

## ANALYSE KRITISCHER SYSTEMSTELLEN

# Schwachstellen im Fokus

Bernd Bertsche und Stefan Kemmler, Stuttgart

Qualitativ oder quantitativ – wer seine Systeme untersuchen und Ausfallwahrscheinlichkeiten berechnen will, muss sich meist entscheiden. Ein Forschungsprojekt des Instituts für Maschinenelemente der Universität Stuttgart hat eine energiebasierte Zuverlässigkeitsanalyse entwickelt, die beide Aspekte vereint, auch die thermischen Bauteilwechselwirkungen einbezieht und so die Ausfallwahrscheinlichkeit genau bestimmt.

Ein ganzheitlichen Systemüberblick bieten zuverlässigkeitsorientierte Systemanalysen bislang nur selten. Meist werden die betriebsbedingten Wechselbeziehungen nicht mit ausreichender Genauigkeit abgebildet. In der Regel werden entweder qualitative oder quantitative Methoden angewandt, mit denen die Untersuchung von kritischen Systemstellen bisher nicht umfassend durchgeführt werden kann.

Das Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart hat eine energiebasierte Zuverlässigkeitsanalyse (Energy-based Reliability Analysis, ERA) entwickelt, die genau diese Lücke schließen soll. Die Analyseverfahren entstand in Zusammenarbeit mit der Firma Bosch im Rahmen einer Diplomarbeit. Inzwischen wurde sie erfolgreich auch bei anderen Unternehmen eingesetzt.

Die ERA fußt auf Energieübertragungen, Energieumwandlungen und Wechselwirkungen zwischen mechanischen und/oder elektronischen Systemkomponenten und ist sowohl als ergänzende als auch als alleinstehende Analyseverfahren verwendbar. Sie bezieht die thermischen Bauteilwechselwirkungen in den Berechnungsvorgang ein. Darüber hinaus ist sie ganzheitlich einsetzbar – aufgrund von Energieflussdiagrammen (qualitativ) und durch die Berechnung der Systemzuverlässigkeit mithilfe von Ausfallwahrscheinlichkeiten in Form von Element-Weibull-Geraden (quantitativ).

Die ERA gliedert sich in zehn Teilschritte, die wiederum in den Gruppen Systemanalyse, -modellierung, Zuverlässigkeitskoordination und -validierung sowie Optimierung zusammengefasst werden können. Zunächst werden das System und dessen Betriebsmodi festgelegt, bevor die Energieflüsse modelliert und Orte hoher Energiedichte (Hotspots) identifiziert werden. Daraufhin kann entwicklungsbegleitend die Betrachtungstiefe an den potenziellen Schwachstellen festgelegt und angepasst werden, um daraus, unter Berücksichtigung aller thermischen Einflüsse, ein Lastkollektiv zu ermitteln. In einem weiteren Schritt wird die Systemzuverlässigkeit auf Grundlage eines Booleschen Modells und des Lastkollektivs bestimmt. Vorangegangene Untersuchungen und Arbeiten lassen gerade diesen Punkt offen [1]. Die ERA setzt hier an und modelliert ein allgemeingültiges Energiegrenzmaß bzw. das Ausfallverhalten.

## Berücksichtigung aller thermischen Einflüsse

Sowohl für mechanische als auch für leistungselektronische Komponenten werden Lebensdauerprüfungen durchgeführt. Bei mechanischen Bauteilen erfolgen diese durch dehnungskontrollierte Schwingversuche. Trägt man die wechselnde Spannungsamplitude über der Dehnung auf, bilden sich sogenannte Hysteresen (geschlossene Kurvenzüge) aus, die Aufschluss über den plastischen Energieein-

trag in das Bauteil geben. Daraus lassen sich, unter Einbeziehung der Umgebungstemperatur, Anrisskennflächen ermitteln. In diesen ist der Energieeintrag, bezogen auf das Probenvolumen über der Temperatur und der Anrisschwingspielzahl, dar-

### Literatur

- 1 Kemmler, S.; Koller, O.; Bertsche, B.: ERA-Energiebasierte Zuverlässigkeitsanalyse. In: VDI-Konstruktion, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2014

### Autoren

**Dipl.-Ing. Stefan Kemmler**, geb. 1983, ist akademischer Mitarbeiter im Bereich Zuverlässigkeitstechnik am Institut für Maschinenelemente (IMA) an der Universität Stuttgart.

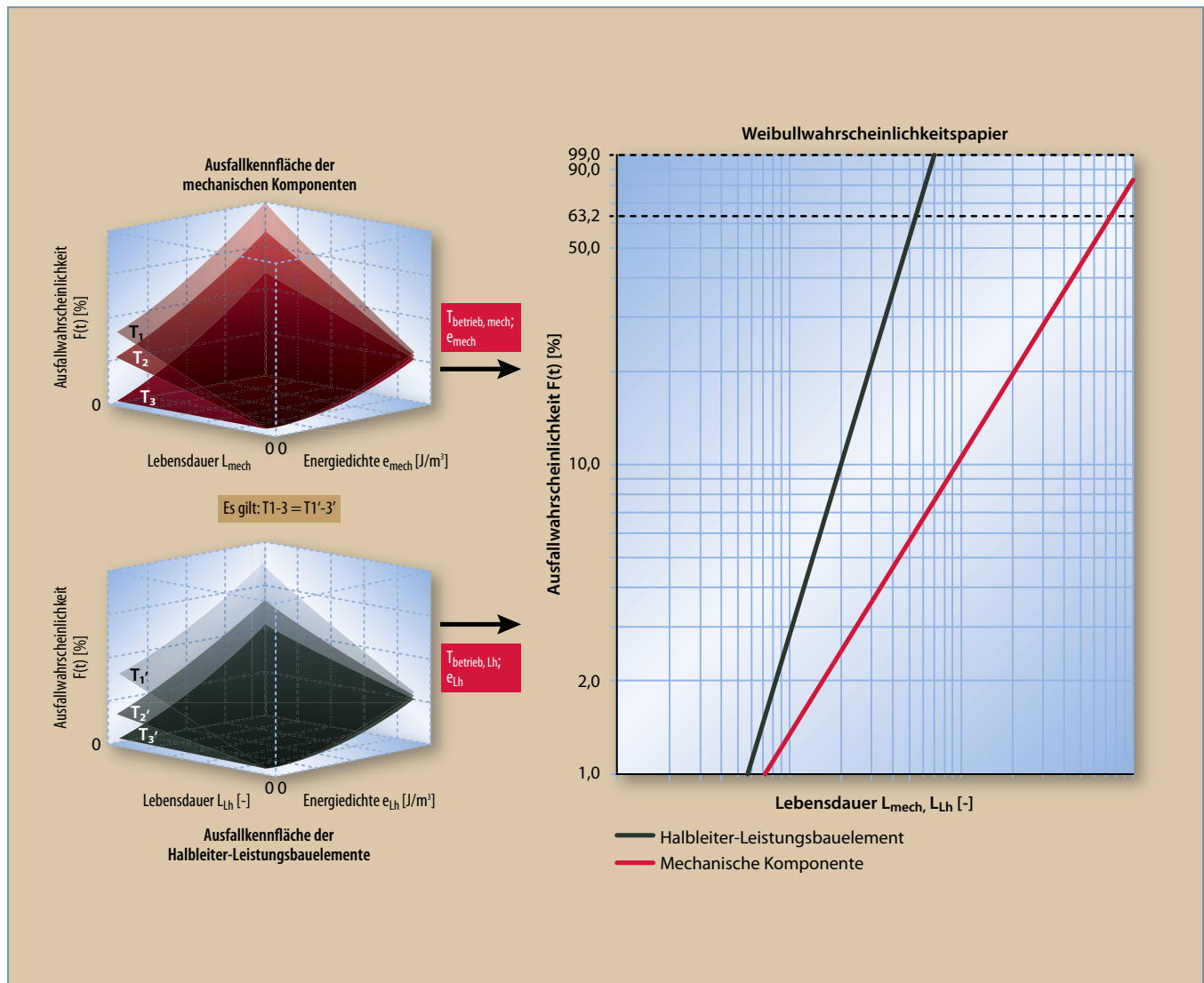
**Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche**, geb. 1957, ist Ordinarius und Leiter des IMA sowie Geschäftsführer bei der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP) und der Technologie-Transfer-Initiative GmbH (TTI).

### Kontakt

**Stefan Kemmler**  
T 0711 68566696  
stefan.kemmler@ima.uni-stuttgart.de

### QZ-Archiv

Diesen Beitrag finden Sie online:  
[www.qz-online.de/913820](http://www.qz-online.de/913820)



**Bild 1.** Vereinigung des betriebspezifischen Ausfallverhaltens mechanischer und leistungselektronischer Komponenten in einem Weibull-Wahrscheinlichkeitspapier

gestellt. Auch für die Lebensdauerermittlung von leistungselektronischen Halbleitern werden Schwingversuche (Power Cycling Tests) durchgeführt. In diesem Fall spielen jedoch statt der mechanischen Spannung der Stromfluss und die daraus resultierenden Temperaturwechsel des Halbleiters eine entscheidende Rolle. Als Ergebnis jedes Versuchs werden die Parameter Ausfallschwingspielzahl, Referenztemperatur und innere Energiedichte festgehalten und schlussendlich in einem dreidimensionalen Schaubild zur Ausfallkennfläche vereint.

### Ausfallrisiko Temperaturschwankung

Die Durchführung mehrerer Versuche sowohl für mechanische Komponenten als auch für leistungselektronische Halbleiter

für die konstanten Parameter Energiedichte und Temperatur führen im Idealfall auf eine Weibull-Gerade, welche die Streuung der Anriss- bzw. Ausfallschwingspielzahl wiedergibt und demzufolge jedem Lebenszeitpunkt eine Ausfallwahrscheinlichkeit zuordnet. Eine anschließende Variation der Parameter Energiedichte und Temperatur mündet in je eine Ausfallkennfläche für mechanische und leistungselektronische Halbleiter (Bild 1). Dabei wird die Ausfallwahrscheinlichkeit über der Energiedichte und der Lebensdauer aufgetragen, die aus der Anriss- bzw. Ausfallschwingspielzahl herrührt. Jede Einzelfläche der Flächenschar stellt dabei dieses Ausfallverhalten bei konstanter Temperatur dar. Alle Flächen zeichnen sich bei Veränderung der Energiedichte und/oder der Temperatur durch veränderliche charakteristische Weibull-Para-

meter ( $b$  und  $T$ ) aus. Das bedeutet, dass beispielsweise die Erhöhung der Umgebungstemperatur bei mechanischen Komponenten zur Erhöhung der Ausfallwahrscheinlichkeit führt und demzufolge zu erhöhten Formparametern  $b$  und reduzierter charakteristischer Lebensdauer  $T$ .

Wird nun ein System mithilfe der ERA analysiert, werden die betriebsbedingten Parameter Energiedichte und Temperatur bestimmt, in denen sich die Information über thermische Wechselwirkung verbirgt. Die entsprechenden Ausfallverhalten können dann in Form von Weibull-Geraden aus der Ausfallkennfläche extrahiert und in einem gemeinsamen Weibull-Wahrscheinlichkeitspapier aufgetragen werden. Bei Kenntnis der Booleschen Systemstruktur lässt sich mithilfe der einzelnen Überlebenswahrscheinlichkeiten die Systemzuverlässigkeit eindeutiger berechnen. □