

**Forschungsberichte des Fachgebietes
Elektronische Fahrzeug- und Mobilitätssysteme**

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Karl-Ludwig Krieger

Andreas Beering

Signalverarbeitungen von
Körperschallsignalen an Getrieben
zur Detektion von Verzahnungsschäden

Signalverarbeitungen von Körperschallsignalen an Getrieben zur Detektion von Verzahnungsschäden

*Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) im Fach Elektrotechnik
und Informationstechnik*

ANDREAS BEERING

Referent: Prof. Dr.-Ing. Karl-Ludwig Krieger

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Stefan Gast

Eingereicht am: 14.12.2022

Tag des Promotionskolloquiums: 01.06.2023



Forschungsberichte aus dem Fachgebiet Elektronische
Fahrzeug- und Mobilitätssysteme der Universität Bremen

Andreas Beering

**Signalverarbeitungen von Körperschallsignalen
an Getrieben zur Detektion von Verzahnungsschäden**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Düren 2023

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.: Bremen, Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9170-0

ISSN 2625-4557

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 • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

In der modernen Zustandsüberwachung werden bereits unzählige Prozesse durch eine Vielzahl von Sensoren überwacht und optimiert. Dennoch kommt es in vielen Bereichen aufgrund von komplexeren Betriebszuständen oder störenden Umgebungsgeräuschen zu vermeidbaren Verschleißerscheinungen und Schäden. Zu diesen zählen unter anderem Getriebe mobile Arbeitsmaschinen. Da bei diesen die Zustandsüberwachung noch in den Anfängen steht leitet sich hieraus das Forschungspotenzial dieser Dissertation ab. Kernziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Signalverarbeitungskette für die Analyse von Körperschallsignalen zur Detektion von Verzahnungsschäden sehr niederdrehender Getriebe in störbehafteten Umgebungen.

Als Grundlage der Arbeit wird zunächst die Schallausbreitung in Getrieben mit Fokus auf Zahneingriffen näher beschrieben. In diesem Kontext wird näher auf Körperschall im Allgemeinen, Körperschallquellen sowie dessen Ausbreitung und charakteristisches Verhalten in Getrieben eingegangen.

In Rahmen dieser Dissertation werden zudem neuartige körperschallbasierte Forschungsergebnisse präsentiert. Zu diesen zählt die Schätzung von Drehzahlen niederdrehender Getriebe über künstliche neuronale Netze. Übliche Signalverarbeitungsansätze zur Bestimmung der Drehzahlzahlen benötigen häufig Vorwissen über die Getriebegeometrie. Künstliche neuronale Netze hingegen können auf Vorwissen verzichten und benötigen lediglich Datensätze und ein Training.

Weiterhin wird untersucht, ab welcher Schadensgröße an Zahnflanken Veränderungen im Schwingungssignal erkennbar sind und wie sich diese äußern. Dies stellt weitestgehend einen innovativen Aspekt dar, da in der Literatur in der Regel nur sehr grobe Schäden algorithmisch erkannt werden oder innerhalb von Restlaufzeitabschätzungen nur Trendänderungen untersucht werden ohne die genaue Schadensgröße zu quantifizieren. Innerhalb dieser Untersuchung wird weiterhin eine neuartige Methodik zur Ableitung geeigneter digitaler Filtergrenzen vorgestellt. Hierbei werden Differenzspektren bekannter Datensätze über geglättete Frequenzspektren verwendet, welche über lineare Prädiktionskoeffizienten bestimmt werden.

Zuletzt wird ein neuartiger Ansatz zur Detektion von Zahnschäden präsentiert. Hier fließen die zuvor gewonnen Erkenntnisse mit ein. Über die bestimmten Filtergrenzen werden die Schädigungen im Zeitbereich hervorgehoben. Weiterhin wird die Drehzahlsschätzung über künstliche neuronale Netze integriert. Validiert wird der entwickelte Ansatz zunächst an sehr massiven Schädigungen. Darauffolgend wird die Funktionalität an den kleinsten erkennbaren Schädigungen gezeigt. Darüber hinaus wird sowohl die entwickelte Signalverarbeitung zur Detektion von Schädigungen als auch die Methodik zur Auswahl geeigneter Filtergrenzen an Schädigungen an zwei unterschiedlichen Zahnrädern validiert.

Abstract

In modern condition monitoring, numerous processes are already monitored and optimized by a multitude of sensors. Nevertheless, avoidable wear and damage occurs in many areas. Among other things, this is related to more complex operating conditions or disturbing environmental noise, which complicates the analysis. These avoidable damages include gearboxes for mobile machinery. Since condition monitoring for these is still in its infancy, the research potential of this dissertation is derived from this. The key objective of the thesis is the development of a digital signal processing chain for the analysis of structure-borne sound signals for the detection of gear damage of very low-speed gearboxes in disturbing environments.

As a basis for the work, structure-borne sound propagation in gearboxes is first described in more detail with a focus on gear meshing. In this context, structure-borne sound in general, sources of structure-borne sound as well as its propagation and characteristic behavior in gearboxes are discussed in more detail.

In the context of this work, novel structure-borne sound based research results are presented as well. These include the estimation of rotational speeds of low-speed gears via artificial neural networks. Common signal processing approaches for determining gearbox rotational speeds often require prior knowledge of the gearbox geometry. Artificial neural networks, however, do not require any prior knowledge and only need data sets and training.

Furthermore, it is investigated from which damage size on tooth flanks changes in the vibration signal are recognizable and how these are expressed. This is largely an innovative aspect, since in the literature usually only very severe damage is detected algorithmically or only trend changes are investigated within residual life estimations without quantifying the exact damage size. Within this study, a novel methodology for the estimation of suitable digital filter limits is presented. Here, difference spectra of known data sets are used over smoothed frequency spectra, which are determined via linear prediction coefficients.

Finally, a novel approach for the detection of tooth damage is presented. Here, the previously gained knowledge is applied. Damage in the time domain is highlighted via the determined filter limits. Furthermore, rotational speed estimation is integrated via artificial neural networks to substitute the need for a measured rotational speed. The developed approach is first validated on very massive damages. Subsequently, the functionality is shown on the smallest detectable damages. In addition, both the signal processing developed for detecting damage and the methodology for selecting suitable filter limits are validated on damage to two different gears.

Publikationen

- Y. Nevarez, A. Beering, A. Najafi, A. Najafi, W. Yu, Y. Chen, K.-L. Krieger und A. Garcia-Ortiz, „CNN Sensor Analytics With Hybrid-Float6 Quantization on Low-Power Embedded FPGAs“, *IEEE Access*, Jg. 11, S. 4852–4868, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3235866.
- F. Cordes, A. Beering und K.-L. Krieger, „Auswahl von Ultraschallpulsformen zur aktiven Prozessüberwachung von Spritzgussverfahren“, S. 1610–1613, 2023.
- A. Beering und K.-L. Krieger, „Estimation of Rotational Speeds Based on Gearbox Vibrations via Artificial Neural Networks“, *IEEE Sensors Journal*, Jg. 22, Nr. 23, S. 22 963–22 971, 2022. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3213917.
- J. Döring, J. Scholtyssek, A. Beering und K.-L. Krieger, „Optimization of Road Surface Wetness Classification Using Feature Selection Algorithms and Sensor Fusion“, *IEEE Access*, Jg. 10, S. 106 248–106 257, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3211648.
- A. Beering und K.-L. Krieger, „Investigations into the Recognisability of Gear Damage Sizes in Vibration Signals and Calculation of Appropriate Digital Filter Limits“, *Applied Sciences*, Jg. 12, Nr. 9, 2022, issn: 2076-3417. DOI: 10.3390/app12094216.
- J. Döring, A. Beering, J. Scholtyssek und K.-L. Krieger, „Road Surface Wetness Quantification Using a Capacitive Sensor System“, *IEEE Access*, Jg. 9, S. 145 498–145 512, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3121099.
- K.-L. Krieger, A. Beering und L. Tharmakularajah, *Echtzeitfähiges, elektronisches Sensorsystem zur Zustandsüberwachung von landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen (VIPER) Abschlussbericht: Teilvorhabenbezeichnung: „Al-*

- gorithmen, Klassifikatoren und Cloud-Diagnosesystem*“, 2021. DOI: 10.2314/KXP:1776306562.
- A. Beering und K.-L. Krieger, „Variable Speed Gear Damage Detection Based on Speed Dependent Masking and Correlation Coefficients“, *e-Journal of Nondestructive Testing (NDT)*, Feb. 2021.
- A. Beering und K.-L. Krieger, „Development of a sensor- and cloud-based condition monitoring system for the detection of gear damage“, in *ZfP heute Sonderband*, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., 2020, S. 27–30.
- A. Beering, A. Zitnikov und K.-L. Krieger, „Fracture Detection of Bearings in Long-Term Measurements Using a Feature-Based CUSUM Algorithm“, in *Sensor and Measurement Science International 2020*, 2020, S. 323–324.
- A. Beering, J. Döring und K.-L. Krieger, „A Study of Feature Selection Algorithms for the Detection of Gear Damage in Vibration Data“, in *46. Deutsche Jahrestagung für Akustik*, 2020, S. 555–559.
- A. Beering, J. Döring und K.-L. Krieger, „Feature-based analysis of reproducible bearing damage based on a neural network“, in *Sensoren und Messsysteme, 20. GMA/ITG-Fachtagung*, 2019, S. 451–456.
- A. Beering und K.-L. Krieger, „Analyse und Lokalisation von Zahnbrüchen in mehrstufigen Getrieben mit Hilfe von vibroakustischen Signalen“, in *45. Deutsche Jahrestagung für Akustik*, 2019.

Inhaltsverzeichnis

I. Einleitung und Grundlagen	1
1. Einleitung	3
1.1. Motivation der Dissertation	3
1.2. Bezug zum Forschungsprojekt VIPER	5
1.3. Wissenschaftliche Zielsetzung	7
1.4. Gliederung der Dissertation	9
2. Schallausbreitung in Getrieben	13
2.1. Körperschall	15
2.1.1. Longitudinal- und Quasilongitudinalwellen	16
2.1.2. Transversalwellen	21
2.1.3. BiegeWellen	24
2.1.4. Lamb- und Rayleigh-Wellen	31
2.1.5. Weitere Wellentypen	33
2.2. Körperschallquellen in Getrieben	34
2.2.1. Wechselnde Verzahnungssteifigkeit	35
2.2.2. Vergrößerung der Zahnradüberdeckung	36
2.2.3. Abweichung der Verzahnungsgeometrie	36
2.2.4. Weitere Körperschallquellen	38
2.3. Körperschallübertragung in Getrieben	38
2.4. Körperschallwandler	39
2.4.1. Methoden zur Körperschallwandlung	41
2.4.2. Piezoelektrische Körperschallwandler	42
2.5. Körperschallsignale von Getriebenverzahnungen	45
2.6. Fazit	51

II. Voruntersuchungen zu Körperschall, Getriebelastungen und -drehzahlen	53
3. Nachbildung realitätsnaher Belastungsprofile am Prüfstand	55
3.1. Langzeit Feldstudie im Ernteeinsatz	56
3.1.1. Aufbau des Ladewagens	57
3.1.2. Datenerfassung im Ladewagen	58
3.2. Ableitung eines realitätsnahen Belastungsprofils	59
3.3. Aufbau des Getriebeprüfstandes und des Getriebes	66
3.4. Fazit	69
4. Drehzahlschätzung über künstliche neuronale Netze	71
4.1. Verwandte Arbeiten zur Drehzahlschätzung über neuronale Netze	74
4.2. Grundlagen zu neuronalen Netzen	75
4.2.1. Mehrschichtiges Perzeptron	78
4.2.2. Long Short-Term Memory	80
4.2.3. Aufbau und Training von Regressionsnetzen	84
4.3. Datenbasis und Aufbau der neuronalen Netze	86
4.4. Training und Test der Netze	90
4.4.1. Einfluss der Abtastrate und des Eingabedatentyps	91
4.4.2. Einfluss der Länge der Eingabedaten	94
4.4.3. Optimierung der Neuronenanzahl	96
4.5. Fazit	99
III. Untersuchungen zu Verzahnungsschäden in Getrieben	101
5. Untersuchung zur Erkennbarkeit von Verzahnungsschäden	103
5.1. Verwandte Arbeiten zu Untersuchungen von Zahnflanken	105
5.2. Experimentelle Untersuchungen	106
5.3. Analyse der Datensätze	110
5.3.1. Segmentierung der Schwingungssignale	110
5.3.2. Untersuchungen im Zeitbereich	116
5.3.3. Untersuchungen im Frequenzbereich	120
5.4. Ableitung digitaler Filter durch LP-Spektren	123
5.4.1. Berechnung und Orderschätzung der LP-Spektren	124
5.4.2. Ableitung von Filtergrenzen durch Differenzspektren	126
5.5. Fazit	129
6. Korrelationsbasierte Detektion von Schäden an Zahnflanken	131
6.1. Verwandte Arbeiten zur Schadensdetektion	133
6.2. Theoretische Grundlagen des Ansatzes	134

6.3. Experimentelle Untersuchungen	140
6.3.1. Detektion von Zahnbrüchen	140
6.3.2. Detektion von Zahnflankenschäden	143
6.4. Algorithmuserweiterung durch die neuronale Drehzahlschätzung	149
6.5. Fazit	153
IV. Resümee	157
7. Zusammenfassung	159
Literaturverzeichnis	163
A. Notation	177
B. Abbildungen und Tabellen	179

Spezifische mathematische Symbole

\sim	Proportionalität
$ \cdot $	Betragsfunktion
$\arg \min_x f(x)$	Operator zur Bestimmung des Werts x , an dem $f(x)$ minimal wird
$f^+(x)$	Positivteil eines Vektors
$h()$	Aktivierungsfunktion
$h_{\text{leaky_ReLU}}()$	Leaky ReLU-Aktivierungsfunktion
$h_{\text{lin}}()$	Lineare Aktivierungsfunktion
$h_{\text{ReLU}}()$	ReLU-Aktivierungsfunktion
$h_{\text{sig}}()$	Sigmoid-Aktivierungsfunktion
$h_{\text{tanh}}()$	Hyperbolische Tangens-Aktivierungsfunktion
\odot	Hadamard-Produkt
\lim	Grenzwertfunktion
$\ln()$	Logarithmus Naturalis
$\tan()$	Tangens-Funktion
$\log_{10}()$	Logarithmus zur Basis 10
$\max()$	Maximalwert
$\min()$	Minimalwert
mod	Division mit Rest
\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen: $\{0, 1, 2, 3, \dots\}$
\mathbb{N}_0	Menge der natürlichen Zahlen größer null: $\{1, 2, 3, \dots\}$
∇	Nabla-Operator
$\frac{\partial x}{\partial z}$	Partielle Ableitung von x nach z
$\text{rect}()$	Rechteckfunktion

Spezifische Symbole

A, A_i	Flächenelemente
$A_{z_i, S_j}, A_{z_i, S_j, \text{NN}}$	Überlappungsflächen diskreter Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen eines Schadens S_j am Zahnrad z_i

A_{z_i, S_i, S_j}	Überlappungsflächen diskreter Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der beiden Schadensstufen S_i und S_j am Zahnrad z_i
$\Delta A_{z_i, S_j}$	Differenzen von Überlappungsflächen
a_B	Vereinfachungsfaktor zur Berechnung von Biegewellengeschwindigkeiten
\mathbf{a}_t	Ausgangstor einer LSTM-Zelle zum Zeitpunkt t
a_S	Schwingbeschleunigung
AIC_p	Akaike Informations Kriterium für eine Ordnung p
α_m	Prädiktionskoeffizienten der lineare Prädiktion
b_B	Plattenbreite
$b, \mathbf{b}, \mathbf{B}$	Skalar-, Vektor- und Matrixgröße der Biaswerte in einem neuronalen Netzwerk
B_P	Breite eines Piezoelements
ΔB_P	Breitenänderung eines Piezoelements
β	Gewichtungsfaktor einer leaky ReLI Aktivierungsfunktion
$c_{B,B}$	Wellengeschwindigkeit einer Biegewelle in einem Balken
$c_{B,G}$	Gruppengeschwindigkeit einer Biegewelle
$c_{B,P}$	Wellengeschwindigkeit einer Biegewelle in einer Platte
$c_{La,A0}, c_{La,A1}$	Wellengeschwindigkeit antisymmetrischer Lamb-Wellen-Moden
$c_{La,S0}, c_{La,S1}$	Wellengeschwindigkeit symmetrischer Lamb-Wellen-Moden
$c_{L,P}$	Wellengeschwindigkeit einer quasilongitudinalen Welle in einer Platte
$c_{L,S}$	Wellengeschwindigkeit einer quasilongitudinalen Welle in einem Stab
\mathbf{c}_t	Zellzustand einer LSTM-Zelle zum Zeitpunkt t
\mathbf{C}_P	Matrix der piezoelektrischen Dehnungskonstanten
c_R	Wellengeschwindigkeit einer Rayleigh-Welle (Approximation)
$c_{\bar{R}}$	Wellengeschwindigkeit einer Rayleigh-Welle
c_{SE}	Zahnpaarsteifigkeit
c_{SG}	Gesamt-Zahnfedersteifigkeit
\bar{c}_{SG}	Mittlere Gesamt-Zahnfedersteifigkeit

c_T	Wellengeschwindigkeit einer Transversalwelle
D	Biegesteifigkeit
d_t	Teilkreisdurchmesser eines Zahnrads
\mathbf{D}	Vektor der elektrische Flussdichte
$d_{V,1}, d_{V,1}$	Zahnverformungen im Zahneingriff
$\frac{\Delta d}{d}$	Querdehnung eines Festkörpers
$\frac{\Delta l}{l}$	Längsdehnung eines Festkörpers
e_{LP}	Akkumulierter quadratischer Fehler
E	Elastizitätsmodul
$\epsilon_e^{\sigma_P}$	Dielektrizitätskonstante für eine konstante mechanische Spannung σ_P
\mathbf{E}	Vektor der elektrischen Feldstärke
$\epsilon_{LP,m}$	Fehlerterm der linearen Prädiktion
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yx}$	Mechanische Dehnung
$\epsilon_{MSE,p}$	Mittlerer quadratischer Fehler
$\boldsymbol{\epsilon}_P$	Vektor der resultierenden mechanischen Dehnung
η_L, η_T	Vereinfachungen zur Berechnung von Lamb-Wellen
$f_1(n_P), f_S(n_P)$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion einer Messreihe eines intakten (I) und eines geschädigten Getriebes (S)
\mathbf{f}_t	Vergesstor einer LSTM-Zelle zum Zeitpunkt t
f_P	Teilungs-Einzelabweichung eines Zahnrads
F_S	Abtastrate
$\mathcal{F}_{x,m,k}^\gamma$	Diskrete Kurzzeit-Fourier-Transformierte
$\mathcal{F}_{x,\tau,f}^\gamma$	Kontinuierliche Kurzzeit-Fourier-Transformierte
f_{z_3}	Theoretische Zahneingriffsfrequenz des Zahnrads z_3
G	Schubmodul
\mathbf{g}_t	Zellkandidat einer LSTM-Zelle zum Zeitpunkt t
γ_{xy}	Gleitung
\mathbf{H}_z	Vektorpotential
h_P	Plattenhöhe
I	Flächenträgheitsmoment
i_{12}	Gesamtübersetzung des Getriebes
i_1, i_2	Übersetzungsverhältnisse der ersten und zweiten Getriebestufen

i_t	Eingangstor einer LSTM-Zelle zum Zeitpunkt t
k_{gleit,z_i}	Anzahl der Elemente zur Betrachtung des gleitenden Mittelwerts für ein Zahnrad z_i
k_R	Verhältnis der quasilongitudinalen zur transversalen Wellengeschwindigkeit
L_P	Höhe eines Piezoelements
ΔL_P	Höhenänderung eines Piezoelements
λ_R	Rayleigh-Wellenlänge
λ_T	Transversal-Wellenlänge
m	Masse
M_x, M_y, M_{xy}, M_{yx}	Biegemomente
μ	Arithmetischer Mittelwert
$\mu_{\text{MBA}}, \mu_{\text{MEA}}, \mu_{\text{MRA}}$	Mittelwerte der Drehmomente zu Anfang der Belade-, Entlade- und Restentladephase
$\mu_{\text{MBE}}, \mu_{\text{MEE}}, \mu_{\text{MRE}}$	Mittelwerte der Drehmomente zu Ende der Belade-, Entlade- und Restentladephase
$\mu_{\text{RB}}, \mu_{\text{RE}}, \mu_{\text{RR}}$	Mittelwerte der Drehzahlen zu Ende der Belade-, Entlade- und Restentladephase
$\mu_{\text{TB}}, \mu_{\text{TE}}, \mu_{\text{TR}}$	Mittelwerte der Getriebezeit in der Belade-, Entlade- und Restentladephase
$n_{\text{I,Zeit}}, n_{\text{I,Freq}}, n_{\text{I,Zeit,Freq}}$	Eingangsgrößen neuronale Netzwerke
n_{opt,z_i}	Optimale Anzahl ganzzahliger Zahnradperioden für die algorithmische Detektion für ein Zahnrad z_i
n_P	Ganzzahlige Vielfache der Zahnradperioden
N_P	Anzahl der Beobachtung zur Berechnung des Pearson Korrelationskoeffizienten
$n_{S_{z_1}}, n_{S_{z_3}}$	Anzahl der betrachteten geschädigten Zeitfenster für Zahnrad z_1 und z_3
N_x, N_y, N_{xy}, N_{yx}	Normalkräfte
$N_{Z,E}, N_{Z,E} + 1$	Getriebezähne im Zahneingriff
ν	Querkontraktions- oder auch Poisson-Zahl
$n_z, n_{z_1}, n_{z_2}, n_{z_3}, n_{z_4}$	Anzahl Zähne des Zahnrad allgemein, z_1, z_2, z_3, z_4
$o, \mathbf{o}, \mathbf{O}$	Skalar-, Vektor- und Matrixgröße der Netzwerkausgänge in einem neuronalen Netzwerk

$\omega[n], \omega_n$	Diskretes Drehzahlsignal
$\omega(t), \omega_t$	Kontinuierliches Drehzahlsignal
p_t	Teilung eines Zahnrads
p_{z_1}, p_{z_3}	Ordnung der Prädiktionskoeffizienten der Zahnräder z_1 und z_3
Φ	Skalares Potential
φ	Zeitabhängige Umdrehungsphase
q_+, q_-	Positive und negative Ladung eines piezoelektrischen Elements
r_{\max}	Maximaler Korrelationswert einer KKF
r_P	Pearson Korrelationskoeffizient
r_{Schnitt}	Schnittpunkt zweier Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen von Pearson Korrelationskoeffizienten
ρ	Dichte
$R_{x_1 x_1, m}$	Diskrete Autokorrelation
$R_{x_1 x_1, \tau}$	Kontinuierliche Autokorrelation
$R_{x_1 x_2, m}$	Disrekte Kreuzkorrelation
$R_{x_1 x_2, \text{coeff}, m}$	Disrekte normalisierte Kreuzkorrelation
$R_{x_1 x_2, \tau}$	Kontinuierliche Kreuzkorrelation
S_0	Zähne ohne eingebrachte Schadensstufen
\mathbf{S}^E	Matrix der Nachgiebigkeitskoeffizienten eines piezoelektrischen Materials bei konstanter elektrischer Feldstärke \mathbf{E}
S_1, S_2, S_3, S_4	Zähne mit eingebrachten Schadensstufen
$\mathcal{S}_{x, m, k}$	Spektrogramm aus diskreter STFT
$\mathcal{S}_{x, m, k, \text{dB}}$	Spektrogramm aus diskreter STFT in dB
$\bar{s}_{x \Delta f, m, \text{dB}}$	Mittlere Leistung eines Spektrogramms über einen definierten Frequenzbereich in dB
S_x, S_y, S_{xy}, S_{yx}	Scherkräfte
σ	Standardabweichung
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}, \sigma_{yx}$	Mechanische Spannung
$\boldsymbol{\sigma}_P$	Vektor der mechanischen Spannung
$\sigma_{\text{MBA}}, \sigma_{\text{MEA}}, \sigma_{\text{MRA}}$	Standardabweichungen der Drehmomente zu Anfang der Belade-, Entlade- und Restentladephase
$\sigma_{\text{MBE}}, \sigma_{\text{MEE}}, \sigma_{\text{MRE}}$	Standardabweichungen der Drehmomente zu Ende der Belade-, Entlade- und Restentladephase

$\sigma_{RB}, \sigma_{RE}, \sigma_{RR}$	Standardabweichungen der Drehzahlen zu Ende der Belade-, Entlade- und Restentladephase
$\sigma_{TB}, \sigma_{TE}, \sigma_{TR}$	Standardabweichungen der Getriebezeit in der Belade-, Entlade- und Restentladephase
t	Zeitpunkt
$t_{P,z}$	Anteilige Signaldauer eines Zahns innerhalb einer Zahnradumdrehung
$t_{\varphi,k}$	Zeitpunkte ganzzahliger Zahnradumdrehungen
$t_i(S_i)$	Zeitpunkte der eingebrachten Schadensstufen im Schwingungssignal
t_{vib}	Länge eines Schwingungssignals
$\bar{T}_{z_1}, \bar{T}_{z_3}$	Gemittelte gemessene Periodendauer zwischen schadhafte Zahneingriffen der Zahnräder z_1 und z_3
$\bar{T}_{z_1,\text{theo}}, \bar{T}_{z_3,\text{theo}}$	Gemittelte theoretische Periodendauer zwischen schadhafte Zahneingriffen der Zahnräder z_1 und z_3
T_{z_i}	Theoretische Periodendauer eines Zahneingriffs eines Zahnrads z_i
τ_{xy}	Schubspannung
U_P	Elektrische Spannung über ein piezoelektrisches Element
u_x, u_y, u_z	Axiale Verschiebungen
$v, \mathbf{v}, \mathbf{V}$	Skalar-, Vektor- und Matrixgröße der Netzwerkeingänge in einem neuronalen Netzwerk
v_S	Schwinggeschwindigkeit
V_x, V_y	Vertikalkräfte
$w, \mathbf{w}, \mathbf{W}$	Skalar-, Vektor- und Matrixgröße der Gewichtungsfaktoren in einem neuronalen Netzwerk
w_S	Schwingweg
ω_W	Kreisfrequenz einer Körperschallwelle
$x[n], x_n$	Diskretes Schwingungssignal
$\tilde{x}[t]$	Diskretes Schwingungssignal nach digitaler Filterung
$\hat{x}[k]$	Lineare Prädiktion eines Signals $x[k - m]$
X_k	Diskrete Fourier-Transformierte eines Signals x_n
X_k^γ	Diskrete Fourier-Transformierte eines gefenstereten Signals $x[t]\gamma[n]$

$X_{S_i,k}^\gamma$	Diskrete Fourier-Transformierte eines Schadensfensters S_i
$\bar{X}_{S_i,k}$	Gemittelteltes diskrete Fourier-Transformierte eines Schadensfensters S_i
$x(t), x_t$	Kontinuierliches Schwingungssignal
$X_{LP,S_i,k}$	Frequenzspektrum bestimmt über lineare Prädiktion
$\tilde{X}_{\Delta,S_i,k}$	Differenzspektrum zweier Frequenzspektren bestimmt über lineare Prädiktion
$\tilde{X}_{\text{Überlappung}}$	Überlappungsbereich zweier Differenzspektren
$\Xi[t]$	Rechteckmaske
$y[t]$	Hüllkurve eines Schwingungssignals
z_1, z_2, z_3, z_4	Getriebezahnräder
z_1	Längeneinheit zur Herleitung von Wellengleichungen
ζ	Wellenzahl

Abkürzungen

ADC	Analog-to-digital converter
AIC	Akaike Information Criterion
AKF	Autokorrelationsfunktion
CNN	Convolutional neuronal network
DFT	Diskrete Fouriertransformation
DIN	Deutsches Institut für Normung
EtherCAT	Ethernet for Control Automation Technology
FC	Fully connected layer
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	Fast Fourier transform
FIR	Finite impulse response filter
IEPE	Integrated Electronics Piezo-Electric
KKF	Kreuzkorrelationsfunktion
LP	Linear prediction

LSTM	Long short-term memory
MLP	Multi layer perceptron
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MSE	Mean squared error
PDF	Probability density function
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat
RAM	Random access memory
ReLU	Rectifier linear unit
RMSE	Root mean squared error
STFT	Short time Fourier transform