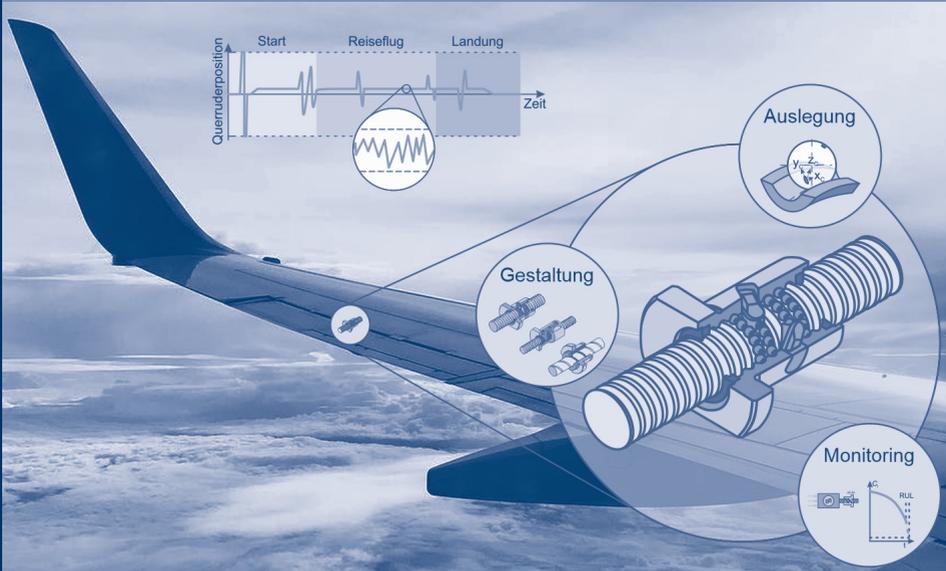


Christoph Kupfer  
Winsen [Luhe]

## Maßnahmen zur Erhöhung der Lebens- und Nutzungsdauer von Kugelgewindetrieben unter Kurzhubbelastung in elektro-mechanischen Flugsteuerungsaktuatoren



01-2021

**Maßnahmen zur Erhöhung der Lebens- und  
Nutzungsdauer von Kugelgewindetrieben unter  
Kurzhubbelastung in elektro-mechanischen  
Flugsteuerungsaktuatoren**

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von  
**Christoph Kupfer, M. Sc.**

aus Winsen (Luhe)

2021

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke  
Institut für Flugzeug-Systemtechnik  
Technische Universität Hamburg
  
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Robert Seifried  
Institut für Mechanik und Meerestechnik  
Technische Universität Hamburg

Tag der mündlichen Prüfung: 27. August 2020

Schriftenreihe Flugzeug-Systemtechnik

Band 1/2021

**Christoph Kupfer**

**Maßnahmen zur Erhöhung der Lebens- und  
Nutzungsdauer von Kugelgewindetrieben unter  
Kurzhubbelastung in elektro-mechanischen  
Flugsteuerungsaktuatoren**

Shaker Verlag  
Düren 2021

### **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.: Hamburg, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7878-7

ISSN 1861-5279

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeug-Systemtechnik der Technischen Universität Hamburg.

Mein Dank gilt zunächst meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die wissenschaftlichen Freiräumen, die diese Arbeit ermöglicht haben. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Seifried für die Bereitschaft, das Zweitgutachten zu verfassen.

Mein besonderer Dank gilt allen Mitarbeitern und ehemaligen Kollegen, mit denen ich in meiner Zeit am Institut für Flugzeug-Systemtechnik zusammenarbeiten durfte. Ich bedanke mich vor allem für die freundschaftliche Atmosphäre und den kollegialen Umgang, durch den ich mich fachlich und menschlich stark weiterentwickelt habe. Stellvertretend möchte ich hier vor allem Nils Trochermann, Tobias Kreitz, Karsten Henning, Marcus Lerch und Marian Pittroff erwähnen. Weiterhin danke ich Detlef Lehmann, Hinrich Sieber, Georg Schindler, Thorsten Windrath und Monika Wittke stellvertretend für alle Institutsmitarbeiter. Stellvertretend für alle Studenten, die mit viel Einsatz ihre Arbeiten bei mir erstellt haben, danke ich Lorenzo Trecroci.

Die inhaltlichen Grundlagen dieser Arbeit entstanden im Rahmen des im Luftfahrtforschungsprogramms V-2 geförderten Projektes NEXT-MOVE in Zusammenarbeit mit Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH. Hier möchte ich mich für die offene, konstruktive und vertrauensvolle Zusammenarbeit vor allem bei Christian Trenkle, Thomas Epple, Lutz Berger, Dr.-Ing. Michael Rottach und Raphael Giselbrecht bedanken. Ein weiterer Dank gilt dem Team vom Institut für Kunststoffe und Faserverbundwerkstoffe, die mir ihre Infrastruktur für die Befundung der Kugelgewindetriebe zur Verfügung gestellt haben.

Abschließend gilt mein ganz persönlicher Dank meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mich während meiner Ausbildung und der Zeit am Institut immer unterstützt haben, meiner Frau Kira für ihren liebevollen und stärkenden Rückhalt und unserem Sohn Jonte. Es ist schön, dass du da bist und unser Leben bereicherst. Ohne euch wäre diese Arbeit nicht entstanden. Danke!

Hamburg, im Oktober 2020

*Christoph Kupfer*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>xi</b>
Formelzeichen . . . . .	xi
Indizes . . . . .	xvii
Abkürzungen . . . . .	xix
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Lebensdauerberechnung von KGTs . . . . .	4
1.2 Zielsetzung der Arbeit . . . . .	6
<b>2 Aufbau, Tribologie und derzeitige Auslegung von Kugelgewinde-     trieben</b>	<b>9</b>
2.1 Aufbau und Funktion von Kugelgewindetrieben . . . . .	9
2.1.1 Geometrische Größen . . . . .	10
2.1.2 Externe Belastungsgrößen . . . . .	11
2.1.3 Kugelrückführungs- und Vorspannsysteme . . . . .	12
2.2 Verschleiß und Verschleißmechanismen . . . . .	15
2.2.1 Allgemeine Verschleißmechanismen . . . . .	15
2.2.2 Schadensformen von KGTs und erwarteter Verschleiß beim Einsatz in der Querruderbetätigung . . . . .	19
2.3 Allgemeine Verschleißvorhersage und Lebensdauerberechnung .	20
2.4 Methodik zur Berechnung abrasiven Verschleißes an KGTs nach Haberkern, Jarosch und Forstmann . . . . .	23
2.4.1 Grundlegender Ansatz nach Haberkern . . . . .	23
2.4.2 Aufbauende Arbeiten von Jarosch und Forstmann . . .	27
2.4.3 Diskussion der Ansätze . . . . .	28
<b>3 Entwicklung einer Methodik zur Lebensdauerberechnung von     KGTs unter Berücksichtigung von abrasivem und adhäsivem Ver-     schleiß</b>	<b>33</b>
3.1 Ziele, Aufbau und Annahmen der Methodik . . . . .	33

3.2	Ablauf der Methodik zur Verschleißvorhersage von KGTs . . .	37
3.2.1	Eingabeparameter . . . . .	37
3.2.2	Initialisierung . . . . .	39
3.2.3	Verschleiß- und Axialspielberechnung . . . . .	40
3.3	Herleitung der Verschleißfaktoren . . . . .	42
3.3.1	Beschreibung der geometrischen Kugel- und Laufbahn- parameter . . . . .	43
3.3.2	Hertz'sche Kontaktparameter . . . . .	53
3.3.3	Kinematische Kontaktparameter . . . . .	58
3.3.4	Kontaktkräfte- und drücke . . . . .	67
3.3.5	Schmierfilm und Lastverhältnisse . . . . .	70
3.3.6	Kontaktart . . . . .	73
3.3.7	Verschleißparameter . . . . .	74
3.3.8	K-Faktor . . . . .	77
3.4	Vereinfachung der Methodik zur Vorauslegung von KGTs . . .	80
3.4.1	Ablauf der Designmethodik . . . . .	80
3.5	Studien und Sensitivitätsanalysen . . . . .	84
3.5.1	Grundlage und Ziele der Studien und Analysen . . . . .	84
3.5.2	Vergleich zwischen der Detail- und der Designmethodik	85
3.5.3	Sensitivitätsanalyse von KGT-Parametern . . . . .	86
3.5.4	Lebensdauer für verschiedene Belastungsprofile . . . . .	87
3.6	Fazit zur Methodikentwicklung . . . . .	89
<b>4</b>	<b>Experimentelle Lebensdauerests von KGTs unter Kurzhub</b>	<b>91</b>
4.1	Zielsetzungen und allgemeines Vorgehen der Lebensdauerests .	91
4.2	Lebensdauerprüfstand und Testszenarien . . . . .	92
4.2.1	Lebensdauerprüfstand . . . . .	92
4.2.2	Prüflinge . . . . .	95
4.2.3	Testszenarien . . . . .	96
4.3	Durchführung, Ergebnisse und Erkenntnisse des Lebensdauer- ests . . . . .	98
4.3.1	Durchführung und Messergebnisse des Lebensdauerests	98
4.3.2	Befundung des Prüflings und des Axiallagers . . . . .	101
4.3.3	Analyse der Testergebnisse . . . . .	106

4.4	Diskussion der Ergebnisse und Rückschlüsse für die Auslegungsmethodik und das weitere Vorgehen . . . . .	107
4.4.1	Abschätzung des weiteren Testaufwandes für eine Validierung der Methodik . . . . .	109
<b>5</b>	<b>Alternative Gestaltungsmaßnahmen von KGTs zur Verschleißreduktion auf Aktuatorebene</b>	<b>113</b>
5.1	Aktuatorkonzept für die Querruderbetätigung . . . . .	113
5.2	Verschleißreduzierende Gestaltungsmaßnahmen von KGTs . . .	114
5.3	Einfluss der verschleißreduzierenden Gestaltungsmaßnahmen auf Aktuatorebene . . . . .	117
<b>6</b>	<b>Überwachungssystemkonzepte zur Optimierung der KGT-Nutzungszeit in Aktuatoren der Querruderbetätigung</b>	<b>119</b>
6.1	PHM-Systemdefinition für KGTs in Aktuatoren . . . . .	119
6.2	Stand der Forschung und Technik von Überwachungssystemen .	120
6.3	Ansatz für die Nutzung von Zählverfahren für die Zustandsprognose von KGTs in EMAs . . . . .	122
6.4	Ansatz für die Nutzung eines Korrelationsfaktors für die Zustandsprognose von KGTs in EMAs . . . . .	126
6.4.1	EMA-Systemmodelle . . . . .	128
6.4.2	Modellbasierte Studie zur Bestimmung des Einflusses von Axialspiel und Reibung auf den Korrelationsfaktor .	136
6.4.3	Studie zur Ermittlung des Korrelationsfaktors anhand experimenteller Tests . . . . .	138
6.5	Fazit zu den vorgestellten Überwachungsfunktionen . . . . .	140
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>143</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>149</b>
A.1	Statistische Versuchsplanung (Design of Experiments) . . . . .	149
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>151</b>



# Nomenklatur

## Formelzeichen

### Lateinische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$a, \ddot{x}$	[m/s <sup>2</sup> ]	Lineare Beschleunigung
$a_{\text{Hertz}}$	[m]	Große Halbachse der HERTZ'schen Kontaktellipse
$b$	[m]	Abstand
$b_{\text{Hertz}}$	[m]	Kleine Halbachse der HERTZ'schen Kontaktellipse
$b_{\text{O}}, b'_{\text{O}}$	[m]	Horizontaler Abstand zwischen Kugel- und Profilkreismittelpunkt
$c$	[–]	Schmiermittelkontamination
$d_1$	[m]	Außendurchmesser der Spindel
$dt$	[s]	Schrittweite
$f$	[Hz]	Frequenz
$f_r$	[–]	Schmiegung
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$h$	[m]	Schmierfilmhöhe
$h$	[m]	Vertikaler Abstand zwischen Spindel- und Kugelmit- tenkreisdurchmesser
$h_c$	[m]	Zentrale Schmierfilmhöhe
$h_{\text{min}}$	[m]	Minimale Schmierfilmhöhe
$h_{\text{min,iso}}$	[m]	Minimale, isotherme Schmierfilmhöhe
$h_{\text{O}}, h'_{\text{O}}$	[m]	Vertikaler Abstand zwischen Kugel- und Profilkreis- mittelpunkt
$i$	[–]	Anzahl Kugelläufe (tragend)
$i$	[–]	Zeitschritt
$i_{\text{G}}$	[–]	Getriebeübersetzung
$j$	[–]	Betriebszyklus (Zählvariable)
$j_{\text{koll}}$	[–]	Anzahl Kollektive

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$j_{\max}$	[–]	Maximaler Betriebszyklus
$k$	[–]	Elliptizität
$k$	[–]	Proportionalitätskonstante
$k$	[–]	Zählvariable
$k_E$	[As/rad]	Spannungskonstante
$k_T$	[Nm/A]	Drehmomentenkonstante
$l, l'$	[m]	Abstand
$l$	[–]	Zählvariable
$n$	[–]	Anzahl
$n$	[U/min]	Drehzahl
$n_{abr}$	[–]	Ertragbare Betriebszyklen durch Abrasion
$n_{fatigue}$	[–]	Ertragbare Betriebszyklen durch Ermüdung
$n_{Ref}$	[–]	Anzahl Referenzbelastungsprofile
$m$	[kg]	Masse
$m$	[–]	Zählvariable
<b>m</b>	[–]	Tangentialebene
$p$	[N/m <sup>2</sup> ]	Flächenpressung
$p_0$	[N/m <sup>2</sup> ]	Gesamte Flächenpressung im Kontakt
$p_A$	[MPa]	Hydraulikdruck in Kammer A des Lastzylinders
$p_B$	[MPa]	Hydraulikdruck in Kammer B des Lastzylinders
$p_{Sys}$	[MPa]	Hydraulischer Systemdruck
$q$	[–]	Anwendungsfallabhängiger Exponent
$r, r'$	[m]	Laufbahnradius
<b>s</b>	[–]	Tangentialebene
$t$	[s]	Zeit
$v$	[m/s]	Lineare Geschwindigkeit
$v_G$	[m/s]	Gleitgeschwindigkeit
$v_{G,B}$	[m/s]	Gleitgeschwindigkeitsanteil durch Bohren
$v_{G,Makro}$	[m/s]	Gleitgeschwindigkeitsanteil durch Makroschlupf
$v_{G,Mikro}$	[m/s]	Gleitgeschwindigkeitsanteil durch Mikroschlupf
$v_R$	[m/s]	Relativgeschwindigkeit
$w$	[–]	Relative Häufigkeit
$x$	[m]	Linearer Weg / Lineare Position

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\mathbf{x}$	[–]	Erste Hauptkrümmungsebene
$x_{\text{Ampl}}$	[m]	Amplitude (Position)
$x_{\text{Bl}}$	[m]	Axialspiel
$(x_C, y_C, z_C)$	[m]	Kontaktpunktfestes Koordinatensystem
$x_G$	[m]	Gleitweg
$x_{\text{Last}}$	[m]	Lineare Position des Lastzylinders
$x_{\text{M,Spiel}}$	[m]	Lineare Position der Mutter (Axialspielmessung)
$\mathbf{y}$	[–]	Zweite Hauptkrümmungsebene
$z$	[m]	Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung bezogen auf die Koordinatentransformation nach BERTOLINO ET AL.
$\dot{z}$	[m/s]	
$\ddot{z}$	[m/s <sup>2</sup> ]	
$z_1$	[–]	Anzahl tragender Kugeln pro Umlauf
$z_2$	[–]	Anzahl nicht-tragender Kugeln pro Umlauf
$z_{\text{Bl}}$	[m]	Axialspiel
$z_{\text{eff}}$	[–]	Anzahl effektiver Kugeln
$z_{\text{ges}}$	[–]	Gesamtanzahl aller Kugeln
$A, A', A_{1,2,3}$	[m <sup>2</sup> ]	Profilflächen
$A_{\text{Hertz}}$	[m <sup>2</sup> ]	Fläche der HERTZ'schen Kontaktellipse
$A_V$	[m <sup>2</sup> ]	Verschleißfläche
$B$	[m]	Abstand
$B$	[–]	Koeffizient
$C$	[–]	Koeffizient
$C_a$	[N]	Dynamische Tragzahl
$C_I$	[–]	Korrelationskoeffizient
$C_{I,1}, C_{I,2}, C_{I,\text{RUL}}$	[–]	Schwellwerte
$C_I$	[–]	Übertragungsfunktion des Stromreglers
$C_x$	[–]	Übertragungsfunktion des Positionsreglers
$C_\omega$	[–]	Übertragungsfunktion des Drehzahlreglers
$D$	[m]	Durchmesser
$D$	[Ns/m]	Kontakttdämpfung
$D_3$	[m]	Innendurchmesser der Mutter

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$D_{pW}$	[m]	Kugelmittendurchmesser
$D_W, D'_W$	[m]	Kugeldurchmesser
$E$	[N/m <sup>2</sup> ]	E-Modul
$E_{red}$	[N/m <sup>2</sup> ]	Reduzierter E-Modul
$F$	[N]	Kraft
<b>F</b>	[–]	Kraftübergangsmatrix
$F_a$	[N]	Äußere, axiale Kraft
$F_C$	[N]	COULOMB'sche Reibkraft
$F_{EHD}$	[N]	Elastohydrodynamische Reibkraft
$F_H$	[N]	Haftreibungskraft
$F_N$	[N]	Normalkraft
$F_{N,\varphi}$	[N]	Normalkraft durch den Winkel $\varphi$
$F_{pr}$	[N]	Vorspannkraft
$F_R$	[N]	Reibkraft
$F_T$	[N]	Trägheitskraft
$G$	[–]	Werkstoffkennzahl
$H, H'$	[m]	Abstand
$I$	[A]	Strom
$\dot{I}$	[A/s]	Zeitliche Änderung des Stroms
$J_S$	[kgm <sup>2</sup> ]	Trägheitsmoment der Spindel
$K$	[m <sup>3</sup> /Nm]	K-Faktor
$K$	[N/m]	Kontaktsteifigkeit
<b>K</b>	[–]	Punkt auf der Kugel
$\tilde{K}$	[–]	Proportionalitätsfaktor
$(2 \cdot K) / (\pi \cdot \mu_{\text{Hertz}})$	[–]	HERTZ'scher Beiwert
$L, L'$	[m]	Abstand
$L$	[–]	Lebensdauer
$L$	[H]	Wicklungsinduktivität
$L_{10}$	[–]	Lebensdauer nach DIN ISO 3408-5
<b>M</b>	[–]	Punkt auf der Mutterlaufbahn
$M_A$	[Nm]	Antriebsdrehmoment
$M_G$	[Nm]	Drehmoment am Ausgang des Getriebes
$M_R$	[Nm]	Reibmoment

---

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$M_S$	[Nm]	Drehmoment der Spindel
$N_I$	[-]	Stromsensorrauschen
$N_x$	[-]	Positionssensorrauschen
$N_\omega$	[-]	Drehzahlsensorrauschen
$\mathbf{O}, \mathbf{O}'$	[-]	Mittelpunkt
$P_h$	[m/U]	Steigung
$R$	[ $\Omega$ ]	Wicklungswiderstand
$R_{\text{Hertz}}$	[m]	HERTZ'scher Ersatzradius
$R_{\text{pW}}$	[m]	Kugelmittlenkreisradius
$R_q$	[m]	Quadratischer Mittenrauwert
$R_{q,\text{eff}}$	[m]	Effektiver quadratischer Mittenrauwert
$R_x$	[m]	Ersatzradius in x-Richtung
$R_y$	[m]	Ersatzradius in y-Richtung
$\mathbf{S}$	[-]	Punkt auf der Spindellaufbahn
$T$	[s]	Zeitdauer
$\mathbf{T}$	[-]	Zeitvektor
$T_{\text{Fluid}}$	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	Temperatur der Hydraulikflüssigkeit
$T_{\text{KGT}}$	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	Temperatur der Mutteroberfläche
$T_{\text{Lager}}$	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	Temperatur der Oberfläche des Lagergehäuses
$T_{\text{Mot}}$	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	Motortemperatur
$T_U$	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	Umgebungstemperatur
$U$	[V]	Elektrische Spannung
$U$	[-]	Geschwindigkeitskennzahl
$U$	[m]	Umfang
$V_K, V'_K$	[m <sup>3</sup> ]	Kugelvolumen
$V_{\text{Lub}}$	[m <sup>3</sup> ]	Schmiervolumen
$V_V$	[m <sup>3</sup> ]	Verschleißvolumen
$W$	[-]	Lastkennzahl
$W_b$	[J]	Bewertete Verschleißarbeit
$W_{\text{Grenz}}$	[m]	Linearer Grenzverschleiß
$W_{\text{krit}}$	[J]	Kritische Verschleißarbeit
$W_1$	[m]	Linearer Verschleißweg
$W_{1/t}$	[m/s]	Lineare Verschleißgeschwindigkeit

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$W_p$	[Nm/s]	Verschleißleistung
$W_V$	[m <sup>3</sup> ]	Verschleißvolumen
$W_w$	[J]	Verschleißarbeit
$\mathbf{X}$	[–]	Positionsübergangsmatrix

### Griechische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\alpha, \alpha'$	[rad]	Kontaktwinkel
$\alpha, \dot{\omega}$	[rad/s <sup>2</sup> ]	Winkelbeschleunigung
$\alpha_p$	[m <sup>2</sup> /N]	Viskositäts-Druck-Koeffizient
$\alpha_w$	[rad]	Wälzwinkel
$\gamma$	[–]	Geometriefaktor
$\delta r_w, \delta r'_w$	[m]	Lokales, wirksames Übermaß
$\delta r_{w,m}$	[m]	Gemittelt, wirksames Übermaß
$\varepsilon$	[rad]	Wälz-Bohr-Winkel (Wälzverhältnis)
$\eta_0$	[Ns/m <sup>2</sup> ]	Dynamische Nennviskosität bei 40 °C
$\eta_G$	[–]	Getriebewirkungsgrad
$\theta$	[rad]	Winkelposition / Oszillationswinkel
$\theta_{crit}$	[rad]	Kritischer Winkel
$\lambda$	[–]	Lastverhältnis
$\mu$	[mm]	Mittelwert (Durchmesser Lagerkugeln)
$\mu_H$	[–]	Haftreibungsbeiwert
$\mu_{Hertz}$	[–]	HERTZ'scher Beiwert
$\nu$	[–]	Querkontraktionszahl
$\nu_{Hertz}$	[–]	HERTZ'scher Beiwert
$\rho$	[1/m]	Reziproker Krümmungsradius
$\rho_K$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Kugelwerkstoffes
$\sigma$	[–]	Rauschen
$\sigma$	[μm]	Standardabweichung (Durchmesser Lagerkugeln)
$\sigma_0$	[N/m <sup>2</sup> ]	Härte
$\cos \tau$	[–]	Hilfswert

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\varphi$	[rad]	Steigungswinkel
$\omega$	[rad/s]	Winkelgeschwindigkeit
$\omega_B$	[rad/s]	Bohrwinkelgeschwindigkeit
$\omega_{KK}$	[rad/s]	Winkelgeschwindigkeit der Kugelkette
$\omega_W$	[rad/s]	Wälzwinkelgeschwindigkeit
$\Delta$	[–]	Effektstärke
$\Delta D_W$	[m]	Kugelübermaß
$\Delta r$	[m]	Änderung des Laufbahnradius
$\Delta t$	[s]	Zeitabweichung / -differenz
$\Delta x$	[m]	Lineare Positionsänderung
$\Delta z$	[m]	Positionsdifferenz
$\Delta \dot{z}$	[m/s]	Geschwindigkeitsdifferenz
$\Delta \vartheta$	[rad]	Drehpositionsänderung
$\Lambda$	[–]	Spezifische Schmierfilmhöhe
$\Sigma \rho$	[1/m]	Summe der reziproken Krümmungsradien

## Indizes

Index	Bedeutung
0	Nenn / Start
1, 2	Lastseite (1: Druck, 2: Zug)
2PK, 4PK	Kontaktart (Zwei-Punktkontakt, Vier-Punktkontakt)
a, b	Körper a und b
c	Kontakt
cmd	kommandiert
const	konstant
C	COULOMB
C	Kontakt
CL	Mittellinie
deg	degradiert

---

<b>Index</b>	<b>Bedeutung</b>
det	detailliert
exp	experimentell
ext	extern
End	Endpunkt
ges	Gesamt
Grenz	Grenz
H	Haft-(reibung)
i	Umlauf
<i>i</i>	Zählvariable
int	intern
<i>j</i>	Betriebszyklus
<i>k</i>	Zählvariable
K	Kugel
KK	Kontakt Kugel-Kugel
KM	Kontakt Kugel-Mutterlaufbahn
KS	Kontakt Kugel-Spindellaufbahn
KU	Kontakt Kugel-Umlenkung
m	Iterationsschritt
<i>m</i>	Zählvariable
max	maximal
mod	Modell
mon	Monitoring-
M	Mitte
M	Mutter
Mot	Motor
nom	nominell
O	Ursprung
S	Spindel
Start	Startpunkt
U	Umlenkung
vis	viskos
x	Hauptkrümmungsebene x
y	Hauptkrümmungsebene y

---

---

**Abkürzungen**

<b>Abk.</b>	<b>Bedeutung</b>
2PK, 3PK, 4PK	Zwei-/ Drei-/ Vier-Punktkontakt
CON / MON	Control / Monitoring
DoE	Design of Experiments
EHA	Elektro-hydrostatischer Aktuator
EHD	Elastohydrodynamisch
EHSA	Elektro-hydraulischer Servoaktuator
EMA	Elektro-mechanischer Aktuator
FCC	Flight Control Computer
FE	Finite-Elemente
FFT	Fast-Fourier Transformation
HD	Hydrodynamisch
HPP	Hydraulic Power Package
HVDC	High Voltage Direct Current
K	Kugel
KGT	Kugelgewindetrieb
KK	Kontakt Kugel-Kugel
KM	Kontakt Kugel-Mutterlaufbahn
KS	Kontakt Kugel-Spindellaufbahn
KU	Kontakt Kugel-Umlenkung
M	Mutter
MEA	More Electric Aircraft
MSV	Mode Selector Valve
PFT	Pre-Flight-Test
PHM	Predictive Health Monitoring
PMSM	Permanentmagneterregter Synchronmotor
REM	Rasterelektronenmikroskop
RGT	Rollengewindetrieb
RUL	Remaining Useful Life
S	Spindel
SV	Servoventil
VBZ	Von-Bis-Zählung

---