



LMG600 Series Applikation:

Traktionsumrichter
und dessen
Hochfrequenz-
Leistungsverluste im
elektrischen
Antriebsstrang

v1.2

ZES ZIMMER – THE EXPERTS IN PRECISION POWER ANALYSIS

Wirkungsgradmessung am Traktionsumrichter – Direktes Bestimmen der HF-Leistungsverluste mittels DualPath und Skripteditor

Die 2010er Jahre waren für die Elektromobilität und dessen Technologie eine Schlüsseldekade. In dieser konnten inzwischen, durch entscheidende Fortschritte in der Forschung & Entwicklung der Halbleiter- und Materialwissenschaft, sowie gestiegene Markttauglichkeit, höchste Antriebseffizienz und entsprechend hohe Reichweite erzielt werden. Insbesondere die Hauptkomponenten des elektrischen Antriebsstrangs eines Elektrofahrzeugs (EV - Electric Vehicle), wie Traktionsumrichter und elektrische Maschine, müssen hier optimal miteinander agieren. Nur dies ermöglicht höchste Effizienz und optimale Fahrdynamik.

Hersteller und Systemintegratoren stehen hier vor der Herausforderung der idealen Ansteuerung der Leistungshalbleiter für den Wandlungsprozess des Traktionsumrichters, optimiert auf die individuelle elektrische Maschine und den Fahrbetriebspunkt. Ziel ist es, eine stets über das Fahrprofil optimale Energiebilanz sicherzustellen. Dies bei geringster Rückwirkung auf die Mechanik (Fahrdynamik und Akustik). Zudem soll dieses gleichermaßen symmetrisch in bidirektionaler Energieflussrichtung (Rekuperation im Bremsprozess) geschehen.

Herausforderung für Hersteller und Systemintegratoren:

- Hohe Fahrdynamik (geregelt Drehmoment)
- Hohe Effizienz (bidirektional) (spiegelt Reichweite wider)
- Optimale Akustik (positive subjektive Geräuschbewertung)
- Geringe Rückwirkung auf Mechanik (Vibration)

Der Wandlungsprozess eines Traktionsumrichters ist jedoch mit verschiedenen Verlustmechanismen verbunden, insbesondere solchen, die durch die Hochfrequenz-Schaltvorgänge der Leistungshalbleiter entstehen. Diese Verluste bedingt durch Ansteuerungsverfahren auf Basis der Pulsweitenmodulation (PWM). Resultierende Schaltvorgänge prägen dem Antriebssystem Oberwellen und hochfrequente Spannungs- und Stromanteile auf, die nicht direkt zur Erzeugung von Drehmoment beitragen, sondern Leistungsverluste verursachen und das elektromagnetische Umfeld des Fahrzeugs beeinflussen. Einige dieser Verluste und Verlustmechanismen sind folgend aufgeführt.



Themen

- Welche Anteile im Leistungsspektrum eines Traktionsumrichters gibt es?
- Wie wirken sich diese Anteile individuell auf das Antriebssystem und die Traktionsmaschine aus?
- Warum HF-Leistungsanteile im Spektrum getrennt analysieren?
- Wie misst man die Leistung am Umrichter Ausgang?
- Wie trennt und misst man das HF-Leistungsspektrum?
- Was ist die LMG600 DualPath-Architektur?
- Welche Parameter eines Leistungsmessgeräts sind zu berücksichtigen?

Typische Verluste und Verlustmechanismen durch HF-Anteile sind:

- Wicklungs-Kupferverluste und Eisenkernverluste des Motors
- Leckströme und einhergehende Isolationsschäden im Motor
- Schaltverluste und Verlustwärme in den Halbleitern im Umrichter

Um obigen Herausforderungen an das Antriebssystem Genüge zu tun, bieten sich unter anderem nachstehende Lösungen zur Optimierung.

Lösung für Hersteller und Systemintegratoren:

- Effizientes Ansteuerverfahren des Traktionsumrichters (Vektorregelung, Raumzeigermodulation)
- Variable Schaltfrequenz (je nach Betriebspunkt)
- Adaptive Anpassung der Flankensteilheit (du/dt) der PWM-Spannung

Wie lässt sich nun die Wirkung obiger Maßnahmen auf optimierte Effizienz und Fahrdynamik des Antriebssystems verifizieren?

Dieser Applikationsbericht klärt jene Frage und beschreibt folgend im Speziellen die Vorgehensweise zur direkten Ermittlung der umrichterbedingten Hochfrequenz-Leistungsverluste eines elektrischen Antriebsstrangs, hier im Weiteren eines Elektrofahrzeugs, unter Verwendung des Leistungsanalysators LMG671.



Erkenntnis

Die Trennung und detaillierte Analyse der Hochfrequenz-Leistungsanteile sind von großer Bedeutung, um die Effizienz des gesamten Antriebsstrangs zu verifizieren und zu optimieren. Hier setzt unser LMG671 Leistungsmessgerät an, welches mit seiner DualPath-Technologie und messzyklischer Ausführung einer Codesequenz des integrierten Skripteditors die gezielte und direkte Trennung der Grundschwingungsleistung von den hochfrequenten Leistungsanteilen ermöglicht. Eine erhebliche Reduktion der Datenpostprozessierung wird folglich erzielt.

Anschaltung des LMG671 an das Prüfobjekt

Eine vollständigen Wirkungsgradvermessung am elektrischen Antriebsstrang erfolgt gängiger Weise durch Messen der elektrischen Leistung zwischen den jeweiligen Hauptkomponenten Hochvolt-Batterie (HV-Batterie), Traktionsumrichter und elektrische Maschine. Eine typische Anschaltung des LMG671 in die Strompfade des Prüfaufbaus ist in [Abbildung 1](#) dargestellt. Die einzelnen Stufen der Leistungsmessung folgen entsprechend gemäß dieser gezeigten Anschaltung. Wir messen schließlich im Folgenden:

- **Eingangsleistung** des Umrichters (DC/DC-Eingangsstufe)
- **Zwischenkreisleistung** des Umrichters (DC-Zwischenkreis)
- **Ausgangsleistung** des Umrichters (DC/AC-Ausgangsstufe) / Eingangsleistung der elektrischen Maschine

Umrichter

- **Mechanische Leistung** der elektrischen Maschine (Drehmoment- und Drehzahlsensor)

Motor

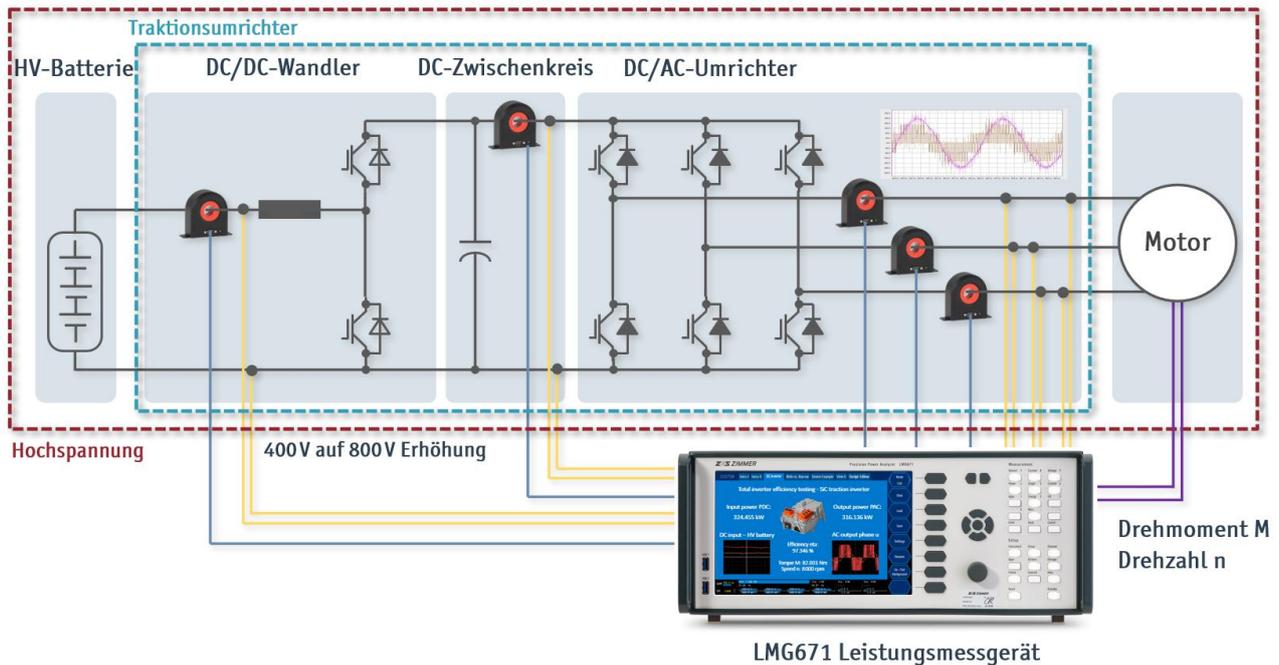


Abbildung 1: Anschaltung des LMG671 Leistungsmessgeräts an den elektrischen Antriebsstrang

Die Messung der Ströme in deren Signalform, Frequenz und Phase, sowohl auf DC- als auch auf der AC-Seite des Umrichters, bedarf einer hohen Genauigkeit, Linearität und Stabilität. Besonders am Umrichter Ausgang und Grundschwingungsfrequenzen von bis zu 1000Hz sind Stromsensoren mit geringste Phasenfehler unverzichtbar. Hier sollten Präzisions-Stromumsetzer unserer PCT-Serie eingesetzt werden, wie bspw. der PCT600¹, welche mittels Plug'n'Measure² zudem unmittelbar aus dem LMG671 heraus versorgt werden.

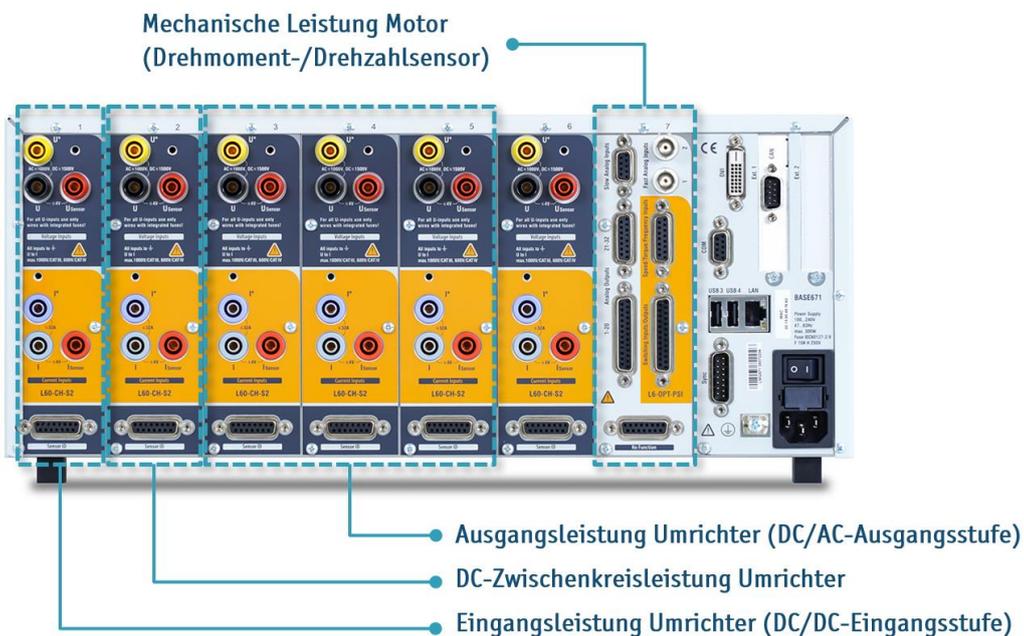


Abbildung 2: Anschluss und Gruppierung der LMG671 Messkanäle

¹ Der PCT600 Stromumsetzer bietet höchstgenaue Strommessung von bis zu 600Arms (1000Apeak) bei DC - 500kHz. Mehr unter: <https://www.zes.com/de/Produkte/Sensorik/PCT>

² Plug'n'Measure ermöglicht die direkte Versorgung des Sensors und ergänzt, mittels Sensorinformationsaustauschs zum Messgerät, das automatische Einstellen des Skalierfaktors und der Messbereiche. Mehr, siehe „Eigenschaften“ unter: <https://www.zes.com/de/Produkte/Praezisions-Leistungsmessgeraete/LMG671>



Erkenntnis

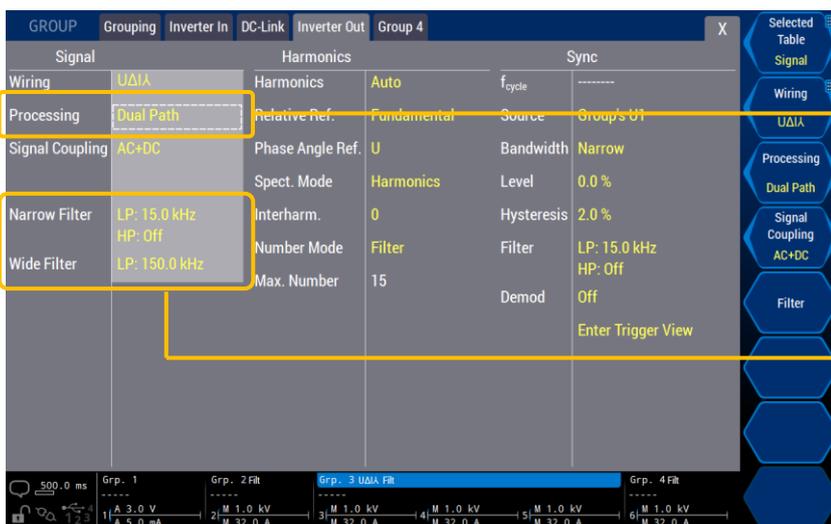
Das LMG671 ermöglicht mit seinen 7 verfügbaren Slots die modulare Ausstattung mit bis zu 7 Leistungsmesskanälen (Typ A/B/C/S) und bis zu 2 Prozess-Signal-Schnittstellen (PSI - Eine PSI belegt einen hierbei Slot). Auf diese Weise lassen sich alle wichtigen Messpunkte im elektrischen Antriebsstrang eines Elektrofahrzeugs, von Hochvolt-Batterie bis zum Umrichter Ausgang respektive der elektrischen Antriebsmaschine, an einem Gerät anschließen und auswerten. Eine vollständige Leistungs- und Wirkungsgradanalyse wird somit mit einem einzigen LMG671 möglich.

DualPath-Parametrisierung des LMG671

Typisch für unsere LMG600 Gerätefamilie ist das mächtige **GROUP**-Menü, in diesem die gezielte applikationsspezifische Parametrisierung des Leistungsmessgerät zur Verarbeitung der Messsignale erfolgt. Resultierend können somit plausible und präzise Messungen ausgeführt werden. Fokussieren wir uns hier auf die Messung der umrichterbezogenen Leistungen, sind wichtigste Schritte und Einstellungen:

- **Gruppierung³** der Leistungsmesskanäle gem. [Abbildung 2](#)
- **Messbereichswahl** und Setzen des optimalen Bereichsmodus (S-Kanal-spezifisch: AC, DC) pro Gruppe
- **Synchronisation** der einzelnen Gruppen
- **Anschaltung** inklusive, im Bedarfsfall, die zutreffende Abtastwerteumrechnung (Stern-Dreieck-Anschaltung im 3-Phasen-System)
- **Filter** zur Signalverarbeitung und -konditionierung für integrierte Messwerte und Berechnung der Harmonischen
- **Processing** zur simultanen Schmal- und Breitbandmessung der elektrischen Signale

Insbesondere der letzte oben aufgeführte Punkt **Processing** trägt hier eine hohe Gewichtung, da die **DualPath-Technologie** der LMG600-Serie im entsprechenden Modus, siehe Markierung in [Abbildung 3](#), zur in dieser Anwendung beabsichtigten Trennung der Grundschwingungs-, Schmal- und Breitbandleistungen befähigt.



Parametrisierung „Processing“ im Signalpfad
Definieren der Signalverarbeitung mittels DualPath

Parametrisierung „Filter“ im Signalpfad
Mit Dual Path Processing sind die Filter für Schmal- und Breitbandpfad individuell einstellbar

Abbildung 3: LMG671 GROUP-Menü zur Parametrisierung der Signalverarbeitung

³ Das Gruppieren der Messkanäle ermöglicht gruppenunabhängige Synchronisation, direkte anschlussabhängige Abtastwerteumrechnung (Star-Delta-Umrechnung) und direkte Berechnung der kollektiven Summengrößen.

DualPath beschreibt das simultane Abtasten (Zwei-A/D-Wandler-Prinzip) und Verarbeiten des Messsignals als Schmal- und Breitbandspektrum, sowohl im Strom- als auch im Spannungspfad eines Messkanals, siehe [Abbildung 4](#).

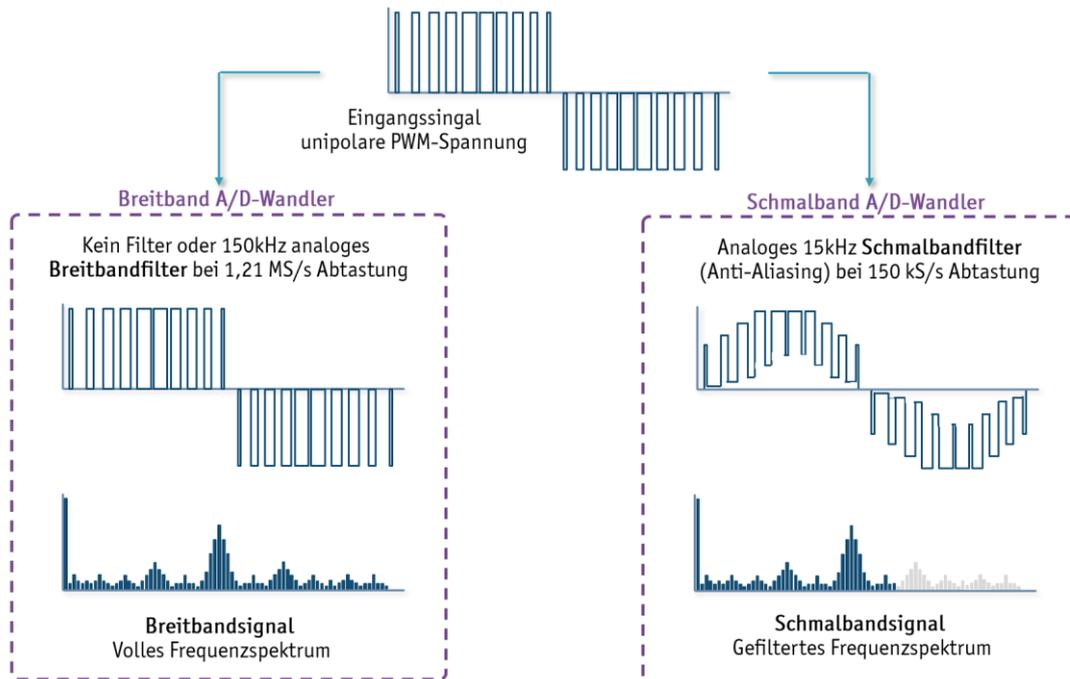


Abbildung 4: Schematische Darstellung der LMG600 Serie DualPath-Signalprozessierung

Das pulswellenmodulierte Spannungssignal, in [Abbildung 4](#) die bereits Dreieck- zu Sternspannung umgewandelte Ausgangsspannung des Umrichters, wird mittels DualPath nun in zunächst zwei Bandbreiten zur Messwertberechnung weiterverarbeitet, hier das Breit- und Schmalbandsignal. Das LMG671 bieten dem Anwender im Weiteren, durch integrierte Fast-Fourier-Transformation (FFT) als zusätzlich 3. Bandbreite, die ausschließlichen Grundschnungsmesswerte.

Gleiche DualPath-Verarbeitung geschieht zeitgleich für das Stromsignal. Daraus ergeben sich schließlich äquivalente Bandbreiten für das Leistungssignal. Das resultierende Trio der Bandbreiten bietet für weitere detaillierte Analyse und Messwertverarbeitung folgende Leistungsspektren am Umrichter Ausgang:

- **Volles Leistungsspektrum** bis zur 150kHz-Eckfrequenz des Breitbandfilters⁴ oder ungefiltert (Ausschöpfen der 10MHz analogen Bandbreite des S-Kanals).
- **Aliasing-freies Leistungsspektrum** bis zur 15kHz-Eckfrequenz des Schmalbandfilters
- **Grundschnungsleistung** aus der schnellen Fouriertransformation, angewendet auf das Aliasing-freie Leistungssignal des Schmalbandpfades



Hinweis

Das Berechnen der Harmonischen und schließlich der Grundschnungsleistung mittels FFT geschieht allgemein über ein definiertes Zeitfenster respektive eine definierte Anzahl von Signalperioden. Leistungsmessgeräte können ggf. hier prinzipbedingt unterschiedliche Zeitfenster für die FFT und zyklische Aktualisierungsrate (Integrationsintervall) der integrierten Messwerte aufweisen. Mit dem LMG671 kann gezielt und aufwandsarm Gleichheit und somit erhöhte Stabilität geschaffen werden. Mehr Informationen hierzu bietet das LMG600 Serie Benutzerhandbuch oder unser Applikationssupport.

⁴ Etwaige Störeinkopplungen in den Messaufbau, welche im einigen 100 kHz- oder MHz-Bereich liegen und die Gesamtleistungsmessung negativ beeinflussen könnten, werden durch Wahl des analogen 150 kHz-Breitbandfilters vermieden.



Erkenntnis

Das LMG671 mit dessen DualPath-Technologie ermöglicht dem Anwender das Messen der Umrichter Ausgangsleistung, hierbei simultan und getrennt für die Grundschiwingung (Aliasing-frei) des Schmalbandpfads und für das Breitband- oder Vollspektrum. Dies stellt die Basis für direkte Berechnen des umrichterbedingten Hochfrequenzspektrums.

Entgegen der doppelten nacheinander folgenden Messung der einzelnen Leistungsspektren, profitiert der Anwender somit von der Halbierung des Prüfdauer, der deutlichen Reduktion des thermischen und mechanischen Stresses auf den Prüfling und der Wahrung gleicher Testbedingungen.

Durch ideales Parametrisieren der Harmonischenberechnung lässt sich die Messung der Aliasing-freien Grundschiwingungsmesswerte in deren Stabilität, gegenüber des zyklischen Integrationsintervalls für die Messwerte, und Präzision optimieren.

Analyse der umrichterbedingten Hochfrequenzleistungsverluste

Nach erfolgter Parametrisierung des DualPath-Processings, ermöglicht im nächsten Schritt der integrierte Skripteditor⁵ durch mathematische Kalkulationen, die HF-Leistung respektive den HF-Leistungsverlustanteil des Traktionsumrichters zu berechnen. Hierbei wird typischerweise die Differenz aus der gemessenen Breit- und Grundschiwingungsleistung gebildet, wie nachfolgende Formel, wobei hier auf den Wirkanteil bezogen wird.

$$P_{hf} \cong P_{wide} - P_{fund}$$

Hochfrequenz-Leistung
Breitbandleistung
Grundschiwingungsleistung

Diese Formel wird schließlich im LMG600 Skripteditor geschrieben und installiert, siehe [Abbildung 5](#).

```

1 //Determining the HF-power of the wired
2 //traction inverter driving a PMSM
3 def{
4   Pfund = "W"
5   Pwide = "W"
6   Pnarrow "W"
7   Phf = "W"
8 }
9
10 Pfund = p3030?
11 Pnarrow = p3010?
12 Pwide = p3020?
13
14 Phf = abs(Pwide - Pfund)
15
16
17

```

Definition der Variablen

Skriptvariablen werden mit Einheiten definiert

Zuweisung von Messwerten

Skriptvariablen werden mit Messwerten belegt.

Berechnung der HF-Leistung

Anwendung von mathematischen Operationen

Abbildung 5: Skripteditor zur Berechnung der Hochfrequenz-Leistungsverluste am Umrichter Ausgang

Schließlich können im Anwendungsfall am elektrifizierten Antriebsstrang, wie hier eines Elektrofahrzeugs, zeiteffizient und höchstgenau alle 3 Leistungen für bestimmte Betriebspunkte gemessen und ausgewertet werden, wie bspw. bei konstanter Drehzahl und verschiedenen Drehmomenten. Dies wird sogar für den bidirektionalen Betrieb, sprich den

⁵ Der LMG600 Skripteditor umfasst eine Vielzahl möglicher mathematischer Operationen, Nutzung integrierter Funktionen, Schreibens ganzer Sequenzen einschl. gängiger Bedingungsabfragen (if-else) und Schleifen (for, do-while) im Stile bekannter Programmiersprachen wie Python. Weiter Information: <https://www.zes.com/de/Service/Downloads/Dokumente/Broschueren>

Beschleunigungsbetrieb und regenerativer Bremsbetrieb (Rekuperation durch Back EMF) ermöglicht, siehe [Diagramm 1](#). Durch Ergänzung der Messung um zusätzliches Drehmoment, Geschwindigkeit und schließlich mechanischer Leistung, können die hochfrequenten Leistungsverluste ebenfalls mit nachstehender Formel aus den Verlustleistungen des Motors berechnet werden, wie in [Diagramm 2](#) dargestellt.

$$P_{hf} \cong P_{lm_wide} - P_{lm_fund}$$

Hochfrequenz-Verlustleistung
Breitband Motorverlustleistung
Grundschw.-Motorverlustleistung

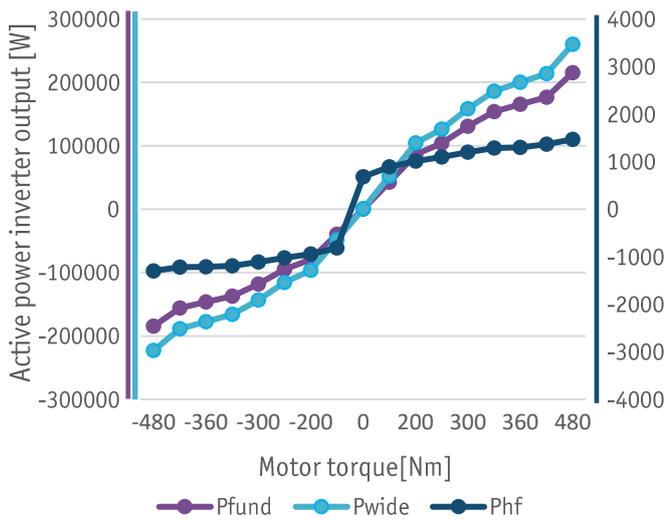


Diagramm 1: Wirkleistungen Umrichter Ausgang bei 4000 U/min, bidirektionaler Traktionsumrichter an Synchronmaschine

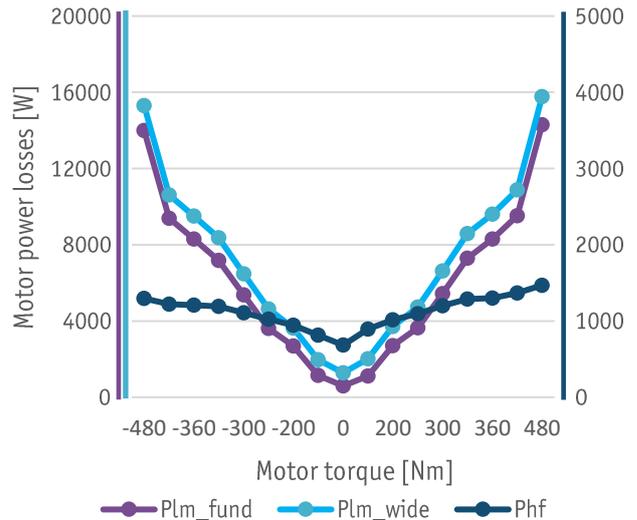


Diagramm 2: Motorverlustleistungen bei 4000 U/min, bidirektionaler Traktionsumrichter an Synchronmaschine

Für die Anwendung selbst bietet das LMG671 weiterhin die spezifische Erstellung und Anzeige eines eigenen auf seine Bedürfnisse zugeschnittene Messmenü, welches bereits während des Testens am angefahrenen Betriebspunkt das direkte Ablesen und Gegenprüfung der Messwerte und Signalformen erlaubt. Exemplarisch ist dies in [Abbildung 6](#) dargestellt. Scope-Signale lassen sich auch alternativ durch Plot-Diagramme substituieren oder ergänzen, um für den zu verifizierenden Betriebspunkt das thermische Einschwingen des Prüflings beobachtet werden kann.

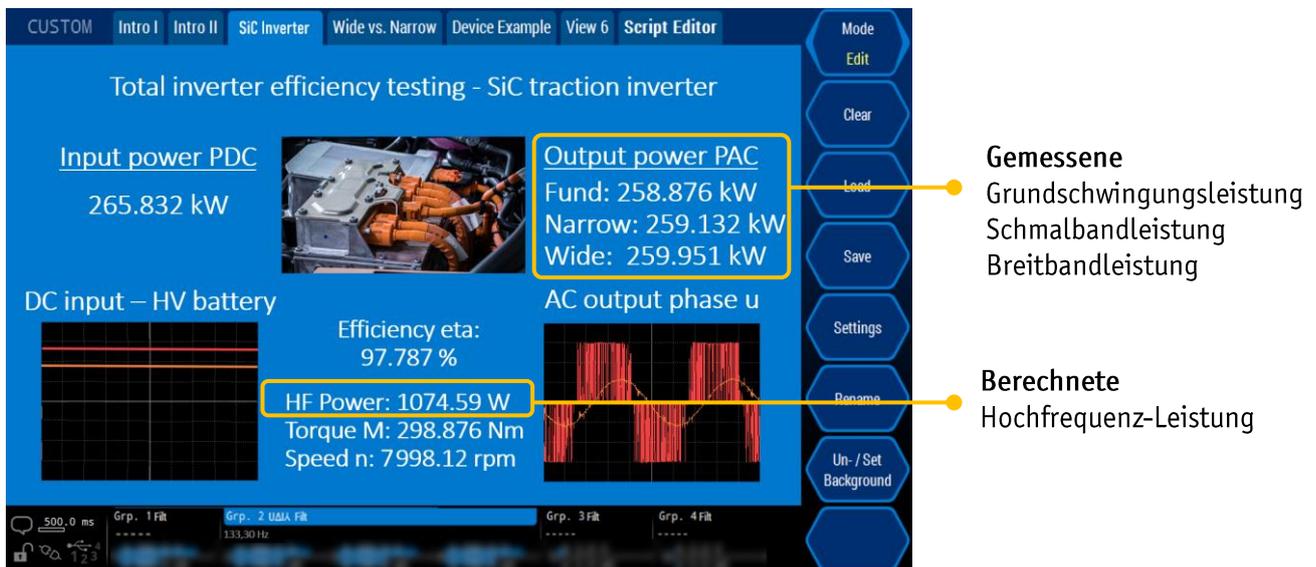


Abbildung 6: LMG600 CUSTOM Menü für die Applikation Wirkungsgradmessung am SiC-Traktionsumrichter

Weitere abgeleitete Messungen

Komplette Wirkungsgradanalyse des gesamten Antriebsstrangs

Die Trennung des Breitband-Leistungsspektrums zur separaten Analyse der Grundschwingungs- und HF-Leistungen ist ein Teil einer vollumfänglichen Wirkungsgradmessung am elektrischen Antriebsstrang. Das LMG671 ist in dessen Ausstattung optimal für diese Anwendung geschaffen.

Ergänzt wird die Messung durch das Erfassen von entweder Analog- oder Frequenzsignalen (Encoder- oder Resolver-Signale) von Drehmoment- und Drehzahlsensoren über die Prozess-Signal-Schnittstelle (PSI) – wir erhalten eine direkte Messung des Drehmoments, der Drehzahl und resultierend die mechanische Leistung des Motors. Messen wir an einer Synchronmaschine (bspw. permanenterregte Synchronmaschine), bietet das LMG671 ebenfalls die Messung und der Id-, Iq- und IO-Stromkomponenten für die Verifikation der feldorientierten Regelung.

Bei einer Anschaltung nach [Abbildung 1](#) und [Abbildung 2](#), ist im Weiteren eine vollständige Vermessung der Wirkungsgrade mit höchster Genauigkeit und Zuverlässigkeit sichergestellt. Hier ließe sich ebenfalls ein kundenspezifisches Messmenü wie in [Abbildung 6](#) erstellen oder bei unseren technischen Experten anfragen.

Führt man die vollständige Wirkungsgradmessung am Antrieb über Abhängigkeiten der Drehzahl und des Drehmoments, erhalten wir im ersten Schritt, bei konstantem Drehmoment, den exemplarischen Wirkungsgradverlauf nach [Diagramm 3](#). In vielen weiteren Drehmoment-Drehzahl-Kombinationsmessungen resultiert das sogenannte Wirkungsgradkennfeld für bestimmte Betriebsquadranten, wie in [Abbildung 7](#) exemplarisch für den ersten Quadranten (vorwärtsbeschleunigen/-fahren) dargestellt.

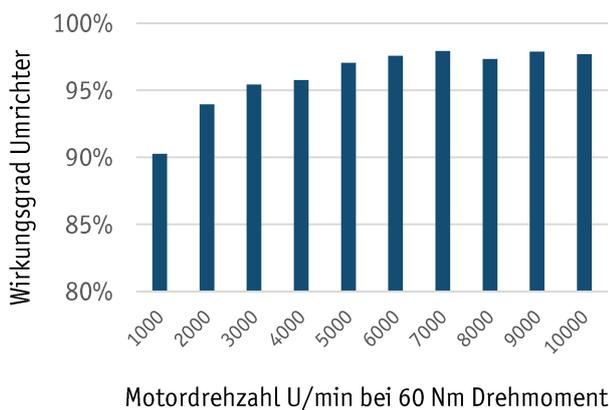


Diagramm 3: Wirkungsgrade am Traktionsumrichter bei variabler Drehzahl und konstanten Drehmoment

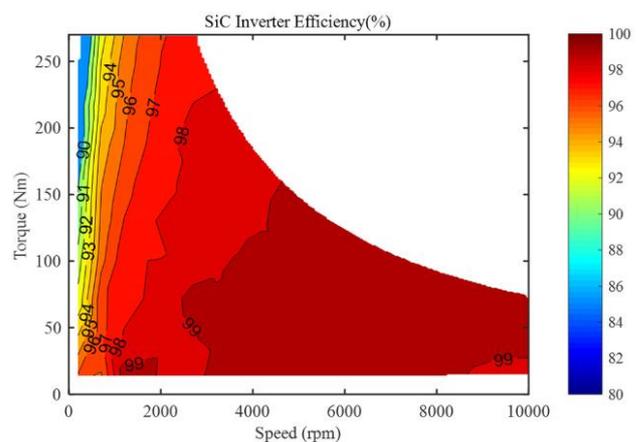


Abbildung 7: Wirkungsgradkennfeld eines SiC-Umrichters, (Su, et al., 2022)



Erkenntnis

Die vollumfängliche Vermessung des gesamten elektrischen Antriebsstrangs während der Entwicklung zur Systemoptimierung, anschließender Typenprüfung und Spezifikation ist die Welt des LMG671. Von Hochvolt-Batterie bis zur elektrischen Maschine, im Testszenario eines Elektrofahrzeugs, wird die Messung und Verifikation des gesamten oder zwischenstufenweisen (einzelne Wandlerstufen individuell vermessen) Wirkungsgrads mit höchster Präzision (durch Kalibrierung nachweisbar), genauester Signalsynchronisation, lückenloser und kontinuierlicher Abtastung, sogar im bidirektionalen Betrieb des Prüflings, ermöglicht. Schließlich ebnet diese vollumfängliche Messung den Weg zur erforderlichen Darstellung und analytischen Be- und Auswertung der Antriebseffizienz in Abhängigkeit der Dynamik aus Drehzahl und Drehmoment, sprich Wirkungsgradkennfeld, dies im Einzel- oder Dauerlaufstest.

⁶ SiC – Silicon Carbide, zu Deutsch: Siliziumkarbid

Prüfung der Eingangs- und Ausgangswellenform des Wechselrichters

Manchmal steckt der Teufel im Detail und eine weitere, über die numerische Analyse der elektrischen Leistungen und Effizienzen hinaus, Detailanalyse auf Rohdatenbasis der gemessenen Signale, lässt sich erstes Licht ins Dunkle bringen.

- Erfassen und qualitatives Auswerten der Umrichtersignale mit spezieller Signalanalysesoftware **LMG600 SampleVision** bei bis zu 1,21 MS/s Abtastwertestream,
- Qualitative Untersuchung atypischer oder unerwünschter Signalspitzen
- Untersuchung des Frequenzspektrums bis zu 600kHz für ein festgelegtes Zeitintervall

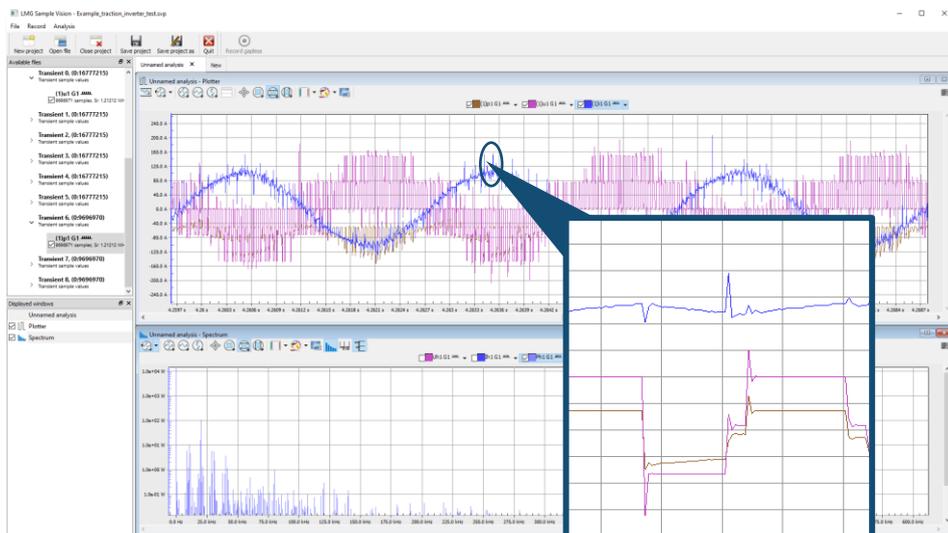


Abbildung 8: Analyse der Umrichtersignale mit der LMG600 SampleVision Abtastwerte-Analyse-Software

Optimierungspotenzial des Schaltverhaltens, wie:

- **Schaltzeitpunkt anpassen:** Weiches Schalten
- **Snubber-Schaltungen:** Implementieren von RLC- Schaltkreisen in den Kommutierungspfad zur Kompensation bzw. Glättung der transienten Spitzen
- **Gate-Widerstand anpassen:** Vergrößern/Verringern des Widerstandswert im Ein- und Ausschaltzeitpunkt (bspw. bei SiC-MOSFETs)



Erkenntnis

Die Analyse der Signal-Abtastwerte bei höchst möglicher Auflösung von 1,21 MS/s, ermöglicht, bereits im Zuge der präzisen Leistungs- und Wirkungsgradvermessung, die qualitative Beurteilung der Signalformen am Umrichter Ausgang. Spitzen in den Signalen können bereits Hinweise auf Oszillationen in den Schaltvorgängen geben, welche den Wirkungsgrad mindern und auch die Motorwicklungsisolierungen stressen. Hier steckt Optimierungspotenzial des Schaltverhaltens, wie gezieltes Anpassen des Schaltzeitpunkt, Implementieren von Snubber-Schaltungen, Anpassen des Gate-Widerstands (bspw. bei SiC-MOSFET) im Ein- und Ausschaltzeitpunkt. Genauere Untersuchen jener Optimierungsmöglichkeiten können durch quantitative Analyse mittels ultra-schneller Oszilloskope ergänzt werden.

Referenzen

Su, H., Zhang, L., Meng, D., Li, Y., Han, N., & Xia, Y. (24. September 2022). *Modeling and Evaluation of SiC Inverters for EV Applications*. Von MDPI: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/19/7025> abgerufen

Autor:

M.Sc. Patrick Fuchs, Leiter Geschäftsfeldentwicklung bei ZES ZIMMER



Tel. +49 6171 88832-91
E-Mail: pfuchs@zes.com

Kontaktieren Sie uns

Für weitere Informationen zu den Produkten, Anwendungen oder Dienstleistungen von ZES ZIMMER kontaktieren Sie uns bitte unter:

ZES ZIMMER Electronic Systems GmbH
Pfeiffstraße 12
61440 Oberursel
Deutschland

Tel. +49 6171 88832-0
Fax +49 6171 88832-28
E-Mail: info@zes.com
Web: www.zes.com