

Diagnose von Lagerfehlern in Elektromotoren durch nichtlineare Modellierung des Motorstroms.

Prof. Dr.-Ing. D. Filbert

Technische Universität Berlin, Institut für Allgemeine Elektrotechnik,

Einsteinufer 19, D-10587 Berlin, Germany.

Tel.: (030) 314 22541, Fax: (030) 314 25717

1 Einleitung

Recherchen der Zuverlässigkeit von elektrischen Maschinen durch Donnell [1] und Untersuchungen eines Herstellers, zeigen, daß die häufigsten Fehler an kleinen Kommutatormotoren im mechanischen Teil auftreten. Besonders häufig treten Fehler an Lagern und am Kommutator auf. Diese mechanischen Fehler sind nach Bild 1 in 62% aller Fälle die Ursache für Geräusche und Schwingungen.

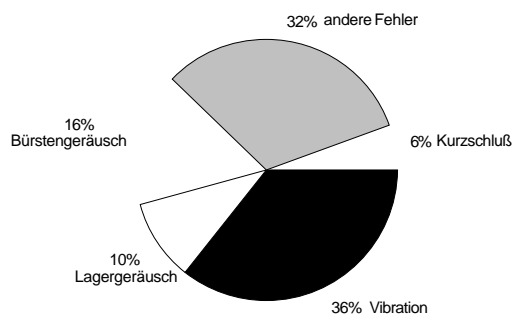


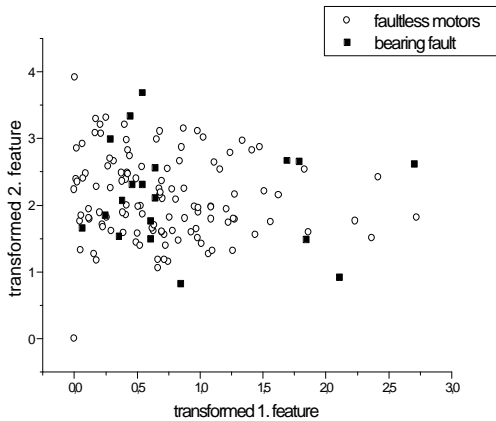
Bild 1: Häufigkeit der Fertigungsfehler an Universalmotoren

Ankopplung von Prüfling zu Prüfling unterschiedlich ausfällt und damit ein unterschiedliches Schwingungssignal am Aufnehmer entsteht. Ein weiteres Problem stellt die punktuelle Beschleunigungsmessung dar. Die Beschleunigung ist sehr stark abhängig von den Körperschalleigenschaften des Gehäuses und das Ergebnis der punktuellen Messung entspricht nicht dem Gesamteindruck eines Geräusches. Daher unterscheidet sich der Luftschall eines Motors teilweise erheblich von dem Körperschallsignal an der Meßstelle.

Aufgrund der geschilderten Probleme bei der Ankopplung des Beschleunigungssensors sind die Ergebnisse aber häufig nicht zufriedenstellend. Da das Beschleunigungssignal, wie beschrieben, sowieso nicht mit dem akustischen Geräuschsignal übereinstimmt, liegt es nahe, die Fehler statt aus der vibroakustischen Prüfung, direkt aus der Messung des elektrischen Stroms zu bestimmen. Die elektrischen und mechanischen Fehler bilden sich direkt oder über mechanische Schwingungen durch magnetische Induktion in den Motorwicklungen auch im Strom des Motors ab. Der Motor wirkt dann wie ein effektiver und jederzeit verfügbarer Sensor. Die Aufgabe ist es, diejenigen Signalanteile herauszufiltern, die einem bestimmten Fehler zuzuordnen sind. Dies ist im Falle der Stromanalyse besonders bei mechanischen Fehlern, nicht einfach, da die Kopplung zwischen der Mechanik und dem elektrischen Teil des Motors gering ist.

Aus dem gemessenen Signal werden Merkmale, wie Effektivwert, Schiefe, Wölbung oder der Crestfaktor des Signals, verwendet. Da die Fehlerinformation häufig in der Modulation des Schwingungssignals enthalten ist, werden auch die Signalparameter des demodulierten Signals ausgewertet. Hierzu wird die Einhüllende des Signals gebildet. Für ein Kollektiv von Motoren für Waschmaschinen, beste-

hend aus der Klasse „fehlerfrei“ und der Klasse „Lagerfehler“ wurde die Einhüllende des Stroms extrahiert und die Merkmale *Effektivwert*, *Schiefe* und *Wölbung* der Einhüllenden berechnet. Bild 2 zeigt den Merkmalsraum, der mit einer trennungserhaltenden Transformation von der 3-dimensionalen in die 2-dimensionalen Darstellung transformiert wurde. Eine Fehlerklassifikation ist offensichtlich nicht möglich. Die folgenden Darlegungen zeigen, daß die üblichen, heute allgemein angewandten Verfahren der Demodulation mit anschließender Merkmalsgewinnung aus dem demodulierten Signal und die daraus resultierender Fehlerklassifikation einer exakten Fehleridentifikation nicht gerecht werden.



Schwingungen und Geräusche in Elektromotoren werden hauptsächlich durch den Kommutator, durch magnetische Kräfte im Luftspalt und durch die Lager erzeugt. Das Geräusch wird stärker, wenn ein Fehler vorliegt. Fehler, die Geräusche produzieren, können sein:

- Exzentrizität des Kommutators
- Exzentrizität des Rotors
- Verschlossene oder fehlerhafte Lager
- Unterbrechungen oder Kurzschlüsse in Rotorwicklung

Bild 2: Waschmaschinenmotoren im Merkmalsraum

Als Beispiel soll hier die Entstehung von Schwingungen aufgrund eines Fehlers im Lager eines Elektromotors näher dargestellt werden [3]. Der Motor ist ein Reihenschluß-Gleichstrommotor für eine Waschmaschine. Die Frequenzen der Schwingungen eines Lagers hängen von der Art und dem Ort der Schädigung ab [4]. Fehler auf dem inneren bzw. auf dem äußeren Lagerring produzieren die Frequenzen f_i und f_o .

$$f_i = f_A \cdot \frac{z}{2} \left[1 + \frac{D}{d} \cos(\beta) \right] \tag{1}$$

$$f_o = f_D \cdot \frac{z}{2} \left[1 - \frac{D}{d} \cos(\beta) \right] \tag{2}$$

mit f_r = Drehfrequenz, f_i = Frequenz bei Innenringfehler, f_o = Frequenz bei Außenringfehler, β = Kontaktwinkel, D = Kugeldurchmesser, d = Käfigdurchmesser, z = Anzahl der Kugeln.

Das Spektrum der Lagerschwingungen enthält neben den in Gleichung (1) und (2) angegebenen Frequenzen auch deren Oberschwingungen, da die Fehlerbilder an der Oberfläche der Lagerringe stoßartige mechanische Pulse erzeugen. Daher sind die in (1) und (2) angegebenen Frequenzen nur die jeweiligen Grundfrequenzen der Schwingungen. Weiterhin gibt es noch die Frequenzen bei Schädigung des Lagerkäfigs und der Rollkörper, die hier aber nicht weiter betrachtet werden sollen. Eine Exzentrizität des Kommutators oder des Rotors erzeugt im Spektrum Linien, die mit der Drehfrequenz und ihren Harmonischen identisch sind.

Die Aufgabe der Fehlerdetektion und -diagnose ist es nun, Merkmale im Zeit- und Frequenzbereich zu extrahieren. Merkmale im Frequenzbereich sind die Amplituden der Spektrallinien, die durch Fehler verursacht werden. Wenn diese Spektrallinien als Seitenfrequenzen auftreten, wird eine Demodulation

mit Hilfe eines Gleichrichters oder der Hilbert-Transformation verwendet. Die Signalparameter werden dann aus dem demodulierten Schwingungssignal gebildet. Die Signalparameter werden als Elemente eines Merkmalsvektors in einem Mustererkennungsverfahren nach Fehlerarten klassifiziert.

2 Modellierung der Schwingungsentstehung

Schwingungen werden, wie beschrieben, durch die rotierenden Teile des Motors erzeugt. Exzentrizitäten des Kommutators und Oberflächendefekte der Lagerelemente bilden eine periodische Last an der Motorwelle. Die Fehler treten im allgemeinen gleichzeitig auf, sodaß die Diagnose auch eine Klassifikation nach Fehlerart gewährleisten muß. Die Art der Schädigung ist fest mit dem Drehwinkel verbunden (z.B. Exzentrizität des Kommutators und Pitting im Außen-, bzw. im Innenring des Lagers). Eine solche Schädigung erzeugt am Rotor ein periodisches Drehmoment, das fest mit dem Drehwinkel verbunden ist. Angenommen das Drehmoment, das von der Reibung des Kommutator mit den Bürsten erzeugt wird, lautet

$$T_1(\alpha) = \sum_{n=1}^N T_{1,n} \sin(n\alpha) + T_0 \quad (3)$$

Die Schwingungsfrequenzen, die von einem defekten Lager erzeugt werden, hängen nach Gleichung (1) und (2) von der konstanten Drehfrequenz f_D ab. In unserem Fall ändert sich aber die Winkelgeschwindigkeit aufgrund der winkelabhängigen Reibung des Kommutators, so daß Gleichung (1) und (2) nicht mehr gelten. Damit ist eine Voraussetzung herkömmlicher Fehleridentifikationsverfahren nicht erfüllt. Im Falle eines fehlerhaften Lagers belastet ein zusätzliches Drehmoment den Rotor, das durch eine Fourierreihe angenähert werden kann

$$T_2(\alpha) = \sum_{m=1}^M T_{2,m} \sin(\alpha k_m) \quad (4)$$

mit $k_m = mf_i/f_D$ bei Innenringfehler oder $k_m = mf_A/f_D$ bei Außenringfehler

durch den Faktor k_m ist das Drehmoment T_2 nicht periodisch in 2π . Das resultierende Drehmoment $T(\alpha) = T_1(\alpha) + T_2(\alpha)$ greift am Rotor an und beeinflusst den Verlauf des Drehwinkels $\alpha(t)$.

3 Modell der Motordynamik

Der Verlauf des Drehwinkels $\alpha(t)$ ist abhängig vom angreifenden Moment. $T(\alpha)$ und von der Dynamik des Rotors. Der untersuchte Motor war ein Reihenschluß - Gleichstrommotor. Das mathematische Modell eines solchen Motors wird durch die Spannungsbilanz (5) und die Drehmomentbilanz (6) beschrieben.

$$u = R \cdot i + c_1 \cdot i \cdot \omega \quad (5)$$

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = c_2 \cdot i^2 - c_3 \cdot \omega - T(\alpha) \quad (6)$$

u = angelegte Spannung, R = Wicklungswiderstand, i = Strom, c_1 = Flußkonstante
 ω = Kreisfrequenz der Drehzahl J = Trägheitsmoment c_2 = Antriebskonstante (Fluß)
 c_3 = Eisenverlustkonstante $T(\alpha)$ = Reibung durch Kommutator und Lager.

Wir $\omega = \dot{\alpha}$ gesetzt und Gleichung (5) in (6) eingesetzt so ergibt sich daraus eine nichtlineare Differentialgleichung 2. Ordnung

$$\ddot{\alpha} = \frac{c_2}{J} \cdot \frac{u^2}{(R + c_1 \dot{\alpha})^2} - \frac{c_3}{J} \dot{\alpha} - \frac{1}{J} \cdot T(\alpha) \quad (7)$$

Um den Wahrheitsgehalt dieser Annahmen zu überprüfen, wurde eine Simulation der Gleichung (7) durchgeführt. Dabei wurde auf die technischen Daten des vorliegenden Waschmaschinenmotors zurückgegriffen. Die Simulation wurde unter MATLAB mit einem Runge - Kutta - Integrationsalgorithmus ausgeführt. Für diese Simulation wurde nur ein Fehler im Außenring des Lagers angenommen. Die Vorgehensweise gilt aber auch für die anderen Fehlerarten in gleicher Weise. Der Vergleich zwischen dem gemessenen und dem simulierten Stromspektrum zeigt in Bild 3 eine gute Übereinstimmung der Lage der interessierenden Spektrallinien.

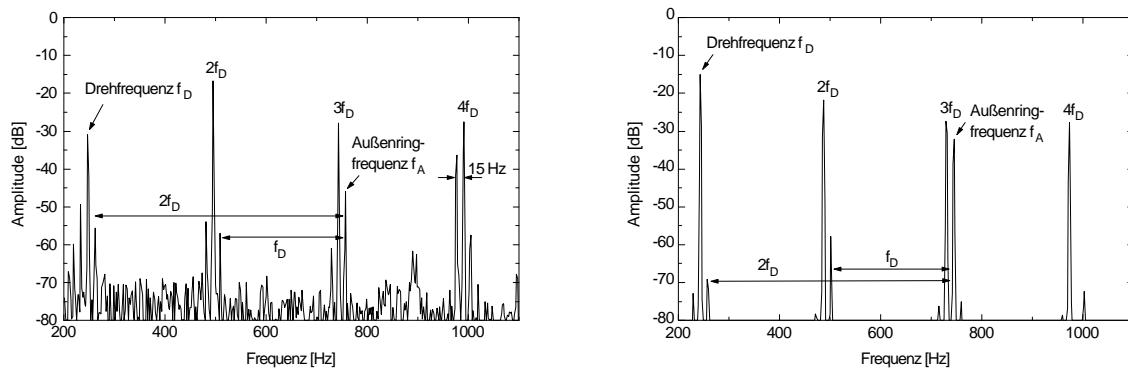


Bild 3: Stromspektrum eines Waschmaschinenmotors mit Lagerfehler (links) und mit nichtlinearem Modell simuliertes Spektrum (rechts).

Die Amplituden stimmen nicht exakt überein. Dies liegt daran, daß die Größe und der Verlauf der die Schwingungen erzeugenden zusätzlichen Drehmomente von Kommutator und Lager $T(\alpha)$ unbekannt waren und daher nicht exakt mit den tatsächlichen Verhältnissen übereinstimmen. Die Information über die Schädigung des Lagers ist aber in den Amplituden der Spektrallinien mit den Frequenzen

$$f_m = |(nf_A \pm kf_D)| \quad n, k \in N \quad (8)$$

eindeutig enthalten. Aus Gleichung (8) und Bild 3 ist zu erkennen, daß die Seitenfrequenzen, die nur 15 Hz von der Drehfrequenz und ihren Harmonischen entfernt sind, nicht die zugehörigen Modulationsspektren sein können. Angenommen die Frequenz, die durch einen Fehler im Außenring des Lagers erzeugt wird ($f_A = 756$ Hz), wirkt als Träger und die Drehfrequenz ($f_D = 247$ Hz) als modulieren des Signal, so entsteht neben der Summenfrequenz die Differenzfrequenz $f_A - f_D = 509$ Hz. Diese hat einen Abstand von 15 Hz von der ersten Harmonischen der Drehfrequenz ($2f_D = 494$ Hz). Diese Linie ist aber die linksseitige Seitenfrequenz der Außenringfrequenz f_A .

4 Fehlerdiagnosesystem

4.1 Systemkonfiguration

Die Vorgehensweise ist nun, diese Pseudoseitenbänder um die Drehfrequenz und ihre Harmonischen herum durch eine Frequenzverschiebung, eine Unterabtastung und eine Spektralschätzung zu extrahieren. Bild 4 zeigt das Diagnosesystem.

In einem ersten Schritt werden die Drehfrequenz und ihre Harmonischen aus dem Stromrippel bestimmt. Die beste Methode dafür ist einen autoregressiven Spektalschätzer [5] zu verwenden, der eine hohe Frequenzauflösung garantiert. Anschließend wird der Motorstrom mit einem Bandfilter, dessen Mittenfrequenz die ermittelte Drehfrequenz ist gefiltert. Um das Signal der Seitenbänder zu extrahieren, wird der gefilterte Strom demoduliert, indem er mit

$$z(nT) = \cos(2\pi k_f nT) + j \sin(2\pi k_f nT) \quad T = \text{Abtastrate} \quad (9)$$

multipliziert wird. Das demodulierte Signal wird durch einen Tiefpaß herausgefiltert und es werden die bekannten Signalparameter im Zeitbereich berechnet (feature extraction). Im Frequenzbereich müssen nun die Amplituden im Spektrum des demodulierten Signals ermittelt werden.

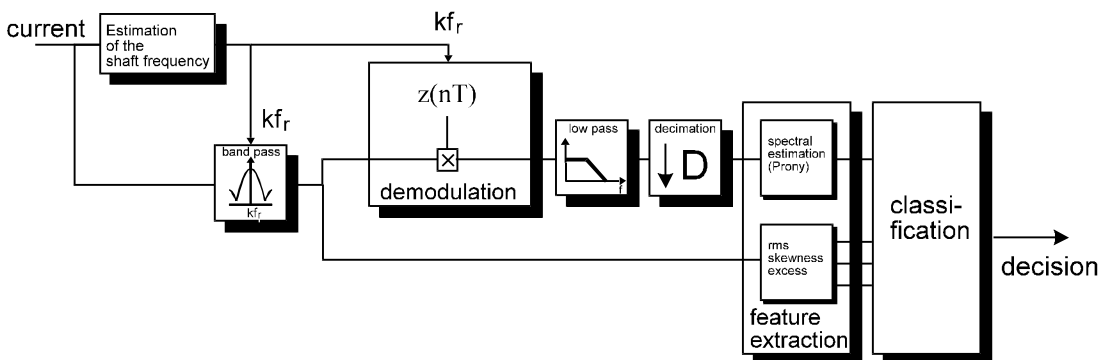


Bild 4: Fehlerdiagnosesystem

Hierzu wird üblicherweise die Fast-Fourier-Transformation (FFT) angewandt. Diese hat den Vorteil einer leichten Implementation und einer kurzen Rechenzeit; aber andererseits den Nachteil des Einflusses der Fensterung auf das Spektrum. Dagegen vermeidet eine modifizierte Kleinste-Quadrate-Schätzung nach Prony [6,7] diese Nachteile. Der Prony-Algorithmus basiert auf einem parametrischen Signalmodell. Die Signalparameter sind für eine Merkmalsbildung besser geeignet, als die durch Fensterung verfälschten Amplitudenwerte der FFT. Zusätzlich werden noch, gemäß Bild 4, der Effektivwert, die Schiefe und die Wölbung des bandpaßgefilterten Signals als Merkmale für die Fehlerklassifikation herangezogen. Die dargestellte Methode wurde auf die Pseudoseitenbänder der Drehfrequenz und ihrer nächsten vier Harmonischen angewendet.

4.2 Parametrische Merkmalsextraktion im Frequenzbereich

In den Amplituden der Seitenbänder der Drehfrequenz und ihrer Harmonischen ist offensichtlich die Information über die Schädigung des Lagers enthalten. Mit der Spektralschätzung nach Prony sollen deshalb die Amplituden der Seitenbänder bestimmt werden. Dazu ist auch eine möglichst genaue Bestimmung der Frequenzen erforderlich.

Angenommen das demodulierte Stromsignal besteht aus M harmonischen Funktionen und ist mit N Abtastungen $x(1) \dots x(N)$ zeitlich diskretisiert worden. Der Prony - Algorithmus schätzt $x(n)$ für $1 \leq n \leq N$ mit einem Modell M - ter Ordnung. Das deterministische Signalmodell besteht aus einer Linearkombination von Exponentialfunktionen.

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^M A_k \exp[\alpha_k(n-1)T] \cdot \exp[2\pi j f_k(n-1)T + j\Theta_k] \quad (10)$$

mit $f_k =$ Frequenz in Hz und $\Theta_k =$ Phase in Radian. Vereinfacht kann das Signalmodell in folgender Form angegeben werden, wenn ungedämpfte Schwingungen vorliegen

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^{2M} h_k z_k^{n-1} \quad (11)$$

in sind h_k und z_k

$$h_k = A_k \exp(j\Theta_k) \quad z_k = \exp(j \cdot 2\pi f_k T)$$

Das Schätzproblem besteht darin, aus $N \geq M$ Meßdaten, die in dem Modellansatz enthaltenen Parameter f_k und Θ_k zu bestimmen. Wendet man die Methode der Summe der kleinsten Fehlerquadrate

$$Q = \sum_{i=1}^N \varepsilon(i)^2 = \sum [x(i) - \hat{x}(i)]^2$$

an, ergibt sich ein in den Parametern nichtlineares Schätzproblem, für das keine analytische Lösung existiert. Zur Vermeidung rechenintensiver, numerischer Iterationsverfahren, bei denen das absolute Minimum oft schwierig zu finden ist, wird das ursprünglich von Prony (Prony, 1795; Hildebrand, 1956) angegebene zweischrittige Verfahren angewendet, dessen Lösung aber suboptimal ist. Nach N Messungen kann Gleichung (11) auch als

$$\begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_M^{N-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_M \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{h}$$

dargestellt werden. Prony's Beitrag besteht darin die z_k und h_k separat zu bestimmen. In einem ersten Schritt werden die Elemente der Matrix \mathbf{Z} bestimmt. Es ergibt sich ein lineares Gleichungssystem zur Berechnung der unbekanntenen Amplituden h_k . Die Parameter z_k werden aus der Minimierung des Prädiktionsfehlers Q^*

$$Q^* = \sum_{i=1}^N e^{*2} = \sum_{i=1}^N \left[x(i) + \sum_{l=1}^{2M} a_l x(i-l) \right]^2 \quad (13)$$

und aus den Wurzeln des charakteristischen Polynoms (14) gefunden.

$$\Phi(z) = \sum_{l=0}^{2M} a_l z^{2M-l} \quad (14)$$

Die Frequenzen f_k werden aus den Wurzeln mit (15) bestimmt.

$$f_k = a \tan\left(\frac{\text{Im}\{z_k\}}{\text{Re}\{z_k\}}\right) \cdot (2\pi T)^{-1} \quad (15)$$

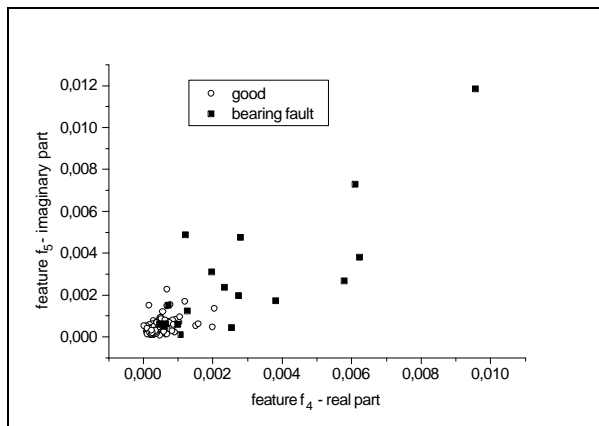
Die Amplituden ergeben sich durch Anwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadratsumme aus dem Ansatz

$$\epsilon^T \cdot \epsilon = [\mathbf{x} - \mathbf{Z} \cdot \mathbf{h}]^T \cdot [\mathbf{x} - \mathbf{Z} \cdot \mathbf{h}] \rightarrow \text{Min.} \tag{16}$$

zu

$$\mathbf{h} = (\mathbf{Z}^T \cdot \mathbf{Z})^{-1} \cdot \mathbf{Z}^T \cdot \mathbf{x} \tag{17}$$

5 Ergebnisse der Fehlerklassifikation



In Bild 5 sind die Real- und Imaginärteile des 1. Pseudoseitenbands der 3. Drehharmonischen von den 138 Motoren dargestellt. Das Bild zeigt, daß die Amplitude ein gutes Maß für die Klassentrennung sein kann. Die Amplitude der Seitenbänder wird aber auch durch die Amplitude der Drehfrequenzen beeinflusst. Mit Hilfe einer weiteren Motorstromsimulation mit dem nichtlinearen Modell (7) wurde geklärt, wie sich ein ungleichförmiger Kommutator und ein Lagerschaden auf die Amplituden der Seitenbänder auswirken. Hierzu wurde in der Simulation zum einen die Amplitude des Kommutatormomentes T_1 (Gleichung 3) variiert und zum

anderen durch Veränderung der Pulshöhe des Lagermomentes T_2 (Gleichung 4) der Grad der Schädigung des Lagers erhöht. Zur Auswertung wurden die Amplituden der Seitenbänder und die Amplituden der Drehfrequenz und ihrer Harmonischen bestimmt. Mit zunehmender Lagerschädigung und bei konstantem Kommutatormoment nimmt die Quadratsumme der Amplituden der Seitenbänder ($Se = \sum B_i^2$) quadratisch zu. Mit Erhöhung des Kommutatormomentes nimmt sowohl die Quadratsumme der Amplituden der Seitenbänder als auch die der Drehfrequenzen ($Sd = \sum D_i^2$) quadratisch zu. Durch Bildung der Quotienten der Quadratsummen Se/Sd lassen sich die Einflüsse von Lager und Kommutator bzw. Rotor trennen (Bild 6a und 6b).

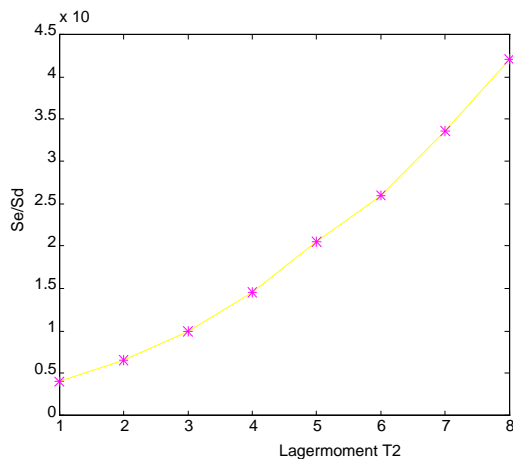


Bild 6a: Se/Sd als Fkt. des Lagermomentes, Kommutatormoment=const.

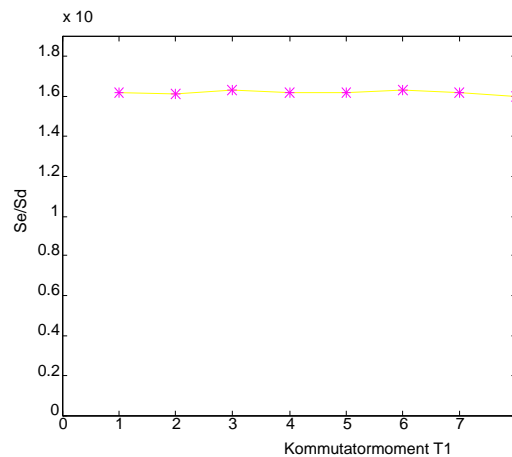


Bild 6b: Se/Sd als Fkt. des Kommutatormomentes, Lagermoment=const.

Der Rippel im Strom von 138 Waschmaschinenmotoren wurde gemessen und mit dem beschriebenen Diagnosesystem klassifiziert. Als Referenz wurde die durch einen Experten durchgeführte Klassifikation benutzt. Motoren, die in der Waschmaschine größere Geräusche erzeugt hatten, waren als fehlerhaft

deklariert worden. Von den 138 Motoren wurden 119 als fehlerfrei und 19 als solche mit Geräuschbildung deklariert. Die Subjektivität des menschlichen Experten ist eine Ursache für eine ungenügende Fehlerklassifikation, da es nicht sicher ist, daß alle Motoren nach dem gleichen Standard aussortiert wurden. Die Beurteilung durch den Experten erfolgte während mehrere Produktionstage. Dennoch waren die Ergebnisse, die mit einem euklidischen Abstandsklassifikator in Verbindung mit einer optimalen Merkmalstransformation [8] erzielt wurden, in guter Übereinstimmung mit der Entscheidung der Experten. In der Tabelle 1 sind die Klassifikationsergebnisse des Diagnosesystems und des Experten angegeben. In 116 Fällen war eine Übereinstimmung vorhanden, in 22 Fällen nicht.

Tabelle I: Klassifikationsergebnisse

	Fehlerdiagnose System	
	gut	Lagerfehler
Expertenentscheidung		
gut	101	18
Lagerfehler	4	15

6 Schlußbemerkung

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die normale Vorgehensweise, die Signalparameter der Einhüllenden zu extrahieren und als Merkmalsvektor zu benutzen, nicht immer zum richtigen Ergebnis führt. Es wurde gezeigt, daß die Dynamik des Rotors eines Elektromotors das Spektrum des Motorstromrippels mitbestimmt. Die vorgestellte Methode ist in der Lage auch kleine mechanische Fehler aus dem Motorstrom zu erkennen. Erwähnt sei noch, daß die untersuchten Waschmaschinenmotoren keine defekten Lager hatten, da sie direkt aus der Produktion kamen, wo einwandfreie Lager eingebaut wurden. Offensichtlich handelte es sich bei den Motoren mit Geräusch um solche mit nicht exakt fluchtenden Lagern. Auch solche kleinen Fehler werden erkannt.

7 Schrifttum:

- [1] Donnell, P. O.
Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Motor Reliability Working Group, IEEE Industry Application Society
- [2] VDI 2056,
Beurteilungsmaßstäbe für mechanische Schwingungen von Maschinen, VDI -Verlag - Düsseldorf 1964.
- [3] Gühmann, C., Filbert, D.:
Fault Diagnosis of Electric Low-Power Motors by Analysing the Current Signal, IFAC/IMACS Safeprocess '91, (Sept. 1991), Baden-Baden, Germany
- [4] Kolerus, J. (1986).
Zustandsüberwachung von Maschinen, Expert Verlag
- [5] Marple Jr., S.L. (1987).
Digital Spectral Analysis with Applications, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs New Jersey
- [6] de Prony, Baron G. R. (1795). Essai expérimental et analytique: sur les lois de la dilatabilité de fluides et sur celles de la force expansive de la vapeur de l'eau et de la vapeur de l'alkool, à différentes températures, *J. E. Polytech.*, vol. 1, no. 2, pp. 24-76.
- [7] Hildebrand, F. B. (1956).
Introduction to Numerical , Analysis, McGraw-Hill Book Company, New York, Chapter 9.
- [8] Parsons, T. (1987).
Voice and Speech Processing, McGraw-Hill Book Company, New York, Chapter 7

