50                 | 50,2            | 5                  | 5,2             |
| Fehler in [%]               | 0,4                |                 | 4,0                |                 |

**Tabelle: Bei der Differenzmessung auftretende Fehler**



2: Prinzipieller Aufbau des DynaStart-Prüfstandes von Sachs

Kenngrößen umrichtertauglicher Leistungsmessgeräte wird im nächsten Abschnitt genauer eingegangen.

Die Berechnung der Verluste eines Elektromotors erfordert dagegen nicht nur die Messung der elektrischen Leistung am Eingang, sondern auch die Messung der mechanischen Leistung am Ausgang des Motors. Da auch Elektromotoren oft eine hohe Effizienz von 90 bis 95 % aufweisen, müssen auch für die Drehmoment- und Drehzahlmessung Geräte höchster Präzision eingesetzt werden. Zusätzliche Probleme können dann auftreten, wenn die Messungen unter erschwerten EMV-Bedingungen durchgeführt werden müssen. Durch Einstreuungen kann dann leicht ein Offset entstehen, welcher eine Messgenauigkeit von 0,1% für die mechanische Leistung dann nicht mehr zulässt. Einige Hersteller von Drehmomentmesswellen bieten deshalb inzwischen auch Frequenzgänge für das Drehmoment an.

Auch Hersteller von Leistungsmessgeräten haben schon reagiert und können die entsprechenden Signale für Drehzahl und Drehmoment auswerten. Die Genauigkeit der Frequenzmessung liegt dabei im Gerät bei zirka 0,025 %. Drehmomentmesswellen sind mit einer Linearitätsabweichung von kleiner 0,05 % verfügbar. Durch den Einsatz der geeigneten Messwelle mit dem richtigen Leistungsmessgerät kann so auch in EMV-technisch schwieriger Umrichterumgebung die Verlustleistungsberechnung an einem Elektromotor mit ausreichender Genauigkeit durchgeführt werden.

### 3 Beschreibung der Komponenten

Der folgende Abschnitt stellt den von HBM angebotenen Drehmomentmessflansch des Typs T10F und das von LEM Norma angebotene Leistungsmessgerät D6000 vor, mit deren Hilfe eine präzise und störungsfreie Wirkungsgradberechnung ermöglicht wird. Diese Komponenten wurden auch zur Realisierung des in Abschnitt 4 beschriebenen Prüfstands eingesetzt.

#### 3.1 Technische Beschreibung der Drehmomentmesswellen

Die Ermittlung der mechanischen Leistung (Drehleistung  $P_{\text{Rot}} = M \cdot \omega$ ) stellt an die

verwendeten Komponenten bereits sehr hohe Anforderungen. So muss der Sensor leicht im Wellenstrang zu montieren sein, darf die Eigenschaften des zu messenden Systemes nicht nennenswert beeinflussen und muss auch in Grenzsituationen zuverlässig arbeiten. Daraus resultieren Forderungen an die Mechanik wie

- einfache Montage,
- hohe Verdrehsteifigkeit,
- geringe Massenträgheitsmomente,
- keine zusätzlichen Lager oder Kupplungen sowie
- hohe Überlastfestigkeit.

Als erstes Glied in der Gesamtmesskette zur Erfassung der mechanischen Leistung kommt den Sensoren für die Drehmoment- und Drehzahlmessung eine zentrale Bedeutung zu. Die Messwerte müssen genau ermittelt und möglichst störsticher übertragen werden. Dabei sind folgende Charakteristiken der Messwelle im Wesentlichen für die Realisierung einer geringen Messunsicherheit verantwortlich:

- hohe Langzeitstabilität,
- geringe Temperaturdriften,
- geringe Linearitätsfehler,
- geringe Drehzahlabhängigkeit von Nullpunkt und Messwert,
- keine Messsignalbeeinflussung durch Querkräfte und Biegemomente,
- hohe Reproduzierbarkeit,
- Rückführbarkeit der Messwerte auf nationale und internationale Normale,
- einfache Möglichkeit zur Überprüfung und Kalibrierung der Messkette sowie
- störstichere Signalübertragung.

Diese Forderungen und die zusätzliche Aufgabe, auch dynamische Signalverläufe und Drehmomentschwankungen erfassen zu können, lassen sich nur mit modernen Sensoren erfüllen, die nach dem neuesten Stand der Dehnungsmessstreifen (DMS)-Technik aufgebaut sind und direkt im Wellenstrang montiert werden. Klassische Prüfstandsbaufbauten, wie z. B. Pendelmaschinenanordnungen, bei denen die Messung des Drehmoments indirekt über die Messung des Reaktionsmoments nach der Formel Kraft  $\times$  Hebelarm erfolgt, sind für diese Art der Messung nicht geeignet. Schlechte dynamische Eigenschaften durch große Massenträgheitsmomente sowie die nicht konstante Lagerreibung in den Pen-

dellagern führen zu Messunsicherheiten, die zur Bestimmung von Wirkungsgraden nicht akzeptabel sind. Deshalb haben sich in der Prüfstandstechnik für die Prüfung und Entwicklung von Verbrennungs- und Elektromotoren neben den bekannten Drehmomentmesswellen vor allem die so genannten Drehmomentmessflansche, wie z. B. der Typ T10F von HBM (Bild 1), durchgesetzt. Dieser bereits 1995 von HBM eingeführte Drehmomentmessflansch wurde stetig weiterentwickelt und wird seither in mehr als 2000 Applikationen weltweit erfolgreich eingesetzt. Er bietet die integrale Lösung für die gleichzeitige Erfassung von Drehmoment und Drehzahl und damit für die Bestimmung der mechanischen Leistung.

#### 3.1.1 Realisierung der Drehmomentmessung

Der Drehmomentaufnehmer besteht aus zwei getrennten Teilen, dem Rotor und dem Stator. Der Rotor ist aus zwei Flanschringen gefertigt, wobei innerer- und äußerer Flanschring über vier kurze Balken (im Doppel-T-Profil) miteinander verbunden sind. Wird zwischen den Flanschringen ein Drehmoment eingeleitet, entstehen in den Balken Scherspannungen, die über mehrere exakt positionierte DMS erfasst werden [1]. Die DMS und weitere zusätzliche Kompensationselemente sind dabei zu einer DMS-Vollbrücke so verschaltet, dass ein möglichst großes Messsignal zur Verfügung steht und Messfehler durch parasitäre Einflüsse wie Temperatur, Drehzahl oder zusätzliche Querbelastungen und Biegemomente nahezu komplett kompensiert werden. Die Rotorelektronik ist zentrisch im Flansch untergebracht und beinhaltet die notwendigen Komponenten für die Erzeugung der Brückenspeisespannung sowie für die berührungslose Messsignalübertragung [2].

Der Stator besteht im Wesentlichen aus dem für die Energie- und Messsignalübertragung notwendigen teilbaren Antennenring und dem Gehäuse für die Statorelektronik. Je nach Wahl der Statorelektronik stehen unterschiedliche Ausgangssignale für das Drehmoment zur Verfügung. In der in Abschnitt 4 beschriebenen Anwendung wurde aus den genannten Gründen ein frequenzmoduliertes Ausgangssignal gewählt. Es steht als Rechteckspannung im Bereich  $10 \pm 5$  kHz (asymmetrisch 12 V oder symmetrisch 5 V, komplementär nach RS422) zur Verfügung und kann über weite Strecken (maximal 80 m) störsticher übertragen werden.

Die Energie- und Messsignalübertragung vom Stator auf den Rotor erfolgt über induktive Kopplung absolut berührungslos. Somit arbeitet der Flansch ohne zusätzliche Lager oder Schleifringe völlig wartungsfrei.

#### 3.1.2 Realisierung der Drehzahlmessung

Die Drehzahlmessung ist im Drehmomentensensor integriert und bietet somit optimale Voraussetzungen für eine exakte Bestimmung der mechanischen Leistung. Verwendet wird dabei eine metallische Inkrement-

scheibe mit maximal 720 Inkrementen, die optional am Stator befestigt werden kann. Die Positionstoleranz der Inkremente ist dabei deutlich kleiner als 0,05 mm.

Die Schlitzscheibe wird durch ein im Stator untergebrachtes optisches Infrarot-Durchlichtsystem abgetastet, das gegen Streulicht unempfindlich ist und an seinem Ausgang zwei um 90° versetzte Rechteck-Impulsreihen für die Drehzahl- und Drehrichtungserfassung zur Verfügung stellt. Das Ausgangssignal kann dabei wahlweise als asymmetrisches (12 V) oder als symmetrisches (5 V, komplementär nach RS422) Rechtecksignal abgegriffen werden. Die robuste mechanische Ausführung sorgt für einen störungsfreien Betrieb auch bei hohen Drehzahlen und hält den Aufwand beim Einrichten in Grenzen. So sind auch mit montiertem Drehzahlmesssystem Axialverschiebungen von bis zu ±2 mm und Radialverschiebungen von bis zu ±1 mm zulässig.

Als nächster Schritt ist die Erweiterung der T10-Familie für andere spezielle Anwendungen geplant. Neue Features wie Null-Impuls, kleineres Rotorgewicht, Erhöhung des Drehzahlbereiches sowie weitere Verbesserungen im Temperaturverhalten lassen dann beispielsweise auch den Einsatz in Formel-1-Prüfständen zu.

### 3.1.3 Auswertesysteme

Die mit hoher Präzision ermittelten Daten können mit geeigneten Messverstärkern weiterverarbeitet werden. Hierfür stellt HBM eine breite Palette von geeigneten Systemen zur Verfügung. In einfacheren Anwendungen können dies Geräte für die Hutschienenmontage aus der Serie PME mit Analogausgang, CAN- oder Profibusanbindung sein. Für komplexere Prüfstandsanwendungen, bei denen mehrere Messgrößen absolut zeitgleich erfasst oder CAN-Bus-Daten z. B. von Motor oder Getriebe mit protokolliert werden müssen, empfiehlt sich der Einsatz eines Gerätes aus dem System MGCplus. Dieses System bietet zudem die Möglichkeit, Daten und Befehle zeitgleich und unabhängig voneinander sowohl über den Profibus DP und CAN-Bus als auch über das Ethernet zu übertragen, woraus sich gerade für hochautomatisierte Prüfstände Vorteile ergeben.

## 3.2 Technische Beschreibung des Power Analyzers

Mit dem Wide Band Power Analyzer D6000 von LEM Norma steht ein Gerät zur Verfügung, mit dem synchron bis zu sechs elektrische und vier mechanische Leistungen gemessen und weiter verarbeitet werden können. Das Gerät wurde in erster Linie für Anwendungen in der Antriebstechnik und Leistungselektronik entwickelt und optimiert. Die Berechnung aller Einzelwirkungsgrade und Einzelverluste geschieht online im gleichen Zeitraum wie die Messung der elektrischen und mechanischen Größen.

### 3.2.1 Arbeitsweise digitaler Leistungsmessgeräte

Moderne digitale Leistungsmessgeräte arbeiten – wie Digitalscopes –, indem sie das

zu messende Signal diskret abtasten. Anders als bei den Scopes, werden bei Leistungsmessgeräten zur Ermittlung der elektrischen Leistung die Abtastwerte der Signale Spannung und Strom miteinander multipliziert. Um ein richtiges Ergebnis der Leistung sicherzustellen, ist es notwendig, dass nur Samplewerte, die zu absolut gleicher Zeit aufgenommen wurden, miteinander multipliziert werden. Die Integration des berechneten Leistungssamplewerts  $p(t)$  ergibt dann die elektrische Wirkleistung:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) dt \quad (1)$$

mit

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (2)$$

### 3.2.2 Signalkurvenformen, Anstiegszeiten und Frequenzbereiche

Die Bedeutung der gleichzeitigen Abtastung ist bei niederfrequenten, sinusförmigen Signalen noch relativ gering. Eine relative Verschiebung der Signale untereinander durch nicht synchrones Abtasten ist in diesem Fall nur bei sehr kleinen Leistungsfaktoren kritisch, wenn die Verschiebung der Signale zueinander sowieso in Richtung 90° tendiert. Eine weitere Verschiebung durch eine Zeitverzögerung beim Abtasten kann hier praktisch zu beliebigen Fehlern führen. Das Ergebnis der Wirkleistungsrechnung ist nicht mehr zu gebrauchen.

Bei steiflankigen bzw. hochfrequenten Signalen in der Leistungselektronik sieht dies anders aus. Spannungs- und Stromkurvenformen sind hier verzerrt und oft sogar rechteckig, das heißt die Amplitude des Signals kann in einem Augenblick maximal und im nächsten schon Null sein. Es ist leicht vorstellbar, dass in diesem Fall ein nicht synchrones Abtasten von Spannung und Strom selbst bei großen Leistungsfaktoren zu hohen Fehlern in der Leistung führen kann.

In Bezug auf synchrones Abtasten und präzise Erfassung der Wirkleistung ist die Antriebstechnik noch relativ unkritisch. Durch Induktivitäten und Kapazitäten in der Motorwicklung ist zumindest der Strom relativ sinusförmig. Da nur Harmonische von Spannung und Strom gleicher Frequenz in der Wirkleistung resultieren, liegt in der Antriebstechnik ein Großteil der Wirkleistung im Bereich der Grundwellenfrequenz von Strom und Spannung. Diese Frequenz liegt meist im Frequenzbereich unter 1 kHz. Auch werden die Komponenten in der Antriebstechnik oft nur in Bezug auf die Effektivwerte der Grundwelle optimiert, da nur diese zu einem nutzbaren Drehmoment an der Motorwelle beitragen. Für eine genaue Verlustleistungsbetrachtung auch der Schaltverluste ist hingegen ein Messgerät notwendig, welches noch präzise im Bereich der Schaltfrequenz des Frequenzumrichters bzw. deren Harmonischen arbeitet. Die Schaltfrequenzen von modernen Umrichtern reichen heute bis zirka 25 kHz. Eine Untersuchung dieser Verluste ist vor allem dann ratsam, wenn der Motorstrom aufgrund geringer Impe-

danzen der Maschine sehr verzerrt ist, wie z. B. bei hochdynamischen Spindelantrieben oder Fahrtrieben mit hohem Anzugsmoment.

### 3.2.3 Kenngrößen breitbandiger Leistungsmessgeräte

Breitbandige Leistungsmessgeräte sind in den verschiedensten Genauigkeits- und Preisklassen am Markt verfügbar. Anhand der im Folgenden aufgezeigten Merkmale kann der Anwender feststellen, ob das jeweilige Leistungsmessgerät auch bei Anwendungen mit Frequenzumrichtern verwendet werden kann:

- **Amplitudengenauigkeit:** Die Amplitudengenauigkeit eines Messgerätes wird immer in Fehler vom Messwert plus Fehler vom Messbereich angegeben. Bei Messungen von Wechselsignalen, wie sie am Ausgang von Frequenzumrichtern auftreten, ist besonders auf einen geringen Messbereichsfehler zu achten, da ein Teil der Abtastwerte von Spannung und Strom in einem schlecht angesteuerten Bereich bzw. im Bereich der Nulldurchgänge der Signale liegt. Das Leistungsmessgerät D6000 hat eine Messbereichsgenauigkeit von 0,01%.

- **Bandbreite:** Ein Leistungsmessgerät für Umrichteranwendungen sollte eine Bandbreite von mindestens 100 kHz haben. Damit ist sicher gestellt, dass die Signalgrundwelle, deren Harmonischen und auch die Schaltfrequenz sicher gemessen werden. Die Bandbreite des Leistungsmessgeräts D6000 liegt bei zirka 2 MHz und übertrifft damit die Anforderungen bei weitem.

- **Phasenwinkelfehler der Eingänge und Wandler:** Der geringe Phasenwinkelfehler zwischen Spannung und Strom ist bei dem Leistungsmessgerät D6000 in erster Linie auf die eingesetzten Koaxialshunts zurückzuführen. Diese Wandler sind extrem kapazitäts- und induktivitätsarm. Sie vereinen eine sehr hohe Amplitudengenauigkeit mit einer minimalen Phasenverschiebung. So liegt der typische Phasenverschiebungswinkel des Messgeräts bei 100 kHz bei weniger als 0,1°.

- **Gleichtaktunterdrückung:** Die Gleichtaktunterdrückung ist ein Maß für den Einfluss von hochfrequenten kapazitiven Arbeitsströmen auf das Messergebnis. Bei dem Leistungsmessgerät D6000 wird durch die sogenannte Guard-Technik eine Gleichtaktunterdrückung von 135 dB bei 100 kHz erreicht. Der Guard ist ein zweiter Schirm, der verhindert, dass kapazitive Ableitströme über die Low-Leitung des Eingangsverstärkers fließen und dort einen Spannungsabfall hervorrufen, der vom Messgerät als Messsignal interpretiert wird.

Auf all diese Punkte ist zu achten, wenn ein Leistungsmessgerät die elektrische Leistung am Umrichteranschluss mit ausreichender Genauigkeit für eine Verlustleistungsberechnung an einem Elektromotor ermitteln soll.

### 3.2.4 Erfassung von Drehmoment und Drehzahl im Leistungsmessgerät

Wie schon erläutert, kann das Erfassen der mechanischen Leistung in Form von analogen Signalen im elektromagnetischen Wir-

kungsbereich von Frequenzumrichtern sehr problematisch sein. Bei dem Leistungsmessgerät D6000 wurden die Messkreise für die Erfassung dieser Signale so ausgelegt, dass als Eingangsgröße wahlweise ein Analogsignal oder ein Frequenzsignal genutzt werden kann. Das erlaubt dem Anwender, problemlos mit Messwellen zu arbeiten, die ein Analogsignal am Ausgang liefern. Bei Messungen in der Nähe von Frequenzumrichtern sollten jedoch vorzugsweise Drehmomentmesswellen mit Frequenzausgang eingesetzt werden. Der Eingang am Leistungsmessgerät muss dafür nur mit einem Softwareschalter umkonfiguriert werden.

Bei dem Leistungsmessgerät D6000 stehen insgesamt acht Eingänge für Drehmomente und Drehzahlen zur Verfügung. Es können also neben der synchronen Messung von sechs elektrischen Leistungen auch vier mechanische Leistungen im gleichen Zeitraum erfasst werden. Im Bereich der Antriebstechnik wird damit die Analyse aller Einzelwirkungsgrade und Einzelverluste von Frequenzumrichter, Elektromotor und Getriebe eines Antriebsstranges mit einer Messung ermöglicht.

Neben der mehrphasigen Messung der elektrischen Leistung und der mehrfachen Erfassung mechanischer Leistungen bietet das Leistungsmessgerät unter anderem noch folgende Funktionen:

- harmonischen Analyse der elektrischen Signale von Spannung, Strom und Wirkleistung (Option),
- x/y- und y/t- Darstellung der Messwerte,
- Darstellung der Signalkurvenformen von Spannung und Strom,
- Formeleditor zum Rechnen mit Messwerten (Online-Anzeige) sowie
- dynamische Luftspaltdrehmomentberechnung (Option).

#### 4 Verlustleistungsbestimmung am Startergenerator-System

Viele namhafte Automobilzulieferer arbeiten derzeit am Konzept und der praktischen Realisierung von Kurbelwellen-Startergeneratoren (CSG, Crankshaft Starter Generator). Die Sachs AG in Schweinfurt,

ein bekannter Hersteller von Komponenten für den Kfz-Antriebsstrang, hat ihr Produkt, den DynaStart, bereits auf der IAA 1999 einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt.

Der Kurbelwellen-Startergenerator des Typs DynaStart verbindet die Funktionen von Starter und Generator in einer Maschine und bietet damit eine gewichts- und raumsparende Lösung. Direkt im Antriebsstrang integriert übernimmt er vielfältige Aufgaben wie

- Energieversorgung im 42-V-Bordnetz,
- automatische Start-Stopp-Funktion,
- Boosterbetrieb beim Beschleunigen,
- Rückgewinnung von Bremsenergie (Rekuperation) und
- Schwingungsdämpfung im Antriebsstrang.

Vom Bauprinzip her ist der Sachs DynaStart eine permanent erregte Synchronmaschine, deren Drehzahl und Leistung über moderne Frequenzumrichter geregelt wird. Die Funktionsnachweise des CSG wurden in enger Zusammenarbeit mit vielen Entwicklungspartnern in umfangreichen Prüfstandtests und in diversen Prototypfahrzeugen bereits erbracht. Dabei werden gerade bei den Tests an dem eigens dafür entwickelten Prüfstand hohe Anforderungen an die Leistungsmesstechnik gestellt (**Bild 2**). Während im Startfall sehr hohe Ströme und Drehmomentwerte gemessen werden müssen, sind diese Größen im generatorischen Fall relativ klein. Neben den bereits erwähnten Problemen bei der Leistungsmessung an pulswechselrichterbetriebenen Systemen stellen diese großen Messbereiche in Kombination mit Komponentenwirkungsgraden bis 98% eine große messtechnische Herausforderung dar. Zusätzlich herrschen im Prüfraum erschwerte EMV-Bedingungen. Während das zu prüfende System selbst EMV-technisch unkritisch ist, wird der Prüfraum im Wesentlichen durch die benötigte Peripherie wie Belastungsmaschine, Bordnetzsimulator, Kühl- und Heizsysteme, welche alle leistungselektronisch geregelt werden, beeinflusst.

Sonst für die Messwernerfassung übliche Gleichspannungssignale ( $\pm 5$  V bzw.  $\pm 10$  V) an hochohmigen Verstärkereingängen sind

unter diesen Umgebungsbedingungen absolut ungeeignet und können in der Regel nicht ausreichend abgeschirmt werden. HBM und LEM tragen diesen Anwendungen Rechnung und haben ihre Komponenten im akkreditierten Prüflabor getestet und in Sachen elektromagnetischer Verträglichkeit optimiert. Sie gewährleisten damit die sichere Einhaltung der EG-Richtlinie 89/336/EWG (elektromagnetische Verträglichkeit) und ermöglichen somit genaue Untersuchungen auch unter schwierigsten EMV-Bedingungen.

#### 5 Ausblick

Elektrische Antriebe und neuartige Generatoren spielen in Kraftfahrzeugen der Zukunft eine immer wichtigere Rolle. Eine Optimierung dieser Komponenten hilft Kosten und unersetzbare Rohstoffreserven sparen. Vor allem bei Messungen an Motoren mit sehr hohem Wirkungsgrad und an Motoren, die an Frequenzumrichtern betrieben werden, sind die Anforderungen an die Messtechnik sehr hoch. HBM und LEM haben sich dieser Herausforderung gestellt und bieten mit ihren Komponenten neue Möglichkeiten zur Bestimmung des Gesamtwirkungsgrades von Frequenzumrichtern, Motoren und Getrieben.

##### Literaturhinweise:

[1] Schicker, R.: Drehmoment-Messflansch nach dem Prinzip der Scherkraftmessung am Doppel-T-Profil. Sensoren, Aufnehmer und Systeme 2000, b-Quadrat-Verlag, 2000, ISBN 3-933609-05-4

[2] Quass, M.; Schicker, R.: Neues Messprinzip revolutioniert die Drehmomentmesstechnik. antriebs-technik 34 (1995), Nr.4, S. 76–80