

# ERA – Energy-based Reliability Analysis – Energiebasierte Zuverlässigkeitsanalyse

Dipl.-Ing. Stefan Kemmler, Dipl.-Ing. Oliver Koller, Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche

Universität Stuttgart, Institut für Maschinenelemente, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart, Deutschland

Tel.: 0711 685 - 66 696

Fax: 0711 685 - 66 319

[Stefan.Kemmler@ima.uni-stuttgart.de](mailto:Stefan.Kemmler@ima.uni-stuttgart.de)

[www.ima.uni-stuttgart.de](http://www.ima.uni-stuttgart.de)

## **Abstract:**

Da die Wechselwirkungen zwischen mechatronischen Komponenten in Systemen eine entscheidende Rolle auf ihre Belastung einnehmen, ist die Betrachtung dieser Wechselwirkungen unverzichtbar. Zur Identifikation solcher Wechselwirkungen ist eine ergänzende Methode zur den bisher klassischen Systemanalysen von Nöten. Dies wird bei der vorgestellten energiebasierten Zuverlässigkeitsanalyse (engl. Energy-based Reliability Analysis - ERA) berücksichtigt, indem die stationären Energie- beziehungsweise die dynamischen Leistungsflüsse mechatronischer Systemen in Form von Energieflussdiagrammen dargestellt werden. Mit der Modellierung des Energieflusses und damit das Ansetzen des ERA-Verfahrens kann der Nutzer Wirkzusammenhänge und Schwachstellen erkennen, eine exaktere Bestimmung der Zuverlässigkeit durch Berechnung der Belastung erreichen und folglich Komponenten zuverlässigkeitsbasiert auslegen.

## **Abstract:**

The interactions between components in mechatronic systems play a crucial role on the components' load. This indispensably demands the consideration of these interactions regarding a reliability analysis. In order to identify such interactions a method complementing already existing and well established system analyses is needed. The method presented here called "Energy-based Reliability Analysis (ERA)" takes into account the stationary as well as the dynamic power flows in mechatronic systems. Energy flow diagrams illustrate these flows. By means of the modeling of the energy flux and thus of the implementation of the ERA process, the user can recognize cause-effect relationships and vulnerabilities. The individual component's as well as the entire system's reliability can therefore be described more accurately based on a more precise load calculation.

## 1 Einleitung und Motivation

Die moderne Technik ist durch ihre rasante Entwicklung auf leistungsfähige mechatronische Komponenten und Systemen angewiesen. Bei immer kleiner werdendem Bauraum und höherer Anzahl von Komponenten führt dies zu einer höheren Packungsdichte und Sensibilität der mechatronischen Komponenten gegenüber wechselseitigen, konvektiven, konduktiven und strahlungsinduzierten Einflüssen [1]. Dies führt zu einer veränderten Belastung und muss daher bei der Lebensdauerabschätzung berücksichtigt werden, um eine ganzheitliche Betrachtung der Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Eine Vernachlässigung dieser wechselseitigen Beeinflussung würde zu einer Über- beziehungsweise Unterschätzung der Lebensdauer führen.

Zur Analyse des komplexen Systems für die Identifizierung möglicher Komponenten, die zum Ausfall dieses Systems führen könnten, stehen verschiedene qualitative Analyse-Methoden zur Verfügung. Dies ist unter anderem die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse FMEA / FMECA-Analyse [2].

Die in diesem Artikel vorgestellte energiebasierte Zuverlässigkeitsanalyse (engl. Energy-based Reliability Analysis - ERA) basiert auf der Annahme, dass ein Zusammenhang zwischen Orten hoher Energiedichte und potentiellen Systemschwachstellen existiert. Diese Annahme ermöglicht, dass die ERA systemkritische Komponenten quantitativ ermittelt und dadurch zu einer ganzheitlichen Betrachtung des Systems führt. Die dafür benötigten Relikte werden über den kompletten Entwicklungsprozess verwendet um das System hinsichtlich der Wirkzusammenhänge zu analysieren und Lastkollektive unter Berücksichtigung dieser Wechselwirkung abzuleiten. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Verfolgung der zuverlässigkeits-orientierten Entwicklung und damit eine stetige Verbesserung der Produktzuverlässigkeit. Hierin ist eine Analogie zu weiteren Methoden der zuverlässigkeitsorientierten Systemanalyse zu sehen. Aufgrund der Definition des energetischen Durchsatzes beziehungsweise den Leistungsanforderungen des Systems in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses, sind Aussagen von hoher Qualität vergleichsweise früh zu treffen.

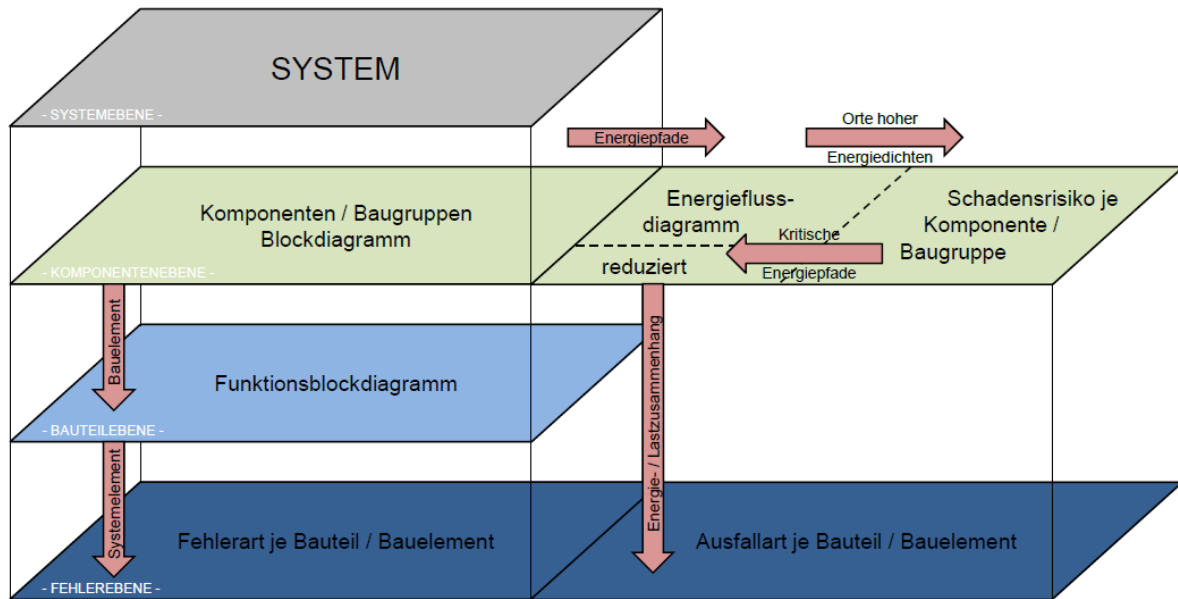
Ein zentrales Relikt stellt das aus dem Energieflussdiagramm entstehende Thermomodell dar, welches im Rahmen der ERA einerseits zur Ermittlung der Komponenten und andererseits im weiteren Verlauf für die Ermittlung eines repräsentativen Lastkollektivs verwendet wird.

Wie in Kapitel vier dargestellt, wird ein Thermomodell unter Berücksichtigung der Wechselwirkung ohnehin für die Belastungsbestimmung benötigt. Zur Bestimmung der Zuverlässigkeit dient hierbei der Arrhenius-Ansatz. Es wird deutlich, dass klassische Verfahren zur Lastkollektiv-Bestimmung, ohne Berücksichtigung der Wechselwirkung, zu einer Unter- beziehungsweise Überschätzung der Lebensdauer führen beziehungsweise kritische Betriebszustände gar nicht erkannt werden. Daher schafft diese Methode nicht nur eine exaktere Ermittlung der vorliegenden Lastkollektive und damit der Zuverlässigkeit, sondern ermittelt auf Basis derselben Relikte die kritischen Systemkomponenten. Somit wird kein Mehraufwand generiert, sondern ein Front-Loading in der Produktentwicklung gezielt herbeigeführt.

## 2 Vorstellung der ERA

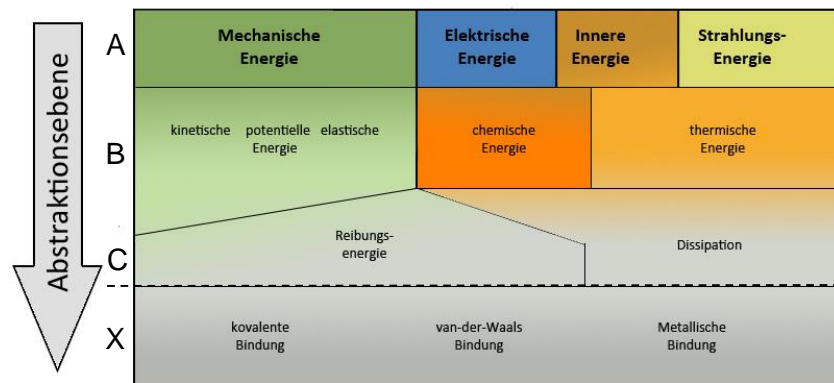
Die ERA beschreibt einen neuen Ansatz zur Analyse und Zuverlässigkeitsermittlung von technischen Systemen. Hauptbestandteil der Methode ist die Betrachtung der stationären Energie- und dynamischen Leistungsflüsse durch das System, sowie der Energieverteilung im System. Dadurch werden Wechselwirkungen wie zum Beispiel thermische Wechselwirkungen in Form von Konvektion, Konduktion und Strahlung berücksichtigt.

Ziel der ERA ist es, Orte hoher Energiedichte oder großer dynamischer Leistungsgradienten (Hotspots) im System aus dem Energieflussdiagramm zu lokalisieren, um dadurch über den Energie- und Leistungszusammenhang zunächst auf die kritischen Komponenten und anschließend auf die Ausfallart je Bauteil zu schließen, vergleiche Bild 1. Im Gegensatz zu herkömmlichen Herangehensweisen, wie zum Beispiel die FMEA [3], ist hinsichtlich der Bauteilfunktionalität keine erweiterte Betrachtung im Funktionsblockdiagramm notwendig.



**Bild 1:** Vergleich herkömmliche Herangehensweise gegenüber ERA

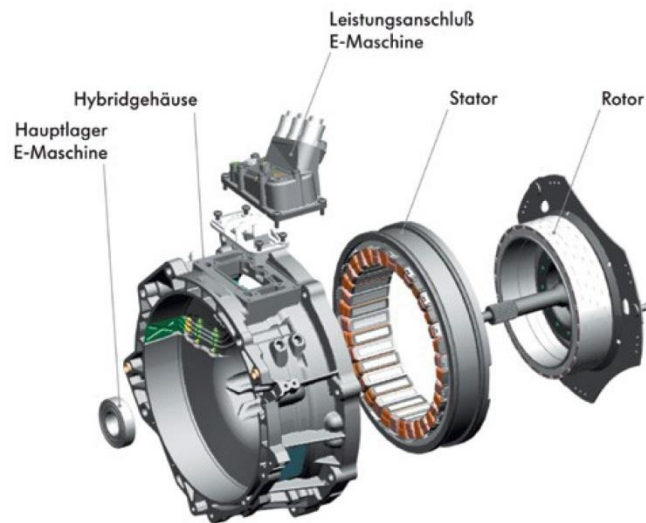
Die Energieflüsse werden analog zu herkömmlichen Analyse-Verfahren in einer Top-Down-Vorgehensweise abgeleitet und in einem Energieflussdiagramm, vergleiche Bild 4, dargestellt. Während kritische Systemkomponenten bis auf die unterste energetische Ebene untersucht werden, können unkritische Komponenten lediglich oberflächlich modelliert werden. Es werden solche Systemkomponenten als kritisch betrachtet, die eine hohe Energiedichte oder einen hohen Leistungsgradienten aufweisen beziehungsweise eine hohe Interaktion mit anderen Komponenten eingehen. Durch eine Detailbetrachtung der Energieflüsse auf einer geeignet tiefen Ebene, vergleiche Bild 2, wird auf Fehlerursachen geschlossen und idealerweise eine Zuverlässigkeitsprognose getroffen. Die daraus gewonnen Erkenntnisse bezüglich der Wirkzusammenhänge der Energieflüsse werden zur Systemoptimierung verwendet.



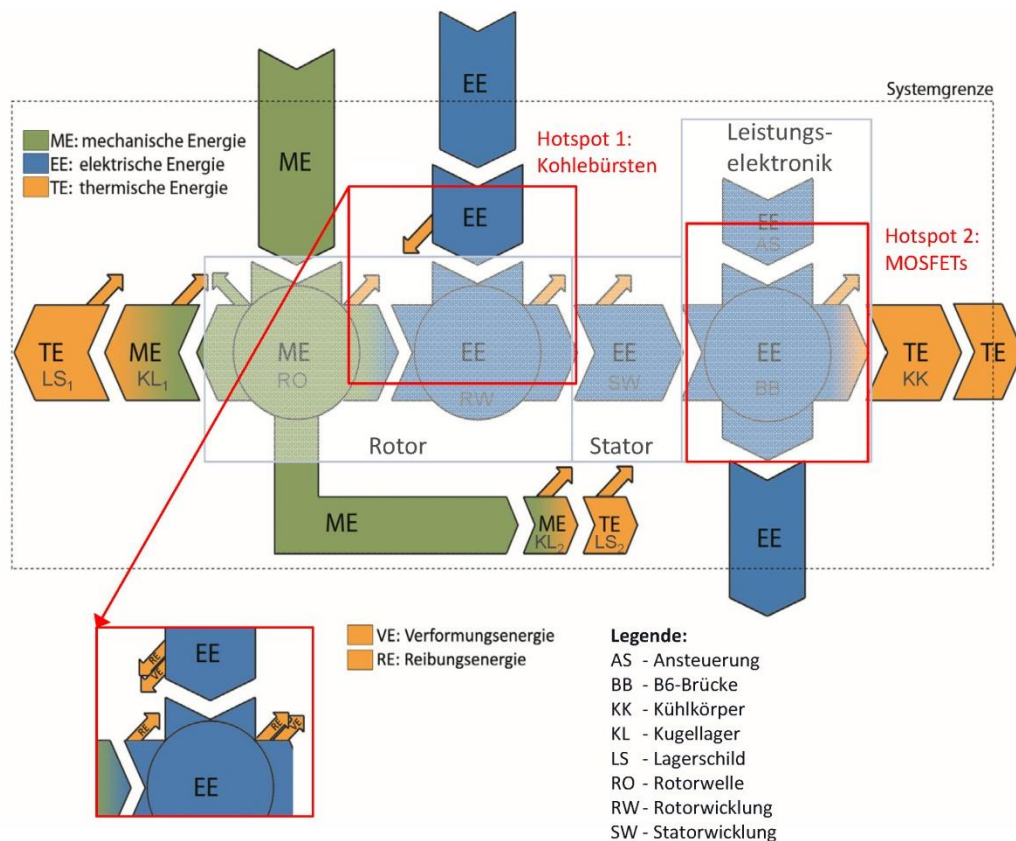
**Bild 2:** Übersicht verschiedene Energien und deren Energieumwandlung in die jeweilige Abstraktionsebene

Beim Erstellen des Energieflussdiagrammes werden die Energieflüsse in allgemeiner Form durch die einzelnen Komponenten betrachtet, vergleiche Ebene A (erste Abstraktionsebene) in Bild 2. Reicht bei einer zu untersuchenden Komponente die Betrachtungsebene A zur Beschreibung der Energieform nicht aus, wird unter Annahme der Energieerhaltung aus Ebene A eine tiefere Abstraktionsebene B betrachtet. Dieser Schritt kann bis auf eine Abstraktionsebene X, auf Bindungsenergien von Atomen, wiederholt werden, bis eine hinreichende Beschreibung der Energieumwandlung in der Komponente angewandt werden kann. Die Tiefe der Betrachtung kann im Anschluss iterativ im Entwicklungsprozess überprüft und angepasst werden.

Als Beispiel zur Anwendung der ERA ist eine E-Maschine gewählt, die bei Hybridantrieben Einsatz findet, vergleiche folgendes Bild 3.



**Bild 3:** Komponenten einer E-Maschine [Quelle:Volkswagen AG]



**Bild 4:** Energieflussdiagramm mit Hotspots

Das Energieflussdiagramm, Bild 4, zeigt die Energieflüsse in einem zu untersuchenden kritischen Lastfall. Das bedeutet, dass aufgrund sich unterscheidender Betriebsmodi in einem komplexen mechatronischen System, wie beispielsweise die E-Maschine, mehrere Energieflussdiagramme abgeleitet werden müssen. Die einzelnen Komponenten mit deren energetischen Schnittstellen sind in Form von Kreisen und Pfeilen in Wirkrichtung dargestellt, wobei die kreisförmige Darstellung das Verzweigen mehrerer Energieflüsse andeutet. Die Energieformen werden farblich unterschieden, dabei

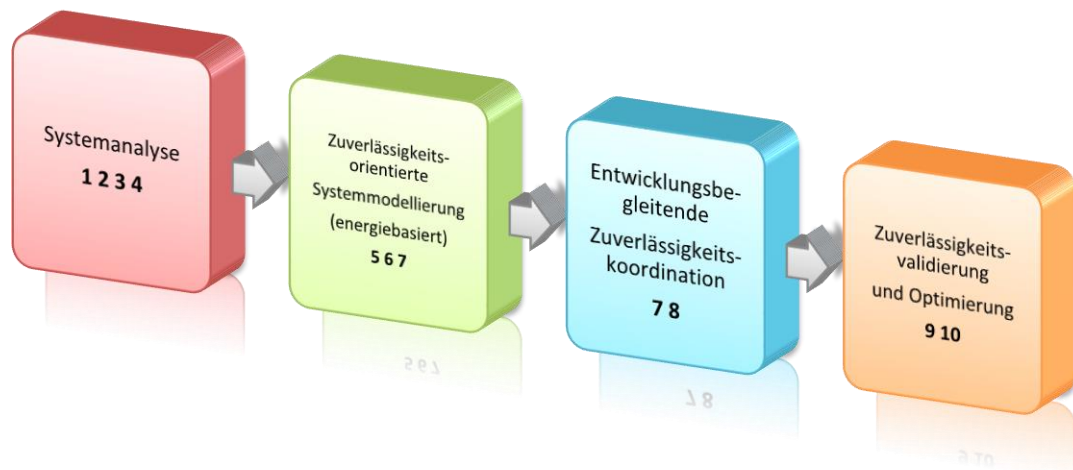
wird die Energieumwandlung innerhalb einer Komponente durch einen Farbverlauf dargestellt. Die diagonal abgehenden Pfeile signalisieren die bei der Energieumwandlung auftretenden Verlustenergien.

Zur Erstellung dieses Diagramms wird die Simulation der Energieflüsse stationär betrachtet. Die Betrachtung der Energieflüsse, Wechselwirkungen (siehe Detailausschnitt in Bild 4) und Verlustenergien führen qualitativ zur Lokalisierung Orte hoher Energiedichten (Hotspots). Für die quantifizierbare Aussage über einen tatsächlich vorhanden systemkritischen Hotspot muss dieser näher untersucht werden. Als systemkritisches Maß könnte ein energetischer Wirkungsgrad oder eine maximale Energiedichte pro Fläche eingesetzt werden.

Im abgebildeten kritischen Zustand wird dem System mechanische und elektrische Energie zugeführt. Aus dem System abgeführt werden elektrische Energie und thermische Energie. Die abgeführte thermische Energie erfolgt zum Beispiel durch ein Kühlmedium. Es sind außerdem die bei Energieumwandlungen auftretenden Verlustenergien dargestellt. Durch diese, meist thermischen Verlustenergien, kommt es zu thermischen Wechselwirkungen innerhalb des Systems.

### 3 Energieansatz – Durchführung

Die Methodik lässt sich in vier Abschnitte gliedern. Dies ist die Systemanalyse, die zuverlässigkeitsorientierte Systemmodellierung, die entwicklungsbegleitende Zuverlässigkeitskoordination und die Zuverlässigkeitsvalidierung, vergleiche Bild 5.



**Bild 5:** Gliederung der ERA-Vorgehensweise

Um diese Abschnitte durchzuführen, werden diese in weitere zehn Arbeitsschritte wie folgt unterteilt:

#### 1. Systemgrenzen festlegen

Für eine eindeutige Betrachtung des Systems wird im ersten Schritt eine Systemgrenze des vorliegenden technischen Produkts definiert.

#### 2. Komponenten im System identifizieren

Innerhalb der in eins definierten Systemgrenzen werden alle Komponenten sowie deren Verkettung und wechselseitigen Beziehungen identifiziert und in einem Blockdiagramm örtlich dargestellt. Dabei wird sichergestellt, dass alle Komponenten ganzheitlich betrachtet werden.

#### 3. Betriebsmodi des Systems analysieren

Moderne mechatronische Systeme weisen unterschiedliche Betriebsmodi in ihrer Anwendung auf. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer jeweiligen Komponentenbelastung.

#### **4. Betriebsmodi-abhängige Energieschnittstellen ermitteln**

Für jeden Betriebsmodus müssen sowohl die Wärmequellen als auch die Wärmesenken an den Energieschnittstellen ermittelt werden. Hierbei wird das System als ganzheitliches Produkt behandelt (Black Box).

#### **5. Energieflüsse inkl. konvektive, konduktive und strahlungsinduzierte Wechselwirkungen modellieren**

Die Energieflüsse über die einzelnen Bauteile werden innerhalb der definierten Systemgrenze analysiert und die gegebenenfalls auftretenden konvektiven, konduktiven oder strahlungsinduzierten Wechselwirkungen modelliert.

#### **6. System reduzieren hinsichtlich Orte hoher Energiedichten um potentielle Schwachstellen identifizieren**

Auf der Basis der in Schritt fünf abgeleiteten Energieflüsse werden Hotspots identifiziert. Diese können potentielle Schwachstellen im Hinblick auf die Systemzuverlässigkeit darstellen. Für die quantifizierbare Aussage über einen tatsächlich vorhanden systemkritischen Hotspot muss dieser anhand eines systemkritischen Maßes, wie zum Beispiel energetischer Wirkungsgrad oder maximale Energiedichte pro Fläche, näher untersucht werden. Im Fall von potentiellen Schwachstellen können diese in diesem Schritt in einem Bool'schen Modell simuliert werden [3].

#### **7. Betrachtungstiefe der Komponenten des reduzierten Systems festlegen**

An den lokalisierten Hotspots muss eine Untersuchung in einer tieferen energetischen Betrachtungsebene erfolgen. Diese muss hinreichend tief gewählt werden, um Fehlerursachen abzuleiten. Aufgrund der Top-Down-Vorgehensweise können thermische Wechselwirkungen, die auf einer zuvor abstrakteren Ebene nicht identifiziert werden konnten, erkannt und bei der Belastungsermittlung weiter berücksichtigt werden und daraus ein Lastkollektiv bestimmt werden.

#### **8. Betrachtungstiefe iterativ im Entwicklungsprozess überprüfen und anpassen**

Die Betrachtungstiefe pro untersuchter Komponente wird dokumentiert. Durch neu gewonnene Erkenntnisse im Entwicklungsprozess können Betrachtungstiefen angepasst werden.

#### **9. Systemzuverlässigkeit validieren**

Mit Hilfe des in Schritt 6 abgeleiteten Bool'schen Modells und des in Schritt 7 ermittelten Lastkollektivs wird die Zuverlässigkeit in einem Wahrscheinlichkeitsnetz modelliert. Trotz der thermischen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten bleibt die Anwendung des Bool'schen Modells zulässig, da diese im Lastkollektiv berücksichtigt werden. Die sich im Wahrscheinlichkeitsnetz ergebende Systemzuverlässigkeit wird mit Hilfe der Anforderungen aus dem Pflichtenheft validiert.

#### **10. Kritische Bauteile optimieren**

Das Wahrscheinlichkeitsnetz bietet die Möglichkeit Optimierungspotentiale auszuschöpfen. Dies bedeutet einerseits, dass systemausfallrelevante Komponenten zuverlässiger gestaltet werden können und andererseits die für die Systemzuverlässigkeit irrelevanten Komponenten kostenoptimiert gestalten werden.

Durch die Anwendung dieser genannten Arbeitsschritte wird eine systematische Vorgehensweise zur zuverlässigkeitsorientierten Produktentwicklung gewährleistet.

## **4 Verifizierung der Methodik**

Der Abschnitt der Systemanalyse, Arbeitsschritte eins bis vier, für das in diesem Artikel integrierte Beispiel, wurde in Kapitel 2 angedeutet. Folgend werden die Arbeitsschritte fünf bis zehn anschaulich erklärt.

Im fünften Arbeitsschritt werden die Energieflüsse modelliert. Hierfür wird zur Lastkollektivvermittlung mittels Simulation ein thermisches Modell des reduzierten Systems erstellt. Die systeminternen thermischen Wechselwirkungen der Komponenten stellen wichtige Einflussfaktoren für die Zuverlässigkeitsbewertung dar und müssen durch geeignete Parameter simuliert werden. Es werden für die jeweiligen Bauteile werkstoffabhängige Wärmekapazitäten und Wärmeabgabefähigkeiten definiert. Dadurch ergibt sich ein thermisches Ersatzschaltbild, bestehend aus Wärmewiderständen und Wärmekapazitäten.

Thermische und elektrische Größen weisen einen analogen Aufbau der Differentialgleichungen für jeweilige Vorgänge auf [4]. Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen der homogenen Wärmeleitungsgleichung und der Differentialgleichung des elektrischen Potentials für die induktionsfreie Leitung erläutert.

Bei Wärmeübertragungsvorgängen wird eine bestimmte Wärmemenge von einem wärmeren Körper zu einem kälteren Körper transportiert. Zur Beschreibung dieser Abläufe kommt die Wärmeleitungsgleichung zur Anwendung. Die Wärmeenergie im Zeitpunkt  $t$  ist wie folgt definiert[5]:

$$W_v(t) = c \int_V \theta(t, x) \rho(x) dV(x) \quad (4.1)$$

spezifische Wärmekapazität  $c$ , Temperatur  $\theta$ , Dichte  $\rho$ , Volumen  $V$

Das Fourier'sche Gesetz der Wärmeleitung bildet die Grundlage zur Beschreibung von Wärmeübertragungsvorgängen. Es besagt, dass ein aus einem Temperaturunterschied resultierender Wärmestrom, durch ein Flächenstück von einem wärmeren in ein kälteres Gebiet, proportional zu diesem Temperaturunterschied ist [6]:

$$\dot{q}(t, x) = -k \nabla \theta(t, x) = -k \text{grad}(\theta(t, x)) \quad (4.2)$$

Wärmeleitfähigkeit  $k$ , Nabla – Operator  $\nabla$

Durch Anwendung des Integralsatzes von Gauss kann der Term für den Wärmestrom umgeformt werden zu [7]:

$$\dot{q}(t, x) = -k \int_v \Delta \theta(t, x) dV(x) \quad (4.3)$$

LaPlace – Operator  $\Delta$

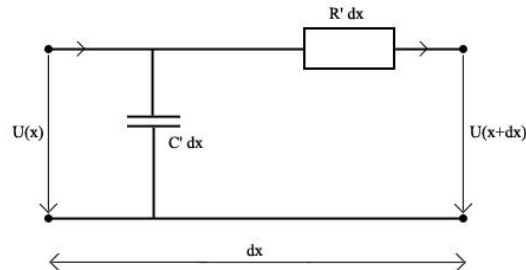
Ohne weitere Energiequellen im Körper ist der Verlust, bzw. die zeitliche Änderung der Wärmeenergie  $-\frac{\partial}{\partial t} W_v(t)$  gleich dem Wärmestrom [5]. Setzt man für die Wärmeenergie Gleichung 4.1 ein ergibt sich folgende Bilanzgleichung für das Volumen  $v$ :

$$\frac{\partial}{\partial t} c \int_v \theta(t, x) \rho(x) dV(x) = k \int_v \Delta \theta(t, x) dV(x) \quad (4.4)$$

Mit der Temperaturleitfähigkeit  $a = \frac{k}{c\rho}$  und  $\rho = \text{const.}$  kann der Term umgeschrieben werden zur Wärmeleitungsgleichung [5]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \theta(t, x) = a \Delta \theta(t, x) q(t, x) \quad (4.5)$$

Zur Verständnis der Analogie muss die Differentialgleichung des elektrischen Potentials bestimmt werden. Folgendes Bild 6 zeigt ein Ersatzschaltbild, mit dessen Hilfe die Ermittlung des elektrischen Potentials veranschaulicht werden soll.



**Bild 6:** Ersatzschaltbild

Das elektrische Ersatzschaltbild stellt eine Schaltung mit den Leitungsbelägen  $R'$  und  $C'$  dar.

Dabei ist  $C' = \frac{\partial C}{\partial x}$ ,  $R' = \frac{\partial R}{\partial x}$ , und  $dx$  beschreibt die infinitesimale Länge [8].

Unter Anwendung der Kirchhoff'schen Regeln ergeben sich für die Spannung  $U$  und die Stromstärke  $I$  folgende Gleichungen [5].

$$U(x + dx) = U(x) + \frac{\partial U}{\partial x} dx \quad (4.6)$$

$$I(x + dx) = I(x) + \frac{\partial I}{\partial x} dx \quad (4.7)$$

Mithilfe elementarer mathematische Umformungen kann die Gleichung für das elektrische Potential  $\varphi$  geschrieben werden als [8]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi(t, x) = \frac{1}{R' \cdot C'} \Delta \varphi(x, t) \quad (4.8)$$

Stellt man die Gleichungen (4.5) und (4.8) mit der Dichte  $\rho = \frac{m}{Al}$  gegenüber, erhält man als entsprechende Größen Wärmewiderstand  $R_{th}$  und elektrischer Widerstand  $R'$ , sowie Wärmekapazität  $C_{th}$  und elektrische Kapazität  $C'$ . Die thermischen Größen ergeben sich zu [8]:

$$C_{th} = m \cdot c \quad (4.9)$$

$$R_{th} = \frac{l}{k \cdot A} \quad (4.10)$$

Mit diesem Zusammenhang ergibt sich eine Analogie zwischen elektrischem Potential und Temperatur. Durch diese Beziehung kann abgeleitet werden, dass ein diskretes Ersatzschaltbild, bestehend aus Wärmewiderständen und Wärmekapazitäten, zur Beschreibung des thermischen Verhaltens angewendet werden kann.

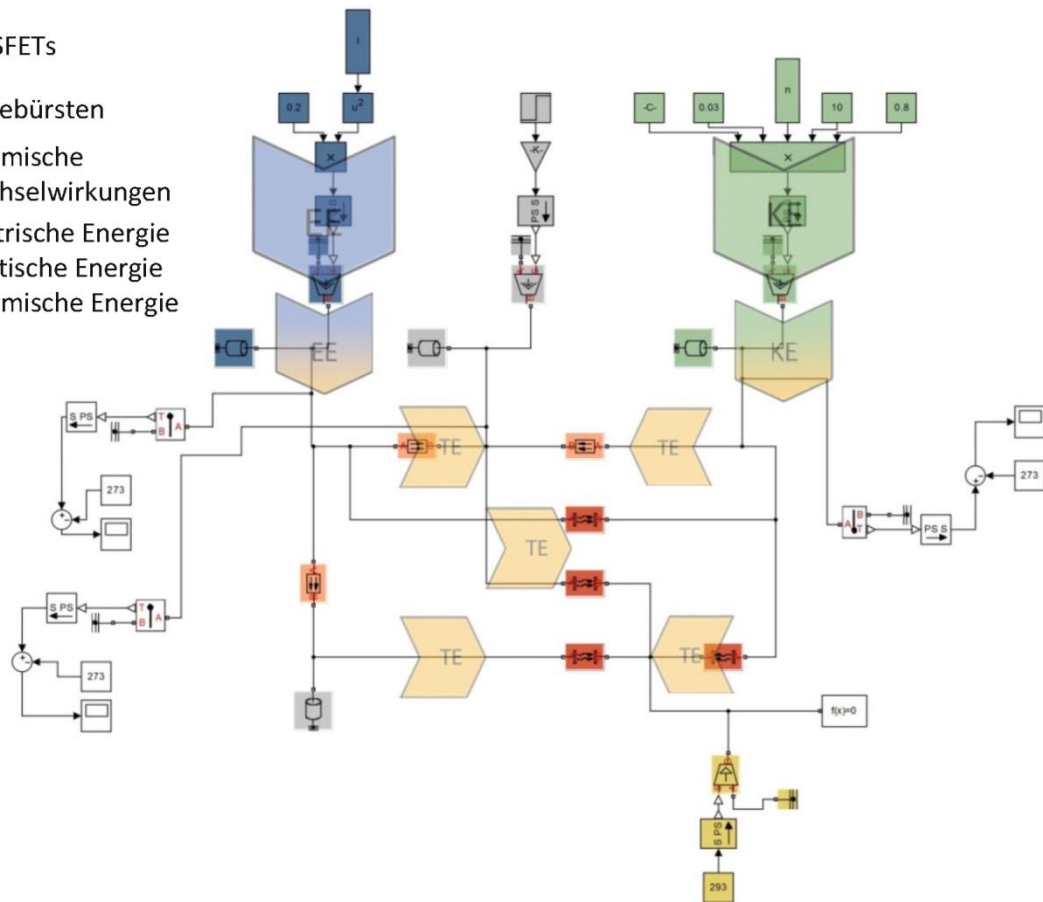


Die physikalischen Eingangsgrößen der kritischen Komponenten werden durch geeignete Blöcke beschrieben. Bei den MOSFETs erfolgt die Bauteilbelastung durch elektrische Leistung (EE), bei den Kohlebürsten wird eine mechanische Leistung (KE) simuliert.

Ein beispielhaftes thermisches Modell stellt folgende Bild 7 dar.

#### Legende:

- MOSFETs
- Kohlebürsten
- Thermische
- Wechselwirkungen
- EE Elektrische Energie
- KE Kinetische Energie
- TE Thermische Energie



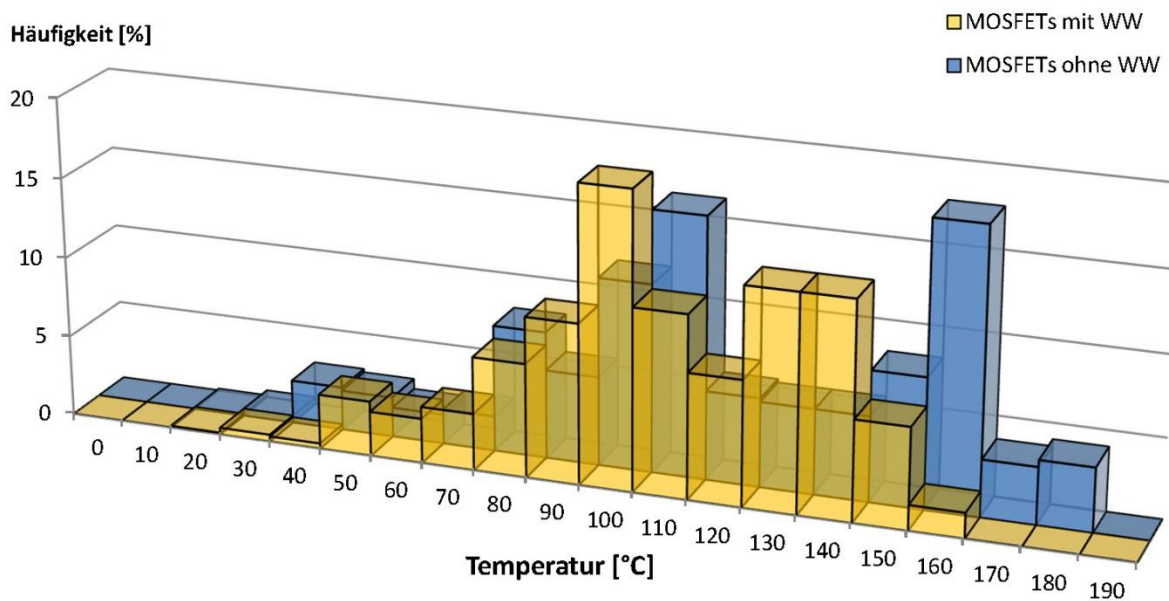
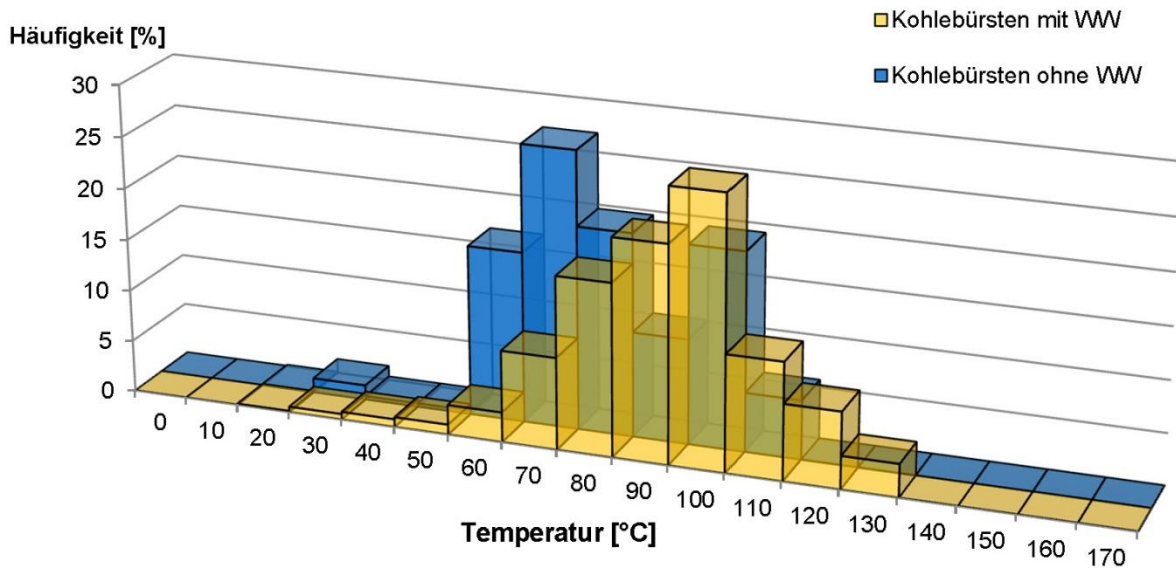
**Bild 7:** Thermisches Modell E-Maschine

Die auftretende Verlustleistung wird im thermischen Modell als Wärmequelle simuliert.

Zur Modellierung der thermischen Wechselwirkungen werden Blöcke, stellvertretend für die systemkritischen Komponenten Kohlebürsten und MOSFETs, für konduktive, konvektive und strahlungsinduzierte Wärmeübertragung verwendet. Simuliert wird dabei der Leistungseintrag in und aus dem System und die dabei entstehende thermische Wärmeleitung beziehungsweise die gegenseitige Wechselwirkung der Komponenten.

#### 4.1 Simulationsergebnisse

Um den Einfluss der Wechselwirkungen zwischen den Komponenten anschaulich darzustellen, wurden zwei verschiedene Simulationen durchgeführt. Während die erste Simulationen thermische Wechselwirkungen berücksichtigt, wurden diese in der zweiten Simulation vernachlässigt.



**Bild 8:** Normierte Temperaturverteilung mit und ohne Wechselwirkung (WW) der Kohlebürsten (oben) und der MOSFETs (unten).

## 4.2 Vergleich der Ergebnisse

Die Notwendigkeit der Modellierung von systeminternen, thermischen Wechselwirkungen zur Zuverlässigkeitsauslegung zeigt der Vergleich der Simulationsergebnisse.

Die Histogramme der simulierten Temperaturverläufe der kritischen Komponenten zeigen den Einfluss der thermischen Interferenzen. Dabei kann bei der Nichtberücksichtigung der Wechselwirkungen die Zuverlässigkeitsauslegung durch Überdimensionierung beeinflusst werden oder eine Auslegung für ein zu niedriges Lastniveau erfolgen.

## 5 Zuverlässigkeitstechnische Bewertung

Für die zuverlässigkeitstechnische Bewertung der Methodik werden beispielhaft für beide Komponenten Lebensdauermodelle hinterlegt. Dies ist für die elektrische Komponente MOSFET das Arrhenius-Gesetz nach [9] wie folgt definiert:

$$N = e^{\left(-\frac{E_a}{k \cdot T}\right)} \quad (5.1)$$

Mit der Boltzmann-Konstante  $k$ :

$$k = 8,617 \cdot 10^{-5} \frac{eV}{K} \quad (5.2)$$

und der Aktivierungsenergie  $E_a$  für elektrische Widerstände nach [9]:

$$E_a = k \cdot 4056 K = 0,35 eV \quad (5.3)$$

Die Lebensdauer der mechanischen Verschleißkomponenten Kohlebürsten wird ebenso durch die Temperatur und deren Wechselwirkung beeinflusst [10]. Es wird der temperaturabhängige Verschleiß von:

$$V = \begin{cases} +0,04 & ; T \leq 30^\circ C \\ +0,008 \cdot T - 0,2 & ; T > 30^\circ C \end{cases} \quad (5.4)$$

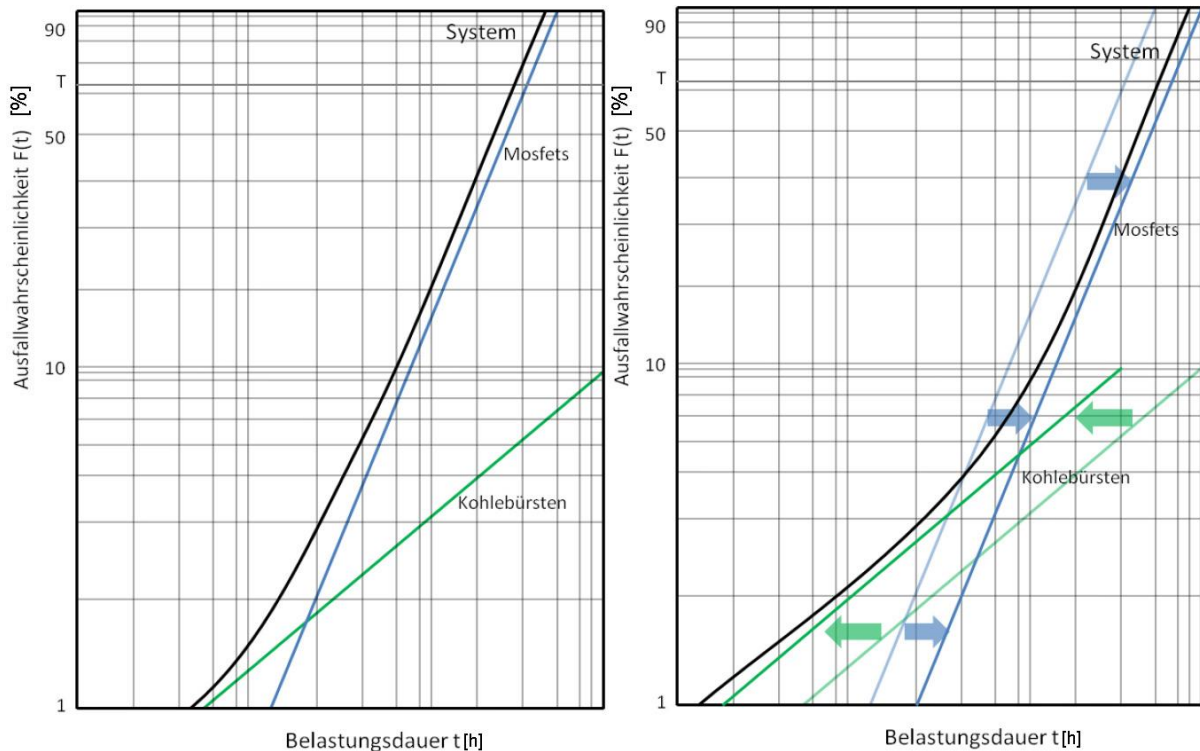
angenommen (in Anlehnung an [10]).

Aus der Analyse der Wechselwirkung zwischen beiden Komponenten und der Berücksichtigung des Wärmeeintrags von den MOSFETs ergibt sich ein höheres Temperaturniveau an den Kohlebürsten.

Auf Basis des Verschleißmodells wurde ein Raffungsfaktor  $R$  mit einer um den Faktor  $f = 12,60$  verringerten Lebensdauer identifiziert.

Durch die Berücksichtigung der Wärmeabfuhr der MOSFETs konnte auf Basis des Arrhenius-Modells. Eine Lebensdauererlängerung der MOSFETs um den Faktor  $f = 1,57$  ermittelt werden. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass Wärmeübertragungsvorgänge von den MOSFETs vernachlässigt wurden. Dadurch kann ein zuverlässigkeitsorientierteres Design abgeleitet werden, indem eine Überdimensionierung der MOSFETs verhindert wird.

Die Auswirkungen auf die Ausfallwahrscheinlichkeit zeigt qualitativ das folgende Bild 9, unter der Annahme einer zuverlässigkeitstechnischen Serienstruktur, ohne und mit Berücksichtigung der thermischen Wechselwirkungen. Die Gegenüberstellung mit Berücksichtigung der thermischen Interaktion zeigt die Verschiebung der Ausfallwahrscheinlichkeitsverläufe beispielhaft durch die ermittelten Modelle.



**Bild 9:** Ausfallwahrscheinlichkeiten ohne (links) und mit (rechts) thermischen Wechselwirkungen

Diese Verschiebungen haben Einfluss auf die Systemlebensdauer, die frühen Belastungsdauern hauptsächlich durch die Kohlebürsten dominiert werden. Daraus kann der Rückschluss gezogen werden, dass die MOSFETs unter Betrachtung der Wechselwirkung deutlich überdimensioniert sind. Im Rahmen des zuverlässigkeitsorientierten Designs bestehen nun zwei sinnvolle Handlungsoptionen: Einerseits kann eine Optimierung der Systemlebensdauer durch Verbesserung der Kohlebürsten erzielt werden. Andererseits kann eine Kostenoptimierung der MOSFETs durch Downsizing erfolgen, ohne dass die Systemzuverlässigkeit wesentlich beeinflusst wird.

## 6 Zusammenfassung

Die energiebasierte Zuverlässigkeitsanalyse (ERA) erweist sich als eine Methodik zur Erkennung von Schwachstellen in Systemen und deren Beschreibung von Wirkzusammenhängen. Hierbei lassen sich diese Komponenten durch ein detailliertes Systemverständnis in erster Linie quantitativ auf Basis von stationären Energie- beziehungsweise dynamischen Leistungsflüssen beschreiben. Besteht allerdings keine Möglichkeit, zum Beispiel aufgrund von fehlenden Messdaten, die auftretenden Energien beziehungsweise Leistungen zu ermitteln, kann die ERA-Methodik dennoch qualitativ zur Bestimmung von kritischen Komponenten angewendet werden.

Durch Kenntnis der wirkenden Belastungen, unter Berücksichtigung der dabei entstehenden Wechselwirkungen, werden Komponenten-Zuverlässigkeiten exakter bestimmt.

Wie in Kapitel fünf gezeigt, beeinflussen die thermischen Wechselwirkungen zwischen den Komponenten deren Aussage über die Zuverlässigkeit im Feld. Eine isolierte Betrachtung würde entweder zu einer überdimensionierten oder andererseits zu einer unterdimensionierten Komponente führen.

In weiteren Untersuchungen wird ein Maß zur Bestimmung einer kritischen Übergangsstelle beziehungsweise Hotspots für Komponenten oder Orte definiert, die hohe Energiedichten aufzeigen. Zudem wird geklärt, wie die daraus resultierende Zuverlässigkeit quantitativ bestimmt werden kann.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Stypa, H. Schaltschrank-Klimatisierung: Grundlagen, Komponenten, Anwendungen. Verl. Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 1992.
- [2] Bertsche, B. et al. Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme. Springer, Berlin, 2009.
- [3] Bertsche, B. und Lechner, G.. Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Springer, Berlin, 2004.
- [4] Weckenmann, A. – Das Frequenzverhalten von thermischen Bauelementen. Springer, Berlin, 1974.
- [5] Müller, H.; Piffer, N.; Raschke, B.; Wogrin, M. – Die Wärmeleitungsgleichung-Projekt aus Partielle Differentialgleichungen. Universität Würzburg, 2004.
- [6] Herwig, H.; Moschallski, A. – Wärmeübertragung. Vieweg + Taubner, Wiesbaden, 2009.
- [7] Merziger, G.; Wirth, T. – Repititorium der höheren Mathematik, Binomi, Barsinghausen, 2006.
- [8] Weckenmann, A. – Das Frequenzverhalten von thermischen Bauelementen. S. 4-5., Archiv für Elektrotechnik Band 65, H.3, Springer, Berlin, 1974.
- [9] Military Handbook – Reliability Prediction of electronic Equipment. Department of Defense, Washington DC, 1991. MIL-HDBK-217F, Notice two. – Kapitel 9.4
- [10] Volkmann, Wilhelm - Kohlebürsten – Untersuchungsergebnisse Erfahrungen Empfehlungen. Schunk & Ebe GmbH, 1980.