

Reinhard Schneider / Markus Öttl

Zuverlässigkeit von Leistungselektronik in elektrifizierten Antriebssträngen: Zufall oder vorhersagbar?

121- LEP - Low Emission Powertrains

Abstract

Simulationen der Alterung und des Verschleißes von Komponenten in elektrifizierten Antriebssträngen sind ein wichtiger Bestandteil bei der Entwicklung von Elektrofahrzeugen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Zuverlässigkeit von Halbleitermodulen in Umrichtern. Es wird gezeigt, dass die Rückführung der Alterung in das thermische Modell der Halbleitermodule sowie die statistische Kombination der Ergebnisse einzelner Module einen signifikanten Einfluss auf die Lebensdauerabschätzung haben.

Keywords:

Elektrischer Antriebsstrang, Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Halbleiter-Leistungsmodule

1. Einleitung

Der derzeitige Wandel in der Individualmobilität (Kraftfahrtbundesamt 2015) hin zum elektrifizierten Fahrzeug stellt Automobilhersteller vor große Herausforderungen. Für die neu hinzukommenden Komponenten gibt es kaum Erfahrungswerte bezüglich Zuverlässigkeit bzw. Verschleiß. Demgegenüber existiert eine hohe Erwartungshaltung der Kunden bezüglich Qualität. Zuverlässige Aussagen über die Lebensdauer des elektrifizierten Antriebsstranges sind für Hersteller daher unbedingt notwendig.

Ohne Erfahrungswerte basieren solche Aussagen auf Modellen, welche nur punktuell verifiziert werden können. Z.B. gibt es nur unter Laborbedingungen zuverlässige Vorhersagen über Lebensdauer für Halbleiter-Leitungsmodule. Dadurch kann es bei realen Belastungssituationen zu unvorhergesehenen Ausfällen kommen. Zur Vermeidung solcher Ausfälle bzw. zur Bestimmung von Service-Intervallen muss es schon im Designprozess eines Fahrzeuges möglich sein, Prognosen über die Lebensdauer zu erstellen. Es müssen Methoden gefunden werden, um unter Laborbedingungen erstellte Modelle in realen Fahrprofilen anwenden zu können. Im Fokus dieser Arbeit stehen dabei Halbleiter-Leitungsmodule, welche ein wichtiger Faktor bei der Bestimmung der Lebensdauer von Umrichtern sind.

Im Folgenden werden jene Ergebnisse eines durch Eurostars geförderten Projektes (FFG - Projektnummer: 841042) vorgestellt, welche zum Ziel hatten, Lebensdauermodelle von Halbleiter-Leistungsmodulen in eine Fahrzeugsimulation zu integrieren, um für spezifische Fahrprofile zugehörige Verschleißaussagen treffen zu können.

2. Problemanalyse

Die hohe Leistung in Umrichtern und die damit verknüpfte hohe Verlustleistung in den Halbleiterbauelementen (IGBTs, MOSFETs) führen zu starken Temperaturschwankungen auf engstem Raum. Durch den schichtweisen Aufbau (siehe Abbildung 1) solcher Module kommt es aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten der Materialschichten zu wechselnden mechanischen Spannungen. Diese sind für zwei zentrale Verschleißerscheinungen verantwortlich: Abheben der Bonddrähte und Rissbildungen in der Lötischiicht (Lutz 2012: 273 ff.). Diese Defekte führen zu gradueller Verschlechterung der elektrischen und thermischen Eigenschaften der Halbleiter-Leitungsmodule bis hin zum Ausfall.

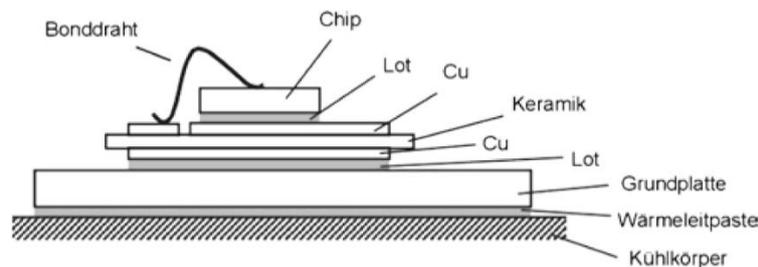


Abbildung 1: Querschnitt durch ein Halbleiterleistungsmodul

Ausfälle von Halbleiter-Leitungsmodulen werden von Herstellern statistisch durch Lastwechseltests unter Laborbedingungen (stationäre, periodische Belastungen) bestimmt. Will man die Ergebnisse solcher Tests auf Fahrzeugsimulationen mit realen Fahrprofilen anwenden, müssen geeignete Methoden ausgearbeitet werden, um daraus den Verschleiß unter nicht-stationären Belastungen abzuleiten.

3. Methodik

In (Öttl/Schneider 2014) wurde ein Ansatz vorgestellt, mit dem eine Prognose der Lebensdauer eines einzelnen Leistungsmodules in einem beliebigen Fahrprofil getroffen werden kann, sofern für das Modul ein bekanntes Verschleißmodell (e.g. LESIT (Lutz 2012: S.275 f.), CIPS08 (Lutz 2012: S.278 f.)) existiert. Dazu werden Last-Zyklen gezählt („Rainflow-Counting“), mit Schadensakkumulationshypothese („Miner’s Rule“) kombiniert und damit der durch das beliebige Fahrprofil verursachte Verschleiß ermittelt. Der Vorteil der implementierten Methode im Vergleich zu ähnlichen Lösungen (Ikonen, 2012) ist, dass das Zählen der Zyklen laufend während der Simulation erfolgt und somit eine Rückkopplung des Verschleißes auf das thermische Modell (Änderung des thermischen Verhaltens

einzelner Materialien) erstmals berücksichtigt wird (Öttl/Schneider 2015). Dies führt zu einem selbstverstärkenden Verhalten und zu höherem, realistischerem Verschleiß.

Eine Lebensdauerprognose für den gesamten Umrichter, bestehend aus mehreren Halbleiter-Leitungsmodulen, wird durch Kombination der Ausfallwahrscheinlichkeiten aller Module getroffen. Die einzelnen Module werden dabei wie vorab beschrieben analysiert. Die thermische Belastung der einzelnen Module unterscheidet sich dabei durch die Ausführung der Kühlung (z.B. Module am Beginn der Kühlkette werden besser gekühlt). Für jedes Modul wird die MTTF (mean time to failure) aus der Verschleißprognose berechnet. Diese werden zur Gesamt-MTTF des Leistungsteils des Umrichters zusammengefasst. Als Ergebnis der Simulation stehen somit die einzelnen Verschleißkurven der Halbleitermodule sowie die kombinierte Verschleißkurve zur Verfügung.

4. Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der Simulation eines einzelnen Moduls im WLTP Fahrzyklus („Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure“: neuer Standard Fahrzyklus). Das

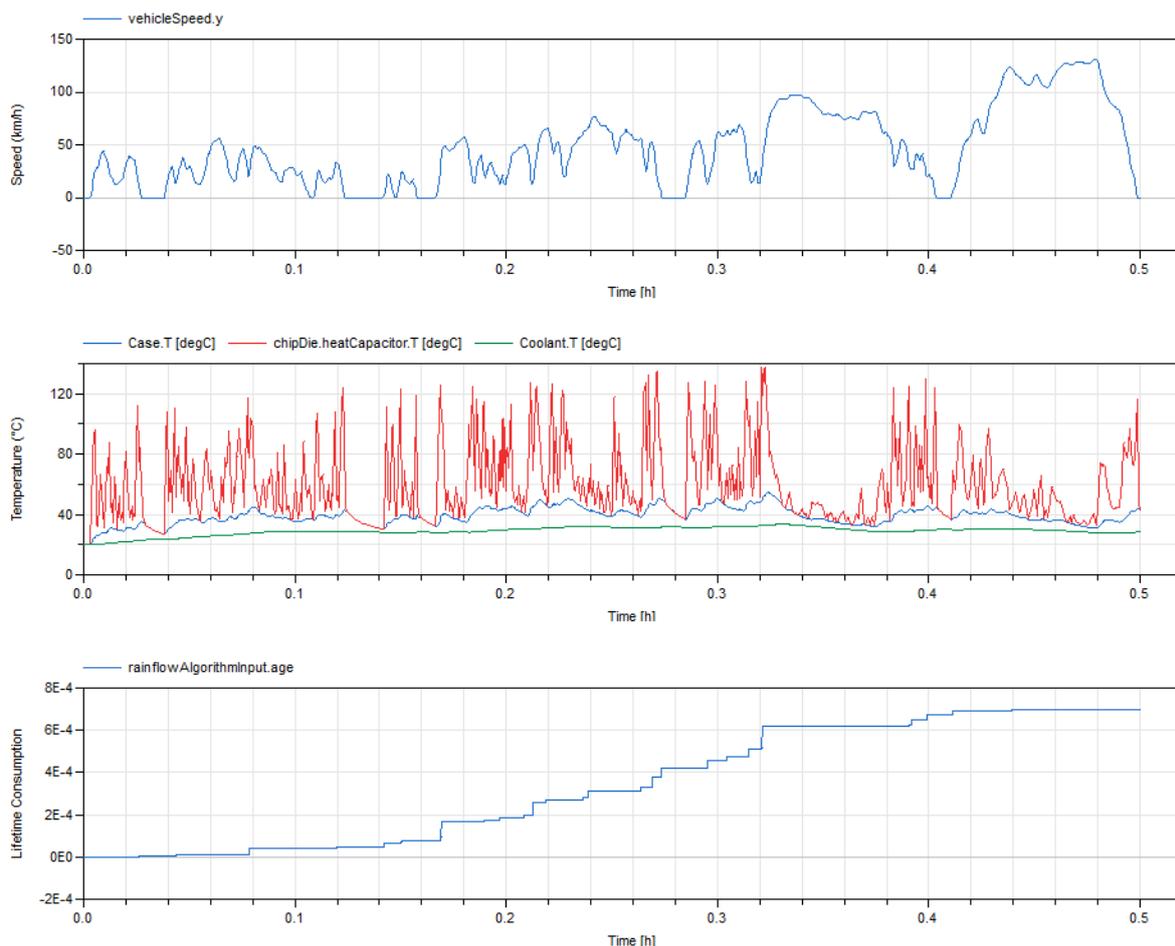


Abbildung 2: Simulation eines WLTP Zyklus

obere Diagramm zeigt die Fahrzeuggeschwindigkeit, welche per Fahrzyklusdefinition gegeben ist. Das mittlere Diagramm zeigt die sich einstellenden Temperaturen an MOSFET Sperrschicht (rot), Leistungsmodul-Grundplatte (blau) und Kühlmedium (grün) bei einer angenommenen Umgebungstemperatur von 20°C. Das untere Diagramm zeigt, wie sich, gemäß dem LESIT Alterungsmodell (Held et al. 1997), der Lebensdauerverbrauch des Leistungsmoduls entwickelt. Der Lebensdauerverbrauch wird dabei definiert als Zahl zwischen 0 (neu) und 1 (Ende der Lebensdauer, MTTF). Entsprechend der, bezogen auf die Gesamtlebensdauer, kurzen Simulationszeit (30 Minuten) ergibt sich ein Endwert in der Größenordnung 10^{-4} .

Abbildung 3 zeigt, wie sich der Lebensdauerverbrauch von Modulen bei langfristiger und hoher Beanspruchung entwickelt. Die Belastung wurde dabei absichtlich so hoch gewählt, dass die beschleunigte Alterung in einer sinnvollen Simulationszeit bis zum Versagen führt. Das ist möglich, da das Modell keine zusätzlichen Versagensmechanismen durch zu hohe Temperaturen berücksichtigt. Die blaue Kurve entspricht der Entwicklung ohne Berücksichtigung der graduellen Verschlechterung des Moduls. Bei der roten Kurve wurde die in Kap. 3 vorgestellte Rückkopplung berücksichtigt.

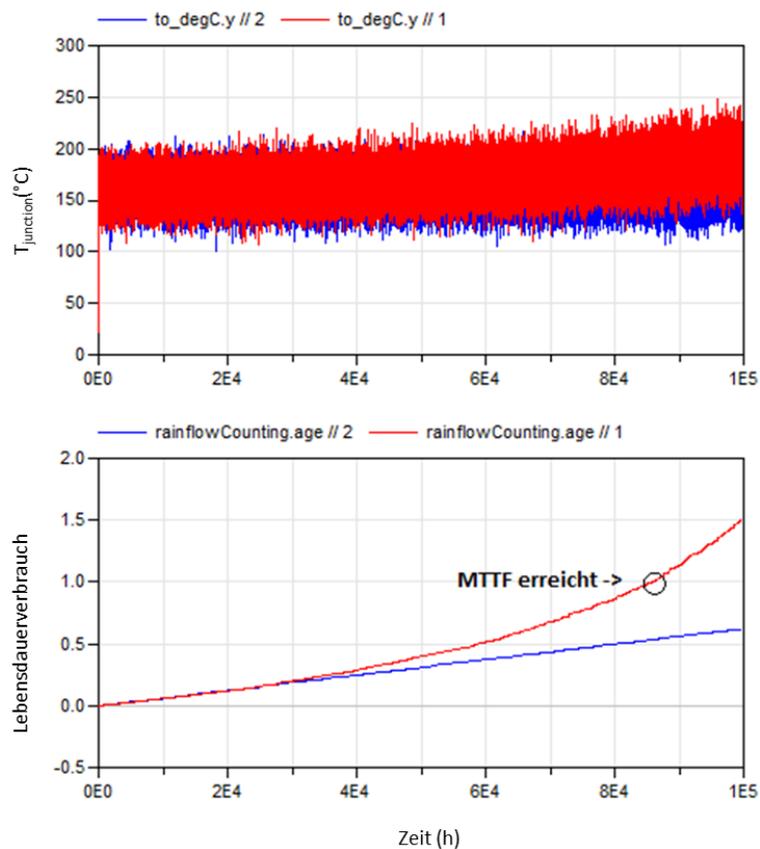


Abbildung 3: Simulation zweier Module. Oben: Temperaturprofil; Unten: Verschleißkurve

Abbildung 4 zeigt Verschleißkurven für vier unterschiedlich gekühlte Module mit thermischer Rückkopplung in einem Umrichter sowie die resultierende Verschleißkurve für den gesamten Leistungsteil. Auch hier wurde eine beschleunigte Alterung durch extreme Temperaturen simuliert.

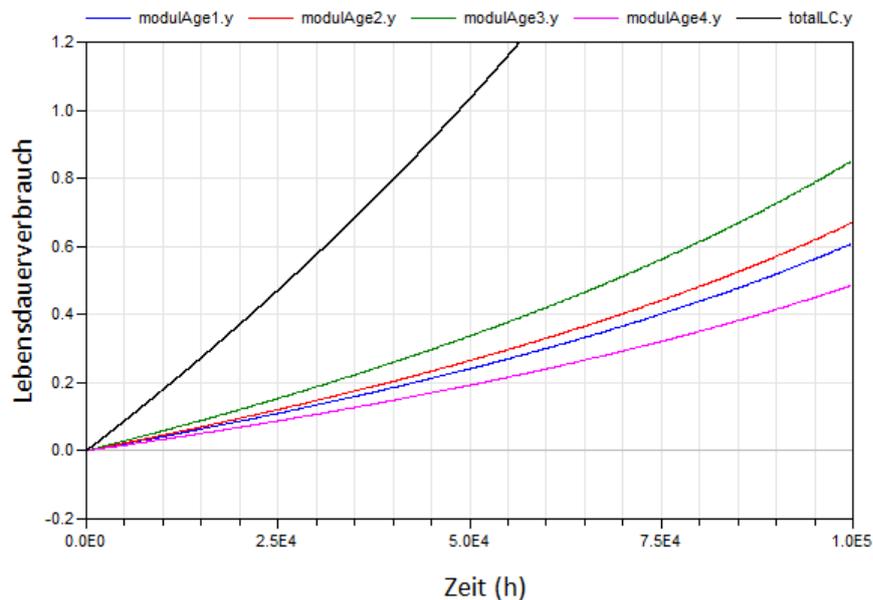


Abbildung 4: Lebensdauerverbräuche 4 einzelner Module in einem Umrichter und Gesamtlebensdauerverbrauch (schwarz)

Die statistische Ausfallswahrscheinlichkeit des gesamten Umrichters ist viel höher als die eines einzelnen Moduls. Das ist aus der erwarteten Lebensdauer des Gesamtmoduls (schwarze Kurve, ca. 50.000 Stunden bei beschleunigter Alterung) im Vergleich zur Lebensdauer der einzelnen Module (>100.000 Stunden) deutlich erkennbar.

5. Zusammenfassung

Der hier vorgestellte Ansatz zur Berechnung der Lebensdauer von Leistungsmodulen in Umrichtern von elektrischen Antriebssträngen ist geeignet, bereits in frühen Designstadien möglichst realistische Aussagen über den Verschleiß des Leistungsteils zu bestimmen. Dadurch ist es für Hersteller möglich, die Auslegung der Leistungselektronik und deren Kühlung für eine zu erwartende Lebensdauer des Fahrzeugs zu optimieren. Die durchgeführten Simulationen haben gezeigt, dass die Berücksichtigung der Verschlechterung des thermischen Verhaltens der Module und die statistische Kombination der einzelnen MTTF Werte der einzelnen Module in einem Umrichter einen wesentlichen Einfluss auf die zu erwartende Lebensdauer haben.

Die Implementierung des vorgestellten Ansatzes ist Teil einer kommerziellen Softwarebibliothek, welche zum Zweck entwickelt wurde, die Auslegung eines elektrischen Antriebsstrangs durch Gesamtfahrzeugsimulationen zu unterstützen.

Literaturliste/Quellenverzeichnis:

Lutz, Josef (2012): Halbleiter-Leistungsbaulemente, zweite Auflage. Berlin: Springer Verlag. (ISBN 978-3-642-29795-3)

Öttl, Markus/ Schmitt, Thomas/ Schneider, Reinhard (2014): Implementation of Power Semiconductor Aging Behavior in an Electric Vehicle Powertrain Model. El Gouna: IEEE. REM 2015 Conference Proceedings. (IEEE Catalog Number: CFP1445X-USB)

Öttl, Markus/ Schneider, Reinhard (2015): Mission-specific aging of Power Modules. Nürnberg: VDE. PCIM2015 Conference Proceedings (ISBN 978-3-8007-3924-0)

Kraftfahrtbundesamt (2015): Anzahl der Elektroautos in Deutschland von 2006 bis 2015.

<http://www.mein-elektroauto.com/2015/01/im-jahr-2014-wurden-deutschland-nur-8-522-elektroautos-verkauft/16592/> (28.01.2016)

Ikonen, Mika (2012): Power Cycling Lifetime Estimation of IGBT Power Modules based on Chip Temperature Modeling. Yliopistopaino/Finnland: Suomen Yliopistopaino Oy. (ISBN 978-952-265-354-3)

Held, M./ Jacob, P./ Nicoletti, G./ Scacco, P./ Poech, M. H. (1997): Fast Power Cycling Test for IGBT Modules in Traction Application. IEEE Service Center in New York, Piscataway NJ. Power Electronics and Drive Systems Conference Proceedings, p.425–430, May 1997, Singapore