

# KOMPLEXE UND INTEGRIERTE METHODEN ZUR ZUVERLÄSSIGKEITSBEWERTUNG BERÜHRUNGSFREIER LAGER

**Stephan DÜSTERHAUPT, Frank WORLITZ**

*Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik*

*Hochschule Zittau/Görlitz*

*Theodor-Körner-Allee 16*

*02763 Zittau, Germany*

*Tel.: +493583 611383, Fax: +493583 611288*

*Email: s.duesterhaupt@hszg.de, f.worlitz@hszg.de*

## **Kurzfassung**

Für den Einsatz aktiver Magnetlager in der Energietechnik muss die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems nachgewiesen werden.

Der Einsatz von Magnetlagerungen in Turbomaschinen, wie sie bspw. Turbinen, Pumpen und Verdichter darstellen, ist durch extreme Prozess- und Umgebungsbedingungen charakterisiert. Fertigungstoleranzen in den Lagerkomponenten und die Beeinflussung durch spezifische Betriebs- und Störszenarien führen zu Parameterdriften, die um die Erwartungswerte einer Nennwertauslegung streuen. Die Folge ist eine arbeitspunkt- und lastabhängige Zuverlässigkeit der Lagerkomponenten. Ein unter Nominalbedingungen funktionsfähiges aktives Magnetlager versagt ggf. aufgrund mechanischer, elektrischer oder magnetischer Parameterdriften.

Die Auslegung aktiver Magnetlager soll um die Zuverlässigkeitsanalyse unter Berücksichtigung von Nichtlinearitäten erweitert werden. Dabei werden mit Hilfe geeigneter Methoden im Gegensatz zur diskreten Herangehensweise die spezifischen Lagerparameter unscharf betrachtet. Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation werden im Rahmen von Simulationen Teilversagenswahrscheinlichkeiten der Komponenten ermittelt und mit Hilfe der Fehlerbaumanalyse zu einer Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems zusammengefasst. Es wird im Auslegungsprozess ermittelt, welche Komponenten des Regelkreises redundant/diversitär ausgeführt werden müssen.

## **1 Motivation**

Aktive Magnetlagerungen (AML) stellen eine Schlüsseltechnologie in modernen Kraftwerks-

konzepten [1, 2] dar. Aufgrund ihrer Vorteile wie

- Schmiermittelfreiheit,
- geringer Verschleiß,
- Variation von Lagersteifigkeit und Lagerdämpfung während des Betriebes und
- hoher Wirkungsgrad

werden sie zunehmend in sicherheitsrelevanten Systemen integriert. Dabei stehen insbesondere Turbomaschinen in Kernkraftwerken im Fokus.

Praktische Erfahrungen während der Inbetriebnahme einer magnetgelagerten Kühlmittelpumpe zeigen, dass ein prinzipiell funktionierendes Lager ggf. unter realen Kraftwerksbedingungen versagen kann. Trotz einer sorgfältigen Anwendung der Auslegungsalgorithmen führten im Wesentlichen Temperatureinflüsse zu unzulässigen Parameterdriften und damit zu einem Lagerausfall.

Im beschriebenen Fall waren die an der (analogen) Regelelektronik und den Pulsstellern gemessenen mittleren Temperaturen deutlich größer als die bei der Magnetlagerauslegung berücksichtigten Werte. Der Temperatureinfluss führte zu veränderten Sollströmen an den Ausgängen der Lageregler und zu einer Abschaltung von Endstufen durch den thermischen Schutz. Weiterhin war der Axial Schub am Pumpenlaufzeug in ausgewählten Betriebsfällen (Anfahren gegen geschlossenen Schieber) ca. 5 bis 6 mal größer als der Wert, der durch den Pumpenhersteller

in der Anforderungsspezifikation genannt wurde.

Die qualitative und quantitative Beurteilung der Zuverlässigkeit ist Voraussetzung für die Zulassung und Verwendung aktiver Magnetlager in sicherheitsrelevanten Systemen. Bereits innerhalb des Design-Prozesses ist zu prüfen, inwieweit das AML-System seinen Systemzweck unter Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Unsicherheiten seiner Komponenten und der Prozessumgebung erfüllt.

### Aktive Magnetlager in der Kraftwerkstechnik

Ein AML ist ein Produkt der Mechatronik. Es besteht aus mechanischen, elektrischen, elektronischen Komponenten und ggf. Software. Der Einsatz berührungsfreier Lager in Turbomaschinen der Kraftwerkstechnik (Abb. 1) ist durch hohe Prozess-/Umgebungstemperaturen und durch hohe mechanische Belastungen gekennzeichnet. Dabei besitzen die Lagerkomponenten unterschiedliche Ausfallmechanismen, deren charakteristische Restriktionsgrenzen zu einer arbeitspunktabhängigen Zuverlässigkeit der Teilkomponente und damit des Magnetlagersystems führen.

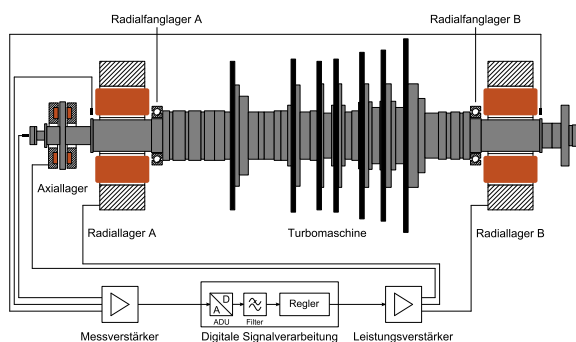


Abb. 1: Vollständig magnetgelagerte Maschine

### Nennwertauslegung von AML für Kraftwerksmaschinen

Die Auslegung von AML erfolgt gegenwärtig auf Basis von Nennwerten. Mit der Nennwertauslegung wird ein AML parametrisiert, das unter der Annahme eines weitestgehend idealen Komponenten-/Bauelementeverhaltens eine notwendige Tragkraft gewährleisten soll. Die hierzu

notwendigen Eingangsparameter und Belastungen können in der Praxis allerdings häufig nur abgeschätzt werden. Wesentliche Ursache dafür ist ein Informationsdefizit durch fehlende Messdaten oder aufgrund einer ungenügenden Wissensbasis über den Prozess. Vor allem bei Strömungsmaschinen in der Kraftwerkstechnik existieren entsprechende Unsicherheiten. Das strömende Medium – Fluid oder Gas – kann grundsätzlich von einer laminaren in eine turbulente Strömung mit schwer oder nicht vorhersagbaren mechanischen Belastungen für die Arbeitsmaschine übergehen.

Die Unsicherheiten bei der Auslegung von AML, die aus Toleranzen und Driften infolge des Herstellungsprozesses oder aus mechanischen und thermischen Einflüssen resultieren, werden mit Sicherheitsfaktoren diskretisiert.

### Hauptziel

Nachfolgend werden Methoden und Verfahren für die Modellierung und Simulation der Zuverlässigkeit magnetgelagerter Maschinen beschrieben. Mit Hilfe qualitativer und quantitativer Untersuchungen soll das Ergebnis einer Magnetlagersauslegung (mit Nominalwerten parametrierter Regelkreis) in Bezug auf seine Funktionsfähigkeit bei Parameterschwankungen analysiert werden.

Langfristig wird das Ziel verfolgt, die Zuverlässigkeit berührungsfreier Lager während des Betriebes innerhalb einer Online-Zustandsdiagnose einzuschätzen. Damit soll an Hochleistungsmaschinen mit berührungsfreien Lagern eine Schadensskalation frühzeitig verhindert und eine zustandsorientierte Wartung und Instandhaltung ermöglicht werden.

## 2 Modellbildung und Nennwertsimulation

Basis für die Simulation der Zuverlässigkeit bilden physikalische Modelle, welche die komponentenspezifischen Nichtlinearitäten berücksichtigen.

Der Einfluss von Nichtlinearitäten elektromagnetischer Aktoren wird durch elektrische, thermische und magnetische Teilmodelle berücksichtigt, die entsprechend der Magnetgeometrie in

Netzwerken verschaltet werden. Die im Betrieb auftretenden Leistungs- und Energieflüsse werden unter Berücksichtigung des Einflusses von Umgebung und Prozess bilanziert. Die lastabhängige Eigenerwärmung der Wicklungen und des Blechpaketes führen zu einer thermischen Belastung. Der Elektromagnet versagt, wenn bspw. die Isolationstemperatur einen Grenzwert überschreitet.

Am Beispiel eines 8-poligen Radiallagers in UI-Anordnung (Abb. 2) wird der prinzipielle Modellbildungsprozess des elektrischen und thermischen Verhaltens dargestellt. Zur Vereinfachung

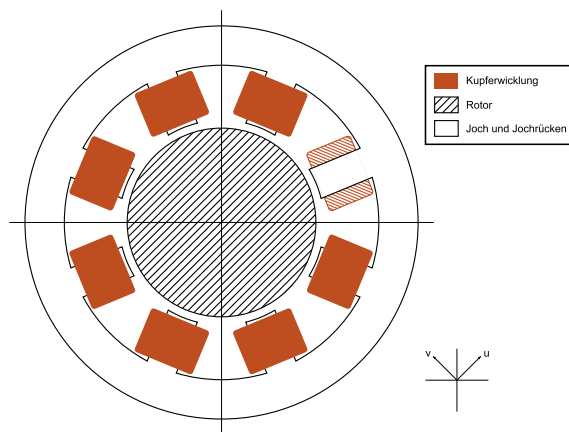


Abb. 2: Radialer elektromagnetischer Aktor

der Modellierung wird die Grobstruktur (Radialmagnet) in n-fach auftretende Feinstrukturen (Wicklung, Joch) zerlegt. Dabei werden systematische und geometrische Symmetrien ausgenutzt.

### Elektrisches Verhalten

Für die Modellierung des elektrischen Verhaltens wird eine Spule als Reihenschaltung (Abb. 3) eines ohmschen Widerstandes  $R$  und einer Induktivität  $L$  idealisiert betrachtet. Der

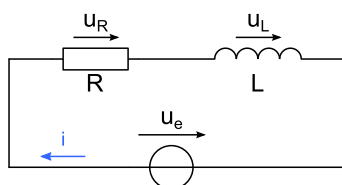


Abb. 3: Spule – Elektrische Ersatzschaltung

Spulenstrom  $i$  berechnet sich unter Anwendung

des Maschensatzes zu:

$$i = \frac{1}{L} \cdot \int_0^T (u_e - i \cdot R) dt \quad (1)$$

Induktivität  $L$ :

$$L = \frac{N^2 \cdot A_{Fe} \cdot \mu_0}{\frac{l_{Fe}}{\mu_r} + 2 \cdot s_0} \quad (2)$$

Temperaturabhängiger Widerstand  $R$  der Kupferwicklung:

$$R = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta T) \quad (3)$$

mit

$$\Delta T = \vartheta_{Cu} - 20^\circ\text{C} \quad (4)$$

Tab. 1 fasst für das Teilmodell eines Elektromagneten ausgewählte Schnittstellenparameter zusammen.

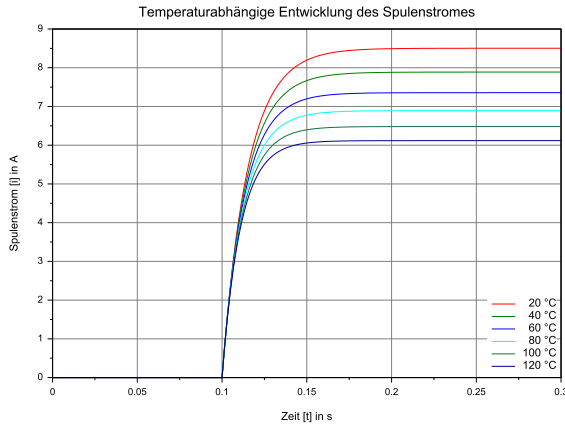
Parameter	Bedeutung
$u_e$	Eingangsspannung
$N$	Windungszahl
$A_{Fe}$	Eisenfläche
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante
$l_{Fe}$	Feldlinienlänge im Eisen
$\mu_r$	relative Permeabilität
$s_0$	Luftspalt
$R_{20}$	Wicklungswiderstand bei $20^\circ\text{C}$
$\alpha_{Cu}$	Temperaturkoeffizient von Kupfer

Tab. 1: Elektromagnetische Schnittstellenparameter (Aktor)

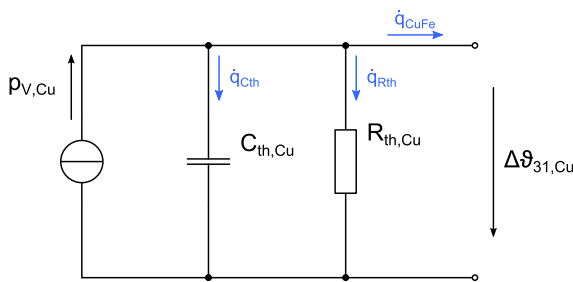
In Abb. 4 ist beispielhaft eine Kurvenschar des temperaturabhängigen Spulenstromes im Bereich von  $20^\circ\text{C}$  bis  $120^\circ\text{C}$  dargestellt.

### Thermisches Verhalten

Für die Entwicklung der thermischen Modellgleichungen werden die thermischen Ersatzschaltungen [3] für eine Spulenwicklung und ein Joch aus dem elektromechanischen Aufbau des Radialmagneten abgeleitet. Die Ersatzschaltung (Abb. 5) besteht aus einer thermischen Quelle ( $p_{V,Cu}$ ), einer Senke, einem Speicher ( $C_{th,Cu}$ ) und einem thermischen Widerstand ( $R_{th,Cu}$ ), die in einem Netzwerk verschaltet sind.



**Abb. 4:** Spulenstrom als Funktion der Temperatur



**Abb. 5:** Thermisches Ersatzschaltbild einer Kupferwicklung

Thermische Kapazität:

$$C_{th,Cu} = m_{Cu} \cdot c_{Cu} \quad (5)$$

Der Wärmestrom ergibt sich allgemein zu:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta\vartheta_{31}}{R_{th}} \quad (6)$$

Mit Hilfe der Kirchhoffschen Regeln wird folgende Leistungsbilanz für die Kupferwicklung aufgestellt:

$$p_{V,Cu} = \dot{q}_{Cth} + \dot{q}_{Rth} + \dot{q}_{CuFe} \quad (7)$$

Die numerische Simulation der Differentialgleichung 1. Ordnung ergibt einen funktionellen Verlauf für die Übertemperatur  $\Delta\vartheta_{31,Cu}$  der Kupferwicklung. Unter Berücksichtigung der Prozess-/Umgebungstemperatur  $\vartheta_A$  im Bereich des elektromagnetischen Aktors ergibt sich seine Absoluttemperatur  $\vartheta_{Cu}$ .

$$\vartheta_{Cu} = \Delta\vartheta_{31,Cu} + \vartheta_A \quad (8)$$

Die Betrachtungen für die Kupferwicklung werden auf das Joch sinngemäß übertragen. Tab. 2

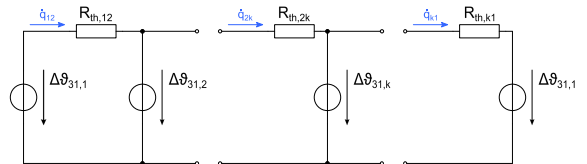
Parameter	Bedeutung
$m_{Cu}$	Kupfermasse
$c_{Cu}$	spezifische thermische Kapazität
$R_{th,Cu}$	thermischer Widerstand
$\Delta\vartheta_{31,Cu}$	Übertemperatur
$\vartheta_A$	Prozess-/Umgebungstemperatur

**Tab. 2:** Thermische Schnittstellenparameter (Aktor)

fasst die thermischen Schnittstellenparameter zusammen.

Kupferwicklung und Joch bilden bezüglich des resultierenden Wärmestromes  $\dot{q}_{CuFe}$  eine Parallelschaltung. Zwischen ihnen findet ein Wärmeübergang statt. Der Potenzialunterschied, d. h. die Differenz zwischen den Übertemperaturen  $\Delta\vartheta_{31}$  bestimmt die Richtung des Wärmeüberganges.

Die Parallelschaltung von acht Elektromagneten (Abb. 6), bestehend aus je einem Joch und einer Kupferwicklung, ergeben das thermische Ersatzschaltbild des Radiallagermagneten. Über



**Abb. 6:** Thermisches Ersatzschaltbild des Jochrückens

den Jochrückens fließen zwischen  $i$  Polen  $i^2 - i$  Wärmeströme von Orten hoher Temperatur (Quellen) zu Orten niedriger Temperatur (Senken).

Es gilt für die Teilwärmeströme  $\dot{q}_{12}$  und  $\dot{q}_{21}$ :

$$\dot{q}_{12} = \frac{\Delta\vartheta_{31,1} - \Delta\vartheta_{31,2}}{R_{th,12}} \quad (9)$$

$$\dot{q}_{21} = \frac{\Delta\vartheta_{31,2} - \Delta\vartheta_{31,1}}{R_{th,21}} \quad (10)$$

Die Ermittlung der Wärmestrombilanz im Joch  $\dot{q}$  erfolgt mit:

$$\dot{q} = (\vartheta^T - \vartheta) \cdot \underline{G}_{th}^T - (\vartheta - \vartheta^T) \cdot \underline{G}_{th} \quad (11)$$

Abb. 7 zeigt beispielhaft die Temperaturverläufe für zwei Kupferwicklungen. Über die Wicklung 1 wurde eine Verlustleistung in das System eingeprägt. Durch die Wärmeleitung im Joch fließt der Wärmestrom zur Wicklung 2, deren Eigentemperatur steigt. Sie zeigt  $PT_2$ -Verhalten.

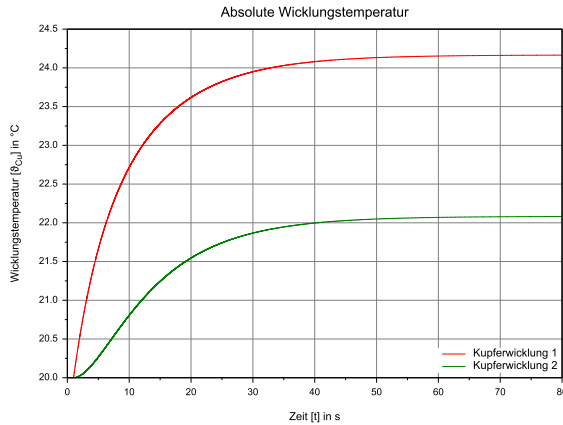


Abb. 7: Absolute Wicklungstemperatur

## Fazit

Unter Ausnutzung von Symmetrien wurden Teilmodelle für die Simulation des elektrischen und thermischen Verhaltens eines elektromagnetischen Aktors entwickelt. Durch Verschaltung zu entsprechenden Netzwerken und der Kopplung dieser können die Leistungs- und Energieströme bilanziert werden. Dabei werden die last- und temperaturabhängigen Verlustleistungen in den Kupferwicklungen berücksichtigt.

Das so erstellte komplexe physikalische Modell eines Elektromagneten bildet die Grundlage für die Simulation der Zuverlässigkeit. Es werden die Temperaturwerte aus der Simulation des thermischen Verhaltens in temperaturabhängigen Spulenparametern berücksichtigt. Darüber hinaus werden die Wicklungs- und Jochtemperaturen als Restriktionsgröße (Grenzwert durch Isolationsklasse vorgegeben) im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalyse ausgewertet. Die Eingangsvektoren der komplexen Teilmodelle werden im Rahmen der probabilistischen Simulation (vgl. Abschnitt 3) über spezifische Schnittstellen parametrisiert.

Ähnliche Betrachtungen und Herangehensweisen werden für alle weiteren Teilkomponenten eines Magnetlagerregelkreises (Sensor, Regler, Leistungsverstärker, Rotor, Energieversorgung, elektrische Leitungen) durchgeführt.

## 3 Probabilistische Simulation

Das beschriebene teilweise Informationsdefizit verhindert eine umfassende Parametrierung der physikalischen Teilmodelle. Im Gegensatz zur Nennwertsimulation (vgl. Abschnitt 2), die mit scharfen Werten arbeitet, werden zur Beseitigung des Informationsdefizits im Rahmen probabilistischer Simulationen mathematische Modelle eingesetzt.

### Berücksichtigung von Unschärfen in den Eingangsvektoren

Ausgewählte physikalische Parameter können in einem ersten Ansatz als normal- oder gleichverteilte Zufallszahl interpretiert werden. Weiteres Potenzial bietet die Fuzzy-Logik. Die Unschärfe eines Parameters wird durch ein spezifisches Vertrauensintervall um seinen Erwartungswert (Nenn-/Nominalwert) dargestellt.

Dabei sind der Erwartungswert  $\bar{x}$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (12)$$

die Varianz  $\sigma^2$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (13)$$

und die empirische Standardabweichung  $\sigma$  wichtige Kenngrößen, die unmittelbar als Simulationsparameter vorgegeben werden. Dabei gibt  $N$  den Stichprobenumfang an.

Tab. 3 zeigt beispielhaft die Betrachtung technischer Parameterwerte mit Unschärfe im Vergleich zur Nennwertdarstellung.

Die Parametrierung der Schnittstellenparameter mit unscharfen Werten, d. h. die Streuung in den Eingangsvektoren, führt zu einer Streuung in den Systemantworten.

Parameter		$\bar{x}$	$\sigma$
Umgebungstemperatur	$\vartheta_A$	100 °C	$\pm 30$ °C
Luftspalt	$s$	500 $\mu\text{m}$	$\pm 300$ $\mu\text{m}$
Wicklungswiderstand	$R_{20}$	1,5 $\Omega$	$\pm 0,2$ $\Omega$

Tab. 3: Modellparameter mit Unschärfe

### Generierung der Stichproben mittels Monte-Carlo-Simulation

Die Ermittlung der Systemantworten erfolgt unter Anwendung der *Monte-Carlo-Simulation*, bei der eine Stichprobe des entsprechenden Parameters oder einer Kombination aus mehreren Parametern generiert wird. Es wird der Zustandsraum des dynamischen AML-Systems abgetastet. Dabei definiert sich der *Systemzustand* als zeitabhängige Kombination aller Variablen der Systemstruktur.

Innerhalb der *Monte-Carlo-Simulation* werden folgende Phasen durchlaufen:

- Ermittlung spezifischer Parameterwerte durch Anwendung mathematischer Modelle (Präprozessor)
- Zuweisung der Werte auf den Eingangsvektor der diskreten Teilmodelle (Parametrierung)
- Aufruf des physikalischen Komplexmodells (Simulation)
- Empfang der Systemantwort
- statistische Auswertung im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalyse (Postprozessor)

Abb. 8 zeigt den Ablauf der probabilistischen Simulation, welche die Methoden in der dargestellten Weise aufruft.

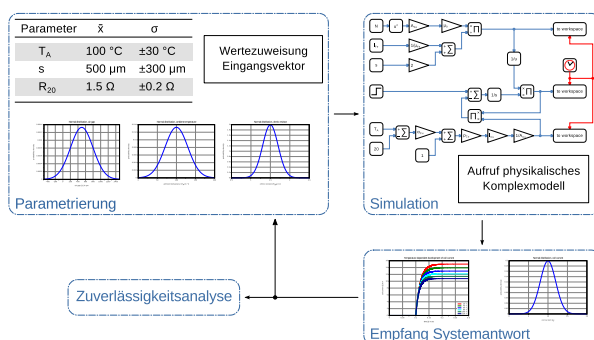


Abb. 8: Ablauf der probabilistischen Simulation

## 4 Zuverlässigkeitsanalyse

Die Ergebniswerte der probabilistischen Simulation werden im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalyse statistisch ausgewertet.

### Zuverlässigkeit nach DIN 40041

Entsprechend der Definition der Zuverlässigkeit nach DIN 40041 [4] wird mit Hilfe der gewonnenen Datenreihen der Grad der Funktionsfähigkeit der Teilkomponenten und des Gesamtsystems unter Berücksichtigung des zu Grunde gelegten Betriebs-/Störszenarios eingeschätzt.

Dazu werden die zuverlässigkeitsrelevanten Restriktionsgrößen, wie der Spulenstrom  $i$ , die Magnetkraft  $F_m$  oder die Wicklungs-/Jochtemperatur  $\vartheta$ , aus der Systemantwort bestimmt. Parallel dazu müssen mit Hilfe von Datenblattangaben, Normen und Vorschriften die spezifischen Restriktionsgrenzen für die Parameter festgelegt werden. In diesem Zusammenhang sei bspw. auf die maximal zulässige Temperatur der Wicklungs- und Blechisolation hingewiesen. Sie beträgt bei der Isolationsklasse  $H$  180 °C. Eine weitere für den elektromagnetischen Aktor wesentliche Restriktionsgrenze ist der maximal zulässige Spulenstrom. Beide Grenzwerte stellen bezüglich der Übertemperatur- und Überstromsicherung zuverlässigkeitsrelevante Angaben dar. Mit Hilfe der Magnetkraft wird die Leistungsfähigkeit des AML bezüglich der mechanischen Belastungen bewertet.

Nach der Auswahl der Restriktionsgrößen werden die zugehörigen Datenreihen auf die Verletzung ihrer Grenzwerte untersucht. Es werden die Grenzverletzungsereignisse innerhalb der Stichprobe gezählt. Gilt für ein spezifisches Grenzverletzungsereignis

$$n_{Fehler} > 0, \quad (14)$$

so kann bezüglich der Restriktionsgröße eine Teilversagenswahrscheinlichkeit

$$P_A = \frac{n_{Fehler}}{N} \quad (15)$$

unter Berücksichtigung des Stichprobenumfangs ermittelt werden.



Mit

$$R_A = 1 - P_A \quad (16)$$

wird eine zugehörige Überlebenswahrscheinlichkeit ermittelt.

Die Teilversagenswahrscheinlichkeiten der Regelkreiskomponenten werden in Fehlerbäumen (vgl. Abschnitt 5) mit Hilfe der booleschen Algebra zu einer Versagenswahrscheinlichkeit des AML-Gesamtsystems zusammengefasst.

### Verifikation am Beispiel einer Lagerspule

Die Verifikation der entwickelten Methoden und der notwendigen Algorithmen erfolgte an einem physikalischen Teilmodell. Für das Beispiel der Lagerspule wurden die Teilversagenswahrscheinlichkeiten bezüglich der Restriktionsgröße *Magnetkraft* an zwei ausgewählten Arbeitspunkten berechnet. Im Ergebnis lagen die Versagenswerte im Bereich des Übergangsvorganges (40 ms nach Spannungssprung) und des stationären Zustandes (300 ms nach Spannungssprung) vor.

Tab. 4 fasst die Erwartungswerte, die den nominalen Arbeitspunkt der Lagerspule im mehrdimensionalen Zustandsraum festlegen, zusammen.

Parameter	Wert	Einheit
Induktivität der Spule	100	mH
Wicklungswiderstand	1,5	$\Omega$
Tragkraft am Arbeitspunkt	6361,5	N
Klemmspannung an der Spule	9	V
Spulenstrom	6	A
Luftspalt am Arbeitspunkt	500	$\mu\text{m}$

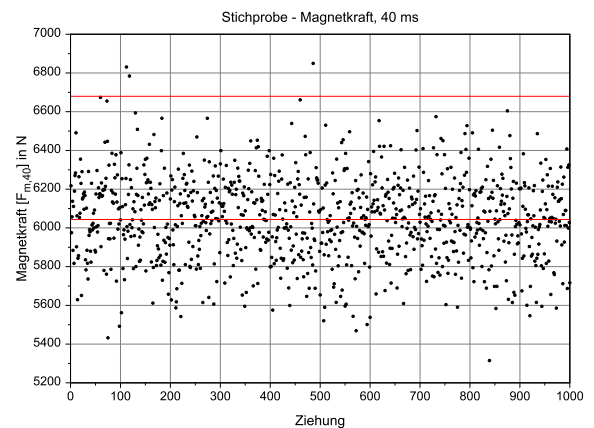
**Tab. 4:** Erwartungswerte der Magnetkreisparameter

Die Standardabweichungen des Aktorluftspaltes und der Klemmspannung betragen  $\pm 5 \mu\text{m}$  bzw.  $\pm 25 \text{ mV}$  normalverteilt.

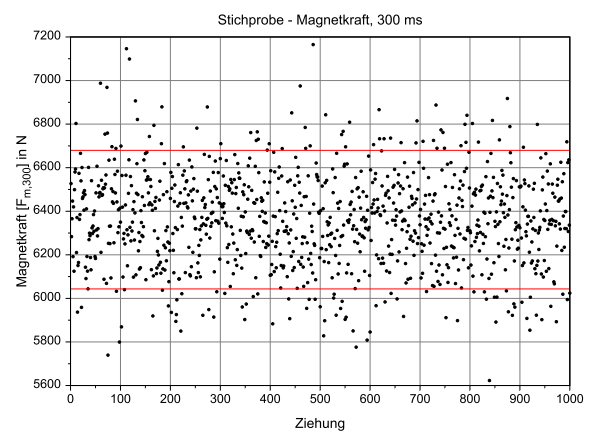
Die nominelle Tragkraft am Arbeitspunkt diente als Bewertungskriterium für das Versagen oder Nichtversagen des Aktors. Werte für die simulierte Tragkraft, welche ein Toleranzband von  $\pm 5 \%$  verlassen haben, wurden als Versagen

gewertet. Die Magnetkraftgrenzwerte betragen 6680 N (obere Grenze) und 6043 N (untere Grenze).

Die Streuungen im Eingangsvektor verursachten Streuungen in der Magnetkraft. Abb. 9 und Abb. 10 zeigen die Magnetkraftwerke als Funktion der Stichprobe (Umfang 1000 Werte).



**Abb. 9:** Streuung der Magnetkraftwerte nach 40 ms



**Abb. 10:** Streuung der Magnetkraftwerte nach 300 ms

Für den Übergangsvorgang wurden innerhalb der Systemantworten drei Verletzungen des oberen Magnetkraftgrenzwertes und 485 Verletzungen des unteren Grenzwertes gezählt. Dies entspricht in Bezug auf den Stichprobenumfang einer Teilversagenswahrscheinlichkeit von 0,003 bzw. 0,485.

Für den eingeschwungenen Zustand ergaben sich in der Stichprobe 66 Verletzungen der oberen Magnetkraftgrenze und 77 Verletzungereignisse an der unteren Grenze. Damit betragen die

Teilversagenswahrscheinlichkeiten 0,066 bzw. 0,077.

Während des Übergangsvorganges war die Versagenswahrscheinlichkeit signifikant höher als im eingeschwungenen Zustand. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass mit der Zeitabhängigkeit der probabilistischen Simulation Übergangsvorgänge in Bezug auf Teilversagenswahrscheinlichkeiten physikalisch plausibel dargestellt werden können.

## 5 Fehlerbaumanalyse

Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse, Teilversagens- oder Teilüberlebenswahrscheinlichkeiten, werden in Fehlerbäumen zu einer Versagens- oder Überlebenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems zusammengefasst.

Die Voraussetzung für die Anwendung von Fehlerbäumen – eine hinreichend genaue Kenntnis über die Systemstruktur – ist beim AML erfüllt. Dabei handelt es sich um ein deduktives Verfahren nach DIN 25424 [5], welches ausgehend von einem Fehlerereignis (Versagen des AML) alle Fehlerpfade bis zu den auslösenden Primärereignissen zusammenfasst.

Für eine Konjunktion (UND) von  $n$  Teilversagenswahrscheinlichkeiten  $P_{A,k}$  berechnet sich die resultierende Versagenswahrscheinlichkeit zu:

$$P_A = \prod_{k=1}^n P_{A,k} \quad (17)$$

Für eine disjunktive Verknüpfung (ODER) von  $n$  Teilversagenswahrscheinlichkeiten gilt:

$$P_A = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - P_{A,k}) \quad (18)$$

Praxiserfahrungen zeigen, dass grundsätzlich von einem Versagen der AML gesprochen werden kann, wenn mindestens ein Magnetlagerregelkreis an der Maschine versagt. Die serielle Anordnung der Teilkomponenten eines Regelkreises ergibt ausschließlich disjunktive Verknüpfungen der Teilkomponenten innerhalb des Fehlerbaumes (Abb. 11), wenn keine

Redundanzen/Diversitäten vorgesehen werden.

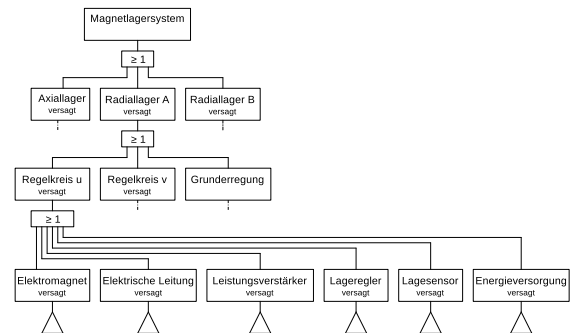


Abb. 11: Ausschnitt aus dem Fehlerbaum eines AML

Abb. 12 zeigt den Teilfehlerbaum eines elektromagnetischen Aktors.

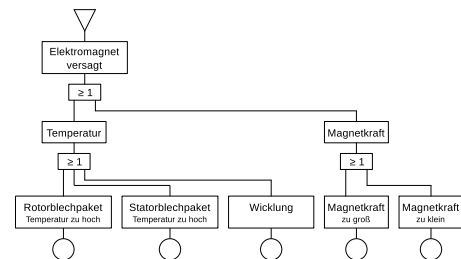


Abb. 12: Fehlerbaum eines Elektromagneten

## Fazit

Für die Teilkomponenten (Elektromagnet, Leitung, Leistungsverstärker, ...) werden Funktionsprototypen erstellt, die die Gesamtheit ihrer spezifischen Ausfallmechanismen und deren Teilversagenswahrscheinlichkeiten unter Anwendung der booleschen Algebra zusammenfassen. Für die geplante Topologie der Regel-/Leistungskreise werden die Funktionsprototypen logisch verknüpft. Es ergeben sich topologiespezifische Fehlerbäume.

Redundanzen werden konjunktiv verknüpft.

## 6 Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt eine Prozedur zur qualitativen und quantitativen Zuverlässigkeitsbewertung aktiver Magnetlager. Dazu werden bereits



während der Auslegung spezifische Nichtlinearitäten von Lagerkomponenten stärker berücksichtigt, ebenso Unsicherheiten von Prozess und Umgebung.

Die diskreten Teilmodelle zur dynamischen Simulation des Systemverhaltens werden durch mathematische Modelle zur Beschreibung der Parameter als unscharfe Werte erweitert.

Für jede Teilkomponente wird im Rahmen der Modellierung der Eingangsvektor spezifiziert, werden Versagensmechanismen definiert und Restriktionsgrößen daraus abgeleitet.

Die Methodik sieht vor, die Eingangsvektoren der diskreten Teilmodelle im Rahmen der *Monte-Carlo*-Simulation mit unscharfen Werten zu parametrieren und das Gesamtsystem zu simulieren. Die Streuung im Eingangsvektor verursacht eine Streuung technischer Parameter in der Systemantwort.

Die gewonnene Systemantwort – bestehend aus Datenreihen von Restriktionsgrößen – wird im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalyse statistisch ausgewertet. Es wird geprüft, wie oft festgelegte Grenzwerte der physikalischen Parameter verletzt worden sind. Unter Berücksichtigung des Stichprobenumfangs ist dies ein Maß für eine Teilversagenswahrscheinlichkeit.

Mit Hilfe von Fehlerbäumen werden die Teilversagenswahrscheinlichkeiten zu einer Versagenswahrscheinlichkeit des AML zusammengefasst.

Die vorgestellte Herangehensweise ermöglicht zukünftig die Bewertung der Zuverlässigkeit für eine gewählte Magnetlagertopologie während des Auslegungsprozesses. Es werden die Unsicherheiten in technischen Parametern, die auf ein grundsätzliches Informationsdefizit zurückzuführen sind, während der Auslegung berücksichtigt. Mit Hilfe der Ergebnisse findet eine Ableitung von Aussagen zu notwendigen Redundanzen statt.

Die Schnittstellen der physikalischen Modelle können mit Messwerten gespeist werden. Die

Algorithmen, in ein Magnetlagerdiagnosesystem implementiert, ermöglichen eine Bewertung der Systemzuverlässigkeit im Rahmen der Online-Zustandsdiagnose.

## Quellenverzeichnis

- [1] WORLITZ, F. u. a.: *The Usage of Simulation for the Development of Active Magnetic Bearings for the GT-MHR-Type Reactor*. Proceedings HTR 2006, 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology. Johannesburg, South Africa, 2006
- [2] WORLITZ, F. ; GRONEK, M. ; ROTTENBACH, T.: *A Contribution on the Investigation of the Dynamic Behaviour of Rotating Shafts with a Hybrid Magnetic Bearing Concept (HMBC) for Blower Application*. Proceedings HTR 2008, 4th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology. Washington D. C., USA, 2008
- [3] KALLENBACH, E. u. a.: *Elektromagnete. Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung*. 2008
- [4] *Zuverlässigkeit; Begriffe*. Norm. 1990–12
- [5] *Fehlerbaumanalyse; Methode und Bildzeichen*. Norm. 1981–09