

# Zuverlässigkeitsbewertung aktiver Magnetlagerungen unter der Berücksichtigung erweiterter Umgebungsbedingungen

**Stephan DÜSTERHAUPT\*, Frank WORLITZ\***

*\* Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik*

*Hochschule Zittau/Görlitz – University of Applied Sciences*

*Theodor-Körner-Allee 16*

*02763 Zittau, Germany*

*Tel.: +49 3583 612 4383, Fax: +49 3583 612 3449*

*E-Mail: S.Duesterhaupt@hszg.de, F.Worlitz@hszg.de*

## **Kurzfassung**

Aktive Magnetlagerungen können in modernen Industrieapplikationen wie Turbomaschinen eine Schlüsseltechnologie darstellen.

Gegenwärtig berücksichtigt der Designprozess Nennwerte in der statischen Auslegung und dynamischen Simulation des magnetgelagerten Systems. Im praktischen Einsatz jedoch beeinflussen der Prozess und die Umgebung die Funktionsweise der Sensoren, Leistungsverstärker und magnetischen Aktoren. Insbesondere der thermische Einfluss verursacht mehr oder minder starke Driften in den Komponenten- und Bauteilparametern. Die Ursachen dafür können hohe Umgebungstemperaturen sein oder mechanische Stützanregungen bzw. Druckänderungen. Die mechanischen Einflüsse führen zu einer zunehmenden Relativbewegung zwischen Rotor und Stator. Infolge der Auslenkungen reagiert das aktive Magnetlager mit Regelingriffen. Die Steuerstromänderungen führen zu einer veränderten Eigenerwärmung der Leistungsteiler und Lagerspulen.

Die arbeitspunkt- und lastabhängige Beeinflussung der Lagerkomponenten führt letztendlich zu einer veränderten Dynamik der Lage- und ggf. der unterlagerten Stromregelkreise. Ein unter Nominalbedingungen funktionsfähiges aktives Magnetlager versagt ggf. aufgrund mechanischer, elektrischer und magnetischer Parameterdriften.

Für den Einsatz muss daher die Zuverlässigkeit des mechatronischen Systems objektiv nachgewiesen

werden. Dies muss unter der Berücksichtigung von Prozess und Umgebung erfolgen.

## **1 Einleitung und Zielstellung**

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

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.

Aus der Einschätzung der Funktions- und Leistungsfähigkeit der Lagerkomponenten als Funktion des Arbeitspunktes, der Belastung und des Alters lassen sich Maßnahmen zum ausfallsicheren Betrieb ableiten. So können

Teile oder der gesamte Regelkreis redundant ausgeführt werden.

Innerhalb der Zuverlässigkeitsbewertung aktiver Magnetlagerungen müssen nach gegenwärtigem Stand zwei Driftmechanismen grundlegend berücksichtigt werden: last- und altersabhängige Parameterdriften in den Bauteilen und Komponenten.

Die lastabhängigen Parameterdriften können mit Hilfe physikalischer Modelle hinreichend genau simuliert werden. So sind Belastungsintensitäten in den Lagerkomponenten zeitabhängig darstellbar.

Die Frage ist aber, wie wird das Funktions- und Leistungsvermögen der Lagerkomponenten durch ihr kalendarisches Alter beeinflusst? Wie verändert sich bspw. die Ausfallrate, wenn das Bauteil eine kurzzeitige thermische Überlastung erfahren hat? Oder wie groß ist die Überlebenswahrscheinlichkeit einer „alten“ Lagerkomponente?

Die Gewinnung von Zuverlässigkeitsdaten für ein Bauteil, oder sogar für eine Lagerkomponente, ist derzeit unzureichend geklärt. Die Simulation der Widerstandsfähigkeit als Funktion des kalendarischen Alters und damit die Definition von Leistungsgrenzen ist gegenwärtig ungelöst. Das Teilmodell zur Bestimmung der kalendarischen Widerstandsfähigkeit ist jedoch essentiell für die Zuverlässigkeitsanalyse.

### **Zielstellung**

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 Magnetlagerauslegung (mit Nominalwerten parametrierter Regelkreis) in Bezug auf seine Funktionsfähigkeit bei Parameterschwankungen analysiert werden.

Während auf wesentliche Aspekte zur Bestimmung der *Belastungsintensität* in [1] bereits eingegangen wurde, stellt die Bestimmung/Bewertung der *Widerstandsfähigkeit* mechatronischer Komponenten eine wesentliche Herausforderung dar. Die Einschätzung der Widerstandsfähigkeit ist besonders für

gealterte Magnetlagerungen für den prognostizierten Ausfall entscheidend.

## **2 Belastungsintensität und Widerstandsfähigkeit**

Die Belastungsintensität und die Widerstandsfähigkeit einer Komponente sind eng miteinander verknüpft. Während die Widerstandsfähigkeit eine Eigenschaft darstellt, die jedem System- und Systemelement inhärent gegeben ist, resultiert die Belastungsintensität aus dem applikationsspezifischen Betrieb einschließlich der Störungen.

Die Widerstandsfähigkeit markiert im Sinne einer Grenze die Funktions- und Leistungsfähigkeit eines Bauteils oder einer Komponente im Zustandsraum. Diese Grenze driftet mit der zunehmenden Alterung. Überschreitet die Belastungsintensität die Widerstandsfähigkeit und damit das Funktions- und Leistungsvermögen eines Bauteils oder einer Komponente so versagt diese und fällt aus.

Für die Zuverlässigkeitsanalyse aktiver Magnetlagerungen kann nach [2] in Normal- und Ermüdungs- oder Alterungsausfälle unterschieden werden.

### **Normalausfälle**

Zu den Normalausfällen werden die Überbeanspruchungsausfälle gezählt. Sie treten während der gesamten Lebensdauer der Lagerkomponenten auf. Ganz allgemein kann gesagt werden, dass ein Überbeanspruchungsausfall dann auftritt, wenn spezifische Belastungsgrenzen der Magnetlagerkomponenten (und da wiederum ihrer Bauteile) verletzt werden.

#### *Technische Belastungsgrenzen*

Die Berücksichtigung von Belastungsgrenzen innerhalb der Zuverlässigkeitsanalysen führen zur Einführung von Restriktionsgrenzen für die physikalischen/technischen Lagerparameter. Sie sind ein Maß für die *Widerstandsfähigkeit*. Die Restriktionsgrenzen lassen sich für den Neuzustand aus den Herstellerangaben der Lagerkomponenten und Bauteile entnehmen. Zudem werden sie mit dem zulässigen Betriebsbereich der Magnetlagerregelkreise festgelegt. Dazu zählen bspw. max. zulässige Temperaturen, Tragkraft, max. Magnetkraft,

max. Lagerströme usw. Diese Überlastungen führen zu Spontanausfällen.

*Regelkreisdynamik (Phasenrand und Amplitudenreserve) als Restriktionsgrenze*

Für aktive Magnetlagerungen muss darüber hinaus die Regelkreisdynamik als Restriktionsgrenze eingeführt werden. Die Lagerkomponenten für sich genommen können funktions- und ausreichend leistungsfähig sein, der Regelkreis kann dennoch instabil werden. Die Ursache liegt in einer unzureichenden Regelkreisdynamik.

Die iterative Nennwertauslegung der Regelkreise ist dann abgeschlossen, wenn für den gewählten Arbeitspunkt oder Betriebsbereich ein gutmütiges Regelverhalten erwartet wird. Die ausgewählten Gütekriterien werden erfüllt. An- und Ausregelzeiten sind hinreichend kurz. Die Überschwingweite und die Regelflächen sind hinreichend klein.

Während des Maschinenbetriebes driften die Werte der Lagerparameter arbeitspunkt- und lastabhängig. Vor allem bei Störungen ändern sich Lagerparameter schnell und mit großen Amplituden. Dies führt zu einem veränderten Frequenzgang (Amplituden- und Phasengang) des offenen Regelkreises gegenüber der Auslegungsreferenz. Damit driften auch die Werte der Stabilitätskriterien *Phasenrand* und *Amplitudenreserve*.

Die Untersuchung der arbeitspunkt- und lastabhängigen Driften in den Lagerparametern erfolgt innerhalb der probabilistischen Simulation eines physikalischen Komplexmodells (Abschnitt 3). Damit kann die *Belastungsintensität* im Magnetlagerregelkreis ermittelt werden.

### **Ermüdungs- oder Alterungsausfälle**

Die Ermüdungs- oder Alterungsausfälle treten in den komponentenspezifischen Ermüdungsphasen auf. Sie zählen auch zum Normausfall. Bisher werden die technischen Belastungsgrenzen und damit die *Widerstandsfähigkeit* als konstant betrachtet. Diese Annahme gilt allerdings nur für den Zeitraum unmittelbar nach der Inbetriebnahme eines neuen Systems.

Einerseits lassen physikalische und chemische Veränderungen die Komponenten grundsätz-

lich altern. Dieser Prozess startet bereits unmittelbar nach der Herstellung. Die Lagerkomponenten altern kalendarisch. Darüber hinaus beschleunigen thermische, elektromagnetische und mechanische Belastungen an den Bauteilen im Lagerbetrieb die physikalischen und chemischen Veränderungsprozesse (*Memory-Effekt*). Beides drückt sich darin aus, dass sich die *Widerstandsfähigkeit* komponentenspezifisch verändert bzw. driftet. Der Regelkreis altert.

Irgendwann sind Veränderungen der Belastungsgrenzen so weit vorangeschritten, dass bereits der Normalbetrieb zum Versagen führt.

Ein Maß für die Widerstandsfähigkeit kann die Ausfallrate als zuverlässigkeitsrelevante Kenngröße darstellen. Diese wird für ausgewählte Bauteile innerhalb umfangreicher Stichproben experimentell ermittelt. Die Ausfallraten sind spezifisch und nicht auf andere Bauteile übertragbar.

Weiterhin sind häufig die Wirkstrukturen innerhalb der Lagerkomponenten unbekannt. Hohe Integrationsgrade gerade in der Leistungs- und Reglerelektronik lassen die Methoden der klassischen Aufklärung von Wirkstrukturen im Sinne der Zuverlässigkeitsanalyse unmöglich werden.

### *Fazit*

Daher muss nach alternativen Lösungsansätzen gesucht werden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwieweit zur Einschätzung der Alterung ein Blick auf die Systemelemente (Bauteilebene) überhaupt notwendig ist.

Interessant und diskussionswürdig erscheint in diesem Kontext die Analogiebetrachtung zwischen dem technischen System „Aktives Magnetlager“ und dem biologischen System „Mensch“.

### **3 Simulation der arbeitspunkt- und lastabhängigen Driften**

Driftet der Wert eines Parameters, so verändert sich seine Lage bezüglich einer Referenzlage im Zustandsraum, die sich aus der Nennwertauslegung des applikationsspezifischen Magnetlagerregelkreises ergibt. Die Drift steht für den Grad der Parameterabweichung bezüglich

einer Nennlage im Zustandsraum bei Normal- oder Nennbetrieb.

### Physikalisches Komplexmodell

Für die Simulation der arbeitspunkt- und lastabhängigen Driften in aktiven Magnetlagern eignen sich physikalische Modelle. Mit ihnen können Einzeleffekte und Nichtlinearitäten hinreichend genau beschrieben werden.

Abb. 1 zeigt das Blockschaltbild eines unterlagerten Magnetlagerregelkreises.

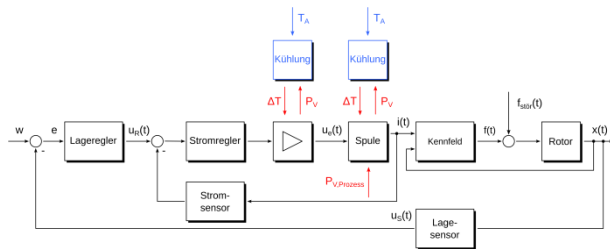


Abb. 1: Blockschaltbild der Regelkreiskomponenten

Die mechanischen, elektromagnetischen und thermischen Einzeleffekte in der Strecke, Aktorik und Sensorik werden in dem physikalischen Komplexmodell mit geeigneten Teilmodellen simuliert. So kann die Prozessumgebung (mechanische und thermische Einflüsse) ebenso berücksichtigt werden wie bspw. die Eigenerwärmung von Lagerkomponenten.

### Probabilistische Simulation

Innerhalb der probabilistischen Simulation werden die unscharfen Systemantworten ermittelt. Mit Hilfe der *Monte-Carlo*-Simulation oder weiteren mathematischen Modellen werden dazu Stichproben des entsprechenden Parameters oder einer Parameterkombination generiert. Es wird der Zustandsraum des dynamischen AML-Systems abgetastet. Dabei definiert sich der Systemzustand als zeitabhängige Kombination aller Variablen der Systemstruktur.

Es wird untersucht, wie stark die Parameter in den Systemantworten driften.

Abb. 2 stellt die für die probabilistische Simulation notwendige Prozedur grafisch dar.

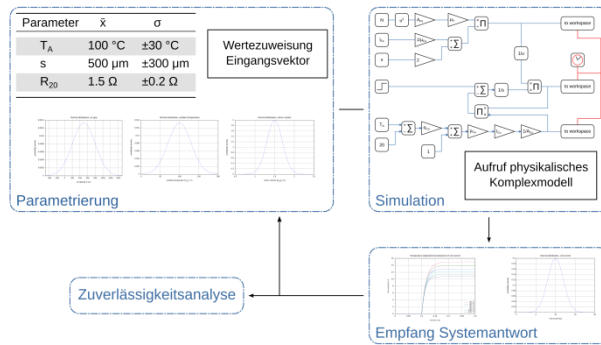


Abb. 2: Prozedur zur Ermittlung zuverlässigkeitsrelevanter Daten

Die allgemeine Vorgehensweise kann dabei wie folgt untersetzt werden:

- *Modellbildung und Nennwertsimulation* – Verknüpfung elektrischer, magnetischer und mechanischer Teilmodelle; Bilanzierung der im Betrieb auftretenden Leistungs- und Energieflüsse unter Berücksichtigung des Einflusses von Umgebung und Prozess
- *Probabilistische Simulation* – Dynamische Simulation des komplexen Magnetlagermodells; Parametrierung der Modellparameter mit unscharfen Werten; die Streuung in den Eingangsvektoren führt zu einer Streuung in den Systemantworten
- *Zuverlässigkeitsanalyse* – statistische Auswertung der Ergebniswerte der probabilistischen Simulation; Zählung Grenzverletzungsereignisse in den Systemantworten und Analyse des Frequenzganges des geschlossenen Regelkreises (Änderung der Regelkreisdynamik); Ermittlung von Teilversagens- oder Teilüberlebenswahrscheinlichkeiten
- *Fehlerbaumanalyse* – Erstellung eines umfassenden Fehlerbaumes auf der Grundlage der Kenntnisse über komponentenspezifische Versagensmechanismen; Zusammenfassung der Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse in Fehlerbäumen zu einer Versagens- oder Überlebenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems

## Lastabhängige Drift

Für einen elektromagnetischen Aktor soll beispielhaft die zeitliche Drift der unscharfen Magnetkraft zwischen zwei Arbeitspunkten veranschaulicht werden.

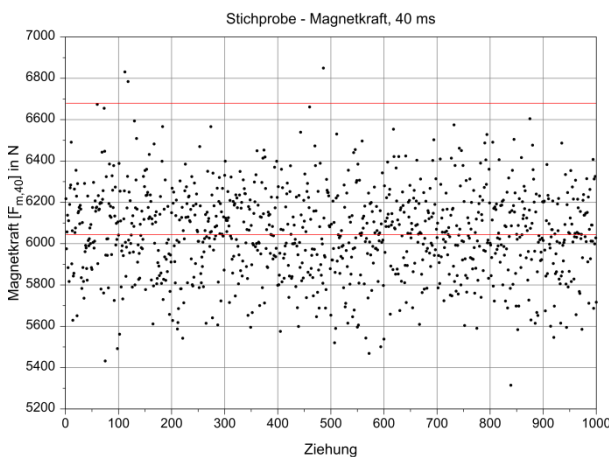
Tab. 1 fasst die Erwartungswerte, die den nominalen Arbeitspunkt der Lagerspule im mehrdimensionalen Zustandsraum festlegen, zusammen.

**Tab. 1: Erwartungswerte der Magnetkreisparameter**

Parameter	
Induktivität der Spule	100 mH
Wicklungswiderstand	1,5 $\Omega$
Tragkraft am Arbeitspunkt	6.361,5 N
Klemmspannung der Spule	9 V
Spulenstrom	6 A
Luftspalt am Arbeitspunkt	500 $\mu\text{m}$

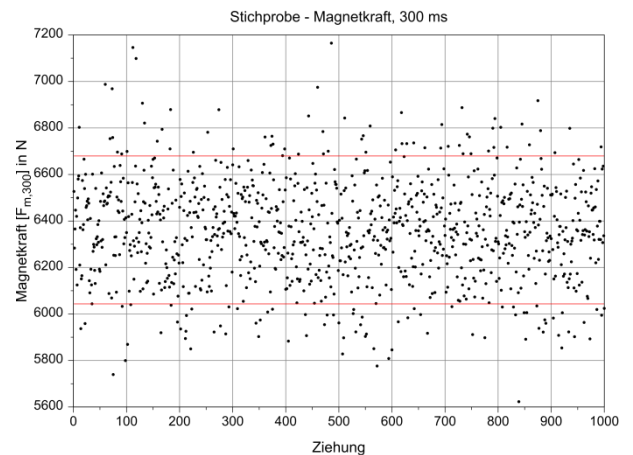
Die Abszisse stellt den Stichprobenumfang dar, die Ordinate die Magnetkraft. Die obere und untere Begrenzung sind jeweils durch rote Geraden markiert.

40 Millisekunden (Abb. 3) nach dem Beaufschlagen der Lagerspule mit einem Spannungssprung fließt ein zunehmend größerer Spulenstrom. Dabei bewegt sich der Schwerpunkt der Punktwolke in Richtung der Tragkraft am Arbeitspunkt. Die Driftgeschwindigkeit resultiert aus der Spulenzzeitkonstante. Die Grenzen werden statistisch gegenüber dem Zustand im stationären Arbeitspunkt sehr oft verletzt.



**Abb. 3: Streuung der Magnetkraftwerte nach 40 ms**

300 Millisekunden (Abb. 4) nach dem Anlegen des Spannungssprungs befindet sich der Aktor in seinem quasistationären Arbeitspunkt.



**Abb. 4: Streuung der Magnetkraftwerte nach 300 ms**

Die Grenzverletzungsereignisse sind hier sehr viel kleiner als 40 Millisekunden nach der sprungförmigen Änderung der Klemmspannung.

## Ermittlung der Stabilitätsreserve

Ein mit Nennwerten parametrierter Magnetlagerregelkreis wird in Betrieb genommen. Das Magnetlager befindet sich im Nennbetrieb, wenn die realen Umgebungs- und Prozessbedingungen denen entsprechen, die in der vorangestellten statischen und dynamischen Auslegung berücksichtigt wurden.

Die Veränderung der Prozess- und Umgebungsbedingungen (z. B. Temperaturänderung) führen nun zu arbeitspunkt- und lastabhängigen Parameterdriften in der erweiterten Regelstrecke und ggf. in den Messketten. Damit ist die Reglerparametrierung für die reale Systemdynamik nicht mehr optimal. Auch dann nicht, wenn die Regler mit Hilfe geeigneter Adaptionsalgorithmen an die veränderte Dynamik angepasst werden. Hier sind es Übergangsvorgänge, die den Regelkreis möglicherweise instabil werden lassen.

Mit der Untersuchung der Regelkreisdynamik stehen zwei Aspekte zur Untersuchung. Einerseits gibt es Stabilitätsgrenzen, die sich aus der offenen Regelstrecke bzw. mit der Analyse des Zustandsraummodells bestimmen lassen. Sie werden im Sinne der Zuverlässigkeitsanalyse

als Belastungsgrenzen eingeführt. Werden diese verletzt, wird der Magnetlagerkreis instabil und das Magnetlager versagt. Weiterhin müssen bezüglich der Stabilitätsgrenzen die Stabilitätsreserven (Amplitudenreserve, Phasenrand) ermittelt werden.

Ganz praktisch lässt sich auch die Störübertragungsfunktion anwenden. Mit ihr kann bestimmt werden, welche Störkraft gerade noch zulässig ist, so dass der Regelkreis stabil bleibt. Je kleiner diese „Störkraftreserve“ wird, desto stärker neigt das Magnetlager zum Schwingen. In der Praxis wird eine Belastungsgrenze definiert. Sie sagt aus, welche Störkraftreserve auf jeden Fall zur Verfügung stehen muss. Ist sie kleiner als der Vorgabewert, klingen unzulässig hohe Schwingungen auf und das aktive Magnetlager versagt.

Für die Untersuchung der Regelkreisdynamik im Sinne eines „stabilen Magnetlagers“ eignen sich folgende weitere Methoden:

#### Bode-Diagramm des offenen Regelkreises

Zur Ermittlung der Stabilitätsreserve eignet sich der Amplituden- und Phasenrand. Mit Hilfe des Bode-Diagramms wird der Amplituden- und Phasengang dargestellt.

Abb. 5 zeigt beispielhaft eine Kurvenschar im Frequenzgang eines geregelten Systems.

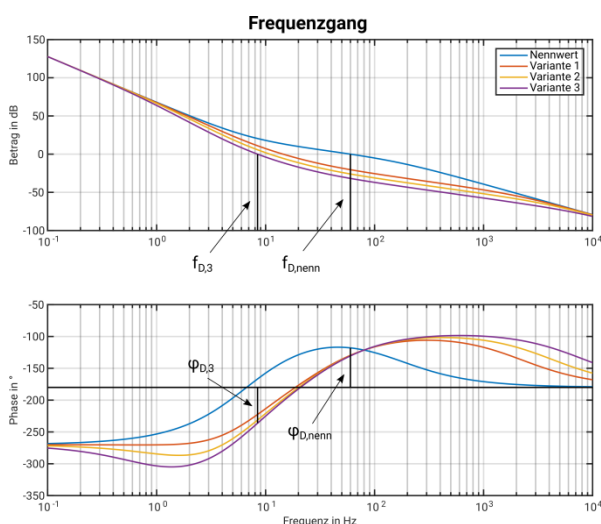


Abb. 5: Kurvenschar im Frequenzgang eines geregelten Systems

Ausgehend von einer Nennwertsimulation wurde die Systemdynamik im Zustandsraum durch die Variation eines Parameters verändert. Mit der Lage der Durchtrittsfrequenzen

$f_{D,nenn}$  und  $f_{D,3}$  kann der entsprechend dazugehörige Phasenrand  $\varphi_{D,nenn}$  bzw.  $\varphi_{D,3}$  bestimmt werden.

Die Belastungs- bzw. Restriktionsgrenzen stellen die 0-dB-Linie im Amplitudengang und die Linie bei  $-180^\circ$  im Phasengang dar.

Während bei der Nennwertauslegung ein Phasenrand  $> 0$  erwartet wird, ist dieser für die Variante 3 negativ. Die Nennwertauslegung zeigt demnach ein stabiles Systemverhalten während Variante 3 instabil wird.

#### Zustandsraummodell

Mit der Zustandsraummodellierung wird das dynamische Systemverhalten des Magnetlagerregelkreises mit Hilfe von Zustandsgrößen beschrieben. Für die Modellentwicklung im Zustandsraum werden die Differentialgleichungen  $n$ -ter Ordnung in  $n$  Differentialgleichungen erster Ordnung zerlegt.

Dabei beschreiben die Zustandsvariablen die im System vorhandenen Energiespeicher.

Die Gl. (1) und Gl. (2) bilden allgemein die Grundlage für die Zustandsraummodellierung.

Zustandsdifferenzialgleichung

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A} \cdot \underline{x}(t) + \underline{B} \cdot \underline{u}(t) \quad (1)$$

Ausgangsgleichung

$$\underline{y}(t) = \underline{C} \cdot \underline{x}(t) + \underline{D} \cdot \underline{u}(t) \quad (2)$$

mit

$\underline{A}$  ... Systemmatrix

$\underline{B}$  ... Eingangsmatrix

$\underline{C}$  ... Ausgangsmatrix

$\underline{D}$  ... Durchgangsmatrix

$\underline{x}(t)$  ... Zustandsvektor

$\dot{\underline{x}}(t)$  ... Ableitung des Zustandsvektors

$\underline{u}(t)$  ... Eingangsvektor

$\underline{y}(t)$  ... Ausgangsvektor

Die Systemmatrix  $\underline{A}$  wird mit den Koeffizienten der Zustandsvariablen parametrisiert.

Mit der Aufstellung des charakteristischen Polynoms  $\chi_A$  kann nun eine Eigenwertanalyse

der Systemmatrix nach Gl. (3) durchgeführt werden.

$$x_A(\lambda) = 0 = \det(\underline{A} - \lambda \underline{E}) \quad (3)$$

Im Ergebnis liegen die Eigenwerte (Polstellen in der Wurzelortskurve)  $\lambda$  vor. Stellen sich im Magnetlagerbetrieb die Eigenwerte ein, so treten Resonanzen und damit verbundene Amplitudenüberhöhungen auf. Die Eigenwerte wiederum stellen komplexe Größen dar, die durch Betrag und Winkel in der Wurzelortskurve gekennzeichnet sind. Praktisch lassen sich mit den Eigenwerten die Steifigkeit und Dämpfung des dynamischen Systems abbilden.

Damit bilden die Eigenwerte der Systemmatrix eine Belastungsgrenze im Magnetlagerregelkreis. So lässt sich auch hier analog zur Störkraftreserve eine Dämpfungsreserve festlegen, die im Anlagenbetrieb auf jeden Fall nicht unterschritten werden darf. Ist die tatsächliche Dämpfung kleiner als diese Reserve, klingen unzulässige Schwingungen auf und das Lager versagt.

#### 4 Berücksichtigung der Alterung von Lagerkomponenten

Bisher wurde bei der Entwicklung der Modellsätze postuliert, dass die *Widerstandsfähigkeit* der Lagerkomponenten im Sinne ihrer physikalischen Parameter über das kalendarische Alter konstant bleibt. So werden die technischen Belastungsgrenzen (Grundlage sind die Herstellerangaben) gegenwärtig in den Zuverlässigkeitsanalysen zeitinvariant berücksichtigt.

Die Erfahrungen zeigen jedoch, dass die Belastungsgrenzen mechanischer und elektronischer Systeme mit zunehmendem kalendarischem Alter ganz unterschiedlich driften. Ursachen dafür sind chemische und physikalische Veränderungen bspw. in Halbleiterkristallen, Kondensatoren (Folie, Elektrolyt) und Konstruktionselementen (Korrosion).

##### *Ausfallprognose, Trend*

Für die Prognose einer Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des aktiven Magnetlagers ist daher die Einschätzung und Beschreibung der *Widerstandsfähigkeit* als Funktion der Zeit notwendig. Dies gewinnt zunehmend an Be-

deutung, wenn sich die Komponenten in einem fortgeschrittenen kalendarischen Alter ab dem Herstellungszeitpunkt befinden.

##### *Analogiebetrachtungen*

Ein Lösungsansatz könnte über die Analogiebetrachtung zwischen dem mechatronischen System „Aktives Magnetlager“ und dem biologischen System „Menschlicher Organismus“ hergestellt werden.

Ein Mensch wird geboren. In Abhängigkeit seines/seiner

- Lebensortes (Umwelteinfluss),
- Geschlechts,
- kalendarischen Alters,
- Unsicherheiten in der Funktions- und Leistungsfähigkeit seines Organismus/seiner Organe (*Widerstandsfähigkeit*),
- allgemeinen Lebensrisikos (Wechselwirkungen mit der Umwelt),
- Lebensgewohnheiten (z. B. Qualität der Ernährung, Rauchen, Trinken),
- körperlichen Belastungen (*Belastungsintensität*)

kann zeitabhängig eine statistische Lebenserwartung postuliert werden. Diese kann sogar für die Organe angegeben werden.

Weiterhin ist allgemein bekannt, dass mit dem zunehmenden kalendarischen Alter die Widerstandsfähigkeit des Organismus tendenziell abnimmt. Der Mensch neigt zu alterstypischen Erkrankungen. Die Ursachen dafür finden sich in der Veränderung biologischer (z. B. Zellteilungsrate) und chemischer Prozesse innerhalb der Organe/Zellstruktur.

Ein aktives Magnetlager wird gefertigt und in Betrieb genommen. In Abhängigkeit der/des

- Aufstellungsortes (Umgebungseinfluss),
- Topologie,
- kalendarischen Alters,

- Unsicherheiten in der Funktions- und Leistungsfähigkeit seiner Komponenten (*Widerstandsfähigkeit*),
- technisches Risiko der Anlage (Wechselwirkungen mit der Umgebung),
- Fahrweise der Anlage (Arbeitspunkt),
- thermischen und mechanischen Belastungen (*Belastungsintensität*)

könnte analog zum biologischen System eine statistische Lebenserwartung postuliert werden. Dabei wird von den Lebenserwartungen der Lagerkomponenten ausgegangen.

Auch für mechatronische Systeme ist allgemein bekannt, dass mit dem zunehmenden kalendarischen Alter die Widerstandsfähigkeit des Gesamtsystems tendenziell abnimmt. Der Magnetlagerregelkreis neigt zu alterstypischem Versagen. Die Ursachen dafür finden sich in der Veränderung physikalischer und chemischer Prozesse innerhalb der Komponenten/Bauelementestruktur.

Weiterhin kann festgehalten werden, dass die medizinische Forschung versucht, Wirkstrukturen, Vorgänge und Effekte auf zellulärer Ebene zu verstehen. Die Komplexität dämpft den Erkenntnisgewinn. Analog dazu führen die komplexen Wirkstrukturen auf der Bauelementeebene zu komplexen Teilsystemen (Komponenten) der Magnetlagertechnik.

So könnte vom System „Mensch“ durch Analogiebetrachtungen ein Verhaltensmodell zur Bestimmung der Widerstandsfähigkeit als Funktion der Zeit abgeleitet werden. In beiden Fällen ist ggf. ein Wissen über Vorgänge auf zellulärer Ebene bzw. Bauelementeebene nicht zwingend erforderlich. Es nimmt lediglich die Unsicherheit in der prognostizierten Lebensdauer zu. Der qualitative Verlauf jedoch wäre damit gegeben und die Widerstandsfähigkeit im Sinne zeitvarianter Belastungsgrenzen simulierbar.

Dieser Denkansatz ist zu diskutieren und weiterzuentwickeln.

## 5 Fehlerbaumanalyse

Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse, Teilversagens- oder Teilüberlebenswahrscheinlichkeiten, werden in Fehlerbäumen zu

einer Versagens- oder Überlebenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems zusammengefasst.

Praxiserfahrungen zeigen, dass grundsätzlich von einem Versagen der AML gesprochen werden kann, wenn mindestens ein Magnetlagerregelkreis an der Maschine versagt.

Der komplexe Fehlerbaum für ein aktives Magnetlager berücksichtigt dabei sowohl

- Normalausfälle aufgrund von Überlastung durch arbeitspunkt- oder lastabhängige Driften in den Parametern,
- Normalausfälle aufgrund von Überlastung des Regelkreises durch eine zu geringe Stabilitäts- oder Störkraftreserve,
- Ermüdungs- oder Alterungsausfälle aufgrund einer zu geringen Widerstandsfähigkeit der Lagerkomponenten.

Die serielle Anordnung der Teilkomponenten eines Regelkreises ergibt ausschließlich disjunktive Verknüpfungen der Teilkomponenten innerhalb des Fehlerbaumes (Abb. 6), wenn keine Redundanzen/Diversitäten vorgesehen werden.

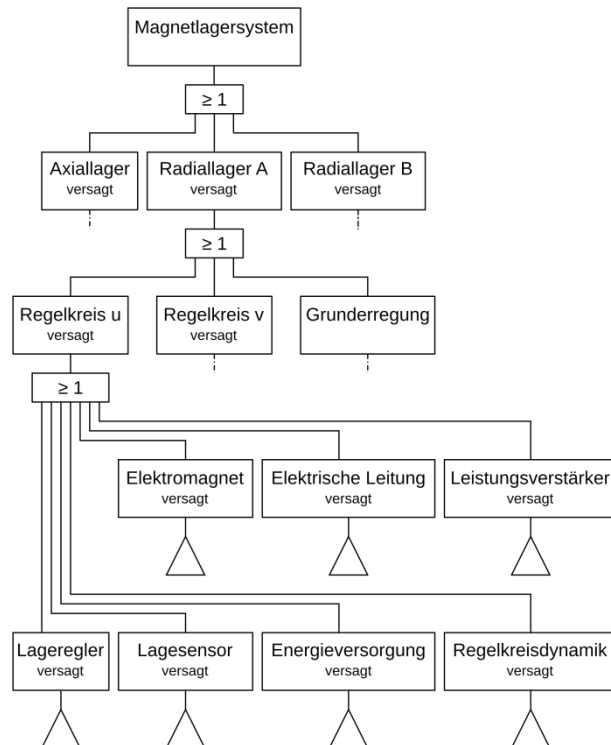


Abb. 6: Fehlerbaum eines aktiven Magnetlagers (Übersicht)



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag gibt einen Überblick zur grundsätzlichen Herangehensweise bei der Zuverlässigkeitsbewertung aktiver Magnetlagerungen.

Es wurde herausgearbeitet, dass die *Belastungsintensität* im Magnetlagersystem mit der *Widerstandsfähigkeit* der Lagerkomponenten eng verknüpft ist. Dabei markiert die Widerstandsfähigkeit die Belastungsgrenze innerhalb des Zustandsraumes. Aufgrund von Parameterdriften während des Betriebes verändert sich die Belastungsintensität. Ursächlich dafür sind Arbeitsverlagerungen und thermische, mechanische, elektromagnetische Belastungen. Sie ergeben sich aus der Betriebsweise bzw. aus dem Prozess und der Umgebung. Aber auch die Widerstandsfähigkeit der Lagerkomponenten verändert sich insbesondere mit zunehmendem Alter. So kann gesagt werden, dass die Funktions- und Leistungsreserven mit der Zeit tendenziell abnehmen. Im Ergebnis kann bereits der Normalbetrieb dazu führen, dass die Widerstandsfähigkeit überschritten wird. Die Folge ist ein (teilweises) Versagen des Magnetlagerregelkreises. Aufgrund der seriellen Anordnung der Lagerkomponenten führt dies in der Regel zum Lagerausfall, wenn keine Redundanzen vorgesehen sind.

Weiterhin wurde gezeigt, welche Wirkmechanismen zum *Normalausfall* führen können. Die Überlegungen wurden für den *Ermüdungs- oder Alterungsausfall* erweitert.

Für die Bestimmung der Versagenwahrscheinlichkeiten durch Normalausfälle eignen sich physikalische Modelle zur Simulation der Einzeleffekte und Nichtlinearitäten. Die Effekte und ihr Einfluss auf die Zuverlässigkeit können hinreichend genau berücksichtigt werden. Damit kann das Driften der technischen Parameter in den Komponenten ebenso untersucht werden wie der Einfluss der Parameteränderungen auf die Regelkreisdynamik. So kann die Stabilitätsreserve des Regelkreises ebenfalls als beeinflussender Faktor in der Zuverlässigkeitsanalyse bewertet werden. Die physikalischen Modelle werden gegenüber der Nennwertauslegung unscharf parametrisiert. Dazu wird die *Monte-Carlo-Simulation* angewendet. Die in der probabilistischen Simulati-

on gewonnen Ergebnisse werden innerhalb der Zuverlässigkeitsanalyse statistisch ausgewertet. Im Ergebnis liegen Teilversagenswahrscheinlichkeiten vor, die innerhalb topologiespezifischer *Fehlerbäume* in eine Gesamtversagenswahrscheinlichkeit des magnetgelagerten Systems zusammengefasst werden.

Die Frage, inwieweit die *Alterung von Lagerkomponenten* in der Zuverlässigkeitsanalyse berücksichtigt werden kann, ist noch unbeantwortet. Es zeichnet sich bereits ab, dass die Herangehensweise über physikalische Modelle ungeeignet erscheint. Ursache hierfür ist, dass aufgrund der hohen Integrationsdichte moderner elektronischer Komponenten die Aufklärung von Struktur und Wirkung unmöglich wird. Daher wird das Ziel verfolgt, mit Hilfe verhaltensbasierter Modellansätze das Informationsdefizit zu bewältigen. Vorbild könnte hier das biologische System „Mensch“ sein. Die Überlegungen dazu sollen zur Diskussion anregen.

Die vorgestellte Herangehensweise ermöglicht zukünftig die Bewertung der Zuverlässigkeit für eine gewählte Magnetlagertopologie auch unter Berücksichtigung 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] Worlitz, F.; Düsterhaupt, S.: *Komplexe und integrierte Methoden zur Zuverlässigkeitsbewertung berührungsfreier Lager*. 9. Workshop Magnetlagertechnik Zittau-Chemnitz, Proceedings, Chemnitz, 2013
- [2] Preuß, H.: *Zuverlässigkeit elektronischer Einrichtungen*. 2. bearbeitete Auflage, VEB Verlag Technik Berlin, Berlin, 1978