

MODELLIERUNG UND SIMULATION DER ZUVERLÄSSIGKEIT MAGNETGELAGERTER MASCHINEN

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: SDuesterhaupt@HS-ZiGr.de, FWorlitz@HS-ZiGr.de

Kurzfassung

Der Einsatz aktiver Magnetlager in Turbomaschinen der Kraftwerkstechnik ist durch extreme Prozess- und Umgebungsbedingungen gekennzeichnet. Fertigungstoleranzen und der Einfluss spezifischer Betriebs- und Störszenarien auf die Komponenten eines Magnetlagerregelkreises führen zu Parameterstreuungen. Die Folge ist eine last- bzw. arbeitspunktabhängige Zuverlässigkeit der Lagerkomponenten. Die Auslegung aktiver Magnetlager soll um die Zuverlässigkeitsanalyse unter Berücksichtigung von komponentenspezifischen 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 Teilversagenswahrscheinlichkeiten der Komponenten durch Abtastung des Zustandsraumes ermittelt und unter Anwendung der Fehlerbaumanalyse zu einer Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems zusammengefasst. Es wird im Auslegungsprozess ermittelt, welche Komponenten des Regelkreises redundant/diversitär ausgeführt werden müssen.

1 Aktive Magnetlager in der Kraftwerkstechnik

Ein aktives Magnetlager (AML) als mechatronisches System besteht aus mechanischen, elektrischen, elektronischen Komponenten und ggf. Software. Der Einsatz von Magnetlagern in Turbomaschinen der Kraftwerkstechnik (Abb. 1) ist durch hohe Prozess- und Umgebungstemperaturen sowie aufgrund massereicher Rotoren

durch hohe mechanische Belastungen gekennzeichnet. Dabei besitzen die Lagerkomponenten unterschiedliche Ausfallmechanismen, deren Restriktionsgrenzen zu einer arbeitspunktabhängigen Zuverlässigkeit der Teilkomponente und damit des Magnetlagersystems führen.

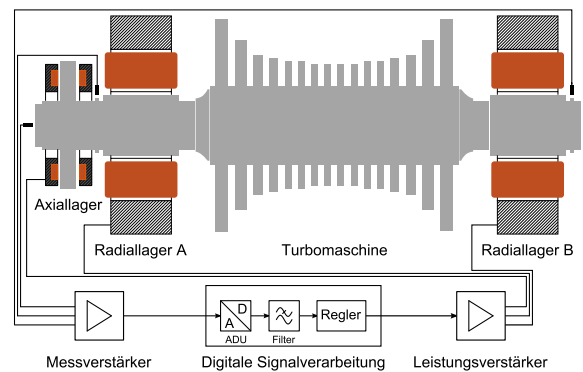


Abb. 1: Vollständig magnetgelagerte Maschine

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.

Zuverlässigkeit

Praktische Erfahrungen bei der Inbetriebnahme der magnetgelagerten Pumpe im Braunkohlkraftwerk Boxberg zeigten, dass ein grundsätzlich funktionsfähiges AML-System, trotz der sorgfältigen Abarbeitung des Auslegungsalgorithmus, unter den realen Bedingungen des Kraftwerksbetriebes (v. a. hohe Umgebungstemperaturen) versagen kann. Im konkreten Fall waren die Umgebungstemperaturen der Leistungselektronik höher als die der Auslegung zugrunde gelegten Werte. Die Folge war ein vorzeitiger Ausfall der Leistungselektronik aufgrund des Ansprechens des thermischen Schutzes der Endstufen. Auch zeigte sich, dass der Axialschub der Pumpe für einzelne Betriebsfälle um den Faktor 5–6 höher war, als der im Lastenheft aufgezeigte Wert, der vom kooperierenden Pumpenhersteller als Erfahrungswert geliefert worden war.

Nachfolgend werden Methoden und Verfahren zur Modellierung und Simulation der Zuverlässigkeit magnetgelagerter Maschinen vorgestellt. Sie sollen zukünftig die Magnetlagerauslegung um den Aspekt der qualitativen und quantitativen Bewertung der Zuverlässigkeit erweitern. Darüber hinaus wird das Ziel verfolgt, im Rahmen der Online-Zustandsdiagnose die magnetgelagerte Maschine einer Zuverlässigkeitsbewertung zu unterziehen. Damit soll die frühzeitige Erkennung und Vermeidung von Schadens eskalationen sowie eine zustandsorientierte Wartung und Instandhaltung magnetgelagerter Großmaschinen im Kraftwerksbetrieb ermöglicht werden.

2 Modellbildung und Nennwertsimulation

Basis für die Simulation der Zuverlässigkeit bilden physikalische Teilmodelle, die 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 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

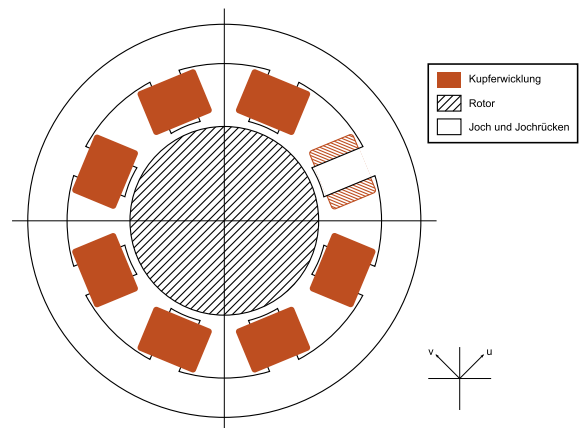


Abb. 2: Radialer elektromagnetischer Aktor

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

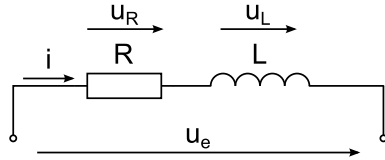


Abb. 3: Spule – Elektrische Ersatzschaltung

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

$$\Delta T = T_0 - 20^\circ\text{C} \quad (4)$$

In Tab. 1 werden für das Teilmodell eines Elektromagneten Schnittstellenparameter identifiziert.

Parameter	Bedeutung
u_e	Eingangsspannung
N	Windungszahl
A_{Fe}	Eisenfläche
μ_0	magnetische Feldkonstante
l_{Fe}	Feldlinienlänge im Eisen
μ_r	relative Permeabilität
s_0	Luftspalt
R_{20}	Wicklungswiderstand bei 20°C
α_{Cu}	Temperaturkoeffizient von Kupfer

Tab. 1: Spule – Elektromagnetische Schnittstellenparameter

In Abb. 4 ist beispielhaft eine Kurvenschar des temperaturabhängigen Spulenstromes im Bereich von 20°C bis 120°C dargestellt.

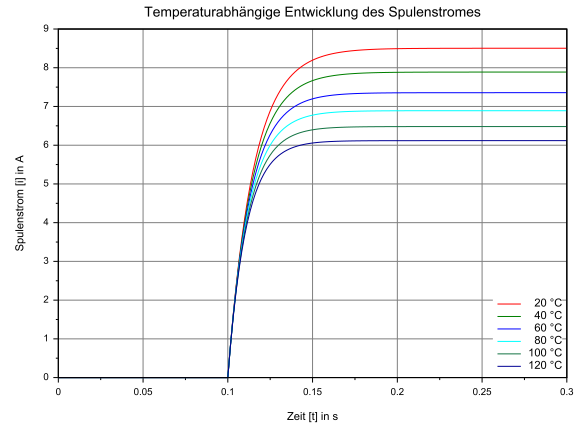


Abb. 4: Temperaturabhängige Entwicklung des Spulenstromes

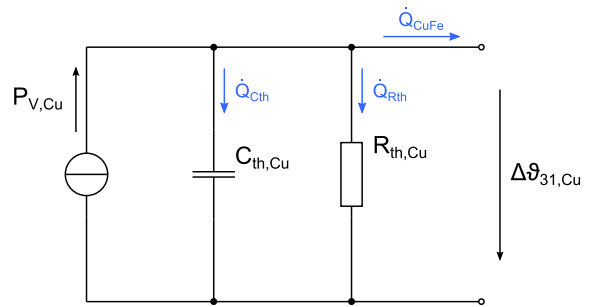


Abb. 5: Thermisches Ersatzschaltbild einer Kupferwicklung

Thermisches Verhalten

Für die Entwicklung der thermischen Modellgleichungen werden die thermischen Ersatzschaltungen [1] für eine Spulenwicklung und ein Joch aus dem elektromechanischen Aufbau des Radialmagneten abgeleitet. Die Ersatzschaltung (Abb. 5) besteht aus einer thermischen Quelle (P_V), Senke, einem Speicher (C_{th}) und einem thermischen Widerstand (R_{th}), die in einem Netzwerk verschaltet sind.

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 T_A im Bereich des elektromagnetischen Aktors ergibt sich seine Absoluttemperatur T_0 .

$$T_0 = \Delta\vartheta_{31} + T_A \quad (8)$$

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

Tab. 2 fasst die thermischen Schnittstellenparameter zusammen.

Parameter	Bedeutung
m	Kupfer-/Eisenmasse
c	spezifische thermische Kapazität
R_{th}	thermischer Widerstand
$\Delta\vartheta_{31}$	Übertemperatur
T_A	Prozess-/Umgebungstemperatur

Tab. 2: Spule – Thermische Schnittstellenparameter

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

Die Parallelschaltung von 8 Elektromagneten (Abb. 6), bestehend aus je einem Joch und einer Kupferwicklung, ergeben das thermische Ersatzschaltbild des Radiallagermagneten. Über

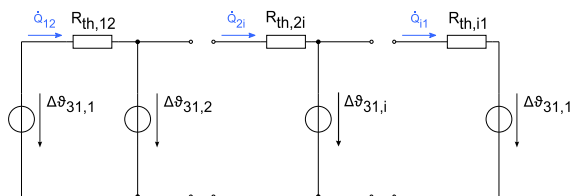


Abb. 6: Thermisches Ersatzschaltbild des Jochrückens

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:

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

Abb. 7 zeigt beispielhaft die Temperaturverläufe für zwei Kupferwicklungen. Über die Wicklung 1 wurde eine Verlustleistung in das System eingepreist. Durch die Wärmeleitung im Joch fließt der Wärmestrom zur Wicklung 2, deren Eigentemperatur steigt. Sie zeigt PT₂-Verhalten.

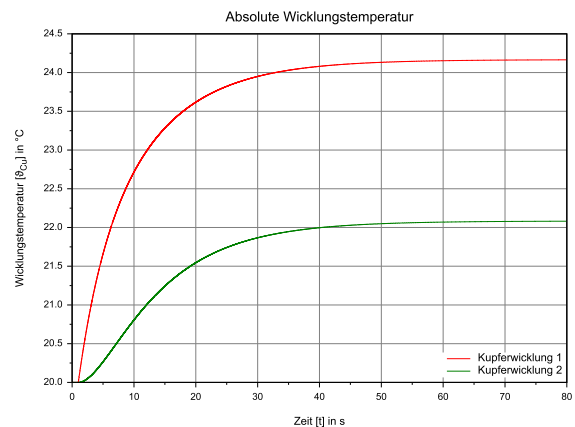


Abb. 7: Absolute Wicklungstemperatur

Fazit

Unter Ausnutzung von Symmetrien wurden Teilmodelle für die Simulation des elektrischen und thermischen Verhaltens eines elektromagnetischen Aktors entwickelt. Durch Verschaltung in 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. Auf der einen Seite 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

Aufgrund des beschriebenen teilweisen Informationsdefizits können die physikalischen Modelle nicht vollständig parametrisiert werden. 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 Eingangsvektoren

Den Parametern werden gleich-/normalverteilte Zufallswerte oder Werte unter Anwendung der Fuzzy-Logik zugewiesen. Die Unschärfe eines physikalischen Parameters [2] lässt sich durch seinen Erwartungswert

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

seine Varianz

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

und durch seine empirische Standardabweichung σ beschreiben.

Parameter	\bar{x}	σ
T_A	40°C	$\pm 10^\circ\text{C}$
l_{Fe}	100,0mm	$\pm 0,2\text{mm}$

Tab. 3: Technische Parameter mit Unschärfe

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.

Monte-Carlo-Simulation

Die Ermittlung der Systemantworten erfolgt unter Anwendung der *Monte-Carlo-Simulation*, bei der eine Stichprobe mit dem Umfang $n_{Stichprobe}$ 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
- ggf. statistische Auswertung im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalyse (Postprozessor)

4 Zuverlässigkeitsanalyse

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

Zuverlässigkeit nach DIN 40041

„Die Gesamtheit der Merkmale einer Systemkomponente bezüglich ihrer Eignung innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne und unter vorgegebenen Bedingungen die festgelegten und vorausgesetzten Anforderungen zu erfüllen, d. h. funktionsfähig zu sein.“

Entsprechend der Definition der Zuverlässigkeit nach DIN 40041 [3] wird mit Hilfe der gewonnenen Datenreihen der Grad der Funktionsfähigkeit der Teilkomponenten und des Gesamtsystems unter Berücksichtigung des zugrunde gelegten Betriebs-/Störszenarios eingeschätzt.

Dazu werden die zuverlässigkeitsrelevanten Restriktionsgrößen, wie der Spulenstrom i , die Magnetkraft F_m oder die Wicklungs-/Jochtemperatur ϑ , 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 F 155°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

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

so kann bezüglich der Restriktionsgröße eine Teilversagenswahrscheinlichkeit

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

unter Berücksichtigung des Stichprobenumfanges 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.

Korrelationsanalyse

Die Untersuchung von Korrelationen zwischen einem Eingangsparameter und Restriktionsgrößen identifiziert systembeeinflussende und damit zuverlässigkeitsrelevante Eingangsgrößen. Mit den Ergebnissen der Korrelationsanalyse können Maßnahmen zur Stabilisierung oder Versagenskompensation des AML durch redundante/diversitäre Ausführung von Teilkomponenten abgeleitet werden.

Abb. 8 zeigt das Beispiel einer starken Korrelation zwischen dem arithmetischen Mittelwert der Spulenspannung u_e und dem Spulenstrom i . Im Vergleich dazu stellt Abb. 9 eine sehr schwache

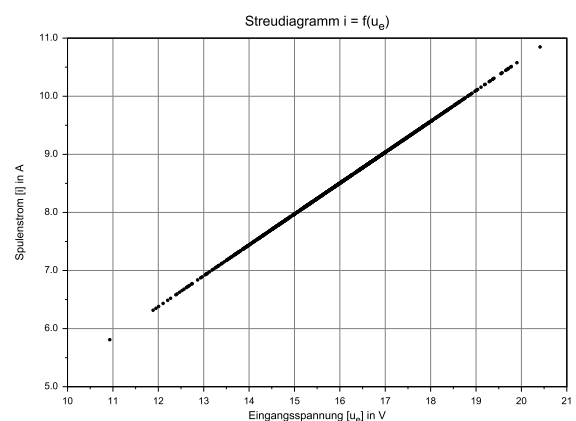


Abb. 8: Streudiagramm mit einer starken Korrelation

che Korrelation zwischen dem Wicklungswiderstand R und dem Spulenstrom i grafisch dar. Während bezüglich der postulierten Betriebsszenarien Maßnahmen zur Stabilisierung des Wicklungswiderstandes nicht notwendig erscheinen,

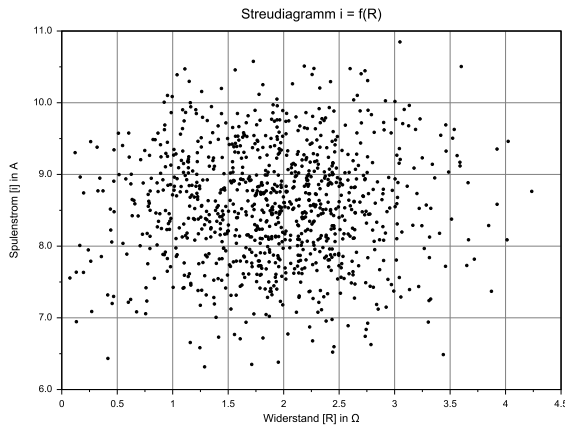


Abb. 9: Streudiagramm mit einer schwachen Korrelation

muss die Spulenspannung grundsätzlich sehr stabil sein. Sie beeinflusst über den Spulenstrom die Magnetkraft. Die Forderung nach einer zuverlässigen Magnetlagerung könnte bspw. die redundante Ausführung des Reglerteils oder der Energieversorgung zur Folge haben. Weiteren Aufschluss gibt die Fehlerbaumanalyse im nachfolgenden Abschnitt.

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 [4], welches ausgehend von einem Fehlerereignis (Versagen des AML) alle Fehlerpfade bis zu den auslösenden Primärereignissen zusammenfasst.

Für eine Konjunktion (UND) zweier Teilversagenswahrscheinlichkeiten P_1 und P_2 berechnet sich die resultierende Versagenswahrscheinlichkeit zu:

$$P_A = P_1 \cdot P_2 \quad (17)$$

Für eine disjunktive Verknüpfung (ODER) zweier Teilversagenswahrscheinlichkeiten

gilt:

$$P_A = 1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) \quad (18)$$

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. 10), wenn keine Redundanzen/Diversitäten vorgesehen werden.

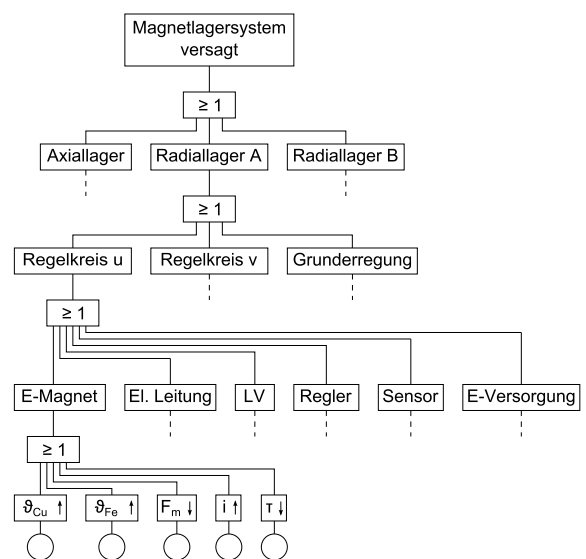


Abb. 10: Ausschnitt aus dem Fehlerbaum eines AML

Die Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems steigt, wenn bspw. die Magnetkraft F_m oder Dynamik τ für den postulierten Belastungsfall ungenügend sind, Grenzwerte für Ströme i oder Temperaturen ϑ überschritten werden.

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 werden konjunktiv verknüpft.

6 Zusammenfassung

Mit Hilfe der vorgestellten Methoden werden die Teilkomponenten aktiver Magnetlager unter Berücksichtigung ihrer spezifischen Nichtlinearitäten modelliert. Insbesondere werden bereits bestehende Modelle um Teilmodelle zur Berücksichtigung thermischer Einflüsse erweitert.

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

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

Die gewonnene Systemantwort – bestehend aus Datenreihen von Restriktionsgrößen – werden einer Zuverlässigkeitsanalyse unterzogen. Dabei 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 mittels der booleschen Algebra 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.

Quellen

- [1] KALLENBACH, E. ; EICK, R. ; QUENDT, P. ; STRÖHLA, T. ; FEINDT, K. ; KALLENBACH, M.: *Elektromagnete. Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung*. 2008
- [2] PAPULA, L.: *Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 2001
- [3] Norm DIN 40041 1990–12. *Zuverlässigkeit; Begriffe*
- [4] Norm DIN 25424-1 1981–09. *Fehlerbaumanalyse; Methode und Bildzeichen*