

***Konzeption, Ansteuerung und Eigenschaften
schneller piezoelektrischer Trägheitsmotoren***

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Ing. Matthias Hunstig
aus Paderborn

Tag des Kolloquiums: 9. Mai 2014
Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro
Korreferent: Prof. Dr. Jörg Wallaschek

Schriften des Lehrstuhls für Mechatronik und Dynamik

Band 2

Matthias Hunstig

**Konzeption, Ansteuerung und Eigenschaften
schneller piezoelektrischer Trägheitsmotoren**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2835-5

ISSN 2198-7947

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Geleitwort des Herausgebers

Neue technische Entwicklungen entstehen heute immer öfter an den Grenzen zwischen den Disziplinen, dort, wo verschiedene Denkweisen sich begegnen und miteinander wechselwirken. Die Entwicklung neuer Systemen setzt immer mehr ein interdisziplinäres Denken und Handeln voraus. In diesem Spannungsfeld lebt die Mechatronik, eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts.

Mechatronische Systeme bestehen aus einer mechanischen Grundstruktur, die durch Integration von Sensoren und Aktoren sowie durch informationsverarbeitende Komponenten ein hohes Maß an Flexibilität und Leistungsfähigkeit gewinnt. Die Mechatronik stellt somit eine interdisziplinäre Kombination der Fächer Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik dar.

Der Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik gehört der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn an. Die Forschungsschwerpunkte des Lehrstuhls sind Dynamik, Schwingungen, Reibung, Aktorik, Sensorik, Piezo- und Ultraschalltechnik, Entwurf, Optimierung und Verlässlichkeit mechatronischer Systeme. Sie spiegeln sich in den Bänden dieser Schriftenreihe, in denen Ergebnisse unserer Forschung veröffentlicht werden. Die Schriftenreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen der Universität und der praktischen Anwendung zu verbessern.

Herr Dr.-Ing. M. Hunstig hat eine neue Entwicklungsmethodik für piezoelektrische Trägheitsmotoren entwickelt und in der vorliegenden Dissertation dargestellt. Eine modellbasierte Analyse des Motorprinzips inkl. der elektrischen Ansteuerung dient als Grundlage für eine Untersuchung der prinzipbedingten Leistungsgrenzen. Neben der Geschwindigkeit werden andere Motoreigenschaften wie Effizienz, Lebensdauer und Stellkraft eingehend untersucht. Seine theoretischen Überlegungen hat er durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen abgesichert. Herr Hunstig hat damit ein schwieriges ingenieurwissenschaftliches Problem durchdrungen und einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung piezoelektrischer Trägheitsmotoren geliefert.

Paderborn, im Mai 2014

Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn. Als ich im Januar 2008 meine Tätigkeit dort begann, leitete Dr.-Ing. Tobias Hemsel den Lehrstuhl. Ihm danke ich für das in mich gesetzte Vertrauen, die gewährte Freiheit bei der Wahl meiner Forschungsthemen und die fortwährende, vielfältige Unterstützung. Im März 2009 übernahm Prof. Dr.-Ing. habil. Walter Sextro die Lehrstuhlleitung. Ihm gilt mein Dank für das Interesse an meiner Arbeit, die Möglichkeit, diese auch unter seiner Leitung fortzusetzen, zahlreiche hilfreiche Anregungen sowie für die Übernahme des Erstgutachtens in meinem Promotionsverfahren. Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer und Dr.-Ing. Tobias Hemsel für das Mitwirken in meiner Promotionskommission als Vorsitzender bzw. Beisitzer.

All meinen Kollegen am Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik, insbesondere der „guten Seele“ des Lehrstuhls, Marina Kassühlke, gilt mein Dank für die stets angenehme Atmosphäre und das gute kollegiale Miteinander. Für anregende fachliche Diskussionen und die gute Zusammenarbeit bei verschiedenen Forschungsprojekten danke ich neben Dr.-Ing. Tobias Hemsel besonders Dr.-Ing. Waleed Al-Ashtari und Dipl.-Ing. Peter Bornmann sowie Dr.-Ing. Walter Littmann, von dessen großem Erfahrungsschatz im Bereich der Piezo- und Ultraschalltechnik ich wiederholt profitieren durfte. Dipl.-Ing. Martin Liekenbröcker danke ich für die hervorragende technische Unterstützung bei allen Laborarbeiten.

Bei meinen Eltern bedanke ich mich für die Förderung meines Technikinteresses bereits in jungen Jahren und ihre ununterbrochene Unterstützung. Zu guter Letzt und ganz besonders danke ich meiner Frau Gisela Sander für ihr Interesse an meiner Forschung, ihre Liebe und ihren steten Rückhalt.

Paderborn, im Mai 2014

Matthias Hunstig

Kurzfassung

Piezoelektrische Trägheitsmotoren nutzen die Trägheit einer bewegten Masse, um diese über einen ununterbrochenen Reibkontakt schrittweise zu bewegen. Wegen ihres einfachen Aufbaus und ihrer guten Miniaturisierbarkeit werden diese Motoren zunehmend in Konsumgütern eingesetzt. Die Geschwindigkeit ist eine wichtige Motorkenngröße, eine allgemeingültige Analyse des Motorprinzips existiert jedoch bisher nicht.

Nach einer Definition von Trägheitsmotoren werden anhand eines Modells eines translatorischen piezoelektrischen Trägheitsmotors verschiedene idealisierte Anregungssignale hergeleitet. Eine Analyse des Motorverhaltens zeigt, dass der verbreitete Betrieb von Trägheitsmotoren mit Haft- und Gleitphasen für das Erreichen hoher Geschwindigkeiten ungeeignet ist. Aus den idealisierten Signalen für den schnellen dauergleitenden Betrieb werden frequenzbeschränkte Signale für den Betrieb mit realen Aktoren abgeleitet. Das Verhalten bei Anregung mit diesen Signalen wird bezüglich Geschwindigkeit, Effizienz, Haltbarkeit und Kraft verglichen. Zudem wird ein Verfahren beschrieben, mit dem die Bewegung hochfrequent angeregter Trägheitsmotoren periodenweise berechnet und wichtige Motorkenngrößen direkt berechnet werden können. Zur Validierung der theoretischen Ergebnisse wird ein Versuchsmotor aufgebaut und mit unterschiedlichen Signalen angeregt, es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Modell. Die Ergebnisse dieser Arbeit geben wertvolle Einblicke in die Funktion schneller Trägheitsmotoren und sind nützlich für ihre weitere Entwicklung und die Erweiterung ihres Einsatzbereichs.

Abstract

Piezoelectric inertia motors use the inertia of a body to incrementally drive it through an uninterrupted friction contact. Because of their simple structure and good miniaturizability, they are increasingly used in consumer goods. The velocity of these motors is an important parameter, but a general investigation of their working principle is not known to date.

After a definition of inertia motors, a model of a translatory piezoelectric inertia motor is used to derive different idealized excitation signals. An investigation of the motor characteristics shows that the common operation of inertia motors with alternating phases of stiction and sliding friction is inappropriate for reaching high velocities. Frequency-limited signals for real actuators are derived from the idealized sliding-only signals for fast inertia motors. The characteristics of a motor driven with these signals are compared regarding velocity, efficiency, durability, and force. Additionally, a method for period-wise simulation of high-frequency inertia motors is described, which also allows direct calculation of important motor characteristics. A test motor is constructed to validate the theoretical results and driven with different signals. A good agreement between measurement and model is found. The results of this work give important insights into the operation of fast inertia motors, are useful for their further development and can enhance their field of application.

Vorveröffentlichungen

Teile der vorliegenden Dissertation oder Vorarbeiten hierzu wurden bereits in den nachfolgenden Artikeln veröffentlicht.

Begutachtete Zeitschriftenartikel

HUNSTIG, M. ; HEMSEL, T.: Drive Signals for Maximizing the Velocity of Piezoelectric Inertia Motors. In: *Journal of the Korean Physical Society* 57 (2010), Nr. 41, S. 938–941

HUNSTIG, M. ; HEMSEL, T.: Parameter Identification and Model Validation for the Piezoelectric Actuator in an Inertia Motor. In: *Journal of the Korean Physical Society* 57 (2010), Nr. 41, S. 952–954

HUNSTIG, M. ; HEMSEL, T. ; SEXTRO, W.: Modelling the friction contact in an inertia motor. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 24 (2013), Nr. 11, S. 1380–1391

HUNSTIG, M. ; HEMSEL, T. ; SEXTRO, W.: Stick-slip and slip-slip operation of piezoelectric inertia drives. Part I: Ideal excitation. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 200 (2013), S. 90–100

HUNSTIG, M. ; HEMSEL, T. ; SEXTRO, W.: Stick-slip and slip-slip operation of piezoelectric inertia drives—Part II: Frequency-limited excitation. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 200 (2013), S. 79–89

Begutachtete Beiträge in Tagungsbänden

HUNSTIG, M. ; HEMSEL, T.: Modellbasierte Entwicklung piezoelektrischer Trägheitsmotoren. In: *6. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme*. Paderborn : HNI-Verlagsschriftenreihe, 2009, S. 85–96

HUNSTIG, M. ; HEMSEL, T. ; SEXTRO, W.: Anregungskonzepte und Modellierung piezoelektrischer Trägheitsmotoren. In: *7. Paderborner Workshop Entwurf mechatronischer Systeme*. Paderborn : HNI-Verlagsschriftenreihe, 2010, S. 129–141

Nicht begutachtete Beiträge in Tagungsbänden

HUNSTIG, M. ; HEMSEL, T. ; SEXTRO, W.: Improving the Performance of Piezoelectric Inertia Motors. In: *ACTUATOR 10 Conference Proceedings*. Bremen : Wirtschaftsförderung Bremen, 2010, S. 657–661

HUNSTIG, M. ; HEMSEL, T. ; SEXTRO, W.: Analysis of Different Operation Modes for Inertia Motors. In: *ACTUATOR 12 Conference Proceedings*. Bremen : Wirtschaftsförderung Bremen, 2012, S. 761–764

HUNSTIG, M. ; HEMSEL, T. ; SEXTRO, W.: An Efficient Simulation Technique for High-Frequency Piezoelectric Inertia Motors. In: *2012 International Ultrasonics Symposium, IEEE*, 2012, S. 277–280

HUNSTIG, M.; HEMSEL, T.; SEXTRO, W.: High-Velocity Slip-Slip Operation of Piezoelectric Inertia Motors – Experimental Validation. In: *Proceedings of 10th International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications and 8th Energy Harvesting Workshop*. Hannover, Berichte aus dem IDS, 2013, S. 16–18

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Aufbau der Arbeit	6
2 Grundlagen von Trägheitsmotoren	7
2.1 Definition	7
2.2 Einsatz zur Krafterzeugung	16
2.3 Reibkontakt	17
2.4 Festkörperaktor	23
2.5 Elektrische Ansteuerung	24
3 Konzepte für den Betrieb von Trägheitsmotoren mit hoher Geschwindigkeit	33
3.1 Modellbildung	33
3.2 Funktionsvoraussetzungen	35
3.3 Definition charakteristischer Größen	37
3.4 Geschwindigkeitsmaximierter Betrieb mit idealisierter Anregung	41
4 Betrieb von Trägheitsmotoren mit frequenzbeschränkter Anregung	63
4.1 Frequenzbeschränkte Anregungssignale	63
4.2 Zusätzliche Kenngrößen für den realen Betrieb	67
4.3 Eigenschaften bei frequenzbeschränkter Anregung	77
4.4 Einfluss von Aktorhub und -bandbreite	82
5 Simulation und Eigenschaften hochfrequent betriebener Trägheitsmotoren	85
5.1 Periodenweises Simulationsverfahren	85
5.2 Einfluss der Reibkraft auf die Motoreigenschaften	92
6 Aufbau und Modellierung eines Versuchsmotors	95
6.1 Aufbau des Versuchsmotors	95
6.2 Spannungsgesteuerter dynamischer Betrieb piezoelektrischer Aktoren in Trägheitsmotoren	101
6.3 Dynamische Charakterisierung des Stators	105
6.4 Modellierung des Reibkontakts	107
7 Betrieb des Versuchsmotors	125
7.1 Versuchsaufbau	125
7.2 Versuchsdurchführung	127
7.3 Ergebnisse	132
7.4 Vergleich von Messung und Simulation	139

8	Empfehlungen für den Bau schneller Trägheitsmotoren	143
9	Zusammenfassung	147
	Literaturverzeichnis	151
A	Anhang	171
A.1	Hersteller von Trägheitsmotoren	171
A.2	Vorzeichen der charakteristischen Beschleunigungen	172
A.3	Anlaufverhalten von Trägheitsmotoren	173
A.4	Fehlerabschätzung für die quasistatische Nutzung eines modalen Aktor- modells	175
A.5	Simulationsalgorithmus	176
A.6	Abschätzung der maximalen im Aktor auftretenden Zugspannung	177
A.7	Dynamikkompensation anhand des diskreten Übertragungsverhaltens für instationäre, nicht-periodische Signale	178
A.8	Korrelationskoeffizient und Korrelationsfunktion	179
	Lebenslauf	183

Nomenklatur

Aus Gründen der Kompaktheit enthält dieses Verzeichnis verwendeter Formelzeichen nur Zeichen, die an mehreren Stellen verwendet werden oder von wesentlicher Bedeutung sind.

Die Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert einer schwingenden Größe wird in dieser Arbeit nach DIN 40110 Teil 1 (März 1994) als Schwingungsbreite bezeichnet.

α	Kopplungsfaktor zwischen elektrischem und mechanischem Verhalten eines piezoelektrischen Wandlers
γ	Steigungswinkel des Trägheitsmotors
δ_p	Haltbarkeitsindikator in Periode p
δ_∞	Haltbarkeitsindikator im stationären Zustand
ζ_p	Geschwindigkeitseffizienz in Periode p
ζ_∞	Geschwindigkeitseffizienz im stationären Zustand
$\kappa = a_R/a_0^+$	Beschleunigungsfaktor für die Beschleunigungsphase der idealisierten Betriebsmodi mit parabolischer Sägezahnanregung
$\lambda = v_{R,1}/v_{S,1}$	Geschwindigkeitsfaktor in der Beschleunigungsphase der idealisierten Betriebsmodi mit linearer Sägezahnanregung
μ_0	Haftwert
μ_d	Reibwert
σ	empirische Standardabweichung
$\sigma_k(n)$	Lanczos'scher σ -Faktor zur Multiplikation mit den Fourier-Koeffizienten der k . Harmonischen
τ	Länge der Phase steigender Statorauslenkung im idealisierten Betrieb
$\varphi =$ ($\varphi_1 \varphi_2 \dots \varphi_n$)	Zeilenmatrix der Phasen der Harmonischen eines Signals
φ_k	Phase der k . Harmonischen einer Schwingung
ω	Kreisfrequenz
ω_1	Grund-Kreisfrequenz einer Schwingung, insbesondere der Anregung
$a_0(t)$	Losbrechbeschleunigung
a_0^+	Losbrechbeschleunigung bei positiver Beschleunigung der Stange
a_0^-	Losbrechbeschleunigung bei negativer Beschleunigung der Stange
$a_d(t)$	Schlittenbeschleunigung während der Gleitphase
a_d^+	Schlittenbeschleunigung während der Gleitphase bei positiver Relativgeschwindigkeit

\bar{a}_d	Schlittenbeschleunigung während der Gleitphase bei negativer Relativgeschwindigkeit
a_k	Fourier-Koeffizient ($k \geq 0$)
a_R	Statorbeschleunigung in der Beschleunigungsphase der idealisierten Betriebsmodi mit parabolischer Sägezahnanregung
\hat{a}_R	Schwingungsbreite der Beschleunigung der Antriebsstange
$\bar{a}_{S,\text{abs}}$	mittlerer Betrag der Schlittenbeschleunigung
b_k	Fourier-Koeffizient ($k \geq 1$)
c	modale Steifigkeit eines piezoelektrischen Wandlers
c_L	Steifigkeit einer Lastfeder
C	elektrische Kapazität eines piezoelektrischen Wandlers (bei mechanischer Einspannung)
d	modale Dämpfungskonstante eines piezoelektrischen Wandlers
$\mathbf{d} =$ ($d_1 \ d_2 \ \dots \ d_n$)	Zeilenmatrix der Amplituden der Harmonischen eines Signals
$\mathbf{d}^* = \mathbf{d}/\hat{x}_R$	normalisierte Amplituden-Zeilenmatrix
d_k	Amplitude der k . Harmonischen einer Schwingung
$d_{S,k}$	Amplitude der k . Harmonischen der Schlittengeschwindigkeit
f	Frequenz
$f_0 =$ $\sqrt{a_0^+ / (2x_{R,\text{max}})}$	Basisfrequenz für die Anregung eines Trägheitsmotors
f_1	Grundfrequenz des Anregungssignals
f_k	Frequenz der k . Harmonischen des Anregungssignals
$f_n = n \cdot f_1$	Frequenz der n . und höchsten Harmonischen des Anregungssignals
f_{zul}	maximal zulässige Betriebsfrequenz (eines piezoelektrischen Aktors)
$F(t)$	auf einen piezoelektrischen Aktor wirkende Kraft
\hat{F}	monofrequente Kraft (komplexe Darstellung)
$F_c(t)$	Normalkraft im Reibkontakt
F_c	konstante Normalkraft im Reibkontakt
$F_{c_L,\infty}$	mittlere Federkraft einer Lastfeder im stationären Zustand
$F_f(t)$	Tangentialkraft im Reibkontakt
F_{f0}	Losbrechkraft
F_{fd}	Reibkraft
F_{fh}	Haftkraft
$F_g = m_S g$	Gewichtskraft des Schlittens
$F_x(t)$	in x -Richtung auf den Schlitten wirkende externe Kraft
F_x	in x -Richtung auf den Schlitten wirkende konstante externe Kraft
$F_z(t)$	in z -Richtung auf den Schlitten wirkende externe Kraft

F_z	in z -Richtung auf den Schlitten wirkende konstante externe Kraft
g	Gravitationskonstante
$G(\omega) = X(\omega)/U(\omega)$	diskrete Funktion zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens eines piezoelektrischen Wandlers
$i(t)$	elektrischer Strom
\hat{i}	Amplitude eines monofrequenten Wechselstroms
$\hat{\underline{i}}$	monofrequenter Wechselstrom (komplexe Darstellung)
\hat{i}_k	Amplitude der k . Harmonischen des Stroms
I	Effektivwert des Stroms
m	äquivalente Masse eines piezoelektrischen Wandlers
m_R	Masse der Antriebsstange eines Trägheitsmotors mit feststehendem Aktor
m_S	Masse des Schlittens eines Trägheitsmotors mit feststehendem Aktor
$M = m + m_R$	modale Ersatzmasse des Stators
n	Anzahl der Harmonischen in einem Signal
n_T	Anzahl der Diskretisierungspunkte pro Signalperiode
p	Periodennummer, auch Index verschiedener periodenbezogener Größen
p_{F0}	Periode drei Perioden bevor in den Betriebsversuchen der Betrag der gemessenen Kraft einen Schwellenwert überschreitet
$p_{F\max}$	Periode drei Perioden nachdem in den Betriebsversuchen der Betrag der gemessenen Kraft einen Schwellenwert überschreitet
p_q	Periode nach dem Start aus der Ruhe, in der die mittlere Schlittengeschwindigkeit \bar{v}_p das q -fache der Endgeschwindigkeit \bar{v}_∞ erreicht
$P_{f,p}$	mittlere in Periode p im Reibkontakt umgesetzte Reibleistung
$q(t)$	Ladung eines piezoelektrischen Wandlers
q	Grenzwert für die Bestimmung des näherungsweise Erreichens der Endgeschwindigkeit
q_p	Welligkeit der Schlittengeschwindigkeit in Periode p
q_∞	Welligkeit der Schlittengeschwindigkeit im stationären Zustand
$\hat{s}(t)$	dimensionsloses stufenförmiges Signal zur Modulation einer harmonischen Anregung
s_{\max}	Phasenverschiebung (in Diskretisierungspunkten), bei der die Abschätzung der Korrelationsfunktion $K_{\dot{x}_R\dot{x}_S, \text{biased}}(s)$ der Geschwindigkeitsverläufe von Stange und Schlitten ihr Maximum erreicht
s_{char}	„charakteristische Verschiebung“ nach Altpeter [4]
S	elektrische Scheinleistung
t	Zeit
t^+	Zeit in einer Periode mit $\dot{x}_R(t) > \dot{x}_S(t)$
$t^- = T - t^+$	Zeit in einer Periode mit $\dot{x}_R(t) < \dot{x}_S(t)$

t_q	Zeit, in der nach dem Start aus der Ruhe die mittlere Schlittengeschwindigkeit \bar{v}_p das q -fache der Endgeschwindigkeit \bar{v}_∞ erreicht
Δt_1	Länge der (ersten) Beschleunigungsphase in den idealisierten Betriebsmodi
Δt_2	Länge der Abbremsphase im idealisierten Haft-Gleit-Betrieb und im idealisierten diskreten Gleit-Gleit-Betrieb mit parabolischer Sägezahnanregung
$\Delta t_{2,p}$	Länge der Abbremsphase in Periode p im idealisierten kontinuierlichen Gleit-Gleit-Betrieb mit parabolischer Sägezahnanregung
Δt_3	Länge der Beschleunigungsphase im idealisierten Gleit/Haft-Gleit-Betrieb mit linearer Sägezahnanregung
T	Periode des Anregungssignals eines Trägheitsmotors
$u(t)$	elektrische Spannung an einem piezoelektrischen Wandler
\hat{u}	Amplitude einer monofrequenten elektrischen Wechselspannung
$\underline{\hat{u}}$	monofrequente Wechselspannung (komplexe Darstellung)
\hat{u}_k	Amplitude der k . Harmonischen der elektrischen Spannung
u_{\max}	Maximalwert der elektrischen Spannung in den Betriebsversuchen
$U(\omega)$	Spannungsverlauf in diskreter Frequenzbereichsdarstellung
U	Effektivwert der elektrischen Spannung
$\bar{v}(t)$	mittlere Schlittengeschwindigkeit (Näherung)
\hat{v}	Geschwindigkeitsamplitude eines piezoelektrischen Aktors bei monofrequenter Anregung
$\underline{\hat{v}}$	monofrequente Geschwindigkeit (komplexe Darstellung)
\bar{v}_0	Anfangsgeschwindigkeit des Schlittens
\bar{v}_∞	mittlere Geschwindigkeit des Schlittens im stationären Zustand
v_1	Geschwindigkeit von Stange und Schlitten am Ende der Beschleunigungsphase im idealisierten Haft-Gleit-Betrieb
v_2	Geschwindigkeit von Stange und Schlitten am Ende der Abbremsphase im idealisierten kontinuierlichen Haft-Gleit-Betrieb
\hat{v}_k	Geschwindigkeitsamplitude der k . Harmonischen des Anregungssignals
\bar{v}_p	mittlere Geschwindigkeit des Schlittens in Periode p
v_r	Relativgeschwindigkeit zwischen Stange und Schlitten
$\bar{v}_{r,\text{abs}}$	mittlere absolute Relativgeschwindigkeit zwischen Stange und Schlitten
\hat{v}_R	Schwingungsbreite der Geschwindigkeit der Antriebsstange
$v_{R,1}$	Geschwindigkeit der Stange in der Beschleunigungsphase bei linearer Sägezahnanregung
$v_{R,\text{eff}}$	Effektivwert der Stangengeschwindigkeit
\hat{v}_S	Schwingungsbreite der Geschwindigkeit des Schlittens im stationären Zustand
$v_{S,1}$	Geschwindigkeit des Schlittens am Ende der Beschleunigungsphase im idealisierten diskreten Gleit-Gleit-Betrieb

$v_{S,\text{eff}}$	Effektivwert der Schlittengeschwindigkeit
$v_{S,\text{min},p}$	minimale Schlittengeschwindigkeit in Periode p
$v_{S,\text{min},\infty}$	minimale Schlittengeschwindigkeit im stationären Zustand
$v_{S,\text{max},p}$	maximale Schlittengeschwindigkeit in Periode p
$v_{S,\text{max},\infty}$	maximale Schlittengeschwindigkeit im stationären Zustand
$\Delta\bar{v}_p$	Änderung der mittleren Schlittengeschwindigkeit \bar{v}_p in Periode p
V_p	Verschleißvolumen in Periode p
w	Faktor zur Berechnung des Reibverschleißes
$W_{f,p}$	in Periode p im Reibkontakt dissipierte Energie
$x(t)$	Auslenkung eines piezoelektrischen Wandlers
$x_{cL,\infty}$	mittlere Verformung einer Lastfeder im stationären Zustand
$x_R(t)$	Position des Stators / der Stange
$\dot{x}_R(t)$	Geschwindigkeit des Stators / der Stange
$\dot{x}_{R,\text{inplane}}(t)$	Geschwindigkeit des Stators / der Stange, mit einem In-Plane-Vibrometer gemessen
$\ddot{x}_R(t)$	Beschleunigung des Stators / der Stange
\hat{x}_R	wahrer Aktorhub (Schwingungsbreite der Auslenkung)
$x_{R,\text{max}}$	maximal zulässiger Aktorhub
$x_{\text{soll}}(t)$	Soll-Wegverlauf
$x_S(t)$	Position des Schlittens
$\dot{x}_S(t)$	Geschwindigkeit des Schlittens
$\ddot{x}_S(t)$	Beschleunigung des Schlittens
\bar{x}_S	mittlere Position des Schlittens
$\bar{x}_\infty = \bar{v}_\infty \cdot T$	Weg des Schlittens pro Anregungsperiode im stationären Zustand = „Schrittgröße“ des Motors
\hat{x}_S	Schwingungsbreite der Schlittenposition im stationären Zustand (bei Fahrt gegen eine Feder)
$x_{S,1}$	Position des Schlittens am Ende der Beschleunigungsphase im idealisierten diskreten Gleit-Gleit-Betrieb
$x_{S,3}$	Position des Schlittens am Ende der Beschleunigungsphase im idealisierten kontinuierlichen Gleit-Gleit-Betrieb mit linearer Sägezahnanregung
$X(\omega)$	Auslenkungsverlauf in diskreter Frequenzbereichsdarstellung
$X_{\text{soll}}(\omega)$	Soll-Auslenkung in diskreter Frequenzbereichsdarstellung
\underline{y}_{11}	Kurzschlussingangsadmittanz eines piezoelektrischen Wandlers
\underline{y}_{12}	Kurzschlusskernadmittanz rückwärts eines piezoelektrischen Wandlers
\underline{y}_{21}	Kurzschlusskernadmittanz vorwärts eines piezoelektrischen Wandlers
\underline{y}_{22}	Kurzschlussausgangsadmittanz eines piezoelektrischen Wandlers