





Abbildung 2 Beispiel Degradationspfade char. Größen (Kapazität, Betragsimpedanz, Serienwiderstand ESR, Eigenresonanz) aus Kondensatormodell (1000 Pfade, grün) im Vergleich mit Labormessung über ca. 200 h (blau)

Mithilfe eines detaillierten Design of Experiment (DoE) wurden überlagerte Einflüsse mehrerer praxisrelevanter Belastungsparameter für die Alterungsmodelle berücksichtigt: Spannungshub, Schaltfrequenz, Umgebungstemperatur und Feuchte. Die durchgeführte Varianzanalyse ermöglicht es, signifikante Lasteinflüsse von messtechnischen und fertigungsbedingten Streuungen zu trennen. Für die Zuverlässigkeitsbewertung wurden die Ergebnisse der Degradationspfadmodelle mit der Weibullverteilung modelliert, was eine stochastische Beschreibung der Lebensdauer ermöglicht. Sowohl im TE-freien als auch im TE-behafteten Betrieb ist die Modellierung der Degradation verschiedener Charakteristika (Kapazität, Resonanzfrequenz, Ersatzwiderstand) möglich.

Die ermittelten Degradationsmodelle zeigen, dass der schädigende Einfluss der elektrischen Belastung sich insbesondere in Form der transformierten Wechselwirkung zwischen Spannungshub (z.B. 800 V) und Schaltfrequenz widerspiegelt. Der Einfluss dieser Wechselwirkung, welche der Summe aller Schaltvorgänge gewichtet mit dem Spannungshub entspricht (neu eingeführte Größe: total pulsed voltage, TPV), zeigt sich konsistent in der Degradationsgeschwindigkeit mehrerer Zielgrößen. Die ausführlichen Degradationsmodelle basieren derzeit auf einer Testdauer von ca. 165 h, wodurch Prognosen in dieser zeitlichen Ordnung sinnvoll sind. Langzeitversuche mit engen Belastungsparameterbereichen könnten in Zukunft diese Lücke schließen und eine Validierung der Modelle auf anwendungsbezogene Zeiträume ermöglichen. Dazu könnten Methoden der Zustandsüberwachung und Datenanalyse (Machine Learning) genutzt werden, um Degradation in Echtzeit zu detektieren und die Modelle durch kontinuierliche Datenintegration fortlaufend zu verbessern.

**Autoren:** **Dr.-Ing. Michael Beltle**  
**M. Sc. Jonas Bux**  
Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik IEH – Uni Stuttgart  
**PD Dr.-Ing. habil. Martin Dazer**  
**M. Sc. Philipp Mell**  
Institut für Maschinenelemente IMA – Uni Stuttgart

**Kontakt:** Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA)  
**Alexander Raßmann**  
T 069-6603-1820

Das IGF-Vorhaben IGF-Nr. 01IF22163N der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit den Mitteln der [IGF](#) gefördert.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## **Die Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF)**

Die Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF) ist ein europaweit einzigartiges, themenoffenes und vorwettbewerbliches Förderprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE), das kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) einen einfachen Zugang zu praxisorientierter Forschung und zu aktuellen Forschungsergebnissen ermöglicht. In der IGF bestimmen Unternehmen bzw. Verbände, Forschungsvereinigungen und Forschungseinrichtungen gemeinsam den Forschungsbedarf und die Forschungsthemen ihrer Branche. Die Begleitung der Forschungsprojekte durch die Unternehmen garantiert die Praxisnähe der Forschungsprojekte. Die Ergebnisse der IGF-Projekte sind öffentlich und stehen allen interessierten Unternehmen zu gleichen Bedingungen zur Verfügung. So stärkt die IGF die Wettbewerbsfähigkeit des Mittelstands in Deutschland und trägt damit maßgeblich zu Deutschlands Innovationsouveränität bei.

**Die FVA (Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V.)** ist das weltweit erfolgreichste und größte Forschungs- und Innovationsnetzwerk in der Antriebstechnik. Zusammen mit rund 180 Unternehmen und 100 Forschungsinstituten haben wir bisher weit über 2.000 Projekte realisiert. Die Antriebstechnik voranzubringen – das ist das Ziel der FVA. Dazu bringen wir Industrie und Forschung zusammen. Dies zu moderieren, neues Wissen zu erforschen, Effizienz und Erkenntnisse zu schaffen – das macht uns zum Innovationsförderer unsere Branche. Für unsere Mitglieder bedeutet das einen mehrfachen Return-on-Invest: Austausch und Kenntnistransfer in der FVA-Community, Mitgestaltung an der Forschung, Teilhabe an neuestem Wissen, Ausbildung von jungen Ingenieur\*innen, passgenaue Weiterbildung, Reduzierung von F+E Kosten. Das kommt unseren Mitgliedsunternehmen, dem Forschungsstandort Deutschland und allen Beteiligten Menschen zu Gute. Denn unsere vorwettbewerbliche Gemeinschaftsforschung, finanziert über die IGF und Eigenmittel ist etwas ganz Besonderes. Gemeinsam geht einfach mehr. Dafür bündeln wir Ressourcen, auch finanzielle, moderieren Kommunikation und Prozesse. Wir helfen, Ideen zu verwirklichen. Weitere Informationen unter [www.fva-net.de](http://www.fva-net.de).