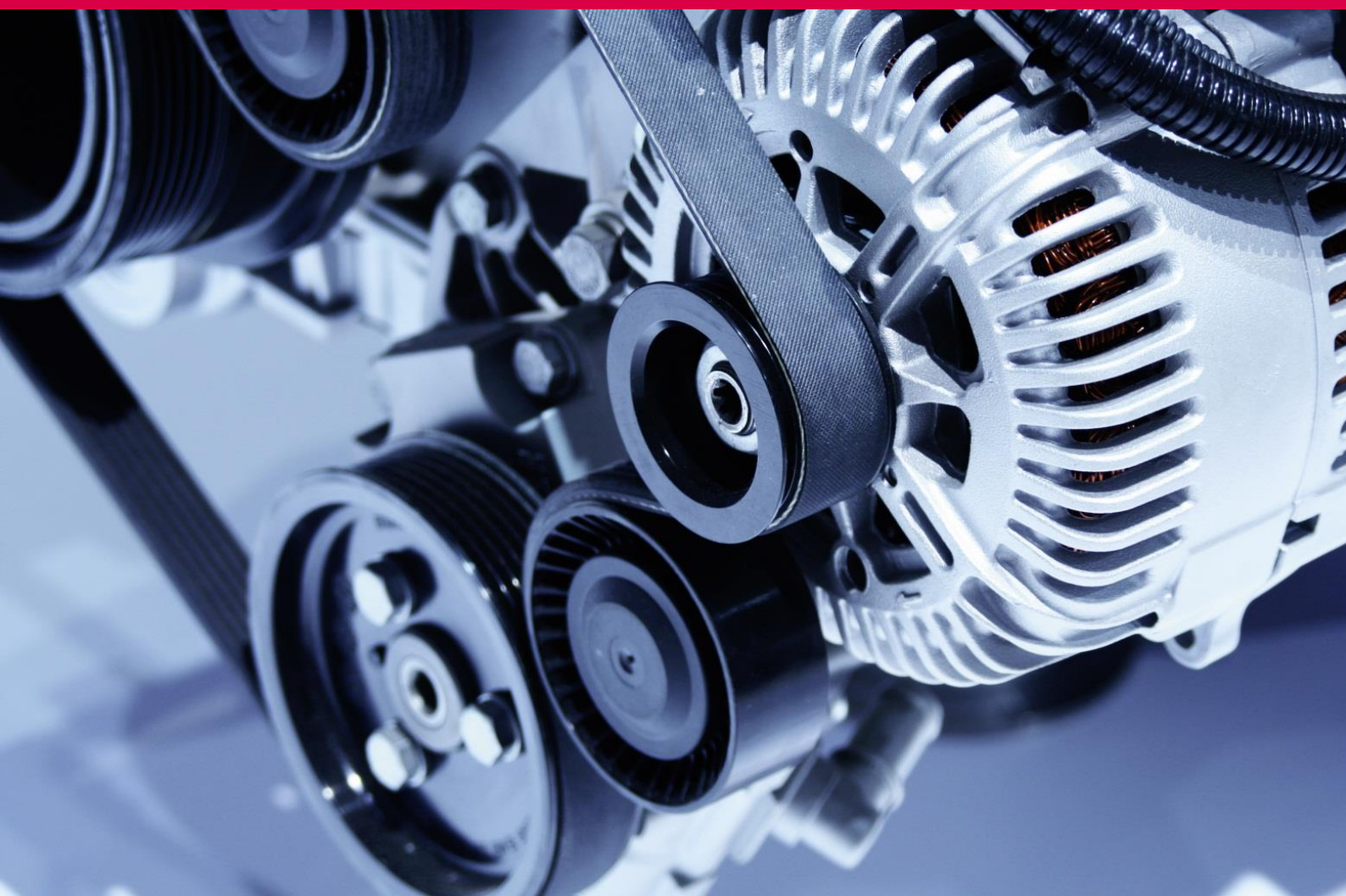


## Worauf man bei Messungen an Hybridmotoren achten muss

White Paper



Im Bereich der Kraftfahrzeuge werden zunehmend Hybridantriebe interessant.

Diese Antriebsform verfügt neben einem konventionellen Verbrennungsmotor zusätzlich über einen Elektromotor. Die Speisung des Elektromotors und die Rückspeisung bei Bremsvorgängen erfolgt dabei über Batterien, die üblicherweise eine Spannung von mehreren hundert Volt aufweisen können.

Ein messtechnisches Problem entsteht bei Messungen einzelner, kaskadierter Zellenspannungen. Zwar betragen die Zellenspannungen üblicherweise nur wenige Volt, jedoch entsteht durch die Hintereinanderschaltung der Zellen ein hohes Spannungsniveau, auf dem die Zellenspannung gemessen werden muss. Dieses Whitepaper zeigt, worauf bei solchen Messaufgaben zu achten ist und hilft, den geeigneten Messverstärker auszuwählen.

Die Thematik wird dabei aus Sicht des Anwenders und nicht des Entwicklers von Verstärkern betrachtet.

## Was ist Gleichtaktspannung?

Am nachfolgenden einfachen Beispiel soll erläutert werden, was sich hinter dem Begriff der Gleichtaktspannung verbirgt. Betrachtet man eine Spannungsquelle, bestehend aus 3 V-Zellen und will man die Zelle deren Minuspol auf 300 V liegt messen, so liegt der negative Eingang des Messverstärkers auf 300 V und der positive Eingang auf 303 V.

Unter der Gleichtaktspannung  $U_{GL}$  wird der Mittelwert der Spannungen an den Verstärkereingängen verstanden. Im dargestellten Beispiel (Abb. 1) beträgt die Gleichtaktspannung  $U_{GL} = 301,5$  V. Der Messverstärker hat nun die Aufgabe, die zwischen seinem Plus- und Minuseingang anliegende Spannung von 3 V korrekt zu messen, ohne sich von der Gleichtaktspannung beeinflussen zu lassen.

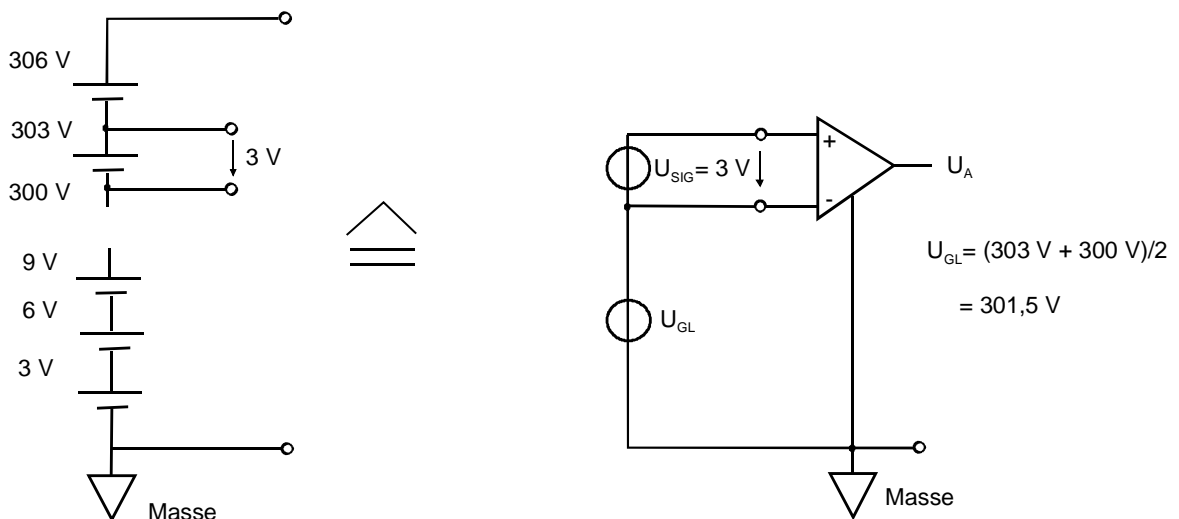


Abb. 1:  
Entstehung von Gleichtaktspannungen an einer Batterie

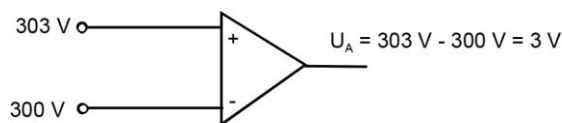


Abb. 2: Der Differenzverstärker subtrahiert die Spannungen zwischen Plus- und Minuseingang

Die  $U_{GL} = 301,5$  V muss eliminiert werden. Hätte der Differenzverstärker (Subtrahierer) eine Unsicherheit von lediglich 0,1%, so würde dies einen Fehler von ca. 0,3 V bedeuten.

Bezogen auf den 3 V-Bereich wäre dies ein relativer Fehler von 10%!

Die Unterdrückung von  $U_{GL}$  wird CMRR genannt.

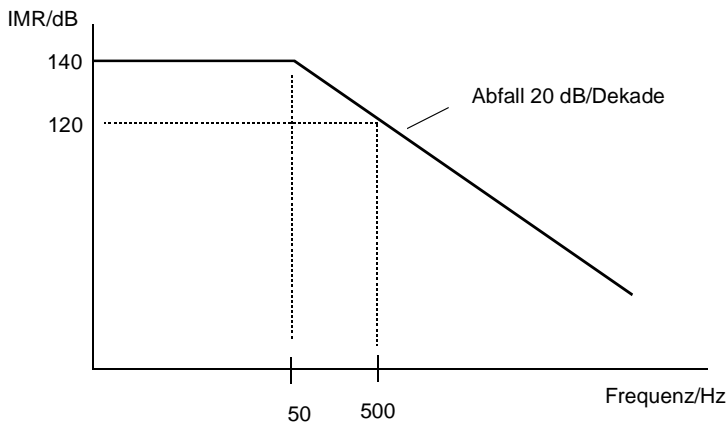


Abb. 3: CMRR als Funktion der Frequenz

Wie das Beispiel an Abb. 2 Bild zeigt, müsste die Differenz mit einer extrem kleinen Unsicherheit ermittelt werden, um die 3 V hinreichend genau messen zu können. Bei Verstärkern wird die Fähigkeit, Gleichtaktspannungen zu unterdrücken, üblicherweise als CMRR (Common Mode Rejection Ratio) bezeichnet. Die Ausgangsspannung  $U_A$  ergibt sich in diesem Fall zu:

$$U_A = U_{SIG} + U_{GL} / CMRR$$

Gute Verstärker unterdrücken Gleichtaktspannungen mit 120 dB (Faktor 106), sehr gute erreichen bis zu 140 dB (Faktor 107). Zu beachten ist allerdings, dass diese CMRR meist nur für 50/60 Hz angegeben wird. Typischerweise wird die CMRR mit höherer Frequenz der Gleichtaktspannung geringer.

Dies ist besonders zu beachten, da bei Hybridantrieben neben der Gleichspannungsbatterie ein Wechselrichter zur Ansteuerung des Elektromotors zwischengeschaltet ist. Stammt die Gleichtaktspannung vom Wechselrichter, so kann davon ausgegangen werden, dass die im Wechselrichter vorhandenen Frequenzen im kHz-Bereich liegen und die CMRR für solche Signale wesentlich geringer ist. Beispielsweise beträgt die CMRR im obigen Bild bei 50 kHz nur noch 80 dB.

Die CMMR nimmt mit 20 dB/Dekade ab. Dies bedeutet, dass bei 10-fach höherer Frequenz die CMMR um den Faktor 10 (20 dB) abnimmt.

### Isolierte Verstärker

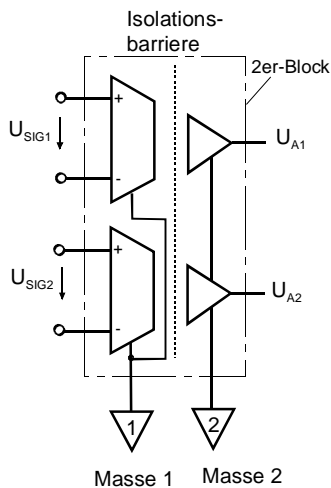
Bei Messungen an hohen Spannungen werden sehr häufig isolierte Verstärker eingesetzt. Einerseits soll Schaden an der Messeinrichtung vermieden werden und andererseits ist der Schutz von Personen zu gewährleisten. Besonders hohe Gleichspannungen, wie sie beispielsweise bei Batterien für Hybridautos vorhanden sind, können für Menschen bei Berührung gefährlich werden.

Bei Isolationsverstärkern ist zwischen solchen zu unterscheiden, die eine Blockisolierung aufweisen und solchen, bei denen jeder Kanal einzeln isoliert ist.

In Abb. 4 ist eine Blockisolation für zwei Kanäle dargestellt. Die Eingangsspannungen  $U_{SIG1}$  und  $U_{SIG2}$  beziehen sich jeweils auf die Masse 1. Beispielsweise darf keine der vier Eingangsleitungen eine höhere Potentialdifferenz als 10 V gegenüber Masse 1 aufweisen. Zwischen den Massen 1 und 2 sei dagegen eine Potentialdifferenz von 1000 V (Trennungsspannung oder Isolationsspannung) zulässig. Diese Form der Anordnung führt für den Anwender sofort zu der Frage, ob er die Masse 1 an einen der beiden Eingänge anschließen soll, oder ob er die Masse 1 ohne Bezug „floaten“ lassen soll. Schließlich haben seine anzuschließenden Sensoren, die die Spannungen  $U_{SIG1}$  und  $U_{SIG2}$  abgeben, üblicherweise nur zwei und nicht drei Anschlussleitungen. Eine allgemeingülti-

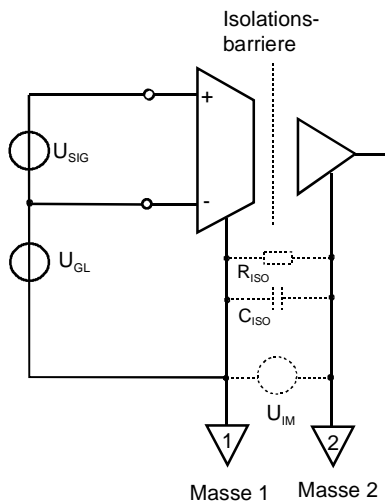
ge, zufrieden-stellende Antwort kann bezüglich des Anschlusses der Masse 1 nicht gegeben werden. Häufig erweist es sich aber als günstiger, die Masse 1 festzulegen.

Um die Verhältnisse bei blockisolierten Verstärkern zu verstehen, wird in Abb. 5 ein Modell verwendet, das für einen Kanal dargestellt



ist.

Abb. 4: Blockisolierung bei zwei Eingängen



$U_{IM}$  = Potentialdifferenz zwischen Masse 1 und Masse 2

$R_{ISO}$  = Parasitärer Isolationswiderstand

$C_{ISO}$  = Parasitäre Kapazität

Abb. 5: Modell bei Blockisoliation

Auf der Seite der Messquelle, deren Spannung  $U_{SIG}$  über die Gleichtaktspannung  $U_{GL}$  mit der Masse 1 gekoppelt ist, gilt das bereits vorher gesagte. Im Messverstärker selbst wird z.B. durch magnetische oder optische Kopplung eine galvanische Trennung geschaffen, die die gewünschte Isolationsbarriere realisiert. Zwischen den Massen 1 und 2 kann eine zusätzliche Spannung  $U_{IM}$  vorhanden sein, die die in den technischen Daten angegebene Trenn- oder Isolationsspannung nicht überschreiten darf. Die Unterdrückung der Spannung  $U_{IM}$  wird in Datenblättern als IMR (Isolation Mode Rejection) angegeben. In solch einem Falle ergibt sich die Ausgangsspannung zu:

$$U_A = U_{SIG} + U_{GL} / CMRR + U_{IM} / IMR$$

Werden die Kanäle einzeln isoliert aufgebaut, was natürlich mit erheblich höheren Kosten verbunden ist (jeder Kanal benötigt eine separate Versorgung), so kann der Minuseingang des Verstärkers auf Masse 1 gelegt werden. Dies geschieht durch den Hersteller und ist daher vom Anwender nicht weiter zu beachten. Bei mehreren Kanälen ist dann jeder Kanal gegen jeden anderen Kanal und alle gegenüber der Masse 2 isoliert.

In diesem Fall wird der Verstärker im sogenannten Single-Ended-Mode genutzt. Dadurch kann sich auf der Eingangsseite des Verstärkers keine Gleichtaktspannung ergeben und die Ausgangsspannung  $U_A$  ergibt sich in diesem Fall zu:

$$U_A = U_{SIG} + U_{IM} / IMR$$

Was also bei nichtisolierten Verstärkern die CMRR ist, ist bei einzeln isolierten Verstärkern die IMR. Für Einzel- und Blockisolation ist zu beachten, dass eine ideale Trennung zwischen den Massen nur für Gleichspannungsunterschiede vorhanden ist.

Während der parasitäre Isolationswiderstand recht hoch sein kann ( $10^{12} \Omega$ ), ist der Einfluss

der parasitären Kapazität  $C_{ISO}$  bei hohen Frequenzen nicht zu vernachlässigen. Nimmt man beispielsweise eine geringe Kapazität von lediglich 10 pF an, so ergibt sich für eine Signalfrequenz von  $f = 1$  MHz ein kapazitiver Widerstand von  $X_f = 1/(2 \pi f C_{ISO}) = 15,9$  k  $\Omega$ . Praktisch bedeutet dies, dass die Trennwirkung für hohe Frequenzen immer geringer wird.

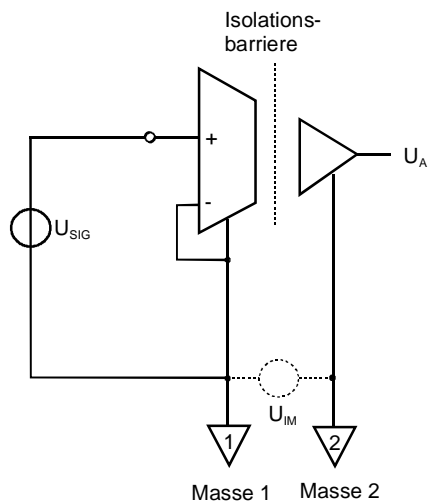


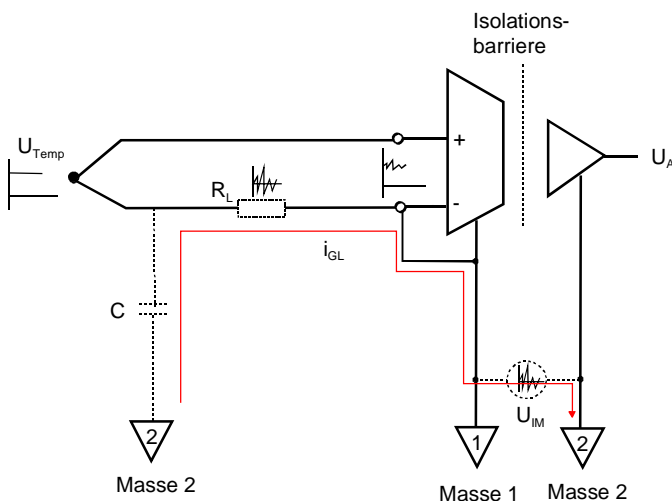
Abb. 6: Einzel isolierter Kanal

## Isolationsspannung gleich Prüfspannung?

In den Datenblättern der verschiedenen Hersteller von isolierten Verstärkern taucht eine Vielzahl von Begriffen auf, die für den Anwender nur schwer nachzuvollziehen sind. Einerseits gibt es die Isolationsspannung  $U_{ISO}$  (maximal zulässige Spannung  $U_{IM}$ ), die zwischen den Massen vom Anwender maximal angelegt werden darf und andererseits gibt es die Prüfspannung  $U_{Prüf}$ . Der Hersteller prüft jeden Kanal vor Auslieferung mit einer Prüfspannung, die wesentlich höher ist als die zu haltende Isolationsspannung. Diese Spannung  $U_{Prüf}$  ist z.B. nach der amerikanischen UL-Spezifikation.

$$U_{Prüf} = 2 U_{ISO} + 1000 \text{ V}$$

wobei die Spannung für 60 s anliegen muss und ein minimaler Strom nicht überschritten werden darf. Entsprechend des Personenschutzes werden auch Schutzklassen CAT I bis III definiert, die jeweils unterschiedliche Prüfspannungen erforderlich machen.



$R_L$  = Leitungswiderstand  
 $i_{GL}$  = Gleichtaktstrom  
 $C$  = Koppelkapazität Thermoelement-Masse 2

Abb. 7: Isolierte Temperaturmessung

## Isoliert mein nicht unbedingt problemfrei

Abschließend soll an einem kleinen Beispiel der Temperaturmessung mit einem Thermoelement gezeigt werden, dass auch bei isolierten Messungen Störprobleme auf Grund von Potentialunterschieden auftreten können. Hierzu soll Abb. 7 betrachtet werden.

Beispielsweise soll ein Thermoelement leitend mit einem elektronischen Bauelement eines Wechselrichters bei einem Hybridfahrzeug gekoppelt sein. Zwischen den beiden Massen ist also eine Spannung  $U_{IM}$  vorhanden, die sich sehr rasch ändern kann. Hier sind Änderungsgeschwindigkeiten von mehreren  $100 \text{ V}/\mu\text{s}$  nicht selten. Um die Auswirkungen deutlich zu machen, sei in unserem Beispiel angenommen, dass sich die Spannung  $U_{IM}$  mit  $dU_{IM}/dt = 100 \text{ V}/\mu\text{s}$  ändern soll. Als Kapazität zwischen Thermoelement und Masse 2 soll ein Wert von lediglich  $C = 5 \text{ pF}$  angenommen werden. Damit ergibt sich der Strom durch den Kondensator bei der Annahme, dass  $U_{IM}$  nahezu vollständig über dem Kondensator abfällt zu:

$$i_{GL} = C \, dU_{IM}/dt = 5 \text{ pF} \, 100\text{V}/\mu\text{s} = 0,5 \text{ mA}$$

Wird für den Widerstand  $R_L$  ein Wert von  $1\Omega$  angenommen (entspricht einer Leiterlänge von ca. 1 m), so ergibt sich ein Spannungsab-

fall von 0,5 mV. Bedenkt man, dass bei einem Thermoelement des Typ K eine Spannung von ca.  $40 \mu\text{V}/\text{K}$  erzeugt wird, entspricht der Spannungsabfall an  $R_L$  bereits einem Messfehler von mehr als 10 K, denn am Eingang des isolierten Verstärkers wird die Summe der Spannung vom Thermoelement und dem Spannungsabfall  $R_L$  gemessen.

Dass das geschilderte Problem häufig bei praktischen Messungen nur in abgemilderter Form auftritt liegt daran, dass auch auf der oberen Leitung des Thermoelementes (+ Eingang des Verstärkers) ebenfalls ein Widerstand und eine Kapazität nach Masse vorhanden ist.

Wären beide RC-Kombinationen gleich groß, so würden sich die Effekte bei der Differenzbildung im Verstärker subtrahieren. Leider sind bei Thermoelement-Messungen die Leitungen, aus denen das Thermoelement aufgebaut ist, aus unterschiedlichem Material mit stark unterschiedlichen Widerständen.

Das geschilderte Problem tritt aber nicht nur bei isolierten Verstärkern auf. Auch bei nicht isolierten Differenzverstärkern kann eine vorhandene Gleichtaktspannung ähnliche Effekte hervorrufen.

Autor: Prof. Dr.-Ing. Klaus Metzger

## Weitere Informationen erhalten Sie unter:

### imc Test & Measurement GmbH

Voltastr. 5  
D-13355 Berlin

Telefon: +49 (0)30-46 7090-0  
Fax: +49 (0)30-46 31 576  
E-Mail: [hotline@imc-tm.de](mailto:hotline@imc-tm.de)  
Internet: <http://www.imc-tm.de>

Die imc Test & Measurement GmbH ist Hersteller und Lösungsanbieter von produktiven Mess- und Prüfsystemen für Forschung, Entwicklung, Service und Fertigung. Darüber hinaus konzipiert und produziert imc schlüsselfertige Elektromotorenprüfstände. Passgenaue Sensor- und Telemetriesysteme ergänzen unser Produktportfolio.

Unsere Anwender kommen aus den Bereichen Fahrzeugtechnik, Maschinenbau, Bahn, Luftfahrt und Energie. Sie nutzen die imc-Messgeräte, Softwarelösungen und Prüfstände, um Prototypen zu validieren, Produkte zu optimieren, Prozesse zu überwachen und Erkenntnisse aus Messdaten zu gewinnen. Rund um die imc Geräte steht dafür ein umfassendes Dienstleistungsspektrum zur

Verfügung, das von der Beratung bis zur kompletten Prüfstandsautomatisierung reicht. Auf diese Weise verfolgen wir konsequent das imc Leistungsversprechen „produktiv messen“.

National wie international unterstützen wir unsere Kunden und Anwender mit einem starken Kompetenz- und Vertriebsnetzwerk.

Wenn Sie mehr über die imc Produkte und Dienstleistungen in Ihrem Land erfahren wollen oder selbst Distributor werden möchten, finden Sie auf unserer Webseite alle Informationen zum imc Partnernetzwerk:

<http://www.imc-tm.de/partner/>



#### Nutzungshinweis:

Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Dieser Bericht darf ohne Genehmigung weder bearbeitet, abgewandelt noch in anderer Weise verändert werden. Ausdrücklich gestattet ist das Veröffentlichung und Vervielfältigen des Dokuments. Bei Veröffentlichung bitten wir darum, dass der Name des Autors, des Unternehmens und eine Verlinkung zur Homepage [www.imc-tm.de](http://www.imc-tm.de) genannt werden. Trotz inhaltlicher sorgfältiger Ausarbeitung, kann dieser Bericht Fehler enthalten. Sollten Ihnen unzutreffende Informationen auffallen, bitten wir um einen entsprechenden Hinweis an: [marketing@imc-tm.de](mailto:marketing@imc-tm.de). Eine Haftung für die Richtigkeit der Informationen wird grundsätzlich ausgeschlossen.