

**Verfahren zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Verlängerung
der Lebensdauer elektronischer Baugruppen durch dynamische
Belastungsreduzierung während des Betriebs**

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik

der Universität Rostock

vorgelegt von

Marco Hartung, geb. am 12.10.1979 in Nordhausen

Rostock, den 14.11.17

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. M. Nowotnick, Universität Rostock

Prof. Dr.-Ing. M. Viehmann, Hochschule Nordhausen

Prof. Dr.-Ing. R.Schacht, BTU Cottbus

Jahr der Einreichung: 2017

Jahr der Verteidigung: 2018

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Stand der Forschung und Technik.....	3
2.1 Aktuelle Marktsituation.....	3
2.2 Schädigungsursachen und Ausfallerscheinungen elektronischer Baugruppen.....	7
2.3 Übersicht Zuverlässigkeit.....	15
2.4 Methoden und Verfahren zur Beschreibung der Ausfallursachen.....	19
2.4.1 Arrhenius-Beziehung.....	19
2.4.2 Power-Law-Modelle.....	20
2.4.3 Palmgren-Miner-Modell.....	21
2.4.4 Migrationseffekte.....	22
2.4.5 Darstellung von Belastungen.....	24
2.5 Methoden und Verfahren zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Verlängerung der Lebensdauer.....	26
2.5.1 Überdimensionierung von Komponenten.....	32
2.5.2 Redundante Systeme.....	34
2.5.3 Auffinden von Schwachstellen durch Simulation und beschleunigte Alterungstests.....	35
2.6 Bewertung des Standes der Forschung und Technik sowie Beitrag der vorliegenden Arbeit.....	37
2.7 Zuordnung von MPR und BIV zur elektronischen Baugruppe.....	46
3. Allgemeingültiger Ansatz für das Verfahren zur dynamischen Belastungsreduzierung.....	50
3.1 Zielstellung und Grundsätze der dynamischen Belastungsreduzierung.....	50
3.2 Kriterium zur Funktionsüberwachung der Baugruppe.....	52
3.3 Algorithmus und Multiparameterregler.....	58
4. Implementierung des Verfahrens in elektronische Baugruppen.....	63
4.1 Notwendige Voraussetzungen in der Baugruppe und ihrer Umgebung.....	63
4.2 Hard- und Softwareelemente zur Umsetzung des Verfahrens.....	64
4.3 Ermittlung von Referenzgrößen der Belastung.....	68
5. Applikationsspezifische Ausführung des Verfahrens am Beispiel einer Schaltanordnung.....	75
5.1 Struktur der Baugruppe und ihre bestimmungsgemäße Funktionalität.....	75
5.2 Analyse und Auswahl der Belastungsparameter.....	78
5.3 Analyse und Auswahl der Beeinflussungsparameter.....	80
5.4 Adaption des Algorithmus mit Parameterregler und Funktionskriterium.....	83
5.4.1 Berechnung von elektrischen Werten.....	88
5.4.2 Bestimmung der Wärmekapazität und Temperaturabhängigkeit des	

Schaltelements.....	88
5.4.3 Berechnung der eintretenden Vibrationen.....	91
5.5 Erforderlicher Umfang des Algorithmus des Betriebs-Interventions-Verfahrens.....	92
6. Verfahrensverifizierung anhand der Beispielapplikation Schaltanordnung....	101
6.1 Testumgebung und klimatische Einflüsse.....	101
6.2 Verifizierungsziel und -strategie.....	102
6.3 Quantifizierung der Referenzgrößen der Belastung.....	104
6.4 Modellierung der Baugruppe mit implementiertem Verfahren und simulationsgestützte Untersuchung.....	111
6.5 Analyse und Auswertung der Simulationsdaten.....	112
6.5.1 Belastungsreduzierung im Vergleich zum Betrieb ohne Multiparameterregler.....	112
6.5.2 Erreichte Lebensdauererlängerung in der Simulation.....	115
6.5.3 Arbeitsweise des Multiparameterreglers in der Simulation.....	116
6.6 Aufbau des Demonstrators.....	117
6.7 Analyse und Auswertung der Messdaten.....	119
6.7.1 Belastungsreduzierung im Vergleich zum Betrieb ohne Multiparameterregler.....	119
6.7.2 Erreichte Lebensdauererlängerung am Demonstrator.....	121
6.7.3 Arbeitsweise des Multiparameterreglers am Demonstrator.....	123
6.8 Ergebnisse der Simulation und der Messungen sowie Diskussion.....	124
7. Verallgemeinerte Herangehensweise bei der Implementierung des Betriebs-Interventions-Verfahrens und der Abschätzung des Wirkungspotentials.....	130
7.1 Schrittfolge bei der Implementierung in Baugruppen.....	130
7.2 Kriterien zur Abschätzung des Wirkungspotentials im Betrieb der Baugruppe.....	133
7.3 Ökonomische Aspekte zur Einsatzfähigkeit.....	138
7.4 Nutzungspotentiale im Entwicklungsprozess elektronischer Systeme.....	142
8. Zusammenfassung und Ausblick.....	144
Anhang.....	I
A.1 Elektrische Eigenschaften des Transistors.....	I
A.2 Beschreibung des Umgebungsklimas.....	IV
A.3 Temperaturabhängige Ausfallzeiten des Transistors.....	VII
A.4 Erstellung des Spice Modells für den Transistor IRF640.....	VIII
A.5 Belastung an den Bauteilen des Demonstrators.....	IX
A.6 Beispiele für eine akkumulierte Belastung.....	XII
A.7 Weitere Punkte zum Verhalten des MPR.....	XIII

Abbildungsverzeichnis.....	XV
Tabellenverzeichnis.....	XVIII
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	XIX
Literaturverzeichniss.....	XXIII

1. Einleitung

Die Entwicklung von elektronischen Bauelementen, speziell Halbleiterbauelementen, ist soweit gereift, dass sie heute in der Lage sind, hohe Ströme bzw. Spannungen zu verarbeiten. Der Einsatz neuer und optimierter Materialien im Bereich Halbleiter, Gehäusematerialien und ebenso neue und optimierte Fertigungstechnologien (Vgl. [Rin06], [Inf17b]) bieten die Möglichkeit, Bauelemente in immer kleineren Bauformen zur Verfügung zu stellen. Dies führt zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit ganzer Baugruppen. Dabei entstehen zumeist sich widersprechende Anforderungen. Beispielsweise ein Produkt mit hoher Zuverlässigkeit, welches zugleich mit minimalen Kosten für Material und Herstellung realisiert werden muss. Gleichermäßen besteht die Forderung nach einer hohen Ressourceneffizienz, d. h. mit einem optimalen Einsatz von Materialien und Energie eine bestimmte Funktion mit einer bestimmten Zuverlässigkeit zu erreichen [DKE12], [DKE07], [Poe10], [DKE90]. Aus diesen Forderungen resultiert eine bedarfsgerechte und damit effiziente Energieversorgung und Steuerung von elektrischen Verbrauchern. Rückblickend auf die letzten Jahrzehnte befähigte dies elektronische Geräte zur Übernahme von Aufgaben im täglichen Leben, in Fertigungsprozessen und bei sicherheitsrelevanten Aufgaben. Dennoch sind im Betrieb einer Schaltung alle Bauteile neben äußeren klimatischen Belastungen auch den zusätzlichen elektrischen und den aufgrund der resultierenden Verlustleistungen ebenfalls der inneren klimatischen Belastung ausgesetzt, welche sich im Betrieb lebensdauerlimitierend auswirken. Ebenso führt der Anstieg an elektronischen Geräten und somit deren Störgrößen zu lokalen Veränderungen im Bereich der energetischen und ebenso der stofflichen klimatischen Komponenten, wie z. B. zusätzlich thermische und mechanische Belastungen, aber auch die zunehmenden Hochfrequenzanwendungen wie z. B. Klasse-D-Leistungsverstärker, Schaltregler oder Mobilfunknetze, welche ein breites elektromagnetisches Spektrum an Störungen hervorbringen.

Die permanente Steigerung der Leistungsfähigkeit geht mit einer steigenden Sensibilisierung einzelner Bauteile, der ganzen Baugruppe und somit auch des kom-

pletten Systems für äußere Störgrößen einher. Mit dieser ebenfalls steigenden Komplexität kann sich eine Vielzahl von Fehlermöglichkeiten einstellen.

Der Zeitpunkt des Ausfalls kann sich dabei nicht nur als Nichterfüllung der Funktion äußern, sondern sich zu Gefahren für Mensch und allg. Gütern ausweiten. Um dies zu vermeiden, Folgekosten zu reduzieren und die Absicherung der Zuverlässigkeit bzw. eine Ausweitung der Lebensdauer zu gewährleisten, sind Kenntnisse über den Zustand eines Systems in der Nutzungsphase von bedeutendem Interesse [Jeo13], [DKE03], [Hai92], [Esc06], [Rak02].

Ziel der Arbeit ist es, ein Schutzsystem zu entwickeln, welches auch durch die aktuellen Trends bedingte Steigerung der Anforderungen an eine elektronische Baugruppe, die Schutzfunktion aufrechterhält und ebenfalls zur Verfügung stellen kann. Dazu werden zunächst Tendenzen im Bereich Bauteilentwicklung und die Anforderungen an elektronische Baugruppen recherchiert und beschrieben. Auf dieser Basis erfolgt die Erstellung des erforderlichen Funktionsumfangs des Schutzsystems mit Aufstellung und Beschreibung nötiger Teilfunktionen. Im nächsten Schritt wird ein Algorithmus zur Entwicklung und Dimensionierung des Schutzsystems erstellt. Dazu gehört ebenfalls die Erstellung einer Prüfungsvorschrift für die zu schützende Baugruppe und für das anliegende Klima. Mit der Umsetzung der theoretischen Betrachtungen in ein reales System erfolgt die Verifizierung einer erreichbaren Schutzfunktion an einem konkreten Beispiel.

2. Stand der Forschung und Technik

Der zunehmende Einsatz elektronischer Baugruppen hat aufgrund kostengünstiger und auch zuverlässiger Fertigungen in unterschiedlichsten Bereichen Einzug gehalten. Die permanente Weiterentwicklung elektronischer Bauteile, beispielsweise bei der Verringerung der Größe oder der Erweiterung des Funktionsumfangs von integrierten Schaltkreisen, macht dies möglich. Moderne Bauteile stellen dabei hinsichtlich der Leiterplattenfertigung oder Entwicklung angepasster Lötpasten ständig neue Herausforderungen an die Elektronikindustrie. Eine Beschreibung des aktuellen Stands der Technik wird in den folgenden Abschnitten durchgeführt.

2.1 Aktuelle Marktsituation

Es ist seit einiger Zeit ein gegenläufiger Trend in der Wertung elektronischer Baugruppen zu erkennen. Einerseits bestehen ein permanentes Vorantreiben der Bauteilentwicklung, Forderungen nach Innovationen, z. B. im Consumer-Bereich, sowie auch der Zwang einer schnellen Markteinführung, andererseits eine immer kürzere Produktlaufzeit. Hierbei stehen sich somit immer kürzer werdende Entwicklungszeiten mit steigenden Anforderungen in Bereichen wie z. B. Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit bei beständiger Integrität des Systems und die steigende Komplexität der geforderten Funktion bei ebenfalls steigendem Leistungsumsatz der Bauteile gegenüber. Heute können die Entwicklungsdauer eines Gerätes, die dazugehörigen Werkzeugkosten und der erforderliche Zeitaufwand für die Herstellung jedoch dazu führen, dass neue Produkte die Anforderungen hinsichtlich eines günstigen Verkaufspreises und einer schnellen Markteinführung nicht mehr erfüllen [EIP17b]. Aus Sicht des Entwicklers sind die genannten Fakten noch zu konkretisieren. Zunehmende Packungsdichten, Erhöhung der Geschwindigkeit von Mikrocontrollern und Leistungsfähigkeit bei Transistoren bei gleichzeitiger Steigerung des klimatischen Eingriffvermögens (z. B. durch Abgabe einer Wärmemenge) oder die Erhöhung der Störanfälligkeit gegenüber klimatischen Belas-

tungen aufgrund steigender Komplexität von Schaltkreisen stehen rauen klimatischen und elektrischen Bedingungen des Einsatzorts gegenüber.

Definition Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit ist definiert als die Fähigkeit einer Betrachtungseinheit, eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen für ein gegebenes Zeitintervall zu erfüllen.

Diese kann einerseits qualitativ beschrieben oder andererseits quantitativ als Überlebenswahrscheinlichkeit ermittelt werden, [Bir91]. Ebenso wird damit die Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Anforderungen an die Zuverlässigkeit zu erfüllen, beschrieben (DIN 40041:1990-12) [DKE90]. Die Zuverlässigkeit gibt demnach die Wahrscheinlichkeit an, dass in einer Zeitspanne T kein Ausfall auftreten wird, der die Funktion der Einheit beeinträchtigt.

In den unterschiedlichen Einsatzgebieten elektronischer Systeme (Consumer, Automotive, Luftfahrt und Militär) ergeben sich unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit, Lebensdauer sowie klimatischer und mechanischer Belastungen. Tabelle 2.1 stellt als Beispiel die unterschiedlichen Temperaturbereiche in den einzelnen Einsatzgebieten dar.

Tabelle 2.1: Temperaturbereiche in den verschiedenen Einsatzgebieten [Kra00]

Einsatzgebiet	Temperaturbereich
Consumer	0 °C bis +70 °C
Industrie	-40 °C bis +85 °C
Automotive	-40 °C bis +125 °C
Militär	-55 °C bis +150 °C

Neben den Temperaturbereichen existieren weitere Unterschiede in den Anforderungen. Beispielsweise sind mechanische Belastungen im Consumer-Bereich vernachlässigbar, im Automotive-Bereich sind diese jedoch bezüglich der Vibrationsbeschleunigung und des Frequenzbereiches genau definiert. Gleichmaßen existiert mit 15 kV eine um das 5 Fache höhere ESD Absicherung (engl. electrostatic discharge) gegenüber der Consumer-Elektronik [fra14]. Die in diesem Bereich existierende geringe Anforderung bezüglich der Zuverlässigkeit äußert sich in einer geforderten durchschnittlichen Lebensdauer von 3 Jahren gegenüber dem Automobil-Bereich mit 10 Jahren bis 15 Jahren. Des Weiteren sind eine Dokumentation von Ausfallverhalten und Schulungen des Bedienpersonals von Sicherheitsanwendungen gegenüber dem Industrie-Bereich und ebenfalls redundante Systeme gegenüber dem Luftfahrt-Bereich nicht erforderlich.

Im Automobil-Bereich herrscht eine große Variantenvielfalt elektronischer Systeme aufgrund kunden- oder länderspezifischer Anpassungen bei gleichzeitig großen Stückzahlen. Dies ergibt statistisch eine hohe Zuverlässigkeit. Gleichmaßen ist eine optimale Wartung von Kraftfahrzeugen durch den Kunden aufgrund einer fehlenden Schulung im Gegensatz zu Piloten oder Bedienpersonal von Prozessautomatisierungssystemen nicht unbedingt gewährleistet. Dennoch nimmt im Automobil-Bereich laut [qzo17] in den letzten Jahren der Funktionsumfang im Bereich Bedienbarkeit, Infotainmentsysteme und autonomes Fahren rasant zu. Dieser Grund erzwingt den Einsatz neuer Technologien, wie z. B. 20-/22-nm CMOS-Prozessen, welche gegenüber der besser verstandenen „älteren“ Technologien zunächst durch Zuverlässigkeit erkannt und verstanden werden muss [tud17].

Um eine hohe Produktzuverlässigkeit zu erreichen, wird häufig die Vorgehensweise des V-Modells, welches z. B. in [tuk17] beschrieben ist, eingesetzt. Um ausgereifte Konstruktionsmethoden und -verfahren sicherzustellen, kommen verschiedene analytische Zuverlässigkeitsmethoden zum Einsatz. Laut [Ben04] ist die Erfüllung von strengen Zuverlässigkeitsanforderungen nur zu gewährleisten, wenn neben qualitativen Aussagen über die Produktzuverlässigkeit (generiert durch FMEA oder Design-Reviews) gleichmaßen auch quantitative Methoden wie

Fehlerbaumanalyse, Markov-Analyse, Monte-Carlo-Simulation etc. eingesetzt werden.

Im Gegensatz zum Automobil-Bereich, in dem verschiedene Standards eingesetzt werden, wird im Luftfahrt-Bereich der Entwicklungsstandard ARP 4754 (Certification Considerations for Highly-Integrated Or Complex Aircraft Systems) mit festgelegten Reviews und eine Zertifizierung durch eine unabhängige Instanz wie beispielsweise die Joint Aviation Authority, kurz JAA, mit den Richtlinien Joint Aviation Regulations, kurz JAR eingesetzt. Im Luftfahrt-Bereich wird eine hohe Verfügbarkeit verlangt, welche sich bei deutlich kleinerer Stückzahl an Elektronikkomponenten in höheren Kosten für personalintensive und langwierige Entwicklung und Erprobung eines neuen Konzepts äußern. Bei gleichzeitig geforderten maximalen Ausfallwahrscheinlichkeiten für den Verlust eines Flugzeuges aufgrund eines Elektronikdefektes nach EADS (European Aeronautic Defence and Space) im militärischen Bereich bei ca. $10^{-5}/h$ und im zivilen Bereich von etwa $10^{-6}/h$ sind deshalb aufwändige Redundanzen in den elektronischen Systemen vonnöten.

Der Industriebereich unterscheidet sich grundsätzlich vom Automobil- und Luftfahrtbereich beispielsweise durch die eingesetzten Standards z. B. [DKE16] mit dem Ziel, die Gefährdung, die vom technischen System ausgeht, zu minimieren. In [DKE11] (DIN EN 61508, Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme Teil 1: Allgemeine Anforderungen) wird dazu neben einem Lebenszyklusmodell für ein sicherheitsbezogenes System gleichzeitig das System hinsichtlich möglicher Gefährdungen untersucht und in Sicherheitsintegritätslevel, kurz SIL, eingestuft. Tabelle 2.2 zeigt dazu die erforderlichen Ausfallgrenzen in den verschiedenen SIL Levels.

Tabelle 2.2: Ausfallgrenze für Sicherheitsfunktionen [DKE11]

SIL	Betriebsart mit niedriger Anforderungsrate	Betriebsart mit hoher Anforderungsrate
4	$\geq 10^{-5}/h$ bis $<10^{-4}/h$	$\geq 10^{-9}/h$ bis $<10^{-8}/h$
3	$\geq 10^{-4}/h$ bis $<10^{-3}/h$	$\geq 10^{-8}/h$ bis $<10^{-7}/h$
2	$\geq 10^{-3}/h$ bis $<10^{-2}/h$	$\geq 10^{-7}/h$ bis $<10^{-6}/h$
1	$\geq 10^{-2}/h$ bis $<10^{-1}/h$	$\geq 10^{-6}/h$ bis $<10^{-5}/h$

2.2 Schädigungsursachen und Ausfallerscheinungen elektronischer Baugruppen

Die Ursache für die begrenzte Lebensdauer elektronischer Baugruppen (BG) sind Belastungen, welche permanent auf ein ganzes System und dessen Bestandteile einwirken. Somit verkürzt sich die Lebensdauer ebenfalls im ausgeschalteten Zustand oder bei Lagerung.

Für die Beschreibung von Schädigungsursachen und Ausfallerscheinungen werden folgende Begriffe definiert:

Definition Lebensdauer

Die Lebensdauer definiert die Zeit, in der ein technisches System eine vorherbestimmte Funktion ohne den Austausch von Komponenten erfüllt [Cha86], [Run10].

Definition Belastung

In dieser Arbeit wird unter der Belastung eine negative Beeinflussung aller Bauelemente einer BG verstanden, welche eine Verkürzung der Lebensdauer zur Folge hat. Die negativen Einwirkungen rufen physikalisch oder chemisch bedingte Materialveränderungen hervor, welche sich zum Ausfallzeitpunkt als zeitweise oder dauerhaft auftretende Ausfallerscheinungen äußern. Weiterhin existiert eine Korrelation zwischen Stärke und Häufigkeit der Einwirkung und der Verkürzung der Lebensdauer.

Tabelle 2.3 stellt die Umweltbedingungen, die daraus resultierenden Hauptauswirkungen und die typischen Schäden dar.

Tabelle 2.3: Auswahl der Hauptauswirkungen der einzelnen Umweltbedingungen [DKE95]

Klimakomponente	Hauptauswirkung	Typische Schäden
Hohe Temperatur	Oxidation, Rissbildung, Sublimation, Viskositätsminderung, Ausdehnungen, Verdampfen,	Versagen der Isolationsfähigkeit, Mechanisches Versagen,
niedrige Temperatur	Versprödungen, Schrumpfen, Viskositätserhöhung	Verstärkter Verschleiß aufgrund thermischer Ausdehnung
Temperaturwechsel	Temperaturschock	Mechanisches Versagen, Rissbildung, Schädigung von Abdichtungen
Hohe Luftfeuchtigkeit	Ad- und Absorption von Feuchtigkeit, Quellungen, Korrosion, Elektrolyse	Mechanisches Versagen, Risse,
Niedrige Luftfeuchtigkeit	Austrocknung, Versprödung	
Sonnenstrahlung	Chemische, physikalische und photochemische Reaktion: Versprödung, Erwärmung, Verfärbung, Ozonbildung	Versagen von Isolation
Sand und Staub	Abrieb, Festfressen, Verminderung der Wärmeleitfähigkeit	Erhöhter mechanischer und elektrischer Verschleiß
Korrosive Atmosphären	Minderung von Isolierfähigkeit, Leitfähigkeitserhöhung	Erhöhter mechanischer und elektrischer Verschleiß
Mechanische Bewegung	Mechanische Ermüdung, Resonanzanregung	Mechanisches Versagen, verstärkter Verschleiß

Die in Tabelle 2.3 aufgelisteten Belastungen sind einzelne Größen, welche grundsätzlich zusammen auftreten und als Klima bezeichnet werden. Die in dieser Arbeit genutzte Definition des Klimas lautet wie folgt:

Definition Klima

Das Klima ist definiert als physikalische und chemische Prozesse an einem Ort sowie die implizierten Fremdfunktionen.

Als Fremdfunktionen werden importierte Funktion wie z. B. externe Taktsignale oder Spannungsversorgungen verstanden. Externe Signale können in ein System einwirken und dieses beeinflussen.

Eine Unterteilung der betrachteten Klimakomponenten (vgl. Tabelle 2.3) erfolgt in energetische Klimakomponenten, z. B. Temperatur oder mechanische Schwingungen, und stoffliche Klimakomponenten, z. B. Staub, Feuchtigkeit und Aerosole. Weitere Klimakomponenten können biologischer, als Pilz-, Viren und Bakterienbefall, oder auch chemischer Natur als korrosive Atmosphäre sein. Des Weiteren ist eine Klassifizierung der am Betriebsort wirkenden Prozesse, z. B. nach Erscheinungsbildern, wirkender Stärke, statistischer Auftretenswahrscheinlichkeit oder durch dessen Folgen möglich. Eine mögliche Unterteilung ist der Norm DIN-EN 60721-3 [DKE04c] zu entnehmen.

Die Ursachen für Ausfälle lassen sich nach [Mid10] in die Kategorien Unterbrechung, Kurzschluss, Arbeitspunktverlagerung und Drift zurückführen. Der Fehler, der zu einem Ausfall führte, ist am zerstörten oder beschädigten Bauteil oftmals von außen nicht zu erkennen. Es kann eine Vielzahl von Fehlerquellen, wie z. B. zeitweise, nicht zum Ausfall führende Überlastung, Materialermüdungen oder auch Verschleiß in Betracht gezogen werden. Es werden Temperatur, Temperaturzyklen, Feuchtigkeit, Feuchtigkeitszyklen, mechanische Belastungen und korrosive Atmosphären als Ursachen für Materialveränderungen wie Gefügeveränderungen, Korrosion, intermetallisches Phasenwachstum und Dentritenwachstum genannt. Aus der Materialbeeinflussung entstehen Fehler, welche sich als Bruch, Kontaktabhebung, Oxidation oder Kurzschluss der Bonddrähte äußern.

Nachfolgend sind Ursachen und Ausfallerscheinungen näher beschrieben.

Elektrische Belastung

Neben der leitungsgebundenen Elektromigration (siehe Migrationseffekte im Abschnitt 2.4) existieren weitere elektrische Belastungen. Nach [Mor16] findet bei thermoelektrisch aktiven Materialien, wie z. B. Kupfer, Gold, Nickel, eine beiderseitige Beeinflussung der Größen Wärme und elektrische Energie sowie die Umwandlung einer Energieform in die jeweils andere statt. Zur Thermoelektrik gehören der Seebeck-, Peltier- und Thomson-Effekt. Die dabei entstehenden Spannungsunterschiede und fließenden Ströme können zu einer Verschiebung des Arbeitspunktes in der BG führen und somit zusätzliche Belastungen hervorrufen. Eine elektrostatische Entladung (ESD) stellt für elektronische Bauteile, insbesondere für Halbleiterbauteile, eine große Belastung dar. Je nach aufgeladener Störquelle und örtlicher Begebenheit ist eine Entladung mit 5 kV bis 25 kV möglich. Die Quelle kann dabei einen Stromimpuls von 1 A bis 50 A mit einer Einwirkzeit der Entladung von 0,5 ns bis 20 ns abgeben. Nach [Gon92] ist für die Zerstörung bzw. zeitweise Störung die in Tabelle 2.4 aufgelistete Energie erforderlich.

Tabelle 2.4: Energie zur Zerstörung von Halbleiterbauteilen (Auswahl)

Bauteil	Energie, die notwendig ist zur	
	vorübergehenden Störung in J	Zerstörung in J
CMOS IC, allg. Halbleiter	10^{-7}	10^{-6}
Signaltransistoren, Schaltdioden	10^{-6}	10^{-5}
Low-Power-Transistoren, Signaldioden	10^{-5}	10^{-4}
Leistungstransistoren, Leistungsdioden	10^1	10^2

Elektrische Belastungen, bei denen Ströme und Spannungen für eine längere Zeit (bis zu > 1 ms) einwirken, werden als EOS (engl. Electrical Overstress) zusammengefasst. Als Folgen sind geschmolzene oder verdampfte Bonddrähte, Risse und Aufplatzungen an Bauteilgehäusen zu nennen. Eine EOS-Schädigung kann

sich am betroffenen Bauteil oder an einer ganzen Baugruppe durch einen überschüssigen Versorgungsstrom und einen niedrigen Widerstand zwischen Versorgungsspannung und Masse bemerkbar machen. Als Gründe sind z. B. unkontrollierte Spannungstöße an der Stromversorgung, Spannungsspitzen durch die externe Verbindung mit kapazitiver Ladung, Bildung von Antennen und die Aufnahme externen Schaltrauschens, induktive Lasten, schlechte Erdung, die zu übermäßigem Rauschen auf der Grundebene führt, und EMI (elektromagnetische Störung) durch schlechte Abschirmung in einer elektrisch rauen Umgebung zu nennen.

Thermische Belastung

Erhöhte Temperaturen stellen einen großen Einfluss auf die Lebensdauer von elektronischen Bauteilen dar. Beispielsweise liegt aufgrund dessen ein verstärkter Verschleiß des Gateoxides am Transistor vor.

Ebenfalls nennt [Säm13] dazu weitere folgende Effekte: Beim Time-Dependent Dielectric Breakdown (TDDB), auch Gate-Oxide-Breakdown (GOB) Effect genannt, bei dem eine Zerstörung des Transistors durch die Ausbildung von Tunnelströmen auf das Gate hervorgerufen wird. Ebenso im Hot-Carriers (HC) Effect, bei dem aus dem Source Drain-Kanal Elektronen in das Gateoxid diffundieren und dort Schäden anrichten. Weiterhin wird die Bias Temperature Instability (BTI), bei der in dem Temperaturbereich von 100 °C bis 250 °C und negativer Gate-Source-Spannung eine Veränderung der Schwellspannung V_{th} , der Konduktanz g_m und des Drainstroms erfolgen und somit die Transistoreigenschaften verändern kann, genannt. Dies wird durch die Ansammlung von Ladungsträgern am Gateoxid erreicht, wodurch eine Veränderung der Ladungsverteilung und -dichte des Gateoxids erfolgt.

Ein aufgrund eines schnellen Temperaturanstiegs auftretender Effekt wird als Popcorning bezeichnet. Hierbei kommt es durch das Verdampfen von im Gehäuse eingeschlossenem Wasser zu Rissen oder zum Aufplatzen des Gehäuses. Aus diesem Grund müssen Bauteile in einer vor Feuchtigkeit schützenden Verpackung aufbe-

wahrt werden. Die maximale Lagerzeit in normaler Atmosphäre wird als Moisture-Sensitivity-Level im Datenblatt des Bauteils angegeben.

Mechanische und thermomechanische Belastung

In dieser Belastungsart wirkt eine Kraft auf ein Material oder einen Körper, was sich als Stauchung und Streckung äußert. Diese Kraft kann zyklisch gleichförmig, beispielsweise als sinusförmige Schwingung, impulsartig durch Stöße oder auch als stochastische Bewegung auftreten. Die einwirkende Kraft ist in ihrer Ursache in mechanisch, thermisch und thermomechanisch unterteilbar.

Beispielhaft ist in (2.1) dazu eine Längenänderung aufgrund einer mechanischen Einwirkung bei gleichbleibender Temperatur (isotherme Verhältnisse) dargestellt.

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \varepsilon_m \quad \text{mit} \quad \varepsilon_m = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.1)$$

σ – Zugspannung

F – einwirkende Kraft

A – Fläche, auf die die Kraft wirkt

E – die Materialkonstante Elastizitätsmodul

ε_m – Dehnungsamplitude aufgrund einer mechanischen Kraft

Die auf eine Leiterplatte wirkende Kraft ist gleichermaßen auch von elektronischen Bauteilen erzeugbar. Als Beispiele dafür sind Motoren und Transformatoren, welche sinusförmige Vibrationen erzeugen, Relais als Quelle für Schocks und impulsartige Stöße oder z. B. Lautsprecher für die Erzeugung stochastische Bewegung genannt.

Als weitere Ursache für eine mechanische Kraft ist die thermische Einwirkung zu nennen. Die Ausdehnung des Materials kommt in diesem Fall durch das Auftreten der Temperaturgradienten zu Stande. Eine Dehnungsamplitude ist in (2.2) exemplarisch durch eine Längenänderung dargestellt.

$$\varepsilon_{th} = \Delta l = l_0 \alpha \Delta T \quad (2.2)$$

- Δl – Längenänderung, auch
- ε_{th} – Dehnungsamplitude aufgrund thermischer Einwirkung
- l_0 – Anfangslänge
- α – Ausdehnungskoeffizient
- ΔT – Temperaturdifferenz

Treten beide Belastungsarten auf, wird die Kombination als thermomechanische Belastung bezeichnet. Die Verformung eines Materials aufgrund mechanischer und thermischer Einwirkung ist in (2.3) dargestellt.

$$\varepsilon_{\text{Gesamt}} = \varepsilon_{\text{m}} + \varepsilon_{\text{th}} \quad (2.3)$$

In Abhängigkeit des Wertes der Dehnungsamplituden und des Materials, in denen sie auftreten, wird vom Material eine unterschiedliche Menge an Schwingspielen bis zur Ermüdung ertragen. Die Menge an ertragbaren Schwingspielen ermöglicht eine Bereichseinteilung.

Im Bereich der Langzeitermüdung, auch als HCF-Ermüdung (engl. high cycle fatigue) bezeichnet, tritt eine elastische Dehnung mit geringen Amplituden auf. In dieser Belastungsart liegen die Zyklenzahlen bis zum Ausfall bei größer 10^4 Zyklen. Diese werden z. B. durch Vibrationen in Motoren verursacht. Die Kurzzeitermüdung, auch als LCF-Ermüdung (engl. low cycle fatigue) bezeichnet, ist durch einwirkende Belastungen bei denen plastische Dehnungen mit großen Amplituden auftreten, gekennzeichnet. Eine Materialermüdung folgt schon bei niedriger Zyklenzahl kleiner als 10^4 Zyklen. Eine Einordnung der Lang- und Kurzzeitfestigkeit im Wöhlerdiagramm ist in Abbildung 2.2 dargestellt, in dem die Zahl noch ertragbarer Schwingspiele mit statistischer Genauigkeit vorausgesagt werden. Für die Bestimmung der Wöhlerlinien wird die lineare Schadensakkumulation nach Palmgren und Miner eingesetzt, siehe Abschnitt 2.4.3.

Die einwirkende Belastung führt zu einer Materialermüdung, wodurch es zur Zerstörung von Bauteilen, Abrissen von Bauteilen vom Bauteileträger oder zur Ermüdung von Lötverbindungen kommen kann. Die damit verbundene steige Kontaktverschlechterung und die Erhöhung der Übergangswiderstände führt zusätzlich zu

einer Erhöhung der thermischen Belastung. In Kombination mit unterschiedlichen thermische Ausdehnungskoeffizienten von z. B. Keramik (ca. 7 ppm/K) und Kupfer-Metallisierung (17 ppm/K) der Materialien von Baugruppe und Bauelement sind beispielsweise Gehäusebrüche möglich. Nach [Epv17] sind die hohen Unterschiede bei den Wärmeausdehnungskoeffizienten von Si (2,7 ppm/K) und Al-Bonddraht (24 ppm/K) speziell bei Leistungshalbleitern, welche große Temperaturzyklen und mechanische Wechselbeanspruchungen ertragen müssen, Grund für die Abhebung des Bonddrahtes vom Substrat. Die thermomechanische Belastung der Verbindung vom Bond-Draht zum Halbleiterkristall ist maßgebend für die Lebensdauer von Leistungshalbleitern. Untersuchungen wurden in [Mid10] durchgeführt. Dieses Problem wird durch den Einsatz von ungehäusten Leistungshalbleitern minimiert. Hierbei wird das Substrat direkt auf die zumeist aus Keramik bestehende Leiterplatte geklebt und die Bonddrähte direkt an der Leiterbahn verlötet. Eine thermisch resistente und gleichbleibend flexible Schicht aus Silikon schützt das Substrat vor Verunreinigung. Um eine direkte, zerstörungs- und rückwirkungsfreie Analyse mechanischer Spannungen in elektronischen Bauelementen zu ermöglichen, werden technologisch herstellbare piezoresistive Materialien in Test-Bauteile integriert [Pus11]. Neben der Erfassung der im Betrieb und auch der im Herstellungsprozess auftretenden mechanischen Spannungen ist ebenfalls eine Erfassung von Temperatur und Feuchtigkeit möglich. Eine weitere Möglichkeit ist ein analytischer Lösungsansatz mit dem Ziel z. B. die Berechnung einer Lebensdauer von Aufbauten bzw. Bauformen unter vergleichbarer Belastung zu bestimmen. Die Modellparameter werden empirisch durch Einprägung einer Belastung in ein Testbauteil ermittelt und in ein mathematisches Modell eingepflegt. Hierzu existieren zahlreiche Schädigungsmodelle, wobei der für diese Schädigungsart angewandte Ansatz von Coffin und Manson stammt, siehe Abschnitt 2.4.2.

Chemische Belastung

Zu einer chemischen Belastung für eine BG und auch einer beschleunigten Korrosion kommt es durch die Kombination von Luftfeuchtigkeit und häufig auftretenden Gasen wie beispielsweise H_2S oder CO_2 . Die in Kombination mit der Luft-

feuchtigkeit entstehende, wässrig saure Verbindung ist besonders an metallischen Kontakten der elektronischen Bauteile schädlich. Ebenfalls werden Kunststoffe, wie der Lötstopplack oder auch die Gehäusebauteile dadurch angegriffen. Besonders schädlich ist dabei der Schwachpunkt zwischen Bauteilgehäuse und Anschlusspin. Eine Schädigung an dieser Stelle begünstigt das Eindringen von Feuchtigkeit in das Bauteil.

Bei der elektrochemischen Migration handelt es sich um einen Korrosionsvorgang, bei dem es aufgrund von Feuchtigkeit auf dem Trägermaterial einer elektronischen Baugruppe zur Bildung von Kurzschlussbrücken zwischen Metallisierungen und Kontakten kommen kann. Eine Verunreinigung der Baugruppe durch Löt-rückstände und die Baugruppenminiaturisierung bei gleichzeitiger Erhöhung der Packungsdichte begünstigen diesen Effekt [Sta08].

2.3 Übersicht Zuverlässigkeit

In der Gesamtheit aller Eigenschaften eines Erzeugnisses existiert neben den systembeschreibenden Eigenschaften, wie z. B. Spannungs-, Strombereiche, umsetzbare Leistung, der Gebrauchswert eines Gerätes, welcher durch Kennziffern, wie z. B. Genauigkeit, Störanfälligkeit, Umweltbeeinflussung und Preis, beschrieben wird. Mit dem Begriff Zuverlässigkeit, als Teileigenschaft der Qualität, wird die Auswirkung bzw. der wirtschaftliche Verlust oder eine Gefährdung von Leben beim Ausfall eines Gerätes beschrieben.

Die Definition der Zuverlässigkeit sagt aus, dass ein technisches Gerät seine Funktion mit vorgegebenen Leistungsparametern innerhalb einer Toleranz in einem Zeitintervall erfüllt [Kra00].

Als Ursachen für die Ausfälle von Geräten sind z. B. Dimensionierungsfehler in der Projektierung oder auch Fehler in der praktischen Umsetzung einer Planung zum fertigen Gerät durch fehlerhafte Montage oder Fertigung zu nennen. Letztendlich beeinflusst auch die Bedienung und Wartung der Geräte maßgeblich deren Lebensdauer und somit die Zuverlässigkeit.

Die Zuverlässigkeit als stochastische Größe ist nicht direkt messbar. Es besteht die Möglichkeit einer analytischen Bestimmung der Zuverlässigkeit aus den Zuverlässigkeitskennwerten der Bauteile des Produktes. Ein weiterer Ansatz ist, durch die Ermittlung der Ausfallhäufigkeit die Zuverlässigkeit empirisch zu bestimmen. Dazu wird bei der Planung und Verifikation der Zuverlässigkeit von Bauelementen bei einer Stichprobe von Prüflingen die Zeit oder ein Parameter, der mit der Zeit korreliert, kontinuierlich oder in Stufen bis zum Ausfall gesteigert. Dabei wird unabhängig von zeitlichen Abläufen als Last eine mechanische Spannung, eine elektrische Spannung oder auch ein elektrischer Strom eingesetzt. Der Zusammenhang mit der Zuverlässigkeit ergibt sich dann aus dem über die Lebensdauer erfassten Belastungsprofil des Bauelements, das Aussagen darüber gibt, wie häufig Belastungen in gegebener Höhe auftreten. Das Ziel eines solchen Versuches ist es, den Zusammenhang zwischen einer zum Ausfall führenden Belastung und der damit verbundenen Lebensdauer zu ermitteln. Ebenfalls wird daraus die Zuverlässigkeitsfunktion über den untersuchten Bereich und eine Aussagewahrscheinlichkeit bestimmt. Bei der Ermittlung der Größen wird nicht ein einzelnes Bauteil, sondern immer eine Stichprobe, bestehend aus mehreren Bauteilen, untersucht, woraus sich aufgrund der sich ergebenden Streuung das Ergebnis als statistische Wahrscheinlichkeit darstellt.

Für die Approximation und quantitative Beschreibung der drei Phasen Früh-, Zufalls- und Spätausfall der Lebensdauer (siehe Abbildung 2.1) wird hauptsächlich die Weibullverteilung eingesetzt. Der zeitliche Verlauf der Ausfallrate ist mit der Form einer Badewanne vergleichbar. Dieser Verlauf ist aufschlussreicher, da er die drei Phasen der Lebensdauer ineinander vereint. Die Zuverlässigkeitskenngrößen werden mittels der Weibullverteilung durch folgende Zusammenhänge dargestellt:

Die Überlebenswahrscheinlichkeit in (2.4) gibt an, wie viele Systeme einer betrachteten Stichprobe zu einer bestimmten Zeit noch funktionieren.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^b}, t < t_0 \quad (2.4)$$

- $R(t)$ – Überlebenswahrscheinlichkeit
 t – Lebensdauer
 t_0 – Ausfallfreie Zeit
 b – Formparameter oder Ausfallsteilheit
 η – Charakteristische Lebensdauer

Der Parameter t_0 beschreibt den Zeitpunkt, ab dem die Ausfälle beginnen. Durch die Transformation $\eta = T - t_0$ und $t - t_0$ wird die ausfallfreie Zeit berücksichtigt. Dabei erfolgt eine Verschiebung des Ausfallverlaufs längs der Zeitachse.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^b} \quad (2.5)$$

- $F(t)$ – Ausfallwahrscheinlichkeit

Die Dichtefunktion in (2.6) gibt die Zahl der Ausfälle in Abhängigkeit von dem Formparameter b an. Dies trifft besonders für reparierbare Systeme zu, da hier nach einer Anlaufphase, in der sich ein stationärer Zustand zwischen Betrieb und gerade in Reparatur befindlichen Systemen einstellt, die Zahl der intakten Systeme konstant ist. Die Ausfallrate erlaubt damit die Beurteilung der „Anfälligkeit“ eines Systemelements mit dem Alter [Klö16].

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{b}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^b} \quad (2.6)$$

- $f(t)$ – Ausfalldichte

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{b}{\eta} \left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^{b-1} \quad (2.7)$$

- $\lambda(t)$ – Ausfallrate

Zu Beginn der Lebensdauer von Systemen ist ein Ausfall auf Material- oder Fertigungsschwächen zurückzuführen. Der als Frühausfall (engl. early failures) bezeichnete und mit der Zeit abnehmende Verlauf wird in der Weibullverteilung (2.4) mit einem Formparameter $b < 1$ charakterisiert.

Die für ein System kalkulierte Lebensdauer verläuft in der Phase der Zufallsausfälle (engl. random failures). Ausfälle in dieser Phase sind auf übermäßige oder Belastungen außerhalb der Dimensionierung oder Wartungsfehler zurückzuführen. Die nahezu konstante Ausfallrate wird in der Weibullverteilung (2.4) mit dem Formparameter $b = 1$ beschrieben.

Mit fortschreitender Lebensdauer ist aufgrund von Alterungs- und Verschleißerscheinungen ein Anstieg von Ausfällen von Systemen zu verzeichnen. In dieser als Spätausfallrate (engl. wearout failures) bezeichneten Phase wird die ansteigende Ausfallrate mit einem Formparameter $b > 1$ in (2.4) beschrieben.

Durch die Addition der Ausfallraten mit dem Formparameter $b < 1$, $b = 1$, $b > 1$ ergibt sich eine Summenkurve (Badewannenkurve). Abbildung 2.1 verdeutlicht die drei Phasen der Lebensdauer und zeigt die als Badewannenkurve beschriebene Summe der Verteilungen.

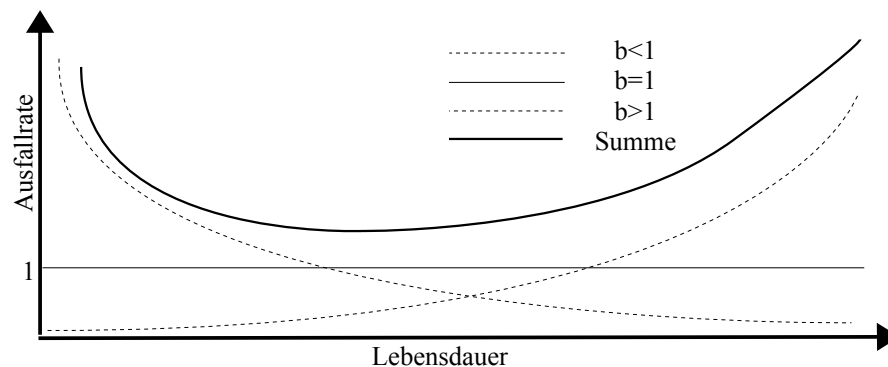


Abbildung 2.1: Ausfallrate in Abhängigkeit der Formparameter

Neben der Weibullverteilung sind noch weitere Verteilungsarten für die Charakterisierung der einzelnen Phasen der Badewannenkurve einsetzbar. Dazu zählen z. B. die Exponentialverteilung, welche nur für die Phase der Frühausfälle eingesetzt werden kann. Ebenfalls ist für die Beschreibung der Verschleißausfälle die Normalverteilung einsetzbar.

Für eine analytische Bestimmung der Zuverlässigkeit wird das betrachtete System in Grundschaltungen, wie Reihen-, Parallel- und ausgewählte gemischte Schaltungen

gen, zerlegt und für diese Teilsysteme die Zuverlässigkeit anhand der Zuverlässigkeitskennwerte der einzelnen Bauteile ermittelt.

Die Berechnung der Ausfallraten ist in einigen Normen beschrieben. Dazu zählt neben der [IEC04] die IEEE STD 493 (IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems), in der Daten zur Systemzuverlässigkeit in industriellen und kommerziellen Netzverteilungssystemen bereitgestellt werden. Die im zivilen und militärischen Bereich eingesetzte MIL-HDBK-217 [MIL91] enthält eine Reihe von empirisch entwickelten Ausfallraten-Modellen. In [DKE12] wird zur Berechnung der Ausfallrate zusätzlich die elektrische Belastung durch Strom und Spannung betrachtet.

2.4 Methoden und Verfahren zur Beschreibung der Ausfallursachen

Ausfallmodelle ermöglichen die Berechnung einer mittleren Ausfallzeit bzw. der mittleren Anzahl der Zyklen bis zu einem Ausfall. Der berechnete Wert ist dabei der charakteristische Wert einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Ausfälle. Die Verteilung der Ausfälle kann durch nicht vermeidbare Variationen der Materialeigenschaften von Komponenten bzw. Produkten begründet werden [Rau12], [MIL92], [Han10], [Kün94]. Nachfolgend sind die bekanntesten Ausfallmodelle, auf die Bezug genommen wird, aufgelistet.

2.4.1 Arrhenius-Beziehung

Die Arrhenius-Gleichung beschreibt die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeiten eines Vorgangs von der Temperatur. Die Beziehung ist in (2.8) dargestellt.

$$t_f = A_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (2.8)$$

- t_f – Ausfallzeit, Zeit bis zum Ausfall
- E_a – Aktivierungsenergie, minimale Energie für das Auftreten eines Ausfallmechanismus. Sie ist für jedes Material unterschiedlich und wird daher empirisch bestimmt. Eine Möglichkeit ist die Ermittlung der Ausfallzeit unter verschiedenen Temperaturen.
- T – statische Temperatur
- k – Boltzmannkonstante ($8,617 \cdot 10^{-5} \text{eV/K}$)
- A_0 – Materialkonstante, mit der Dimension Zeit. Sie beschreibt einen Beschleunigungsfaktor

2.4.2 Power-Law-Modelle

Power-Law-Modelle beschreiben die Beziehung zwischen einer einwirkenden Belastung und der sich ergebenden Lebensdauer oder einem Ausfallzeitpunkt. In (2.9) ist die Beziehung zwischen einer Dehnung $\Delta \varepsilon_p$ und der Anzahl ertragbarer mechanischer Schwingungen N dargestellt. Durch die Kenntnis der Periodendauer der mechanischen Schwingung ist eine Umrechnung in eine Zeit möglich.

$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{2 \varepsilon_f} \right)^{-\beta} \quad (2.9)$$

- $\Delta \varepsilon_p$ – plastische Dehnung eines Materials
- ε_f – Koeffizient für die ermüdungsrelevante Dehnung, Bruchdehnung
- N – Anzahl der Schwingspiele
- β – duktiler Ermüdungsexponent, liegt für Metalle zwischen 1,4 und 2

Ist der Exponent β kleiner als null, wird diese Beziehung als „Inverse Power Law“ bezeichnet. Als Beispiel für ein Power-Law-Modell ist die Coffin-Manson Beziehung in [Mid10] beschrieben.

2.4.3 Palmgren-Miner-Modell

Die folgenden Betrachtungen erfolgen in Anlehnung an [Köh12].

Das Palmgren-Miner-Modell ist nicht als Lebensdauermodell anzusehen, da es beschreibt, wie sich eingehende Belastungen mit beliebiger Ursache als Teilschäden summieren. Es wird davon ausgegangen, dass eine zu ertragene Belastung mit dem Einbringen von Energie verbunden ist und an einem Material eine Arbeit verrichtet wird. Die Zerstörung des Bauelements erfolgt, sobald die maximal anzunehmende Arbeit erreicht wurde. Somit beschreibt das Modell die Schädigung eines Bauelements durch die Akkumulation zu ertragender Teilschädigungen. Der Zusammenhang (2.10) drückt das Verhältnis der ertragenen Belastung zur maximal ertragbaren Belastung und ebenso das Verhältnis der Zyklenzahl zur maximal möglichen Zyklenzahl aus.

$$D = \left(\frac{n_1}{N_1}\right) + \dots + \left(\frac{n_j}{N_j}\right) = \left(\frac{b_1}{B}\right) + \dots + \left(\frac{b_j}{B}\right) \quad (2.10)$$

D – Gesamtschädigung

B – Summe der ertragbaren Belastungen

b_j – Belastungswert

n_j – Anzahl ertragener Zyklen auf dem Belastungsniveau von b_j

N_j – Menge der ertragbaren Zyklen, bezogen zum Niveau von b_j

$$D = \sum_{j=1}^i \frac{n_j}{N_j} \quad (2.11)$$

Ein Ausfall tritt ein, wenn die Summe der Teilschädigungen bzw. die Gesamtschädigung D in (2.11) größer als oder gleich eins ist.

Das Palmgren-Miner-Modell ist nur für Belastungen im Kurz- und Zeitfestigkeitsbereich einer Wöhlerlinie bestätigt. Um auch Belastungen des Dauerfestigkeitsbereichs (vgl. Abbildung 2.2) mit einzubeziehen, wurden verschiedene Anpassungen an der Miner-Regel, z. B. eine Modifikation nach Haibach, durchgeführt.

2.4.4 Migrationseffekte

Elektromigration

Bei der Elektromigration kommt es aufgrund eines Stromflusses zu Migrationseffekten in Leitungen, bei denen Material in Richtung des Stromflusses (physikalische Stromrichtung) abtransportiert wird. Grund dafür ist die Kollision von Elektronen mit Metallionen. Ebenfalls unterstützt dies das elektrische Feld. Diese Ursachen als einwirkende Kraft begünstigen, dass die zuvor ungerichtete, thermisch aktivierte Diffusion eine Vorzugsrichtung erhält [Sta08]. Es erfolgt eine Ausdünnung der Leitung und dies begünstigt die Erhöhung von Übergangswiderständen. Gleichermaßen erfolgt eine Anreicherung von Material am Ende der Leitung, woraus Kurzschlüsse mit anderen Leitungen resultieren können. Im Hinblick auf die Lebensdauer ist dieser Effekt durch die Black'sche Gleichung in (2.12) beschrieben [Säm13].

$$t_{50} = A \left(J - J_{\text{Lim}} \right)^{\frac{E_a}{kT}} \quad (2.12)$$

- t_{50} – die Zeit, in der die Hälfte der Leiterbahnstrukturen ausgefallen sind
- J – Stromdichte auf der Leitung
- J_{Lim} – die kritische Stromdichte für die Elektromigration
- E_a – Aktivierungsenergie
- k – Boltzmannkonstante
- A – Materialkonstante
- T – Temperatur

Bei der Elektromigration wird der Effekt durch bereits eingetragene Defekte begünstigt. Die Thermomigration hingegen wird einzig durch hohe Temperaturen und Stromdichten bestimmt.

Kompensiert wird der Effekt durch die Änderung des Verhältnisses der Höhe der Leitung zu ihrer Breite. Als weitere Gegenmaßnahme ist der vermehrte Einsatz von Aluminiumleitern gegenüber Kupferleitungen und ebenso der Einsatz von Low-k-Dielektrikum-Materialien [McP07] zu nennen.

Elektrochemische Migration im Isolator

Die elektrochemische Migration ist eine Form der Korrosion, bei der sich typische Fehlerbilder ebenfalls als bleibende und temporäre Kurzschlüsse darstellen, welche wiederum eine lokale Überhitzung der Baugruppe hervorrufen können. Als Voraussetzungen für die Entstehung einer elektrochemischen Migration ist ein elektrochemisches Brückenwachstum aufgrund eines auf der Oberfläche der Leiterplatte adsorbierten Feuchtefilms oder durch Temperaturwechsel induzierte Wechselbetaung der Baugruppe erforderlich. Gleichermaßen begünstigen Rückstände und Verunreinigungen diesen Effekt. Beispielsweise setzen Lötückstände (meistens organische Säuren oder Halogenidsalze) den Taupunkt lokal bis auf 60 Prozent relativer Feuchte herab [Ael16]. Aufgrund der Feuchte wird die Isolationsfähigkeit der Lötstoppsmasken herabgesetzt und durch Elektrolyse eine anodische Metallauflösung hervorgerufen. Ebenfalls wird die Bewegung der Ionen dabei durch den Potenzial- (V_{CC} oder Signalkontakt) und Konzentrationsgradienten sowie durch das anliegende elektrische Feld mitbestimmt. Die Anfälligkeit zur elektrochemischen Migration kann anhand der eingesetzten Metalle und der damit verbundenen Spannungsreihe abgeschätzt werden. Vorbeugende Maßnahmen sind die Auswahl der Lötstoppsmaske und die Auswahl der auf der Leiterplatte eingesetzten Metalle. Beim Einsatz von Metallen ist darauf zu achten, dass diese nur schwer lösliche Komplexe und ebenso keine Hydroxide bilden. Als ideal hat sich eine Nickel-Gold-Metallisierung herausgestellt. Weitere grundsätzliche Möglichkeiten im Schaltungslayout sind Potenzialtrennungen bei gleichzeitig größtmöglichem Abstand zwischen Spannungsversorgung und Masse sowie kurze Signalzeiten und niederohmige Bauelemente, da sie im Betrieb eine höhere Verlustwärme entwickeln. Weitere Möglichkeiten zur Minderung sind z. B. Lackbeschichtung oder Einbau in ein Gehäuse. Die Norm IPC 9202 (Material and Process Characterization/Qualification Test Protocol for Assessing Electrochemical Performance) beschreibt den von einer Leiterplatte zu realisierenden Isolationswiderstand von mindestens $10^8 \Omega$. Die bei diesem Widerstand verbleibenden Kriechströme erfüllen damit eine Mindestanforderung.

2.4.5 Darstellung von Belastungen

Um die Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit von Werkstoffen oder Bauteilen zu ermitteln, werden mechanische Beanspruchungen, bestehend aus periodischen Lasten, eingepägt. Die Ermittlung der Werkstoffkennwerte erfolgt durch Auftragen zyklischer, meist sinusförmiger Beanspruchungs-Zeit-Funktionen in einem Dauer-versuch. Zur Ermittlung der Werte werden die Bauelemente auf mehreren Lastho-rizonten, bei denen das Spannungsverhältnis von Unterlast zu Oberlast konstant ist, geprüft. Der als Wöhler-versuch bezeichnete Versuch läuft, bis ein definiertes Versagen (Bruch, Anriss) eintritt oder eine festgelegte Anzahl an Zyklen überstan-den ist. Die Zeit (Anzahl von Zyklen oder Schwingspielen) bis zum Ausfall kann im Rahmen statistischer Genauigkeit mit Hilfe der Wöhlerlinie vorausgesagt wer-den. Die erfassten Daten werden nach der Methode der linearen Schadensakkumu-lation nach Palmgren und Miner aufgetragen.

Für die Bewertung einer Belastung und der dazugehörigen Schädigung werden die für mechanische Belastungen geltenden Beziehungen in (2.9) und (2.13) genutzt. Demnach wird den erfassten Belastungen eine Schädigung zugeordnet. Um eine statistische Lebensdauer zu ermitteln, sind folgende Schritte erforderlich: Zu-nächst werden die Einzelschädigungen innerhalb einer Belastungsklasse nach (2.9) bestimmt. Im nächsten Schritt erfolgt das Aufsummieren aller bisher ertrage-nen Einzelschädigungen nach (2.10). Es wird davon ausgegangen, dass eine Ge-samtschädigung ($D=1$) eine Zerstörung des Bauteils zur Folge hat. Daraus ist mit der Kenntnis der bisher ertragenen Menge an Belastungen nach (2.13) die ma-ximal ertragbare Menge an Belastungszyklen N_{max} berechenbar. Diese geben bei Umrechnung in eine Zeiteinheit eine Aussage über die noch verfügbare Lebens-dauer.

$$N_{max} = \frac{1}{D} \cdot \sum_{i=1}^n h_i \quad (2.13)$$

Sobald eine Korrelation zwischen einer Belastung und der Zeit vorliegt, können die dargestellten Verhältnisgleichungen in der allgemeinen Form für alle Arten von Belastungen herangezogen werden. Die in [Hai06] und [Gud95] beschriebene

Modifikation der Miner-Regeln gilt zunächst nur für mechanische Belastungen. Um Aussagen hierzu auch für nicht mechanische Belastungen treffen zu können, müssen maximal ertragene Schädigungen und deren Einwirkdauer empirisch ermittelt und die aufgezeigte Berechnung mit der vorliegenden Belastung durchgeführt werden.

Die Darstellung erfolgt im Wöhlerdiagramm, bei dem üblicherweise die Nennspannungsamplitude (Belastung) linear oder logarithmisch über der logarithmisch dargestellten ertragbaren Schwingenspielzahl aufgetragen wird. In dem sich ergebenden Kurvenzug werden dabei die drei Bereiche Kurzzeitfestigkeit, Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit deutlich.

Im Bereich Zeitfestigkeit verläuft die Wöhlerkurve bei doppellogarithmischer Darstellung nahezu in einem Geradenverlauf. In diesem und dem Bereich Kurzzeitfestigkeit erfolgt ein Versagen des Bauteils nach einer bestimmten Zahl an Schwingspielen. Im Dauerfestigkeitsbereich können prinzipiell beliebig viele Schwingspiele ertragen werden [Ber04], [Mey03], [Wil10].

Ursprünglich wurde das Wöhlerdiagramm für mechanische Belastungen erstellt. Dennoch ist es möglich, auch nichtmechanische Belastungen, die eine Korrelation mit einer Lebensdauer aufweisen, in gleicher Weise darzustellen.

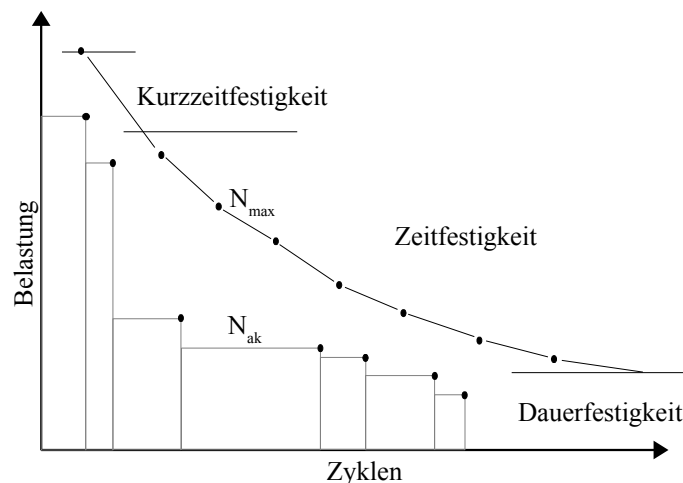


Abbildung 2.2: Beispielhafte Wöhlerkurve mit akkumulierten Lastkollektiven nach [Köh12]

Abbildung 2.2 zeigt die beschriebene Darstellungsart. Im weiteren Verlauf wird diese aufgrund der Verarbeitung unterschiedlicher Belastungsarten als N_{\max} -Verlauf bezeichnet. Weiterhin sind bereits ertragene Belastungen als Kollektive zusammengefasst und sortiert aufgetragen (Verlauf N_{ak}). Diese werden nachfolgend als Belastungsmenge bezeichnet. Es muss zwischen einer bisher ertragenen Belastungsmenge (vgl. N_{ak} in Abbildung 2.2) und einer maximal ertragbaren Belastungsmenge unterschieden werden. Im Anhang A.6 sind Beispiele für die Umwandlung zeitlich erfasster Messwerte zur Darstellung als akkumulierte Belastung aufgeführt.

Dennoch muss der N_{\max} -Verlauf nicht zwingend eine maximal ertragbare Menge an Belastungen visualisieren. Die Darstellung ist gleichermaßen dafür geeignet, z. B. aus Spezifikationen heraus festgelegte zu ertragende Mengen an Belastungen darzustellen.

Für die Erstellung des N_{\max} -Verlaufs wurde sich an der Darstellung und Berechnung der Wöhlerlinie orientiert, dennoch wird der N_{\max} -Verlauf nachfolgend nicht primär für die Darstellung einer maximal ertragbaren Belastung, sondern gleichermaßen für die Darstellung einer zu ertragenden Belastung innerhalb einer vorgeschriebenen Lebensdauer verwendet.

2.5 Methoden und Verfahren zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Verlängerung der Lebensdauer

Um eine Zuverlässigkeitserhöhung und Lebensdauerverlängerung zu erreichen, ist eine Einrichtung zum Schutz vor lebensdauerlimitierenden Einwirkungen erforderlich. Diese wird als Schutzmaßnahme bezeichnet und ist in der vorliegenden Arbeit wie folgt definiert:

Definition Schutzmaßnahme

Eine Schutzmaßnahme ist eine Hard- und/oder Softwaremaßnahme, welche einwirkende Belastungen für eine elektronische Baugruppe reduziert.

In der EN ISO 12100:2010 (Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung) wird eine Schutzmaßnahme definiert als ein Verfahren, um Personen vor Gefährdungen zu schützen, die durch inhärent sichere Konstruktion nicht in angemessener Weise beseitigt werden können, oder vor Risiken zu schützen, die dadurch nicht ausreichend vermindert werden können,

Nach [Kra00] lassen sich drei Aufgaben für Schutzmaßnahmen definieren.

Tabelle 2.5: Aufgaben der Schutzmaßnahmen [Kra00]

I)	Sicherung eines Systems und dessen Funktion vor möglichen Umwelteinflüssen
II)	Sicherung eines Systems und dessen Funktion vor innerhalb des Systems erzeugten Störgrößen
III)	Sicherung der Umwelt vor von dem System erzeugten Störgrößen

Um eine Erhöhung der Lebensdauer zu erreichen, müssen die anliegenden lebensdauerverkürzenden Belastungen reduziert werden. Dies wird durch eine Schutzmaßnahme realisiert. Die dazu existierenden Möglichkeiten sind in Abbildung 2.3 zusammengefasst.

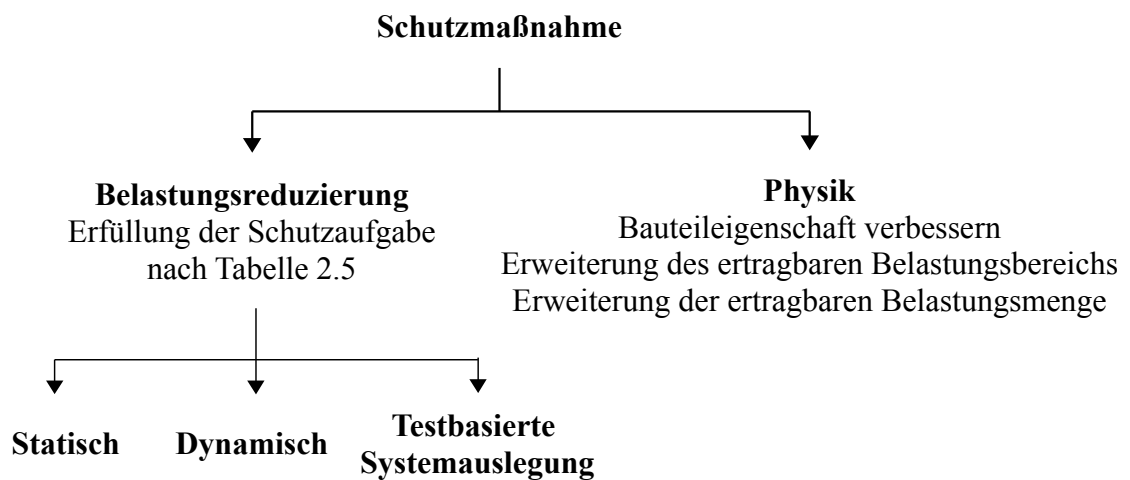


Abbildung 2.3: Grundlegende Varianten von Schutzmaßnahmen

Die Aufteilung der Varianten in Abbildung 2.3 unterscheiden sich zum einen in der Reduzierung örtlicher und betriebsbedingter Belastungen und zum anderen in der Anpassung des Bauteils an einwirkende Belastungen. Im Letztgenannten erfolgt eine Spezialisierung des Bauteils.

Beispielsweise wird der Einsatz von Siliziumkarbid-Halbleitern (SiC) vorgeschlagen. Diese bieten eine verbesserte Stromtragfähigkeit und Spannungsfestigkeit bei gleichzeitig erhöhter Zyklfestigkeit gegenüber Si-Halbleitern.

Aus der Optimierung der physikalischen Eigenschaften eines Bauteils folgt eine Erhöhung der ertragbaren Belastungsgröße und der ertragbaren Menge an Belastungen und somit eine Lebensdauerverlängerung. Dieses Verfahren ist indirekt als eine Schutzmaßnahme zu verstehen.

Eine weitere Variante ist nach [Kra00] die Erfüllung der Schutzaufgaben durch Minderung der Belastung. Bestehende Schutzeinrichtungen werden hauptsächlich nach dieser Maßnahme realisiert und werden wie folgt weiter aufgegliedert:

Statische Schutzeinrichtungen

Auf Basis bestehender Klimainformationen wird im Vorfeld die maximal eintretende Belastung als Worst-Case-Fall ermittelt und daraus eine erforderliche

Schutzmaßnahme dimensioniert. In der Ausführung bestehen statische Schutzeinrichtungen aus rein passiven Elementen, welche durch das konstante Verhalten einen gleichbleibenden, nicht anpassbaren Schutz bieten. Bei der Ausführung der Schutzmaßnahme erfolgt keine Reaktion auf einwirkende Belastungen. Für jede Störgröße ist eine separate Schutzeinrichtung erforderlich.

Laut [Sch12] haben sich in den letzten Jahren die Anforderungen an die Produkteigenschaften stetig erhöht. Dazu ist z. B. die Senkung des spezifischen Widerstands eines MOSFET (engl. metal-oxide-semiconductor field effect transistor) für erhöhte Zyklenfestigkeit elektronischer Baugruppen [IZM17] oder der Einsatz neuer Aluminium Bonds zur Vervielfachung der Anzahl an Temperaturhüben, die durchlaufen werden können [Inf17a], zu nennen. Auch die Eigenschaften der Leiterplatten erfahren eine zunehmende Spezialisierung bezüglich der Anforderungen im Bereich Hochfrequenzanwendung mit sehr geringer relativer Permittivität, Dickschichtkupfer für Hochstromanwendungen oder auch für stark thermisch belastete Anwendungen mit eingebrachten Kühlelementen, ebenso verstärkter Einsatz von Starrflex-Leiterplatten zur Verbesserung der Baugruppenzuverlässigkeit durch Senkung der Anzahl eingesetzter Steckverbinder [Kuc17]. Gleichmaßen wurde im Zuge der Umstellung von bleihaltigen zum bleifreien Lötprozess (RoHS Umstellung) die Störanfälligkeit von Lötverbindungen auf standardisiertem FR4-Material bei mechanischer Belastung untersucht. Ziel ist die Verbesserung der Zuverlässigkeit von Lötverbindungen bezüglich Rissbildung, siehe [Hut17], [Vas07] und [Fix07]. In [Füs06] wird die Anwendung flüssiger bzw. temporär im Betriebszustand flüssiger Lötstellen vorgeschlagen. Ferner wurde die Delamination von Leiterplattenmaterial [Bah11], [Tau10] oder die Erfassung mechanischer Belastungen der Leiterplatte nach [Wör14] durchgeführt. Die genannten Spezialisierungen der Leiterplatte sind u. a. Ergebnisse dessen.

Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung von Belastungen ist deren Umwandlung in elektrische Energie mittels Energy Harvesting [IFA12], [Hem11].

Im Bereich des EMV-Schutzes werden Lösungen wie Glasfronten mit eingebrachtem Metallgewebe oder thermoplastische Kunststoffe mit leitfähigen Kohlenstofffasern angeboten. Gleichfalls bieten diese Schutz vor mechanischen Belastungen

nach IEC 61587-1 [EIP17], [EIP12]. Jedoch stellt dies jeweils nur einen Kompromiss zwischen den weiteren Anwendungen eines Gehäuses, wie Stützfunktion und auch Design, dar [EIP15]. Dabei gilt primär die Aufrechterhaltung der Funktion einer elektronischen Baugruppe für einen festgelegten Zeitraum, ungeachtet des Verbleibs der von der Baugruppe erzeugten Verlustleistung (im Sinne von Störgrößen). Dies kann bei ortsveränderlichen Geräten durch die Abdeckung eines breiten Spektrums eintretender klimatischer Situationen, aber auch bei Erweiterungen bestehender Gerätesysteme, bezüglich der Summierung der örtlichen Störgrößen, zu Problemen führen. Um vielseitigen Einsatz zu finden, werden die verfügbaren Schutzmaßnahmen auf einen hohen ausweisbaren Schutzgrad getrimmt und nach verschiedenen Standards, z. B. nach [MIL74], [MIL99], [MIL08] oder auch dem ARINC 404A, getestet.

Dynamische Schutzeinrichtungen

Es erfolgt die Bildung der Schutzmaßnahme durch Erfassung einer von außen einwirkenden Belastung und die Anpassung der Schutzgröße an die einwirkende Belastung. Die Schutzeinrichtung stellt dabei ein Parallelsystem zur zu schützenden Funktion, welches als Sensor-Steuerung-Aktor beschreibbar ist, bereit.

Als Beispiel sei die Temperaturüberwachung einer CPU genannt. Bei Überschreitung einer Temperaturschwelle wird ein Lüfter zugeschaltet oder in Abhängigkeit der Temperatur die Lüfterdrehzahl und somit die Stärke der Konvektion geregelt.

Testbasierte Systemauslegung

Als immer wichtiger werdende Ergänzung zur Ausbildung erforderlicher Schutzeinrichtungen sind vor- und nachbereitende Tests zu nennen. Dabei wird das stetig wachsende Eingriffsvermögen elektronischer Systeme bei gleichbleibendem Informationsumfang der Klimabelastungen durch ständig verbesserte Tests kompensiert. Hierbei werden durch Vorüberlegungen die zur Verfügung stehenden Informationen der Belastungen am Einsatzort differenziert, daraus weiterführende In-

formationen generiert und in Kombination mit nachbereitenden Tests ein Design bestmöglich an spätere Belastungen angepasst.

Bestehende statische und dynamische Schutzmaßnahmen erfüllen trotz zahlreicher unterschiedlicher Realisierungen keinen vollständigen Schutz gemäß der Definition in [Hul04].

Statische Schutzmaßnahmen bieten zwar einen optimalen Kosten-Nutzen-Faktor durch schnelle Dimensionierung, jedoch ist zu sagen, dass aufgrund der mehrfachen Verwendung der gleichen Baugruppe unter verschiedenen Klimaten (bei großen Chargen) statistisch gesehen nur ein geringer Teil der maximalen Belastung unterlegen ist. Für einen Großteil der Baugruppen jedoch sind die Schutzeinrichtungen überdimensioniert und haben sich nur beim Einsatz bei ortsveränderlichen Geräten als vorteilhaft erwiesen. Bei der Dimensionierung statischer Schutzeinrichtungen werden diese nur durch Beaufschlagung mit einem Sicherheitsaufschlag oder gegebenenfalls durch eine (auch mehrfach) redundante Ausführung beherrschbar. Dynamische Schutzmaßnahmen bieten bei vergleichbaren Belastungen durch Anpassung der Schutzwirkung ein deutlich erhöhtes Schutzvermögen. Dennoch gilt, dass aufgrund des unbekanntes Außenklimas keine zeitgleiche Reaktion und somit keine dynamische Erfüllung des Schutzes ohne Zeitversatz erfolgen kann. Weiterhin beschreiben Modellrechnungen nur die Korrelationen zwischen Produktparametern, Umweltbedingungen und Alterung für größere Stichproben und versagen, wenn für einzelne Bauelemente Korrelationen zwischen den tatsächlichen Produktparametern und den während des Betriebs erfahrenen Betriebsbedingungen hergestellt werden sollen [Rid17]. Auch wird dadurch nicht bestimmt, welchen tatsächlichen Einflüssen ein individuelles Bauelement während des Betriebs unterworfen sein wird.

Im Nachfolgenden werden weitere Möglichkeiten zur Lebensdauererlängerung und zur Zuverlässigkeitserhöhung beschrieben.

2.5.1 Überdimensionierung von Komponenten

Wird die Überdimensionierung einer Komponente als Schutzmaßnahme gewählt, wird die Annahme getroffen, dass über die Lebensdauer des Bauteils größere als die derzeit anliegenden Belastungen zu erwarten sind. Diese werden zunächst in Erfahrung gebracht und ein Sicherheitsaufschlag addiert. Es wird ein Bauteil ausgewählt, welches diese Belastung laut seiner Spezifikation erträgt.

Beispiel 1: Statistische Temperaturverteilung an den Einsatzorten

Für die Dimensionierung einer erforderlichen Kühlfläche für ein Bauteil wird dessen produzierte Verlustleistung, die Bauform des Bauteils inklusive dessen R_{th} und ebenfalls die maximale Temperatur am Einsatzort einbezogen. Sind die ersteren Parameter noch genau bestimmbar, ist die Temperatur am Einsatzort meistens vage bis ungenau vorhersagbar. Hierbei steht meistens nur der auftretende Temperaturbereich zur Verfügung. Dieser Bereich wird über alle Angehörigen einer Stichprobe, welche sich in der gleichen Umgebungen befinden, bestimmt, daraus der Worst-Case-Fall ermittelt und mit einem Sicherheitsaufschlag versehen.

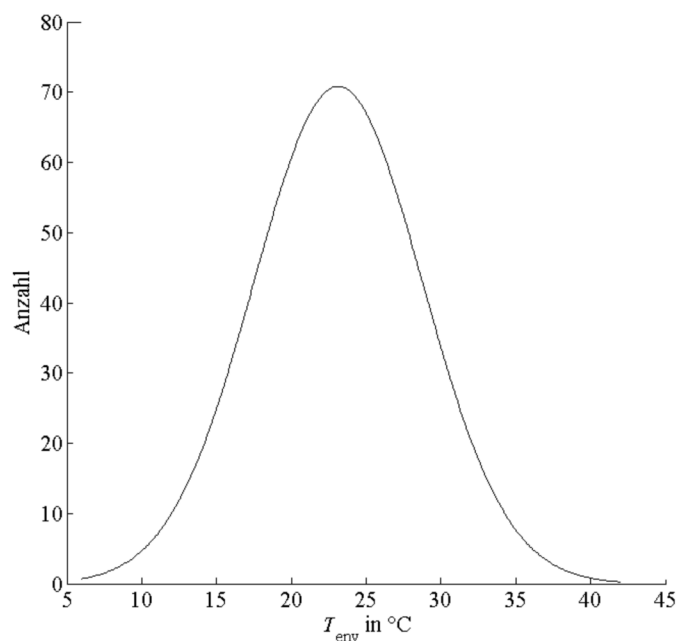


Abbildung 2.4: Beispielhafte Temperaturverteilungen

Abbildung 2.4 zeigt beispielhaft ein Histogramm für das Auftreten der Temperaturen einer Stichprobe. Die Kühlfläche wird auf die maximal auftretende Temperatur, z. B. 40 °C, dimensioniert und ist bezogen auf die Menge der Einsatzorte, an denen die Temperatur auftritt, wertemäßig überdimensioniert. Ein Großteil der Elemente der Stichprobe (Temperatur an den unterschiedlichen Einsatzorten) liegen unterhalb der zur Dimensionierung genutzten Maximaltemperatur. Das in dieser Arbeit beschriebene Verfahren ist in der Lage, die auftretende thermische Belastung des Bauteils zu reduzieren, woraus die Reduzierung der erforderlichen Kühlfläche folgt.

Beispiel 2: Spannungsspitzen am Transistor

Schalten Transistoren induktive Lasten, entstehen gefährlich hohe Spannungsspitzen in der Drain-Source-Strecke bei Feldeffekttransistoren bzw. Kollektor-Emitter-Strecken bei Bipolartransistoren. Die Spannungsspitzen können durch eine Zusatzschaltung, bestehend aus Widerstand, Kondensator und Diode (Snubberglied), eliminiert werden. Die Energiemenge des Spannungsimpulses wird dabei am Widerstand in Wärme umgesetzt. Die erforderliche Verlustleistung des Widerstands und somit dessen Baugröße ist damit von der Form des Impulses abhängig. Die Form des Impulses und die damit verbundene Energie sind direkt von der Ansteuerung des Transistors abhängig. Um die Impulsform und damit die Energiemenge zu beeinflussen, wurde der Transistor mit unterschiedlichen Ansteuerparametern, bestehend aus einer Variation der Frequenz, Slewrate und des Tastverhältnisses, beaufschlagt. Es wurde eine Testschaltung gemäß Abbildung 5.1 aufgebaut, um ein Snubberglied erweitert und die Verlustleistung am Widerstand gemessen. Die unterschiedlichen Ansteuermöglichkeiten und die daraus resultierende Eingriffsvielfalt ergeben verschiedene P_V -Werte an dem Snubber-Widerstand. Es stellt sich bei einem Großteil der Ansteuerungen eine sehr geringe Verlustleistung am Widerstand ein. Dennoch muss der Widerstand eine Verlustleistung von > 2 W aufweisen. Dies wirkt einer Miniaturisierung entgegen.

2.5.2 Redundante Systeme

Eine weitere Variante, die Zuverlässigkeit zu beeinflussen, ist der Aufbau eines Systems mit Serien- und Parallelstruktur. Durch die Einführung zusätzlicher Systeme gleicher Funktion wird ein redundantes System erstellt. Nach [Kon07] wird ein redundantes System notwendig, wenn ein Zuverlässigkeitswert nicht erreicht wird.

Redundante Systeme lassen sich wie folgt unterteilen:

1) Bei heißer Redundanz sind das Redundanzelement und das arbeitende Element über die Lebensdauer den gleichen Belastungen ausgesetzt. Aus der Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems in (2.14) ergibt sich für n gleiche Elemente dafür die Überlebensfunktion (2.15).

$$F_S = \prod_{i=1}^n F_E \quad \text{mit} \quad F_E = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.14)$$

$$R_S(t) = 1 - [1 - R_E(t)] \cdot [1 - R_E(t)] \quad (2.15)$$

F_S – Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems

F_E – Ausfallwahrscheinlichkeit eines einzelnen Systems

$R_S(t)$ – Überlebenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems

$R_E(t)$ – Überlebenswahrscheinlichkeit eines einzelnen Systems

2) Bei warmer Redundanz ist bis zum Ausfall des arbeitenden Systems das Redundanzelement einer geringeren Belastung ausgesetzt. Es gilt für die Überlebensfunktion der Zusammenhang (2.15).

3) Bei kalter Redundanz ist das Redundanzelement bis zum Ausfall des arbeitenden Elements keinen Belastungen ausgesetzt. Ein Umschalten erfolgt manuell oder automatisch. Bei Annahme gleicher Ausfallraten des arbeitenden und des Redundanzelements gilt (2.16).

$$R_S(t) = e^{-\lambda t} (1 + \lambda t) \quad (2.16)$$

λ – Ausfallrate

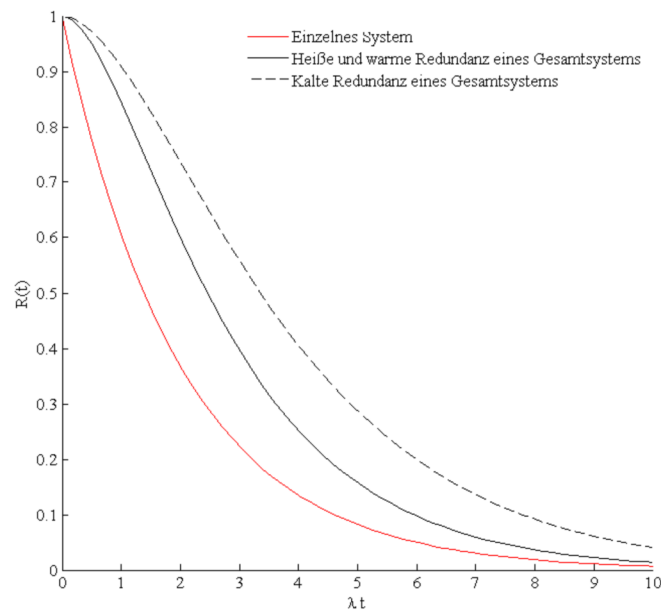


Abbildung 2.5: Verlauf der Überlebenswahrscheinlichkeit mit Gegenüberstellung möglicher Redundanzen

Abbildung 2.5 stellt die durch die verschiedenen Redundanzvarianten erreichte Überlebenswahrscheinlichkeit dar. Dabei wird zu einem einzelnen Element die heiße und warme Redundanz gegenübergestellt. Die kalte Redundanz, welche die höchste Überlebenswahrscheinlichkeit bietet, muss noch um ein Schaltelement, welches beim Ausfall vom ausgefallenen Element zum Redundanzelement schaltet, erweitert werden. Das Schaltelement ist in dieser Abbildung als ideal angenommen.

2.5.3 Auffinden von Schwachstellen durch Simulation und beschleunigte Alterungstests

Zu den praktischen Tests am Ende einer Entwicklung zählt die ergänzende Bewertung der Zuverlässigkeit mittels Robustness Validation, zu denen als wichtige Vertreter die HASS-, HALT- und HASA-Tests gezählt werden [McL09], [Hob05]. Bei diesen Tests werden die Baugruppen noch im Entwicklungsstadium einer beschleunigten Alterung durch erhöhte klimatische Belastung ausgesetzt. Die aufgedeckten Schwachpunkte werden im Entwicklungsstadium berücksichtigt.

Die Einhaltung von Produkt- und Herstellungsspezifikationen bis hin zum Endprodukt wird durch weitere Prüfungen abgesichert. Hierzu zählt z. B. die vollautomatische Verifikation von Schaltungsblöcken mittels In-Circuit-Test, bei dem schon während der Produktion die Funktionsprüfung durch Adaptierung des simulierten Einsatzfalls durchgeführt wird. Ebenso werden im sogenannten Burn-in-/Run-in-Test Frühausfälle durch definierte Temperatur- und / oder Lastzyklen aufgedeckt [Hob05], [Cha01]. Weiterhin werden elektrische Belastungen und funktionale Anforderungen, wie die Änderungshäufigkeit der Betriebszustände, betrachtet [ZVEI08]. Für die Ermittlung technologischer Grenzen einzelner Bauteile und ganzer Baugruppen wird der End-of-Life-Test herangezogen. Durch eine Dauerbelastung mit relevanten Beanspruchungen wird eine beschleunigte Alterung des Produktes erzwungen, daraus bedingte Abweichungen in den Produktspezifikationen erkannt, der Totalausfall des Produktes provoziert und die typische Lebensdauer des Produktes ermittelt.

Problematisch ist es hierbei, die relevante klimatische Belastung in ihrer Art, Intensität und Einwirkungsdauer sowie eine Mischung davon optimal anzugeben. Laut [DKE03] bestehen konzeptionelle Probleme in der Vorgehensweise für Qualifikationstests. Ebenso wird in [Hel07] von fehlender Realitätsnähe bei Betaungstests gesprochen. Derartige Belastungen treten in der Praxis nicht auf, woraus sich eine Bewertung der Testergebnisse als schwierig bis unmöglich erweist.

Im zunehmenden Maße wird die FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) eingesetzt. Mit dieser standardisierten Methode werden mögliche Fehler im diagnostischen Prozess aufgedeckt und bewertet [Bir91]. Die Weiterentwicklung elektronischer Komponenten hat auch eine ständige Aktualisierung verschiedener Normen zur Folge.

Um Anforderungen in der Entwicklung ein- und beizubehalten, sind weitere Tests und Methoden, z. B. Risikoanalyse, Ausfallart- und Fehlereffekt-Analyse [Säm13], [Ru00], [McP07], durchzuführen. Gleichmaßen gelingen Aussagen über das spätere Verhalten einer Baugruppe unter gegebenen Randbedingungen durch die Bestimmung einer Zuverlässigkeitskenngröße mittels MTBF-Analyse (engl. Mean Time Between Failure). Dabei werden auf Basis statistisch ermittelter

Daten eingesetzter Komponenten Schwachstellen und Verbesserungspotenziale aufdeckt.

2.6 Bewertung des Standes der Forschung und Technik sowie Beitrag der vorliegenden Arbeit

Die aufgezeigte fortschreitende Bauteil- und Baugruppenentwicklung erfordert zunehmend eine dynamische Erfassung aktuell auftretender Belastungen am Erscheinungs-/Wirkungsort der Baugruppe/des Bauteils bis hin zur permanenten Überwachung von Degradationen an Bauteilabschnitten. Dies erfordert ein eigenständiges Teilsystem zur Erfassung relevanter Belastungen. Eine Kontrolleinheit setzt die Informationen in die Steuerung entsprechender Aktoren um. Beispielhaft ist dazu die Steuerung einer erzwungenen Konvektion durch Messung einer Temperatur zu nennen [Fin17]. Im Derating-Verfahren, z. B. im Einsatz bei Wechselrichtern, wird durch eine kontinuierliche Erfassung thermischer und mechanischer Belastungen der Bauteile sowie der Aufbau- und Verbindungstechnik mit Abschalten bei Unterschreiten einer bestimmten Modulspannung reagiert [Sol17] und damit der Verschiebung des Arbeitspunkts nach außerhalb des Arbeitsbereiches vorgebeugt.

Neuste Entwicklungen, wie die Sentinel Silicon-Technologie, erlauben die Bestimmung der Lebensdauer eines Halbleiterbausteins während des Betriebs [Rid17]. Dabei kann die noch zur Verfügung stehende Lebensdauer eines Halbleiterbausteins abhängig von dessen konkreter Vorgeschichte bezüglich Temperatur, elektrischer Einstrahlung und Aufladung sowie der radioaktiven Strahlung auch während des laufenden Betriebs prognostiziert werden. Die fortschreitende Degradation eines Schaltkreises wird durch zusätzlich eingebrachte Duplikate des Schaltkreises ermittelt. Durch die gleiche örtliche Platzierung wird den Duplikaten die identische Belastung auferlegt. Durch die permanente Funktionsermittlung der Duplikate wird zu jedem Zeitpunkt eine Aussage über die verbleibende Lebensdauer der zu schützenden Schaltkreise ermöglicht. Dadurch werden beispielsweise hohe Stillstands- und Instandhaltungskosten reduziert. Es ist erkennbar,

dass im Schadensfall eine nachträgliche Analyse der gespeicherten Daten durchgeführt und somit im Nachhinein die Ursache für den Ausfall ermittelt werden kann.

Eine große wirtschaftliche Bedeutung im Bereich der Automobil-Elektronik nimmt laut [Hfo17] der Innovationszyklus der Elektronik ein. Dieser beträgt je nach Automobil-Marke durchschnittlich ein bis drei Jahre. Somit ist eine Reparatur eines sechs Jahre alten Autos mit Elektronik, welche bis zu sechs Generationen veraltet ist, aufgrund knapper, kostspieliger oder sogar nicht mehr verfügbarer Ersatzteile kaum zu bewerkstelligen. Weiterhin ist der Ersatz der alten Elektronikkomponenten durch Neuentwicklungen bislang wenig möglich.

Die Empfindlichkeit gegenüber elektrostatischen Auf- und Entladevorgängen ist als markantes Schädigungsphänomen im Betrieb elektronischer Baugruppen zu nennen. Dabei sind nahezu alle aktiven elektronischen Bauelemente sehr empfindlich gegenüber dieser Schädigung. Zunehmend werden auch mit Dünn- und Dick-schichtstrukturen hergestellte SMD-Kondensatoren und SMD-Widerstände nachweislich durch elektrostatische Entladevorgänge geschädigt [Ber17]. Dabei ist für eine Schädigung keine direkte Entladung am Bauteil erforderlich, bereits entstehende elektrostatische Felder führen zu einer Veränderung auf oder im Bauelement. Das empfindlichste Bauelement bestimmt die Empfindlichkeit der gesamten Baugruppe. Die in der CMOS-Technologie eingesetzten Feldeffekttransistoren weisen durch ihren Aufbau das Gateoxid als kritischste Stelle aus. Bei einer Schichtdicke von kleiner als 10 nm ist bereits durch die Ausbildung einer geringen elektrostatische Ladungsmenge die Gefahr eines Durchschlags und somit der Zerstörung des Bauteils gegeben.

Bipolare Leistungsbaulemente sind gleichermaßen durch elektrostatische Entladung gefährdet. Die Zerstörung eines pn-Überganges erfolgt dabei durch einen hohen Entladestrom. Elektronische Bauelemente können dazu in „energieempfindliche“ wie z. B. Leistungshalbleiter und „spannungsempfindliche“ Bauelemente wie z. B. CMOS-Bauelemente unterteilt werden [Ber17].

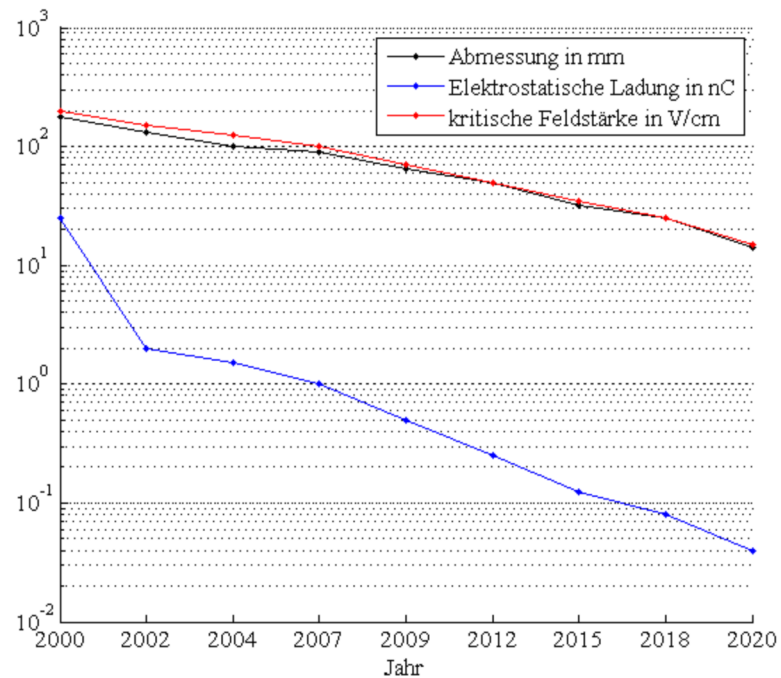


Abbildung 2.6: Entwicklung der Bauteilgröße und Senkung der kritischen Feldstärke in den nächsten Jahren [Ber17]

Abbildung 2.6 verdeutlicht die Entwicklung der Bauteilgrößen, die Steigerung der Empfindlichkeit gegenüber elektrostatischen Entladevorgängen und die damit verbundene Reduzierung der zur Zerstörung führenden elektrostatischen Feldstärke. Ebenfalls ist ersichtlich, dass die Entladeenergie eine immer größere Bedeutung gewinnt. Aufgrund des Trends der Miniaturisierung elektronischer Baugruppen wird sich nach [Ber17] in den nächsten Jahren die Empfindlichkeit gegenüber elektrostatischen Ladungen und Feldern um mindestens den Faktor 4 erhöhen. Die Langzeitverfügbarkeit von elektronischen Bauteilen stellt sich hinsichtlich ökonomischer, umwelttechnischer, aber auch wettbewerblicher Gründe als große technische Herausforderung dar. Zu den Gründen zählen immer kürzere Produktlebenszyklen und immer kürzere Verfügbarkeit von elektronischen Bauteilen, Laufzeiten von nur wenigen Jahren und eine nur begrenzte Verfügbarkeit nach Produktionsende. Als Obsoleszenz wird nach [Ae17] die Nichtverfügbarkeit von Material, Komponenten, Produkten, Prozessen und Wissen bezeichnet. Mit dem Einsatz der DIN EN 62402:2008-01, Anleitung zum Obsoleszenzmanagement [DKE08] werden die Folgen einer Nichtverfügbarkeit und der Vermeidung wirtschaftlicher

Schäden, wie lange Stillstandszeiten, mögliche Abkündigungen von Bauelementen oder Baugruppen, kontrollierbar. Weitere Punkte wie umweltpolitische Restriktionen, wie beispielsweise die RoHS Einführung, oder die Umsetzung z. B. nach der DIN EN ISO 14001, Umweltmanagementsysteme -Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung [DKE15] werden dadurch ebenfalls in ihrer Auswirkung beherrschbar. Um eine Langzeitverfügbarkeit von Produkten zu erreichen, werden derzeit Möglichkeiten wie Refabrikation von Elektronikbaugruppen, Reparatur bestehender Systeme, Nachentwicklungen und Erarbeitung von Nachserienprodukten bis hin zur dauerhaften Einlagerung eingesetzt. Dennoch gestalten sich diese Möglichkeiten aufgrund der immer kürzeren Produktlebenszyklen bzw. Weiterentwicklungen elektronischer Baugruppen zunehmend schwieriger.

Erhobene Daten über klimatische Belastungen am Einsatzort gehen nicht nur in die erforderlichen Designregeln der zu entwickelnden Baugruppe ein, wie z. B. notwendige Kühlmaßnahmen, Vibrationsdämpfer oder Schutzlacke gegen aggressive Medien und Feuchtigkeit, sondern ebenfalls in die Gestaltung des Gehäuses. Alle kombinierten Maßnahmen ergeben im Zusammenwirken das geeignete Konzept für die Sicherstellung des Betriebs der Baugruppe (BG).

Die einem System auferlegten internen und externen Einflüsse, z. B. thermische Einwirkungen, Vibrationen und mechanische Spannungen, magnetische und elektrische Felder oder Verschmutzung, reduzieren dessen Zuverlässigkeit während der Lebensdauer. Über diese vorherrschenden Einflüsse in der realen Einsatzumgebung ist zuvor der Entwickler zu informieren, um diese in den Entwicklungsprozess einfließen zu lassen. Jedoch stellt sich eine genaue Erfassung der klimatischen Situation am Einsatzort als problematisch heraus, da schon das Einbringen von Messeinrichtungen die klimatische Situation verändert und ebenso das resultierende Klima durch Fehlen der noch zu entwickelnden BG (als Störquelle) nicht vorherrscht.

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren zur Lebensdauererweiterung und Zuverlässigkeitserhöhung muss eine Vielzahl der beschriebenen Schädigungsmechanismen (siehe Abschnitt 2.4) im Betrieb der BG erkennen und dieser entgegenwirken. Die folgenden Belastungsarten werden in der Realisierung des zu entwickelnden

den Verfahrens an einer Demonstratorschaltung (siehe Kapitel 5) berücksichtigt. Die dazu notwendigen Bestandteile werden anschließend beschrieben und definiert.

Thermische Belastung

Eine zu hohe Chiptemperatur aufgrund einer hohen Außentemperatur oder zu hoher Verlustleistung führt zu einer schnelleren Degradation und somit beschleunigten Alterung und Verkürzung der Lebensdauer. Als signifikanten Effekt einer dauerhaft erhöhten Temperatur ist der Verschleiß des Gateoxides zu nennen. Ein Entgegenwirken ist nur durch die Reduzierung der Verlustleistung und somit der produzierten Wärmemenge möglich.

Mechanische Belastung

Eine von außen einwirkende mechanische Belastung kann von der Baugruppe nicht ohne zusätzliche Bauelemente wie z. B. passive Schwingungsdämpfer eliminiert werden. Die mechanische Störgröße wird beabsichtigt eingebracht. Der direkt auf der Leiterplatte befestigte Lüfter überträgt die Vibration auf die Leiterplatte und prägt somit eine in Schwingfrequenz, Amplitude und Beschleunigung definierte mechanische Belastung ein. Die vom Lüfter generierten mechanischen Störungen können beispielsweise durch Anpassung der Drehzahl beeinflusst werden. Des Weiteren ist der Grund für die Auswahl des Lüfters die gute Beherrschbarkeit in Regelungsmechanismen.

Elektrische Belastung

Geht man von einem als Schalter eingesetzten MOSFET, welcher eine Spannung auf eine Induktivität schaltet, aus, entstehen auf der Drain-Source-Spannung Spannungsspitzen. Diese führen zur Schädigung des Transistors und somit zur Funktionsunfähigkeit. Ebenfalls haben Untersuchungen gezeigt, dass große kurzzeitige Strompeaks neben starken Temperaturwechseln maßgeblich für die Schädigung der Kontaktierung von Bonddraht und Kristall verantwortlich sind [Mid10]. Dabei unterliegt der Bonddraht größeren mechanischen Dehnungen als der Kristall, so dass die Kontaktfläche bei längerem Einwirken in Mitleidenschaft gezogen wird. Für die Verringerung dieser Belastungen ist neben der Senkung der Tempe-

raturwechsel ebenfalls die Senkung der Menge und der Höhe der Strompeaks nötig. Eine Herabsetzung der elektrischen Belastungen wird durch ein „sanftes“ Einschalten des Transistors, also die Reduzierung der Schaltflanken der Drain-Source-Spannung durch Minimierung der Slewrate, erreicht.

Alle genannten Fehlerszenarien lassen erkennen, dass neben der Aufnahme bzw. Kenntnis der aktuellen fehlerverursachenden Belastung ebenfalls die Kenntnis über die Menge der ertragbaren Belastungen erforderlich ist. Ebenso ist erkennbar, dass neben der direkten zumeist nur eine indirekte Einflussnahme durch die Änderung der Betriebsweise des Transistors möglich ist. Eine Einflussnahme auf die stofflichen Klimakomponenten, wie z. B. Feuchtigkeit, Staub oder korrosive Atmosphären, kann ebenfalls nur indirekt vorgenommen werden. Diese Fehlermechanismen werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Die erforderliche Menge an maximal ertragbaren Belastungen wird nach Abschnitt 6.3 bestimmt und fließt in die Gestaltung des Verfahrens zur dynamischen Belastungsreduzierung ein.

Die steigende Leistungsfähigkeit elektronischer Bauelemente bereitet hinsichtlich des derzeit vorherrschenden Miniaturisierungstrends zunehmend Schwierigkeiten bei der Realisierung elektronischer Baugruppen. Ein weiterer Grund dafür ist die bevorzugte Nutzung bewährter Schutzmaßnahmen. Der Widerspruch wird derzeit noch durch weitere Spezialisierung der eingesetzten Schutzmaßnahmen ausgeglichen. Bevorzugt werden in Zweifelsfällen weiterhin noch Überdimensionierungen. Die heute üblichen Qualifikationsverfahren für elektronische Bauelemente, Baugruppen und gleichermaßen die Ausbildung erforderlicher Schutzmaßnahmen beruhen auf der Nutzung von standardisierten theoretischen Vorbetrachtungen zu Beginn und praktischer Tests zum Ende der Produktentstehung. Herkömmlichen Schutzmaßnahmen sind jedoch physikalische Grenzen gesetzt. Die Herstellung einer Schutzfunktion mit den genannten Schutzmaßnahmen gestaltet sich in Bezug auf die Bauteil- und Baugruppenentwicklung zunehmend schwieriger. Wird der Baugruppe die Fähigkeit gegeben, aktiv auf Störgrößen und Belastungen Einfluss zu nehmen, ist eine Reduzierung der klimatischen und elektrischen Belastung des Gerätes möglich.

Entwickelt werden soll eine erweiterte dynamische Schutzmaßnahme zur Erfüllung der Schutzaufgabe. Diese besteht aus einer Erweiterung der Fähigkeit einer Baugruppe, in Echtzeit am Einsatzort ihre klimatische Belastung zu erfassen und zum Eigenschutz ihren energetischen Umsatz anzupassen. Die von der Baugruppe erfassten Daten werden entnommen und zu Zwecken der Langzeitdiagnostik herangezogen. Dadurch sind Aussagen zur Zuverlässigkeit und Robustheit gezielter quantifizierbar. Ebenfalls ergibt sich ein Erkenntnisgewinn zu grundlegenden Informationen der von einzelnen Bauteilen erzeugten Störgrößen und deren Zusammenspiel mit der klimatischen Situation am Einsatzort.

Die Betrachtung der im Betrieb an einem Bauteil auftretenden Belastungen ermöglicht es, einen Eingriff in die elektronische Baugruppe zu generieren, um bei Aufrechterhaltung der Funktion die anliegenden Belastungen zu minimieren.

Durch den Eingriff wird eine Senkung der Schädigung je Zeiteinheit ermöglicht und somit gelingt eine Verlängerung der Lebensdauer des zu überwachenden Bauteils [DKE12], [Jeo13], [Spr05]. Weiterhin werden nicht nur die Belastungen gesenkt, sondern die von einem Bauteil ertragbaren Belastungsmengen bewusst ausgenutzt (vgl. Abbildung 2.2).

Aus der Kenntnis der N_{\max} -Verläufe resultiert nicht nur eine reine Belastungssenkung, ebenfalls ist eine genaue Einstellung von Belastungswerten und deren Auftretensmenge innerhalb der Lebensdauer einer BG möglich. Dazu zählt ebenfalls das bewusste Zulassen größerer Belastungswerte.

Das in dieser Arbeit zu erstellende soft- und hardwarebasierte Verfahren setzt in einer Baugruppe sensorisch erfasste Belastungen in Beziehung zu der zugehörigen maximal ertragbaren Menge der Belastung und reagiert on demand auf die Belastungen, um diese zu reduzieren.

Diese Aufgabe wird durch einen Multiparameterregler (MPR), welcher nach dem Betriebs-Interventions-Verfahren (BIV) arbeitet, erledigt.

Definition Multiparameterregler (MPR)

Unter einem Multiparameterregler wird eine der Funktion einer elektronischen Baugruppe übergeordnete Instanz verstanden, welche in der Lage ist, Belastungs- und Klimaparameter der elektronischen Baugruppe zu erfassen und ihre belastungsbestimmenden Betriebsparameter zu beeinflussen. Die Beeinflussung erfolgt dabei mit dem Ziel der dynamischen Belastungsreduzierung.

Definition Betriebs-Interventions-Verfahren (BIV)

Das Betriebs-Interventions-Verfahren ist im Multiparameterregler implementiert und beschreibt sein Vorgehen bei der Beeinflussung der Betriebsparameter zur dynamischen Belastungsreduzierung. Es beinhaltet die Analyse der Belastungs- und Klimaparameter, die Kalkulation der Beeinflussungsparameter, die Überwachung des Funktionskriteriums (siehe Abschnitt 3.1) sowie die Belastungsstatistik mit der Lebensdauerprognose.

Der MPR umfasst neben dem BIV die hardwareseitige sensorische Aufnahme relevanter Daten und die hardwareseitig erforderlichen Maßnahmen, um einen Eingriff in die Funktion einer BG vorzunehmen. Dabei ist die Realisierung des MPR jeweils von der zu steuernden Baugruppe abhängig. Die zu überwachende BG erzwingt grundsätzlich die Erfassung mindestens einer anliegenden Belastung. Gleichmaßen muss der MPR die Aufrechterhaltung der Funktion der BG überprüfen und ebenso gewährleisten. Das dafür erforderliche Funktionskriterium wird in Abschnitt 3.1 definiert. Daraus resultiert ein Mehrgrößensystem. Abbildung 2.7 zeigt das beschriebene System mit der Kontaktierung an einer BG.

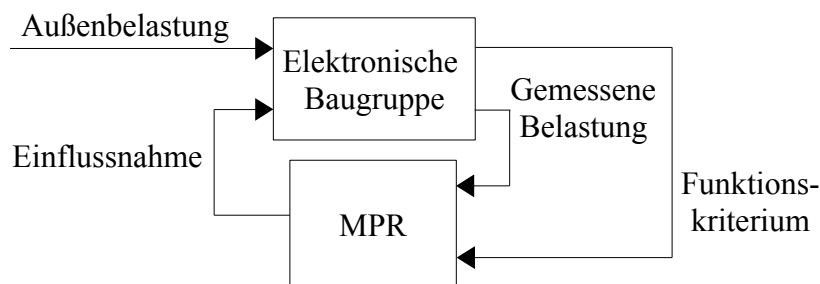


Abbildung 2.7: Struktur und Arbeitsprinzip des MPR

Das beschriebene Verfahren bedingt die Einführung einer weiteren Schutzmaßnahme. Diese wird als erweiterte dynamische Schutzeinrichtungen, ergänzend zu Abschnitt 2.5 mit Abbildung 2.3, definiert.

In der erweiterten dynamischen Schutzeinrichtung besteht die Schutzmaßnahme in einer permanenten Erfassung der von außen einwirkenden und der auf der BG erzeugten Belastungen. Die Generierung der Schutzgröße erfolgt durch Eingriff am Entstehungspunkt der Störgröße auf der Baugruppe. Die Schutzeinrichtung stellt dabei ein Parallelsystem zur zu schützenden BG dar.

Für die Beschreibung der Systemgrenzen und der Interpretation der Daten existieren Konzeptionen in [Hul04], [Kla98] oder einer Life-Cycle-Unit in [Mid10]. Durch Interpretation erfasster Messdaten werden in Kombination mit Ausfallmodellen entsprechender Bauteile oder Systeme deren Zustände und deren verbleibende Lebensdauer ermittelt. Als Ergebnis werden bevorstehende Systemausfälle erkannt und durch zustandsbasierte Wartung vermieden [Cha01], [IZM17b]. Eine unabdingbare Voraussetzung für derartige Konzepte ist ebenso das Vorhandensein von Wissen über die erfahrene Beanspruchung und ebenfalls der maximal ertragbaren Belastungen, welche in Beziehung zur Leistungsfähigkeit des betrachteten Systems gesetzt werden. Um die Anforderungen an einzelne Bauteile und das gesamte System verarbeiten und vorhersagen zu können, muss eine Prüfung aller Komponenten auf deren vorgesehenen Anwendungsbereich erfolgen [IZM17c]. Durch die Kenntnis aller Einflüsse gelingt die Reduzierung des Sicherheitsaufschlags bei der Dimensionierung statischer Schutzmaßnahmen. Gleichmaßen kann auch die Einsatzfähigkeit bei unbestimmten Klimagrößen und erweiterten klimatischen Bereichen kompensiert werden.

2.7 Zuordnung von MPR und BIV zur elektronischen Baugruppe

Durch die Einhaltung genau definierter Betriebsbedingungen ist eine statistische Abschätzung der Lebensdauer von Halbleiterelementen möglich [Bil06]. Die Belastungen, die einer Baugruppe auferlegt sind, bestehen grundsätzlich aus einem Mix aus selbst erzeugten und von außen einwirkender Störgrößen. Dies legt den Schluss nahe, dass eine Erweiterung des Schutzes nur durch einen gezielten Eingriff in die zu schützende Baugruppe und dadurch in ihren Betrieb ermöglicht werden kann.

Als Ausgangspunkt für die Herleitung des allgemeingültigen Ansatzes für das Verfahren zur Belastungsreduzierung soll eine Regelstruktur in Anlehnung an [Lun07] dienen. Abbildung 2.8 beschreibt dazu die Ein- und Ausgangsgrößen einer Reglerstruktur in Bezug auf die Nutzung im MPR.

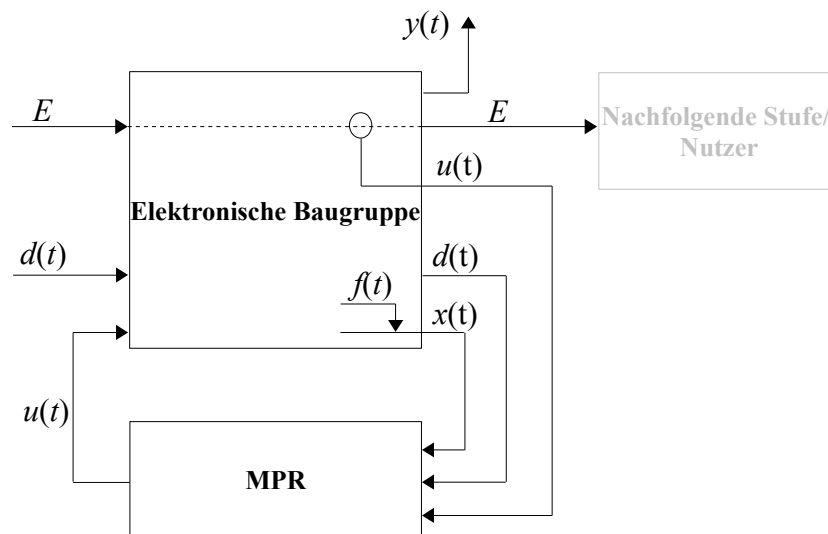


Abbildung 2.8: Arbeitsprinzip des MPR als Regelkreis

Tabelle 2.6 fasst die zeitlichen Größen des allgemeingültigen Regelsystems zusammen und stellt diese der Kombination aus MPR und zu schützender elektronischen Baugruppe gegenüber.

Tabelle 2.6: Gegenüberstellung von Regelkreisgrößen und vom MPR genutzte Größen

Regelkreisgrößen	Für den MPR äquivalente Größen
<p>Stellgrößen $u(t)$ Wird durch das System festgelegt, um das Prozessverhalten zielgerichtet zu beeinflussen.</p>	Einflussnahmegrößen und Funktionskriterium
<p>Störgrößen $d(t)$ Eingangssignale, über die die Umwelt den Prozess beeinflusst. Sie werden gelesen, aber nicht vom System beeinflusst.</p>	Außenklima
<p>Fehler $f(t)$ * Innere Veränderungen, die ein fehlerhaftes Prozessverhalten bewirken und nicht durch eine Regelung ausgeglichen werden können.</p>	Funktionsdrift
<p>Zustandsgrößen $x(t)$ Prozesssignale, die für eine eindeutige Vorhersage zukünftigen Verhaltens bekannt sein müssen. Der Systemzustand ist im Allg. nicht messbar.</p>	Innere klimatische und elektrische Belastungen
<p>Ausgangsgrößen $y(t)$ Sind messbare Signale, über die der Prozess von außen beobachtet wird und über die der Prozess seine Umgebung beeinflusst.</p>	Rückwirkung auf die Umgebung

*Über die Lebensdauer einer elektrischen Baugruppe kann es aufgrund einer Alterung an den Bauelementen zu einer Funktionsdrift und somit zur Veränderung der inneren Zustände sowie zu unvorhersehbarem Prozessverhalten kommen. Der MPR ist nach seiner Beschreibung, siehe Abschnitt 2.6, in der Lage, die Abweichungen zu kompensieren. Die in Tabelle 2.6 als Fehler $f(t)$ definierte Größe tritt somit an einer durch einen MPR überwachten BG nicht auf.

Die Tabelle 2.6 und die Abbildung 2.8 beschreiben den MPR in einer klassischen Reglerstruktur. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Erstellung und Untersuchung eines Verfahrens und gleichermaßen auch eines allgemeingültigen Ansatzes zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer.

Das energieverarbeitende System erhält als Eingangsgröße den Energiefluss E , der in Abhängigkeit der Funktion der Baugruppe verändert und an eine nachfolgende Baugruppe weitergegeben wird. Der Energiebedarf der nachfolgenden Baugruppe muss von der zu überwachenden Baugruppe bereitgestellt und als Stellgröße $u(t)$ dem MPR mitgeteilt werden. Daraus resultiert das Erfordernis eines Funktionskriteriums, siehe Abschnitt 3.1. Weitere Eingangsgrößen sind das am Einsatzort vorherrschende Klima $d(t)$ und die Einflussnahme durch die Regelgröße $u(t)$. Um die Stellgröße $u(t)$ durch den MPR zu generieren, sind von der zu überwachenden Baugruppe der innere Zustand $x(t)$, der Energiebedarf der nachfolgenden Stufe und das Umgebungsklima $d(t)$ in Erfahrung zu bringen.

Der definierte Fehler $f(t)$, die beispielsweise aufgrund von Alterung auftretende Funktionsdrift der Baugruppe, hat in der Baugruppe eine direkte Auswirkung auf die Prozessgröße $x(t)$ und wird somit gleichermaßen überwacht.

Um eine geeignete Einflussnahme $u(t)$ auf die Baugruppe zu generieren, sind folgende Aufgaben im MPR erforderlich: Zunächst erfolgt eine Zustandsbeobachtung. Hierdurch werden die von außen einwirkenden Größen, der innere Zustand und die auszugebenden Größen in Erfahrung gebracht, woraus das aktuelle Verhalten der Baugruppe berechnet werden kann.

Ferner ist dadurch ebenfalls eine Überwachung des Unter- bzw. Überschreitens vorgegebener Grenzwerte möglich. Die aus der Zustandsbeobachtung erhobenen Daten sind Basis für die darauf folgende Aufgabe der Prozessdiagnose. Durch den Prozess wird zunächst die fehlerfreie Funktion der Baugruppe überwacht. Die Änderung innerer Zustände $x(t)$ und das Auftreten des Fehlers $f(t)$ hat eine Änderung in der Generierung der Ausgangsgröße E und somit auch von $u(t)$ zur Folge. Durch die kontinuierliche Messung der inneren Zustände $x(t)$ ist das Auftreten des Fehlers $f(t)$ erkennbar. Im letzten Schritt erfolgt die Berechnung von Steuer Eingriffen. Ziel ist hierbei ein gewünschter Verlauf von $y(t)$, die nutzerwunschanhängige Zurverfügungstellung von E und die Minimierung auftretender Belastungen in der Baugruppe, also eine Festlegung von $x(t)$.

Die Prozessgrößen treten aufgrund der Betrachtungen mehrerer Belastungsarten als Tupel auf.

Für die für den MPR erforderliche rechentechnische Einheit ergeben sich mehrere zu erfüllende Voraussetzungen. Zunächst ist in Abhängigkeit einer Einflussnahme, der schaltungstechnischen Realisierung der BG und der Menge zu erfassender Belastungen die Auswahl der rechentechnischen Einheit anhand der entsprechenden Menge an Analog-Digital-Wandler-Kanälen erforderlich. Die zu verarbeitende Datenmenge der Sensorsignale, das Handling erforderlicher intelligenter Algorithmen und die Bildung der Einflussnahme geben die Verarbeitungsgeschwindigkeit und -breite vor. Des Weiteren erfolgt eine Auswahl anhand notwendiger zusätzlicher Hardwarekomponenten, wie z. B. Kommunikationsschnittstellen zur Ein- und Ausgabe von Daten und nötiger Auflösung der AD- und DA-Wandlung. Gleichmaßen muss der μC eine Speichergröße bieten, welche die Speicherung aller eingehenden Messwerte aller Belastungen über die gesamte Lebensdauer ermöglicht. Des Weiteren kann die schaltungstechnische Gegebenheit die Möglichkeit zur Nutzung eines vorhandenen Mikrocontroller (μC) ergeben. In dieser Variante muss ebenfalls die Voraussetzung einer bereits angeschlossenen nötigen sensor-technischen Erfassung entsprechender Belastungen erfüllt sein.

3. Allgemeingültiger Ansatz für das Verfahren zur dynamischen Belastungsreduzierung

Der in Kapitel 2 aufgezeigte Bedarf an einer erweiterten dynamischen Schutzmaßnahme dient als Ausgangspunkt, um ein Verfahren zu entwickeln, welches diese Schutzaufgabe zur Verfügung stellt. Ebenfalls wird dazu ein Ansatz zur Beherrschbarkeit der Dimensionierung des Verfahrens erstellt. Dies umfasst die Analyse der zu schützenden BG hinsichtlich der Eingriffnahme, siehe Abschnitt 3.2, und ebenfalls die Einsatzfähigkeit des Verfahrens an der BG bezüglich der Flexibilität der zu realisierenden Funktion, siehe Abschnitt 7.2. Die Bestimmung der Art der Eingriffnahme und der Eingriffspunkt in die BG, siehe 7.1, und ebenso die Ermittlung erforderlicher hardwareseitiger Zusatzfunktionalitäten, wie z. B. Sensoren und Eingriffsmaßnahmen, siehe Abschnitt 5.3, sind Punkte, welche ausschlaggebend für die Einsatzfähigkeit der Schutzmaßnahme sind.

Mit wachsender Komplexität wird es nahezu unmöglich, ohne geeignete Hilfsmittel und zeitintensive Maßnahmen mit spezieller Software geeignete Regelungsmechanismen zu generieren. Um die Akzeptanz der Schutzmaßnahme beim Anwender weiter zu erhöhen, werden die im Alltag zutreffenden ökonomischen Gründe, wie z. B. finanzielle Aspekte und erforderliche Zeitaufwände, als weiterer Punkt für den allgemeingültigen Ansatz mit aufgenommen.

3.1 Zielstellung und Grundsätze der dynamischen Belastungsreduzierung

Weitere allgemeine Betrachtungen führen zu Grundsätzen für den erforderlichen Funktionsumfang des MPR mit BIV, welche in der Dimensionierung beachtet werden müssen.

Grundsatz: Ermittlung von erforderlichen Bauteil- und Baugruppeneigenschaften für die Funktion des MPR

Die Gesamtlebensdauer einer Baugruppe ist bestimmt durch die Lebensdauer der einzelnen Bauteile. Die Funktion wird nicht mehr erfüllt, sobald ein Bauteil ausfällt. Um eine größtmögliche Verlängerung der Lebensdauer der gesamten Baugruppe, gleichzeitig auch eine Reduzierung der Belastung einzelner Bauteile zu erreichen, ist die Ermittlung spezieller Bauteil- und Baugruppeneigenschaften nötig. Dazu zählen die vorhergehende Ermittlung des Belastungsmengenverlaufs (als Kennwert des Bauteils) aller Bauteile und ebenfalls die Bestimmung der relevanten lebensdauerlimitierenden Einwirkungen. Diese sind abhängig vom Außenklima und von der Realisierung der Baugruppe. Ebenfalls gilt grundsätzlich für die Realisierung einer Zustandsbeobachtung die Kenntnis über die inneren Zustände einer Baugruppe als unabdingbar, woraus wiederum die permanente Erfassung der während des Betriebs auftretenden Belastungen folgt.

Grundsatz: Variabilität des MPR

Der MPR wird zur Reduzierung auftretender Belastungen eingesetzt. Im Fall einer zeitlichen Veränderung der Eingangsgrößen, z. B. der Parameter des Außenklimas oder der elektrischen Last, ist der MPR in der Lage, dynamisch auf die Änderung zu reagieren. Im Falle eines statischen Verhaltens der Eingangsgrößen steuert der MPR das System in den ausgeglichenen Zustand und verharrt dort.

Grundsatz: Dynamikbereich des MPR

Der Dynamikbereich des MPR muss so geschaffen werden, dass die Einflussnahme der klimatischen Größen und die Stärke der elektrischen Eingangsgrößen, also der implizierten Nebenfunktionen, beeinflusst werden kann. Dies ist von der Realisierung einer Funktion in Form der BG abhängig.

Grundsatz: Unterstützung der Schutzmaßnahme durch den MPR

Durch die dynamische Reduzierung der Belastungen durch den MPR ist ebenfalls eine Reduzierung statischer Schutzmaßnahmen möglich, woraus sich wiederum erweiterte, z. B. ökonomische oder designtechnische Optionen hinsichtlich Realisierung eines Systems ergeben.

Bei der Anwendung dieses Grundsatzes für den MPR in dem Beispiel 1 „Temperaturverteilung am Einsatzort“ und Beispiel 2 „Spannungsspitzen am Transistor“ im Abschnitt 2.5.1 ist eine Reduzierung der dort beschriebenen Schutzmaßnahme und -einrichtung möglich.

Grundsatz: Art der Eingriffnahme durch den MPR

Das Ziel der Eingriffnahme durch den MPR ist die positive Beeinflussung der Lebensdauer der BG. Dazu ist der Eingriff in Art und Intensität so zu gestalten, dass die Belastung an den Bauteilen der BG ebenfalls minimiert, mindestens jedoch gleichbleibend ist.

Wird die Lebensdauer der BG durch den MPR nicht beeinträchtigt, ist die durch dessen Eingriffnahme resultierende Verschiebung der Belastungsschwerpunkte auf andere Bauelemente und die mögliche Erhöhung der Belastung an einzelnen Bauteilen als zulässig zu bewerten.

Um die Aufrechterhaltung der Funktion und die Einflussnahme gegenüberzustellen, muss ein Kriterium, an dem die Funktion einer BG bzw. dessen Änderung quantisierbar wird, definiert werden.

Definition Funktionskriterium (FK)

Das Funktionskriterium dient der Bewertung, inwieweit die bestimmungsgemäße Funktion einer elektronischen Baugruppe erfüllt wird.

3.2 Kriterium zur Funktionsüberwachung der Baugruppe

Die Kriterien zur Funktionsüberwachung beschreiben Merkmale an der zu schützenden Baugruppe und des Klimas am Einsatzort, um Aussagen über den Nutzen des Einsatzes eines MPR zu generieren.

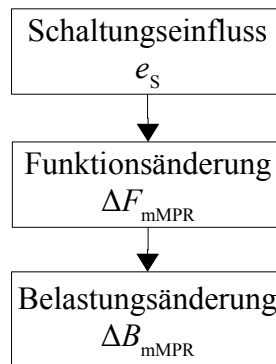


Abbildung 3.1: Zusammenhang zwischen Funktionsänderung und Belastungsänderung

- e_s – Schaltungseinfluss
- ΔF – Änderung der Funktion einer BG
- ΔB – Änderung der Belastung eines Bauelements oder Baugruppe
- mMPR – Indiz zur Kennzeichnung der Einflussnahme des MPR

Abbildung 3.1 beschreibt die sich ergebende Abarbeitungskette hin zur Belastungsänderung. Zunächst erfolgt eine quantitative Beurteilung der Baugruppe, woraus wiederum eine Ermittlung des Schaltungseinflusses, nachfolgend als e_s bezeichnet, folgt. Eine Änderung von e_s ruft eine Funktionsänderung ΔF_{mMPR} hervor, aus dieser wiederum folgt die geforderte Belastungsänderung ΔB_{mMPR} . Die Überprüfung der Grundsätze ist in Abschnitt 3.1 beschrieben. Weiterhin sind der Aufbau und die Komplexität der zu schützenden Schaltung und die Variabilität der eingesetzten Bauteile einzubeziehen, siehe dazu Abschnitt 7.2. Zu berücksichtigen sind ebenfalls folgende Punkte:

- Vereinbarkeit des Einsatzes des MPR in einer sicherheitsrelevanten Schaltung
- Form des Ausgangssignals
- Leistungsbedarf des Verbrauchers (allg. nachfolgende Stufe, Nutzer)
- nicht reparierbare Baugruppen, z. B. Satelliten (Raumfahrt)
- Existenz einer ausreichenden Wechselhaftigkeit des Klimas am Einsatzort
- Informationsumfang über Klima am Einsatzort

- erforderliche Messrate und Messgenauigkeit des MPR
- ökonomische Gründe: Preis der Baugruppe, Entwicklungskosten
- geplante Lebensdauer der Baugruppe

Im ersten Schritt wird die Einflussnahme auf die Baugruppe bestimmt. Möglichkeiten für die Erfassung sind z. B. Simulation, Tests, Erfahrung oder Testergebnisse auf Datenbankbasis aus vorhergehenden Tests.

Die hardwareseitige Einflussnahme wird als Menge an Einflussnahmeparametern $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ festgelegt. Der zu ermittelnde Einflussnahmebereich bildet je Einflussnahmeparameter einen Vektor mit $S_m = \{s_{m1}, s_{m2}, s_{m3}, \dots, s_{mn}\}$. Aufgrund der diskreten Verarbeitung durch einen Mikrocontroller liegen alle Einflussnahmeparameter als eine endliche Menge vor. Somit ergibt sich die Menge der Ansteuermöglichkeiten bei diskreter Verarbeitung der Einflussnahmeparameter als Produktmenge nach (3.1).

$$e_s = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_m \quad (3.1)$$

- e_s – eine Matrix, bestehend aus allen Vektoren für den Schaltungseinfluss
 S_m – ein Vektor der einen Bereich eines Einflussnahmeparameters umfasst

Die Ermittlung der Bereiche der jeweiligen Einflussnahmeparameter ergibt eine Unterteilung. Diese wird folgend, beginnend mit der höchsten Priorität, beschrieben.

a) Die Einflussnahme wird durch bauteileigene Grenzen vorgegeben

Die höchste Priorität in der Einflussnahme bilden technisch bedingte Vorgaben der Bauteile. Die aus der Änderung der Funktion resultierende Änderung von Strom- und Spannungsverhältnissen an den Bauteilen dürfen die als „Absolute Maximum Ratings“ im Datenblatt vorgegebenen Werte nicht überschreiten. Eine erste Grenze der Einflussnahme wird dadurch gebildet. Diese ist in Abbildung 3.2 als äußerste Begrenzung der Einflussnahme dargestellt.

Als Beispiel soll die Gate-Source-Spannung eines MOSFETs erwähnt sein. Diese kann laut Datenblatt einen Wert im Bereich von -4 V bis 20 V annehmen. Bei Überschreiten des Bereiches erfolgt eine Zerstörung des Bauteils.

b) Funktion der Schaltung

Das Funktionskriterium wird genutzt, um die Grenzen der Funktionserfüllung an einer Baugruppe festzulegen. Das Mindest- und Maximalmaß wird folgend als FK_u und FK_o bezeichnet. Durch e_s wird nun die Schaltungsbeeinflussung und die damit verbundene Funktionsänderung und somit die Belastungsänderung verknüpft. Ist der Schaltungseinfluss e_s größer als das Funktionskriterium FK , führt eine weitere Erhöhung von e_s zu einer Nichterfüllung der Funktion der BG und somit keiner weiteren Belastungssenkung. Es resultiert daher die Begrenzung von e_s auf FK zu $e_{s\max} = FK$.

Als Beispiel wird erneut die Gate-Source-Spannung des MOSFETs genutzt. Bei einem Potentialunterschied von 12 V sei der MOSFET im leitenden Zustand. Mit der weiteren Erhöhung der Gate-Source-Spannung erfolgt keine weitere Sättigung des Drain-Source-Kanals und somit keine merkliche Reduzierung des $R_{DS\text{ on}}$, ebenfalls auch keine weitere Reduzierung der Verlustleistung und somit der thermischen Belastung. Innerhalb des bereits eingegrenzten Bereiches a wird der Bereich b erstellt, siehe dazu Abbildung 3.2.

c) Begrenzung des Einflussnahmebereichs auf variable Belastungsänderung

Werden mehrere Belastungen an einer Baugruppe betrachtet, ist es möglich, dass im Einflussnahmebereich die Belastungen unterschiedliche Reaktionen aufweisen. So kann durch eine Einflussnahme gleichzeitig eine Senkung einer Belastung und eine Erhöhung einer anderen Belastung erfolgen. Die Erhöhung einer Belastung wird zugelassen, wenn gleichzeitig eine Reduzierung der weiteren betrachteten Belastungen erfolgt. Dies spannt den Bereich c in Abbildung 3.2 auf.

Beispielsweise wird durch die Senkung der Slewrates eine Reduzierung der Spannungsspeaks in der Drain-Source-Spannung erreicht. Gleichermaßen erfolgt jedoch

aus der daraus resultierenden Verlängerung der Zustandswechsel des MOSFETs eine Erhöhung der Verlustleistung und somit eine Steigerung der Temperatur.

Nach dem Grundsatz „Art der Eingriffnahme durch den MPR“ wird die Erhöhung einer Belastung durch eine Einflussnahme zugelassen, sobald in den weiteren betrachteten Belastungen eine Reduzierung erfolgt.

d) Begrenzung des Einflussnahmebereichs auf reduzierende Belastungsänderungen

Eine weitere Eingrenzung von e_s erfolgt durch die Selektion der Ansteuerparameter. Nach der Bedingung $B_{mMPR 1} > B_{oMPR 1} \wedge B_{mMPR 2} > B_{oMPR 2} \wedge \dots \wedge B_{mMPR n} > B_{oMPR n}$ werden entsprechende Ansteuerparameter aus der Menge der Ansteuerungen e_s entfernt. Es erfolgt eine Reduzierung des Einflussnahmebereichs auf den Bereich d.

Bei der Festlegung von e_s für eine Baugruppe ist der Stellenwert der Sicherstellung der Betriebsweise und die Aufrechterhaltung der Funktion unabhängig vom Ziel der Schutzmaßnahme als mögliche Anforderung zu beurteilen. Folgende Auflistung unterteilt die Gewichtung:

Toleranter Modus

Im toleranten Modus liegt der Fokus auf der Lebensdauererlängerung. Klimatische und elektrische Situationen liegen in einem für die BG ungefährlichen Bereich. Ebenfalls ist der Energiebedarf einer nachfolgenden Stufe konstant bzw. unterliegt nur geringen Schwankungen. Somit kann ein maximaler Einflussnahmeumfang generiert und somit der maximale Bereich zwischen FK_u und FK_o ausgenutzt werden.

Intoleranter Modus

Im intoleranten Modus ist der Einflussnahmeumfang aufgrund eines stark variierenden Energiebedarfs der nachfolgenden Stufe bei gleichzeitig vorherrschenden klimatischen Extrembedingungen stark eingegrenzt.

Zwangsmodus

Der Zwangsmodus ist als ein Notbetrieb beschreibbar. Es existiert keine Einflussnahme auf die Funktion der BG und das Betriebsverhalten liegt bei $e_{S \max} \leq FK$. Während des Betriebs kann zwischen den genannten Modi gewechselt werden.

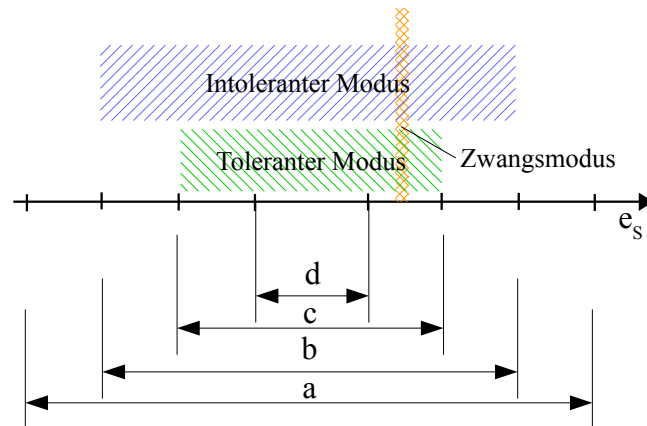


Abbildung 3.2: Unterteilung des Einflussnahmebereichs

Abbildung 3.2 verdeutlicht die beschriebene hierarchische Gliederung. Dabei bildet die Nichtzerstörung der BG (Bereich a) die höchste Priorität. Als Teilmenge bildet sich die Aufrechterhaltung der Funktion (Bereich b) heraus. Innerhalb des Bereichs b kann eine Menge an Ansteuerparametern ermittelt werden, bei denen eine Belastungsänderung erfolgt (Bereich c). Der Bereich d umfasst eine Menge an Ansteuerparametern, bei denen nur eine Belastungsreduzierung vorliegt.

Innerhalb der Bereiche können die Betriebsmodi des MPR dargestellt werden. Der tolerante Modus ist aufgrund der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Ausnutzung der maximal ertragbaren Menge an Belastungen und der daraus resultierenden Maximierung der Lebensdauer auf den Bereich c begrenzt. Aufgrund der Zurverfügungstellung einer Energie erfordert der intolerante Modus die Ausnutzung des Bereichs b zur Aufrechterhaltung der Funktionalität. Im Zwangsmodus ergibt sich eine konstante Ansteuerung, bei der schaltungsabhängig die geforderte Leistung geliefert und dennoch die geringste Gesamtbelastung der Baugruppe auferlegt wird. Der Zwangsmodus liegt dabei zur Aufrechterhaltung der Funktion (vgl. Def.

Funktionskriterium in Abschnitt 3.1) innerhalb des Bereichs c und nicht im Bereich d.

3.3 Algorithmus und Multiparameterregler

Das Betriebs-Interventions-Verfahren (BIV) ermittelt aus allen anliegenden Belastungen die optimale Ansteuerung. Der Ausgangspunkt ist der beschriebene Belastungsmengenverlauf in Abbildung 3.3. Nachfolgend werden Überlegungen und nötige Größen für eine Senkung der Belastung und zur Lebensdauerverlängerung beschrieben.

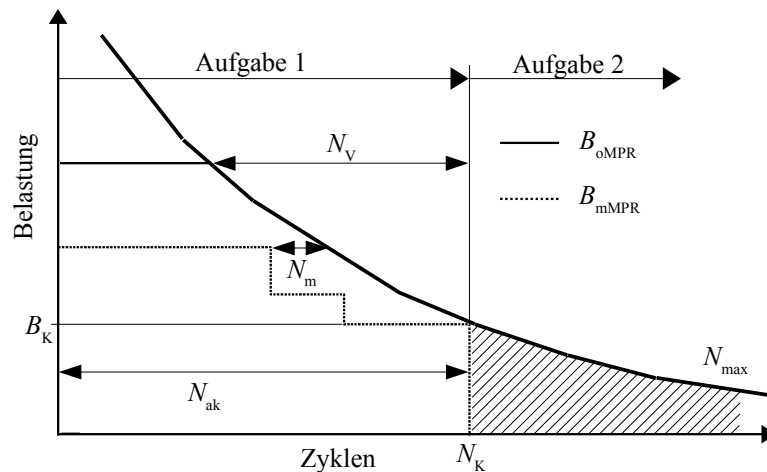


Abbildung 3.3: Beispielhafter N_{max} -Verlauf mit Eintrag aller relevanten Informationen

- B_{oMPR} – Belastungswert im Betrieb ohne MPR
- B_K – Belastungswert, mit dem der N_{max} Verlauf kontaktiert wird
- N_m – Abstand zwischen ertragener Belastung und N_{max} Verlauf
- N_V – eine Menge an Zyklen, die aufgrund der Senkung der Belastung gegenüber dem Betrieb ohne MPR zur Verfügung stehen, die sich als eine Lebensdauerverlängerung äußert
- N_K – die Menge an Zyklen, bei der die Berührung des ertragenen akkumulierten Belastungsverlaufs mit dem N_{max} Verlauf stattfindet
- N_{ak} – Menge der bisher ertragenen Belastungen
- N_{max} – Verlauf des vom Bauteil maximal Ertragbaren oder der zu ertragenden Menge an Belastungen

Der N_{\max} -Verlauf, siehe Abbildung 3.3, beschreibt, welche Menge eines Wertes einer Belastungsgröße ertragen werden kann. Es ist ersichtlich, dass kleine Belastungen in größerem Umfang, hingegen große Belastungen nur in geringen Mengen ertragen werden. Wird davon ausgegangen, dass die Kontaktierung des N_{\max} -Verlaufs eine Zerstörung des Bauteils zu Folge hat, sind die einwirkenden Belastungen maßgebend für die Lebensdauer verantwortlich und das Ziel einer Einflussnahme muss die Minimierung der anliegenden Belastungen sein. Im Laufe der Betriebszeit nähern sich die bisher ertragenen Belastungen N_{ak} der ertragbaren Belastungen an. Um eine Relation der bisher ertragenen zu ertragbaren Belastungen herzustellen, müssen die kontinuierlich erfassten Werte einer Belastungsgröße gespeichert und zur bisher ertragenen Menge hinzugenommen werden, siehe beispielhafter Verlauf B_{mMPR} in Abbildung 3.3.

Reale Bauelemente identischen Typs weisen fertigungs- und materialtechnische Toleranzen auf. Aufgrund dessen ergeben sich unterschiedliche N_{\max} -Verläufe, welche sich als Schwarm an N_{\max} -Verläufen innerhalb eines Bereiches ausbilden und die Verteilung der N_{\max} -Werte je Klasse ist demnach unterschiedlich. Der vom MPR eingesetzte N_{\max} -Verlauf wird als Mittelwert aus dem Schwarm der im Designprozess des MPR messtechnisch ermittelten Verläufe gebildet. Bei der Annäherung der ertragenen Belastungen an diesen Verlauf steigt die Ausfallwahrscheinlichkeit an. Daher wird ein Sicherheitsabstand zwischen den bereits ertragenen und den maximal ertragbaren Belastungen eingeführt. Der Abstand wird nachfolgend als N_x bezeichnet.

Neben der Nutzung des Mittelwertes ist die Nutzung des geringsten N_{\max} -Verlaufs möglich. In diesem Einsatzfall entfällt die Nutzung des Sicherheitsabstandes N_x . Als Tätigkeitsbereich des MPR lassen sich zwei Aufgaben ableiten. Zum einen gibt es die grundsätzliche Belastungsreduzierung als Aufgabe A1 und zum anderen die weiterführende Belastungsreduzierung mit verringerter Einflussnahme als Aufgabe A2. Die Arbeitsweise beschreibt Abbildung 3.4.

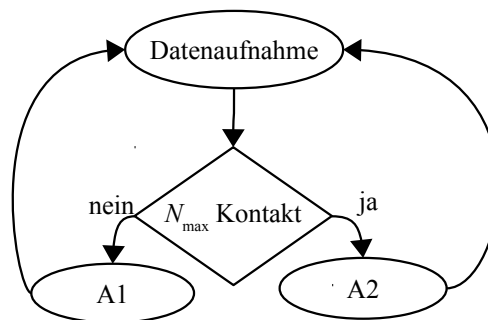


Abbildung 3.4: Prinzip der Aufgabenteilung für den Algorithmus zur Belastungssenkung

In der Zeit $N < N_K - N_x$ (Aufgabe 1) arbeitet der Algorithmus mit dem Ziel der Belastungssenkung und der damit verbundenen Verschiebung des Kontaktierungszeitpunkts N_K .

Die Bedingung (3.2) wird nach jeder Messwerterfassung auf Gültigkeit geprüft. Wird die Ungleichung nicht mehr erfüllt, wird von der Aufgabe 1 in die Aufgabe 2 umgeschaltet.

$$[N_m]_n < [N_{max}]_n - N_x \quad (3.2)$$

- N_m – Abstand zwischen ertragener Belastung und N_{max} Verlauf
- N_x – Beschreibt eine Menge an Zyklen, welche als Sicherheitsabstand zwischen den bereits ertragenen Belastungen und dem N_{max} Verlauf bestehen muss.

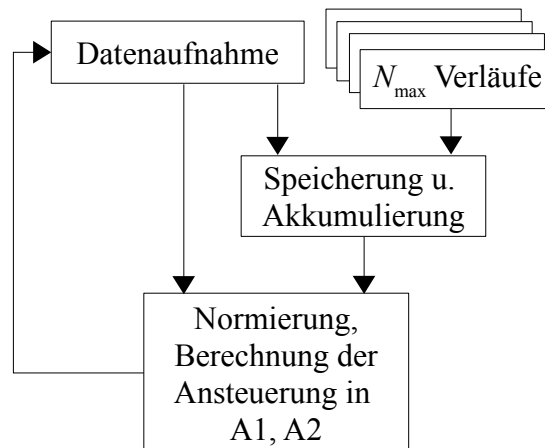


Abbildung 3.5: Algorithmus zur Ansteuerungsberechnung im BIV

Der bisher beschriebene Arbeitsumfang des BIV ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Zur permanenten Erfassung wird ein zyklischer Arbeitsablauf zwischen Datenaufnahme und Berechnung der Einflussnahme vorgesehen. Um eine Positionierung der bisher ertragenen Menge an Belastung im jeweiligen N_{max} -Verlauf durchzuführen, wird parallel dazu eine Speicherung und Akkumulation aller gemessenen Belastungen durchgeführt. Die Information aus der Positionierung des Verlaufs und die aktuellen Messwerte werden zur Berechnung der Einflussnahme herangezogen.

Ab dem Zeitpunkt $N > N_K + N_x$ steigt die Ausfallwahrscheinlichkeit aufgrund der Überschreitung des Sicherheitsabstandes N_x stark an, sofern B nicht reduziert wird. Aus diesem Grund wird in der Aufgabe 2 die Einflussnahme auf die Funktion so angepasst, dass die restliche verfügbare Belastungsmenge, siehe Schraffur in Abbildung 3.3, vollständig genutzt wird. Es muss die Einflussnahme so angepasst werden, dass nur noch Belastungen auftreten, die unterhalb des Belastungskontaktwertes B_K und somit innerhalb der schraffierten Fläche liegen. Dieser Prozess wird als Aufgabe 2 bezeichnet. Abbildung 3.6 verdeutlicht den be-

schriebenen Algorithmus. Der Schaltungseinfluss e_s wird in Form einer Lookup-Table (LuT) abgebildet.

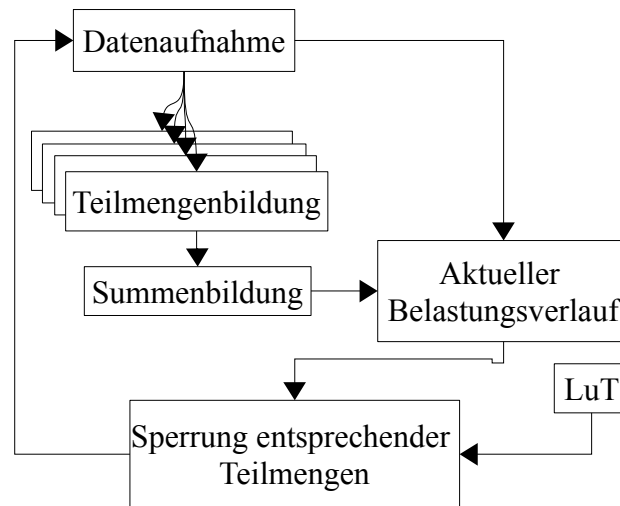


Abbildung 3.6: Teilalgorithmus der Aufgabe 2

Der MPR verbleibt bis zum Ende der Lebensdauer der BG in Aufgabe 2.

4. Implementierung des Verfahrens in elektronische Baugruppen

In den folgenden Abschnitten werden nötige Voraussetzungen zur Implementierung des MPR in einer Baugruppe beschrieben. Dazu zählen z. B. an der BG erforderliche Hard- und Softwareelemente und auch die Kenntnis über einwirkende Belastungen.

4.1 Notwendige Voraussetzungen in der Baugruppe und ihrer Umgebung

Die Beschreibung notwendiger Voraussetzungen erfolgt allgemeingültig für alle BG. Für die Erstellung eines MPR wird der Algorithmus aus Kapitel 3 mit der Unterteilung in die Schritte „Erfassung“, „Verarbeitung“ und „Einflussnahme“ genutzt und getrennt betrachtet.

Im Schritt „Erfassung“ steht die Ermittlungsmöglichkeit von Belastungsgrößen im Vordergrund. Dazu zählen die Belastungsgrößen aller relevanten Bauelemente (z. B. Temperatur, Spannung, Strom), Belastungsgrößen der Baugruppe (z. B. Temperatur, Vibration, mechanische Spannung) und die Belastungsgrößen der Umgebung (z. B. Temperatur, mechanische Bewegungen) durch Sensorik oder durch synergetische Nutzung vorhandener Signale und Informationen. Ebenfalls ist eine synergetische Nutzung des vorhandenen Bauraums der Leiterplatte, beispielsweise durch Integration von Sensoren in Sockel für Bauelemente, möglich, siehe [Iro16]. Um Belastungen so nah wie möglich am Entstehungsort zu erfassen, soll dazu als Beispiel die Temperaturabhängigkeit einer Kollektor-Emitter-Strecke, einer Drain-Source-Strecke oder der pn-Übergang einer Diode genannt sein. In diesem Zusammenhang ist die Bildung eines Thermoelements an einem Kupfer-Leiterzug oder Anschlusspin einer Leiterplatte mittels Hinzunahme eines weiteren leitenden Materials, wie eines Aluminium- oder Konstantanleiters, denkbar. Dies bietet den Vorteil, aufgrund des kleinen und einfachen Aufbaus thermische Belastungen an nahezu allen Punkten an einer Baugruppe zu erfassen.

Im Schritt „Verarbeitung“ muss das Mindestmaß an Wirkungspotential auf Ausfallrate und Lebensdauer (Verhältnis Aufwand und Nutzen) gegeben sein. Die

Überprüfung wird im Kapitel 7 näher erläutert. Der Zusammenhang zwischen Einflussparameter und dessen Wirkung auf Ausfallrate sowie Lebensdauer ist als Quantifizierbarkeit der Belastungsbeeinflussung beschreibbar und muss demnach durch den zyklisch erfassten Betriebszustand wiederholt neu bestimmt werden. Als Beispiele für die Ermittlung der Korrelation zwischen Verläufen der Betriebsparameter und Verläufen der Zuverlässigkeitsgrößen seien die Tools „Zero downtime ZDT“ für die Datenauswertung in einem Maschinennetzwerk zur Vorhersage von Ausfällen und Festlegung von einer vorbeugenden Instandsetzung der Firma Fanuc [Fan16] und ebenso „smart plastics“ oder „isense“ der Fa. Igus [Igu16] genannt. Um im dritten Schritt eine geeignete Einflussnahme auf die Funktion einer BG zu generieren, ist zunächst die Messbarkeit und Variationsmöglichkeit der belastungsbeeinflussenden Parameter, gleichermaßen auch die Beeinflussbarkeit der Belastung durch Parameter zu gewährleisten. Ebenso muss die hardware- und softwareseitige Implementierbarkeit eines MPR in die BG gegeben sein. Dies erzwingt eine erforderliche Mindestvariabilität, also die Fähigkeit einer Baugruppe, unter veränderten elektrischen Betriebsbedingungen die vorhergesehene Funktion aufrecht zu erhalten, siehe dazu Kapitel 7. Weiterhin schließt dies die Existenz oder die Schaffung eines Eingriffspunkts in die Baugruppe, die Existenz von Ermittlungsmöglichkeiten der zu messenden Belastungsgrößen und ebenfalls die Existenz der Funktionsüberwachung der Baugruppe in dem nötigen Umfang mit ein. Speziell bei aktiver Einbeziehung der Umgebung muss dahingehend die Einflussmöglichkeit auf die Umgebungsbedingungen, z. B. Zwangskonvektion, geschaffen werden.

4.2 Hard- und Softwareelemente zur Umsetzung des Verfahrens

Um die unterschiedlichen Anforderungen an den MPR zu berücksichtigen, erfolgt die Beschreibung der erforderlichen Elemente für die Bereitstellung als allgemeingültiger modularer Aufbau und, wie in Abbildung 4.1 dargestellt, in Abarbeitungsreihenfolge.

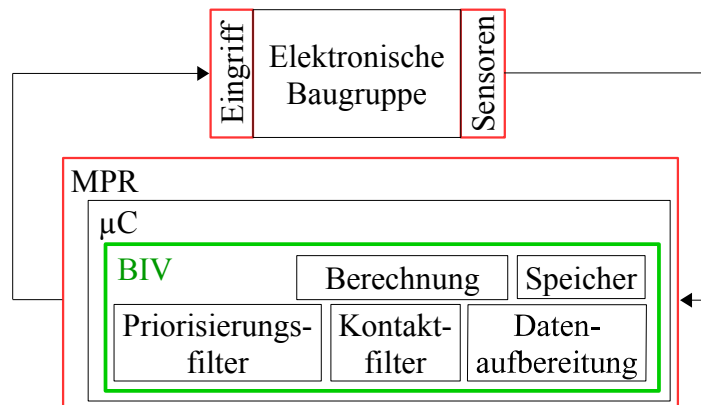


Abbildung 4.1: Prinzipdarstellung der hard- und softwareseitig erforderlichen Elemente des MPR

Die Erfassung, Berechnung und Beeinflussung von Belastungen, siehe Abbildung 4.1, umfasst Elemente insbesondere zur Datenaufbereitung, Abstandsdetektion, ein Priorisierungselement zur Normierung unterschiedlicher N_{\max} -Verläufe und ebenfalls ein geeignetes Komprimierungsverfahren, um die aufkommende Messdatenmenge in einer vorgegebenen Zeit verarbeiten und speichern zu können. Der modulare Aufbau begünstigt die einfache Erweiterung des MPR und die Anpassung an den jeweiligen Einsatzbereich. Die erforderliche Leistungsfähigkeit des MPR wird vorausgesetzt. Deren Bestimmung erfolgt in Kapitel 7.

Aus den am Einsatzort vorherrschenden klimatischen Störgrößen resultiert die Anpassung der erforderlichen Auflösung des Digital-Analog-Wandlers und des Analog-Digital-Wandlers des Elements Datenaufbereitung, die Art und Stärke des Eingriffs, die Messdauer und der Zyklusabstand.

Im ersten Schritt der Abarbeitungsreihenfolge erfolgt die sensorische Aufnahme der betrachteten Belastungen. Speziell für die Erfassung klimatischer Belastungen muss bei der Platzierung der Sensoren die Unterscheidung nach dem Erzeugungspunkt erfolgen. Grundsätzlich erfolgt die Erfassung der Belastungen so nah wie möglich am Entstehungsort, so dass eine wechselseitige Beeinflussung der auf der BG erzeugten und der vom Außenklima erzeugten Belastungen minimiert wird. Ein weiterer Punkt ist die Unterscheidung nach Messung klimatischer und elektrischer Größen. Hierbei ist der entscheidende Punkt, dass die Messung elektrischer Größen immer mit einem Eingriff in die BG verbunden ist. Hingegen stellt sich

die Erfassung klimatischer Einflüsse als unabhängiges Subsystem dar. Aufgrund der Starre der Leiterplatte ist eine Unterscheidung bzw. Trennung der inneren und äußeren mechanischen Belastung nicht möglich. Dies wird durch die Kenntnis des MPR über den Betriebszustand der zu überwachenden elektronischen Baugruppe kompensiert. Mittels Beschleunigungssensoren wird die Bewegung in den drei Dimensionen erfasst und aus diesen Werten ein Summensignal gebildet. Es wird somit keine Unterscheidung in der Fehlerprovozierung durch unterschiedliche Einflussrichtung vorgenommen. Die erfassten Messwerte geben die erforderliche Samplerate des AD-Wandlers und die zu erwartenden Wertekollektive die Auflösung des AD-Wandlers vor. Für beide Dimensionen wird sich an der Klimaklasse bzw. den Informationen des zu erwartenden Betriebsklimas orientiert. Der Begriff Klimaklassen ist der Norm IEC 60721-3 (Leitfaden für die Korrelation und Umsetzung der Klassen) von Umgebungsbedingungen [DKE04c] entnommen und zur Einteilung des Klimas eingesetzt.

Zum Beispiel werden am Demonstrator (dieser wird an späterer Stelle näher beschrieben) alle Belastungen in konstanten Zeitabständen von 5 Sekunden periodisch innerhalb einer Messzeit von 10 ms mit 21000 S/div und einer Auflösung von 10 Bit eingelesen. Diese Werte sind für die laut Klimaklasse 3k3, 3M1, siehe Abschnitt 6.1, zu erwartenden mechanischen Belastungen ausreichend. Da sich die Temperatur deutlich träger verhält, erfolgt zur Datenkomprimierung zunächst eine Mittelwertbildung. Die digitalen Werte werden einer Logik zur Aufzeichnung und zur Verarbeitung von Beanspruchungsverläufen zugeführt. Hierzu wurde ein Mikrocontroller (μC) ausgewählt. Der in dem MPR des Demonstrators eingesetzte μC ist vom Typ MSP430G2553. Der Speicher hat zwei Aufgaben zu erfüllen, zum einen werden die Programmabläufe und N_{\max} -Verläufe vorgehalten und zum anderen muss die Speicherung der erfassten Belastungen erfolgen. Aus der Sicht der dynamischen Belastungsreduzierung als Schutzmaßnahme stellen der Speicher und die darin gespeicherten Werte das wichtigste Element des MPR dar. Der Speicher im MPR muss genügend Kapazität aufweisen, um die erfassten Werte in Form einer Matrix auf Basis eines Histogramms abzuspeichern.

Im Abschnitt „Datenaufbereitung“ des BIV erfolgt eine Trennung der Störeinflüsse vom Nutzsignal. Dazu ist am Eingang eine Filterung eingefügt. Im Demonstrator wurde ein Tiefpassfilter als FIR (engl. finite impulse response filter) realisiert, um hochfrequente Störungen zu reduzieren. Die Filtereinstellung erfolgt empirisch. Im Element „Belastungsermittlung“ erfolgt zunächst die Berechnung der Einflussnahme auf Basis gemessener Belastungen. Hierzu wurden zuvor die entstehenden Belastungen berechnet und die dazugehörigen Ansteuervarianten in einer Lookup-Table (LuT) gespeichert, siehe Abschnitt 5.4. Durch den Wegfall der Berechnungen können die eingesparten Leistungsressourcen beispielsweise für die Bewältigung großer Mengen an Sensordaten eingesetzt werden. Gleichmaßen ist somit auch der Einsatz leistungs- und energiesparender Mikrocontroller (μC) möglich. Um mehrere Belastungen gleichwertig behandeln zu können, organisiert ein Priorisierungsfilter das ausgeglichene Ausschöpfen aller Belastungsmengen bis zum N_{\max} -Kontakt. Parallel dazu scannt ein Kontaktfilter in jedem Messschritt den Abstand jedes N_{\max} -Verlaufs zur entsprechenden akkumulierten Belastung. Bei einem vordefinierten konstanten Abstand N_x wird eine bestimmte Teilmenge einer berechneten Menge möglicher Eingriffe gesperrt, siehe dazu Abschnitt 5.5. Um die im Laufe der Betriebszeit größer werdenden Datenmengen in gleicher Zeit verarbeiten zu können, muss ein Algorithmus zur Datenkomprimierung vorhanden sein. Hierzu werden die gemessenen Belastungswerte in Form eines Histogramms vorgehalten. Zwar geht die zeitliche Zuordnung verloren, aber der Bearbeitungsaufwand und die Speichergröße des Histogramms bleiben konstant. Es erfolgt eine Klassenbildung von Wertekollektiven, woraus ein Histogramm gebildet wird. Dies bietet den Vorteil, dass sich der Speicherbedarf im Laufe der Betriebszeit nur unerheblich vergrößert. Die chronologische Reihenfolge aus Zeit- und Werteinformationen ist zwar nicht reproduzierbar, jedoch unerheblich für die Akkumulation der eintreffenden Belastungswerte und zur Orientierung von bisher ertragener Belastung zur ertragbaren Menge an Belastungen.

Die berechneten Werte werden für eine Einflussnahme in der dem MPR zugehörigen Ansteuerhardware in elektrische Signale umgesetzt. Dazu muss die BG um eine Eingriffsmöglichkeit erweitert werden. Die Positionsbestimmung für diese

Eingriffsmöglichkeit wird in Abschnitt 7.1 beschrieben. Die Bestimmung der Beeinflussungsparameter wird in Abschnitt 5.3 beschrieben.

4.3 Ermittlung von Referenzgrößen der Belastung

Durch die permanente Erfassung und Speicherung der elektrischen und klimatischen Belastungen am zu überwachenden Bauteil ergibt sich ein genaues Bild einwirkender Belastungen. Durch eine Unterteilung in Bauteil-, Funktionalitäts- und Spezifikationsebene lassen sich Aussagen über das Verhalten des Bauteils und der gesamten Schaltung in Abhängigkeit von spezifischen Merkmalen, wie z. B. einer schaltungstechnischen Realisierung oder einer klimatischen Situation, ableiten.

Bauteilebene (BTE)

Die erste Ebene wird durch das einzelne Bauteil, als nicht weiter teilbare Einheit, gebildet. Auf dieser Ebene wirkt die Belastung, hier erfolgen die Erfassung und die Einflussnahme auf die Belastung. Dieser Ebene zugehörige Werte liegen innerhalb eines vom Hersteller garantierten Bereichs. Die Überschreitung der Werte führt zu einer Zerstörung des Bauteils.

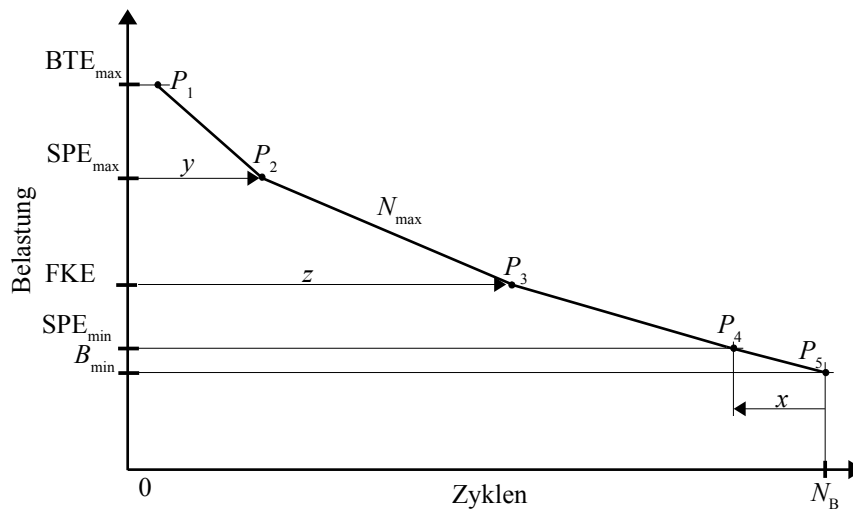
Funktionalitätsebene (FKE)

Der Zusammenschluss von Bauteilen als dimensionierte Schaltung bildet die der Bauteilebene übergeordnete Funktionalitätsebene. Aus den in der Bauteilebene gemessenen Werten können ebenfalls Aussagen zur Funktionalitätsebene abgeleitet werden. Dabei stellen längerfristige Messungen mögliche Bauteildriften und die daraus resultierende Funktionsveränderung fest. Im Schaltungsgefüge äußert sich dies z. B. in einer Verschiebung des Arbeitspunkts, woraus ein möglicher Verlust der Funktion resultiert. Die Art der Realisierung einer Funktion in Form einer elektronischen Baugruppe beeinflusst die in der Bauteilebene entstehenden Belastungen.

Spezifikationsebene (SPE)

In der Spezifikationsebene ist das Klima der BG am Einsatzort eingeordnet. Die Spezifikationsebene bildet damit eine weitere Abhängigkeit für die in der Bauteilebene wirkenden Belastungen. Da diese Werte für die Funktion des MPR erforderlich sind und somit erfasst werden, kann ebenfalls eine Aussage über das tatsächliche Klima am Einsatzort getroffen werden. Diese Informationen werden im Designprozess zur Realisierung der BG und zur Generierung von erforderlichen Schutzmaßnahmen, wie z. B. zur Berechnung von Kühlungsmaßnahmen, Dimensionierung von Schutzlacken oder Schwingungsdämpfern, herangezogen. Ferner ist aus den Messwerten ein Vergleich der Klimaspezifikation mit dem tatsächlichen Klima vor Ort möglich.

Der Zusammenhang zwischen Belastungsmengen und Belastungswert eines Bauteils steht oftmals nicht zur Verfügung und wird zumeist auch nicht von den Herstellern bereitgestellt. Um dennoch eine belastbare Aussage über die Einsatzfähigkeit der MPR zu erstellen, werden zur Bildung des N_{\max} -Verlaufs verfügbare Daten in Relation gesetzt. Nachfolgend wird die Bildung eines N_{\max} -Verlaufs mit vorhandenen Daten aus den einzelnen Ebenen beschrieben und exemplarisch für die Temperatur eines Transistors erstellt. Dennoch muss bedacht werden, dass die Werte aus dem Ebenenmodell abgesehen von den BTE-Werten nicht die maximal ertragbare Menge einer Belastung darstellen. Abbildung 4.2 zeigt dazu einen beispielhaften N_{\max} -Verlauf.

Abbildung 4.2: Darstellung der erforderlichen Punkte zur Erstellung des N_{\max} -Verlaufs

Für die Ermittlung eines theoretischen N_{\max} Verlaufs werden die Punkte P_1 bis P_5 zusammengetragen. Diese bestehen, wie in Tabelle 4.1 dargestellt aus folgenden Werten.

Tabelle 4.1: Punkte des N_{\max} -Verlaufs und deren Zusammensetzung

	Anzahl der Zyklen	Wert der Belastung
P_1	0	BTE_{\max}
P_2	y	SPE_{\max}
P_3	z	FKE
P_4	$N_B - x$	SPE_{\min}
P_5	N_B	B_{\min}

Im Bezug auf das Diagramm in Abbildung 4.2 werden zunächst die Ordinatenwerte in Tabelle 4.1 eingetragen. Der Bereich des Klimas des späteren Einsatzortes wird als obere und untere Grenze der Spezifikationsebene als SPE_{\min} und SPE_{\max} eingetragen. Beispielsweise wird nach der Klimaklasse 3K3, siehe Abschnitt 6.1, ein Temperaturbereich von 5 °C bis 40 °C genutzt. Aus der Bauteilebene werden für die Werte BTE_{\min} und BTE_{\max} -Werte aus den „Absolute Maximum Ratings“ des zu überwachenden Bauteils mit $BTE_{\min} = -55$ °C und $BTE_{\max} = 150$ °C genutzt. Es wird mit B_{\min} ein Belastungswert angenommen, ab dessen Unterschreitung die geplante Lebensdauer der BG erfüllt wird.

Die Werte der Funktionalitätsebene (FKE) ergeben sich durch Festlegung der Realisierung der Funktion der BG durch die dazu eingesetzten Bauteile und deren Dimensionierung.

Für die Ermittlung der Abszissenwerte wird wie folgt vorgegangen. Der Punkt N_B markiert die geplante Lebensdauer einer BG. Für den Zyklenwert von P_1 und P_5 werden die Angaben des Herstellers herangezogen. Der Belastungswert dieser Punkte entspricht den „Absolute Maximum Ratings“, sodass davon ausgegangen wird, dass ein erstmaliges Erreichen dieses Punktes zur Zerstörung des Bauteils führt und somit keine Zyklen bei diesem Belastungswert ertragen werden (die praktische Bestimmung der maximal ertragbaren Zyklen folgt im Abschnitt 6.3). Zur Berechnung der Zyklenwerte x , y und z der Punkte P_2 , P_3 und P_4 wird ein Histogramm einer Stichprobe an Belastungen nach Abbildung 4.3 herangezogen.

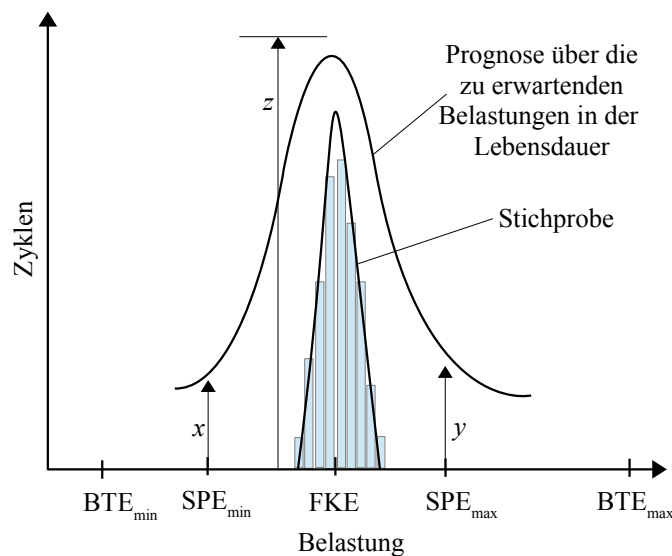


Abbildung 4.3: Beispielhafte Darstellung einer erfassten Belastung als Histogramm

Abbildung 4.3 zeigt das Histogramm eines beispielhaften Belastungsverlaufs einer BG im Betrieb ohne MPR. Dazu werden die Belastungen am zu überwachen- den Bauteil im Betrieb ohne MPR am Einsatzort erfasst. Es wird bei der Bildung des Stichprobenumfangs davon ausgegangen, dass in einer Stichprobe, siehe blaues Histogramm in Abbildung 4.3, alle zu erwartenden Messwerte in ausreichender

Menge vorhanden sind. Alle weiteren Messungen stellen somit eine Vervielfachung der in der Stichprobe erfassten Messwerte dar. Es ergibt sich ein prognostizierter Verlauf der Belastung über die geplante Lebensdauer des Bauteils, welcher als Zusammenhang (4.1) dargestellt werden kann.

$$m = \frac{N_B}{N_{SP}} \quad (4.1)$$

m – Multiplikator

N_B – eine in Zyklen geplante Lebensdauer einer BG/ Bauelements

N_{SP} – eine in Zyklen dargestellte Zeit der Stichprobenmessung

Mit dem Einsatz des Multiplikators aus (4.1) werden die Werte x , y und z berechnet. Dazu wird die erfasste Anzahl an Zyklen der Belastungswerte von SPE_{\min} , SPE_{\max} , FKE aus der Stichprobe mit m aus (4.1) multipliziert. Die Vervollständigung der Tabelle 4.1 und eine Erstellung des N_{\max} -Verlaufs ist somit möglich.

Nachfolgend wird ein N_{\max} -Verlauf für die thermische Belastung an einem Transistor aus Werten des Ebenenmodells bestimmt. Bei der vorliegenden Darstellung der Temperaturverteilung wurde eine Messdauer von 24 h genutzt, da durch die Messung eine Wiederholung innerhalb dieses Zeitbereichs deutlich wurde, siehe Abbildung 4.4.

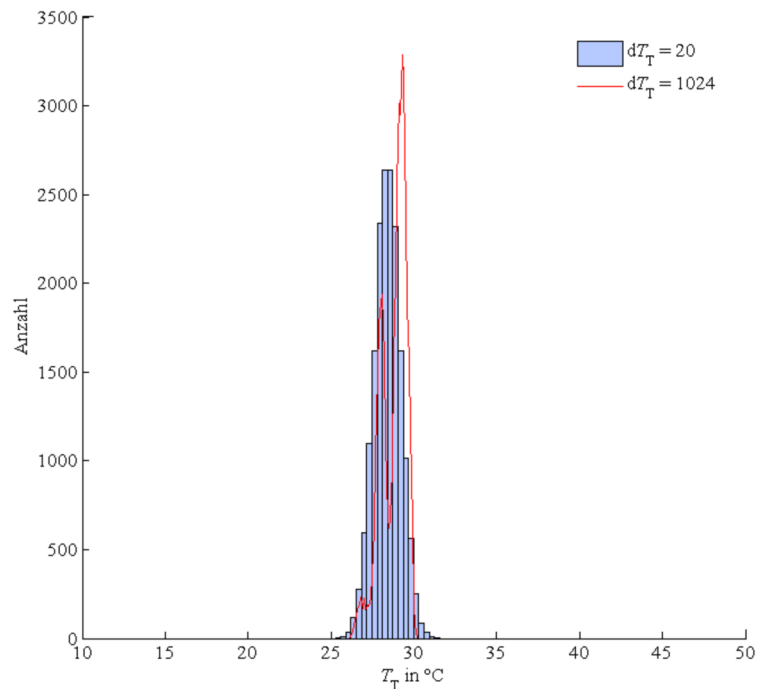


Abbildung 4.4: Histogramm des Temperaturverlaufs am Transistor in der 24-h-Stichprobe

Abbildung 4.4 zeigt ein Histogramm der 24-h-Stichprobe im Betrieb ohne MPR. Das rote Histogramm ist mit der maximalen Auflösung des AD-Wandlers von 10 Bit erstellt worden. Aufgrund der Speichergröße im μC wird eine Reduzierung der Klassenanzahl auf 20 durchgeführt, siehe Abschnitt 4.2. Mit der Erhöhung der Klassierungsbreite auf $dT_T = 1,5 \text{ K}$ wird der blaue Verlauf generiert. Mit dem sich am Transistor einstellenden Temperaturbereich von $26 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $30 \text{ }^\circ\text{C}$ wird von einer vollständigen Nutzung des SPE-Bereichs ausgegangen. Eine nähere Betrachtung der Verteilung der Stichprobe ergab, dass sich die Daten normalverteilt ausbilden. Mit Hilfe eines Distribution Fitting Tool z. B. aus Matlab[®] wurden die erforderlichen Parameter der Verteilung bestimmt. Durch Einbeziehung der beschriebenen Werte und dem Zusammenhang $\mu \pm 2\sigma \approx 95\%$ ergibt sich eine Varianz von $\sigma = 0,8$ und der Erwartungswert von $28 \text{ }^\circ\text{C}$. Für den Belastungswert B_{\min} wird eine Temperatur von $5 \text{ }^\circ\text{C}$ angenommen. Bei einer geplanten Lebensdauer von 2 Jahren ergeben sich folgende Zyklenwerte $x=1460730$, $y=529980$ und

$z=1828650$ Zyklen. Die Abbildung 4.5 zeigt den zusammengesetzten N_{\max} -Verlauf mit den berechneten Werten.

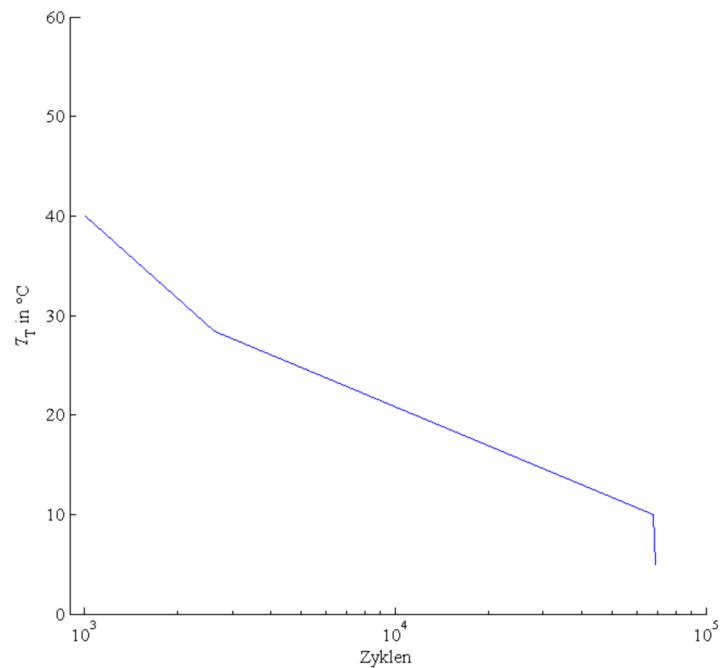


Abbildung 4.5: Resultierender N_{\max} -Verlauf

Durch die Annahme gleicher Zyklenabstände bei Messung und Eingriffnahme in eine BG, ist die Umrechnung von Zyklen in Zeit nach (4.2) möglich.

$$t = N t_{MA} \quad (4.2)$$

t – Zeit

N – Zyklen

t_{MA} – Zeitabstand zwischen aufeinanderfolgenden Messungen

5. Applikationsspezifische Ausführung des Verfahrens am Beispiel einer Schaltanordnung

Im Bereich der Energieversorgung ist beim Schalten von induktiven, kapazitiven oder resistiven Lasten bei Frequenzen größer als 10 kHz und Spannungen bis 1000 V der Leistungs-MOSFET ein wichtiges Halbleiterbauelement [Wit12]. Als weiterer Aspekt ist die Verfügbarkeit einer Vielzahl unterschiedlicher MOSFET-Typen zu nennen. Durch die Spezialisierung auf z. B. hohe Spannungsfestigkeit, hohe Stromtragfähigkeit, schnelles Umschalten für Hochfrequenzanwendungen oder auch Spezialbauformen mit verbesserter Wärmeabgabe ist der MOSFET im Linear- sowie für den Schalterbetrieb vielseitig einsetzbar.

Im Bereich der Energieversorgung findet der Einsatz des MOSFETs vorwiegend im Schaltbetrieb in Schaltreglern statt.

Aus der hohen Effizienz und gleichzeitig nur geringfügigen Erzeugung einer thermischen Verlustleistung folgt ein breiter wirtschaftlicher Einsatz. Aus diesem Grund wird ein Sperrwandler (auch Flybackconverter) als Vertreter der Schaltregler für die zu untersuchende Beispielanordnung ausgewählt.

5.1 Struktur der Baugruppe und ihre bestimmungsgemäße Funktionalität

Abbildung 5.1 zeigt die eingesetzte Demonstratorschaltung mit dem Parameterregler zur Ansteuerung für den Transistor T_1 und den Lüfter L. Der Parameterregler erhält als Eingangssignale die sensorisch zu erfassenden Belastungswerte.

Die folgenden Betrachtungen und die Konfiguration der Schaltung wurde nach [Vog91], [Rie88], [Brä83] und [Lut99] durchgeführt.

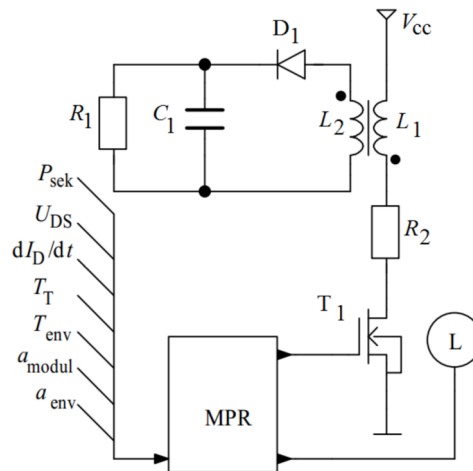


Abbildung 5.1: Demonstratorschaltung

- U_{DS} – Drain-Source-Spannung
- dI_D/dt – Drainstromgradient
- T_T – Transistortemperatur
- T_{env} – Temperatur des Außenklimas
- a_{modul} – auf der Baugruppe erzeugte mechanische Belastung
- a_{env} – von außen einwirkende mechanische Belastung (Beschleunigung)

Es erfolgt durch die Ansteuerung des Transistors T_1 die Steuerung des Energieinhalts der Spule L_1 . Der sekundäre Kreis wird durch L_2 gespeist und stellt an R_1 über die Gleichrichtung D_1 , C_1 eine Ausgangsleistung zu Verfügung. Die an R_1 entstehende Leistung wird als Funktionskriterium festgelegt. Über R_2 erfolgt eine Begrenzung des Drainstroms.

Die Analyse der Schaltung hinsichtlich lebensdauerlimitierender Belastungen ergab, dass die Lebensdauer der Schaltung maßgeblich vom Transistor T_1 abhängt. Es wurde festgelegt, die am Transistor einwirkenden Belastungen mittels MPR zu reduzieren. Der Eingriff durch den MPR erfolgt ebenfalls am Transistor T_1 . Um bewusst Störungen und Belastungen an der BG zu provozieren, werden Schutzmaßnahmen, wie z. B. passive Snubberglieder, Kühlfläche am Transistor und Schwingungsdämpfer zur Reduzierung mechanischer Belastungen an der BG nicht vorgesehen.

Um eine auf der BG erzeugte mechanische Störgröße zu provozieren, wurde ein Lüfter (vgl. L in Abbildung 5.1) anstatt einer passiven Kühlung vorgesehen. Der

Transistor gibt dementsprechend die Verlustleistung nur über sein Gehäuse an die Umgebungstemperatur ab. Der Lüfter wird direkt vom MPR bei der Überschreitung einer bestimmten Umgebungstemperatur bzw. beim Überschreiten einer definierten Transistortemperatur ein- und beim Unterschreiten eines Temperaturniveaus wieder abgeschaltet. Somit wird durch den Einsatz des Lüfters die Transistortemperatur gesenkt und die thermische Belastung reduziert. Ebenfalls wird durch den Einsatz des Lüfters eine mechanische Belastung auf die Leiterplatte eingepreßt.

Es erfolgt durch den MPR eine Zu- bzw. Abschaltung, jedoch keine Drehzahlregelung des Lüfters. Als Grund dafür ist die An- und Nachlaufphase des Lüfters zu nennen. In diesen Phasen entstehen durch die Änderung der Drehzahl weitere mechanische Schwingungen, woraus sich ein größeres Spektrum an Belastungen einstellt.

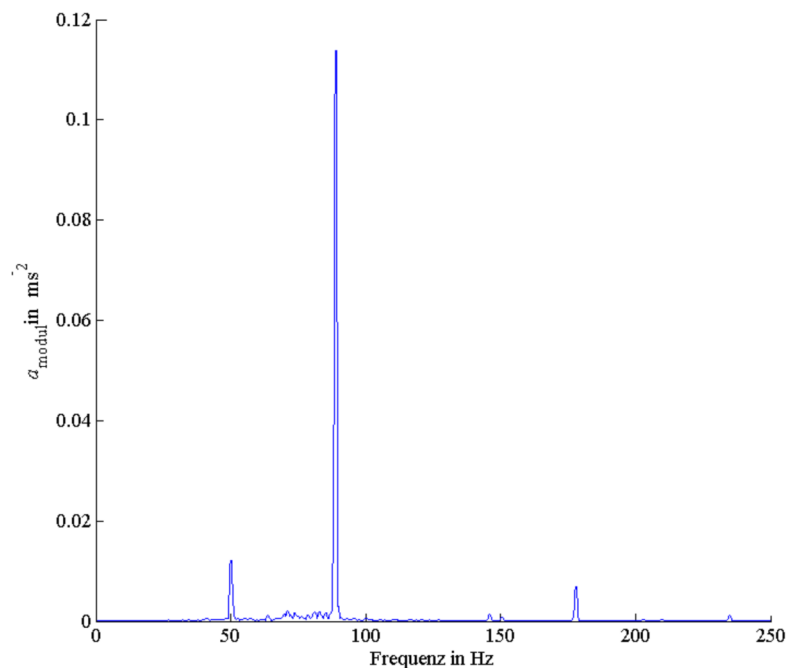


Abbildung 5.2: Frequenzspektrum der Schwingung des Lüfters

Abbildung 5.2 zeigt das von dem Lüfter erzeugte Spektrum mechanischer Störungen während des Betriebs. Bei einer Nenndrehzahl von 4500 U/min erzeugt der Lüfter eine Beschleunigung von 0,12 g, bei einer Frequenz von 75 Hz. In der Anlaufphase des Lüfters stellt sich eine Änderung der Schwingungsverhältnisse, wel-

che sich mit der zusätzlichen Erzeugung von Schwingungen im Bereich 60 Hz bis 70 Hz bemerkbar machen, ein. In der Nachlaufphase wird zusätzlich dazu noch eine Schwingung von ca. 175 Hz generiert.

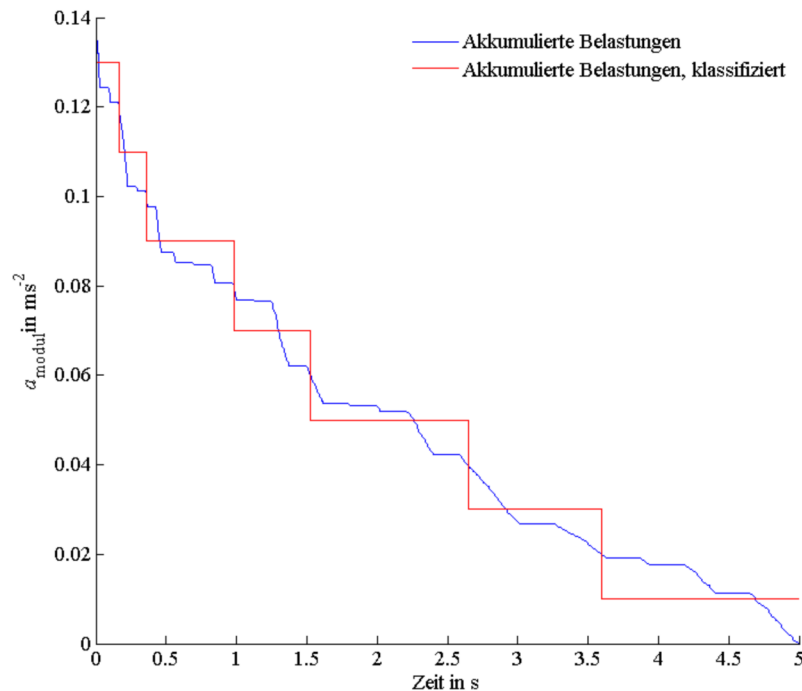


Abbildung 5.3: Akkumulierte mechanische Belastung

Abbildung 5.3 zeigt akkumulierte Belastungen, welche von Lüfter im Betrieb in die BG eingeprägt werden. Da die negativen Amplituden ebenfalls als Belastungen zu ertragen sind, werde diese durch eine Absolutwertbildung zu den positiven Amplituden hinzugenommen.

Die dargestellten Belastungen wurden in einem Zeitraum von 5 s mit einer Samplerate von 500 kS/s aufgenommen. Mit der daraus resultierenden Auflösung von $\Delta t = 2 \text{ ms}$ ergeben sich für die Messzeit von 5 s $2,5 \times 10^6$ Messwerte. Um die große Anzahl von Messwerten bei gleichzeitig hoher Auflösung im Controller zeitlich zu verarbeiten, wird in der Realisierung des MPR (siehe Abschnitt 6.3) eine Klassifizierung der Messwerte durchgeführt. Ergänzend zur akkumulierten Belastung ist diese in Abbildung 5.3 beispielhaft klassifiziert dargestellt.

5.2 Analyse und Auswahl der Belastungsparameter

Am Transistor treten im Betrieb mehrere Schädigungsmechanismen gleichzeitig auf. Diese haben im Allgemeinen eine Änderung des elektrischen Verhaltens des Transistors zu Folge, woraus wiederum eine Verschiebung des Arbeitspunkts der Schaltung resultiert. Wird davon ausgegangen, dass bei der Auslegung einer BG entstehende Belastungen berücksichtigt und durch die Dimensionierung der Schaltung weitestgehend minimiert werden, ist gleichfalls davon auszugehen, dass mit der Verschiebung des Arbeitspunktes eine Erhöhung der Belastungen einhergeht. Dies führt ferner zur Herabsetzung der Lebensdauer.

An der in Abschnitt 5.1 beschriebenen BG werden die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Ausfallerscheinungen betrachtet und es ergeben sich für den MPR die Aufgaben gemäß Tabelle 5.1.

Tabelle 5.1: Aufgaben des MPR am Demonstrator

Klimatisches/ elektrisches Geschehen	Änderungsmöglichkeit
Thermische Belastung	
<ul style="list-style-type: none"> - Erhöhung der Umgebungstemperatur - Erhöhung der Transistortemperatur aufgrund der Verlustleistung - mangelnder Abtransport der Wärme 	<ul style="list-style-type: none"> - Senkung der Verlustleistung - Senkung der Transistortemperatur durch den Einsatz des Lüfters auf der Baugruppe
Elektrische Belastung	
<ul style="list-style-type: none"> - Spannungsspitzen in der Drain-Source-Spannung durch Schalten der Induktivität - Stromgradienten 	<ul style="list-style-type: none"> - durch ein „sanftes“ Einschalten des Transistors und somit Reduzierung der Schaltflanken durch Senkung der Slewrates
Mechanische Belastung	
<ul style="list-style-type: none"> - auf der Baugruppe erzeugte Vibrationen 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzierung der Verlustleistung, somit Reduzierung der Transistortemperatur, somit Senkung der Einwirkzeit des Lüfters

Der Zusammenhang zwischen den elektrischen und klimatischen Größen des zu überwachenden Bauteils ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Aus den zu überwachen-

ner endlichen Menge an Sinusverläufen, um daraus nach dem Additionsverfahren hinreichend genau die signalbeschreibenden Größen zu beeinflussen und einen Leistungsverlauf zu generieren. Eine weitere Möglichkeit ist die gezielte Beeinflussung der Parameter durch das in die Baugruppe eingreifende Element. Tabelle 5.2 stellt den Ausgangspunkt für die Entscheidung der Einflussnahmemöglichkeit dar.

Tabelle 5.2: Verarbeitungsprozesse elektrischer Energie

Aufgabe	Beschreibung/ Beispiel
Formung $E_{in} = E_{out}$	Es erfolgt eine Umwandlung der elektrischen Parameter. z. B. Transformator, Sperrwandler, Durchflusswandler, $S_{in} \neq S_{out}$
Leitung $E_{in} = E_{out}$	Es erfolgt eine reine Übertragung der Energie. z. B. Leitung, $S_{in} = S_{out}$
Erzeugung $E_{in} = 0, \geq E_{out}$	Es erfolgt eine Umwandlung einer nicht-elektrischen Energie. z. B. Generator, $S_{in} = 0, S_{in} \neq S_{out}$

Die ausgewählte Schalteranordnung (Flybackconverter) ist ein Element der Gruppe „Formung“ in Tabelle 5.2. Als Kriterium für die Funktionserfüllung wird die sekundärseitig erzeugte Leistung genutzt. Im nachfolgenden wird der Aspekt der Änderung der Belastung durch die signalbeschreibenden Größen näher beschrieben.

Eine Prüfung der Demonstratorschaltung ergab eine ausreichende Einflussnahme auf die Schaltung bei stetiger Erfüllung des Funktionskriteriums durch die Änderung der Signalparameter Frequenz, Tastverhältnis und Slewrate. Ebenfalls stellt sich dadurch eine große Einflussnahme auf die Belastung ein (vgl. Abbildung 5.7).

Bei jeder vollen Schwingung durchläuft der Transistor 4 Zustände, welche unterschiedliche Verlustleistungsumsätze zeigen. Die direkte Proportionalität zwischen der umgesetzten Energie zur Frequenz ist durch den Anstieg der Anzahl an steigenden und fallenden Flanken je Messzeitraum begründet. Das Verhalten im ge-

sperren und durchgeschalteten Zustand sowie der Anstieg der fallenden und steigenden Flanken wirkt sich, wie in Abbildung 5.5 dargestellt, durch eine Steigerung der Verlustleistung aus. Erste Versuche an der Demonstratorschaltung ergaben eine hinreichende Beeinflussung der Verlustleistung im Frequenzbereich von 100 Hz bis 1 kHz.

Das Tastverhältnis (engl. duty cycle) beschreibt das Verhältnis von Impulsdauer zu Periodendauer. Durch die Änderung des Tastverhältnisses gelingt ein Eingriff auf die Sperr- und Leitzeiten des Transistors und somit auf dessen Verlustleistung. Abbildung 5.5 zeigt die Abhängigkeit. Das Tastverhältnis wird für die Beeinflussung der Demonstratorschaltung im Bereich von 0,1 bis 0,9 variabel gestaltet.

Die Slewrate ist definiert als Spannungsanstieg je Zeit und ist in den Übergangphasen zwischen dem leitenden und sperrenden Zustand des Transistors relevant. Die Slewrate ist dahingehend interessant, dass in der ausgewählten Schaltanordnung induktiv geschaltet wird. Im leitenden Zustand des Transistors wird die Spule L_1 , siehe Abbildung 5.1, energetisch aufgeladen. Im Wechsel zum sperrenden Zustand des Transistors erfolgt eine Änderung des Drainstroms und somit eine Spannungsinduktion in der Spule L_1 . Diese macht sich als Spannungsspitzen auf der Drain-Source-Spannung bemerkbar. Somit wird nur die steigende Flanke der U_{DS} variabel gestaltet. Die fallende Flanke der U_{DS} bleibt unverändert. Im Einstellbereich der Slewrate von 17 kV/s bis 53 kV/s ergeben sich Spannungsspitzen von 55 V bis 200 V. Die resultierende Verlustleistung des Transistors zeigt Abbildung 5.5. In den Abbildungen A1.1, A1.2 und A1.3, siehe Anhang A.1, werden die gemessenen Änderungen der Energiemenge im Transistor bei Änderung der Einflussnahme dargestellt.

Die genannten Bereiche der Einflussnahmeparameter werden in Kombination mit der Erstellung der LuT festgelegt, siehe Abschnitt 5.4. In der LuT werden nur Einflussnahmeparameter und die dazugehörigen elektrischen und klimatischen Belastungen eingetragen, bei denen die Erfüllung des Funktionskriteriums vorliegt, siehe Abschnitt 3.2.

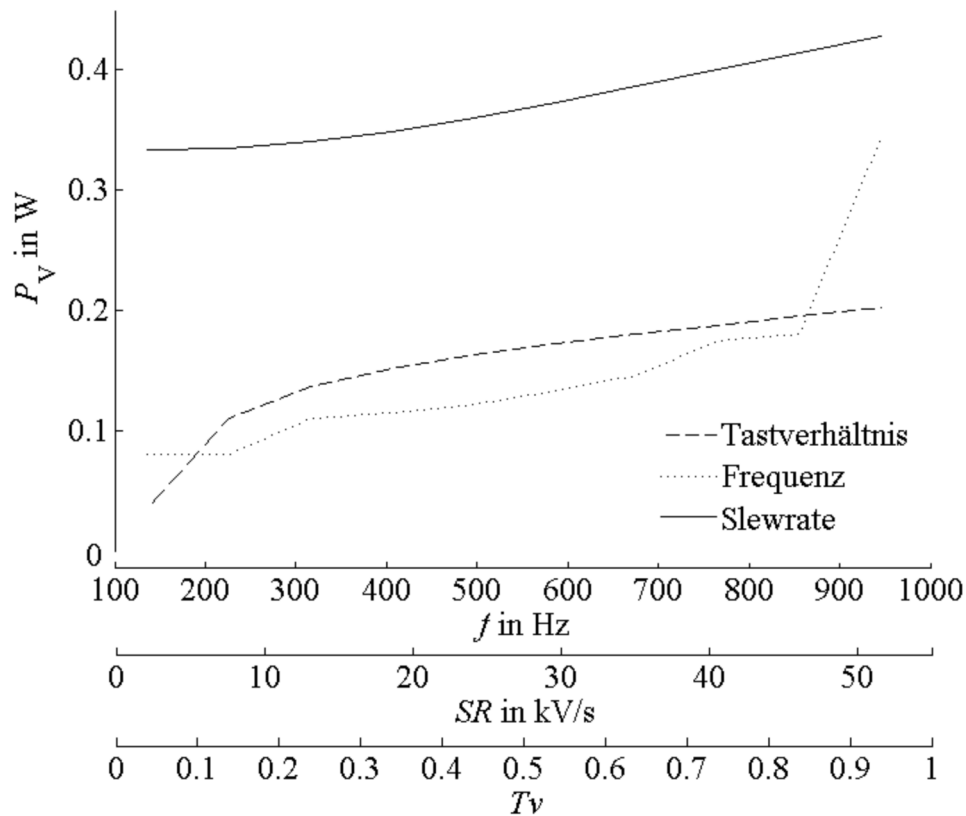


Abbildung 5.5: Einflussnahme auf die Verlustleistung des Transistors durch die Variation der Parameter Frequenz, Tastverhältnis und Slewrate

Die in Abbildung 5.5 dargestellte Abhängigkeit der Verlustleistung des Transistors von den Parametern der Einflussnahme ist der LuT entnommen. Die Erstellung der LuT wird im Abschnitt 5.4 beschrieben.

5.4 Adaption des Algorithmus mit Parameterregler und Funktionskriterium

Aus folgenden Gründen erfolgt eine vorhergehende Bestimmung der Einflussnahme und Speicherung in einer LuT im Gegensatz zur Berechnung der Einflussnahme während des Betriebes im MPR: Der Mikrocontroller (μC) kann in Abhängigkeit seiner Hardware nur endlich genaue Werte ausgeben. Beispielsweise begrenzt die Auflösung des DA-Wandlers die Ausgabemenge an unterschiedlichen Analogwerten. Hochgenaue Berechnungen des μC werden daher in wenige, von der

Hardware abhängige Werte umgewandelt. Des Weiteren ist es, wie in Kapitel 3 beschrieben, sinnvoll, eine Einsparung von Controllerressourcen durchzuführen und diese für die Aufbereitung und das Speichern der Messwerte vorzuhalten. Ebenfalls können ökonomische Gründe wie eine Kosteneinsparung durch den Einsatz eines kleineren μC und einer kleineren Zusatzplatine für den MPR usw. aufgeführt werden.

Die Überprüfung der elektrischen Größen der Bauteile ergab, dass eine Änderung äußerer klimatischer Einflüsse nur eine marginale Einflussnahme auf die elektrischen Größen ausübt. Klimatische Werte hingegen, wie mechanische Vibrationen und Temperaturdifferenzen, müssen unter gleichbleibender klimatischer Außenbelastung erfasst werden. Um ein gleichbleibendes Außenklima zu gewährleisten und die von der Baugruppe erzeugte thermische Belastung auszugleichen, wurde die Baugruppe im Klimaschrank betrieben. Neben dem Einsatz zweier örtlich getrennter Temperatursensoren erfolgt so eine messtechnische Trennung der Umgebungstemperatur und der Transistortemperatur. Durch eine vibrationsmindernde Auflagefläche im Klimaschrank wird eine Trennung der einwirkenden äußeren mechanischen Belastungen und auf der Leiterplatte entstehenden mechanischen Belastungen erreicht. Mit „äußere mechanische Belastung“ ist in diesem Fall eine Belastung gemeint, deren Quelle außerhalb des Klimaschranks liegt. Dadurch wird eine genaue Beschreibung der von der Baugruppe erzeugten klimatischen Belastungen erreicht.

Für die Generierung der LuT wird eine vollständige Produktmenge (auch kartesisches Produkt) nach (3.1) der diskret vorliegenden Parameter der Einflussnahme gebildet und der Baugruppe auferlegt.

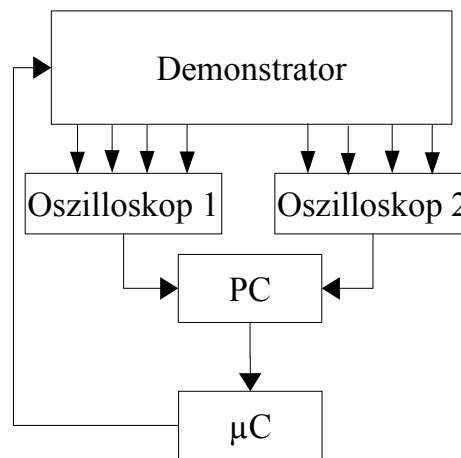


Abbildung 5.6: Messanordnung

Die Baugruppe in Abbildung 5.6 besteht aus den auf der Leiterplatte aufgebracht Sensoren bzw. Messeinrichtungen, welche von den Oszilloskopen mittels VISA Schnittstelle (engl. Virtual Software Architecture) zyklisch abgefragt und an den PC übergeben werden. Auf dem PC werden die Rohdaten umgesetzt und bewertet, siehe dazu Abschnitt 5.5, und an den μC , der das Ansteuersignal für den Transistor generiert, übertragen. Beim Design der Messeinrichtung wurde sich an [Brä76], [Bjo72] und [Wei09] orientiert.

Der Betrieb ohne MPR und mit MPR unterscheidet sich daher einzig in der Variation der Einflussnahmeparameter. Die erforderliche Aufnahme der klimatischen und elektrischen Daten ist bei beiden Betriebsvarianten gleich. Für die Ermittlung der Einflussnahme durch den MPR ist ein Vergleich zum Betrieb ohne MPR notwendig. Genutzt werden für die Aufnahme insgesamt 8 Kanäle zweier Oszilloskope. Um eine hohe Genauigkeit bei gleichzeitig hoher Messwiederholungsrate zu erreichen, wurde die Messzeit jedes Kanals auf 10 ms beschränkt, so dass eine Periode der unteren Ansteuerfrequenz erfasst werden kann. Durch die Wahl der hohen Samplerate von 21000 S/div ergibt sich eine genügend große Auflösung, um bei der oberen Grenzfrequenz von 1 kHz eine hohe Detailtreue zu erreichen. Da die Temperatur eine geringe Änderungsgeschwindigkeit aufweist und das zu überwachende Bauteil eine Wärmekapazität besitzt, wird für die Temperaturerfassung der Mittelwert aus dem Signal des Oszilloskops gebildet. Hingegen wird bei der maximalen Spannungsüberhöhung der Maximalwert ermittelt.

Die Messwiederholungsrate liegt bei 1,7 s. Diese Zeit bildet sich aus der Zeit für die Aufnahme aller 8 Kanäle und der Verarbeitungszeit im PC.

Tabelle 5.3: Gemessene Rohdaten

	mechanisch	elektrisch	thermisch
Baugruppe	a_{modul}	$U_{\text{DS}}, I_{\text{D}}, I_{\text{R1}}, U_{\text{R1}}$	T_{T}
Umgebung	a_{env}		T_{env}

Der Transistor in der Demonstratorschaltung ist als Bauteil, welches die Lebensdauer entscheidend beeinflusst, ermittelt worden. Um die am Transistor einwirkende Belastungen zu senken und so die Lebensdauer positiv zu beeinflussen, müssen die in Tabelle 5.3 aufgelisteten Werte ermittelt werden.

Tabelle 5.4: Berechnete Daten

	mechanisch	elektrisch	thermisch
statisch	–	$U_{\text{DS max}}, I_{\text{D max}}, \bar{I}_{\text{D}}$ $P_{\text{V}}, W, P_{\text{sek}}$	$T_{\text{env max}},$ $T_{\text{T max}},$ ΔT
dynamisch	–	$\frac{dU_{\text{DS}}}{dt}, \frac{dI_{\text{D}}}{dt}$	–

Die Messwerte werden in die in Tabelle 5.4 aufgelisteten Werte umgerechnet und in die LuT eingetragen. Für die Erfassung und Bewertung der mechanischen Rohdaten wurde sich an [DKE78], [ISO06], [ISO03b], [ASTM07] und [DKE82] orientiert.

Abbildung 5.7 zeigt die Änderung der Gesamtbelastung bei vollständiger Änderung der Beeinflussungsparameter.

Aufgrund dessen, dass alle in der LuT erfassten Einflussnahmeparamter und deren zugehörige Belastungen das Funktionskriterium erfüllen, resultiert eine große Bereichsabdeckung, siehe Tabelle 5.5.

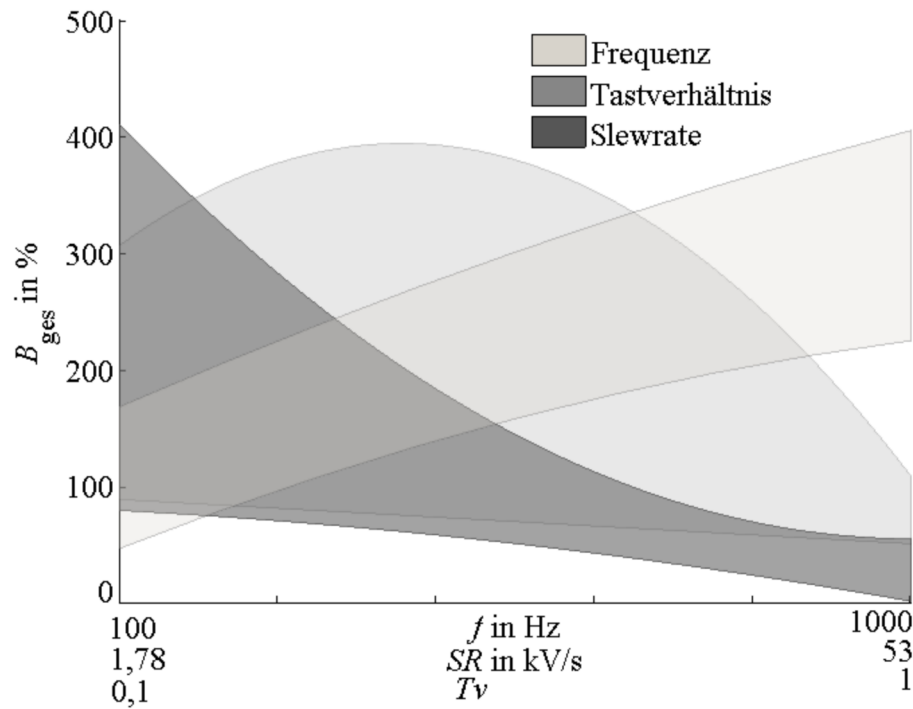


Abbildung 5.7: Beeinflussung der Gesamtbelastung durch Änderung der Beeinflussungsparameter

Tabelle 5.5: Bereiche und Verteilung der in der LuT gespeicherten Belastungen

Belastung und rel. Belastung	Einstellbarer Bereich und rel. Belastungsbereich		Bereichs-abdeckung
$U_{DS\ max}$ B_{rel}	59,7 V 0 %	199,9 V 100 %	98,6 %
P_V B_{rel}	90 mW 0 %	3,43 W 100 %	99,4 %
ΔT_T B_{rel}	0,28 K 0 %	10,30 K 100 %	97 %
$d I_D / dt$ B_{rel}	250,5 A/s 0 %	276,9 A/s 100 %	87,7 %
B_{ges}	44 %	399 %	99,4 %

Eine Beschreibung zur Berechnung der Werte für die LuT und die Reaktion des BIV auf eingehende Messwerte wird in den folgenden Abschnitten durchgeführt.

5.4.1 Berechnung von elektrischen Werten

Aus den Verläufen der Drain-Source-Spannung U_{DS} und des Drainstroms I_D wird nach (5.1) der Mittelwert der Verlustleistung und über (5.2) die vom Transistor abgegebene Wärmemenge berechnet.

$$\bar{P}_V = \frac{1}{t_{\text{mess}}} \cdot \int_0^{t_{\text{mess}}} U_{DS}(t) \cdot I_D(t) dt \quad (5.1)$$

\bar{P}_V – Mittelwert der Verlustleistung des Transistors innerhalb des Messzeitraums

$$W_{\text{th}} = \int_0^{t_{\text{mess}}} \bar{P}_V dt \quad (5.2)$$

W_{th} – Wärmemenge aufgrund der Verlustleistung

Der Transistor erwärmt sich aufgrund der erzeugten Verlustleistung. Die sich ergebende Temperaturerhöhung wird nach (5.6) berechnet.

5.4.2 Bestimmung der Wärmekapazität und Temperaturabhängigkeit des Schaltelements

Die Bestimmung der Wärmekapazität ist aufgrund der Zusammensetzung aus unterschiedlichen Materialien schwer berechenbar. Für die analytische Bestimmung ist die Wärmekapazität nach (5.3) erforderlich.

$$C_{\text{th}} = \frac{\Delta W_{\text{th}}}{\Delta T_T} \quad (5.3)$$

C_{th} – Wärmekapazität

ΔT_T – Änderung der Transistortemperatur

W_{th} – Wärmemenge aufgrund der Verlustleistung

Für die messtechnische Ermittlung der Wärmekapazität wird der Transistor mit einer konstanten Gate-Source-Spannung (U_{GS}) durchgesteuert und ein konstanter Drainstrom (I_D) eingepreßt. Dabei wird der zeitliche Verlauf der Transistortem-

peratur, der U_{DS} und des I_D aufgenommen und die elektrische Verlustleistung berechnet. Die Temperaturabhängigkeit des R_{DSon} des Transistors (siehe Abbildung A1.4) führt zu einer Änderung der Verlustleistung und nach (5.4) zu einer Änderung der Temperatur.

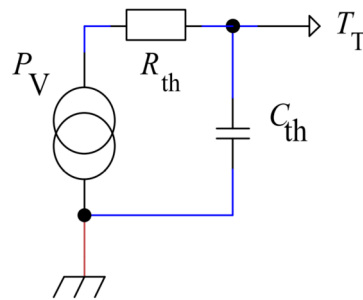


Abbildung 5.8: Thermisches Ersatzschaltbild des Transistors

T_T – Transistortemperatur

R_{th} – thermischer Widerstand des Transistors, auch als $R_{\Theta JA}$ (junction to ambient) bezeichnet

Die elektrische Verlustleistung wird vollständig in Wärme umgewandelt, wonach die Verlustleistung als Wärmestrom angesehen werden kann, siehe Abbildung 5.8. Der Wärmestrom fließt zunächst in die Wärmekapazität des Transistorgehäuses und sorgt somit für eine verzögerte Erwärmung. Durch die messtechnische Ermittlung der Wärmekapazität werden die einzelnen Wärmekapazitäten des Halbleiterkristalls $C_{junction}$ und Gehäusematerials C_{Case} kombiniert betrachtet. Mit der Einflussnahme auf die Wärmekapazität ergibt sich die Temperaturänderung am Transistor in (5.4).

$$\Delta T_T = R_{th} \cdot \bar{P}_V \quad (5.4)$$

ΔT_T – Temperaturänderung am Transistor

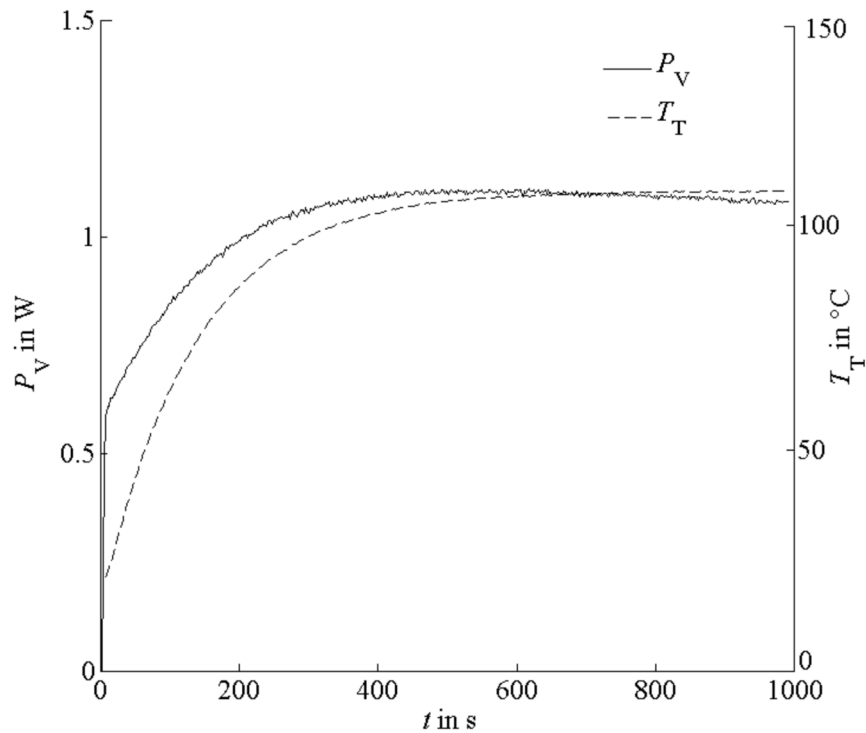


Abbildung 5.9: Zeitlicher Verlauf der Temperatur und der Verlustleistung am leitenden Transistor

Durch das Ablesen von 5τ aus dem Diagramm in Abbildung 5.9 ergibt sich eine Wärmekapazität von $C_{th}=1,0301 J/K$. Zusammen mit dem Wärmewiderstand aus dem Datenblatt [IRF640] von $R_{th}=62 K/W$ ergibt sich eine Erwärmung nach (5.6).

$$\tau = R_{th} C_{th} \quad (5.5)$$

τ – Zeitkonstante der RC-Kombination, bei 5τ gilt ein Kondensator als aufgeladen

$$T_{MP+1} = T_{MP} + \Delta T_T \quad (5.6)$$

T_{MP} – Temperatur am aktuellen Messzeitpunkt

T_{MP+1} – Temperatur zum nächsten Messzeitpunkt

Die sich zum Messzeitpunkt z_{MP+1} (siehe Abbildung 5.10) am Bauteil einstellende Temperatur ergibt sich nach (5.7).

$$T_{MP+1} = \bar{P}_V \cdot R_{th} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{mess}}{\tau}}\right) + T_{MP} \quad \text{mit } \tau = R_{\theta JA} C_{th} \quad (5.7)$$

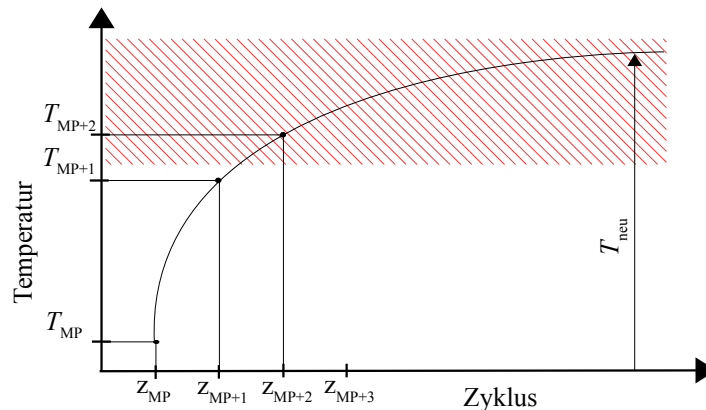


Abbildung 5.10: Beispielhafter Verlauf der Temperatur bei Eintrag einer Wärmemenge zwischen zwei Messzeitpunkten

Abbildung 5.10 beschreibt die zyklische Messung zu jedem Messzeitpunkt z_{MP} der Temperatur des Transistors T_{MP} und die sich einstellende Temperatur T_{MP+1} zum nächsten Messzeitpunkt z_{MP+1} . Im vorliegenden Verlauf erreicht die Temperatur zum Messzeitpunkt z_{MP+2} den Wert T_{MP+2} und liegt damit im Bereich, in dem der Lüfter eingesetzt wird (rote Schraffur). Durch den Einsatz des Lüfters wird auf der BG eine mechanische Belastung eingepreßt. Durch die Berechnung des Temperaturwertes zum nächsten Messzeitpunkt ist es möglich, die Entscheidung zu treffen eine hohe Temperatur am Transistor oder eine mechanische Belastung auf der BG einzupreßen.

5.4.3 Berechnung der eintretenden Vibrationen

Nach Berechnung der sich einstellenden Temperatur für den Zeitpunkt z_{MP+1} nach Abschnitt 5.4.2 ist eine mögliche Überschreitung der Lüftereinsatztemperatur (rote Schraffur) und die damit verbundene Aktivierung des Lüfters zum Zeitpunkt

z_{MP+2} bestimmbar. Abbildung 5.10 zeigt das Überschreiten der Lüftereinsatztemperatur zwischen dem Zeitpunkt z_{MP+1} und z_{MP+2} . Es ist demnach zu erwarten, dass zum Zeitpunkt z_{MP+2} der Lüfter durch den MPR aktiviert und so für den Zeitraum $> z_{MP+2}$ eine Vibration auf der Leiterplatte eingeprägt wird. Die Berechnung einer möglichen Überschreitung der Lüftereinsatztemperatur wird in die Berechnung einer neuen Ansteuerung im Element Belastungsermittlung, siehe Abbildung 5.11, berücksichtigt. Dazu wird in diesem Element eine Ansteuerung priorisiert, in der die Transistortemperatur unterhalb der Lüftereinsatztemperatur liegt.

Der Einsatz des Lüfters ergibt sich aus der aktuellen Transistortemperatur und der nach (5.7) berechneten Temperatur. Aufgrund dessen, dass der beschriebene Algorithmus zu jedem Zeitpunkt erneut durchlaufen wird, werden Informationen zur mechanischen Belastung nicht in die LuT eingetragen. Es wird davon ausgegangen, dass die vom Lüfter erzeugte mechanische Schwingung (siehe Abbildung 5.3) konstant ist. Aufgrund dessen wird diese in den Berechnungen des Algorithmus in Abschnitt 5.5 berücksichtigt, jedoch nicht in die LuT eingetragen.

5.5 Erforderlicher Umfang des Algorithmus des Betriebs-Interventions-Verfahrens

Der in Abbildung 5.11 dargestellte und im Nachfolgenden beschriebene Algorithmus ist in die für die Belastungsreduzierung des Demonstrators benötigten Elemente unterteilt.

Der Hauptpfad (schwarz) umfasst neben der Datenaufbereitung und der hardwareseitigen Ansteuerung die gesamte Berechnung der neuen Ansteuerung auf Basis der anliegenden Belastungen. Dieser Pfad wird zyklisch abgearbeitet. Nach der hardwareseitigen Aufnahme der Daten erfolgt im Element „Datenaufbereitung“ eine Filterung, die Mittelwertbildung der Temperaturwerte und die Angleichung des Versatzes zwischen der U_{DS} und des I_D , welcher aufgrund der sequentiellen Messwertaufnahme entsteht.

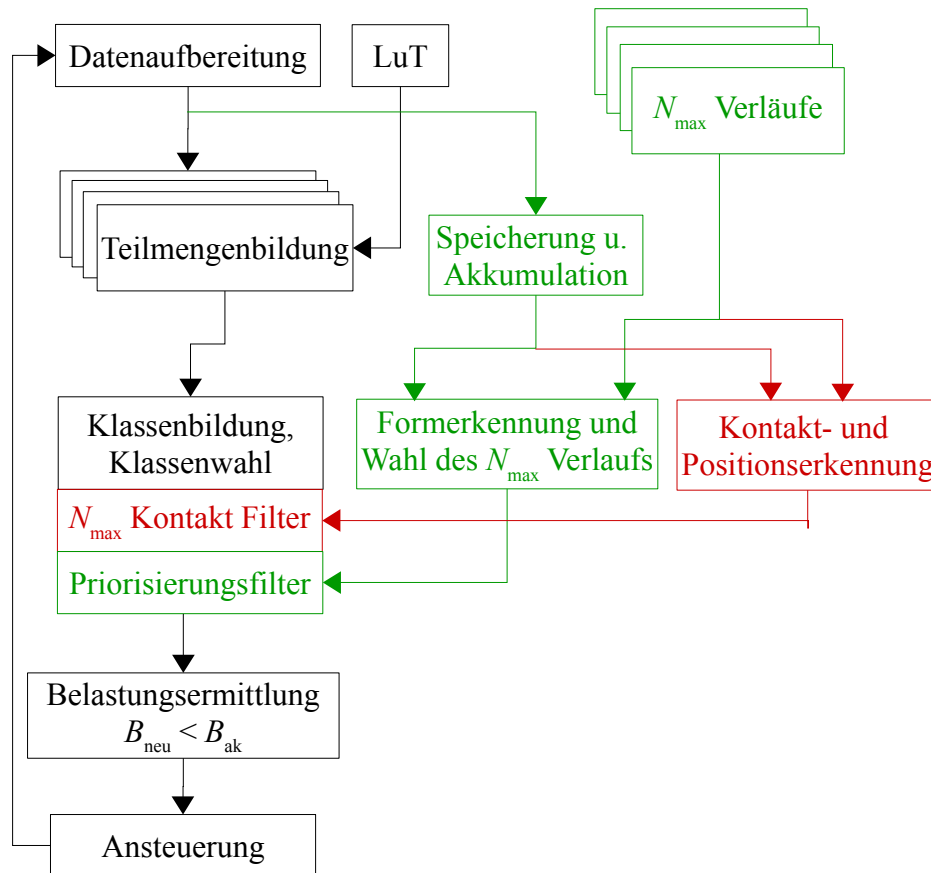


Abbildung 5.11: Im Vergleich zu Abbildung 3.5 und 3.6 vervollständigter Algorithmus des Betriebs-Interventions-Verfahrens

- B_{ak} – zum aktuellen Messzeitpunkt erfasste Belastung
- B_{neu} – bis zum nächsten Messzeitpunkt anliegende Belastung
- Schwarz – in den Aufgaben 1 und 2 zyklisch abzuarbeitende Elemente
- Grün – Elemente für die Speicherung und Normierung eingehender Belastungen
- Rot – für Aufgabe 2 zugeschaltete Elemente

In dem Element „Teilmengenbildung“ wird ein Vergleich der eingehenden Belastungsdaten mit den jeweiligen Daten aus der LuT durchgeführt. Dabei werden alle Werte der LuT, die kleiner als der aktuell gemessene Wert sind, mit 1, anderenfalls mit Null markiert. Dies wird für alle Belastungen durchgeführt. Dazu wird eine Hilfsmatrix $A^* = \{0,1\}$ in (5.9) mit Hilfe der Heaviside-Funktion in (5.8) gebildet.

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } x < 0 \\ 0, & \text{wenn } x \geq 0 \end{cases} \quad (5.8)$$

$$A_{ij}^* = \begin{cases} 1, & \text{wenn } A_{ij} < V_i \\ 0, & \text{wenn } A_{ij} \geq V_i \end{cases} \quad (5.9)$$

$$A^* = \{\Theta(V_i - A_{ij}), i = 1, \dots, p, j = 1, \dots, q\}$$

- $\Theta(x)$ – Heaviside Funktion
- V – Vektor mit den aktuellen Messwerten
- A – Bezeichner der LuT-Matrix
- A^* – Bezeichner der umgeformten Matrix
- i, j – Spalten- und Zeilenindex der Matrizen
- p, q – Spalten- und Zeilenlänge der LuT

Das Element „Klassenbildung und -wahl“ erhält die Matrix A^* und berechnet nach (5.10) die Summe jeder Spalte und bildet den Zeilenvektor Z . Der Vektor Z enthält die gleiche Anzahl an Spalten wie die LuT und die Matrix A^* .

$$Z_j = \sum_{i=1}^q A_{ij}^* \quad (5.10)$$

- Z – Zeilenvektor, enthält die Summe aller Spalten der Matrix A^*

Die Einträge des Vektors Z liegen im Bereich zwischen null und maximal der betrachteten Menge an Belastungen. Diese beschreiben mit ihrem Wert die mögliche Menge an gleichzeitig reduzierbaren Belastungen. Um gleichzeitig so viele Belastungen wie möglich zu reduzieren, werden die Indizes der größten Werte in Z ausgelesen und mit denen die entsprechenden Ansteuerwerte, welche ebenfalls in der LuT gespeichert sind, ermittelt.

Der Vektor Z durchläuft in jedem Zyklus das Element „Priorisierungsfiler“. Dieser hat die Aufgabe, die unterschiedlichen N_{\max} -Verläufe der betrachteten Belastungen gleich zu behandeln. Ohne das Filter würde immer der kürzeste N_{\max} -Verlauf durch seine akkumulierte Belastung kontaktiert und somit das Bauteil immer durch die gleiche Belastungsgröße zerstört werden. Der vom Ursprung her gese-

hene am nächsten liegende N_{\max} -Verlauf gibt dementsprechend immer die charakteristische Lebensdauer vor. Durch eine Kontrolle der eingehenden Belastungen kann der Verlauf und somit auch der Kontaktpunkt bestehend aus Belastungs- und Zyklenwert gesteuert werden und es gelingt eine Gleichbehandlung aller Belastungen.

Im parallel arbeitenden grünen Pfad erfolgt eine Normierung der unterschiedlichen N_{\max} -Verläufe. Das Element „Speicherung und Akkumulation“ erhält die Rohdaten aus dem Element „Datenaufnahme“ und speichert diese separat ab. Dazu wird, um den Speicheraufwand zu minimieren und die Speichergröße über die Lebensdauer konstant zu halten, ein Histogramm erstellt und mit zyklisch gemessenen Daten in $[N_{\text{ak}}]_n$ für alle Belastungen aktualisiert. Aufgrund dessen, dass die Messwerte der betrachteten Belastungen unterschiedlich ausfallen, unterscheiden sich die Verläufe der akkumulierten Belastungen im Laufe der Betriebszeit erheblich. Das Element „Formerkennung und Wahl“ bestimmt permanent die Abstände zu den entsprechenden N_{\max} -Verläufen nach (5.11), siehe Abbildung 3.3.

$$N_m = [N_{\max}]_n - [N_{\text{ak}}]_n \quad (5.11)$$

N_m – Matrix, enthält die Abstände zwischen der bisher ertragenen Menge an Belastungen zum jeweiligen N_{\max} Verlauf

N_{ak} – Vektor der bisher ertragenen Menge an Belastungen

n – Anzahl der Belastungen

Das Priorisierungsfiter tritt in Kraft, sobald in Z der größte Wert kleiner als die Anzahl der betrachteten Belastungen ist. Das Filter sperrt in Z entsprechende Datensätze auf Basis der Matrix N_m . Dazu werden bei Belastungen, welche den geringsten Wert in N_m enthalten, dem zugehörige Wert in der Matrix A^* auf 1 gesetzt, um somit eine Reduzierung dieser Belastung auszulösen. Gleichermaßen werden Belastungen, bei denen N_m große Werte enthält, durch Nullsetzen der entsprechenden Stelle in der Matrix A^* von einer Reduzierung der Belastung ausgeschlossen. Bei einer Veränderung der Matrix A^* wird der Vektor Z neu bestimmt.

Im Element „Belastungsermittlung“ werden anhand der Indizes der größten Werte des Vektors Z die Werte aus der LuT entnommen und die relative Belastung nach (5.12) bestimmt. Dazu wird weiterhin von einem linearen Zusammenhang nach der Geradengleichung $y = mx + n$ ausgegangen.

$$\begin{aligned} \min(B_n) &\Rightarrow B_{n(\text{rel})} = 0 \\ \max(B_n) &\Rightarrow B_{n(\text{rel})} = 1 \end{aligned} \quad (5.12)$$

B_n – Eine der n betrachteten Belastungen

$B_{n(\text{rel})}$ – Eine der n betrachteten Belastungen im relativen Wert

Aus den in eine relative Belastung umgerechneten einwirkenden Belastungen wird durch Summierung die Gesamtbelastung berechnet und als Vektor an das Element „Ansteuerung“ übergeben. Anhand des Index des kleinsten Wertes der Gesamtbelastung werden aus der LuT die Einflussnahmeparameter ermittelt und in Ansteuerwerte für den DA-Wandler umgesetzt.

Im Laufe der Betriebszeit nähert sich N_{ak} dem N_{max} -Verlauf an (vgl. Abbildung 3.3). Bei einem definierten Abstand, siehe Abschnitt 3.3, von N_x wird der rote Pfad, siehe Abbildung 5.11, zugeschaltet. Hierbei wird eine Teilmenge an Ansteuermöglichkeiten gesperrt, welche nicht mehr in den schraffierten Bereich, siehe Abbildung 3.3, fällt. Die Zuschaltung der zusätzlichen Funktion des Algorithmus wird durch das Element „Kontakt und Positionserkennung“ erledigt. Es werden permanent die bisher ertragenen und gespeicherten Belastungen abgefragt und die Matrix N_m bestimmt. Bei erstmaliger Nichterfüllung von (5.13) wird das N_{max} -Kontaktfilter zugeschaltet. Die Prüfung (5.13) wird für alle betrachteten Belastungen durchgeführt. Aufgrund der Abarbeitung mehrerer Belastungen mit unterschiedlichen N_{max} -Verläufen ist davon auszugehen, dass die Bedingung (5.13) in den jeweiligen betrachteten Belastungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten nicht mehr erfüllt wird und die Umschaltung zu Aufgabe 2 zeitlich getrennt erfolgt.

$$N_m < N_{\text{max}} - N_x \quad (5.13)$$

N_m – Matrix, enthält die Abstände zwischen der bisher ertragenen Menge an Belastungen zum jeweiligen N_{max} Verlauf

N_x – Matrix, enthält definierte Sicherheitsabstände für alle Belastungen

Das N_{max} -Kontaktfilter sperrt durch Informationen des vorhergehenden Elements „Positionserkennung“ die Indizes von Ansteurmöglichkeiten aus der LuT, die oberhalb des Kontaktierungswertes B_K und somit außerhalb des schraffierten Bereiches in Abbildung 3.3 liegen.

Die Werte der Matrix A^* des Elements „Klassenwahl“ werden nochmals neu berechnet. Dazu wird nach (5.14) zunächst der Belastungswert bestimmt, bei dem ein Mindestabstand vorliegt.

$$B_K = \min(N_m) \quad (5.14)$$

B_K – Belastungswert, bei dem die Unterschreitung des Mindestabstands nach (5.13) vorliegt

Mittels B_K wird über (5.15) die Matrix A^* überarbeitet und alle Ansteurmöglichkeiten, deren Belastungswerte größer als B_K sind, in der LuT gesperrt.

$$A^* = \{ \Theta([B_K]_j - A_j), j = 1, \dots, q \} \quad (5.15)$$

Im Laufe der Zeit wird durch die weiter eingehenden Belastungen der N_{max} -Verlauf kontaktiert. Dabei verbleibt der Algorithmus in Aufgabe 2.

Nachfolgend wird der beschriebene Algorithmus des BIV an einem Beispiel verdeutlicht. Es wird von 2 einwirkenden Belastungen ausgegangen. In Tabelle 5.6 ist dazu eine beispielhafte LuT mit Belastungswerten und einem Einflussnahme-parameter dargestellt.

Tabelle 5.6: Beispielhafte LuT

Temperatur in °C	43	38	34	27	25	21	29	38
Spannung in V	5	7	12	18	27	46	70	144
Einflussnahme, Frequenz in Hz	100	200	300	400	500	600	700	800

Die derzeitige Ansteuerung beträgt 100 Hz. Im aktuellen Zyklus wurde eine Spannung von 26 V und eine Temperatur von 35 °C gemessen. Für den Sicherheitsabstand wurde $N_x = 1$ gewählt.

Nach (5.9) wird die Hilfsmatrix A^* gebildet.

Tabelle 5.7: Hilfsmatrix A^*

0	0	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	0	0	0	0

Nach (5.10) wird der Vektor Z gebildet.

Tabelle 5.8: Spaltenvektor Z

1	1	2	2	1	1	1	0
---	---	---	---	---	---	---	---

Der Vektor Z sagt aus, dass in der LuT 2 Einflussnahmeparameter existieren (Index 3 und 4), mit denen beide betrachteten Belastungen reduziert werden können. Ebenfalls existieren 4 Parameter, mit denen nur eine Belastung, und 2 Parameter, mit denen keine Belastung reduziert wird. Im letzten Fall bleibt die Belastung gleich oder erhöht sich.

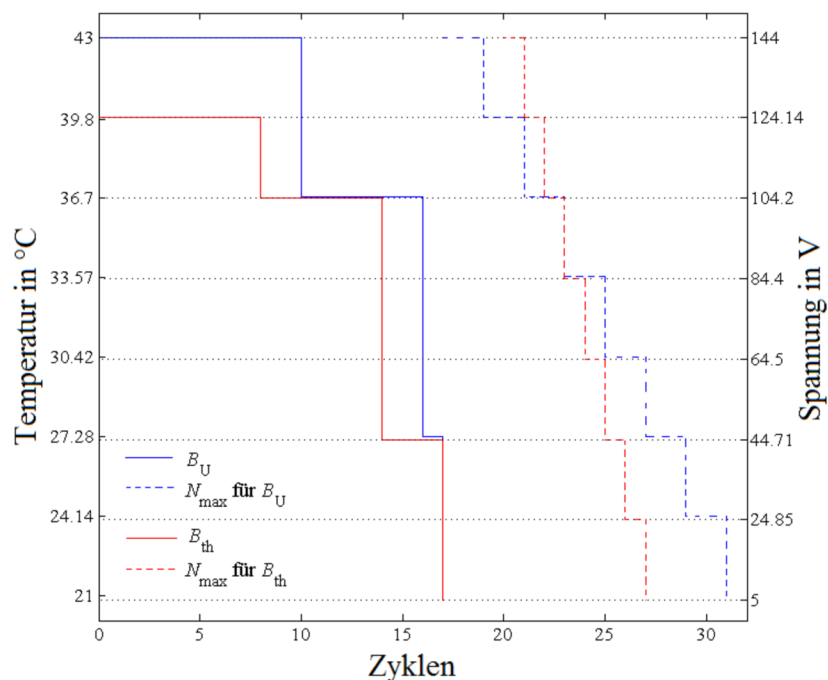


Abbildung 5.12: Beispielhafte akkumulierte Belastungen und N_{max} -Verläufe

B_U – Akkumulierte Spannungsbelastung

B_{th} – Akkumulierte thermische Belastung

Im Element „Klassenbildung und -wahl“ erfolgt durch den Vektor Z somit eine Priorisierung der Einflussnahmeparameter. Abbildung 5.12 zeigt die akkumulierten Belastungen der betrachteten Belastungen Temperatur, Spannung und deren N_{max} -Verläufe. Beide eintretenden Belastungsbereiche sind in 8 Klassen unterteilt.

Tabelle 5.9: Matrix N_m

7	20
9	13
5	6
7	7
8	8
10	7
12	8
14	9

Es wird in jedem Zyklus nach (5.11) die Matrix N_m ermittelt.

Durch die Bestimmung der Matrix N_m im Element „Speicherung und Akkumulation“ wurden 3 Einträge in Z ermittelt, dessen Werte der Anzahl der betrachteten Belastung entspricht. Daraus resultiert, dass das „Priorisierungsfilter“ nicht aktiviert und die LuT sowie der Vektor Z an das Element „Belastungsermittlung“ übergeben werden. Wie im Vektor Z erkennbar, siehe Tabelle 5.8, existieren in der LuT 3 geeignete Einflussnahmeparameter, mit denen eine Belastungsreduzierung aller betrachteten Belastungen erreicht werden kann. Für die Bestimmung des auszuwählenden Einflussnahmeparameters muss nach (5.12) die relative Belastung ermittelt werden.

Tabelle 5.10: Übersicht über die relativen Belastungen, ausgehend vom Vektor Z

Z	1	1	2	2	1	1	0	0
$B_{th(rel)}$			0,65	0,38				
$B_{U(rel)}$			0,051	0,094				
$B_{ges(rel)}$	x	x	0,701	0,474	x	x	x	x

Um die Tabelle 5.10 zu ermitteln, werden die Geradengleichungen aufgestellt.

Es ergeben sich die Gleichungen nach (5.16).

$$\begin{aligned}
 B_{th(rel)} &= \frac{1}{26}T - 0,65 \\
 B_{U(rel)} &= \frac{1}{139}U - 0,035
 \end{aligned}
 \tag{5.16}$$

Die geringste Gesamtbelastung in Tabelle 5.10 mit $B_{ges(rel)} = 0,474$ wurde in der LuT mit dem Index 4 berechnet. Es wird der Einflussnahmeparameter $f=400$ Hz aus der LuT, siehe Tabelle 5.6, ermittelt.

In jedem Zyklus wird der Zusammenhang (5.13) geprüft. Wird dieser im Laufe der Betriebszeit nicht mehr erfüllt, wird in Aufgabe 2 umgeschaltet und der rote Pfad in Abbildung 5.11 aktiviert. Dazu wird B_K nach (5.14) ermittelt. In der Matrix N_m ergibt sich ein Mindestabstand in den akkumulierten Temperaturwerten in der Klasse 6. Ab diesem Zeitpunkt werden im Temperaturverlauf nur noch Werte unterhalb von B_K angesteuert. Diese liegen im schraffierten Bereich, siehe Abbildung 3.3. Dazu werden in der Matrix A^* für die Temperatur alle Bereiche oberhalb von B_K gesperrt. In diesem Beispiel werden alle Einflussnahmeparameter, welche eine thermische Belastung $>36,7^\circ\text{C}$ erzeugen, vgl. Abbildung 5.12, in der LuT und dementsprechend auch in der Hilfsmatrix A^* gesperrt. In diesem Fall erfolgt keine Änderung der Matrix A^* . Nach der erneuten Anpassung der Matrix A^* wird der Vektor Z nach (5.10) gebildet. Es erfolgt daraufhin die Berechnung der relativen Belastung nach (5.12) und die Bestimmung der Gesamtbelastung. Im letzten Schritt wird der ausgewählte Einflussnahmeparameter an das Element „Ansteuerung“ übergeben.

6. Verfahrensverifizierung anhand der Beispielapplikation Schaltanordnung

In diesem Kapitel erfolgt die simulationsbasierte Verifizierung sowie die Untersuchung am Demonstrator. Ebenfalls erfolgt die Erstellung der Simulation, das Prüfkonzept und der Testaufbau vorgestellt. Anschließend wird ein Vergleich der Betriebsverhalten ohne und mit MPR mit Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse und der Messergebnisse des Demonstrators durchgeführt.

6.1 Testumgebung und klimatische Einflüsse

Für die zu untersuchende Schaltung kommt die Klimaklasse 3K3 und die Klimaklasse 3M1 für die mechanische Belastung aus [DKE92], [DKE04c] und [DKE04b] zum Einsatz. Die dabei auftretenden äußeren klimatischen Belastungen sind in Tabelle 6.1 dargestellt. Weiterhin wurde für die zu testende Baugruppe eine zu erreichende Lebensdauer von 14000 h festgelegt.

Tabelle 6.1: Auswahl an Spezifikationswerten der Klimaklasse 3K3 und 3M1 [DKE04]

Thermisch (10000 h)		Mechanisch (5000 h)	
Temperatur	Temperaturgradient	Bewegung	Stöße
5 °C bis 40 °C	0,5 °C/min	Amplitude: 0,3 mm Beschleunigung: 1,0 m/s ² Frequenzbereich: 9 Hz bis 200 Hz	40 m/s

Die Tabelle 6.1 zeigt thermische und mechanische Grenzwerte der Klimaklassen 3K3, 3M1. An diesen wird sich für die Generierung des Außenklimas für die Simulation und Messung am Demonstrator orientiert. Die vollständige Beschreibung der Klimaklassen 3K3 und 3M1 findet sich im Anhang A.2.

Um die auch bei gleichen Typen eines Bauelements auftretenden Unterschiede der maximal ertragbaren Belastungen nachzubilden, erhielt jede der Belastungen des Demonstrators und in der Simulation einen individuellen N_{\max} -Verlauf. Dazu wird den erstellten N_{\max} -Verläufen ein zufällig generierter und normal-verteilter Wert, welcher der Breite der Klassendifferenz entspricht, hinzuaddiert.

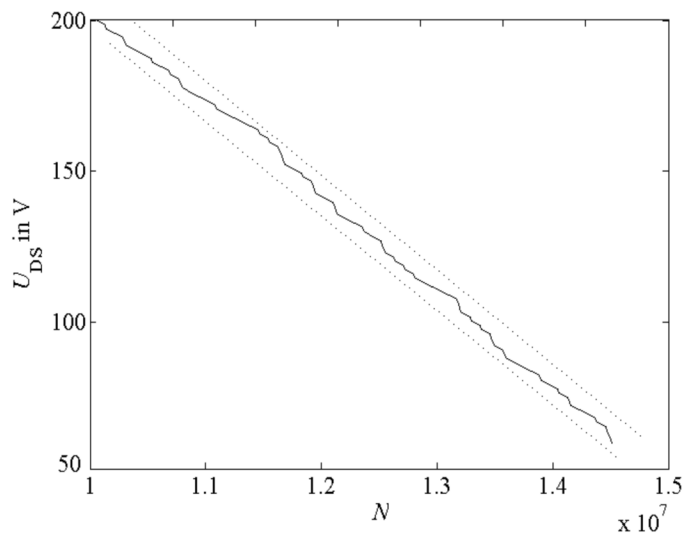


Abbildung 6.1: Darstellung der Variation des N_{\max} -Verlaufs

Abbildung 6.1 zeigt beispielhaft die Variation des N_{\max} -Verlaufs für die U_{DS} . Bei der Ermittlung der Einflussnahme auf die U_{DS} wurde innerhalb des Funktionskriteriums ein Spannungsbereich von 55 V–200 V ermittelt und für diesen Bereich ein N_{\max} -Verlauf erstellt.

6.2 Verifizierungsziel und -strategie

Das Ziel des Demonstrators und der Simulation ist, die Wirksamkeit des MPR und des BIV aufzuzeigen. Dazu werden variable Temperaturwechsel und mechanische Vibrationen für den Demonstrator und die Simulation erzeugt sowie die Reaktion des MPR und die entstehenden Belastungssenkungen aufgezeichnet. Es wurde für jeden Angehörigen der Simulations- und der Demonstratorstichprobe ein individuelles Umgebungsklima auf Basis Tabelle 6.1 generiert. Dazu wurde ein Tempera-

tur- und ein Schwingungsverlauf erstellt, welcher innerhalb der thermischen und mechanischen Werte aus Tabelle 6.1 liegt. Für die Länge der Verläufe wurde sich an den Werten der N_{\max} -Verläufe orientiert. Diese Klimate wurden gespeichert und für den Betrieb ohne und mit MPR eingesetzt. Ebenso erhielt jeder Angehörige der Stichprobe N_{\max} -Verläufe mit der in Abschnitt 6.1 beschriebenen Varianz.

Für den Vergleich der Simulations- und Demonstratorstichproben wurde zunächst der Betrieb ohne MPR aufgenommen. Die Messwerte dieses Betriebsmodus werden mit den Messwerten aus dem Betrieb mit MPR verglichen. Die konstante Ansteuerung wird nachfolgend mit $f_{\text{oMPR}}=400$ Hz, $Tv_{\text{oMPR}}=0,5$ und $SR_{\text{oMPR}}=53$ kV/s festgelegt und ebenfalls als Ausgangspunkt für jede Messung ausgewählt.

Für die Messwiederholung wurde eine Taktung von 5 Sekunden gewählt. Dazu wurde sich am Temperaturgradienten in Tabelle 6.1 orientiert. Es ergibt sich bei $0,5^{\circ}\text{C}$ eine Temperaturänderung pro Zyklus von maximal $0,0417^{\circ}\text{C}$. Durch die Wahl der Messzeit von 10 ms mit einer Samplerate von 21000 S/div wird eine ausreichend genaue Abtastung des Frequenzbereichs der mechanischen Schwingung erreicht. Somit ist eine ausreichende Genauigkeit in der Erfassung der klimatischen Situationen möglich. Nach der in Abschnitt 6.1 festgelegten Lebensdauer der Schaltung ergibt sich für die genutzten N_{\max} -Verläufe eine Zyklenzahl von rund 10 Millionen Zyklen. Für die gewählte Mess- und Simulationsdauer ergibt sich eine ausreichende Reaktionsaufzeichnung in Aufgabe 1 und Aufgabe 2. Die gleichfalls geringe Klassendifferenz ist ebenfalls für die Abarbeitung der Aufgabe 2 ausreichend. Um einen ausreichenden Abstand zum Ausfallzeitpunkt zu erreichen, wurde das Simulationsende ab Kontaktierung eines N_{\max} -Verlaufs nochmals um 100 Zyklen verzögert. Aufgrund der Betrachtung von mehreren Belastungen wird davon ausgegangen, dass eine Kontaktierung eines N_{\max} -Verlaufs, unabhängig in welcher Belastung, eine Zerstörung der Baugruppe zur Folge hat. Die Zeitpunkte aller Kontaktierungen werden ebenfalls in der folgenden Messung gespeichert.

6.3 Quantifizierung der Referenzgrößen der Belastung

Bisher wurde angenommen, dass das erstmalige Erreichen der BTE-Werte eine Zerstörung des Bauteils zur Folge hat. Die vorliegende Untersuchung der Ausfälle am BTE_{\max} -Punkt gibt Aufschluss über die Beurteilung des Absolute-Maximum Rating-Werts. Ebenfalls ist dadurch ein Vertrauensbereich bezüglich der Zyklen um den Punkt P_1 , siehe Abschnitt 4.3, bestimmbar. Ziel der Messung ist die Erfassung des Zusammenhangs zwischen der Temperatur und der Ausfallzeit oberhalb der im Datenblatt angegebenen Sperrschichttemperatur von $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der zu erwartende Verlauf wird durch eine kubische Interpolation, siehe Abbildung 6.7, aus mehreren zu messenden Stützstellen ermittelt. Daraus sind die Temperaturbereiche bis in den eingesetzten klimatischen Bereich hinein bestimmbar. Nachfolgend wird die empirische Bestimmung des thermischen N_{\max} -Verlaufs beschrieben.

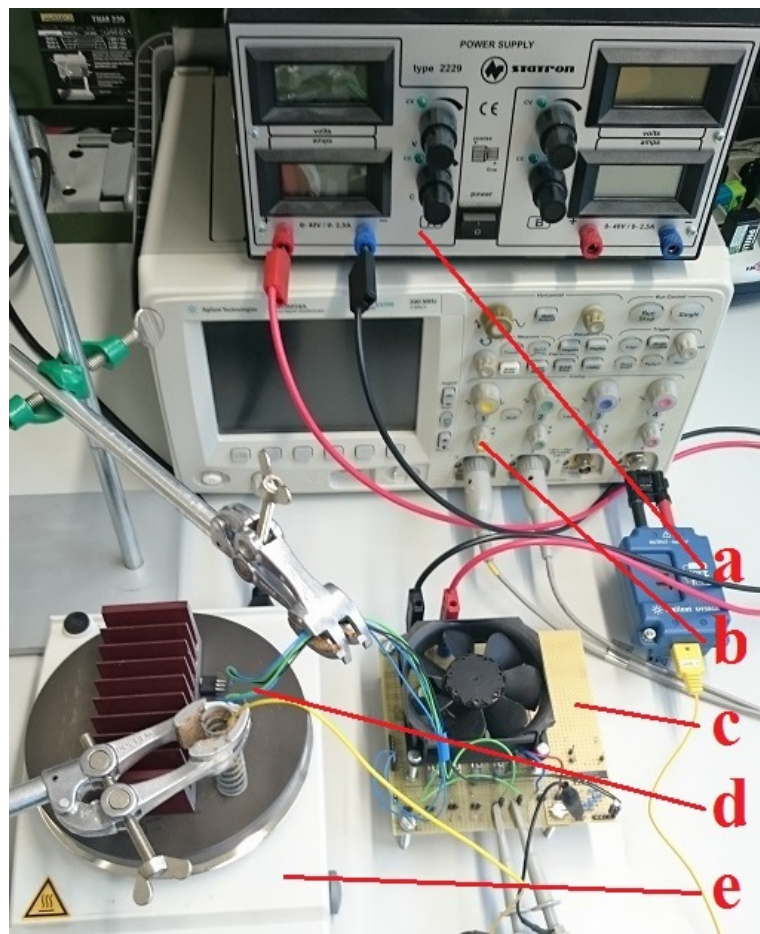


Abbildung 6.2: Darstellung der Messschaltung zur Erfassung des thermischen N_{\max} -Verlaufs

- a – Stromversorgung
- b – Oszilloskop zur Aufzeichnung der Spannungsverläufe
- c – Ansteuerplatine zur Erzeugung der U_{GS}
- d – Transistor als Testobjekt
- e – Heizelement zur Erwärmung der Transistoren

Der komplette Aufbau mit allen notwendigen Komponenten ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

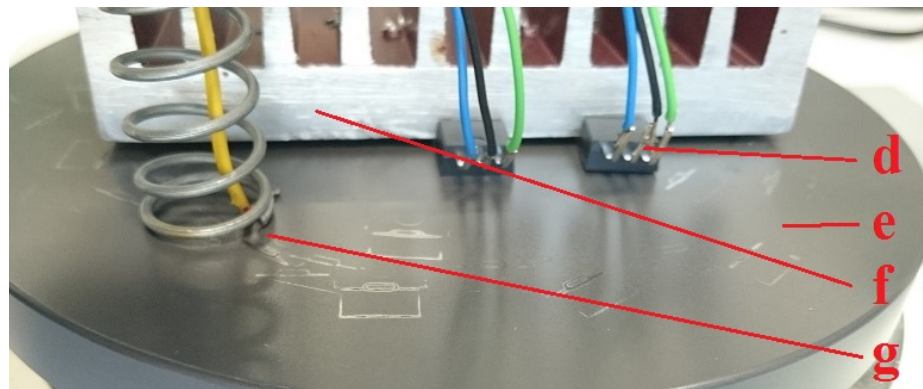


Abbildung 6.3: Detailansicht der Transistorbefestigung, der Temperaturmessung und der Heizung des Transistors

- d – Transistor als Testobjekt
- e – Heizelement zur Erwärmung der Transistoren
- f – Befestigung der Transistoren auf dem Heizelement
- g – Thermoelement inklusive Kontaktierung auf dem Heizelement

Die Abbildung 6.3 zeigt die Detailansicht der thermischen Beaufschlagung der Transistoren. Diese sind mittels Pressung auf dem Heizelement aufgebracht. Die Temperaturbestimmung erfolgt durch ein Thermoelement, welches durch Federkraft auf der Heizplatte kontaktiert ist.

Die thermische Beaufschlagung erfolgte im Bereich 200 °C bis 320 °C durch eine Heizplatte vom Typ Heidolph MR Hei Standard 825 W. Das Gerät regelt innerhalb des genutzten Temperaturbereichs die Temperatur mit einer Abweichung von ca. +/-2 K. Zur genaueren Temperaturermittlung wurde ein Thermoelement einge-

setzt. Zum Konstanthalten der Umgebungstemperatur erfolgte der Betrieb des Messaufbaus in einem Klimaschrank vom Typ Weiss TK140.

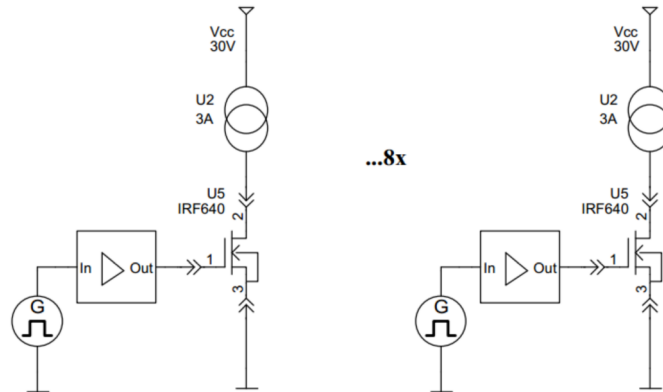


Abbildung 6.4: Messschaltung für die Ermittlung des thermischen N_{\max} -Verlauf

Abbildung 6.4 zeigt einen Teil der Testschaltung für die Erfassung des thermischen N_{\max} -Verlaufs. Um die Messung zu beschleunigen und um eine größere Stichprobe zu erhalten, wurden acht Transistoren gleichzeitig erhitzt und bestrahlt.

Der Schaltung werden die Einflussnahmeparameter $f_{\text{oMPR}} = 400 \text{ Hz}$, $Tv_{\text{oMPR}} = 0,5$ und $SR_{\text{oMPR}} = 53 \text{ kV/s}$ des Betriebs ohne MPR zugeführt. Gleichzeitig wurde darauf geachtet, weitere Stressfaktoren, wie mechanische Vibrationen, zu eliminieren. Um auch die Außentemperatur stabil zu halten, wurde die Messschaltung in einen Klimaschrank eingebracht und die Umgebungstemperatur auf $20 \text{ }^\circ\text{C}$ konstant gehalten. Ferner wurden bei der Durchführung der Messung gleichmäßige Startbedingungen gewährleistet, indem die Bauteile bereits beim Aufwärmen der Heizquelle mit erwärmt wurden.

Die von einem Generator erzeugte Rechteckschwingung von 400 Hz steuert über einen Treiber den Transistor an. Der $I_{\text{D on}}$ wird durch eine Stromquelle auf 3 A festgelegt. Im Betrieb der Schaltung wird permanent der Verlauf der $U_{\text{DS}}(t)$ gemessen und an den PC zur Auswertung übermittelt. In der Analysesoftware wurde

aus der $U_{DS}(t)$ je Messdurchlauf der Spannungswert $U_{DS\text{ off}}$ des ausgeschalteten Transistors gefiltert.

In einem Vorversuch wurden Merkmale ermittelt, an denen ein drohender Ausfall des Transistors anhand der U_{DS} identifiziert werden kann. Wie der zeitliche Verlauf in Abbildung 6.5 beschreibt, deutet sich ein Ausfall durch eine Senkung der $U_{DS\text{ off}}$ an. Ebenfalls zeigt Abbildung 6.5 den Zusammenhang der $U_{DS\text{ off}}$ und der Temperatur des Halbleiters als Beispiel im Bereich $t_c \leq t \leq t_d$.

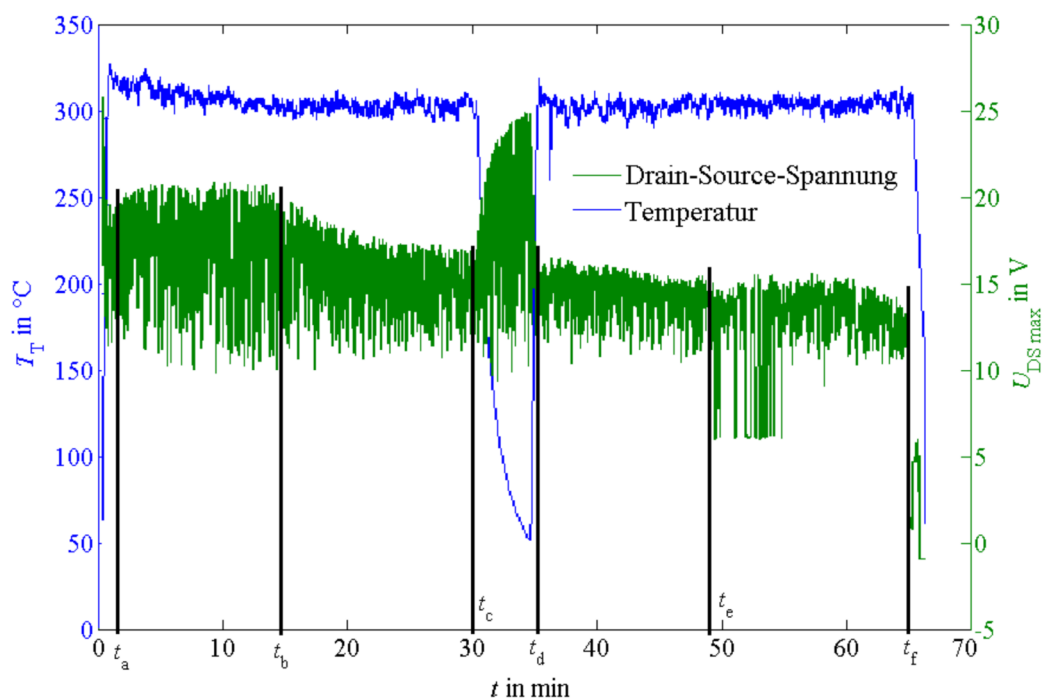


Abbildung 6.5: Zeitlicher Verlauf der U_{DS} bei Beaufschlagung mit $320\text{ }^{\circ}\text{C}$

Da nach [Fre10] eine Streuung der Messwerte zu erwarten ist, wurde im Bereich von $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Abstand von ca. 20 K ein Stichprobenumfang von 20 Transistoren eingesetzt. Durch die sich ergebende Korrelation zwischen Lebensdauer und Temperatur ist durch Interpolation zwischen den Stützpunkten die Funktion bestimmt worden. Nach der Zerstörung eines Transistors wurde dieser entfernt und der Messplatz mit einem neuen Transistor bestückt.

Abbildung 6.5 beschreibt den sich einstellenden Fehler anhand der U_{DS} in mehreren markanten Punkten. Bis zum Zeitpunkt t_a erfolgt die Erwärmung des Transis-

tors. Im Bereich $t_a \leq t \leq t_b$ stellt sich ein konstanter Verlauf der $U_{DS\text{ off}}$, der mit einer Messung an einem weniger thermisch belasteten Transistor bei 20 °C identisch ist, ein. Die Funktion kann für diesen Zeitbereich als fehlerfrei beschrieben werden. Erst ab dem Zeitpunkt t_b stellt sich eine Veränderung der Funktion des Transistors ein, die mit Ausbildung des Fehlers zum Zeitpunkt t_e endet. Als Ursachen für die in diesem Bereich erkennbare stetige Senkung der Spannung sind die Veränderungen des Drain-Source-Widerstandes, die Änderung der Ausgangskapazität C_{oss} oder die Änderung der parasitären Source-Induktivität des Transistors zu nennen [Zhe13]. Die sich ab dem Zeitpunkt t_b einstellende Funktionsveränderung ist irreversibel. Dies zeigt der Bereich $t_c \leq t \leq t_d$, bei dem die Temperatur des Transistors testweise auf 50 °C gesenkt und erneut auf 320 °C angehoben wurde. Nach dem erneuten Erreichen der Stresstemperatur zum Zeitpunkt t_d folgt der Verlauf der Spannung dem vorhergehenden Verlauf ab Zeitpunkt t_c bis zum Zeitpunkt t_f . Ab diesem Zeitpunkt erfolgt die dauerhafte Nichterfüllung der Funktion und der Transistor ist zerstört. Dennoch ist ein erstmaliges Auftreten dieses Fehlers bereits zum Zeitpunkt t_e ersichtlich. Es wird das erstmalige Eintreten dieses Fehlers als Zerstörungszeitpunkt des Transistors definiert. Im direkten Vergleich des Verlaufs in Abbildung 6.5 mit Verläufen bei niedrigeren Temperaturen ist eine Verlängerung der Zeiträume $t_a \leq t \leq t_b$ und $t_b \leq t \leq t_f$ zu verzeichnen. Des Weiteren ist die Senkung der Spannung im Bereich $t_b \leq t \leq t_f$ gleich. Nach der Zerstörung konnten mittels Widerstandsmessung Kurzschlüsse in der Gate-Source-Strecke sowie in der Drain-Source-Strecke festgestellt werden.

Abbildung 6.6 zeigt den erfassten Zusammenhang der Transistortemperatur T_T zur Ausfallzeit t_B der 140 Stichproben im Temperaturbereich von 140 °C bis 320 °C. Im Anhang A.3 ist die Tabelle der Ausfallzeiten dargestellt. Für die Regressionsgerade wurde nach [DKE96] und [Dro06] ein exponentieller Zusammenhang, wie in (6.1) dargestellt, genutzt.

$$t_B = a_n \cdot e^{b_n \cdot T} \text{ mit } a = 2898987,84; b = -0,028 \quad (6.1)$$

t_B – Lebensdauer zu einer bestimmten Temperatur

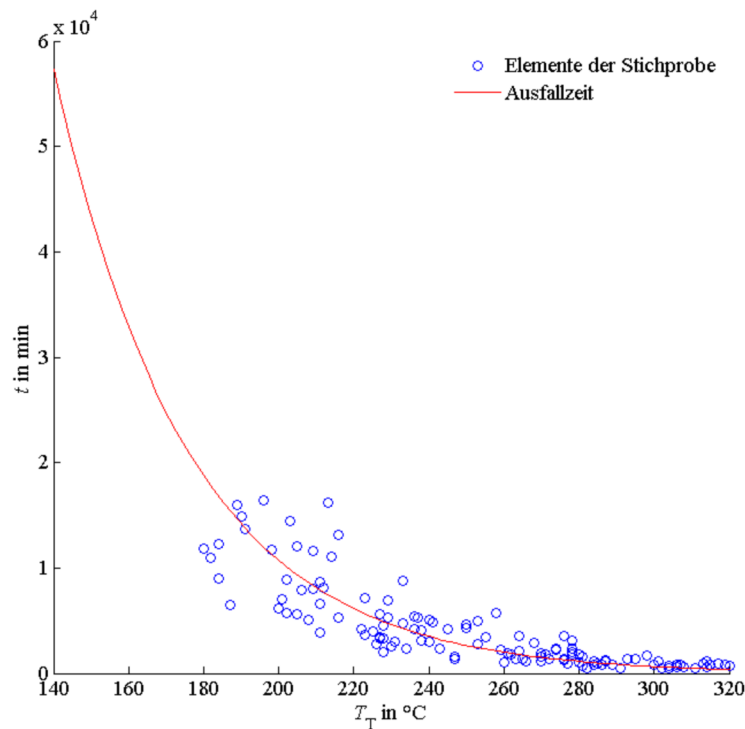


Abbildung 6.6: Resultierende Lebensdauer des Transistors bei unterschiedlichen Temperaturen

Abbildung 6.7 zeigt einen Ausschnitt des Verlaufs aus Abbildung 6.6. Die Schätzung der Lebensdauer bei 150 °C muss noch durch eine Angabe des Vertrauensbereiches ergänzt werden. Dazu wird angenommen, dass sich die Verteilung der Lebensdauer bei 150 °C identisch zu den aufgenommenen Betriebszeiten einstellt. Somit sind durch die blauen und braunen Verläufe aus Abbildung 6.7 die Grenzen der Ausfallwahrscheinlichkeit für 150 °C bestimmbar. Es ergibt sich nach Gleichung (6.1) für eine Sperrschichttemperatur von 150 °C eine Lebensdauer von 25 Tagen, +/- 5 Tage. Insofern bildet der Punkt P_1 , siehe Abschnitt 4.3, keinen Schnittpunkt mit der Y-Achse. Die Annahme für den Zyklenwert des Punkts P_1 muss aktualisiert werden.

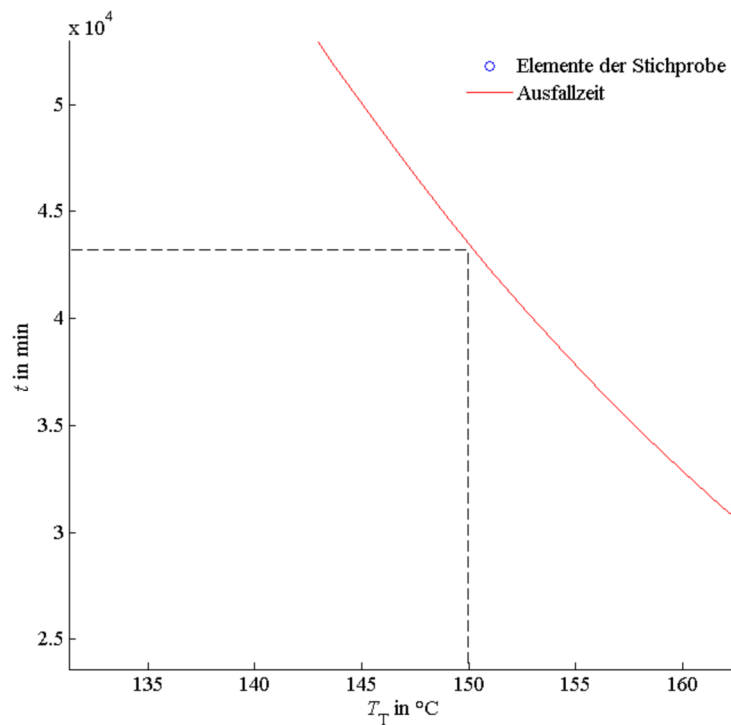


Abbildung 6.7: Ausschnitt aus Abbildung 6.6 zur Bestimmung der Lebensdauer bei 150°C

Die Aussage muss dahingehend weiter erklärt werden, dass die Hersteller elektronischer Bauteile in der Angabe „Absolute Maximum Ratings“ Grenzwerte ihrer Bauteile spezifizieren und innerhalb derer die Funktion garantieren. Durch das Überschreiten der „Absolute Maximum Ratings“ erfolgt nicht zwingend die sofortige Zerstörung eines Bauteils.

Werden die Minimal- und Maximalverläufe durch die Gleichung (6.1) bestimmt sowie die in Abschnitt 4.3 und Kapitel 5 angegebenen Betriebsdaten für den Betrieb ohne MPR einbezogen, ergibt sich, dass im Temperaturbereich von 5°C bis 40°C keine relevanten Auswirkungen auf den N_{\max} -Verlauf entstehen. Daher ist die Betrachtung des Mittelwertes ausreichend. Ferner ist speziell der Minimalverlauf (blauer Verlauf in Abbildung 6.7) für die Bildung des Sicherheitsabstandes t_x , siehe Abschnitt 3.3, einsetzbar.

6.4 Modellierung der Baugruppe mit implementiertem Verfahren und simulationsgestützte Untersuchung

Mittels des Modells wird die Betriebsweise des MPR an der Demonstratorschaltung in einem zeitlichen Ablauf simuliert. Als Startbedingung jedes Simulationdurchganges werden die Einflussnahmeparameter $f_{\text{oMPR}}=400\text{ Hz}$, $Tv_{\text{oMPR}}=0,5$ und $SR_{\text{oMPR}}=53\text{ kV/s}$ des Betriebs ohne MPR gesetzt. Ebenfalls erhält jeder Simulationdurchgang ein individuelles, nach Kapitel 6 beschriebenes Außenklima. Abbildung 6.8 zeigt eine Übersicht über die Bestandteile des Modells und den softwareseitigen, mit verschiedenen Tools umgesetzten internen Informationsfluss.

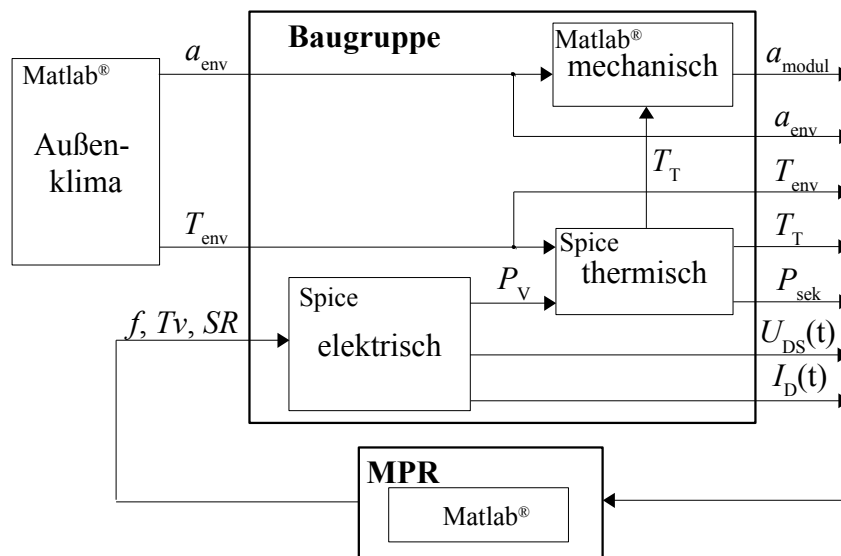


Abbildung 6.8: Simulationsmodell

- U_{DS} – Drain-Source-Spannung
- I_{D} – Drainstrom
- P_{sek} – Sekundäre Leistung
- P_{V} – Verlustleistung des Transistors
- T_{T} – Transistortemperatur
- T_{env} – Temperatur des Außenklimas
- a_{modul} – auf der Baugruppe erzeugte mechanische Belastung
- a_{env} – von außen einwirkende, mechanische Belastung (Beschleunigung)
- f – Frequenz
- Tv – Tastverhältnis
- SR – Slewrate

Für die thermischen und elektrischen Elemente wurde eine Spice-Simulation genutzt. Deren Vorteil liegt in der einfachen Beschreibung der BG und dessen Bauteile durch eine Netzliste. Die Übergabe zwischen den Matlab[®]- und Spice-Elementen erfolgt durch eine spezielle Textdatei, in der die Spice-Elemente ihre Konfiguration beschreiben. Matlab[®] erhält die mittels Spice generierten Daten über ein eigenes Raw-Format. Um die Daten nutzen zu können, wird zusätzlich ein Konverter eingesetzt.

Die interne Übergabe der Daten in Matlab[®], z. B. der Beeinflussungsparameter des MPR an die simulierte BG, erfolgt bei jedem Funktionsaufruf.

Neben der Verlustleistung des Transistors werden alle in der Schaltung des Demonstrators (siehe Abbildung 6.14) entstehenden Ströme und Spannungen entnommen. Dazu wird über Matlab[®] die Netzliste der thermischen Simulation mit dem aktuellen Wert der Außentemperatur aktualisiert. Die Außentemperatur wird geprüft und beim Überschreiten eines voreingestellten Wertes wird die mechanische Vibration generiert. Die Nachbildung des Lüfters erfolgt durch ein Sinussignal mit fester Amplitude und Frequenz.

Die Simulation wird zyklisch abgearbeitet und nach 100 weiteren Zyklen ab der Kontaktierung des N_{\max} -Verlaufs beendet. Es erfolgt ein Neustart der Simulation, bis alle Angehörigen der Stichprobe abgearbeitet sind. Somit erfolgt eine sequentielle Abarbeitung der gesamten Stichprobe.

6.5 Analyse und Auswertung der Simulationsdaten

6.5.1 Belastungsreduzierung im Vergleich zum Betrieb ohne Multiparameterregler

Für die Bestimmung der Belastungsreduzierung werden die Daten des Betriebsmodus ohne MPR herangezogen und mit den Daten des Betriebs mit MPR verglichen. Für den Vergleich wird angenommen, dass die im Betrieb ohne MPR einwirkenden Belastungen 100 % entsprechen.

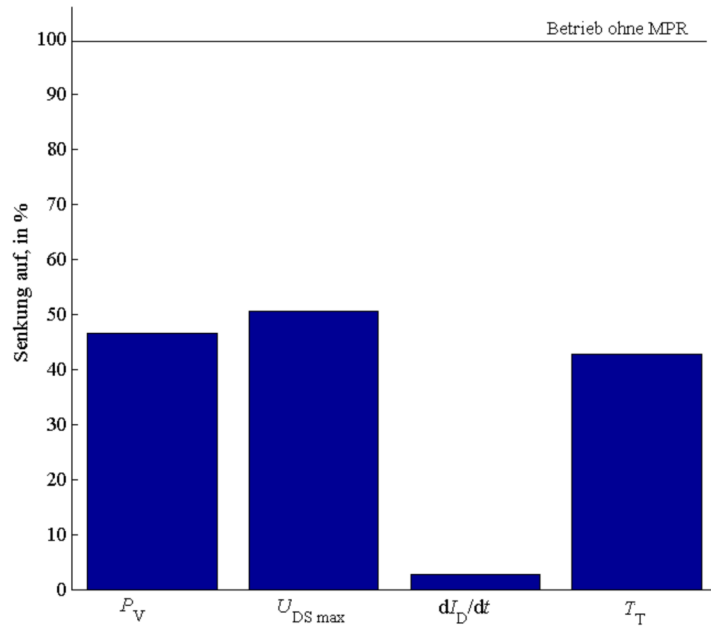


Abbildung 6.9: Erreichte Belastungssenkung in der Simulation

Abbildung 6.9 zeigt die durchschnittlich erreichte Reduzierung der betrachteten Belastungen im Vergleich zum Betrieb ohne MPR. Mit Ausnahme der Belastungen durch die Stromgradienten mit einer Reduzierung auf 5 % wurde bei den restlichen Größen eine Belastungsreduzierung von ca. 50 % erreicht. Ergänzend zur Darstellung der am Transistor erreichten Belastungssenkung sind im Anhang A.5

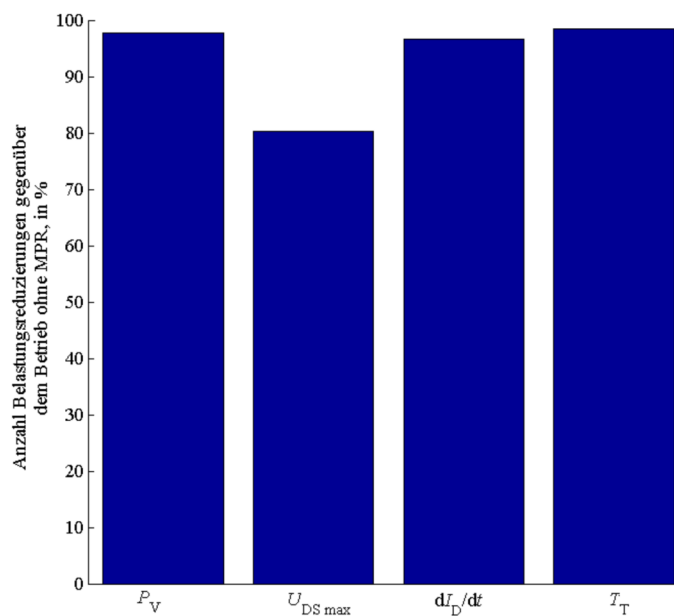


Abbildung 6.10: Menge der erreichten Belastungssenkungen in der Simulation

in den Abbildungen A5.1 bis A5.6 die Belastungsreduzierungen an den restlichen Bauteilen des simulierten Demonstrators dargestellt. Des Weiteren stellen die genannten Abbildungen auch die Belastungen im Betrieb ohne MPR dar.

Abbildung 6.10 listet die Menge an Zyklen auf, bei denen eine geringere Belastung als im Betrieb ohne MPR erreicht wurde. Bezogen auf die gesamten Messzyklen eines Simulationsdurchganges wurden ca. 95 % geringere Belastungen gemessen und dazu vom MPR eine Eingriffsmenge von 3 % der gesamten Messzyklen aufgewendet. Eine weitere Folge ist die Reduzierung der mechanischen Belastung aufgrund der Reduzierung der Lüftereinsatzzeit um 43 %.

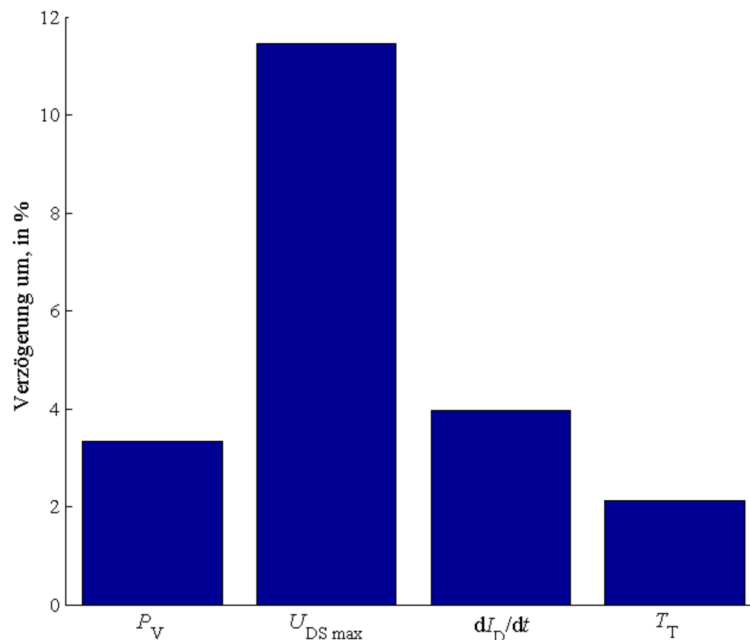


Abbildung 6.11: Erreichte Verzögerung der N_{\max} -Kontaktierung in der Simulation

Aus den in Abbildung 6.9 dargestellten erreichten Belastungsreduzierungen folgt eine Verzögerung des Kontaktierungszeitpunkts gegenüber dem Betrieb ohne MPR. In Bezug auf den N_{\max} -Verlauf (vgl. Abbildung 3.3) resultiert daraus eine Verlängerung der Lebensdauer. Abbildung 6.11 stellt die prozentuale Verzögerung der Kontaktierung der N_{\max} -Verläufe der betrachteten Belastungen dar.

6.5.2 Erreichte Lebensdauererlängerung in der Simulation

Die Simulation verdeutlicht durch den Einsatz des MPR eine Verlängerung der Lebensdauer.

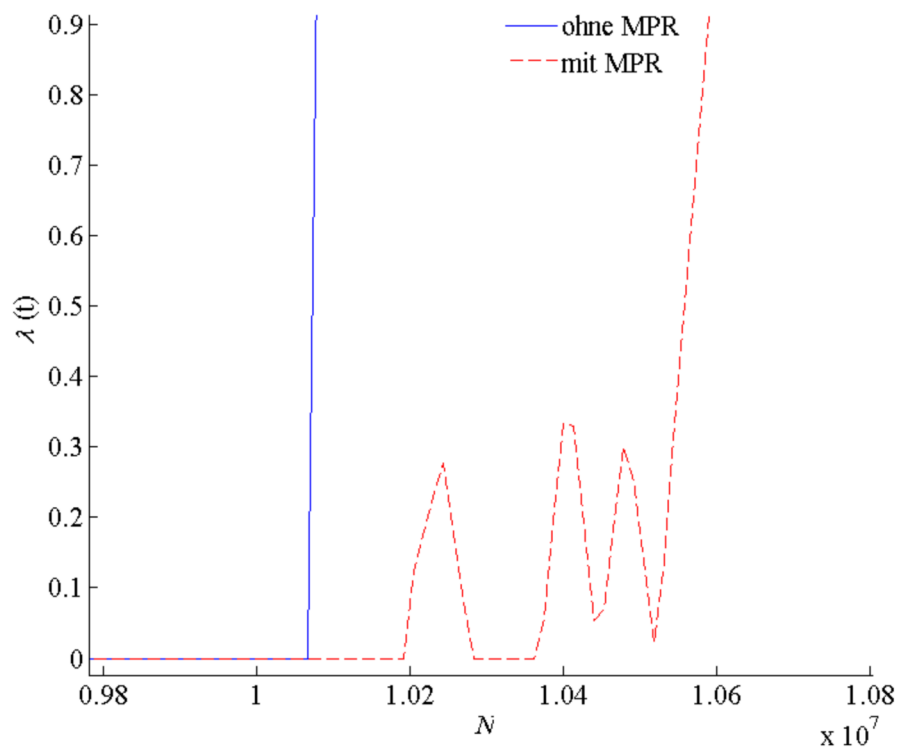


Abbildung 6.12: Gegenüberstellung der Spätausfallraten der Betriebsmodi mit und ohne MPR in der Simulation

In Abbildung 6.12 wird die Ausfallrate der gesamten simulierten Stichprobe im Vergleich zum Betrieb ohne MPR dargestellt. Die gesamte Stichprobe fällt innerhalb von ca. 19000 Zyklen (27 h) aus. Als Grund für die geringe Zyklenzahl ist zum einen die in Abschnitt 6.1 beschriebene Varianz der N_{\max} -Verläufe und zum anderen das erstellte Außenklima zu nennen. Der Spätausfallphase beginnt verzögert um ca. 120000 Zyklen (167 h) und verläuft deutlich verzögert innerhalb von ca. 400000 Zyklen (555 h). Somit wurde eine Verlängerung der Spätausfallphase um das 20-fache erreicht. Ebenfalls zeigt die verzögerte Spätausfallrate mehrere lokale Maxima. Dies lässt nach (2.6) auf einen gruppenweisen Ausfall der Elemente der Stichprobe schließen. Die Ursache dafür liegt in der geringen Wechselhaftigkeit des Außenklimas, wodurch der MPR nur eine geringe Senkung der Be-

lastung erreicht. Ebenfalls ergibt sich durch gleiche Außenklimate eine ähnliche Auswahl an Beeinflussungsparametern durch den MPR, woraus sich wiederum über die Lebensdauer nahezu gleiche Belastungswerte ergeben.

6.5.3 Arbeitsweise des Multiparameterreglers in der Simulation

Die Arbeitsweise der MPR in der Simulation wird nachfolgend anhand der Menge an Optimierungsmöglichkeiten, welche der MPR je Zyklus ermittelt, dargestellt. Dazu werden die unterschiedlichen Optimierungsklassen (OK) aus dem Element „Klassenwahl“ des Algorithmus des BIV herangezogen, siehe Abschnitt 5.5. Die OK stellen jeweils eine Menge an gleichzeitig reduzierbaren Belastungen dar.

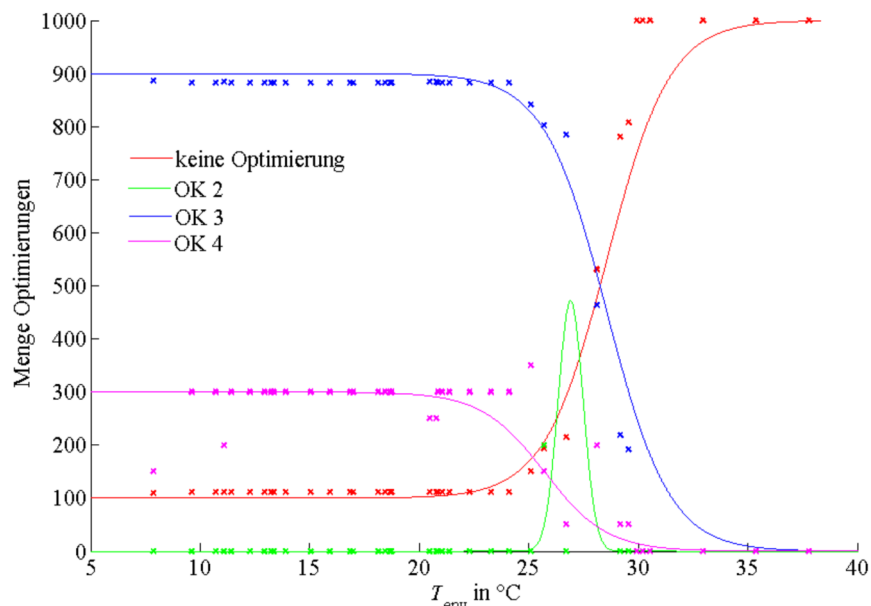


Abbildung 6.13: Arbeitsweise des BIV in Abhängigkeit von der Außentemperatur in der

- Keine Optimierung – Es wird keine Belastungsreduzierung erreicht
- OK 2 – Optimierungsklasse 2
- OK 3 – Optimierungsklasse 3
- OK 4 – Optimierungsklasse 4

Abbildung 6.13 stellt die Arbeitsweise des MPR anhand einer Menge an möglichen Optimierungen in Abhängigkeit vom Außenklima dar. Die Menge an Opti-

mierungen beschreibt die Anzahl der in der LuT verfügbaren Menge an Ansteuerungen, welche eine geringere Belastung als die aktuell anliegende Belastung ergibt. Es ist ein klarer Zusammenhang zwischen steigender Außentemperatur und Anzahl der Optimierungen zu erkennen. Gleichmaßen ist ein sprunghafter Wechsel in der Einsatzfähigkeit des MPR zwischen 25 °C und 30 °C zu erkennen. Grund dafür ist die Verteilung der Beeinflussungsparameter und deren Auswahl aus der LuT.

6.6 Aufbau des Demonstrators

Der Demonstrator wurde in klassischer THD-Technik auf zweilagigem FR4-Material aufgebaut. Weiterhin wurde die Schaltung um Anschlussmöglichkeiten für die Diagnose erweitert.

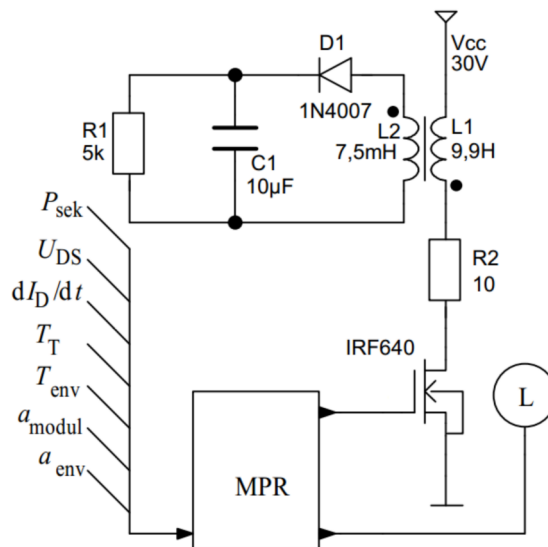


Abbildung 6.14: Dimensionierte Schaltung des Demonstrators

Die vollständig dimensionierte Schaltung ist in Abbildung 6.14 dargestellt. Durch den Widerstand R_2 wird der maximale Drainstrom auf 3,0 A festgelegt. Als Funktionskriterium wird die an R_1 entstehende Leistung ausgewählt und für den Bereich von 4 mW bis 6,3 W definiert. Der Einsatzpunkt des Lüfters ist für eine

Außentemperatur $\geq 30^\circ\text{C}$ oder beim Erreichen der Gehäusetemperatur des Transistors von 42°C festgelegt. Die Ansteuerung im Betrieb ohne MPR erfolgt mit den Einflussnahmeparametern $f_{\text{omPR}} = 400\text{ Hz}$, $Tv_{\text{omPR}} = 0,5$ und $SR_{\text{omPR}} = 53\text{ kV/s}$. Zum Vergleich der Einsatzfähigkeit des MPR wird die Baugruppe zunächst im Betrieb ohne MPR betrieben und die entstehenden Belastungen als Referenz zur Beurteilung des Eingriffs ermittelt. Für die variable Arbeitsweise im Betrieb mit MPR wird die im Abschnitt 5.4 erstellte Einflussnahme eingesetzt.

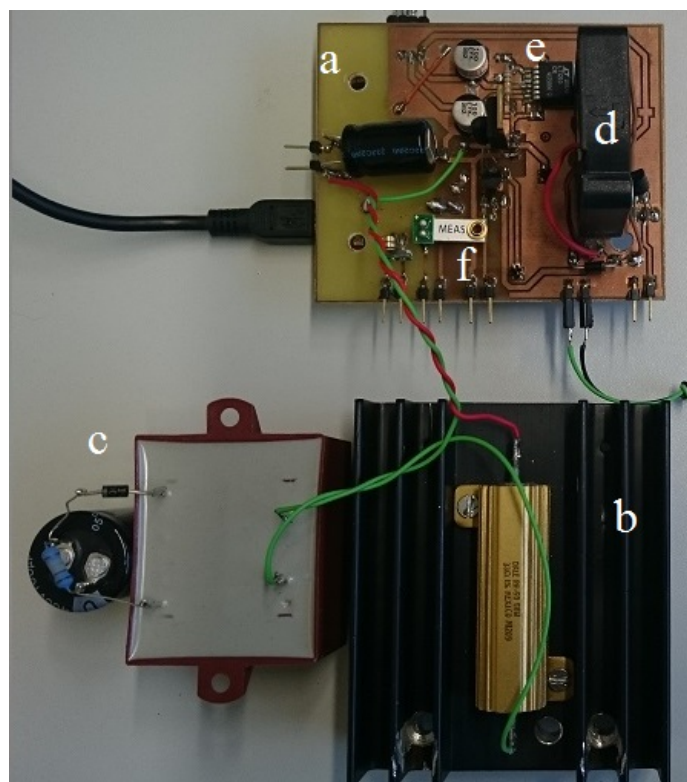


Abbildung 6.15: Bestandteile des Demonstrators

Abbildung 6.15 zeigt die Bestandteile des Demonstrators. Zu diesen gehören die Leiterplatte mit der Schalteranordnung (a), der auf einem Kühlkörper platzierte Widerstand R_2 (b) zur Begrenzung des I_D , der vergossene Transformator samt sekundärer Gleichrichtung mit Lastwiderstand (c), der Lüfter (d), der Schaltkreis zur erweiterten Ansteuerung des Transistors durch den MPR (e) und die erforderlichen Sensoren (f). Weiterhin sind die Kabel für Stromversorgung und Datenkommunikation zu erkennen.

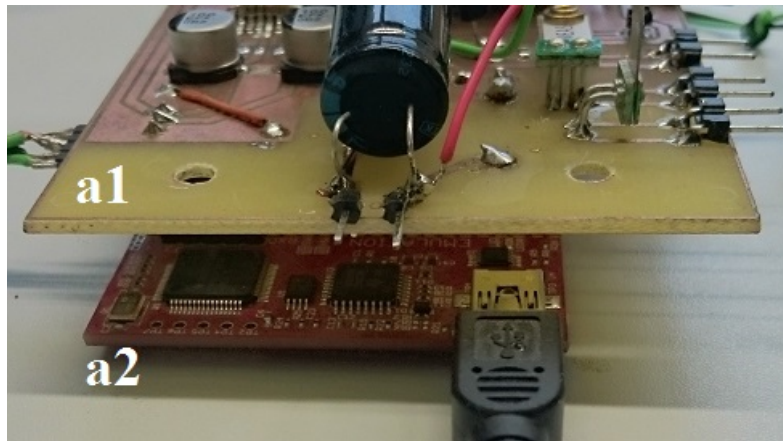


Abbildung 6.16: Detaildarstellung des Demonstrators mit kontaktierter MPR-Platine

Die in Abbildung 6.16 dargestellte Detailansicht zeigt die Kontaktierung und Platzierung der Controllerplatine zur Aufnahme des MPR. Die zusätzliche Platine (a2) nimmt den μC auf, in dem als Software das BIV implementiert ist. Die Platine (a1) ist mit der Platine (a2) über einen 20-poligen Steckverbinder verbunden.

6.7 Analyse und Auswertung der Messdaten

Die Arbeitsweise des MPR in der Simulation und am Demonstrator wird nachfolgend gegenübergestellt. Die Untersuchungen mit Demonstrator und Simulation beziehen sich auf dieselben Größen und haben dieselben Untersuchungsziele. Um den Demonstrator mit den gleichen klimatischen Belastungen zu beaufschlagen, wurde im Vorfeld aus den Schwingungs- und Temperaturverläufen, siehe Abschnitt 6.1, eine Konfigurationsdatei für den Klimaschrank erstellt.

6.7.1 Belastungsreduzierung im Vergleich zum Betrieb ohne Multiparameterregler

In Abbildung 6.17 sind die entstehenden Belastungsreduzierungen des Demonstrators vergleichend zum Betrieb ohne MPR dargestellt. In den folgenden Abbildungen sind die jeweiligen Ergebnisse der Simulation (grau) hinterlegt. Es ergibt

sich am Demonstrator eine vergleichbare Eingriffsmenge in der Größenordnung wie bei der Simulation. Abgesehen von der Verlustleistung des Transistors und den Stromgradienten zeigt sich am Demonstrator eine stärkere Reduzierung der Belastung im Gegensatz zur Simulation.

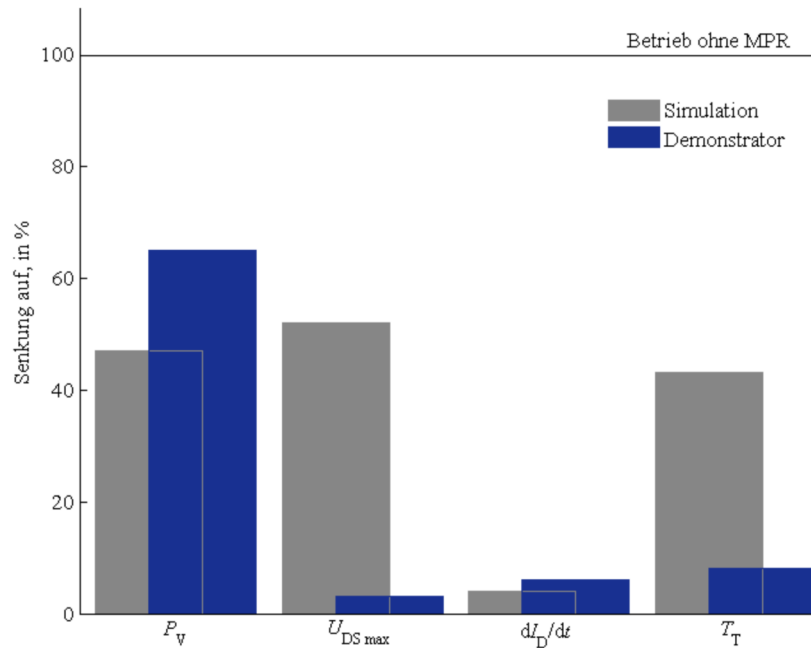


Abbildung 6.17: Erreichte Belastungssenkung am Demonstrator

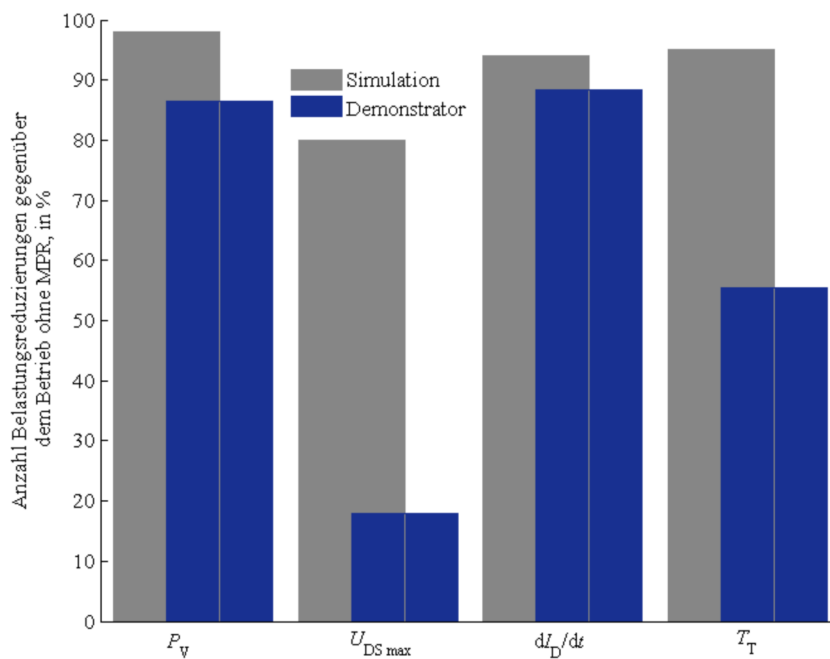


Abbildung 6.18: Menge der erreichten Belastungssenkungen am Demonstrator

In der Abbildung 6.18 ist die Menge der Belastungsreduzierungen, die gegenüber dem Betrieb ohne MPR erreicht wurde, dargestellt. Es stellen sich zur Simulation abgesehen von U_{DS} und T_T vergleichbare Werte ein. Die Lüftereinsatzzeit wurde durchschnittlich um 28 % des Betriebs ohne MPR gesenkt.

Abbildung 6.19 stellt die am Demonstrator erreichten Verzögerungen der betrachteten Belastungen dar. Ein deutlicher Unterschied ist in der erreichten Verzögerung der $U_{DS\max}$ am Demonstrator $< 1\%$ gegenüber der in der Simulation mit 12 % zu verzeichnen. Ein weiterer Unterschied ist in der P_V zu sehen; hier konnte gegenüber der Simulation eine Verzögerung um 12 % erreicht werden.

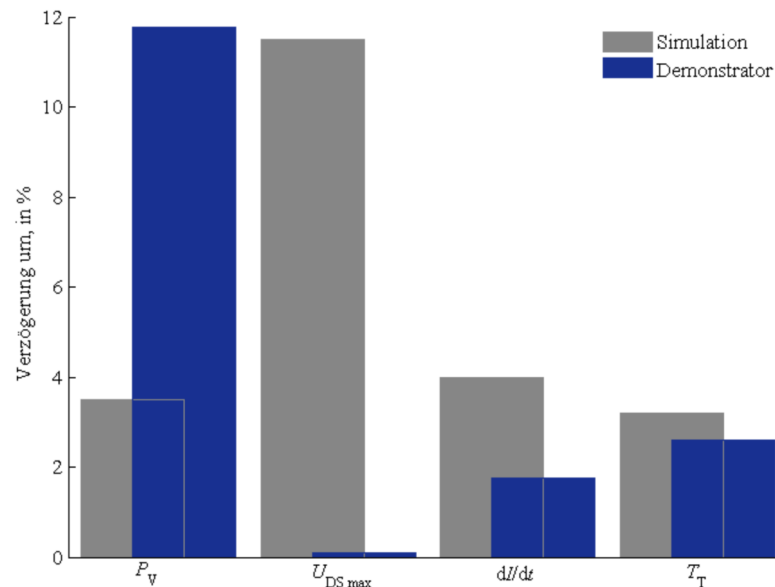


Abbildung 6.19: Erreichte Verzögerung des N_{\max} -Kontakts am Demonstrator

6.7.2 Erreichte Lebensdauererlängerung am Demonstrator

Auch am Demonstrator gelingt dem MPR durch Reduzierung anliegender Belastungen die Verzögerung der Spätausfallphase und damit eine Lebensdauererlängerung. Im Vergleich zum Verlauf der Ausfallrate in der Simulation ergibt sich ein, durch weniger lokale Maxima ausgeprägter Verlauf.

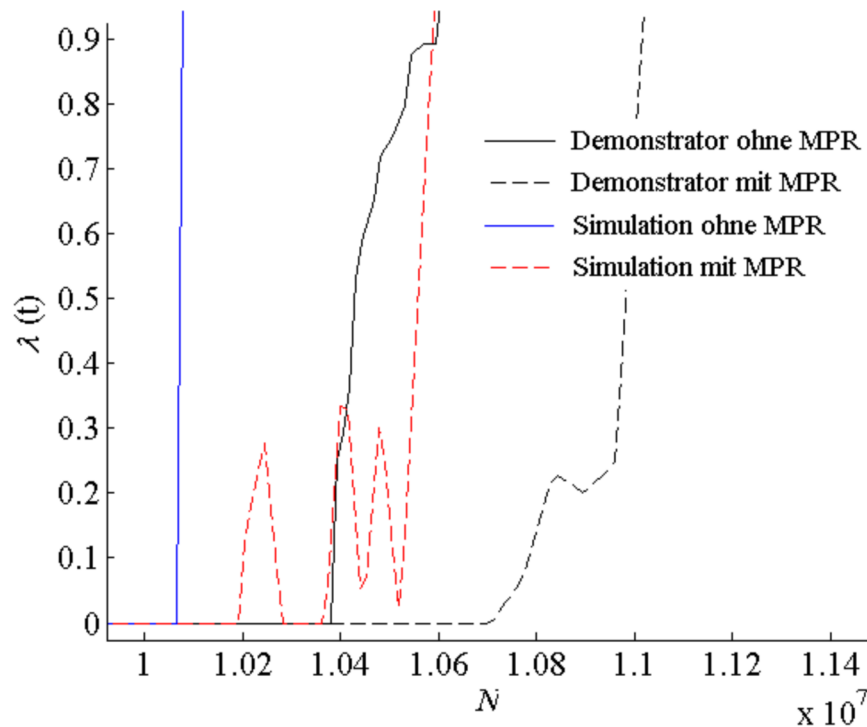


Abbildung 6.20: Gegenüberstellung der Spätausfallraten der Betriebsmodi mit und ohne MPR am Demonstrator und in der Simulation

Abbildung 6.20 stellt die Spätausfallraten der Betriebe ohne und mit MPR des Demonstrators und der Simulation gegenüber. Im Gegensatz zur benötigten Zeit von ca. 19000 Zyklen (27 h) für die Ausfallrate ohne MPR in der Simulation ergibt sich am Demonstrator eine verringerte Ausfallrate und somit ein längerer Zeitraum von ca. 111000 Zyklen (154 h), in dem die Ausfälle stattfinden. Grund dafür ist die in Abschnitt 6.8 beschriebene Veränderung des Sollklimas durch den Klimaschrank. Gleichbleibend ist die für die Spätausfallphase benötigte Zeit mit ca. 400000 Zyklen (555 h) im Betrieb mit MPR.

In Tabelle 6.2 ist die erreichte Lebensdauererlängerung der Simulation und des Demonstrator gegenübergestellt.

Tabelle 6.2: Gegenüberstellung der erreichten Verzögerung in der Simulation und am Demonstrator

		Simulation	Demonstrator
Ausfallzeitpunkt (Mittelwert) in Zyklen	Ohne MPR	$1,007 \times 10^7$	$1,044 \times 10^7$
	Mit MPR	$1,04 \times 10^7$	$1,089 \times 10^7$
Verlängerung der Lebensdauer (Verzögerung der N_{\max} Kontaktierung)		3 %	4,3 %
Verlängerungsfaktor der Spätausfallphase		20	3,6

6.7.3 Arbeitsweise des Multiparameterreglers am Demonstrator

Die Arbeitsweise des MPR am Demonstrator ist in Abbildung 6.21 dargestellt. Es ergibt sich die gleiche Abhängigkeit der Menge an Optimierungen zur Außentemperatur wie in der Simulation. Die Menge an Optimierungen stellt die in der LuT verfügbaren Ansteuerungen dar, deren Auswirkungen zum Erfassungszeitpunkt eine geringere Belastung ergeben. Im unteren Temperaturbereich von 5 °C bis ca. 23 °C stellt sich eine nahezu vollständige Optimierung mit der Optimierungsklasse 2 (OK 2) ein. Im Temperaturbereich von 23 °C bis 32 °C stellt sich eine markante Veränderung des Verhaltens des MPR ein. Es ergibt sich ab diesem Bereich die Reduzierung der Optimierungsklasse 2. Im Temperaturbereich > 32 °C erfolgt keine Optimierung. Im Gegensatz zum Verhalten des MPR in der Simulation erfolgt keine Optimierung mit der Optimierungsklasse 3 (OK 3). Der Grund dafür ist die in Abschnitt 6.8 beschriebene Generierung des Umgebungsklimas durch den Klimaschrank.

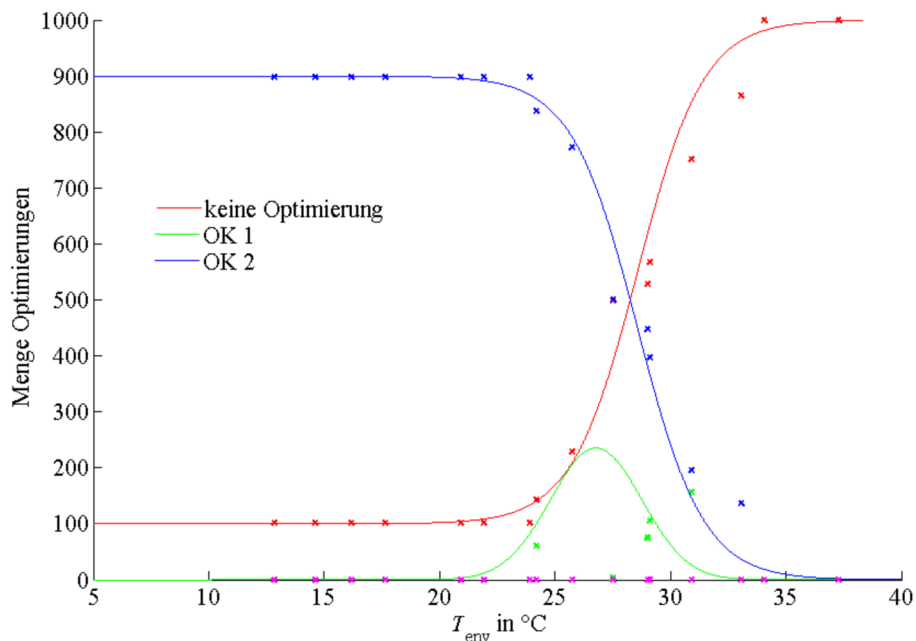


Abbildung 6.21: Arbeitsweise des BIV in Abhängigkeit von der Außentemperatur am Demonstrator

- Keine Optimierung – Es wird keine Belastungsreduzierung erreicht
- OK 2 – Optimierungsklasse 2
- OK 3 – Optimierungsklasse 3
- OK 4 – Optimierungsklasse 4

6.8 Ergebnisse der Simulation und der Messungen sowie Diskussion

Werden die Mess- und Simulationsergebnisse der vorhergehenden Abschnitte miteinander verglichen, ist festzustellen, dass die Ergebnisse der Simulation und des Demonstrators nur bedingt vergleichbar sind. Die Ursache für die Unterschiede sind in mehreren Kategorien zu finden und werden nachfolgend beschrieben.

Es wurden unterschiedliche Stichprobenumfänge bei der Simulation und im Demonstratorbetrieb genutzt. Dies resultierte aus der Entscheidung, dass die Elemente beider Stichproben einer ähnlichen Verteilung folgen. Dies ist hinsichtlich der erreichten Belastungsreduzierungen in Abbildung 6.13 und auch im Verhalten des MPR in Abbildung 6.21 ersichtlich. Des Weiteren spricht auch das in die Stich-

proben eingeprägte identische Außenklima zunächst für eine Vergleichbarkeit der 1000 Angehörigen der Simulation und 38 Angehörigen des Demonstrators.

Die Verzögerung der Kontaktierung und die erreichte Belastungsreduzierung ist das Ergebnis der erstellten linearen N_{\max} -Verläufe. Durch die Annahme exponentiell abnehmender Verläufe bestehen mehr ertragbare Zyklen im unteren Belastungsbereich, woraus dem BIV mehr Möglichkeiten zur Verfügung stehen, eine Belastungsreduzierung im größeren Maßstab zu generieren.

Aufgrund dessen, dass sich erst bei höheren Zyklenzahlen vorhandene Material- und Fertigungsunterschiede deutlicher auswirken, gelingt mit dem BIV schon bei geringer Zyklenzahl und somit auch geringer Klassendifferenz eine deutliche Belastungssenkung in Aufgabe 1 und eine nochmalige Verzögerung der N_{\max} -Kontaktierung in Aufgabe 2. Dies lässt vermuten, dass eine deutlich größere Streubreite bei den N_{\max} -Verläufen als die gewählte existiert (vgl. die Variable t_x in Abschnitt 3.3). Diese Vermutung wird durch den messtechnisch ermittelten N_{\max} -Verlauf des Transistors, siehe Abschnitt 6.3, bestätigt.

Als weitere Gründe für die unterschiedlichen Mess- und Simulationsergebnisse sind abweichende Temperatur- und Vibrationsverläufe des Demonstrators gegenüber dem Modell eingepprägten Verläufe. Es stellt sich beispielsweise eine merkliche Abweichung zwischen dem Sollwert und den vom Klimaschrank generierten Istwerten (Verläufen) von über 2 K im Bereich von Gradientenwechseln heraus. Das bei verschiedenen Temperaturgradienten folgende unterschiedliche Verhalten des MPR zeigt Abbildung A7.1. In Bereichen gleichbleibender Gradienten stellen sich häufig Temperaturschwankungen von durchschnittlich 1 K aufgrund von Umwälzungen der Luftmassen im Klimaschrank ein.

Als maßgebende Abweichung zwischen Simulation und Demonstrator sind unzureichende Parameterangaben im Datenblatt des Transformators, z. B. die Streuinduktivitäten aufgrund des Wicklungsaufbaus, die Eisenverluste des Kernmaterials und die Permeabilität des Kernmaterials zu nennen. Letztere beeinflusst die Größe der Induktivität abhängig vom Arbeitspunkt bzw. der Aussteuerung. Die Energie der primären Streuinduktivität wird in der Abschaltphase des Transistors nicht an

die Sekundärseite übergeben. Diese Tatsache führt dazu, dass in der Simulation deutlich schneller höhere Spannungsspitzen am Transistor zu verzeichnen sind. Das in der Simulation genutzte Level-3-Spice-MOSFET-Modell des Herstellers zeigt erhebliche Unterschiede zum Verhalten des realen Transistors. Aus diesem Grund wurde nach [IRF17] das in Abbildung A4.1 dargestellte Ersatzschaltbild als Spice-Modell aufgebaut. Abbildung 6.22 zeigt die Verläufe der Drain-Source-Spannung und des Drainstroms für einen ausgewählten Betriebspunkt in Abhängigkeit von der Gatespannung.

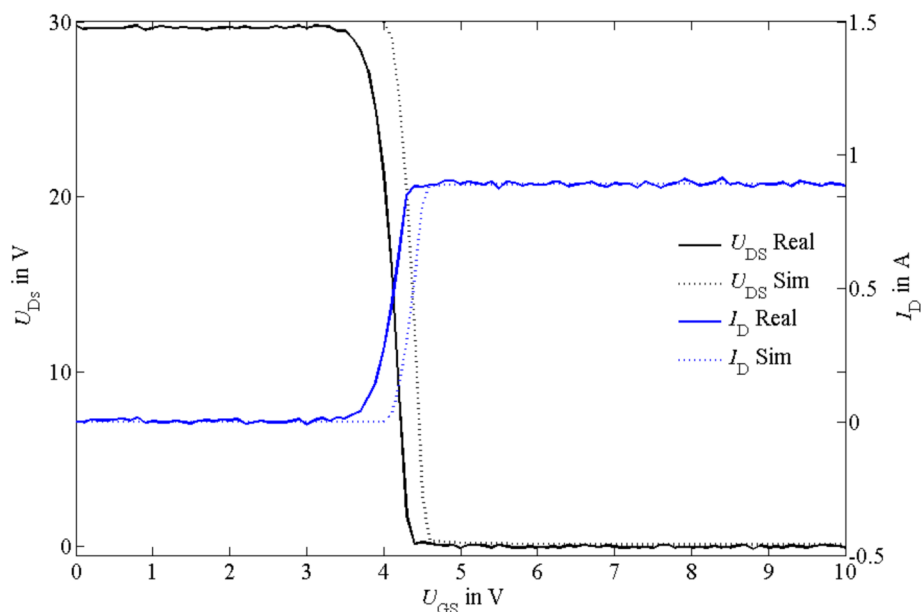


Abbildung 6.22: Unterschiede zwischen dem realen Transistor und dem Spice-Modell

Beide Verläufe zeigen annähernd gleiches Verhalten in den Endwerten oder auch bei der Übertragungsteilheit S . Die Übertragungsteilheit beschreibt mit $I_D = f(U_{GS})$ die Reaktion des Transistors mit der Änderung des I_D auf eine Änderung der U_{GS} . Die Verschiebung des linearen Bereiches hat zur Folge, dass statistisch gesehen eine höhere Lüftereinsatzzeit und auch stärkere Wechsel in den Ansteuerwerten folgen. Bezogen auf den Kontaktierungszeitpunkt wirkt sich dies negativ aus.

Weiterhin ist eine fehlende Rückwirkung der thermischen Beeinflussung aller Bauteile in der Simulation zu nennen. Für die Modelle stehen keine Wärmekapa-

zitäten zur Verfügung. Diese wurden für jedes Bauteil recherchiert und in ein parallel laufendes thermisches Modell integriert.

Im Spice-Modell wird die Generierung der Stromabfall- und Stromanstiegszeiten als temperaturunabhängig angenommen. Dazu wurden in mehreren Durchläufen das Modell mit Umgebungstemperaturen im Bereich von 20 °C bis 120 °C simuliert und die elektrischen Werte ermittelt.

Ebenfalls wurde der Demonstrator mit dem gleichen Temperaturbereich im Klimaschrank beaufschlagt. Es stellen sich erhebliche Parameterstreuungen am realen Bauteil gegenüber dem Transistormodell ein. Abbildung 6.23 zeigt dazu die Streuung elektrischer Größen des Transistors bei einer thermischen Belastung. Das Modell zeigt im Gegensatz zum realen Transistor nahezu keine Beeinflussung. Die starke Beeinflussung des Transistors durch die thermische Belastung verursacht einen verstärkten Eingriff in das Verhalten des MPR bezüglich dessen Menge an Eingriffen in die BG.

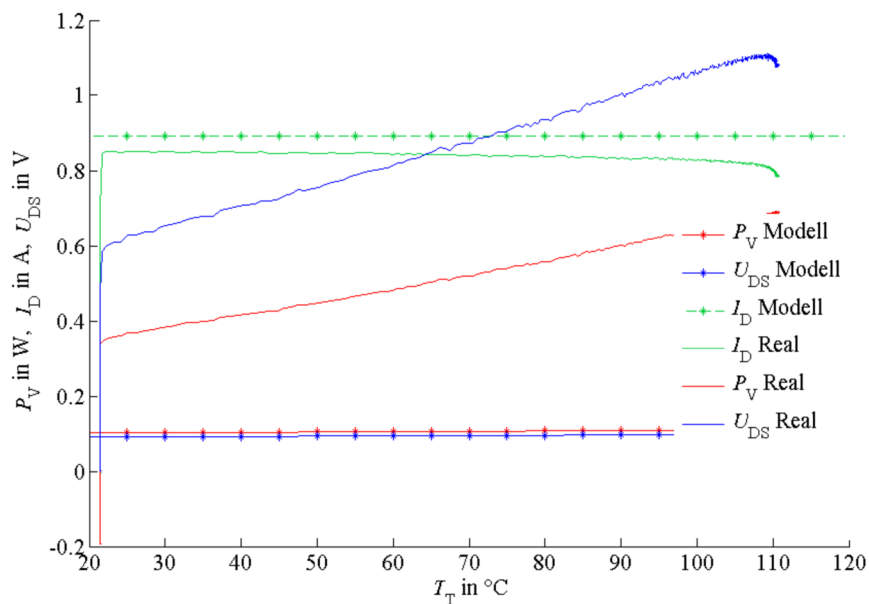


Abbildung 6.23: Unterschiede zwischen der thermischen Auswirkung im Modell und am realen Transistor

Es zeigt sich in den Verläufen in Abbildung 6.23, dass die thermische Beeinflussung der elektrischen Parameter der Simulation gegenüber den realen elektrischen

Parametern wesentlich geringer ausfällt. Weiterhin sind die thermischen Auswirkungen größer als am Modell. Dies führt zu einer nahezu vernachlässigbaren Beeinflussung der simulierten Schaltung durch das Außenklima, woraus wiederum aufgrund der größeren Temperaturgradienten der MPR bei gleicher Zyklenzahl eine größere Menge an Eingriffen generiert.

Am Demonstrator sind weiterhin Messfehler beispielsweise aufgrund von Rauschen des Sensorsignals und leitungsgebundene Einkopplung von Störsignalen in die Messpfade als Ursache für Unterschiede zu nennen. Der Wirkungsmechanismus des Rauschsignals ist als systematischer Fehler rechnerisch korrigierbar. Dazu ist im Element „Datenaufbereitung“ des BIV-Algorithmus im Abschnitt 5.5 ein Filter implementiert. Dieses wurde empirisch an die zu messenden Belastungen angepasst.

Um leitungsgebundene Einkopplungen zu verringern, wurde auf eine örtlich getrennte Verlegung der Stromversorgungs- und Messleitungen geachtet. Weiterhin sind für die Stromversorgung kurze und verdrehte Leitungen eingesetzt worden. Die beschriebenen Unterschiede am Demonstrator und der Simulation ergeben unterschiedliche klimatische und elektrische Situationen an den Elementen beider Stichproben, so dass diese in näherer Betrachtung nicht als identisch, aber als vergleichbar dargestellt werden können. In der unabhängigen Betrachtungsweise ergibt sich ein neuer erweiterter Stichprobenumfang, welcher das Verhalten der Schaltung und des MPR hinsichtlich Belastungsreduzierungen und Lebensdauerverlängerungen bestätigt.

Die lokalen Maxima in der Spätausfallphase der Simulation und des Demonstrators im Betriebsmodus mit MPR, siehe Abbildung 6.20, ergeben sich aufgrund von gruppierten Kontaktzeiten. Abbildung 6.24 zeigt die Kollektive der Kontaktzeiten für die Simulation und den Demonstrator. Als Ursache für die gruppierten Kontaktzeiten N_K sind ähnliche Klimate, deren Umgebungstemperaturen T_{env} einen nahezu identischen Mittelwert besitzen, zu nennen. Weiterhin ist hierfür die in Abschnitt 6.5.2 beschriebene geringe Wechselhaftigkeit des Außenklimas zu nennen. Daraus ergibt sich eine Eingriffsmöglichkeit des MPR in die BG mit nur einer geringen Varianz der Beeinflussungsparameter über die Lebensdauer, woraus

ähnliche Belastungsverläufe und somit nahezu identische Betriebszeiten resultieren. Die ebenfalls dargestellte Abhängigkeit der Kontaktzeiten von der Umgebungstemperatur T_{env} (rote Verläufe) verdeutlicht die Wirkung des MPR, an der Simulation und am Demonstrator dynamisch auf Belastungsunterschiede einzugehen und eine Lebensdauerverlängerung zu generieren.

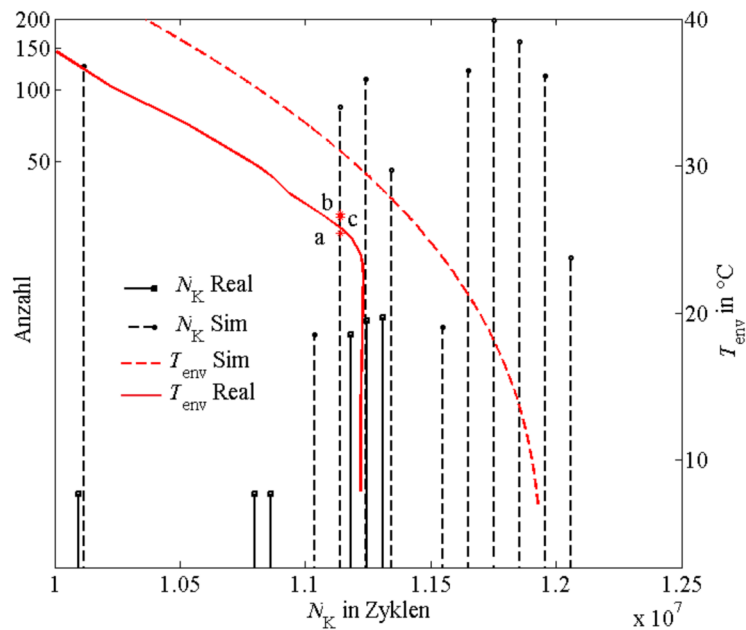


Abbildung 6.24: Ausfallzeiten in der Simulation und am Demonstrator

Die in der Simulation und im Test des Demonstrators ermittelte zeitliche Verlängerung der Spätausfallphase äußert sich als eine geringere Menge ausfallender Einheiten je Zeiteinheit. Dies ist als Erhöhung der Zuverlässigkeit interpretierbar.

7. Verallgemeinerte Herangehensweise bei der Implementierung des Betriebs-Interventions-Verfahrens und der Abschätzung des Wirkungspotentials

In den folgenden Abschnitten wird eine Übersicht über die Abfolge beschrieben, mit der eine Prüfung auf Sinnhaftigkeit des Einsatzes des MPR an einer BG durchzuführen ist. Ebenfalls beinhaltet die Prüfung auch eine allgemeingültige Abfolge für die Implementierung eines MPR an eine BG. Ausgangspunkt der Schrittfolge ist der allgemeingültige Ansatz aus Kapitel 3 und dessen Konkretisierung gemäß Kapitel 4. Speziell werden die in Abschnitt 4.1 beschriebenen nötigen Voraussetzungen einbezogen.

7.1 Schrittfolge bei der Implementierung in Baugruppen

Die Einsatzfähigkeit des MPR ist gemäß dem Grundsatz der Variabilität des MPR im Abschnitt 3.1 nur bei einer gewissen Mindestvariabilität der zu schützenden BG gegeben. Die Prüfung dazu wird nach dem Funktionskriterium in Abschnitt 3.1 durchgeführt. Der Eingriff in eine BG, also eine Belastungsänderung, wird zum einen durch eine Leistungsabfrage einer nachfolgenden Last, zum anderen durch die Variabilität des Klimas gesteuert. Die genannten Aspekte zeigen die Einsatzfähigkeit des MPR auch in einem gleichbleibenden Klima oder an einer konstanten Last. Aufgrund dessen bildet die Aufrechterhaltung der Funktion einer BG als Entscheidungskriterium eine höhere Priorität als die Variabilität des Klimas. Ausgehend davon sind für die Implementierung weitere Informationen zu erbringen. Dazu zählen zunächst die Kategorisierung nach Abschnitt 3.1 und die Bestimmung der Flexibilität der BG. Der Eingriff durch den MPR erfordert an der zu schützenden BG einen Eingriffspunkt.

Es ist dahingehend als positiv zu bewerten, wenn eine Eingriffnahme an der entsprechenden Stelle durch bereits eingesetzte Bauteile möglich wird. Zu den Bauteilen zählen alle aktiven Bauteile, wie beispielsweise Transistoren, Optokoppler oder Relais. Durch die Nutzung eines vorhandenen Bauteils als Eingriffsmöglich-

keit entfällt somit die Einbringung zusätzlicher, für die Funktion der BG nicht erforderlicher Bauteile. Durch die gleichbleibende Anzahl an Bauelementen auf der BG entfällt die Steigerung der Fehleranfälligkeit.

Auf Basis der Informationen zum Klima am Einsatzort und über die Funktion der Baugruppe wird der Beeinflussungsbereich an den zu überwachenden Bauteilen bestimmt und die Art der Einflussnahme bezüglich der Auswahl der Einflussparameter und des Bereiches festgelegt. Zunächst werden die elektrischen und klimatischen Belastungen an allen Bauteilen einer Baugruppe ermittelt. Ebenfalls ist im Vorfeld die klimatische Belastung am Einsatzort zu bestimmen. Hierzu gibt es mehrere Varianten, diese in Erfahrung zu bringen (vgl. Abschnitt 3.2). Für die Einordnung einer Größe als Belastung und die damit verbundene Gegenmaßnahmen wird auf Abschnitt 5.2 verwiesen.

Die ermittelten Belastungsdaten bilden das Kriterium, in welcher Form der Schutz der BG erfolgen muss. Dazu ist eine Zerlegung der BG in das Ebenenmodell, siehe Abschnitt 4.3, möglich. In allen Fällen ist der Eingriffspunkt in die Schaltung so zu wählen, dass alle Belastungen minimiert werden und ebenfalls keine bis geringstmögliche negative Beeinflussung der restlichen Bauteile entsteht.

Es folgt die Bestimmung der Menge und der Art der Eingriffsparameter sowie deren Eingriffsbereich nach Abschnitt 3.1. Ebenfalls wird hierzu die Analyse und Auswahl der Beeinflussungsparameter aus Abschnitt 5.3 herangezogen.

In der Abarbeitung wird die Funktion einer elektronischen Baugruppe als gewichteter Graph neu beschrieben. Dabei werden die Bauelemente in Knoten und die Verbinder werden in Kanten umgewandelt, siehe Abbildung 7.1. Die Kanten sind im ersten Schritt richtungslos und ungewichtet.

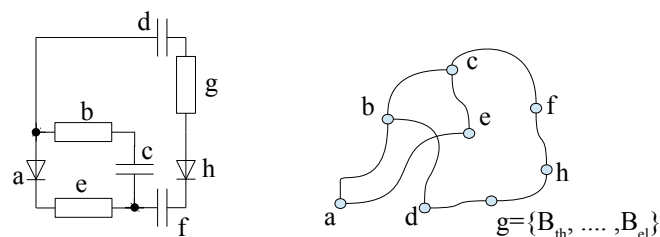


Abbildung 7.1: Umwandlung einer Beispielanordnung in Knoten und Kanten

Die an den einzelnen Bauteilen auftretenden Belastungen werden an die Knoten angetragen, siehe dazu Abbildung 7.1, woraus ein Graph mit gewichteten Knoten entsteht. Dazu ist es möglich, eine Matrix nach dem Stil einer Adjazenzmatrix zu bilden und die zuvor ermittelten Belastungswerte einzutragen.

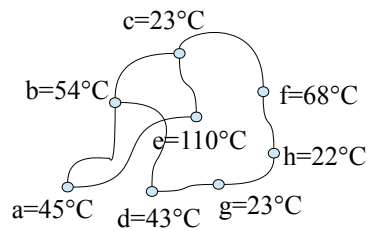


Abbildung 7.2: Beispiel für auftretende thermische Belastungen an der Beispielanordnung in Abbildung 7.1

Tabelle 7.1: Tabellarische Form der auftretenden Belastungen der Beispielbaugruppe

	a	b	c	d	e	f	g	h
a	45	54			110			
b	45	54	23	43				
c		54	23		110	68		
d		54		43		23		
e	45		23		110			
f			23			68		22
g				43			23	22
h						68	23	22

Die größte Belastung in der Matrix (siehe Tabelle 7.1) wird durch den Zusammenhang (7.1) ermittelt. Dieser wird für jede betrachtete Belastung aufgestellt und die Bestimmung für jede Belastung durchgeführt.

$$AP = \max \left(\sum_{i=0}^n A_{ij} \right) \tag{7.1}$$

AP – Angriffspunkt, beschreibt einen Knoten, dessen Belastung in Verbindung mit seinen direkten Nachbarn am größten ist.

Daraus wird zunächst der gemeinsame Ausgangsknoten für jede Belastung identifiziert und nach (7.1) die Summe aller von einem Knoten abgehenden direkten Kanten gebildet. Dieser Knoten beschreibt somit auch den Eingriffspunkt für den MPR in eine Baugruppe. Es resultiert somit maximal eine Menge unterschiedlicher Eingriffspunkte für die Baugruppe, die der Menge der betrachteten Belastungen entspricht.

Im nächsten Schritt wird ein gemeinsamer Eingriffspunkt für alle Belastungen gebildet. Dazu werden die Eingriffspunkte für die unterschiedlichen Belastungen zusammengezogen und somit ein gemeinsamer Eingriffspunkt gebildet. Dies ist nur möglich, wenn mehrere unterschiedliche Gegenmaßnahmen von diesem gemeinsamen Eingriffspunkt durchgeführt werden können. Ist dies nicht möglich, müssen mehrere Eingriffspunkte in die Baugruppe eingebracht werden. Bei dem Zusammenziehen der unterschiedlichen Eingriffspunkte und der damit verbundenen Verschiebung entsteht eine Verminderung des Eingriffsvermögens.

Im nächsten Schritt erfolgt die Prüfung der Einflussnahme auf die Schaltung bezüglich der Änderung der elektrischen Werte und die Prüfung der daraus resultierenden Einflussnahme auf die Belastungsänderung. Dies ist ebenfalls durch verschiedene Varianten, wie z. B. Simulationen, möglich.

Für die technische Umsetzung steht die Auswahl geeigneter Beeinflussungselemente und deren Position innerhalb der BG im Vordergrund. Im Fall eines vorhandenen Beeinflussungselements muss dessen Erweiterung bezüglich der Ansteuerung geprüft werden.

7.2 Kriterien zur Abschätzung des Wirkungspotentials im Betrieb der Baugruppe

Das Wirkungspotential beschreibt die Fähigkeit des MPR, eine belastungsreduzierende Beeinflussung an einer zu schützenden BG durchzuführen und kann als Verhältnis der auftretenden Belastung ohne MPR zur auftretenden Belastung mit MPR in einem Zahlenwert nach (7.2) ausgedrückt werden.

$$WP = 1 - \frac{B_{mMPR}}{B_{oMPR}} \quad (7.2)$$

WP – Wirkungspotential

Die Belastungen B_{oMPR} und B_{mMPR} können als zeitliche Verläufe oder Mittelwerte angesehen werden.

Um eine Abschätzung des Wirkungspotentials zum Einsatz des MPR an einer Baugruppe zu klären, sind allgemeine Fragen nach Erforderlichkeit einer Zuverlässigkeitserhöhung oder Lebensdauererlängerung, beispielsweise nach ökonomischen Gesichtspunkten, im Vorfeld zu klären. Die Flexibilität einer BG wird durch die schaltungstechnische Realisierung, also die Verteilung der Bauteile in der Schaltung und die Art der eingesetzten Bauteile vorgegeben. Für eine Bestimmung der Flexibilität ist zunächst jedem Bauteil ein Flexibilitätskennwert zu vergeben. Die Funktion passiver Bauteile ist im gesamten BTE-Bereich unabhängig anliegender elektrischer Werte konstant. Sie weisen damit eine hohe Variabilität auf und erhalten die Nummerierung 1. Aktive Bauteile erfüllen ihre Funktion ebenfalls im gesamten BTE-Bereich gleich. Dennoch müssen bestimmte Spannungen oder Ströme anliegen, um die Funktion zu erfüllen: beispielsweise Flussspannung bei Dioden, Gatespannung des MOSFETs, Basisstrom des Bipolartransistors. Es ergibt sich eine bedingte Flexibilität mit der Nummerierung 2. Aufgrund der Anpassungsfähigkeit an große Spannungsbereiche werden in diese Kategorie auch Operationsverstärker oder auch LDO-Spannungsregler (engl. Low Drop-out) als Vertreter der integrierten Schaltkreise einsortiert. Je mehr Anschlüsse bzw. Eingangssignale ein mehrpoliges Bauelement besitzt, desto mehr elektrische Bedingungen müssen für die Erfüllung der Funktion des Bauteils ausgeführt werden. Dies schließt eine Variabilität, welche gegebenenfalls an manchen Anschlüssen vorliegt, nahezu aus. Beispielsweise weisen Schaltkreise oder μC eine geringe Variabilität auf, welche mit der Kennziffer 3 beschrieben wird. Die Vergabe ist in Tabelle 7.2 dargestellt.

Tabelle 7.2: Unterteilung elektronischer Bauteile nach Flexibilität

Flexibilitätskennwert (F _{xk})	Bauelement
1	Widerstände, Induktivitäten, Kondensatoren,
2	Dioden, Bipolar- und Feldeffekttransistoren
3	Integrierte Schaltkreise, Mikrocontroller, Operations- verstärker, Treiber, Logikgatter
Keine Beachtung	Stecker, Buchsen, Anzeigeelemente

Tabelle 7.2 zeigt eine beispielhafte Vergabe eines Kennwertes zur Flexibilität. Es besteht ferner ebenfalls die Möglichkeit, eine weitere Unterteilung durchzuführen. Über den Mittelwert der Flexibilitätskennwerte aller eingesetzten Bauteile ist es möglich, den erreichbaren Eingriff in die Schaltung zu bestimmen. Die Zusammenschaltung der Bauelemente wird in Beziehung gesetzt. Dazu werden alle Knoten, an denen Bauelemente miteinander verbunden sind, untersucht und für jeden Knoten der Mittelwert des Kennwertes zur Flexibilität gebildet.

$$F_{xk_k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{xk_i} \tag{7.3}$$

F_{xk_k} – Flexibilitätskennwert für den Knoten n

F_{xk_i} – Flexibilitätskennwert eines Bauteile am Knoten n

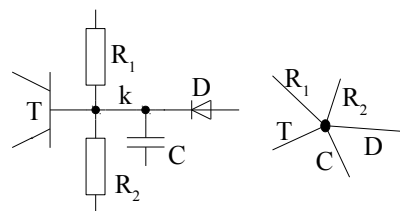


Abbildung 7.3: Beispielhafter Schaltungsknoten und dessen Abstrahierung

In Abbildung 7.3 ist ein Ausschnitt einer Schaltungsanordnung dargestellt. Der Knoten k im linken Teil der Abbildung wurde zum Knotenpunkt im rechten Teil der Abbildung abstrahiert. Dem Knoten wird nach (7.3) der Flexibilitätskennwert $F_{xk_k} = (T + R_1 + R_2 + D + C) / 5 = (2 + 1 + 1 + 1 + 2) / 5 = 1,4$ zugewiesen. Durch die Be-

stimmung des Flexibilitätskennwertes aller Knoten einer Baugruppe kann eine Aussage zur Eignung der Baugruppe für den Eingriff des MPR getätigt werden.

Als weiterer Entscheidungspunkt werden Informationen über die einwirkenden thermischen und elektrischen Belastungen herangezogen. Hierbei wird die Wechselhaftigkeit V der Belastungen nach (7.4) betrachtet. Dazu wird das Verhältnis der Menge an unterschiedlichen Messwerten bei aufeinanderfolgenden Messpunkten zur Gesamtmenge der Messwerte eingesetzt. Je größer die vorliegende Wechselhaftigkeit der Belastungen, desto mehr ist der MPR in der Lage, die Einflussnahmegrößen anzupassen. Für das im Vorfeld unbekanntes Klima am Einsatzort besteht die Möglichkeit einer Abschätzung oder der vorhergehenden Aufnahme einer Stichprobe, welche alle möglichen klimatischen Situationen umfasst. Ferner ist ebenfalls die Erfassung der Wechselhaftigkeit des Klimas durch den MPR selber denkbar. Solche Möglichkeiten werden im Abschnitt 7.4 diskutiert.

$$V = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{mit} \quad \begin{cases} N_1 = \{B_{MP} - B_{MP-1} = 0\} \\ N_2 = \{B_{MP} - B_{MP-1} \neq 0\} \end{cases} \quad (7.4)$$

V – Wert, der die Wechselhaftigkeit des Klimas beschreibt

$N_{1,2}$ – Menge gleicher und unterschiedlicher, aufeinanderfolgender Belastungswerte

B_{MP} – Belastung zum aktuellen Messpunkt

Somit ergibt sich bei $V \rightarrow 0$ eine Beständigkeit und bei $V \rightarrow 1$ der Grenzwert für die Wechselhaftigkeit der Belastungen.

Der eintragbare Bereich des Klimas wird auf der Ordinate und der Flexibilitätskennwert auf der Abszisse abgetragen, woraus eine kombinierte Visualisierung beider Kennzahlen erfolgt und somit eine allgemeine Einschätzung der Wirkung des MPR an einer Baugruppe gelingt. Die sich dabei aufspannende Fläche verdeutlicht die Grenzsituationen für den Einsatz des MPR mit der Unterteilung in klimatisch bzw. schaltungstechnisch geeignet/ungeeignet.

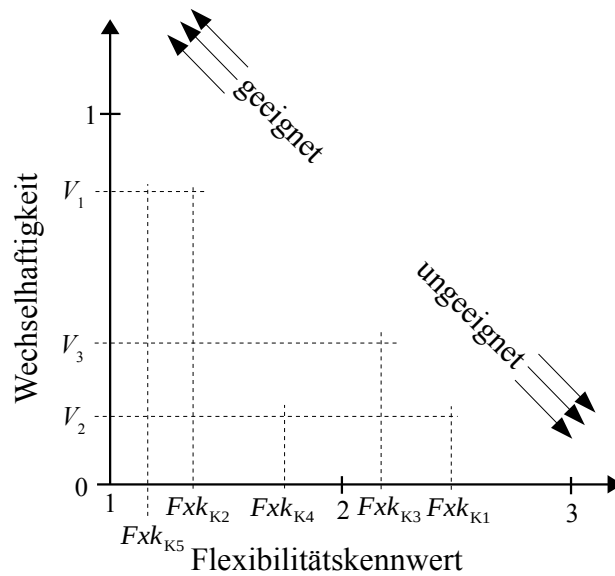


Abbildung 7.4: Diagramm zur Einordnung des Wirkungspotentials

Als Beispiel wurde eine Schaltung gewählt, welche aus 5 Knoten besteht. Nach (7.3) wird für alle Knoten der Flexibilitätskennwert F_{xxk_1} bis F_{xxk_5} ermittelt. Für den Betrieb der Schaltung wurden die Belastungen B_1 , B_2 und B_3 als lebensdauerrelevant identifiziert und für diese die Wechselhaftigkeit V_1 , V_2 und V_3 nach (7.4) bestimmt. Das Wirkungspotential und der Flexibilitätskennwert sind kombiniert im Diagramm in Abbildung 7.4 dargestellt.

Der Abbildung 7.4 ist zu entnehmen, dass die Knoten k_5 und k_2 schaltungstechnisch eine hohe Flexibilität aufweisen und ebenfalls die einwirkende Belastung eine hohe Wechselhaftigkeit besitzt. Beide Aspekte wirken sich positiv auf die Einsatzfähigkeit des MPR auf. Der MPR ist an diesen Knoten in der Lage, innerhalb des Funktionskriteriums mit einem großen Einflussnahmebereich einzuwirken. Aufgrund der geringeren Flexibilität und ebenfalls geringeren Wechselhaftigkeit der einwirkenden Belastung ist der MPR in der Lage, an den Knoten k_1 , k_3 und k_4 eine geringere Einflussnahme auszuüben.

7.3 Ökonomische Aspekte zur Einsatzfähigkeit

Für eine Implementierung des MPR in eine BG müssen ökonomische Aspekte betrachtet werden und der dafür eingesetzte Aufwand ist dem zu erhaltenden Mehrwert gegenüber zu stellen. Diese Betrachtung ist nicht allgemeingültig und muss für jede Baugruppe/jedes System separat durchgeführt werden.

Zunächst ist auf der Kostenseite der finanzielle Aufwand bezüglich eingesetzter Arbeitszeit für Design und Dimensionierung des MPR zu berücksichtigen. Dazu gehören ebenfalls die Dimensionierung, der Prototypenbau und der Test des MPR mit der damit verbundenen Bindung von Entwicklungszeit. Eine Einsatzfähigkeit ist nur dann als sinnvoll zu erachten, wenn sich der Aufwand bei einer geplanten Lebensdauer der Baugruppe, beispielsweise durch die Reduzierung geplanter oder nötiger Reparaturen, finanziell rechnet. Gleichmaßen muss betrachtet werden, dass sich beim Einsatz des MPR und der damit verbundenen Erhöhung der Anzahl der Bauteile eine Erhöhung der Komplexität der gesamten BG ergibt. Dies kann aufgrund der Menge an Bauteilen zu einer Senkung der Zuverlässigkeit führen.

Dem steht durch den Einsatz des MPR der Nutzen in Form einer Verlängerung der Lebensdauer und der Erhöhung der Zuverlässigkeit gegenüber. Somit sinken mit steigender Zuverlässigkeit die Wartungs- und Instandhaltungskosten.

Aus diesen Aspekten ergeben sich beispielsweise Einsatzgebiete in lebenserhaltenden und Leben schützenden Anlagen, bei denen ein Ausfall eine Gefährdung von Gesundheit und Leben von Menschen darstellt, dazu zählen beispielsweise medizinische oder Verkehrssteuerungsanlagen. Ebenfalls in Geräten mit erheblichem zeitlichen und finanziellen Entwicklungsaufwand oder die durch eine örtliche Trennung nicht repariert werden können, z. B. Raumfahrt, Satelliten. Ferner sind informationsgewinnende Zwecke denkbar, diese werden in Abschnitt 7.4 aufgezeigt.

Die Einsatzfähigkeit der MPR ist auch bezüglich des *WP* von den jeweiligen technologischen und ökonomischen Gesichtspunkten der Schaltung der BG abhängig und kann nicht verallgemeinert werden. Um sich einer Entscheidung anzunähern, kann der Weg über eine Simulation der zu schützenden BG, vergleichbar mit der

in dieser Arbeit beschriebenen Herangehensweise, durchgeführt werden. Um eine bewusste Steigerung des *WP* zu erreichen, muss eine zu schützende BG vorliegen, welche eine nach Abschnitt 7.2 beschriebene hohe Flexibilität aufweist. Dadurch ist es durch den MPR möglich, einen breiten Eingriff in die BG zu generieren. Gleichermaßen wird durch die Wechselhaftigkeit des Klimas das *WP* entscheidend beeinflusst, siehe Abschnitt 7.2. Durch das Einbringen der BG samt MPR in ein Klima, welches bei der Konfiguration des MPR nicht berücksichtigt wurde, ist ebenfalls eine Veränderung des *WP* erreichbar. Diese Veränderung ist jedoch nicht kontrollierbar und kann sowohl eine Steigerung als auch eine Senkung des *WP* herbeiführen. Der letztere Fall ist mit einer Verkürzung der Lebensdauer verbunden.

Letztendlich ist der Einsatz des MPR auch als sinnvoll zu erachten, wenn die Lebensdauer des MPR geringer als die der zu überwachenden BG ausfällt. In diesem Fall ergibt sich die erweiterte Schutzfunktion durch den MPR innerhalb seiner Lebensdauer. Es wird in dieser Zeit eine Belastungssenkung an der BG erreicht, welche sich wiederum (vgl. Abbildung 3.3) in einer Lebensdauererlängerung äußert. Nach dem Ausfall des MPR muss auf eine weitere vorhandene Schutzmaßnahme zurückgegriffen werden.

Nachfolgend wird der Zusammenhang zwischen Lebensdauer einer BG und Lebensdauer eines MPR näher betrachtet.

Allgemein gilt für die Ausfallrate der Zusammenhang (2.7). Dieser kann auch nach (7.5) beschrieben werden.

$$\lambda(t) \approx \frac{\Delta n_a}{n(t) \Delta t} \quad (7.5)$$

$\lambda(t)$ – Ausfallrate

Δn_a – Anzahl der Ausfälle in Δt

$n(t)$ – Anzahl der intakten Elemente zu Beginn der Δt

Es wird davon ausgegangen, dass der Einsatz des MPR an einer BG eine Lebensdauerverlängerung zu Folge hat. Er greift in (7.5) also beispielsweise in Δt bzw. in die Anzahl der Ausfälle Δn_a ein. Seine Wirkung kann durch einen Wirkungsfaktor F_w in (7.6) beschrieben werden.

$$F_w = \frac{n_{k \text{ mMPR}}}{n_{k \text{ oMPR}}} \quad (7.6)$$

- F_w – Wirkungsfaktor
- $n_{k \text{ mMPR}}$ – Kontaktzeitpunkt im Betrieb mit MPR
- $n_{k \text{ oMPR}}$ – Kontaktzeitpunkt im Betrieb ohne MPR

Aus (7.6) folgt für eine Baugruppe mit MPR der Zusammenhang (7.7). Es kann damit die Überlebenswahrscheinlichkeit in (7.8) berechnet werden.

$$\lambda(t)_{\text{mMPR}} = \frac{\lambda(t)_{\text{oMPR}}}{F_w} \quad (7.7)$$

$$R(t)_{\text{MPR}} = e^{-\lambda(t)_{\text{mMPR}}t} \quad (7.8)$$

- $R(t)_{\text{mMPR}}$ – Überlebenswahrscheinlichkeit der Baugruppe im Betrieb mit MPR

Es ergeben sich hinsichtlich der Zuverlässigkeit folgende Zusammenhänge zwischen den Funktionen der Baugruppe und des MPR.

a) funktionale Unabhängigkeit

Für die Funktion der BG wird die Funktion des MPR nicht benötigt.

In diesem Fall wird von einer BG, welche für einen Einsatzort und -zweck dimensioniert wurde, ausgegangen. In der Dimensionierung der Baugruppe sind dazu nötige Schutzmaßnahmen implementiert worden.

Liegt eine funktionale Abhängigkeit vor, ergibt sich für eine Baugruppe mit intaktem MPR die Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)_{\text{mMPR}}$. Nach dem Ausfall ändert sich die Überlebenswahrscheinlichkeit zu $R(t)_{\text{oMPR}}$. Daraus resultiert die Forde-

zung $R(t)_{\text{MPR}} > R(t)_{\text{mMPR}}$. Ist der Zusammenhang gegeben, erfolgt über die gesamte Lebensdauer der Baugruppe eine Einflussnahme durch den MPR.

b) funktionale Abhängigkeit

Für die Funktion der BG wird die Funktion des MPR benötigt. Abbildung 7.5 zeigt die daraus resultierende Struktur.

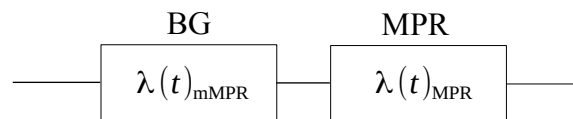


Abbildung 7.5: Struktur der funktionalen Abhängigkeit

Aus Abbildung 7.5 folgt der Zusammenhang (7.9).

$$R(t)_{\text{ges}} = e^{-\lambda(t)_{\text{mMPR}}t} \cdot e^{-\lambda(t)_{\text{MPR}}t} \quad (7.9)$$

$$R(t)_{\text{ges}} = e^{-(\lambda(t)_{\text{mMPR}} + \lambda(t)_{\text{MPR}})t} = e^{-\left(\frac{\lambda(t)_{\text{oMPR}}}{F_w} + \lambda(t)_{\text{MPR}}\right)t} = e^{-\frac{\lambda(t)_{\text{oMPR}}}{F_w}t}$$

$$R(t)_{\text{ges}} \approx e^{-\frac{\lambda(t)_{\text{oMPR}}}{F_w}t} \quad \text{mit } \lambda(t)_{\text{MPR}} \ll \lambda(t)_{\text{oMPR}}$$

$$R(t)_{\text{ges}} \approx e^{-\lambda(t)_{\text{mMPR}}t} \quad (7.10)$$

Aus dem Zusammenhang (7.10) ergeben sich folgende Forderungen:

Die funktionale Unabhängigkeit ist anzustreben. Aus diesem Aspekt folgt zum einen die parallele Existenz der Einflussnahmemöglichkeiten durch den MPR und durch die Uransteuerung. Mit Uransteuerung ist der Betrieb ohne MPR gemeint.

Des Weiteren muss die Einflussnahme in die BG durch den MPR eine höhere Priorität aufweisen als der Wechsel zum Betrieb ohne MPR. Gleichermäßen ist bei dem vorzeitigen Erreichen der maximalen Lebensdauer des MPR jederzeit der Wechsel zum Betrieb ohne MPR möglich.

Gleichermäßen ergibt sich die Forderung $\lambda(t)_{\text{MPR}} \ll \lambda(t)_{\text{oMPR}}$. Ferner besteht die Möglichkeit, den MPR redundant aufzubauen.

7.4 Nutzungspotentiale im Entwicklungsprozess elektronischer Systeme

In den vorhergehenden Abschnitten wurden Aspekte aufgezeigt, die für den Einsatz des MPR sprechen. Dazu zählt die Reduzierung anliegender Belastungen, die Erhöhung der Zuverlässigkeit und die Verlängerung der Lebensdauer. Gleichmaßen stellt es einen Beitrag zur Gewährleistung der Betriebssicherheit (Dependability), welche die Zuverlässigkeit (Reliability), funktionale Sicherheit (Safety), Verfügbarkeit (Availability) und Datensicherheit (Security) umfasst, bereit.

Der MPR kann in Kombination mit weiteren existierenden Schutzmaßnahmen koexistieren, so dass die Vorteile des MPR und beispielsweise der statischen Schutzmaßnahme gleichzeitig genutzt werden. Denkbar ist hier die Verringerung einer erforderlichen Kühlfläche, aufgrund der Anpassung einer Verlustleistung oder die Reduzierung von Schwingungsdämpfern aufgrund der Optimierung von aktiven Kühlmaßnahmen auf der Leiterplatte.

Bei der Betrachtung einer einzelnen BG mit integriertem MPR sei zunächst der Monitoring-Betrieb genannt. In dieser Arbeitsweise wird die Einflussnahme des MPR abgeschaltet, so dass nur die Datenaufnahme und die Speicherung bzw. Weiterleitung der aufgenommenen Daten erfolgt. Dadurch ist die Generierung von Nutzungs- und Belastungsstatistiken möglich. Diese umfasst die Prüfung auf vorhersehbare Arbeits- und Belastungskriterien einzelner Bauelemente bis hin zu Belastungsmengenverläufen der gesamten BG. Diese Daten stehen für die Auslegung und Dimensionierung von Baugruppen in Entwicklungs- und Redesignprozessen als zusätzliche Information zu Verfügung. Durch die Einflussnahme auf einwirkende Belastungen wird die Priorität fehlender oder unbekannter Informationen, wie z. B. über das Außenklima oder maximal ertragbare Belastungen, auf die derzeit nur durch Überdimensionierung reagiert wird, reduziert. Dadurch kann der aktuelle Trend der Miniaturisierung (engl. electronic downsizing) bedient werden. Weitere Nebeneffekte dieses Verfahrens sind die Steigerung der Energieeffizienz, allgemein die Reduzierung von Schutzmaßnahmen sowie die Möglichkeit eines Notlaufbetriebs der Baugruppe. Bei einer gleichzeitigen nutzerbezogenen Auswertung der erhobenen Daten ist nicht nur eine Vorhersage zur Lebensdauer oder eine Meldung zur mean time to failure (MTTF) möglich, sondern auch die Ermittlung

tatsächlicher Klimate an einem Einsatzort sowie eine Verifizierung der angenommenen Umgebungsbedingungen. Die Schaffung eines genaueren Abbildes des Klimas am Einsatzort liefert weiterführende Informationen ergänzend zu Normen wie DIN EN60721-3 (Leitfaden für die Korrelation und Umsetzung der Klassen von Umgebungsbedingungen) [DKE04] oder DIN EN ISO 291:2008-08 (Kunststoffe - Normalklimate für Konditionierung und Prüfung) [DKE08]. Diese Information ist bei der Erweiterung eines existierenden Systems sinnvoll.

Durch das Führen von Belastungsstatistiken ist die Lernfähigkeit des Verfahrens gegeben. Dazu werden wiederkehrende Belastungsverläufe (im Sinne von Mustern) und Belastungskollektive untersucht und gleichzeitig die Zuordnung der Belastung zu den Einflussnahmen durchgeführt. Bei mehrmaligen Durchläufen, inklusive vorhergehender Speicherung der Belastungswerte, kann über die Zeit aus einer Menge eine geeignete Ansteuerung, manuell oder automatisiert, durch den Parameterregler ausgewählt werden. Daraus erwächst die Notwendigkeit eines temporären Änderungsspeichers. Die erhobenen Daten stellen ebenfalls Funktions- und Klimaindikatoren dar, welche in der Lage sind, Funktionsänderungen und -driften aufgrund der Alterung einer elektronischen BG darzustellen. Durch die Messung funktionsentscheidender Größen ist eine Aussage über die Zuverlässigkeit oder die MTBF generierbar.

Funktions- und Klimaindikatoren sind das Abbild der Funktion einer elektronischen BG, ihrer chemischen und physikalischen Prozesse und Bedingungen vor Ort sowie ihrer implizierten Fremdfunktionen.

Durch die Vernetzung mehrerer MPR zu einem Verbund ist ein Informationsaustausch möglich. Dieses System als interagierender Verbund von elektronischen Baugruppen bietet die Möglichkeit, durch den Austausch von Informationen über einen Kommunikationsbus und die Einbeziehung einer Vielzahl von unterschiedlichen Sensoren ist eine genauere klimatische Situation des Betriebsorts zu generieren. Durch den Austausch von zu erwartenden Belastungsverläufen der einzelnen MPR wird somit die Teilung klimatischer Ressourcen erreicht. Ebenfalls gelingt es durch das Abschalten einiger Systeme durch deren MPR, klimatische Ressourcen für ein einzelnes System zur Verfügung zu stellen.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Bisher werden Schutzmaßnahmen gegen lebensdauerverkürzende Einwirkungen auf die maximal eintretende Belastung hin entwickelt. Dies ist durch den Aspekt bedingt, dass zumeist nur unzureichende Aussagen über tatsächliche klimatische Belastungen einer BG am Einsatzort vorliegen. Die Beschreibung möglicher auftretender Belastungen wird aus diesem Grund in Form eines Bereiches durchgeführt. Statistisch gesehen kann auch bei einer großen Anzahl an Baugruppen nur für einen geringen Teil der maximal zu ertragende Belastungsbereich angesetzt werden. Somit stellen sich vorhandene, jedoch nicht im vollen Umfang genutzte statische Schutzmaßnahmen für die Mehrzahl der Baugruppen als überdimensioniert dar. Durch den Einsatz des Multiparameterreglers zur permanenten Überwachung einwirkender Belastungen und Berechnung einer Einflussnahme mittels geeigneten Betriebs-Interventions-Verfahrens ist die Generierung einer Schutzmaßnahme möglich. Gleichfalls ist die Baugruppe auf eine geringere Belastung zu dimensionieren, woraus wiederum eine Reduzierung der statischen Schutzmaßnahmen und die damit verbundene Senkung von Gewicht, Kosten und Größe ermöglicht wird. Das erarbeitete Verfahren stellt einen Beitrag zum belastungsreduzierten Betrieb und somit zur effektiveren Nutzung einer elektronischen Baugruppe dar.

Es wurde dazu neben dem Multiparameterregler das Betriebs-Interventions-Verfahren entwickelt, welches die für ein Bauteil relevanten Belastungen miteinander verknüpft, in Relationen zueinander stellt und eine Einflussnahme in die zu schützende Schaltung vornimmt. Im weiteren Verlauf nähert das Verfahren ebenfalls durch gezielte Einflussnahme, die Lebensdauer des zu überwachenden Bauteils an dessen Maximum ertragbarer Belastungen gezielt an. Um dies zu erreichen, wird im Betriebs-Interventions-Verfahren zyklisch eine Erfassung und Verarbeitung der gemessenen Belastungswerte durchgeführt. Die gewonnenen Daten werden mit den zuvor gespeicherten Daten akkumuliert und ein belastungssenkender Eingriff berechnet und hardwareseitig durchgeführt.

Um die Leistungsfähigkeit dieser Schutzmaßnahme zu ermitteln und diese zu quantifizieren, wurde eine Schalteranordnung ausgewählt und als Demonstrator in Form einer Simulation und als BG realisiert. Der Demonstrator wurde mit lebensdauerverkürzenden Belastungen klimatischer und elektrischer Natur bekannter Höhe beaufschlagt. Für die Prüfung der Einsatzfähigkeit des Multiparameterreglers und des Betriebs-Interventions-Verfahrens wurde der Demonstrator in der Simulation und als Baugruppe ohne Multiparameterregler betrieben und die erreichte Belastungsreduzierung mit dem Betrieb mit Multiparameterregler verglichen. Der Multiparameterregler und das Betriebs-Interventions-Verfahren wurden anhand des Demonstrators und der vorliegenden Belastungen dimensioniert und prototypisch als Hardware und Software realisiert. Diesbezüglich wurde eine Dimensionierung der Sensorik, des Controllers und der Eingriffsansteuerung vorgenommen. Das Betriebs-Interventions-Verfahren beinhaltet neben der Eingabe und Festlegung von Parametern und Berechnungsalgorithmen ebenso die Prognostizierung der noch verfügbaren Lebensdauer.

Voraussetzung für den Einsatz des Multiparameterreglers ist die Kenntnis bzw. Bereitstellung des Verlaufs der maximal ertragbaren Menge an Belastungen für jede zu überwachende elektrische und klimatische Größe. Da diese von der elektrischen Beanspruchung der Baugruppe und der klimatischen Situation am Einsatzort abhängig sind, stehen diese auch vom Hersteller nicht zur Verfügung und müssen im Vorfeld ermittelt werden. Diese Werte wurden exemplarisch für die temperaturabhängige Lebensdauer eines Transistors ermittelt. Darüber hinaus ist eine Abfolge zur Prüfung der zu schützenden Baugruppe auf Eignung für den Einsatz des Multiparameterreglers bezüglich des erforderlichen Eingriffsvermögens erstellt worden.

Der entwickelte Multiparameterregler beschränkt sich ausschließlich auf die Erfassung thermischer, mechanischer und elektrischer Größen mit dem Ziel der intelligenten und dynamischen Reaktion zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Baugruppe. Im praktischen Einsatz ist die Erstellung des Multiparameterreglers mit einem zusätzlichen (finanziellen) Aufwand an Material, Energie, Arbeit und Zeit verbunden. Ob die erforderliche Neugestaltung der

Schaltung und die Ermittlung der Verläufe der maximal ertragbaren Belastungen als Mehraufwand die Vorteile des Multiparameterreglers rechtfertigen, muss anhand des jeweiligen Einsatzzwecks der zu schützenden Baugruppe geprüft werden. Hier ist die Entscheidung hinsichtlich ökonomischer Punkte ausschlaggebend. Für Kosten und Zeitersparnisse ist die Integration in ein Entwicklungstool (z. B. Altium Designer) denkbar.

Mit dem vorgestellten Verfahren wurde gezeigt, dass sich eine permanente Erfassung und Reaktion auf vorherrschende Belastungssituationen als Alternative zu herkömmlichen Schutzmaßnahmen behaupten kann.

Der Multiparameterregler ist in der Lage, durch Nutzung der Informationen des Betriebs ohne Multiparameterregler und durch die im Betrieb erhobenen Daten eine Aussage zur restlichen statistischen Lebensdauer bereits während des Betriebs zu generieren. Weitere Einsatzmöglichkeiten sind bei Vernetzung mehrerer Multiparameterregler erkennbar. Die ab dem Beginn des Betriebs vorliegenden elektrischen Messwerte, welche eine Aussage zum tatsächlichen Zustand des Bauteils bereitstellen, können durch den Multiparameterregler abgegeben werden. Diese Meldung enthält beispielsweise Informationen zum drohenden Ausfall oder einer erforderlichen Reparatur. Die Teilung der sensorischen Daten, also die Ausgabe erhobener Daten und die Annahme fremd erhobener Daten, ermöglicht eine genauere Bildung der klimatischen Situation vor Ort. Die Informationen müssen bei einer eventuellen späteren Erweiterung des bestehenden Systems und der damit verbundenen Dimensionierung von Schutzmaßnahmen beachtet werden. Des Weiteren stellt sich die Weitergabe der Information zwischen Multiparameterreglern ebenfalls als sinnvoll heraus. In einem bestehenden Verbund mehrerer Multiparameterregler kontrollierter elektronischer Baugruppen ist der Vorteil des gegenseitigen Schutzes, aber auch die gemeinsame Nutzung des Klimas vor Ort erkennbar. Analog dazu kann durch die Informationsverteilung zwischen den Multiparameterreglern ein bevorstehender stärkerer Eingriff in das Klima, durch z. B. eine Erhöhung der Verlustleistung, gemeldet und die restlichen Multiparameterregler dazu veranlasst werden, darauf zu reagieren. Zur näheren Erklärung soll folgendes Beispiel mit der Temperatur als Störgröße dienen.

Denkbar ist ein geschlossener Raum mit eigenem lokalem Klima, in dem sich Systeme befinden, welche durch einen Multiparameterregler gesteuert werden. Im normalen Betriebsmodus geben die örtlichen Systeme eine Wärmemenge von bis zu 200 Ws an die Umgebung ab. Gleichzeitig ist die räumliche Situation so beschaffen, dass die 200 Ws an das außerhalb des Raumes liegende äußere Klima abgegeben werden. Unter dieser Bedingung stellt sich eine Temperatur innerhalb eines bestimmten Bereiches ein. Jeder Multiparameterregler erfasst permanent den Energiebedarf der nachfolgenden Stufe. So erkennt jener eine plötzliche Erhöhung des Energiebedarfs und berechnet daraus die von seinem System erzeugte Verlustenergie von beispielsweise 90 Ws. Bei der Erkennung eines erhöhten Energiebedarfs der angeschlossenen nachfolgenden Stufe gibt der Multiparameterregler des betroffenen Systems diese Information an die mit ihm vernetzten Multiparameterregler ab. Deren Reaktion ist es, durch Funktionsanpassung eine Senkung der Verlustleistung ihrer Systeme zu erwirken, um in Summe weiterhin eine Verlustenergie von 200 Ws an die Umgebung abzugeben.

Anhang

A.1 Elektrische Eigenschaften des Transistors

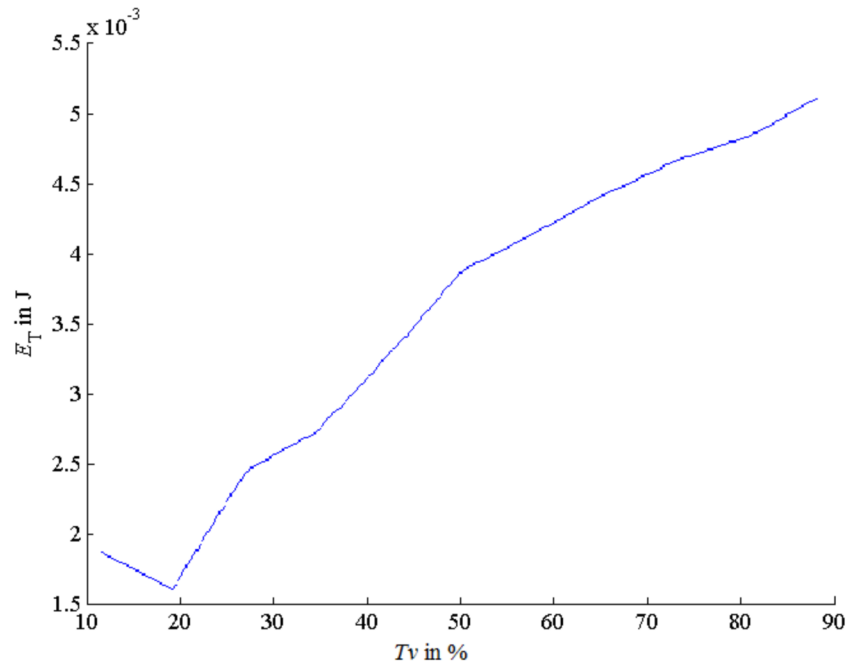


Abbildung A1.1: Energieumsetzung am Transistor bei variablen Tastverhältnissen

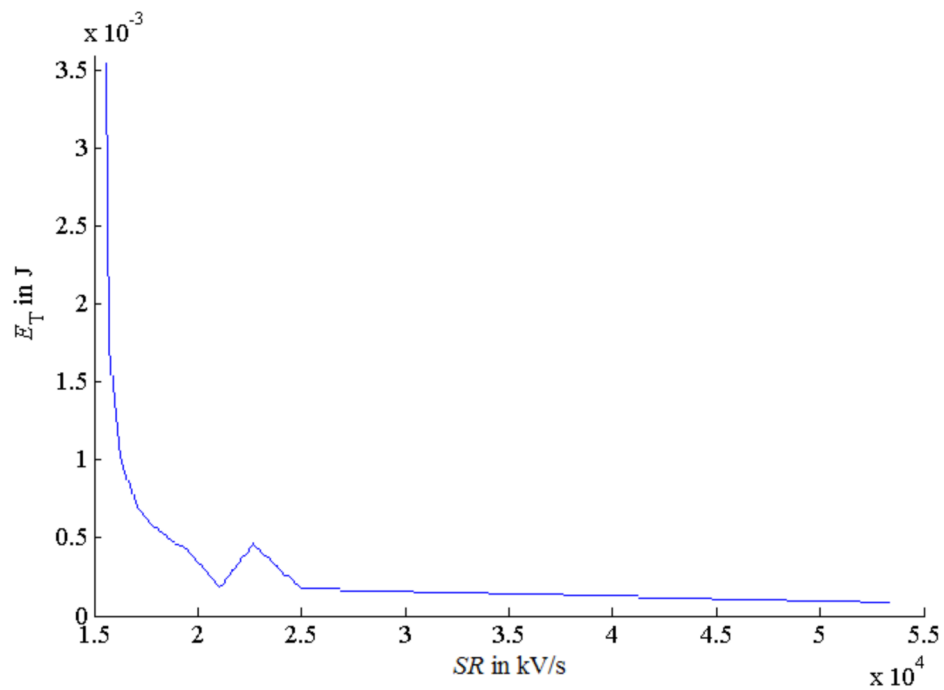


Abbildung A1.2: Energieumsetzung am Transistor bei variabler Slewrate

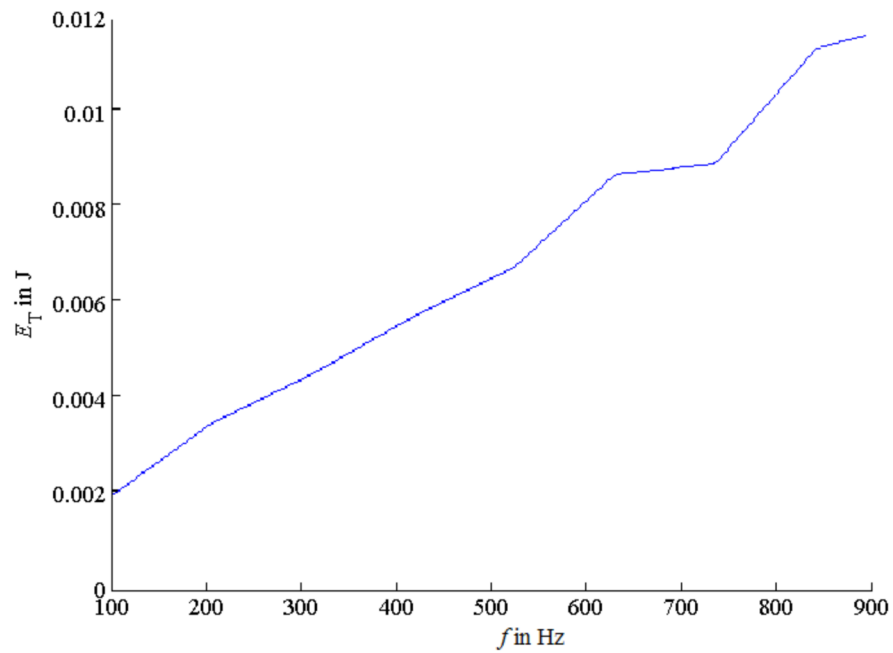
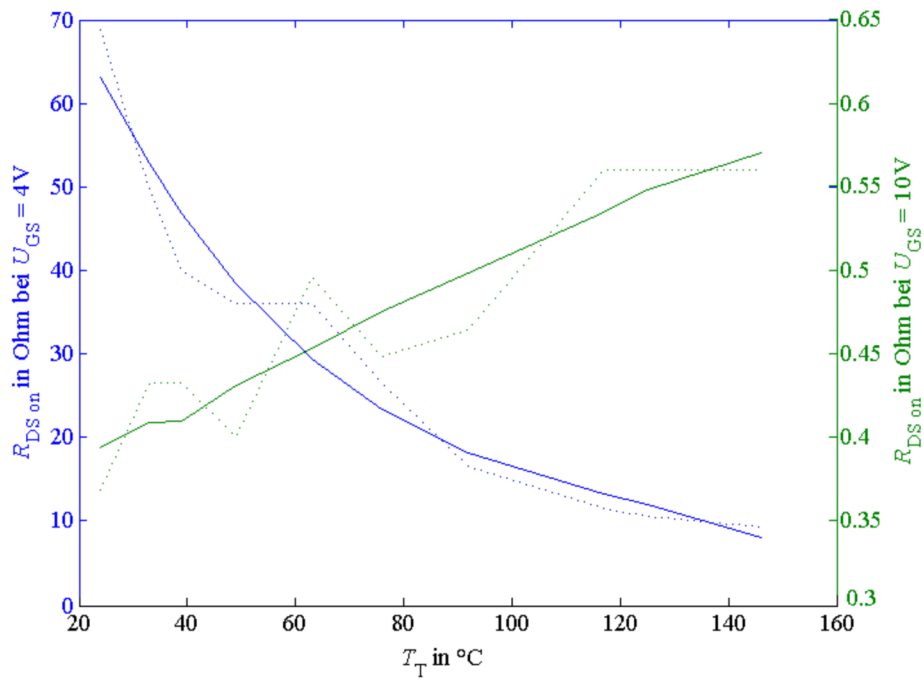


Abbildung A1.3: Energieumsetzung am Transistor bei variabler der Frequenz

Die Abbildungen A1.1 bis A1.3 stellen die Energieumsetzung am Transistor in Abhängigkeit der Einflussnahmeparameter dar, siehe Abschnitt 5.3.

Abbildung A1.4: $R_{DS\ on}$ des Transistors in Abhängigkeit der Temperatur

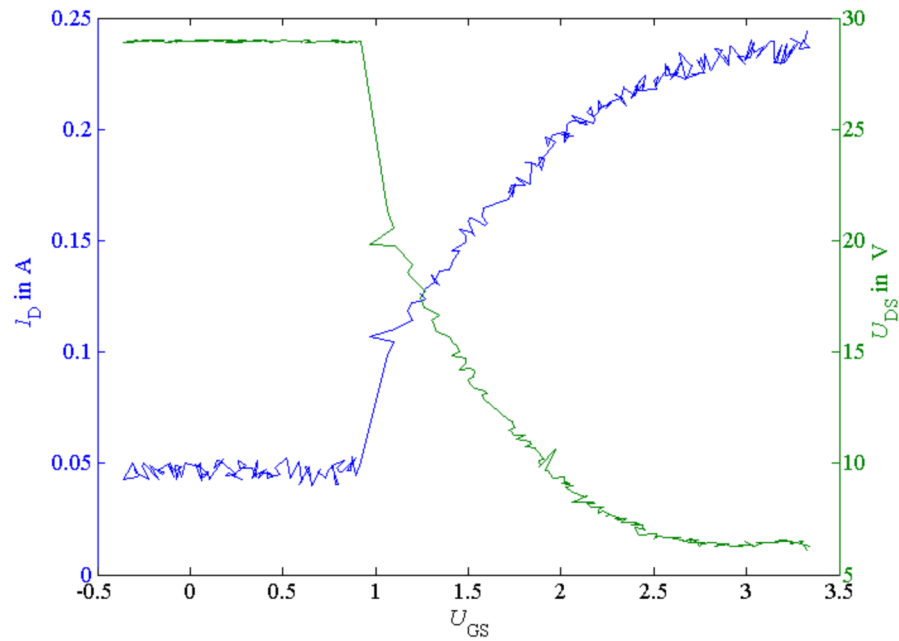


Abbildung A1.5: Drainstrom und Drain-Source-Spannung des Mosfet in Abhängigkeit der Gate-Source-Spannung

Anhand der in Abbildung A1.5 dargestellten Verläufe wird die Einsatzschwelle der variablen Slewrates (siehe Abbildung A1.6), festgelegt.

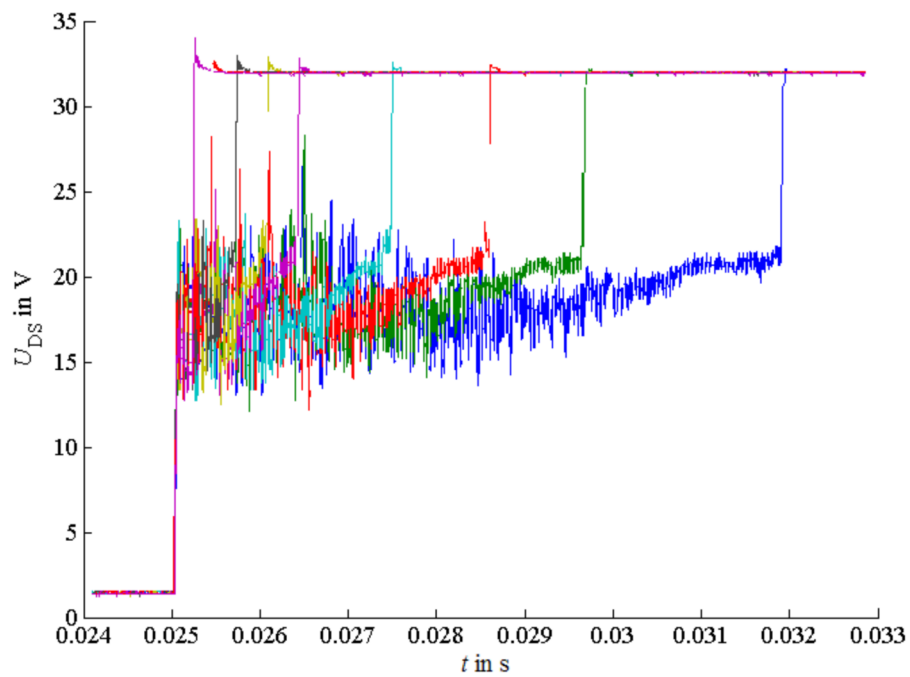


Abbildung A1.6: Beispiele variabler Slewrates im einstellbaren Bereich

A.2 Beschreibung des Umgebungsklimas

IEC 60721-3-3 Klimatische Bedingungen		IEC 60068-2 Klimatische Prüfungen				Anm.
Umwelteinflussgrößen	Klasse	Nächstliegende IEC 60068-2	Empfohlene Prüfung	Prüfschärfegrade	Prüfverfahren	Nr.
	3K3					
<p>Bild 1 – Klasse 3K3 Klimatogramm Relative Luftfeuchte (%r.F.)</p>					x) Trockene Wärme IEC 60068-2-2: Bb/Bd y) Kälte IEC 60068-2-1: Ab/Ad z) Feuchte Wärme IEC 60068-2-56: Cb	1), 2) 1), 2) 1), 3)
a) Niedrige Lufttemperatur	+5°C	Wie empfohlene Prüfung	Siehe oben			
b) Hohe Lufttemperatur	+40°C	Wie empfohlene Prüfung	Siehe oben			
c) Niedrige relative Luftfeuchte	5%	Wie empfohlene Prüfung	Siehe oben			
d) Hohe relative Luftfeuchte	85%	Wie empfohlene Prüfung	Siehe oben			
e) Niedrige absolute Luftfeuchte	1g/m³	Wie empfohlene Prüfung	Siehe oben			
f) Hohe absolute Luftfeuchte	25g/m³	Wie empfohlene Prüfung	Siehe oben			
g) Rasche Änderung der Lufttemperatur	0,5°C/min.	60068-2-14: Nb	Normal nicht erforderlich – Siehe Anmerkung 4)			4)
h) Niedriger Luftdruck	70kPa	60068-2-13: M	Normal nicht erforderlich – Siehe Anmerkung 5)			5)
i) Hoher Luftdruck	106kPa	Keine IEC 60068-2 Prüfung	Normal nicht erforderlich – Siehe Anmerkung 6)			6)
j) Sonnenstrahlung	700 W/m²	60068-2-5: Sa Verfahren C	Feuchte Wärme Prüfung um 10°C erhöht durchführen und Materialien auf photochemische Reaktionen untersuchen	+5°C bis Umg.Temp. 2 Zyklen 1°C/min t1=3		7)
k) Wärmestrahlung Auswahl durch den Anwender 3Z1, 3Z2, oder 3Z3		Keine IEC 60068-2 Prüfung	Normal nicht erforderlich – Siehe Anmerkung 8)			8)

Abbildung A2.1: Klimatogramm der Klimaklasse 3K3

IEC 60721-3-3 Klimatische Bedingungen		IEC 60068-2 Klimatische Prüfungen				
Umwelteinflussgrößen	Klasse	Nächstliegende IEC 60068-2		Empfohlene Prüfung		Anm.
	3K3	Prüfverfahren	Prüfschärfegrade	Prüfverfahren	Prüfschärfegrade	Nr.
l) Luftbewegung Auswahl durch den Anwender 3Z4, 3Z5 oder 3Z6	Nein	Keine IEC 60068-2 Prüfung		Normal nicht erforderlich – Siehe Anmerkung 9)		9)
m) Betauung	Nein					
n) Niederschlag (Regen, Schnee, Hagel usw.)	Nein					
o) Wasser (außer Regen)	Nein					
p) Eisbildung und Vereisung	Nein					

ANMERKUNG 'nein' in der Spalte Klasse bedeutet, dass keine Bedingung nach IEC 60721-3-3 spezifiziert ist

Abbildung A2.2: Klimatogramm der Klimaklasse 3K3 (Fortsetzung) [DKE04]

IEC 60721-3-3 Dynamische Umweltbedingungen		IEC 60068-2 Dynamische Prüfungen				
Umwelteinflussgrößen	Einheit	Nächstliegende IEC 60068-2		Empfohlene Prüfungen		Anm.
		Prüfverfahren	Prüfschärfegrade	Prüfverfahren	Prüfschärfegrade	Nr.
a) Schwingen, sinusförmig						
Amplitude der Auslenkung:	mm	60068-2-6 Fc-Schwingen, sinusförmig	0,35 1,0 1-150	Prüfung normal nicht erforderlich Siehe Anmerkung 1)		1)
Amplitude der Beschleunigung	m/s ²					
Frequenzbereich:	Hz					
Zahl der Achsen			3			
Dauer /Achse			10			2)
b) Stöße						
Gesamt-Schock-Antwort-Spektrum	m/s ²	60068-2-27 Ea: Stöße halb sinus)	50 30 3 6	Prüfung normal nicht erforderlich Siehe Anmerkung 3)		3)
Spitzenbeschleunigung	ms					
Zahl der Stöße pro Richtung Stossrichtungen						

Es wird empfohlen entweder Sinus- oder Rauschprüfungen zu wählen (nicht beide).

Abbildung A2.3: Klimatogramm der Klimaklasse 3M1 [DKE04]

Die Abbildungen A2.1 bis A2.3 stellen das vollständige Klimatogramm der Klimaklasse 3K3 und für die mechanische Belastung die Klimaklasse 3M1 dar.

A.3 Temperaturabhängige Ausfallzeiten des Transistors

Tabelle A3.1: Temperaturabhängige Ausfallzeiten

t_b in min	T_T in °C	t_b in min	T_T in °C	t_b in min	T_T in °C	t_b in min	T_T in °C
815	333	459	294	2194	268	7150	202
491	332	1128	304	3635	269	4700	239
751	318	746	288	2600	262	7112	205
366	304	431	310	1428	252	6665	236
615	311	1011	318	1482	247	4161	236
726	339	1026	282	1273	259	5078	230
475	312	1527	280	2857	277	3934	217
847	334	2032	300	1326	240	6750	233
453	326	1768	298	2387	248	7831	230
803	304	2152	276	1272	245	8705	203
869	323	1098	279	3416	249	7531	220
651	302	1808	276	3747	251	7987	230
797	311	1885	282	2197	237	5744	206
566	308	2194	300	2364	222	8593	225
796	316	2196	281	2964	244	8373	233
425	327	827	265	5429	254	11910	203
380	313	1620	272	3956	259	5884	214
643	327	2102	281	2905	229	9985	215
389	307	1398	282	5048	241	13708	181
845	319	1819	282	3845	234	7083	186
426	302	1951	261	5669	246	8299	204
1044	282	1468	266	4863	226	9920	193
706	298	1304	270	3733	243	9748	196
691	312	1004	286	3572	255	7336	204
969	301	1047	271	4533	227	6541	188
663	315	2067	248	3312	245	13966	193
1180	306	2428	275	5998	252	13644	189
870	283	1698	256	2508	259	14565	208
647	297	2269	279	2095	229	8727	213
1007	291	2788	274	2443	244	11253	192
549	320	3443	255	8304	216	14650	193
557	311	2412	271	5214	222	11627	212
1042	320	3496	273	5646	208	12986	191
983	297	2086	257	3744	238	10521	189
1047	300	3505	264	8141	219	11425	195

A.4 Erstellung des Spice Modells für den Transistor IRF640

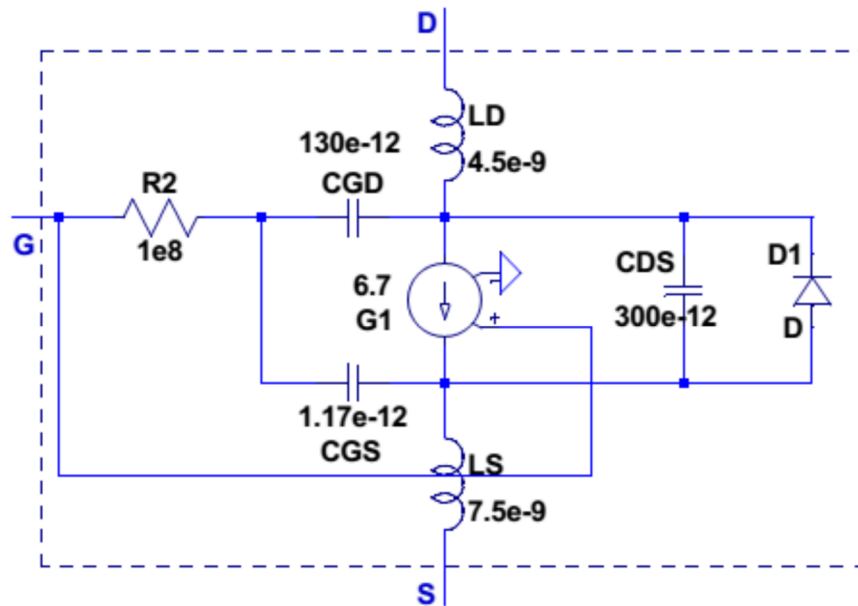



Abbildung A4.1: Ersatzschaltung des Transistor [IRF17]

Tabelle A4.2: Ausschnitt aus der Tabelle der Spezifikationswerte des Transistors IRF640 [IRF640]

Forward Transconductance	g_{fs}	$V_{DS} = 50 \text{ V}, I_D = 11 \text{ A}^b$	6.7	-	-	S
Dynamic						
Input Capacitance	C_{iss}	$V_{GS} = 0 \text{ V},$ $V_{DS} = 25 \text{ V},$ $f = 1.0 \text{ MHz},$ see fig. 5	-	1300	-	pF
Output Capacitance	C_{oss}		-	430	-	
Reverse Transfer Capacitance	C_{rss}		-	130	-	
Total Gate Charge	Q_g	$V_{GS} = 10 \text{ V}$ $I_D = 18 \text{ A}, V_{DS} = 160 \text{ V},$ see fig. 6 and 13 ^b	-	-	70	nC
Gate-Source Charge	Q_{gs}		-	-	13	
Gate-Drain Charge	Q_{gd}		-	-	39	
Turn-On Delay Time	$t_{d(on)}$	$V_{DD} = 100 \text{ V}, I_D = 18 \text{ A},$ $R_g = 9.1 \Omega, R_D = 5.4 \Omega,$ see fig. 10 ^b	-	14	-	ns
Rise Time	t_r		-	51	-	
Turn-Off Delay Time	$t_{d(off)}$		-	45	-	
Fall Time	t_f		-	36	-	
Internal Drain Inductance	L_D	Between lead, 6 mm (0.25") from package and center of die contact 	-	4.5	-	nH
Internal Source Inductance	L_S		-	7.5	-	
Gate Input Resistance	R_g	$f = 1 \text{ MHz},$ open drain	0.5	-	3.6	Ω

Die Umwandlung der Gate-Source-, Drain-Source- und Gate-Drain-Kapazität zu der Input-, Output- und Reverse-Transfer Kapazität erfolgt mittels des Zusammenhangs (A4.3).

$$\begin{aligned}
 C_{iss} &= C_{GS} + C_{GD} \\
 C_{iss} &= C_{GD} \\
 C_{oss} &= C_{DS} + C_{GD}
 \end{aligned}
 \tag{A4.3}$$

Die weiteren Werte für das Modell in Abbildung A4.1 werden aus der Tabelle A4.2 entnommen.

A.5 Belastung an den Bauteilen des Demonstrators

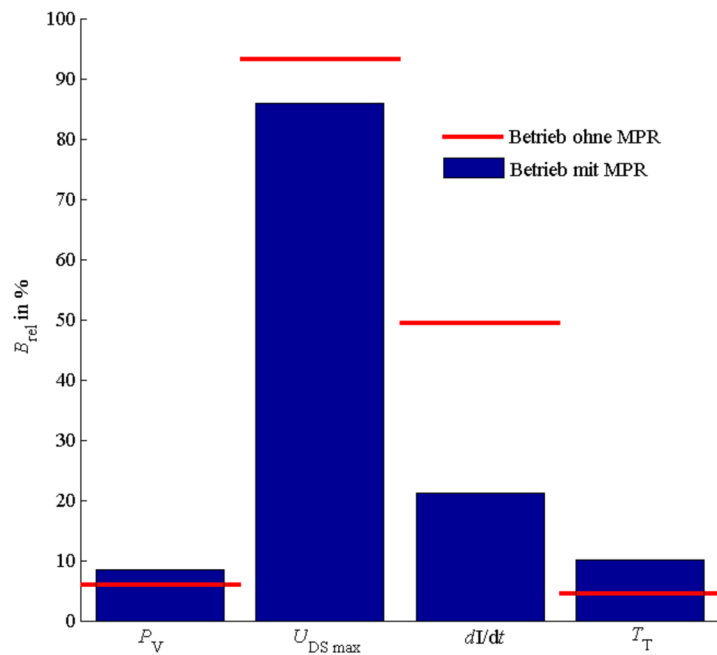


Abbildung A5.1: Vergleich der Belastung am Bauteil R_2 in den Betriebsarten mit und ohne MPR

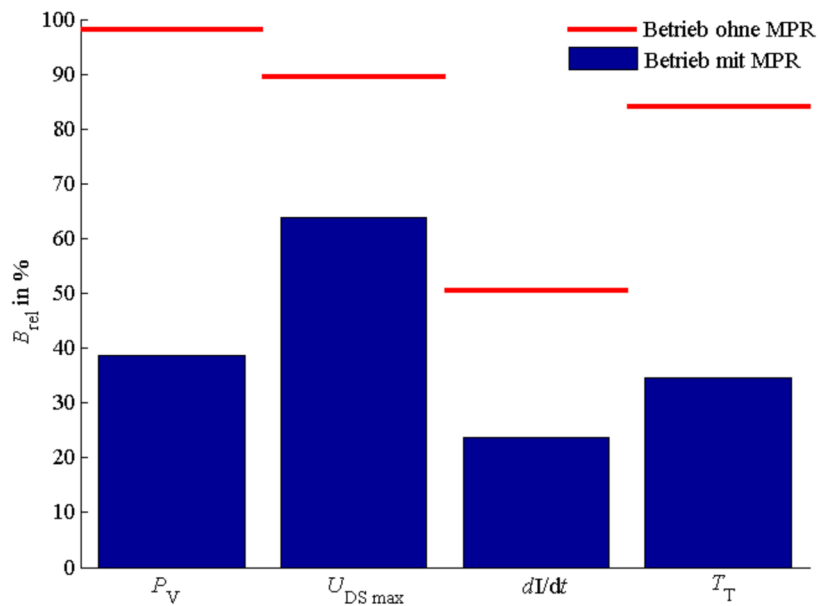
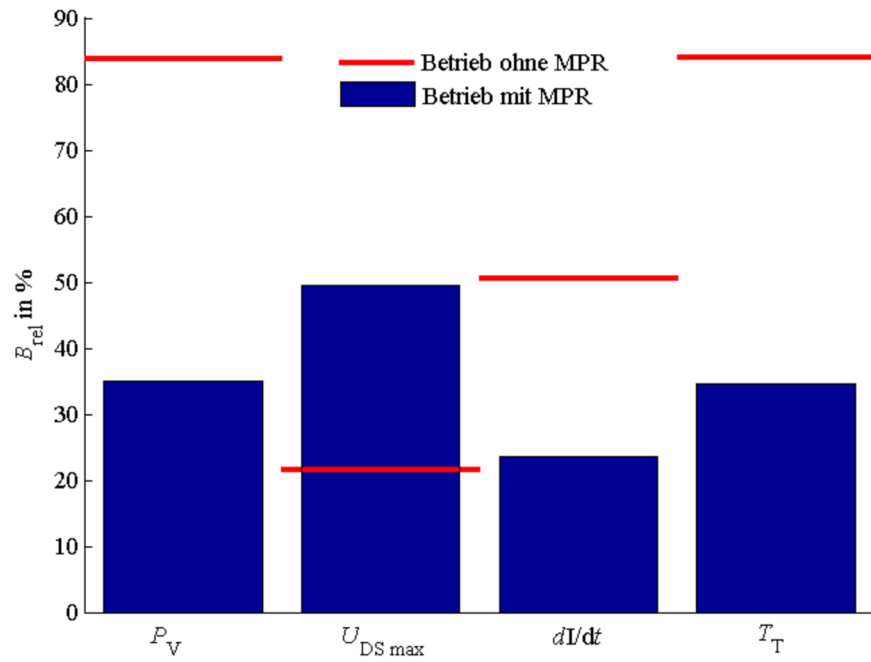
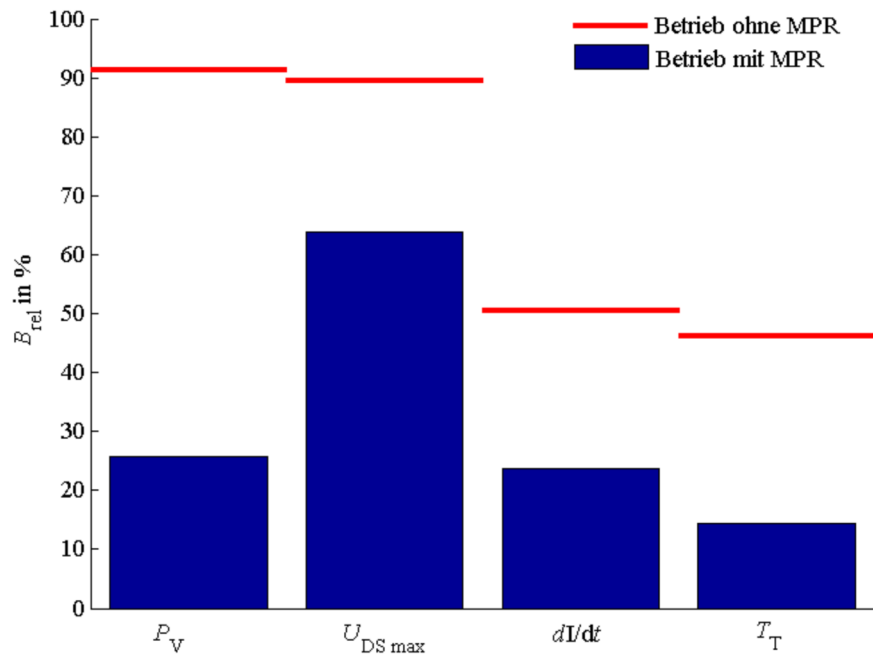


Abbildung A5.2: Vergleich der Belastung am Bauteil L_2 in den Betriebsarten mit und ohne MPR

Abbildung A5.3: Vergleich der Belastung am Bauteil D_1 in den Betriebsarten mit und ohne MPRAbbildung A5.4: Vergleich der Belastung am Bauteil C_1 in den Betriebsarten mit und ohne MPR

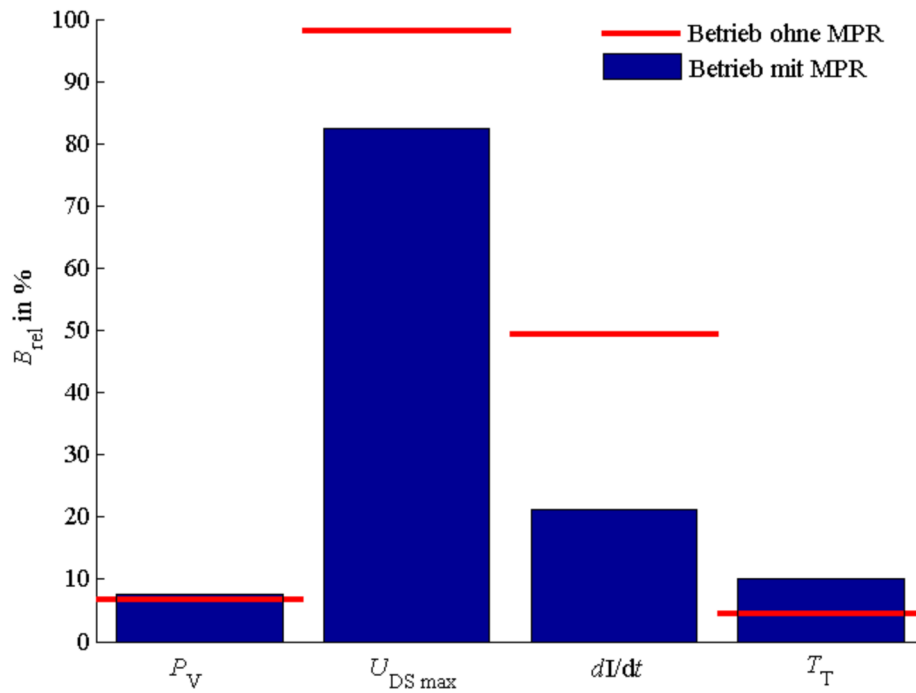


Abbildung A5.6: Vergleich der Belastung am Bauteil L_1 in den Betriebsarten mit und ohne MPR

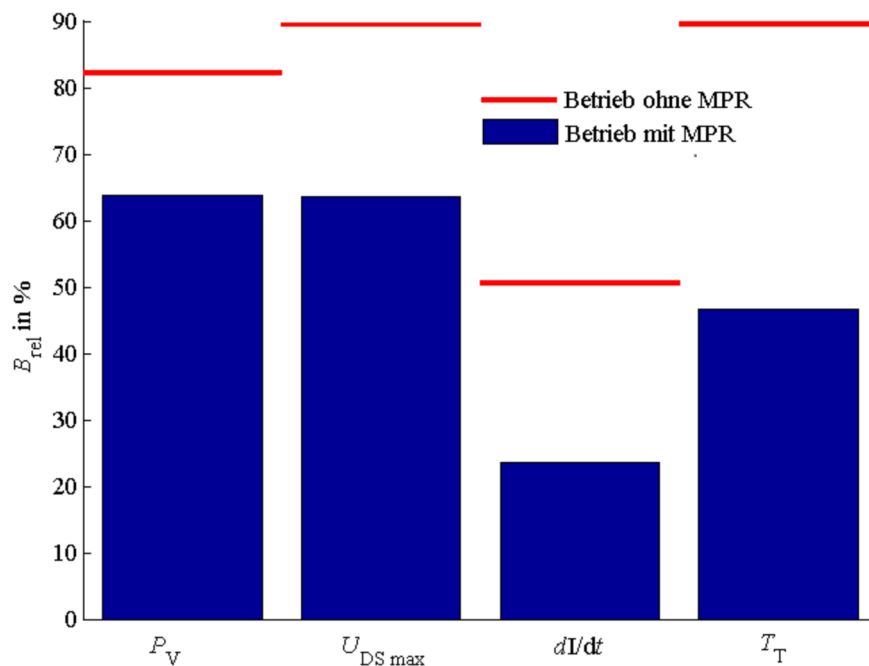


Abbildung A5.5: Vergleich der Belastung am Bauteil R_1 in den Betriebsarten mit und ohne MPR

Die Abbildungen A5.1 bis A5.6 stellen die sich im Betrieb ohne MPR und im Betrieb mit MPR ergebenden Belastungen aller Bauteile, ergänzend zu Abbildung 6.9 dar. Die dargestellten Werte sind Ergebnisse aus der Simulation.

A.6 Beispiele für eine akkumulierte Belastung

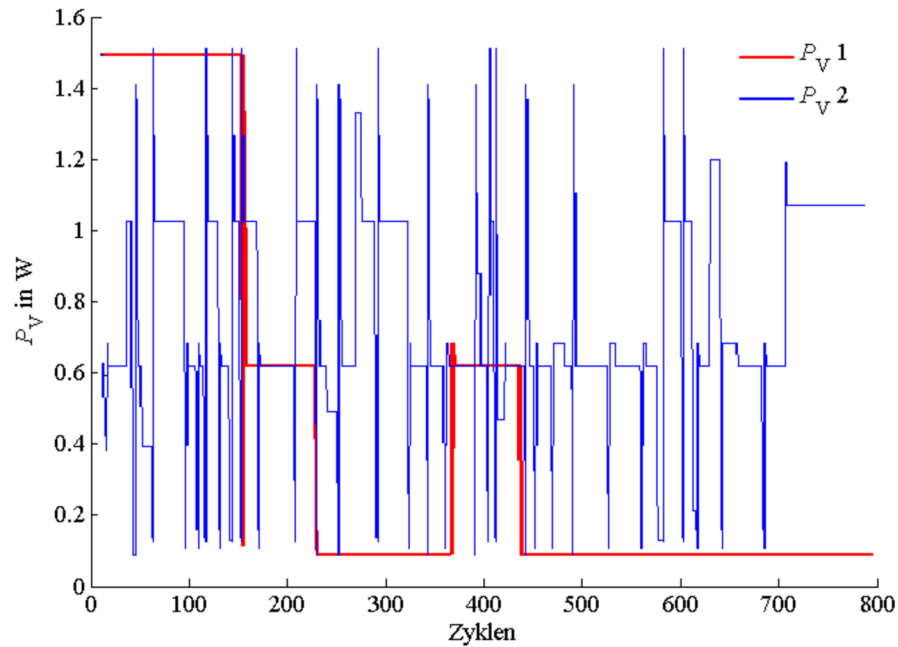


Abbildung A6.1: Beispiele für zeitliche Verläufe der Verlustleistung

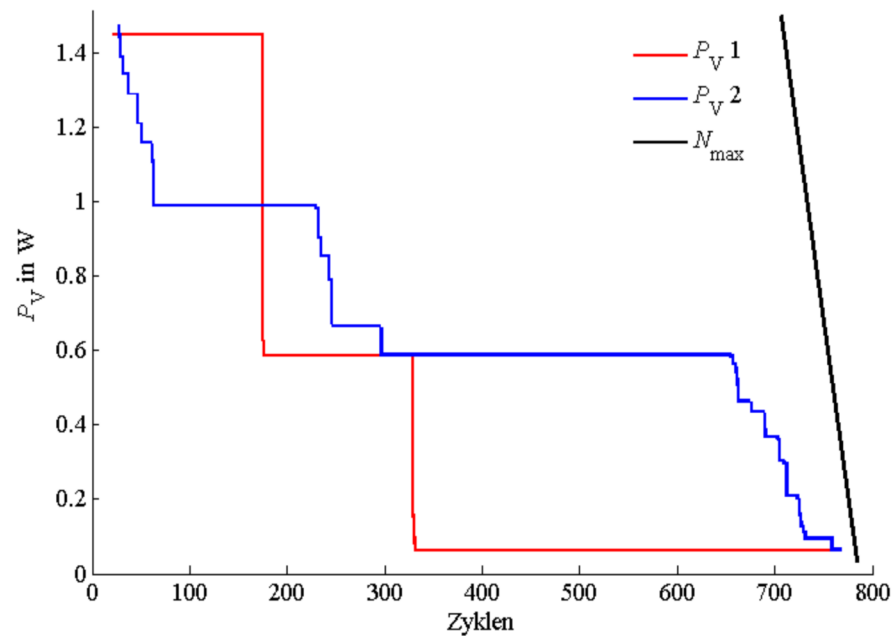


Abbildung A6.2: Beispiele für akkumulierte Belastungen der in Abbildung A6.1 dargestellten Verläufe

A.7 Weitere Punkte zum Verhalten des MPR

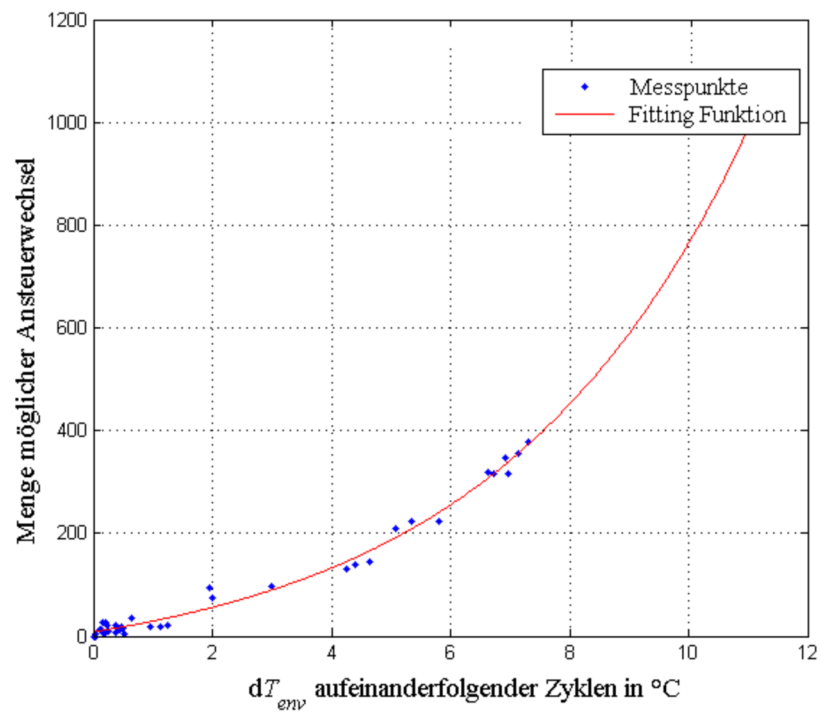


Abbildung A7.1: Einflussnahme des MPR in Abhängigkeit der Änderung der Außentemperatur

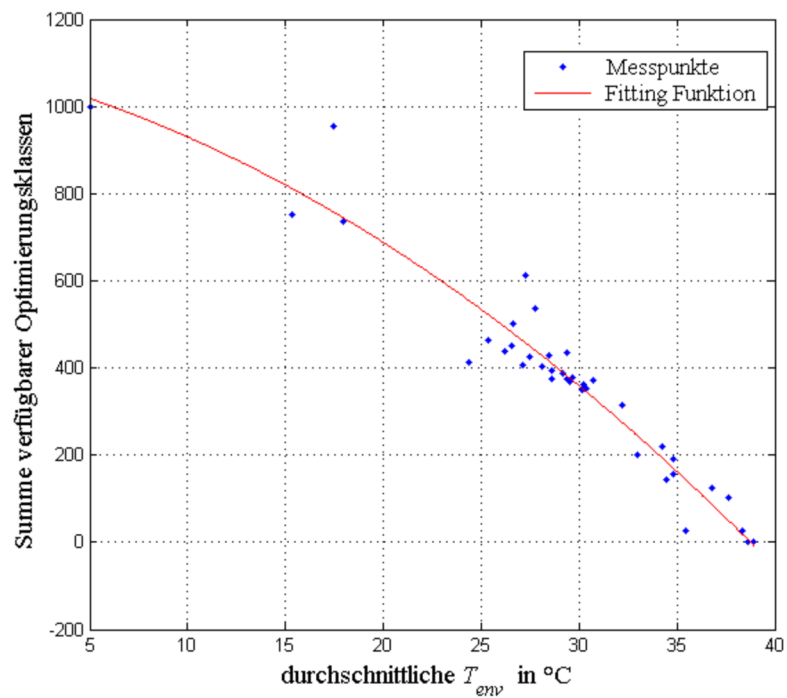


Abbildung A7.2: Einflussnahme des MPR in Abhängigkeit zur Außentemperatur

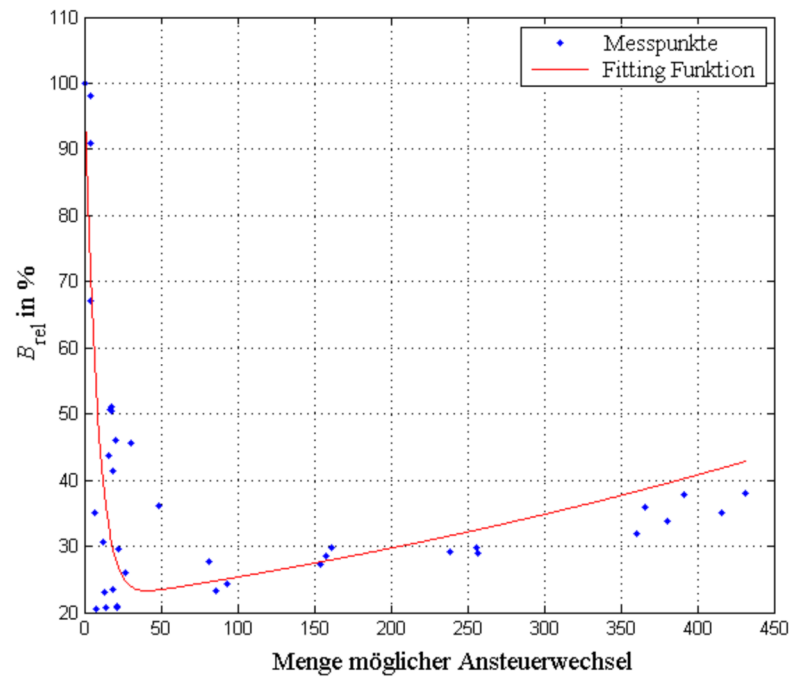


Abbildung A7.3: Die relative Belastung der BG in Abhängigkeit zur Einflussnahme des MPR

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Ausfallrate in Abhängigkeit der Formparameter.....	18
Abbildung 2.2: Beispielhafte Wöhlerkurve mit akkumulierten Lastkollektiven nach [Köh12].....	25
Abbildung 2.3: Grundlegende Varianten von Schutzmaßnahmen.....	28
Abbildung 2.4: Beispielhafte Temperaturverteilungen.....	32
Abbildung 2.5: Verlauf der Überlebenswahrscheinlichkeit mit Gegenüberstellung möglicher Redundanzen.....	35
Abbildung 2.6: Entwicklung der Bauteilgröße und Senkung der kritischen Feldstärke in den nächsten Jahren [Ber17].....	39
Abbildung 2.7: Struktur und Arbeitsprinzip des MPR.....	44
Abbildung 2.8: Arbeitsprinzip des MPR als Regelkreis.....	46
Abbildung 3.1: Zusammenhang zwischen Funktionsänderung und Belastungsänderung.....	53
Abbildung 3.2: Unterteilung des Einflussnahmebereichs.....	57
Abbildung 3.3: Beispielhafter Nmax-Verlauf mit Eintrag aller relevanten Informationen.....	58
Abbildung 3.4: Prinzip der Aufgabenteilung für den Algorithmus zur Belastungssenkung.....	60
Abbildung 3.5: Algorithmus zur Ansteuerungsberechnung im BIV.....	61
Abbildung 3.6: Teilalgorithmus der Aufgabe 2.....	62
Abbildung 4.1: Prinzipdarstellung der hard- und softwareseitig erforderlichen Elemente des MPR.....	65
Abbildung 4.2: Darstellung der erforderlichen Punkte zur Erstellung des Nmax- Verlaufs.....	70
Abbildung 4.3: Beispielhafte Darstellung einer erfassten Belastung als Histogramm.....	71
Abbildung 4.4: Histogramm des Temperaturverlaufs am Transistor in der 24-h- Stichprobe.....	73
Abbildung 4.5: Resultierender Nmax-Verlauf.....	74
Abbildung 5.1: Demonstratorschaltung.....	76
Abbildung 5.2: Frequenzspektrum der Schwingung des Lüfters.....	77
Abbildung 5.3: Akkumulierte mechanische Belastung.....	78
Abbildung 5.4: Zusammenhang von Ursache und Wirkung der zu ertragenden Belastungen an der elektronischen Baugruppe.....	80
Abbildung 5.5: Einflussnahme auf die Verlustleistung des Transistors durch die	

Variation der Parameter Frequenz, Tastverhältnis und Slewrate.	83
Abbildung 5.6: Messanordnung.....	85
Abbildung 5.7: Beeinflussung der Gesamtbelastung durch Änderung der Beeinflussungsparameter.....	87
Abbildung 5.8: Thermisches Ersatzschaltbild des Transistors.....	89
Abbildung 5.9: Zeitlicher Verlauf der Temperatur und der Verlustleistung am leitenden Transistor.....	90
Abbildung 5.10: Beispielhafter Verlauf der Temperatur bei Eintrag einer Wärmemenge zwischen zwei Messzeitpunkten.....	91
Abbildung 5.11: Im Vergleich zu Abbildung 3.5 und 3.6 vervollständigter Algorithmus des Betriebs-Interventions-Verfahrens.....	93
Abbildung 5.12: Beispielhafte akkumulierte Belastungen und-Verläufe.....	98
Abbildung 6.1: Darstellung der Variation des Nmax-Verlaufs.....	102
Abbildung 6.2: Darstellung der Messschaltung zur Erfassung des thermischen Nmax-Verlaufs.....	104
Abbildung 6.3: Detailansicht der Transistorbefestigung, der Temperaturmessung und der Heizung des Transistors.....	105
Abbildung 6.4: Messschaltung für die Ermittlung des thermischen Nmax-Verlauf	106
Abbildung 6.5: Zeitlicher Verlauf der UDS bei Beaufschlagung mit 320 °C.....	107
Abbildung 6.6: Resultierende Lebensdauer des Transistors bei unterschiedlichen Temperaturen.....	109
Abbildung 6.7: Ausschnitt aus Abbildung 6.6 zur Bestimmung der Lebensdauer bei 150 °C.....	110
Abbildung 6.8: Simulationsmodell.....	111
Abbildung 6.9: Erreichte Belastungssenkung in der Simulation.....	113
Abbildung 6.10: Menge der erreichten Belastungssenkungen in der Simulation	113
Abbildung 6.11: Erreichte Verzögerung der Nmax-Kontaktierung in der Simulation.....	114
Abbildung 6.12: Gegenüberstellung der Spätausfallraten der Betriebsmodi mit und ohne MPR in der Simulation.....	115
Abbildung 6.13: Arbeitsweise des BIV in Abhängigkeit von der Außentemperatur in der Simulation.....	116
Abbildung 6.14: Dimensionierte Schaltung des Demonstrators.....	117
Abbildung 6.15: Bestandteile des Demonstrators.....	118
Abbildung 6.16: Detaildarstellung des Demonstrators mit kontaktierter MPR- Platine.....	119
Abbildung 6.17: Erreichte Belastungssenkung am Demonstrator.....	120

Abbildung 6.18: Menge der erreichten Belastungssenkungen am Demonstrator	120
Abbildung 6.19: Erreichte Verzögerung des Nmax-Kontakts am Demonstrator.	121
Abbildung 6.20: Gegenüberstellung der Spätausfallraten der Betriebsmodi mit und ohne MPR am Demonstrator und in der Simulation.....	122
Abbildung 6.21: Arbeitsweise des BIV in Abhängigkeit von der Außentemperatur am Demonstrator.....	124
Abbildung 6.22: Unterschiede zwischen dem realen Transistor und dem Spice-Modell.....	126
Abbildung 6.23: Unterschiede zwischen der thermischen Auswirkung im Modell und am realen Transistor.....	127
Abbildung 6.24: Ausfallzeiten in der Simulation und am Demonstrator.....	129
Abbildung 7.1: Umwandlung einer Beispielanordnung in Knoten und Kanten. .	131
Abbildung 7.2: Beispiel für auftretende thermische Belastungen an der Beispielanordnung in Abbildung 7.1.....	132
Abbildung 7.3: Beispielhafter Schaltungsknoten und dessen Abstrahierung.....	135
Abbildung 7.4: Diagramm zur Einordnung des Wirkungspotentials.....	137
Abbildung 7.5: Struktur der funktionalen Abhängigkeit.....	141

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Temperaturbereiche in den verschiedenen Einsatzgebieten [Kra00]...	4
Tabelle 2.2: Ausfallgrenze für Sicherheitsfunktionen [DKE11].....	7
Tabelle 2.3: Auswahl der Hauptauswirkungen der einzelnen Umweltbedingungen [DKE95].....	8
Tabelle 2.4: Energie zur Zerstörung von Halbleiterbauteilen (Auswahl).....	10
Tabelle 2.5: Aufgaben der Schutzmaßnahmen [Kra00].....	27
Tabelle 2.6: Gegenüberstellung von Regelkreisgrößen und vom MPR genutzte Größen.....	47
Tabelle 4.1: Punkte des Nmax-Verlaufs und deren Zusammensetzung.....	70
Tabelle 5.1: Aufgaben des MPR am Demonstrator.....	79
Tabelle 5.2: Verarbeitungsprozesse elektrischer Energie.....	81
Tabelle 5.3: Gemessene Rohdaten.....	86
Tabelle 5.4: Berechnete Daten.....	86
Tabelle 5.5: Bereiche und Verteilung der in der LuT gespeicherten Belastungen.	87
Tabelle 5.6: Beispielhafte LuT.....	97
Tabelle 5.7: Hilfsmatrix.....	98
Tabelle 5.8: Spaltenvektor.....	98
Tabelle 5.9: Matrix Nm.....	99
Tabelle 5.10: Übersicht über die relativen Belastungen, ausgehend vom Vektor	100
Tabelle 6.1: Auswahl an Spezifikationswerten der Klimaklasse 3K3 und 3M1 [DKE04].....	101
Tabelle 6.2: Gegenüberstellung der erreichten Verzögerung in der Simulation und am Demonstrator.....	123
Tabelle 7.1: Tabellarische Form der auftretenden Belastungen der Beispielbaugruppe.....	132
Tabelle 7.2: Unterteilung elektronischer Bauteile nach Flexibilität.....	135

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

BG	Baugruppe
BIV	Betriebs-Interventions-Verfahren
BTI	Negative/ positive Bias Temperature Instability
CMOS	Complementary metal-oxide-semiconductor
CPU	Central Processing Unit
DIN	Deutsche Institut für Normung
EMI	Electromagnetic interference
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EOS	Electrical Overstress
ESD	Electrostatic Discharge
FK	Funktionskriterium
GOB	Gate Oxide Breakdown
HALT	Highly Accelerated Life Test
HASA	Highly Accelerated Stress Audit
HASS	Highly Accelerated Stress Screening
HCF	High cycle fatigue
KK	Klimakomponente, ein chem. oder phys. Prozess als Teil des Klimas
LCF	Low cycle fatigue
LuT	Lookup-Table
MOSFET	Metal oxide semiconductor field-effect transistor
MPR	Multiparameterregler
MP	Messpunkt
MTBF	Mean time between failures
μC	Mikrocontroller
Ov	Optimierungsverfahren
Ok	Optimierungsklasse
PCB	Printed Circuit Board

RoHS	Restriction of Hazardous Substances, deutsch ‚Beschränkung gefährlicher Stoffe
SR	Slewrates
SIC	Abkürzung für Siliciumcarbid
SMD	Surface-mounted device
Tv	Tastverhältnis
TDDDB	Time-Dependent Dielectric Breakdown
THD	Through Hole Technology
WP	Wirkungspotential
A	Bezeichner der LuT-Matrix
A^*	Bezeichner der neuen LuT-Matrix
A_0	Materialkonstante
b	Systemabhängige Konstante oder Ausfallsteilheit
B	Allg. Belastung
ΔB	Änderung der Belastung
$B_{\text{oMPR}}, B_{\text{mMPR}}$	Auftretende Belastung ohne MPR und mit MPR
B_K	Kontaktwert, der Wert der Belastung den N_{max} Verlauf kontaktiert
C_{th}	Wärmekapazität (J/K)
dI_D/dt	Drainstromgradienten (A/t)
D_i	Eine in Schädigung umgerechnete bisher ertragene Belastung einer Klasse
e_S	Einfluss auf die Schaltung
$e_{S \text{ min}}, e_{S \text{ Max}}$	Minimal und maximal möglicher Einfluss in die Schaltung
E	Energie (Ws)
E_a	Aktivierungsenergie (Ws)
f	Frequenz (Hz)
FK_u, FK_o	Untere und obere Grenze des Funktionskriteriums
$F_{\text{oMPR}}, F_{\text{mMPR}}$	Ursprüngliche Funktion, ohne Beeinflussung des MPR, Funktion mit Beeinflussung des MPR

F_{\min}, F_{\max}	Mindest- und Maximalmaß der zu erfüllenden Funktion
h_i	Menge bisher ertragener Messwerte einer Klasse (Belastungskollektiv)
H_O	Menge aller bisher ertragener Belastungen
i, j	Spalten- und Zeilenindex der Matrizen
i_{Bk}	Index der Klasse, in der die Kontaktierung (voraussichtlich) stattfindet
i_{oMPR}	Index der Klasse, in der die Belastung des Betriebs ohne MPR eintrat
J	Stromdichte (A/m ²)
J_{Lim}	Die kritische Stromdichte für die Elektromigration (A/m ²)
k	Boltzmannkonstante (8,617·10 ⁻⁵ eV/K)
mMPR ,	Indizes mit Multiparameterregler
N	Anzahl der Schwingspiele, Zyklen
\hat{N}	Maximal ertragbare Zyklenanzahl
n_j	Anzahl ertragener Zyklen auf dem Belastungsniveau von b_j
N_j	Anzahl der maximal ertragbaren Zyklen bezogen zum Niveau von b_j
N_{max}	Maximal ertragbare Belastungsmenge
N_{ak}	Bisher ertragene Menge an Belastungen
N_{diff}	Belastungsmengenunterschied zwischen den einzelnen Klassen
N_V	Eine Menge an Zyklen die aufgrund der Senkung der Belastung gegenüber dem Betrieb ohne MPR zur Verfügung stehen, die äußert sich als eine Betriebsdauerverlängerung
N_K	Die Menge an Zyklen bei der die Berührung des ertragenen akkumulierten Belastungsverlaufs mit dem N_{max} Verlauf stattfindet
N_B	Eine in Zyklen geplante Betriebszeit einer Schaltung/ Bauelements
oMPR	Indizes ohne Multiparameterregler
P_V, \bar{P}_V	Verlustleistung, Mittelwert der Verlustleistung (W)
R_{0JA}	Thermischer Widerstand des Transistors (junction to ambient) (K/W)

R_{th}	Allg. Wärmewiderstand (K/W)
$R(t)$	Überlebenswahrscheinlichkeit
T	Statische Temperatur (°C)
ΔT	Temperaturänderung (K)
T_T	Transistortemperatur (°C)
T_{env}	Temperatur des Außenklimas (°C)
T	Periodendauer (s)
t_{mess}	Messzeitraum (s)
t_f	Ausfallzeit, Zeit bis zum Ausfall (s)
t_{50}	Die Zeit, bei der die Hälfte der Leiterbahnstrukturen ausgefallen sind (s)
t_n	Wirkungszeitraum (s)
t_{MA}	Zeitabstand zwischen aufeinanderfolgenden Messungen
U_{DS}	Drain-Source-Spannung (V)
$du(t)/dt$	Spannungsgradient (V/s)
V	Spaltenvektor mit den aktuellen Messwerten
WB	Array, in dem gemessene Werte aus W gespeichert werden
W_{th}	Wärmemenge (Ws)
Z	Zeilenvektor als Ergebnis der Summenbildung
a_{modul}	Auf der Baugruppe erzeugte mechanische Belastung (m/s ²)
a_{env}	Von außen einwirkende mechanische Belastung (m/s ²)
β	Ermüdungsexponent
$\Delta \varepsilon_p$	Dehnung eines Materials (mm)
ε_f	Koeffizient für die ermüdungsrelevante Dehnung,
ε_m	Dehnungsamplitude aufgrund einer mechanischen Kraft
ε_{th}	Dehnungsamplitude aufgrund thermischer Einwirkung
τ	Tau, Zeitspanne für die on-Zeit im Tastverhältnis (s)
$\Theta(x)$	Heaviside Funktion

Literaturverzeichnis

- [Ael16] all-electronics:
Elektrochemische Migration als Ursache von Felddausfällen, all-electronics, 13.09.2016,
<<http://www.all-electronics.de/elektrochemische-migration-vermeidung-von-felddausfaellen-teil-ii>>, (28.08.17)
- [Ael17] all-electronics:
Obsoleszenzmanagement für elektronische Baugruppen, 10.09.2014,
<<http://www.all-electronics.de/obsoleszenzmanagement-fuer-elektronische-baugruppen/>>, (28.08.17)
- [ASTM07] ASTM International:
Norm ASTM E 466-07 Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, 2007
- [Bah11] Bahancova N.:
FR4 ist nicht gleich FR4: Was zu beachten ist, um Delamination zu vermeiden, 2011, <<http://www.alpha-board.de/fertigungsservice/fr4-ist-nicht-gleich-fr4-was-zu-beachten-ist-um-delamination-zu-vermeiden>>, (24.05.12)
- [Ben04] Benz S.:
Eine Entwicklungsmethodik für sicherheitsrelevante Elektroniksysteme im Automobil, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2004
- [Ber04] Bertsche B.; Lechner G.:
Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten (VDI-Buch), Springer Verlag, ISBN-13: 978-3540208716, 2004
- [Ber17] Berndt, H.: ESD-Schutz, Normen, Konzepte und Messtechnik in der Praxis (Kontakt & Studium), expert Verlag, ISBN: 978-3-8169-32352-, 2017
- [Bir91] Birolini A.:
Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme: Theorie, Praxis, Management, Springer Verlag, ISBN-13: 978-3540540670, 1991
- [Bil06] Bihler E.; Vermeire B.; Goodman D.:
Lebensdauer-Monitoring auf dem Chip, 15.11.2006, <<http://www-elektroniknet.de/halbleiter/sonstiges/artikel/145>>, (29.08.17)

- [Bjo72] Bjorck A.; Dahlquist G.:
Numerische Methoden, Oldenbourg R. Verlag, ISBN-13: 978-3486338522, 1985
- [Brä76] Bräunig D.; Richter G.:
Novel technique for MOS pulse capacitance measurements in C(V) and C(t) mode, 1976,
<<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1134619>>, (29.08.17)
- [Brä83] Bräunig D.; Fahrner W.:
Effects of radiation on MOS structures and silicon devices, Report, Hahn Meitner-Institut, Berlin, 1983
- [Cha01] Chan H. A.:
Accelerated Stress Testing Handbook: Guide for Achieving Quality Products,
Wiley-IEEE Press, ISBN: 978-0-7803-6025-9, 2001
- [Cha86] Chamoni P.:
Simulation Störanfälliger Systeme: Praxisorientierte Modelle und deren Einsatz auf Mikrocomputern zur Betriebswirtschaftlichen Bewertung von Störungen, Gabler Verlag, ISBN-13: 978-3409139052, 1986
- [DKE03] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN EN 60749-1:2003-12, Halbleiterbauelemente - Mechanische und klimatische Prüfverfahren - Teil 1: Allgemeines, Berlin: Beuth, 2003
- [DKE04] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN 40046-721-3:2004-11, Leitfaden für die Korrelation und Umsetzung der Klassen von Umgebungsbedingungen nach IEC 60721-3 in Prüfverfahren nach IEC 60068 - Ortsfester Einsatz, wettergeschützt (IEC/TR 60721-4-3:2001 + A1:2003), Berlin: Beuth, 2004
- [DKE04b] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN 40046-721-2:2004-11, Leitfaden für die Korrelation und Umsetzung der Klassen von Umgebungsbedingungen nach IEC 60721-3 in Prüfverfahren nach IEC 60068 - Transport (IEC/TR 60721-4-2:2001 + A1:2003), Berlin: Beuth, 2004
- [DKE04c] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN 40046-721-1:2004-11, Leitfaden für die Korrelation und Umsetzung der Klassen von Umgebungsbedingungen nach IEC 60721-3 in Umgebungsverfahren nach IEC 60068 - Lagerung (IEC/TR 60721-4-1:2001 + A1:2003), Berlin: Beuth, 2004

- [DKE07] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN IEC 60605-6:2007-11, Prüfungen der Zuverlässigkeit von Geräten - Teil 6: Test auf Gültigkeit zeitlich konstanter Ausfallrate und Ausfalldichte sowie deren Schätzung (IEC 60605-6:2007), Berlin: Beuth, 2007
- [DKE08] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN EN ISO 291:2008-08, Kunststoffe - Normalklimate für Konditionierung und Prüfung (ISO 291:2008); Deutsche Fassung EN ISO 291:2008, Berlin: Beuth, 2008
- [DKE11] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN EN 61508-1:2011-02; Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 61508-1:2010), Berlin: Beuth, 2011
- [DKE12] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN EN 61709:2015-01, Elektrische Bauelemente - Zuverlässigkeit - Referenzbedingungen für Ausfallraten und Beanspruchungsmodelle zur Umrechnung (IEC 56/1583/CD:2014), Berlin: Beuth, 2012
- [DKE15] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN EN ISO 14001:2015-11, Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 14001:2015), Berlin: Beuth, 2015
- [DKE16] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN EN ISO 13849-1:2016-06, Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze, Berlin: Beuth, 2016
- [DKE78] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN 50100:2016-12, Schwingfestigkeitsversuch - Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile, Berlin: Beuth, 2016
- [DKE82] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN 50113:1982-03, Prüfung metallischer Werkstoffe; Umlaufbiegeversuch, Berlin: Beuth, 1982
- [DKE90] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN 40041:1990-12, Zuverlässigkeit: Begriffe, Berlin: Beuth, 1990

- [DKE92] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN IEC 60747-11:1992-04, Halbleiterbauelemente; Rahmenspezifikation für Einzel-Halbleiterbauelemente, Teil 11, Berlin: Beuth, 1992
- [DKE95] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN EN 60068-1:1995-03, Umweltprüfungen Teil 1: Allgemeines und Leitfaden, Berlin: Beuth, 1995
- [DKE96] Deutsches Institut für Normung e.V.:
Norm DIN 1319-3:1996-05 Grundlagen der Meßtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit, Berlin: Beuth, 1996
- [Dro06] Drog M.:
Der Umgang mit Unsicherheiten: Ein Leitfaden zur Fehleranalyse, Facultas Verlag, ISBN-13: 978-3850767485, 2006
- [EIP12] Rinortner K.:
Elektronikschrank-Schirmung, Was beim Schirmen auf Schrankebene zu beachten ist, Elektronik Praxis, 22.11.10, <<http://www.elektronikpraxis.vogel.de/gehaeuse/articles/293386/>>, (29.08.17)
- [EIP15] Tasseki A.; Schober M.; Rinortner K.:
Air Transportation Rack, Elektronik Praxis, 31.03.15, <<http://www.elektronikpraxis.vogel.de/gehaeuse/articles/484618/>>, (29.08.17)
- [EIP17] Elektronik Praxis:
Tragbare elektronische Geräte richtig schirmen, 19.11.10, <<http://www.elektronikpraxis.vogel.de/gehaeuse/articles/293074/>>, (29.08.17)
- [Esc06] Escobar L. A.; Meeker W. Q.:
A Review of Accelerated Test Models, Institute of Mathematical Statistics, Statistical Science, Band 2, 2006
- [Epv17] Kucera G.:
Embedded Power Devices und Logik in Hochstromleiterplatten, Elektronik Praxis, 02.09.15, <<http://www.elektronikpraxis.vogel.de/leistungselektronik/articles/502853/index3.htm>>, (29.08.17)
- [Fan16] Fa. Fanuc:
FANUC ROBODRILL für die Automobilindustrie, <<http://www.fanuc.eu/de/de/robodrill-ib>>, (29.08.17)

- [Fin17] Fa. Finder:
Thermostate und Hygrostate ,
<https://www.findernet.com/sites/all/files/user_72/dl/S7T81_91DE.pdf>, (29.08.17)
- [Fix07] Fix A.:
Auswirkungen von thermischen, mechanischen und thermomechanischen Belastungen auf die Mikrostruktur bei SMD-Lötstellen, Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, 2007
- [fra14] Gall M.; Clausner, A.; Sander, C.; Kraatz M.; Zsche E.:
Automobilelektronik – Materialien und Zuverlässigkeit,
<https://www.ikts.fraunhofer.de/content/dam/ikts/kommunikation/publikationen/Jahresberichte/jb2014/26_Automobilelektronik_-_Materialien_und_Zuverl%C3%A4ssigkeit.pdf>, (29.08.17)
- [Fre10] Freescale Semiconductor Inc.:
Thermal Analysis of Semiconductor Systems, Freescale Semiconductor Inc, 2010
- [Füs06] Füssel U.; Scheel W.; Wittke K.; Nowotnick M.:
Zuverlässigkeit stoffschlüssiger Fügeverbindungen für Hochtemperatur-Elektronikbaugruppen, Dresdner Fügetechnische Berichte, Band 13/0, 2006
- [Gon92] Gonschorek K.H.:
Elektromagnetische Verträglichkeit: Grundlagen, Analysen, Maßnahmen, Vieweg+Teubner Stuttgart, ISBN-13: 978-3519061441, 1992
- [Gud95] Gudehus H., Zenner H.:
Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung, Verlag Stahleisen GmbH, Auflage 3, ISBN-13: 978-3514004450, 1995
- [Hai92] Haibach E.:
Betriebsfeste Bauteile: Ermittlung und Nachweis der Betriebsfestigkeit, Konstruktive und unternehmerische Gesichtspunkte (Konstruktionsbücher), Springer Verlag, ISBN-13: 978-3540548157, 1992
- [Hai06] Haibach E.:
Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, Springer Verlag, Auflage 3, ISBN-13: 978-3540293637, 2006

- [Han10] Hannach T.:
Ermittlung von Lebensdauergleichungen vom Coffin-Manson- und Morrowtyp für bleihaltige und bleifreie Weichlote durch Kombination von FE und Experiment, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2010
- [Hel07] Hellwig P.:
Untersuchung von wechselnden klimatischen Umgebungsbedingungen und den daraus resultierenden Betauungsphänomenen auf elektronische Komponenten, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2007
- [Hem11] Hunstig, M.; Al-Ashtari, W.; Hemsel, T.; Sextro W.:
Piezoelektrischer "Energy Harvesting" Generator, Report, Universität Paderborn, <<https://groups.uni-paderborn.de/ldm/publications/download/Hunstig2013b.pdf>>, (29.08.17)
- [Hfo17] hwk-oberfranken:
Trend: Elektronische Bauteile verursachen die meisten Autopan-
nen, hwk-oberfranken, 26.09.12, <<https://www.hwk-oberfranken.de/artikel/trend-elektronische-bauteile-verursachen-die-meisten-autopannen-72,604,657.html>>, (29.08.17)
- [Hob05] Hobbs G. K.:
HALT and HASS Accelerated Reliability Engineering, Wiley,
ISBN-13: 978-0471979661, 2000
- [Hut17] Hutter M.:
Möglichkeiten zur Verbesserung der Zuverlässigkeit von Lötver-
bindungen, 25.03.08 <http://wiki.fed.de/index.php/M%C3%B6glichkeiten_zur_Verbesserung_der_Zuverl%C3%A4ssigkeit_von_L%C3%B6tverbindungen>, (29.08.17)
- [Hul04] Hulsken G.; van den Bogaard J.A.; Shangguan D.; Jayaram J.S.R.;
Brombacher A.C.; Ion R.A.
Using dynamic reliability models to extend the economic life of
strongly innovative products,
<<http://ieeexplore.ieee.org/document/1299719>>, (29.08.17)
- [IEC04] International Electrotechnical Commission:
Norm IEC TR 62380:2004 (RDF 2000), Reliability Data Hand-
book, A universal model for reliability prediction of Electronics
components, PCBs and equipment,
International Electrotechnical Commission, 2004

- [IFA12] Fraunhofer IFAM:
Erster gedruckter Thermogenerator, Markt & Technik, 45/2012
- [Igu16] Fa. Igus:
smart plastics,
<http://www.igus.de/wpck/17587/Motek_N16_01_02_isense>,
(29.08.17)
- [Inf17a] Fa. Infineon:
PrimePACK with IGBT5 and .XT,
<<http://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/primepack>
>, (29.08.17)
- [Inf17b] Fa. Infineon:
EconoDUAL 3 ,<<http://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/econodual3>>, (29.08.17)
- [IRF17] Vrej B.:
Power MOSFET Basics, International Rectifier, <<https://www.infineon.com/dgdl/mosfet.pdf?fileId=5546d462533600a4015357444e913f4f>>, (29.08.17)
- [IRF640] Vishay Siliconix:
IRF640, SiHF640 Power MOSFET, Vishay Siliconix, <<http://www.vishay.com/docs/91036/sihf640.pdf>>, (29.08.17)
- [Iro16] Fa. Ironwood:
Electronics BGA-Testsockel mit integriertem Temperatursensor,
<<http://www.all-about-test.info/bauteile/1105-bga-burn-in-sockel-fuer-extreme-temperaturanforderungen.html>>, (29.08.17)
- [ISI12] ISIT:
Lötwärmebeständigkeit und Zuverlässigkeit neuer Konstruktionen
im manuellen Reparaturprozess bleifreier elektronischer Baugruppen,
<http://www.isit.fraunhofer.de/content/dam/isit/en/documents/Schlussbericht-IGF_15.535N_tcm663-84939.pdf>, (24.05.12)
- [ISO03b] International Organization for Standardization (ISO):
Norm ISO 12106:2003, Metallic materials -- Fatigue testing -- Axial-strain-controlled method, International Organization for Standardization, 2003
- [ISO06] International Organization for Standardization (ISO):
Norm ISO 1099:2006 Metallic materials -- Fatigue testing -- Axial force-controlled method, International Organization for Standardization, 2006

- [IZM17] Fraunhofer IZM:
Zustandsüberwachung elektronischer Systeme, http://www.izm.fraunhofer.de/de/abteilungen/environmental_reliabilityengineering/arbeitsgebiete/zustandsueberwachung.html, (29.08.17)
- [IZM17b] Fraunhofer IZM:
Projekt CoMoLeFo,
<http://www.izm.fraunhofer.de/de/abteilungen/rf-smart-sensor-systems/Forschungsschwerpunkte/Condition_Monitoring_Systeme/CoMoLeFo.html>, (29.08.17)
- [IZM17c] Fraunhofer IZM:
Projekt "Robuster Entwurf von neuen Elektronikkomponenten für Anwendungen im Bereich Elektromobilität" (RESCAR 2.0),
<http://www.izm.fraunhofer.de/de/abteilungen/environmental_reliabilityengineering/projekte/rescar_2_0.html>, (29.08.17)
- [Jeo13] Joensson D.:
Betriebsfestigkeit, Vorlesungsskript, HTW Berlin, 2013
- [Kla98] Klausner M.; Grimm W. M.; Hendrickson C.; Horvath A.:
Identification of Life-Time Parameters with Electronic Data Unit, University of Pittsburgh, Robert Bosch Corp., <<http://www.cmu.edu/gdi/docs/sensor-based.pdf>>, (29.08.17)
- [Klö16] Klöden W.:
Arbeitsblätter zum Fach Sicherheitstechnik, Abschnitt: Zuverlässigkeit, TU Dresden, Institut für Verfahrenstechnik & Umwelttechnik, <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifvu/svt/ressourcen/dateien/dateien/sicher/ST_skript.pdf?lang=de>, (28.08.17)
- [Kon07] Konnov A.:
Zuverlässigkeitsberechnung und vorbeugende Wartung von komplexen technischen Systemen mittels modifizierter Markov-Methode, Dissertation, Universität Karlsruhe, 2007
- [Kra00] Krause W.:
Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik, Fachbuchverlag Leipzig; Auflage: 3, ISBN-13: 978-3446196087, 2000
- [Köh12] Köhler M.; Jenne S.; Pötte K.; Zenner H.:
Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit, Springer Verlag, ISBN 978-3-642-131163-, 2012

- [Kuc17] Kucera G.:
Wie Starrflex-Leiterplatten die Baugruppenzuverlässigkeit erhöhen, 14.03.11, <<http://www.elektronikpraxis.vogel.de/wie-starrflex-leiterplatten-die-baugruppenzuverlaessigkeit-erhoehen-a-307089/>>, (29.08.17)
- [Kün94] Künzel H. M.:
Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Dissertation, Universität Stuttgart, 1994
- [Lun07] Lunze J.:
Automatisierungstechnik: Methoden für die Überwachung und Steuerung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme, De Gruyter Verlag, ISBN-13: 978-3110465570, 2016
- [Lut99] Lutz J.:
Freilaufdioden für schnell schaltende Leistungsbaulemente, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 1999
- [McL09] McLean H. W.:
HALT, HASS, and HASA Explained, Amer Society for Quality, ISBN-13: 978-0873897662, 2009
- [McP07] McPherson, J.W.:
Reliability Trends with Advanced CMOS Scaling and The Implications for Design, 21.01.08, IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC), <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4405763/?arnumber=440576>>, (29.08.17)
- [Mey03] Meyna A.; Pauli B.:
Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik, Quantitative Bewertungsverfahren, Hanser Fachbuch Verlag, ISBN-13: 978-3446215948, 2003
- [Mid10] Middendorf A.:
Lebensdauerprognostik unter Berücksichtigung realer Belastungen am Beispiel von Bondverbindungen bei thermomechanischen Wechselbeanspruchungen, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2010
- [MIL74] MIL:
Norm MIL-STD-704F, List of Basic Terms, Definitions and Related Mathematics for Reliability, IEC 271, Department of Defense, 1974

- [MIL91] MIL:
Norm MIL-HDBK-217, Reliability prediction electronic equipment, Department of Defense, 1991
- [MIL92] Mil:
Norm MIL-HDBK-217F, Reliability Prediction of electronic Equipment, 1992
- [MIL99] Mil:
Norm MIL-STD-461E, requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment, Department of Defense, 1999
- [MIL08] MIL:
Norm MIL-STD-810G, environmental engineering considerations and laboratory tests, Department of Defense, 2008
- [Mor16] Morschel M.:
Thermomechanische Analyse von thermoelektrischen Generatoren unter dynamischer Last im Kfz, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2016
- [Poe10] Poech M.H.:
Test und Zuverlässigkeit von Leistungsmodulen – Belastungsanalyse und Lebensdauerprognose, Fraunhofer ISI, 2010
- [Pus11] Pustan D. S.:
Belastungs- und Zuverlässigkeitsanalyse einer Ball-Grid-Array-Bauform - Von der Herstellung über den Einsatz in Kfz-Elektronik bis zum Ausfall im Test-, Dissertation, Universität Freiburg im Breisgau, 2011
- [qzo17] Abelein U.:
Mobiler Lifestyle, aber sicher!, <http://vda-qmc.de/fileadmin/redakteur/presse/2014/2014_Mobiler_Lifestyle_aber_sicher.pdf>, (29.08.17)
- [Rau12] Rauch M.:
Zuverlässiges Design von Aluminiumdickdrahtbonds bei Temperaturwechselbelastung von Steuergeräten mit Gehäusen aus glasfaserverstärktem Kunststoff am Beispiel ESP, 24/25.1111, <http://www.dynardo.de/fileadmin/Material_Dynardo/WOST/Paper/wost8.0/Paper_Rauch.pdf>, (29.08.17)
- [Rak02] Rakowsky U. K.:
Systemzuverlässigkeit, Terminologie Methoden Konzepte, LiLoLe Verlag, ISBN-13: 978-3934447226, 2001

- [Rie88] Riedel F.:
MOS-Analogtechnik, Oldenbourg Verlag, ISBN 13:
978348620507, 1988
- [Rid17] Ridgetop Group Inc.:
Sentinel Silicon™ Die-Level Reliability Monitors, <<http://www.ridgetopgroup.com/products/semiconductors-for-critical-applications/sentinel-silicon-technology>>, (29.08.17)
- [Rin06] Rinortner K.:
Kühle Brise für heiße Momente – Zukunftssichere Kühlkonzepte bei steigender Elektronikleistung, Elektronik Praxis, 28.09.2006, <<http://www.elektronikpraxis.vogel.de/waermemanagement/articles/37471>>, (29.08.17)
- [Ru00] Ru C.Q.:
Thermomigration as a driving force for instability of electromigration induced mass transport in interconnect lines, Journal of Materials Science, Ausgabe 3, 2000
- [Run10] Runge A.:
Modellierung der Lebensdauer von Systemen, Diplomarbeit, Universität Potsdam, Institut für Mathematik, 2010
- [Säm13] Sämrow H.:
Maßnahmen zur Steigerung der Zuverlässigkeit integrierter Schaltungen auf Gatterebene hinsichtlich Gateoxiddefekten, Dissertation, Fakultät für Informatik und Elektrotechnik, Universität Rostock, 2013
- [Sch12] Fa. Schroff:
EMV im Elektronikschrank,
2017<<https://schroff.pentair.com/de/schroff/emc-cabinets-schroff>>, (29.08.17)
- [Sol17] Fa. Solaredge:
PV Überwachung,
<<http://www.solaredge.de/groups/de/products/pv-monitoring>>, (29.08.17)
- [Spr05] Spraul M.; Nuchter W.; Wundererle B.; Michel B.:
FE analysis and experimental testing of a 4-pin ceramic test vehicle with tin-lead and tin-silver-copper solder joints, 6th IEEE EuroSimE, 06.09.05 <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1502846>>, (29.08.17)

- [Sta08] Stahlmecke B.:
Elektromigration in Gold und Silber Nanostrukturen, Dissertation,
Universität Duisburg-Essen, 2008
- [Tau10] Taube R.:
Risikofaktor Basismaterial, Eine Untersuchung mit dem Ziel, Dela-
minationen von Leiterplatten zu verhindern, <[http://www.lp-akade-
mie.de/publikationen/cad-bg/cad_lp_bg_004.pdf](http://www.lp-akademie.de/publikationen/cad-bg/cad_lp_bg_004.pdf)>, (29.08.17)
- [tud17] Projektgruppe Airbag:
Überblick und Anforderungen an Automobilelektronik, <[http://ls12-
www.cs.tu-dortmund.de/airbag/seminarphase/Autoelektronik_fo-
lie.pdf](http://ls12-www.cs.tu-dortmund.de/airbag/seminarphase/Autoelektronik_fo-
lie.pdf)>, (29.08.17)
- [tuk17] TU Kaiserslautern:
V-Modell @XT <[http://ftp.uni-kl.de/pub/v-modell-xt/Release-
1.1/Dokumentation/pdf/V-Modell-XT-Komplett.pdf](http://ftp.uni-kl.de/pub/v-modell-xt/Release-
1.1/Dokumentation/pdf/V-Modell-XT-Komplett.pdf)>, (29.08.17)
- [Vas07] Vasudevan V.; Fan X.; Liu, T.; Young D.:
Slow cycle fatigue creep performance of Pb-free (LF) solders, 57th
Electronic Components and Technology Conference, 25.06.07,
<<http://ieeexplore.ieee.org/document/4249871>>, (29.08.17)
- [Vog91] Voges, E.:
Hochfrequenztechnik. Band 1: Bauelemente und Schaltungen,
Hüthig Verlag, ISBN-13: 978-3055003387, 1988
- [Wei09] Weise T.:
Global Optimization Algorithms, Theory and Application, 2009,
<<http://www.it-weise.de/projects/book.pdf>>, (29.08.17)
- [Wil10] Wilker H.:
Band 3: Weibull-Statistik in der Praxis: Leitfaden zur Zuverlässig-
keitsermittlung technischer Komponenten, Books on Demand
GmbH, ISBN-13: 978-3839162415, 2010
- [Wit12] Wittig B.:
Verbesserung des Schalt- und Betriebsverhaltens von Leistungs-
MOSFETs mit niedriger Spannungsfestigkeit und hoher Stromtrag-
fähigkeit durch Optimierung der Treiberschaltung, Dissertation,
Christian-Albrechts-Universität Kiel, 2012
- [Wör14] Wörner N.:
Leiterplattentest per DMS, Markt & Technik, 4/2014

- [Zhe13] Wu, L; Guan L; Li X; Zheng, X.:
Analysis of the Degradation of MOSFETs in Switching Mode
Power Supply by Characterizing Source Oscillator Signal, 2013
- [ZVEI08] ZVEI:
Handbook for Robustness Validation of Automotive Electric/electronic Modules, 2008, <https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2013/Oktober/Handbook_foer_Robustness_Validation_of_Automotive_Electrical/Robust-Validation-EE-Modules.pdf>, (29.08.17)

Kurzreferat

Leistungselektronische Schaltelemente unterliegen elektrischen und thermischen Stressfaktoren, welche ihre Zuverlässigkeit und Lebensdauer reduzieren. Einerseits gibt es die Bestrebung, den Einflüssen durch eine Überdimensionierung der Schaltung oder durch eine fortschreitende Spezialisierung eingesetzter Komponenten entgegenzutreten. Andererseits werden passive Varianten zum Bauteilschutz eingesetzt (beispielsweise Kühlflächen, Vibrationsdämpfer, Schutzlacke), die statisch ausgelegt sind und kein Anpassungsvermögen bei Änderungen der Betriebsbedingungen besitzen. Bei einer aktiven Version, zum Beispiel Power Derating Systeme, werden Klimagrößen erfasst und Systemreaktionen organisiert, in erster Linie in Form einer Leistungsreduzierung bis hin zur Abschaltung einer Baugruppe. Im Unterschied zu den aufgeführten Maßnahmen liefern eine Identifikation lebensdauerlimitierender Effekte sowie die Ableitung lebensdauerverlängernder Maßnahmen in elektronischen Baugruppen (Belastungsdosierung) einen aktiven Beitrag zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und zur Lebensdauerverlängerung. Die Arbeit behandelt ein Betriebs-Interventions-Verfahren (BIV), welches in einem Multiparameter-Regler (MPR) implementiert ist und eine dynamische Belastungsreduzierung des Schaltelements vornimmt. Der Multiparameter-Regler erfasst vom Schaltelement: Spannungsbelastung, Stromänderungsgeschwindigkeit, Elementtemperatur sowie weitere externe Klima- und Einflussgrößen (beispielsweise Umgebungstemperatur oder Vibrationen als mechanischer Stressfaktor bei einem Lüftereinsatz). Zur Belastungsbeeinflussung werden folgende Ansteuergrößen beeinflusst: Schaltfrequenz, Tastverhältnis, Slewrate. Durch die permanente Überprüfung der Einhaltung von definierten Funktionsindikatoren wird die gewünschte Funktionalität der Baugruppe mit ihrem Schaltelement gesichert.

Mit dem vorgestellten Betriebs-Interventions-Verfahren (BIV) zur dynamischen Belastungsreduzierung kann die Lebensdauer leistungselektronischer Schaltelemente verlängert werden. Das Verfahren, implementiert in einem Multiparameter-Regler (MPR), basiert auf der Erfassung belastungsbestimmender Einflussgrößen und auf der Ansteuervariation des Schaltelements in der Form, dass ein Minimum der Gesamtbelastung vorliegt. Durch die dafür notwendige Akkumulation der er-

fassten Belastungen lässt sich bei Kenntnis der Belastungsgrenze eine Lebensdauerprognose ableiten. Darüber hinaus ist mit Hilfe der Belastungsstatistik eine Aussage über die tatsächliche Betriebsbelastung des Schaltelements generierbar, so dass sich daraus Erkenntnisse über eine Belastungsreserve, ein Downsizing der Schaltung, über Funktionsänderungen oder über driftartige Arbeitspunktverlagerungen ableiten lassen. Letztendlich liefert die Erfassung der Einflussgrößen auch eine Angabe über die tatsächlichen Klimabedingungen, welche die Grundlage für ein optimiertes Schaltungsdesign sind. Das Betriebs-Interventions-Verfahren und der Multiparameter-Regler wurden exemplarisch per Simulation und labortechnisch mittels Demonstrator an einem leistungselektronischen Schaltelement zum Schalten einer Induktivität untersucht.

Abstract

Electronic power switching elements are affected by electrical and thermal stress factors that reduce their reliability and service life. On the one hand, efforts are made to counteract such influences by oversizing circuits or by a progressive specialization of the components employed. On the other hand, passive variants are used for the protection of components (cooling surfaces, vibration dampers and protective coatings) which are static in design and unable to adjust when operating conditions change. Active versions, such as power derating systems, record climatic parameters and organize system reactions, primarily in the form of performance reductions. Such reactions can even mean that a component is switched off altogether. Unlike the measures listed above, the identification of life-limiting effects and the derivation of life-extending measures in electronic assemblies (stress dosage) actively help increase reliability and extend service life. The document looks at an operation intervention procedure (OIP) implemented in a multiparameter regulator (MPR) that reduces the dynamic stress of the switching element. The multiparameter regulator records the following data of the switching element: voltage load, current change rate, element temperature and other external climate and influencing variables (e.g. ambient temperature or the vibrations occurring in a fan insert as a mechanical stress factor). The following control action variables are used to influence stress: switching frequency, duty cycles and slew rate. The desired functionality of the assembly with its switching element is ensured by a permanent monitoring of the observance of defined functional indicators.

With the operation intervention procedure (OIP) for dynamic stress reduction, the service life of electronic power switching elements can be extended. The procedure implemented in a multiparameter regulator (MPR) is based on the recording of the stress-defining variables and on the control action variation of the switching element, so that total stress is minimized. Based on the required accumulation of the stresses recorded, service life can be predicted if stress limit is known. Using stress statistics, the actual operating stress of the assembly can be evaluated as well, so that inferences about stress reserves, circuitry downsizing, functional changes or drift-type operating point shifts can be drawn. In the final analysis, the

recording of variables also provides information about actual climatic conditions, which are the basis for optimized circuit design. Using a demonstrator, the operation intervention procedure and the multiparameter regulator have been studied in an exemplary manner on an electronic inductance switching element through simulation and in a technical lab.