

Rekonstruktion der Belastung eines magnetostriktiven Aktors durch Signalanalyse

Dipl.-Ing. Markus Schommer, Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Janocha
Lehrstuhl für Prozessautomatisierung, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Deutschland

Kurzfassung

Inhärente Sensoreigenschaften von Festkörperaktoren lassen sich zum Bau so genannter self-sensing Aktoren nutzen, die gegenüber konventionellen Aktoren ein hysteresearmeres Übertragungsverhalten aufweisen. Sie ermöglichen es, im aktorischen Betrieb gleichzeitig Informationen über die mechanische Belastung des Aktors zu erhalten. In magnetostriktiven Werkstoffen tritt dieser Sensoreffekt als eine Änderung der Permeabilität auf und ist von den einwirkenden Kräften abhängig. Durch die den magnetostriktiven Werkstoff umgebende Feldspule ist der Aktor elektrisch gesehen einer Induktivität ähnlich, deren Impedanz sich als Funktion der auf ihn wirkenden Kraft ändert.

Im Folgenden wird zunächst die Variation der Permeabilität des aktiven Materials unter Kraftereinwirkung untersucht. Dazu wurde eine Hall-Sonde in den Aktor eingebracht, die qualitative Aussagen über die Permeabilitätsänderung zulässt. Darauf aufbauend wird die Änderung der elektrischen Impedanz im aktorischen Betrieb mit Hilfe eines überlagerten Testsignals und anschließender Fourieranalyse des Spannungssignals dargestellt. Alternativ dazu wird die Bestimmung der Induktivität durch eine Parameterschätzung untersucht. Abschließend werden Aussagen über die auf den Aktor wirkenden Kräfte gemacht.

1 Einleitung

Die Fähigkeit, aktorische und sensorische Eigenschaften gleichzeitig und am selben Ort bereitzustellen, machen magnetostriktive Festkörperaktoren für den industriellen und kommerziellen Einsatz interessant. Durch diese inhärenten Sensoreigenschaften können die Werkstoffe sowohl aktorische als auch sensorische Funktionen übernehmen, was einen miniaturisierten, einfacheren und billigeren Systemaufbau ermöglicht. Bei gleichzeitiger Nutzung dieser beiden Fähigkeiten spricht man von ‚self-sensing‘ Aktoren. Werden zusätzliche Steuer- und Regelalgorithmen eingesetzt, so erreicht man ein hysteresereduziertes, nahezu lineares Übertragungsverhalten.

Hauptaufgabe bei der Realisierung eines ‚self-sensing‘ Aktors ist die Trennung von eingepprägten aktorischen und zurückgelieferten sensorischen Informationen. Insbesondere durch die großen Unterschiede in den Signalamplituden ist eine Auswertung der im magnetischen Fluss enthaltenen lastabhängigen Sensorinformation meist sehr aufwändig [1].

2 Verfahren zur Lastrekonstruktion

Die sensorischen Eigenschaften magnetostriktiver Werkstoffe beruhen auf dem Villary-Effekt. Er beschreibt die Änderung der Permeabilität des magnetostriktiven Werkstoffes in Abhängigkeit der auf ihn

wirkenden Kraft. Ziel ist daher die Messung des magnetischen Flusses und die Aufstellung eines Zusammenhangs zwischen Messwert und Kraft. Im Folgenden werden zwei Verfahren untersucht, die im aktorischen Betrieb gleichzeitig eine Flussmessung erlauben.

2.1 Flussmessung mit einem Hall-Sensor

Ist die direkte Messung des magnetischen Flusses nicht möglich, so können geeignete Ersatzgrößen herangezogen werden, die seine indirekte Bestimmung erlauben. Zwischen Flussdichte B und Fluss ϕ besteht die Beziehung $\phi = B \cdot A$; ist die Querschnittsfläche A des Magnetkreises konstant, gilt somit $\phi \sim B$.

Die Messung von B erfolgt hier mit einem Hall-Element. Es werden unterschiedliche Bauformen kommerziell angeboten, deren sehr kleine Abmessungen eine Unterbringung auch unter beengten Raumverhältnissen ermöglicht. Ein solcher Hall-Sensor wurde in einen magnetostriktiven Aktor eingesetzt, dessen Konstruktion in Bild 1 dargestellt ist. Der magnetostriktive Stab (Hersteller Materitek, China) besitzt die Abmessungen $\varnothing 6 \times 30$ mm und ist von einer Spule mit 1200 Windungen umgeben. Die Feldspule hat bei unbestromtem, ungeklemmtem Aktor einen ohmschen Widerstand von ca. 8 Ohm und eine Induktivität von ca. 33 mH.

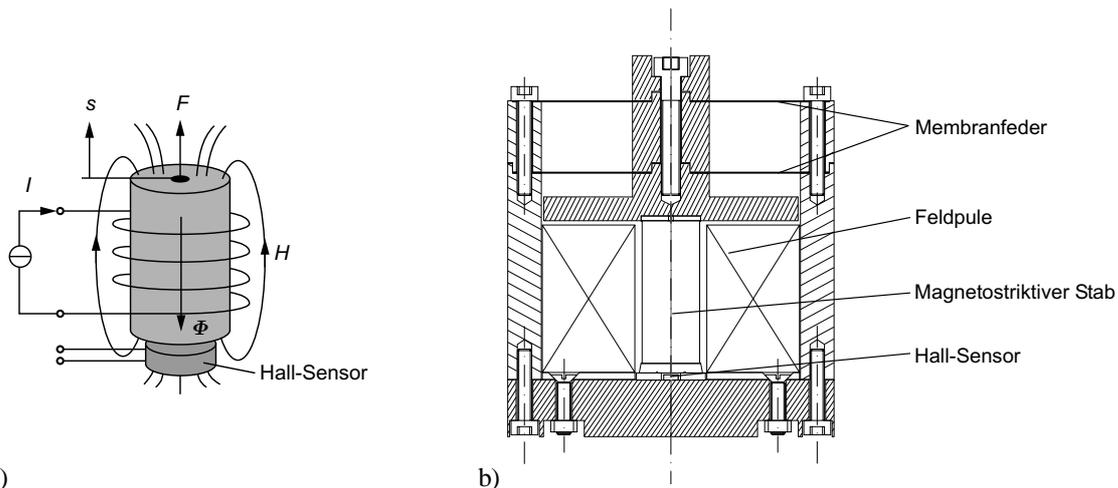


Bild 1 Magnetostruktiver Aktor. a) Prinzip eines magnetostruktiven Aktors mit Flussmessung durch ein Hall-Element. b) Aufgebauter magnetostruktiver Aktor. Der Hall-Sensor befindet sich unterhalb des magnetostruktiven Stabes.

Problematisch bei der Messung mit einem Hall-Element ist die Positionierung der Sonde derart, dass eine zuverlässige und aussagekräftige Messung von B möglich wird. Ein Einbringen in das magnetostruktive Material scheidet aufgrund aufwändiger Bearbeitungsmöglichkeiten des Stabes aus. Alternativ wurde der Sensor unterhalb des Stabes angebracht (vgl. Bild 1b), was zu einer Inhomogenität des Feldverlaufes an dieser Stelle führt. Damit der magnetostruktive Stab über seine gesamte Länge in einem annähernd konstanten magnetischen Feld betrieben wird, waren entsprechende Zusatzaßnahmen in der Flussführung notwendig. Durch Modellierung und anschließende Simulation der Struktur mit einem FEM-Programm wurde die magnetische Erregung entlang des Stabes berechnet, und die auftretenden Abweichungen der Feldhomogenität um den Hall-Sensor herum konnten weitgehend kompensiert werden. Dadurch entsteht ein Volumen gleichen magne-

tischen Zustandes, so dass Einbautoleranzen keine Auswirkungen auf das Messergebnis haben.

Bild 2 zeigt den Verlauf des magnetischen Flusses ϕ in Abhängigkeit von Aktorstrom I und Kraft F . Teilbild a) zeigt die Änderung von ϕ in Abhängigkeit von F bei verschiedenen Strömen. Vernachlässigt man den Einfluss der Hysterese, so ergibt sich aufgrund des streng monotonen Verlaufes der Kurven ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Fluss und Kraft. Bild 2b) beschreibt den Zusammenhang zwischen ϕ und I bei verschiedenen Kräften. Bis auf die Hysterese ergibt sich wiederum ein streng monotoner Zusammenhang. Unter der Annahme, dass die Monotonie der ϕ/F -Kurve im betrachteten Arbeitsbereich erhalten bleibt, lässt sich durch Messung des Flusses auf die mechanische Belastung des Aktors schließen.

Alle Kurven sind hysteresebehaftet. Wird diese Eigenschaft in einem geeigneten Modell nachgebildet,

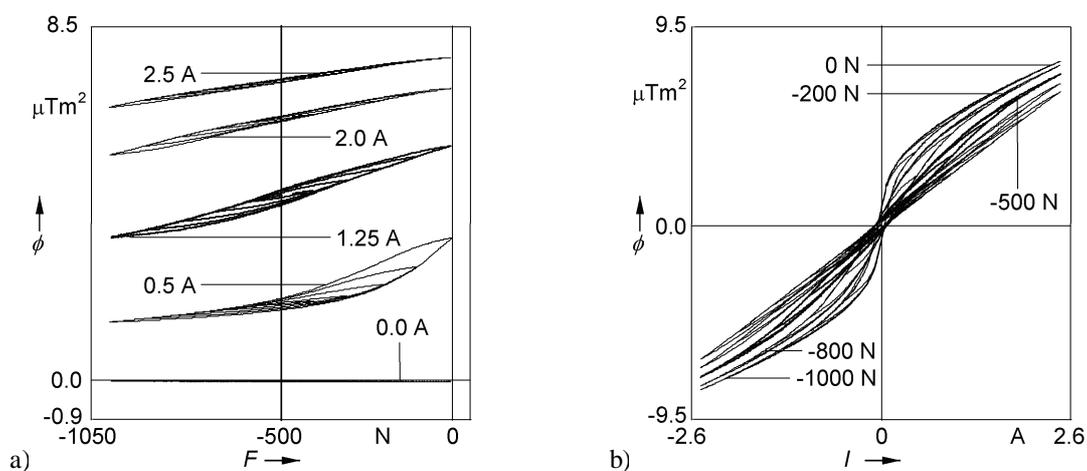


Bild 2 Magnetischer Fluss gemessen mit einer Hall-Sonde. a) Magnetischer Fluss in Abhängigkeit der Kraft mit Parameter Aktorstrom. b) Magnetischer Fluss in Abhängigkeit des Aktorstromes mit Parameter Kraft.

so lässt sich prinzipiell eine Rekonstruktion der Belastung durch Flussmessung mit Hilfe eines Hall-Sensors durchführen.

Dieser Ansatz wurde in [1] umgesetzt. Dort wird ein ‚self-sensing‘ Aktor beschrieben, der die sensorischen Effekte in magnetostriktiven Materialien (Villary Effekt) durch Einsatz des Hall-Sensors direkt nutzt. Mit Hilfe eines inversen Modells wurde ein hysteresereduziertes Übertragungsverhalten ermöglicht.

Wurde in der oben genannten Arbeit der Einfluss der Kraft auf die Auslenkung noch nicht berücksichtigt, so erweitert [2] diesen Ansatz. Erfährt der Aktor durch die ihn umgebende mechanische Struktur eine Krafteinwirkung, so ändert sich die Auslenkung des magnetostriktiven Materials aufgrund seiner endlichen Steifigkeit. Diese Längenänderung muss durch Anpassen des Aktorstroms I ausgeglichen werden. Eine Rückführung des rekonstruierten Auslenkungssignals und Vergleich mit der Sollauslenkung erweitert den smarten Aktor zu einem kraftkompensierten Aktor.

2.2 Induktivitätsmessung mit einem Testsignal

Die Induktivität L einer Spule ist durch $L = \phi / i$ definiert. Sind die Werte für Induktivität und Strom bekannt, kann daraus der magnetische Fluss in der Spule errechnet werden. Der Strom lässt sich durch Messen des Spannungsabfalls an einem bekannten Widerstand bestimmen, der in Reihe mit der Induktivität geschaltet ist. Für die Messung einer Impedanz werden in der Literatur verschiedene Verfahren beschrieben wie z.B. Vergleich mit einer Referenzimpedanz in einer abzugleichenden Wechselstrombrücke [3] oder Bestimmung der Phasenbeziehung zwischen Strom und Spannung [4, 5]. Dabei wird jedoch nicht berücksichtigt, dass während der Messung ein weiterer Strom überlagert wird, der die Auslen-

kung des Wandlers bewirkt. Dieser Strom kann die Messung der Induktivität beeinflussen und zu falschen Messergebnissen führen.

Der hier gewählte Ansatz zur Bestimmung der Induktivität verwendet wie bei den abstimmbaren Brückenschaltungen einen sinusförmigen Strom als Testsignal, der in den magnetostriktiven Wandler eingepreßt wird. Ist der ohmsche Anteil an der Gesamtimpedanz gegenüber der induktiven Komponente vernachlässigbar, so fällt am Aktor durch den Zusammenhang

$$U = j\omega L \cdot I \quad (1)$$

eine zu Induktivität und Frequenz proportionale Spannung ab. Bei kleinen Stromamplituden können Nichtlinearitäten und Hysterese im Verlauf von L vernachlässigt werden. Davon unbeeinflusst bleiben sie im Großsignalbetrieb im elektrischen wie im mechanischen Übertragungsverhalten erhalten. Da die Messung im aktorischen Betrieb des magnetostriktiven Wandlers erfolgen soll, wird dieses Testsignal dem Steuerstrom überlagert.

Um eine Separierung der vom aktorischen Steuerstrom und der vom Testsignal hervorgerufenen Spannungsanteile zu erreichen, wird die Frequenz des Testsignals deutlich größer gewählt als die maximale Frequenz der Ansteuerung. So können in der gemessenen Spannung die niederfrequenten Anteile des Ansteuerung durch Frequenzfilterung unterdrückt werden.

In der Praxis treten jedoch Einschränkungen auf, die bei der Realisierung des Verfahrens berücksichtigt werden müssen: Das resultierende Magnetfeld enthält durch Überlagerung des Ansteuerstromes mit einem Testsignal hochfrequente Anteile, die für die Auslenkung des magnetostriktiven Wandlers als Störgröße wirken.

Daher muss zur Reduzierung dieser überlagerten Auslenkung die Amplitude des Testsignals einerseits

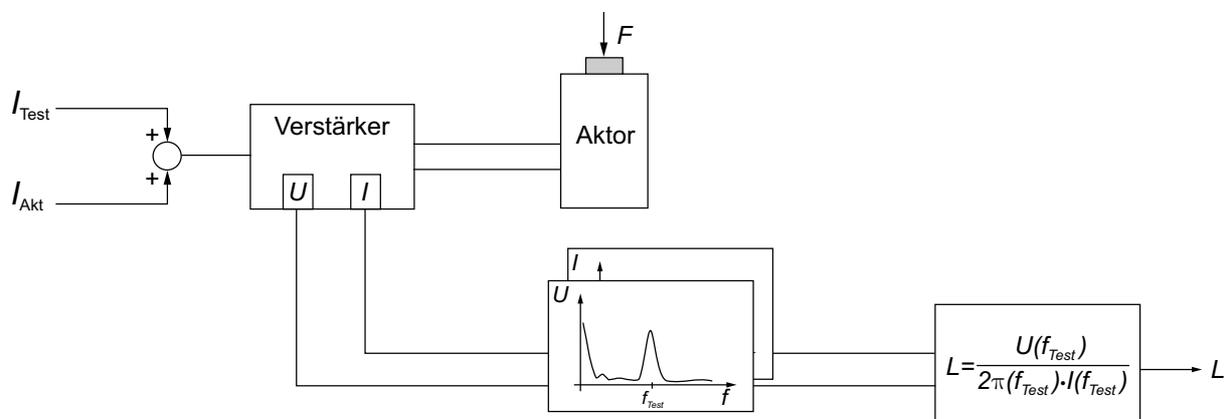


Bild 3 Versuchsaufbau zur Fourieranalyse. Das Testsignal I_{Test} wird von einem Funktionsgenerator erzeugt und mit einem analogen Addierer dem aktorischen Ansteuerstrom I_{Akt} überlagert.

möglichst klein gewählt werden, andererseits muss die resultierende Spannung ausreichend groß sein. Hierbei ist entscheidend, dass der Ausgangsstrom des Verstärkers einen möglichst niedrigen Rauschanteil besitzt, um bei einem kleinen Testsignal einen ausreichend großen Signal-Störabstand zu gewährleisten.

Weiterhin kann die Frequenz des Testsignals nicht beliebig hoch gewählt werden. Zwar kann nach Gleichung (1) die erzeugte Spannung durch Anheben der Frequenz erhöht werden, jedoch steigen dadurch auch die Wirbelstromverluste in der Flussführung des Aktors, welche einen großen Teil der Energie des hochfrequenten Testsignals dissipieren. Es durchdringt nicht das magnetostruktive Material, so dass der Anteil des belastungsabhängigen Flusses am Gesamtfluss und somit auch die Empfindlichkeit des Verfahrens sinken.

2.2.1 Signalauswertung mit Fourieranalyse

Aufgrund der oben genannten Einschränkungen durch Stromrauschen und Wirbelstromverluste kann die sich ergebende Testsignalfrequenz so nah an der maximalen Ansteuerfrequenz des Aktors liegen, dass bei analoger Signalverarbeitung sehr steilflankige Filter eingesetzt werden müssten. Eine Alternative zum Einsatz analoger Filter bietet die digitale Signalanalyse mit Hilfe der diskreten Fouriertransformation (DFT). Dabei müssen zwei Kriterien beachtet werden. Erstens muss aufgrund des Abtasttheorems die Abtastfrequenz f_A mindestens doppelt so hoch sein wie die Frequenz des Testsignals, d.h. $f_A \geq 2 \cdot f_{Test}$. Zweitens erfolgt die Berechnung des Frequenzspektrums mit einem Mikrorechner, so dass sich durch die diskreten Abtastzeitpunkte ein ebenfalls diskretes Frequenzspektrum ergibt, dessen Auflösung $\Delta f = f_A / N$ beträgt (N ist die Anzahl der Messwerte im Zeitbereich, aus denen die Fourierzerlegung errechnet wird).

Durch geschickte Wahl der Abtastfrequenz fällt die Frequenz des Testsignals auf einen der diskreten Frequenzwerte im Spektrum. Es tritt daher kein Leck-Effekt auf, und die Amplitude des Spektrums erreicht bei der Testsignalfrequenz ihren maximal möglichen Wert. Um eine ausreichende Trennung von Testsignal und niederfrequentem Ansteuerstrom zu erreichen, wird die spektrale Auflösung zu $\Delta f = f_{Test} / 4$ gewählt. Durch die Nebenbedingung $f_A \geq 2 \cdot f_{Test}$ folgt für die Abtastfrequenz $f_A \geq 8 \cdot \Delta f$. In den hier durchgeführten Untersuchungen wurde als Abtastfrequenz $f_A = 16 \cdot f_{Test}$ gewählt, und es ergibt sich N zu 64.

Bild 3 zeigt den Versuchsaufbau. Eine Stromquelle steuert den magnetostruktiven Wandler an. Zwar be-

sitzen Verstärker für magnetostruktive Aktoren im Großsignalbetrieb eine relativ niedrige Grenzfrequenz von 50...100 Hz, bei Kleinsignalansteuerung liegt diese Grenzfrequenz jedoch deutlich höher, so dass aktorischer Ansteuerstrom und Testsignalstrom in ein und demselben Verstärker erzeugt werden können. Dazu wird das Testsignal zum Ansteuersignal addiert und dem Verstärker zugeführt. Strom und Spannung am Aktor werden über die Monitor-Ausgänge des Verstärkers abgegriffen und mittels diskreter Fouriertransformation in den Frequenzbereich übertragen. Ist die Abtastfrequenz entsprechend den obigen Kriterien gewählt, so ergibt sich bei der Testsignalfrequenz ein Maximum, dessen Wert der Amplitude des Testsignals am Gesamtsignal entspricht. Mit den Amplituden von Strom und Spannung lässt sich die Induktivität gemäß

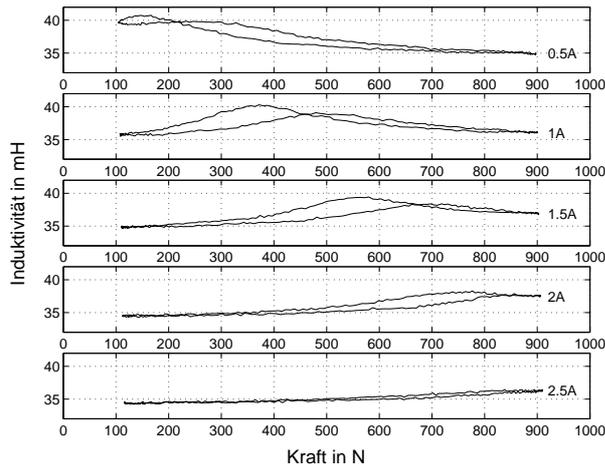
$$L = \frac{U(f_{Test})}{2\pi f_{Test} \cdot I(f_{Test})} \quad (2)$$

berechnet.

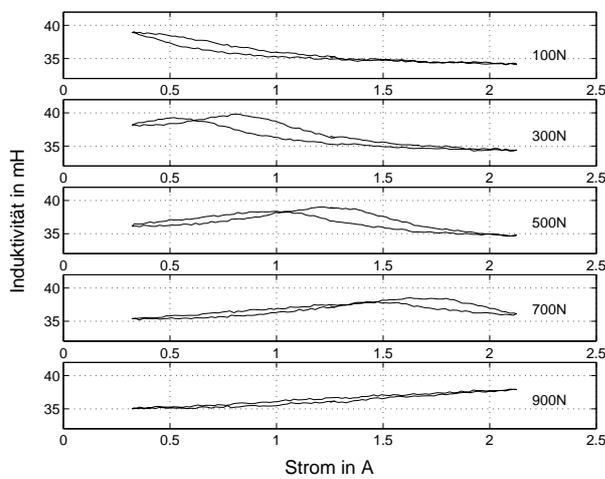
Die Messungen wurden an dem in Bild 1b) vorgestellten Aktor durchgeführt. Als Stromverstärker wurde ein Labor-Eigenbau eingesetzt, die Testsignal-erzeugung übernimmt ein Funktionsgenerator Agilent 33120A. Für die Messwerterfassung wurde eine Schnittstellenkarte National Instruments MIO-16E4 verwendet, welche die aufgezeichneten Daten an ein unter LabView erstelltes Programm weiterleitet. Die spätere Datenauswertung und Induktivitätsberechnung erfolgen offline mit der Analyse- und Simulationssoftware Matlab.

Die Kurven in Bild 4 zeigen wie erwartet eine sowohl von der Kraft F als auch vom Ansteuerstrom I abhängige Induktivität. Bild 4a) zeigt die nach Gleichung (2) errechnete Induktivität des magnetostruktiven Aktors in Abhängigkeit der Kraft. Die Änderung der Induktivität durch mechanische Belastung beträgt je nach Aktorstrom zwischen 5 und 12% bei einer maximalen Empfindlichkeit von etwa 2,5 mH / 100 N.

In Bild 4b) ist der Verlauf der Induktivität für variablen Strom bei konstanter Kraft aufgetragen. Für die Rekonstruktion der auf den Aktor wirkenden Kraft muss ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Induktivität und Kraft herrschen. Diese Voraussetzung ist nicht für alle Ströme und Kräfte erfüllt. Vielmehr ergeben sich für einen errechneten Induktivitätswert mehrere mögliche Kraftkorrespondenzen, so dass eine eindeutige Zuordnung nicht möglich ist. Lässt man den hysteretischen Verlauf der Kurven außer Acht, so können zumindest Kraft- und Strombereiche festgelegt werden, in denen diese Eindeutigkeit gewährleistet ist.



a)



b)

Bild 4 Bestimmung der Induktivität mittels DFT ($f_{\text{Test}}=310$ Hz, $f_A=4960$ Hz, $I_{\text{Test,eff}}=10$ mA). a) Induktivität als Funktion der Kraft. Parameter ist der Aktorstrom. b) Induktivität als Funktion des Stromes. Parameter ist die Kraft.

2.2.2 Signalauswertung mit Parameteridentifikation

Bei diesem Verfahren werden die Parameter eines zuvor erstellten elektrischen Modells durch Optimierung eines Gütekriteriums (meist *least-square*) geschätzt. Das Modell leitet sich in diesem Fall aus dem vereinfachten elektrischen Ersatzschaltbild eines magnetostriktiven Aktors her und ergibt sich zu

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{d}{dt} i(t). \quad (3)$$

Durch Implementierung auf einem Mikrorechner werden zeitdiskrete Werte verarbeitet. Die Diskretisierung von (3) liefert

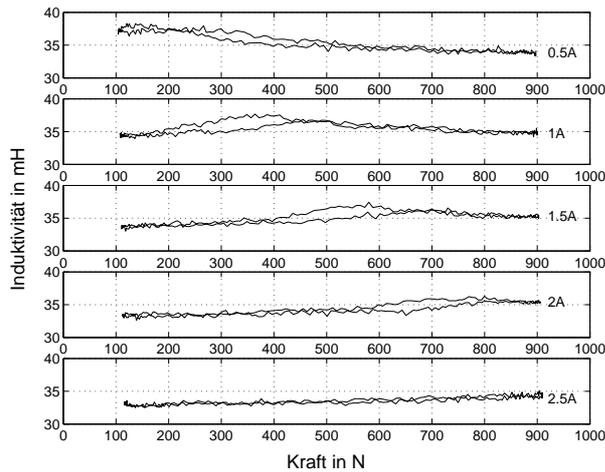
$$u(n) = i(n) \cdot \underbrace{\left(R + \frac{L}{\Delta T} \right)}_{b_1} + i(n-1) \cdot \underbrace{\frac{-L}{\Delta T}}_{b_2} \quad (4)$$

Die beiden Parameter b_1 und b_2 werden geschätzt, woraus sich die Werte für R und L errechnen lassen.

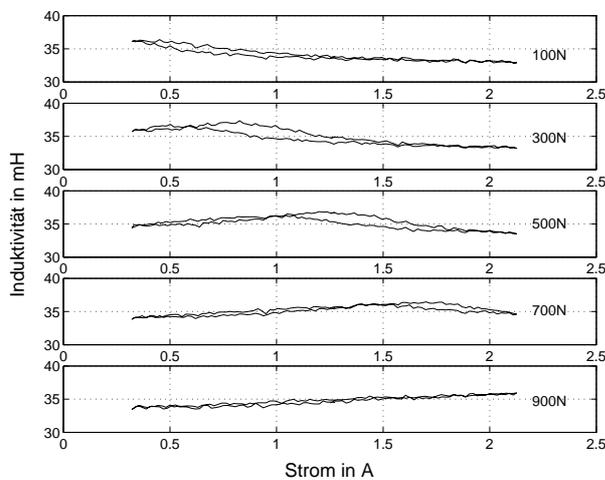
Die Genauigkeit der Identifikation der induktiven Komponente des Aktors hängt von der Differenz der in den Identifikationsalgorithmus einfließenden Werte $i(n)$ und $i(n-1)$ ab. Ist deren zeitliche Änderung zwischen zwei Abtastpunkten gering, so ist auch die aufgrund von Selbstinduktion der Spule erzeugte Spannung im Vergleich zur ohmschen Komponente der Gesamtspannung $u(n)$ sehr gering. Verfälscht Rauschen die Nutzsignale zu stark, so werden falsche Werte für die Induktivität identifiziert. Wird der Term $di(t)/dt$ in Gleichung (3) vergrößert, so liefert die Parameteridentifikation verlässliche Werte. Dies kann entweder durch Erhöhen der Stromamplitude oder durch Verkürzen der für die Änderung benötigten Zeit erfolgen.

Da jeder zusätzliche Strom die Auslenkung des magnetostriktiven Wandlers beeinflussen würde, wird hier der Nenner möglichst klein gewählt, was auf das bereits vorgestellte Konzept der Einkopplung eines hochfrequenten Stromanteils in den magnetostriktiven Aktor führt. Dabei sind die gleichen Aspekte wie bei der in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Methode zu berücksichtigen.

Bild 5 zeigt den Verlauf der Induktivität bei verschiedenen mechanischen Lasten und unterschiedlichen Ansteuerströmen. Der verwendete Aufbau ist identisch mit dem in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Versuchsaufbau zur Bestimmung der Induktivität durch Fourierzerlegung. Der identifizierte Induktivitätswert liegt zwischen 33 und 38 mH, der Widerstandswert variiert zwischen 8,5 und 9 Ω , wobei diese Änderung erwartungsgemäß weder strom- noch kraftabhängig ist, sondern überwiegend von der Erwärmung des Aktors im Betrieb her rührt. Die Änderung der Induktivität durch Strom und Spannung beträgt je nach Betriebsbedingung ca. 8...12% bei vergleichbarer maximaler Empfindlichkeit wie die Bestimmung der Induktivität durch Fourierzerlegung. Eine Nutzung dieses Verfahrens ist daher ebenfalls prinzipiell möglich, jedoch gelten durch den gleichen hysteresebefahenen Verlauf der Kurven ähnliche Einschränkungen hinsichtlich der nutzbaren Strom- und Kraftbereiche wie bei dem in 2.2.1 vorgestellten Verfahren.



a)



b)

Bild 5 Bestimmung der Induktivität mit einem Testsignal und Parameteridentifikation ($f_{\text{Test}}=310$ Hz, $f_A=4960$ Hz, $I_{\text{Test,eff}}=10$ mA). a) Induktivität als Funktion der Kraft. Parameter ist der Aktorstrom. b) Induktivität als Funktion des Stromes. Parameter ist die Kraft.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Magnetostruktive Werkstoffe besitzen sowohl aktori-sche als auch sensorische Eigenschaften und erlauben somit den Aufbau von ‚self-sensing‘ Aktoren. Im vorliegenden Aufsatz wurden mehrere Verfahren untersucht, um mit Hilfe der im magnetischen Fluss enthaltenen sensorischen Informationen eine Rekonstruktion der Belastung durchzuführen.

Die Messung des magnetischen Flusses mit Hilfe einer Hall-Sonde liefert in den betrachteten Kraft- und Strombereichen Messergebnisse, die bis auf eine Überlagerung von Hysterese streng monoton sind. In Kombination mit einem inversen Modell mit Hyste-

resekompensation lässt sich daher ein smarter Aktor aufbauen, der neben der reinen Kraftrekonstruktion auch die durch Kräfteinwirkung auftretenden Auslenkungsfehler kompensiert.

Die Bestimmung der Induktivität mit Hilfe eines Testsignals hingegen ist nur für bestimmte Strom- und Kraftbereiche eindeutig. Die Zuordnung einer Kraft zu einem gemessenen Induktivitätswert ist hierbei nicht immer möglich, da der Verlauf der Kurve, zusätzlich zu überlagerter Hysterese, nicht streng monoton ist und somit kein inverses Modell aufgestellt werden kann.

Weitere Untersuchungen sind hinsichtlich der Auswirkungen eines hochfrequenten Testsignals auf die Auslenkung des magnetostruktiven Aktors notwendig. Weiterhin muss die Frage geklärt werden, inwieweit sich der Verlauf der Induktivitätskurven ändert, wenn magnetostruktive Materialien unterschiedlicher Hersteller eingesetzt werden, da diese sich durch verschiedene Herstellungsverfahren und -güten in ihrer Kristallstruktur unterscheiden und somit andere Ergebnisse erzielt werden könnten.

4 Literatur

- [1] Kuhnen, K.; Schommer, M.; Janocha, H.: Design of a Smart Magnetostrictive Actuator by Sensing the Variation of Magnetic Flux, Conference Proceedings of Sensor 2003, Nürnberg
- [2] Kuhnen, K.; Schommer, M.; Janocha, H.: Integral Feedback Control of a Smart Magnetostrictive Actuator, Eingereicht zur Publikation in 'Smart Materials and Vibration Control'
- [3] IEEE Standard for Test Procedures for Magnetic Cores, 1992, IEEE Std 393-1991,
- [4] Atmanand, M. A.; Kumar, V. J.; Murti, Vempati G. K.: A Novel Method of Measurement of L and C, 1995, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 44, No. 4, August 1995, pp 898-903
- [5] Taha, S.: Digital Measurement of the Polar and Rectangular Forms of Impedances, 1989, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 38, No. 1, February 1989, pp 59-63