

VERFASST VON



Philipp Mell, M. Sc.
ist Doktorand am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart.



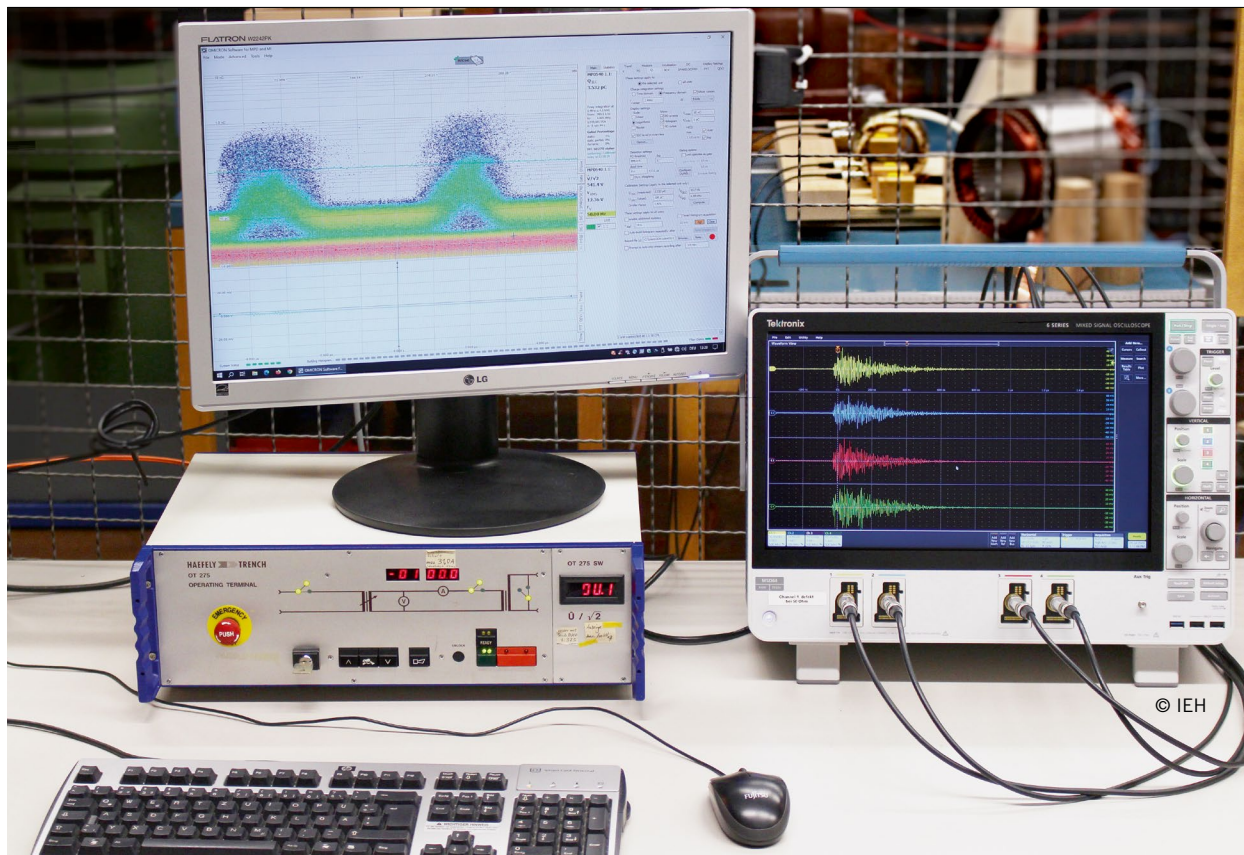
Dr.-Ing. Martin Dazer
ist Bereichsleiter Zuverlässigkeitstechnik am Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart.



Dr.-Ing. Michael Beltle
ist Abteilungsleiter EMV und Standortleiter des Hochspannungslabors Nellingen des Instituts für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) der Universität Stuttgart.

Zuverlässigkeitsbewertung für Ausfallmechanismen an komplexen elektrifizierten Systemen

Dekarbonisierung und Elektrifizierung bestimmen die Weiterentwicklung komplexer technischer Systeme und Innovationen. Zentrale Motivationstreiber sind Nachhaltigkeitsziele. Über den Erfolg eines Produkts entscheidet seine Zuverlässigkeit, die auch gegenüber unbekanntem Schadensmechanismen sichergestellt werden muss. Auf welche Weise das für elektrisch angetriebene Fahrzeuge erfolgen kann, wurde im FVV-Forschungsprojekt „Lebensdauermodell Wicklungs-isolation“ (Nr. 1441) zu Ausfällen von E-Motoren aufgrund ihrer Isolierungen an der Universität Stuttgart untersucht.



1	MOTIVATION
2	SCHADENSMECHANISMUS
3	HEURISTIK
4	MESSMETHODE
5	MEHRSTUFIGE VERSUCHSPLANUNG
6	ERGEBNISOFFENE AUSWERTUNG
7	AUSBLICK

1 MOTIVATION

Bereits seit einigen Jahren hält der Wandel hin zu elektrischen Antrieben die Automobilbranche in seinem Bann [1]. Der elektrische Antriebsstrang ist noch nicht zu Ende entwickelt: Der Wunsch nach weiteren Effizienzsteigerungen, insbesondere im Hinblick auf die Reichweite, fordert Innovationskapazitäten bei den Herstellern [2]. Diesem Wunsch wird durch den Einsatz von Leistungshalbleitern auf Siliziumkarbid(SiC)-Basis Rechnung getragen. Sie ermöglichen kürzere Schaltzeiten, was die Schaltverluste verringert und die Reichweite batterieelektrisch angetriebener Systeme erhöht. Der daraus resultierende hohe Spannungsgradient im Bereich von 20 bis 160 V/ns stellt gleichzeitig neue Herausforderungen für die Isolierung der elektrischen Maschine dar. Insbesondere bei der Isolierung der Statorwicklungen, die im Automobilbereich meist als sogenannte Hairpins ausgeführt sind, muss der Schadensmechanismus der Teilentladung (TE) genauer betrachtet werden [3-5]. Im Rahmen des FVV-Forschungsvorhabens wurde daher untersucht, welche physikalischen Einflüsse die TE-Empfindlichkeit von Hairpins in Elektromotoren beeinflussen. An dem Projekt, das am Institut für Maschinenelemente (IMA) und am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) der Universität Stuttgart bearbeitet wird, haben sich circa ein Dutzend industrielle Partner aus den Bereichen Elektromobilität und TE-Messtechnik beteiligt.

2 SCHADENSMECHANISMUS

Die bekannteste Versagensart elektrischer Isolierungen ist der elektrische Durchschlag, der bei einmaligem Überschreiten der Durchschlagsspannung auftritt und die gesamte Isolation überbrückt. Bei TE wird die Isolierung nicht komplett überbrückt, sondern lokal geschädigt, wenn die TE-Einsatzspannung (Partial Discharge Inception Voltage, PDIV) überschritten wird. Dann treten so lange TEs auf, bis die TE-Aussetzspannung (Partial Discharge Extinction Voltage, PDEV) unterschritten wird, **BILD 1**. Das ist insbesondere bei Schaltflanken deutlich größer als 1 V/ns der Fall. Die bei der TE lokal umgesetzte Energie hinterlässt eine zunächst kleine Schädigung (zumeist durch Karbonisierung des Isolators), was sich in erhöhter elektrischer Leitfähigkeit niederschlägt. Die PDIV wird herabgesetzt und begünstigt somit weitere TE [5-7]. Dadurch können sich die Fehlstellen in der Isolierung vergrößern und zum vollständigen Durchschlag und somit zum Ausfall der Wicklung des Elektromotors führen. Es liegt daher nahe, die PDIV als Indikator für den Isolationszustand heranzuziehen.

Zunächst muss geklärt werden, welche physikalischen Bedingungen den Einsatz von TE begünstigen und mit welcher Intensität. **BILD 2** gibt eine kategorisierte Übersicht über die im Rahmen des Forschungsprojekts in Betracht gezogenen Einflussfaktoren. Des Weiteren ist zu ermitteln, welche Lebensdauer die betrachteten Hairpins erreichen können, bevor ein kritisches PDIV-Niveau

unterschritten wird, was einer grundlegenden Fragestellung der Zuverlässigkeitstechnik entspricht [8].

TE sind ein stochastisch auftretendes, stark streuendes Phänomen. Es existiert in der Fachwelt kein Modell und keine abgeschlossene phänomenologische Beschreibung des Schadensmechanismus der TE. Daher ist unklar, welche physikalischen Größen einen relevanten Einfluss auf das Absinken der PDIV haben.

3 HEURISTIK

Die anwendungsgerechte Auslegung von Elektromotoren wird komplexer durch die Anforderungen an Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit. Mit Methoden der statistischen Versuchsplanung (Design of Experiments, DoE) kann diesen Herausforderungen angemessen begegnet werden [9]. Über den exemplarischen Anwendungsfall der TE-Problematik hinaus ermöglicht dieses strukturierte Vorgehen Zuverlässigkeitsaussagen auch bei unbekanntem Schadensmechanismus.

Zunächst erfolgte die möglichst genaue Eingrenzung und Beschreibung des betrachteten Systems sowie des relevanten Schadensmechanismus unter Einbeziehung allen vorhandenen Wissens, Literaturquellen und verwandter Systeme. Im Fall der Degradation der PDIV kann beispielsweise aufgrund des bekannten Verhaltens anderer elektrischer Schädigungsphänomene angenommen werden, dass neben dem Spannungsgradienten die Temperatur einen relevanten Einfluss auf die Lebensdauer hat. Vorversuche bestätigten diese These. **BILD 3** zeigt den zugehörigen Vergleich: Die absolute PDIV und ihre Degradationsgeschwindigkeit ist von der Maximaltemperatur abhängig. Überlagert wird dieser systematische Unterschied von der Messstreuung (Fehlerbalken $\pm 1 \sigma$) und der Produktionsstreuung der Hairpins (erkennbar an den Startwerten). Aufgrund der chemischen Zusammensetzung der Hairpinisolation ist die Annahme gerechtfertigt, dass die Feuchtigkeit der Umgebungsluft ebenfalls zu den Einflussgrößen zählt. Dennoch kann dieser Parameter vernachlässigt werden, da über das System bekannt ist, dass die Hairpins im Stator vergossen und somit keinen Schwankungen der Luftfeuchtigkeit ausgesetzt sind.

Die meisten technischen Systeme unterliegen einem Verschleiß. Daher wird angenommen, dass die PDIV bei Isolierungen auch im TE-freien Betrieb degradiert [5, 6]. Entsprechend müssen sie nicht

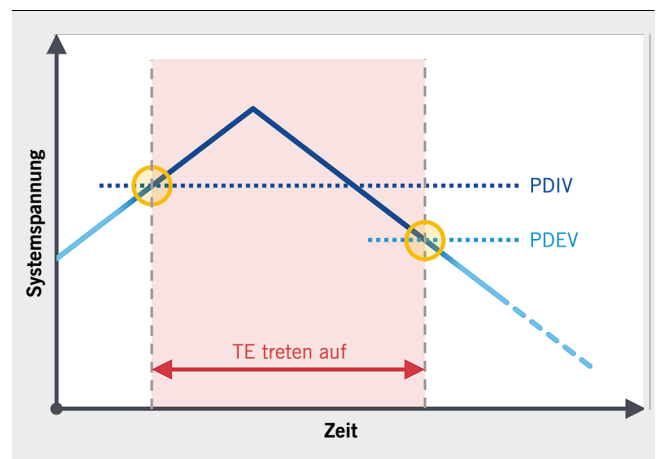


BILD 1 Schematische Darstellung des Auftretens von TE (© IMA)

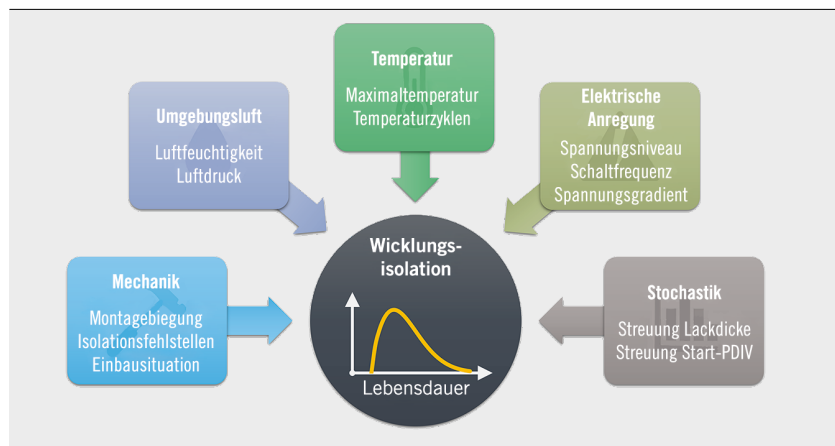


BILD 2 Kategorisierte potenzielle Einflussgrößen für die Degradation beziehungsweise Lebensdauer von Wicklungsisolierungen (© IMA)

bis zum Ausfall getestet werden. Mit der Messung der PDIV in definierten Intervallen kann der Ausfallzeitpunkt extrapoliert werden. Die Rückführung auf einen gut untersuchten Teilbereich der Zuverlässigkeitstechnik – konkret auf beschleunigte Degradationsversuche – erlaubt hier die Verringerung des Versuchsaufwands [6, 8].

4 MESSMETHODE

Die PDIV ist wegen ihrer starken inhärenten Streuung eine herausfordernde Messgröße. Zusätzlich existiert für die anwendungsrelevante pulsweitenmodulierte Spannungsbeaufschlagung noch kein genormtes Messverfahren, sondern lediglich Vorschläge [7]. Weitere unkontrollierbare, sich überlagernde Streuungen lassen sich in der Praxis zwar nicht verhindern, durch Quantifizierung können sie aber in der anschließenden Auswertung zumindest teilweise ausgeglichen werden. Daher ist im Vorfeld eine Messmittelanalyse sowie während der Versuchsdurchführung ein Monitoring auf Reproduzierbarkeit erforderlich. Das schließt auch Unterschiede zwischen mehreren Messaufbauten ein, die beispielsweise bei parallelisierten Versuchen auftreten.

Die Messung wurde im vorliegenden Anwendungsfall zu jedem Messzeitpunkt zehnmal wiederholt und anschließend gemittelt. Ausreißerwerte und driftende Datenreihen wurden mithilfe de-

finierter statistischer Kriterien und künstlicher Intelligenz (KI) erkannt und entfernt. Durch die zehnfache Replikation jeder Messung konnte die Entwicklung der Wiederholpräzision über der Versuchszeit quantifiziert werden.

5 MEHRSTUFIGE VERSUCHSPLANUNG

Um innerhalb kurzer Zeit Aussagen über die Lebensdauer eines Produkts treffen zu können, wird die Belastung gegenüber dem Feldniveau erhöht. Wenn mehr als eine einzelne Lastgröße betrachtet wird, muss ein mit DoE systematisch erarbeiteter Versuchsplan verfolgt werden [9]. Liegen mehr als drei infrage kommende Einflussgrößen vor, empfiehlt sich ein vorgeschaltetes Parameterscreening. Mit einem stark verkürzten Versuchsplan wird geprüft, welche Parameter vernachlässigbar sind. Jeder Parameter, der in den Hauptversuchen nicht variiert werden muss, reduziert den Aufwand und gibt Kapazitäten frei, relevante Parameter eingehender betrachten zu können. Das fördert die Ergebnisgenauigkeit.

BILD 4 skizziert, wie mit der Fülle an potenziellen Einflussgrößen auf die PDIV-Degradation umgegangen wurde, um die Parameteranzahl in den Hauptversuchen systematisch zu verringern. Zunächst wurden einige Parameter anhand pragmatischer Überlegungen bewertet – beispielsweise hinsichtlich Produktionsstreuungen, die als solche repräsentativ abgebildet werden. Anhand eines Screeningversuchsplans wurden weitere Parameter als nicht relevant erkannt, oder es wurden Korrekturen hinsichtlich ihres Einflusses vorgenommen [6]. In den Hauptversuchen wurden somit nur vier statt ursprünglich zwölf Parameter variiert. Der Umfang an zu testenden Parameterkombinationen sinkt somit von über 160 auf ein vertretbares Niveau von 20.

6 ERGEBNISOFFENE AUSWERTUNG

Bei komplexen Systemen und unbekanntem Schadensmechanismen ist die Annahme, dass alle Daten dem intendierten Ausfallmechanismus entsprechen, besonders kritisch zu prüfen. Konkurrierende Ausfallursachen lassen sich zum Beispiel anhand abweichender Schadensbilder erkennen, die häufig auf einen Unterbereich des Versuchsraums begrenzt sind [8].

Im vorliegenden Forschungsprojekt traten Frühausfälle auf, die zwar nicht zum gesuchten Schadensmechanismus gehören, aber

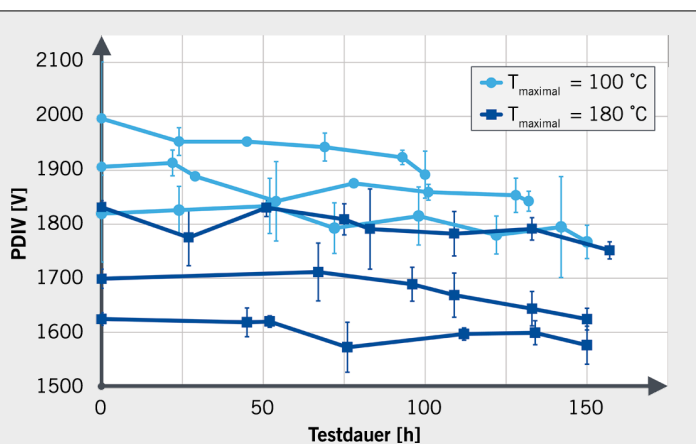


BILD 3 Degradationsversuche in Abhängigkeit von der Temperatur (© IMA)

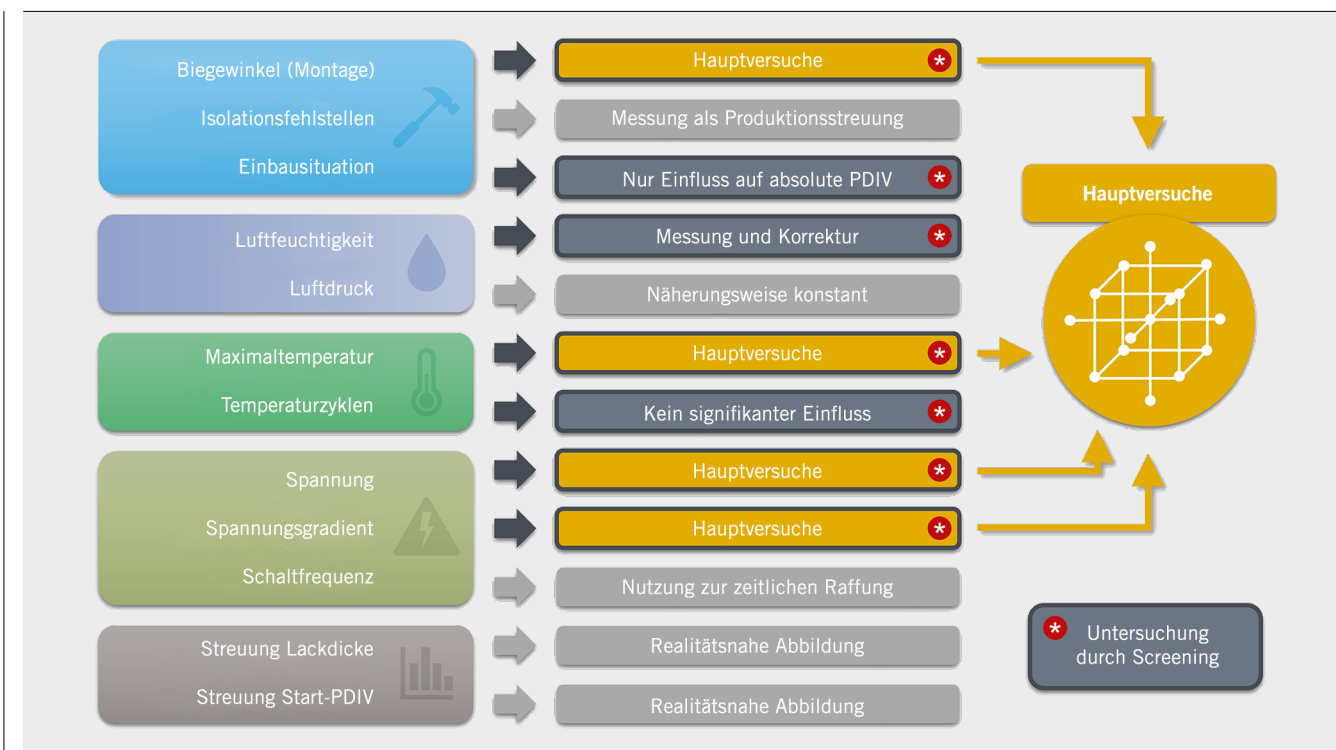


BILD 4 Behandlung der zuvor kategorisierten potenziellen Einflussgrößen und gegebenenfalls Zuordnung zu Screeningvorversuchen oder Hauptuntersuchungen (© IMA)

Praxisrelevanz haben. Über die geplanten Ausfallursachen hinaus wird somit zusätzliches Wissen über das bisher wenig verstandene System generiert.

7 AUSBLICK

Komplexe oder nicht restlos verstandene Systeme können nur dann effizient untersucht werden, wenn klassische Zuverlässigkeitsmethoden um DoE erweitert werden. Nach Abschluss der Versuche kann die Systemlebensdauer empirisch begründet prognostiziert werden. Das Anwendungsbeispiel der TE-Anfälligkeit von Wicklungsisolierungen in Elektromotoren zeigt, wie der Versuchsaufwand praktisch darstellbar wird und die Ausfallwahrscheinlichkeit – und somit auch die Zuverlässigkeit – strukturiert ermittelt werden kann.

LITERATURHINWEISE

- [1] Schütz, S.: Deutsche Autoindustrie investiert bis 2026 über 220 Milliarden Euro in Forschung und Entwicklung [Pressemitteilung]. Online: https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/2021/211230_Deutsche-Autoindustrie-investiert-bis-2026-ber-220-Mrd-Euro-in-Forschung-und-Entwicklung, aufgerufen: 24. Januar 2024
- [2] LeasePlan Deutschland GmbH (Hrsg.): Mobility Insights Report – Elektrofahrzeuge und Nachhaltigkeit. Online: <https://www.leaseplan.com/de-de/presse/interesse-an-elektromobilitaet-waechst/>, aufgerufen: 24. Januar 2024
- [3] Johannesson, D.; Nawaz, M.; Ilves, K.: Assessment of 10 kV, 100 A Silicon Carbide mosfet Power Modules. In: IEEE Transactions on Power Electronics, 33 (2018), Nr. 6, S. 5215-5225
- [4] Fabiani, D.; Montanari, G. C.; Cavallini, A.; Mazzanti, G.: Relation between space charge accumulation and partial discharge activity in enameled wires under PWM-like voltage waveforms. In: IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 11 (2004), Nr. 3, S. 393-405

- [5] Boege, K.: Teilentladungen in elektrischen Komponenten. Abschlussbericht FVA-Projekt Nr. 855 I, 2020
- [6] Mell, P.; Dazer, M., He, C.; Beltle, M.: A Novel ADT Approach for Partial Discharge in Electrical Machines. 2023 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), Orlando, 2023
- [7] He, C.; Beltle, M.; Tenbohlen, S.; Hubert, T.; Schmidt, S.; Schneider, J.: Partial Discharge Characteristic of Hairpin Windings for Inverter-Fed Motors. IEEE 4th International Conference on Dielectrics (ICD), Palermo, 2022
- [8] Bertsche, B.; Dazer, M.: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau (4. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg
- [9] Montgomery, D.C.: Design and analysis of experiments (10. Aufl.). Hoboken: John Wiley & Sons, 2021

DANKE

Das Forschungsvorhaben (FVV-Nr. 1441) wurde unter der Leitung von Dr.-Ing. Martin Dazer am Institut für Maschinenelemente (IMA) und unter der Leitung von Dr.-Ing. Michael Beltle am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) der Universität Stuttgart durchgeführt. Es wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. (IGF-Fördernr. 21658 N) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages finanziell gefördert. Die Autoren bedanken sich bei den Fördergebern, der FVV, der SEG Automotive GmbH mit Projektinitiatorin Dr.-Ing. Zeljana Beslic und allen weiteren Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.mtz-worldwide.com