

Konzept und Demonstration eines simulationsbasierten Ansatzes für die akustische Resonanzanalyse

Dissertation

zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

von

Matthias David Heinrich

Saarbrücken

2024

Tag des Kolloquiums: 4. April 2025

Dekan: Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Ute Rabe
Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre

Vorsitz: Prof. Dr. mont. Christian Motz

Akad. Mitarbeiter: Dr.-Ing. Christian Bur

Vorwort & Danksagung

Im Zeitraum der Erstellung dieser Dissertation war ich als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP (Fraunhofer IZFP) und zeitweise an der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (htw saar) tätig. Diese Arbeit geht zu Teilen aus dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt MERKUR hervor (Förderkennzeichen: 03FH029PX4 & 13FH029PX4, Zuwendungsempfänger: htw saar). Inhalte der vorliegenden Arbeit wurden in geringerem Umfang bereits im Abschlussbericht des Projekts MERKUR veröffentlicht. Einige Inhalte wurden darüber hinaus auf Fachtagungen in Form von mündlichen Vorträgen und Posterbeiträgen präsentiert. Weitere Veröffentlichungen, die bedeutsame Überschneidungen mit diesem Dokument aufweisen, sind im Text referenziert.

Zuallererst möchte ich mich herzlich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Ute Rabe für die umfassende sowie hervorragende Betreuung dieser Doktorarbeit bedanken. Die zahlreichen fachlichen Diskussionen, ihre stetige Hilfsbereitschaft und nicht zuletzt die Ermutigungen zur Fertigstellung der Arbeit haben wesentlich zum erfolgreichen Abschluss beigetragen. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre möchte ich mich zum einen für die Übernahme der Zweitbegutachtung und zum anderen für die unmittelbare Unterstützung dieser Arbeit durch seinen Lehrstuhl bedanken (u. a. geometrische Vermessung von Untersuchungsobjekten). Zudem gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Diebels, der die wissenschaftliche Begleitung dieser Arbeit übernommen hat.

Ein großer Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Valeske, der mich bereits seit vielen Jahren fördert. In seinen Funktionen als Abteilungs- und mittlerweile als Institutsleiter des Fraunhofer IZFP hat er stets für die erforderlichen Rahmenbedingungen gesorgt, die für das Gelingen der Arbeit essentiell waren. Frau Prof. Dr. rer. nat. Barbara Grabowski möchte ich für die umfangreiche fachliche Beratung danken und insbesondere auch dafür, dass sie als Professorin der htw saar für Mathematik und Statistik vor langer Zeit einmal mein Interesse an statistischen Methoden weckte, die eine zentrale Bedeutung für die vorliegende Arbeit aufweisen. Frau Dr. Sigrun Hirsekorn danke ich für ihre herzliche Unterstützung, vor allem auch in der frühen Phase der Themenfindung, in der sie mir bei den vielfältigsten Herausforderungen immer hilfsbereit zur Seite stand.

Bei den Herren Thomas Schwender, Dr. Thomas Waschkies und Steffen Bessert bedanke ich mich dafür, dass sie mir als Vorgesetzte zu jeder Zeit den nötigen Freiraum geboten haben und ein offenes Ohr für Fragen hatten. Ebenso geht mein Dank an meine aktuellen direkten Vorgesetzten, Frau Dr. Ines Veile und Herrn Dr. Florian Römer, die mich immer in jeglicher Hinsicht unterstützt haben und mir auch stets bei fachlichen Fragestellungen weiterhalfen. Den Herren Giuseppe Di Gregorio, Michael Finckbohner und Ewald Toma

danke ich für die technische Unterstützung im Zusammenhang mit dem Einbohren von Testfehlern in die untersuchten Proben bzw. für die Anfertigung von Röntgenaufnahmen. Herrn Stefan Wilhelm danke ich für die sehr umfassende Unterstützung im Rahmen der geometrischen Vermessung der untersuchten Teile. Bei Herrn Sascha Schneider möchte ich mich für die mechanische Fertigung einiger Proben bedanken, die für nicht gezeigte, jedoch wichtige Referenzanalysen genutzt wurden. Außerdem möchte ich mich bei Jonas Edelmann, Eugen Seide und Marius Gipperich bedanken, die als studentische Hilfskräfte diese Arbeit zeitweise unterstützt haben. Mein Dank geht zudem an die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Firma RTE Akustik + Prüftechnik GmbH, mit denen ich schon seit Jahren in einem wertvollen fachlichen Austausch stehe.

Bei Herrn Robert Lermen möchte ich mich für das Korrekturlesen dieses Dokuments hinsichtlich Rechtschreibung sowie Grammatik bedanken. Herrn Dietmar Weber und Herrn Simon Kraus danke ich sowohl für den äußerst wertvollen fachlichen Austausch als auch für die Überprüfung der Formeln und Gleichungen der Arbeit.

Weiterhin möchte ich mich bei sämtlichen hier nicht namentlich erwähnten Kolleginnen und Kollegen des Fraunhofer IZFP und der htw saar sowie bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Universität des Saarlandes bedanken, mit denen ich in den vergangenen Jahren in Kontakt stand und die mir stets sehr freundlich und hilfsbereit begegnet sind. Denn oftmals sind es doch die kleinen, vermeintlich alltäglichen Dinge, die zwar schnell in Vergessenheit geraten, die aber in Summe von großer Bedeutung sind.

Zum Schluss geht mein persönlicher Dank an meine Mutter, meine Familie sowie meine Freunde, die mir auf unterschiedlichste Weise großes Verständnis entgegengebracht und Rückhalt sowie Unterstützung geboten haben. Mein ganz besonderer Dank geht an meine Frau Anna und meine kleine Tochter Emma, die mich zu jeder Zeit mit bemerkenswerter Hingabe emotional begleitet und mir tagtäglich den Rücken freigehalten haben. Dies hat entscheidend zum Abschluss der Arbeit beigetragen. Ich liebe euch!

Matthias Heinrich

Lebach/Saarbrücken, September 2024

Kurzfassung & Abstract

Kurzfassung (deutsch)

Die *akustische Resonanzanalyse (ART)* ist ein objektives zerstörungsfreies Prüfverfahren, das auf der Analyse gezielt angeregter Eigenschwingungen der zu prüfenden Teile basiert. Das Verfahren nutzt dabei die Tatsache, dass sich strukturmechanische Anomalien bzw. makroskopische Defekte in den Eigenschwingungscharakteristika fehlerhafter Prüfobjekte widerspiegeln. Entsprechende Prüfurteile werden üblicherweise mithilfe eines spezifischen Klassifikators getroffen, der zuvor auf Basis von messtechnisch an repräsentativen Teilen generierten Trainingsdaten abgeleitet wurde. Allerdings ist die experimentelle Erzeugung geeigneter Trainingsdaten häufig sehr aufwendig und aufgrund praktischer Limitierungen können die Daten einen zu geringen Umfang aufweisen sowie schlecht konditioniert sein. Die vorliegende Arbeit adressiert diese Problematik mit einem Konzept, das sich auf synthetische Trainingsdaten stützt, die primär mithilfe einer Simulationssoftware berechnet und danach unter Einbeziehung einiger experimenteller Referenzdaten in die »Messwelt« transformiert werden. Am Beispiel einer fiktiven Prüfaufgabe bzw. maschinell gefertigter Teile mit künstlichen Defekten wird das Konzept demonstriert. Dabei wird gezeigt, dass synthetische ART-Trainingsdaten nicht nur in fundierten Gut/Schlecht-Klassifizierungen münden, sondern auch quantitative Rückschlüsse auf die Anomalien fehlerhafter Objekte ermöglichen können, was das übliche Leistungsspektrum der ART übertrifft.

Abstract (english)

Acoustic resonance testing (ART) is an objective, nondestructive testing method based on the analysis of deliberately excited natural vibrations of the parts to be tested. The method leverages the fact that structural anomalies or macroscopic defects are reflected in the natural vibration characteristics of defective test objects. Corresponding test decisions are typically made by means of a specialized classifier, which has previously been derived from training data collected by measurements on representative parts. However, the experimental generation of sufficient training data is often very time-consuming and, due to practical limitations, the data may be too small and poorly conditioned. The present work addresses this difficulty with a concept based on synthetic training data that is mainly calculated with the help of simulation software and subsequently transformed into the »measurement world« by incorporating some experimental reference data. The concept is demonstrated using a fictional inspection task involving machine-made parts with artificial defects. It is shown that synthetic ART training data can not only result in reliable good/bad classifications, but can also enable quantitative conclusions about the anomalies of faulty parts, exceeding the usual capabilities of ART.

Inhalt

Vorwort & Danksagung	III
Kurzfassung & Abstract	V
Inhalt	VII
Abbildungen	IX
Tabellen	XIII
Abkürzungen	XV
Symbole	XVII
1 Motivation, Ziele & Aufbau der Arbeit	1
2 Stand der Technik & Grundlagen	11
2.1 Stand der Technik und Abgrenzung der Arbeit	12
2.2 Zentrale theoretische Grundlagen	19
2.2.1 Lineare Elastizität und Wellenausbreitung	19
2.2.2 Eigenmoden und Eigenfrequenzen freier Körper	25
2.2.3 Finite-Elemente-Methode (FEM)	26
2.2.4 Mathematisch-statistische Grundlagen	28
2.2.5 IO/NIO-Klassifizierungen und Fehlrteile	33
3 Konzept: Simulationsbasiertes ART-Training	35
4 Anwendungsszenario »Pleuel«	43
4.1 Überblick, Anwendungsziel und Definitionen	44
4.2 Strukturmechanische Eigenschaften der Pleuel	48
4.2.1 Geometriemodell und zufällige Abmessungen	48
4.2.2 Materialmodell und Materialkennwerte	50
4.2.3 Defektmodell und IO/NIO-Wahrscheinlichkeiten	50
4.3 Eigenmoden und Eigenfrequenzen der Pleuel	52
4.3.1 Eigenmoden und grundsätzliche Charakteristika	52
4.3.2 Sensitivitäten der Eigenfrequenzen	54
4.3.3 Verteilungseigenschaften der Eigenfrequenzen	60
4.4 Limitierungen einer Schwellwert-Klassifizierung	66

5 Simulationen & Messungen	71
5.1 Virtuelle Pleuel und simulationstechnische Analysen	73
5.1.1 Übersicht und Definition konkreter Teile	73
5.1.2 FEM-Eigenfrequenzsimulationen und Modenerkennung	77
5.1.3 Unsicherheiten und Fehler simulierter Frequenzdaten	82
5.2 Reale Pleuel und messtechnische Analysen	87
5.2.1 Übersicht und maschinelle Fertigung	87
5.2.2 Störeinflüsse, Zufallseffekte und Unsicherheiten	93
5.2.3 Materialcharakterisierung: Dichte	97
5.2.4 Materialcharakterisierung: Elastizität	99
5.2.5 Durchstrahlungsprüfung per Röntgentechnik	107
5.2.6 Taktile Geometrieermessung der Pleuel	112
5.2.7 LDV-Analyse der Pleuel-Eigenmoden	117
5.2.8 FEM-Eigenfrequenzsimulationen für die Pleuel	120
5.2.9 ART-Eigenfrequenzmessungen an den Pleueln	121
5.3 Simulierte vs. gemessene Eigenfrequenzen	128
5.3.1 Frequenzabweichungen und mögliche Ursachen	128
5.3.2 Anpassung mittels optimierter Modellierungen	133
5.3.3 Anpassung mittels Korrekturfaktoren	137
5.3.4 Überprüfung der Korrekturfaktormethode	138
6 Konzeptdemonstration »Pleuel«	143
6.1 Erzeugung synthetischer ART-Trainingsdaten	145
6.2 Ermittlung mehrerer ART-Klassifikatoren	151
6.3 Validierung anhand gefertigter Pleuel	163
7 Diskussion des Konzepts	171
8 Zusammenfassung & Ausblick	185
Literatur & Quellen	193
Anhang A Kennwerte eines Aluminiumwerkstoffs	205
Anhang B Visualisierungen der Pleuel-Eigenmoden	207
Anhang C Temperatureinflüsse & -kompensation	217
Anhang D Kurzbezeichnungen (Proben & Klassifikatoren)	229

Abbildungen

1.1	Prinzip und Ablauf einer ART-Prüfung	3
2.1	Dichtefunktion und Verteilungsfunktion (→ Normal- & Gleichverteilung)	30
2.2	IO/NIO-Prüfproblem und Fehlklassifizierungen	33
3.1	Konzept für ein simulationsbasiertes ART-Training	36
3.2	Optimierte Verteilungseigenschaften synthetischer ART-Trainingsdaten	39
4.1	Kernaspekte des fiktiven Anwendungsszenarios	45
4.2	Grundsätzliche Form eines Pleuels und Pleuel-KOS	45
4.3	Hauptgeometrieparameter eines Pleuels	48
4.4	Mögliche Positionierung eines Defekts in einem NIO-Pleuel	51
4.5	Auftretenswahrscheinlichkeiten für IO- und NIO-Pleuel	51
4.6	Eigenschwingungsformen <i>Mode-1</i> bis <i>Mode-18</i> eines Pleuels laut FEM	52
4.7	Sensitivitäten der Pleuel-Eigenfrequenzen (→ Geometrie)	55
4.8	Nichtlinearitäten/Wechselwirkungen bzgl. der Pleuel-Eigenfrequenzen	56
4.9	Sensitivitäten der Pleuel-Eigenfrequenzen (→ Defektposition)	58
4.10	Sensitivitäten der Pleuel-Eigenfrequenzen (→ Defektgröße)	59
4.11	Eigenfrequenz-Histogramm und Korrelationskoeffizienten (→ IO-Teile)	60
4.12	Verteilungseigenschaften der Pleuel-Eigenfrequenzen (→ IO-Teile)	62
4.13	Verteilungseigenschaften der Pleuel-Eigenfrequenzen (→ NIO-Teile)	64
4.14	Verteilungseigenschaften der Defekteinflüsse (→ NIO-Teile)	65
4.15	Vergleich der Eigenfrequenzen von IO- und NIO-Pleueln	67
4.16	Allgemeine Darstellung einer binären Schwellwert-Klassifizierung	68
4.17	Qualitätsabhängige Verteilung der Pleuel-Eigenfrequenzen	69
5.1	Gegenüberstellung eines virtuellen und eines realen Pleuels	71
5.2	Verteilungsvorgaben für die virtuellen Trainings- und Validierpleuel	74
5.3	Bauteilkonfigurationen der virtuellen Trainingspleuel	76
5.4	FEM-Diskretisierung eines virtuellen Pleuels	78
5.5	Geometriepunkte zur Identifizierung simulierter Pleuel-Eigenmoden	80
5.6	Diskretisierungseinfluss auf FEM-simulierte Pleuel-Eigenfrequenzen	83
5.7	Diskretisierungsfehler der FEM-simulierten Pleuel-Eigenfrequenzen	85
5.8	Fotoaufnahme der realen Referenzpleuel	90

5.9	Defektpositionen für die realen Validierpleuel	91
5.10	Fotoaufnahme der realen Validierpleuel mit eingebrachten Defekten	91
5.11	Experimentell ermittelte Dichtewerte	98
5.12	Zeitsignal einer longitudinalen US-Welle	100
5.13	Experimentell ermittelte Longitudinalwellengeschwindigkeiten	101
5.14	Experimentell ermittelte Transversalwellengeschwindigkeiten	103
5.15	Röntgenbilder ausgewählter Materialproben	108
5.16	Röntgenbilder ausgewählter realer Pleuel	109
5.17	Röntgenbild eines realen Pleuels mit Flachbodenbohrungen	111
5.18	Messfeatures für die Geometrievermessung realer Pleuel	113
5.19	Auswertestrategie bei der Geometrievermessung realer Pleuel	114
5.20	LDV-Videobild mit Versuchsaufbau und Messpunktanordnung	118
5.21	Eigenschwingungsformen <i>Mode-1</i> bis <i>Mode-18</i> eines Pleuels laut LDV	119
5.22	ART-Messaufbau und wesentliche Hardwarekomponenten	122
5.23	Anregepositionen/-orientierungen für die ART-Messungen	122
5.24	Zeitsignale und FFT-Spektren auf Basis von ART-Messungen	123
5.25	Modenidentifizierung für ART-gemessene Pleuel-Eigenfrequenzen	125
5.26	Größtfehler der ART-gemessenen Pleuel-Eigenfrequenzen	127
5.27	Abweichungen simulierter von gemessenen Pleuel-Eigenfrequenzen	129
5.28	Einfluss der FEM-Geometriemodellierung der Pleuel	135
5.29	Einfluss der FEM-Materialmodellierung der Pleuel	135
5.30	Anwendung der Korrekturfaktormethode (\rightarrow reale Referenzpleuel)	138
5.31	Anwendung der Korrekturfaktormethode (\rightarrow reale Validierpleuel)	139
5.32	Geometrieabschätzung auf Basis gemessener Pleuel-Eigenfrequenzen	141
6.1	Konzeptdemonstration und zentrale Aspekte des Anwendungsszenarios	143
6.2	Interpolationsartige Erweiterung synthetischer ART-Trainingsdaten	147
6.3	Sektoren zur diskreten Beschreibung möglicher Defektpositionen	150
6.4	Klassifizierungen der virtuellen Validierpleuel (\rightarrow IO/NIO)	156
6.5	Klassifizierungen der virtuellen Validierpleuel (\rightarrow Defektgröße)	161
6.6	Klassifizierungen der virtuellen Validierpleuel (\rightarrow Defektposition)	162
6.7	Klassifizierungen der realen Validierpleuel (\rightarrow IO/NIO)	165
7.1	Schaltgabel als ART-relevantes Serienteil	176
7.2	ART-gemessene Schaltgabel-Eigenfrequenzen nach Chargen	179
B.1	Eigenschwingungsform <i>Mode-1</i> eines Pleuels laut FEM	208
B.2	Eigenschwingungsform <i>Mode-2</i> eines Pleuels laut FEM	208
B.3	Eigenschwingungsform <i>Mode-3</i> eines Pleuels laut FEM	209

B.4	Eigenschwingungsform <i>Mode-4</i> eines Pleuels laut FEM	209
B.5	Eigenschwingungsform <i>Mode-5</i> eines Pleuels laut FEM	210
B.6	Eigenschwingungsform <i>Mode-6</i> eines Pleuels laut FEM	210
B.7	Eigenschwingungsform <i>Mode-7</i> eines Pleuels laut FEM	211
B.8	Eigenschwingungsform <i>Mode-8</i> eines Pleuels laut FEM	211
B.9	Eigenschwingungsform <i>Mode-9</i> eines Pleuels laut FEM	212
B.10	Eigenschwingungsform <i>Mode-10</i> eines Pleuels laut FEM	212
B.11	Eigenschwingungsform <i>Mode-11</i> eines Pleuels laut FEM	213
B.12	Eigenschwingungsform <i>Mode-12</i> eines Pleuels laut FEM	213
B.13	Eigenschwingungsform <i>Mode-13</i> eines Pleuels laut FEM	214
B.14	Eigenschwingungsform <i>Mode-14</i> eines Pleuels laut FEM	214
B.15	Eigenschwingungsform <i>Mode-15</i> eines Pleuels laut FEM	215
B.16	Eigenschwingungsform <i>Mode-16</i> eines Pleuels laut FEM	215
B.17	Eigenschwingungsform <i>Mode-17</i> eines Pleuels laut FEM	216
B.18	Eigenschwingungsform <i>Mode-18</i> eines Pleuels laut FEM	216
C.1	Eigenfrequenz-Temperaturkoeffizienten für die realen Pleuel	226

Tabellen

2.1	Formeln zur Berechnung der elastischen Konstanten C_{11} , C_{44} und C_{12}	22
2.2	Formeln zur Berechnung der Ingenieurskonstanten E , G und ν	22
4.1	Erwartungswerte und Standardabweichungen der Pleuel-Abmessungen	49
4.2	Dichte und elastische Eigenschaften des isotropen Pleuel-Materials	50
4.3	Modentypen und Symmetrieeigenschaften der Pleuel-Eigenmoden	53
4.4	Eigenfrequenz-Erwartungswerte und Standardabweichungen (\rightarrow IO-Teile)	61
5.1	Gegenüberstellung der virtuellen Trainings- und Validierpleuel	76
5.2	Sollabmessungen der realen Referenz- und Validierpleuel	89
5.3	Experimentell ermittelte Schallgeschwindigkeiten	103
5.4	Experimentell ermittelte Elastizitätskennwerte	105
5.5	Anzahl der ART-Messungen je nach Pleuel/Qualitätszustand	126
5.6	Korrekturfaktoren für FEM-simulierte Pleuel-Eigenfrequenzen	137
6.1	Klassifizierungen der virtuellen Validierpleuel (\rightarrow IO/NIO)	155
6.2	Klassifizierungen der virtuellen Validierpleuel (\rightarrow Defektgröße)	158
6.3	Klassifizierungen der virtuellen Validierpleuel (\rightarrow Defektposition)	159
6.4	Klassifizierungen der realen Validierpleuel (\rightarrow IO/NIO)	164
6.5	Klassifizierungen der realen Validierpleuel (\rightarrow Defektgröße)	168
6.6	Klassifizierungen der realen Validierpleuel (\rightarrow Defektposition)	169
7.1	Klassifizierungen der realen Validierpleuel (\rightarrow Klassensystem)	175
A.1	Typische Materialkennwerte eines isotropen Aluminiumwerkstoffs	205
C.1	Formeln zur Berechnung konsistenter Temperaturkoeffizienten	221
C.2	Theoretische Temperaturkoeffizienten eines Aluminiumwerkstoffs	222
D.1	Kurzbezeichnungen (\rightarrow physische Proben der Arbeit)	229
D.2	Kurzbezeichnungen (\rightarrow konkrete Klassifikatoren der Arbeit)	230

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AGG	»Anwendungsszenario-Grundgesamtheit« (siehe S. 46 in Abschn. 4.1)
ART	<i>acoustic resonance testing</i> , dt.: akustische Resonanzanalyse
ASTM	ASTM International (zuvor: <i>American Society for Testing and Materials</i>)
CAD	<i>computer-aided design</i> , dt.: rechnergestütztes Konstruieren
CNC	<i>computerized numerical control</i> , dt.: rechnergestützte numerische Steuerung
DGZfP	Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	<i>fast Fourier transform</i> , dt.: schnelle Fourier-Transformation
IO	Qualitätszustand »in Ordnung«
KI	Künstliche Intelligenz
KOS	Koordinatensystem
LDV	Laser-Doppler-Vibrometrie
ML	Maschinelles Lernen
NIO	Qualitätszustand »nicht in Ordnung«
PCRT	<i>process compensated resonance testing</i> (Variante/Bezeichnung für ART)
RUS	<i>resonant ultrasound spectroscopy</i> , dt.: Resonanz-US-Spektroskopie
TNR	<i>true negative rate</i> , dt.: Richtig-negativ-Rate (Spezifität)
TPR	<i>true positive rate</i> , dt.: Richtig-positiv-Rate (Sensitivität)
US	Ultraschall
ZfP	zerstörungsfreie Prüfung

Weitere Abkürzungen bzw. zentrale Kurzbezeichnungen für die gefertigten Proben und konkreten Klassifikatoren dieser Arbeit sind in Anh. D zusammengefasst.

Symbole

Symbol	Bedeutung	→ griechische Buchstaben
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz zwischen ϑ_0 und ϑ_1 (→ $\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_0$)	
Δf	Frequenzabweichung/-änderung (kontextabhängig)	
δ_ξ	Unsicherheit eines temperaturkompensierten Ergebniswerts ξ_0	
δ_ϑ	Unsicherheit einer messtechnisch ermittelten Temperatur ϑ_1	
δ_k	Unsicherheit eines eingesetzten Temperaturkoeffizienten k_ξ	
ε	linearisierter Verzerrungstensor	
ε_{kl}	linearisierte Verzerrung (mit $k, l = 1, 2, 3$) → Komponente des Verzerrungstensors ε	
$\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_6$	linearisierte Verzerrungen (unabhängige, neu indizierte Verzerrungen)	
ϑ	Temperatur	
ϑ_0	Bezugstemperatur (→ $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$)	
ϑ_1	Ist-Temperatur eines Festkörpers bzw. gemessene Temperatur	
ϑ_{\max}	obere Temperaturgrenze für Analysen zur Temperaturabhängigkeit	
ϑ_{\min}	untere Temperaturgrenze für Analysen zur Temperaturabhängigkeit	
λ_k	k -ter Eigenwert eines Körpers (FEM-Lösung, mit $k = 1, 2, \dots$)	
μ_G	Erwartungswert eines Pleuel-Geometrieparameters (siehe Tab. 4.1)	
μ_X	Erwartungswert eines Merkmals bzw. einer Zufallsvariablen X	
ν	Poissonzahl eines isotropen linear-elastischen Materials	
ν_0	Poissonzahl ν bei der Temperatur ϑ_0	
ν_1	Poissonzahl ν bei der Temperatur ϑ_1	
$\xi(\vartheta)$	temperaturabhängige physikalische Größe → stellvertretend betrachtete Größe für allgemeine Erläuterungen	
ξ_0	Ausprägung der temperaturabhäng. Größe $\xi(\vartheta)$ bei der Temperatur ϑ_0 bzw. rechnerisch temperaturkompensierter Wert von $\xi(\vartheta)$	
ξ_1	Ausprägung der temperaturabhäng. Größe $\xi(\vartheta)$ bei der Temperatur ϑ_1 bzw. bei der Temperatur ϑ_1 ermittelter Wert von $\xi(\vartheta)$	
π	Kreiszahl (→ $\pi \approx 3,14159\dots$)	
ρ	Dichte eines Festkörpers bzw. Materials	

Symbol	Bedeutung	→ griechische Buchstaben
ρ_0	Dichte ρ bei der Temperatur ϑ_0	
ρ_1	Dichte ρ bei der Temperatur ϑ_1	
ρ_L	Dichte von Luft	
ρ_W	Dichte von Wasser	
$\boldsymbol{\sigma}$	Cauchyscher Spannungstensor	
σ_{ij}	mechanische Spannung (mit $i, j = 1, 2, 3$) → Komponente des Spannungstensors $\boldsymbol{\sigma}$	
$\sigma_1, \dots, \sigma_6$	mechanische Spannungen (unabhängige, neu indizierte Spannungen)	
σ_G	Standardabweichung eines Pleuel-Geometrieparameters (siehe Tab. 4.1)	
σ_X	Standardabweichung eines Merkmals bzw. einer Zufallsvariablen X	
σ_X^2	Varianz eines Merkmals bzw. einer Zufallsvariablen X	
$\boldsymbol{\varphi}$	Eigenmode/Eigenvektor (im Kontext einer FEM-Berechnung)	
$\boldsymbol{\varphi}^k$	k -te Eigenmode eines Körpers (FEM-Lösung, mit $k = 1, 2, \dots$) → in Form von FEM-berechneten Knotenpunktverschiebungen	
ω	(Eigen-)Kreisfrequenz	
ω_k	k -te Eigenkreisfrequenz eines Körpers	

Symbol	Bedeutung	→ lateinische Buchstaben
a_1, a_2	reelle Zahlen (mit $a_1 \leq a_2$)	
b_0	Modellparameter (Konstante)	
b_1, \dots, b_{18}	Modellparameter (Koeffizienten der Eigenfrequenzen f_1, \dots, f_{18})	
$b_{1/1}, \dots, b_{18/18}$	Modellparameter (Koeffizienten von Eigenfrequenz-Produkttermen)	
b_S	Pleuel-Geometrieparameter (siehe Abb. 4.3/Abschn. 4.2.1) → Breite des Steg-Segments S (Stegbreite)	
\mathbf{C}	Elastizitätsmatrix eines linear-elastischen Materials → Darstellung des Elastizitätstensors \mathbf{c} als (6×6) -Matrix	
C_{IK}	elastische Konstante (mit $I, K = 1, \dots, 6$) → Komponente der Elastizitätsmatrix \mathbf{C} → bei Isotropie: $C_{11}, C_{44},$ & C_{12} → bei Orthotropie: $C_{11}, C_{22}, C_{33}, C_{44}, C_{55}, C_{66}, C_{12}, C_{13}$ & C_{23}	
\mathbf{c}	Elastizitätstensor eines linear-elastischen Materials	
c_{ijkl}	elastische Konstante (mit $i, j, k, l = 1, 2, 3$) → Komponente des Elastizitätstensors \mathbf{c}	

Symbol	Bedeutung	→ lateinische Buchstaben
D_{R1}	Pleuel-Geometrieparameter (siehe Abb. 4.3/Abschn. 4.2.1) → Außendurchmesser des Zylinderring-Segments R1	
D_{R2}	Pleuel-Geometrieparameter (siehe Abb. 4.3/Abschn. 4.2.1) → Außendurchmesser des Zylinderring-Segments R2	
d_{R1}	Pleuel-Geometrieparameter (siehe Abb. 4.3/Abschn. 4.2.1) → Innendurchmesser des Zylinderring-Segments R1	
d_{R2}	Pleuel-Geometrieparameter (siehe Abb. 4.3/Abschn. 4.2.1) → Innendurchmesser des Zylinderring-Segments R2	
d_x^Q	Interquartilsabstand der Werte x_1, \dots, x_N	
E	Elastizitätsmodul eines isotropen linear-elastischen Materials	
E_0	Elastizitätsmodul E bei der Temperatur ϑ_0	
E_1	Elastizitätsmodul E bei der Temperatur ϑ_1	
$F_X(x)$	Verteilungsfunktion einer Zufallsvariablen X	
\mathbf{f}_a	Matrix mit FEM-berechneten Eigenfrequenzen N virtueller Pleuel → Sortierung pro Pleuel/Zeile nach aufsteigendem Frequenzwert	
\mathbf{f}_M	Matrix mit FEM-berechneten Eigenfrequenzen N virtueller Pleuel → Sortierung pro Pleuel/Zeile nach der Modennummer m	
f_1, \dots, f_{18}	Pleuel-Eigenfrequenzmerkmale bis ca. 30 kHz (siehe Abschn. 4.3.1) → zugehörige Eigenmoden: <i>Mode-1</i> , ..., <i>Mode-18</i> (siehe Abb. 4.6)	
f_k	k -te Eigenfrequenz eines Körpers	
f_m	m -tes Pleuel-Eigenfrequenzmerkmal (mit der Modennummer m) → zugehörige Eigenmode: <i>Mode-m</i> (vgl. Abb. 4.6/Abschn. 4.3.1)	
$f_m(\vartheta_0)$	Eigenfrequenz f_m bei der Temperatur ϑ_0	
$f_m(\vartheta_1)$	Eigenfrequenz f_m bei der Temperatur ϑ_1	
$f_m(\vartheta_{\max})$	Eigenfrequenz f_m bei der Temperatur ϑ_{\max}	
$f_m(\vartheta_{\min})$	Eigenfrequenz f_m bei der Temperatur ϑ_{\min}	
$f_X(x)$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion einer Zufallsvariablen X	
G	Schubmodul eines isotropen linear-elastischen Materials	
G_0	Schubmodul G bei der Temperatur ϑ_0	
G_1	Schubmodul G bei der Temperatur ϑ_1	
g_1	untere Grenze einer gleichverteilten einer Zufallsvariablen X	
g_2	obere Grenze einer gleichverteilten einer Zufallsvariablen X	
h_R	Pleuel-Geometrieparameter (siehe Abb. 4.3/Abschn. 4.2.1) → Höhe der Zylinderring-Segmente R1 und R2 (Zylinderringhöhe)	

Symbol	Bedeutung	→ lateinische Buchstaben
h_S	Pleuel-Geometrieparameter (siehe Abb. 4.3/Abschn. 4.2.1) → Höhe des Steg-Segments S (Steghöhe)	
i	imaginäre Einheit (→ $i^2 = -1$)	
K	Steifigkeitsmatrix (im Kontext einer FEM-Berechnung)	
K, K'	allgemeine Skalierungsfaktoren	
$K_\rho(\vartheta)$	temperaturabhängiger Skalierungsfaktor bzgl. der Dichte ρ	
$K_C(\vartheta)$	temperaturabhängiger Skalierungsfaktor bzgl. der Elastizitätsmatrix C	
$K_L(\vartheta)$	temperaturabhängiger Skalierungsfaktor bzgl. der Geometrie	
$K_{f_m}(\vartheta)$	temperaturabhängiger Skalierungsfaktor bzgl. der Eigenfrequenz f_m	
$k_\xi(\vartheta)$	temperaturabhängiger Temperaturkoeffizient der Größe $\xi(\vartheta)$	
k_ξ	konstanter Temperaturkoeffizient der Größe $\xi(\vartheta)$	
k_ν	Temperaturkoeffizient der Poissonzahl ν	
k_ρ	Temperaturkoeffizient der Dichte ρ	
k_C	Temperaturkoeffizient der Elastizitätsmatrix C	
k_{C11}	Temperaturkoeffizient der elastischen Konstante C_{11}	
k_{C12}	Temperaturkoeffizient der elastischen Konstante C_{12}	
k_{C44}	Temperaturkoeffizient der elastischen Konstante C_{44}	
k_E	Temperaturkoeffizient des Elastizitätsmoduls E	
k_{f_m}	Temperaturkoeffizient der Eigenfrequenz f_m	
k_G	Temperaturkoeffizient des Schubmoduls G	
k_L	Temperaturkoeffizient der Geometrie (Längenausdehnungskoeffizient)	
k_{v_L}	Temperaturkoeffizient der Longitudinalwellengeschwindigkeit v_L	
k_{v_T}	Temperaturkoeffizient der Transversalwellengeschwindigkeit v_T	
l_R	Pleuel-Geometrieparameter (siehe Abb. 4.3/Abschn. 4.2.1) → Abstand der Zylinderring-Segmente R1 und R2 (funktionelle Länge)	
M	Massenmatrix (im Kontext einer FEM-Berechnung)	
m	Modennummer (Pleuel, mit $m = 1, \dots, 18$) (siehe Abschn. 4.3.1) → Index/Nummer der Eigenmode <i>Mode-m</i> und des Merkmals f_m	
m_G	Masse eines Festkörpers	
N	Stichprobenumfang → Anzahl der Werte x_1, \dots, x_N oder Anzahl von Teilen	
P	Wahrscheinlichkeit (Wahrscheinlichkeitsmaß)	

Symbol	Bedeutung	→ lateinische Buchstaben
\mathbf{P}_k^i	Verschiebungswerte in Bezug auf die k -te FEM-berechnete Eigenmode (unbekannte Mode) eines i -ten virtuellen Zufallspleuels	
$\mathbf{P}_m^{\text{Ref}}$	Verschiebungswerte in Bezug auf die m -te FEM-berechnete Eigenmode (<i>Mode-m</i>) eines virtuellen Pleuels mit IO-Referenzkonfiguration	
p	Anteil bzw. Irrtumsniveau	
q	Anteil bzw. Konfidenzniveau	
r_{xy}	empirischer Korrelationskoeffizient d. Werte x_1, \dots, x_N und y_1, \dots, y_N	
S_x^2	Stichprobenvarianz (Schätzfunktion) → Schätzer für die Varianz σ_x^2 eines Merkmals X	
s_x	empirische Standardabweichung der Werte x_1, \dots, x_N	
s_x^2	empirische Varianz der Werte x_1, \dots, x_N → Schätzwert für die Varianz σ_x^2 eines Merkmals X	
t	Zeit	
t_N	$(1 - p/2)$ -Quantil der t -Verteilung mit $N - 1$ Freiheitsgraden	
\mathbf{U}	Knotenpunktverschiebungen (im Kontext einer FEM-Berechnung)	
$\ddot{\mathbf{U}}$	Knotenpunktbeschleunigungen (im Kontext einer FEM-Berechnung)	
\mathbf{u}	Verschiebungsvektor → Verschiebungen an einem materiellen Punkt im Kontinuum	
\mathbf{u}_k	k -te Eigenmode eines Körpers (Kontinuumslösung, mit $k = 1, 2, \dots$) → in Form von Verschiebungen an jedem materiellen Punkt	
u_x	empirischer Standardfehler basierend auf den Werten x_1, \dots, x_N → Maß für die Unsicherheit eines Mittelwerts \bar{x} im Sinne eines Schätzwerts für den Erwartungswert μ_x eines Merkmals X	
V	Volumen eines Festkörpers	
V_0	Volumen V bei der Temperatur ϑ_0	
V_1	Volumen V bei der Temperatur ϑ_1	
v_L	theoretische Longitudinalwellengeschwindigkeit → reine Longitudinalwelle in einem isotropen Material	
v_T	theoretische Transversalwellengeschwindigkeit → reine Transversalwelle in einem isotropen Material	
$v_{ii}^{(L)}$	theoretische Longitudinalwellengeschwindigkeit → reine Longitudinalwelle in einem orthotropen Material → Ausbreitung & Polarisation: x_i^+ -Richtung (mit $i = 1, 2, 3$)	
$v_{ij}^{(T)}$	theoretische Transversalwellengeschwindigkeit → reine Transversalwelle in einem orthotropen Material → Ausbreitung: x_i^+ -Richtung (mit $i = 1, 2, 3$) → Polarisation: x_j^+ -Richtung (mit $j = 1, 2, 3$ und $j \neq i$)	

Symbol	Bedeutung	→ lateinische Buchstaben
$v_{ii}^{(l)}$	experimentell ermittelte Longitudinalwellengeschwindigkeit → Ausbreitung & Polarisation: » i -Richtung« (mit $i = x, y, z$)	
$v_{ij}^{(t)}$	experimentell ermittelte Transversalwellengeschwindigkeit → Ausbreitung: » i -Richtung« (mit $i = x, y, z$) → Polarisation: » j -Richtung« (mit $j = x, y, z$ und $i \neq j$)	
v_x	empirischer Variationskoeffizient der Werte x_1, \dots, x_N	
W_L	Wägewert eines Festkörpers (Wägevorgang in Luft)	
W_W	Wägewert eines Festkörpers (Wägevorgang in Wasser)	
X	Merkmal bzw. stetige Zufallsvariable	
\bar{X}	Stichprobenmittel (Schätzfunktion) → Schätzer für den Erwartungswert μ_X eines Merkmals X	
X_1, \dots, X_N	Stichprobenvariablen bzgl. eines Merkmals X → unabhängige und identisch verteilte Zufallsvariablen	
X_i	i -te Stichprobenvariable aus X_1, \dots, X_N	
x	Achse/Richtung im Pleuel-KOS (siehe Abb. 4.2)	
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert der Werte x_1, \dots, x_N → Schätzwert für den Erwartungswert μ_X eines Merkmals X	
$x_{0,25}$	unteres Quartil der Werte x_1, \dots, x_N (empirisches 0,25-Quantil)	
$x_{0,5}$	Median der Werte x_1, \dots, x_N (empirisches 0,5-Quantil)	
$x_{0,75}$	oberes Quartil der Werte x_1, \dots, x_N (empirisches 0,75-Quantil)	
x_1, \dots, x_N	Stichprobenwerte bzgl. eines Merkmals X → konkrete Werte (Realisierungen von X_1, \dots, X_N)	
x_i	i -ter Stichprobenwert aus x_1, \dots, x_N	
x_i^+	Koordinatenachse/-richtung bzgl. eines Materials (mit $i = 1, 2, 3$)	
x_j^+	Koordinatenachse/-richtung bzgl. eines Materials (mit $j = 1, 2, 3$)	
x_p	p -Quantil eines Merkmals bzw. einer Zufallsvariablen X	
Y	Merkmal bzw. stetige Zufallsvariable	
y	Achse/Richtung im Pleuel-KOS (siehe Abb. 4.2)	
\bar{y}	arithmetischer Mittelwert der Werte y_1, \dots, y_N	
y_1, \dots, y_N	Stichprobenwerte bzgl. eines Merkmals Y	
y_i	i -ter Stichprobenwert aus y_1, \dots, y_N	
z	Achse/Richtung im Pleuel-KOS (siehe Abb. 4.2)	

1 Motivation, Ziele & Aufbau der Arbeit

Im Kontext des menschlichen Hörens ist – neben der sensorischen Erfassung von Tönen, Klängen oder Geräuschen mit unseren Ohren – auch die hochkomplexe Verarbeitung der registrierten Schallsignale und deren Interpretation im Gehirn von zentraler Bedeutung. So erschließt **unser Hörsinn** uns unterschiedlichste Informationsquellen, auch losgelöst von Gesprächen, Telefonaten, Vorträgen, TV-Sendungen etc. Unter anderem ermöglicht unser Gehör es uns, anhand akustischer Signale auf die Beschaffenheit oder den Zustand einer Schallquelle zu schließen. Dies lässt sich am Beispiel eines Kraftfahrzeugs verdeutlichen, das im Betrieb aufgrund eines Defekts auffällige, nicht der Gewohnheit bzw. der Erwartung entsprechende Geräusche emittiert. Auch ohne die Ursächlichkeit zu kennen, könnte eine nicht sachverständige Person zur Abklärung eine Fachwerkstatt aufsuchen. Das dortige Personal wäre dann auf Basis seiner Ausbildung bzw. Erfahrung möglicherweise in der Lage, die Geräuschursache zu benennen oder die Fehlersuche einzugrenzen. Wie dieses Beispiel untermauert, führen wir sowohl im privaten als auch im beruflichen Umfeld tagtäglich subjektive Analysen von Schallsignalen im Sinne **zerstörungsfreier Prüfungen (ZfP)** durch, entweder gezielt oder so lange unbewusst, bis schließlich ein verdächtiges Geräusch unsere aktive Aufmerksamkeit weckt.

Eigenschwingungen und Klang eines Körpers [Mös09; Mig97; Aul73b; Pfl06]

Der Klang, der bei nicht allzu starker Dämpfung von einem angeschlagenen (also impulshaft angeregten und danach sich selbst überlassenen) Körper¹ ausgeht, beruht auf freien Schwingungen bzw. Eigenschwingungen des Körpers, welche in Form von abgestrahltem Luftschall letztendlich für uns hörbar sind. Dabei liegen solch einem Klangsignal charakteristische, objektspezifische Schwingungsformen, sog. **Eigenmoden**, zugrunde, die mit bestimmten Frequenzen, sog. **Eigenfrequenzen**, einhergehen.

Die Eigenmoden und Eigenfrequenzen sind die Schwingungsformen bzw. die zugehörigen Frequenzen eines schwingungsfähigen Systems, mit denen dieses infolge einer einmaligen Anregung frei schwingen kann. Wenngleich die Begriffe auch im Kontext gedämpfter und nichtlinearer Schwingungen verwendet werden, implizieren sie meist ungedämpfte harmonische Schwingungen linearer Systeme. Ein **elastischer Festkörper** stellt ein kontinuierliches, schwingungsfähiges System dar, dessen (theoretisch unendlich viele) Eigenmoden und -frequenzen i. Allg. wesentlich von den Randbedingungen abhängen. Unter Vernachlässigung von Dämpfung und in Abwesenheit äußerer Einschränkungen, d. h. bei einem freien, von der Umgebung entkoppelten Objekt, resultieren sie laut der linearen Theorie jedoch ausschließlich aus der Beschaffenheit des Körpers (siehe Abschn. 2.2.2). Im Detail

¹⁾ Der Begriff *Körper* meint in diesem Dokument immer einen elastisch deformierbaren Festkörper.

werden die Eigenmoden und -frequenzen hauptsächlich durch die Geometrie des Körpers sowie durch die Dichte und Elastizität seines Materials definiert. Darüber hinaus hängen sie mehr oder weniger deutlich auch von makroskopischen Defekten bzw. Fehlstellen wie Rissen, Poren, Lunkern, Einschlüssen oder Delaminationen ab. Demnach lassen sich die Eigenmoden und -frequenzen eines freien Körpers als objektspezifische Eigenschaften (im Sinne von Bauteileigenschaften) interpretieren.²

Die sich infolge einer Impulsanregung eines Körpers ausbildenden **Eigenschwingungen** sowie der damit einhergehende Klang resultieren i. d. R. aus der Überlagerung mehrerer Eigenmoden und -frequenzen des Körpers. In diesem Kontext sind u. a. die Position, die Orientierung und die Intensität der Impulsanregung maßgeblich, da von diesen Faktoren abhängt, wie deutlich sich welche Schwingungskomponenten initial ausbilden. Weiterhin spielen die i. d. R. modenspezifischen Abklingcharakteristika eine Rolle, die jedoch nicht nur vom Dämpfungsverhalten des Körpers abhängen, sondern auch wesentlich durch äußere Dämpfungseinflüsse mitbestimmt werden können.³ Oftmals ist die hier geschilderte Superposition von Eigenmoden und -frequenzen einschließlich entsprechender Linearitätsannahmen gerechtfertigt bzw. ausreichend präzise, um die Entstehung von Eigenschwingungen zu beschreiben. Je nach Beschaffenheit des Körpers, u. a. im Fall eines schmalen rissartigen Defekts, können aber auch verschiedene nichtlineare Phänomene sein tatsächliches Schwingungs- und Klangverhalten wesentlich prägen. Denn möglicherweise verhält der Körper sich dann schwingungstechnisch nicht mehr linear, selbst wenn sein Material an sich linear-elastisch ist.

»Klangprüfung« (**ART**) [Her03; DGZfP; Sch96; Han97; ASTMa; ASTMb; Lai11]

Die **ART** (*acoustic resonance testing*, dt.: **akustische Resonanzanalyse**)⁴ ist ein akustisches ZfP-Verfahren, das sich auf provozierte Eigenschwingungsvorgänge der zu untersuchenden Prüfobjekte stützt. Bei einer ART-Prüfung wird das zu analysierende Objekt zuallererst schwingungsentkoppelt gelagert, damit es mit seinen Eigenmoden und Eigenfrequenzen schwingen kann. Mittels einer breitbandigen Anregung wird das Objekt dann in Eigenschwingungen versetzt, z. B. impulshaft per Schlag mit einem kleinen Hammer. Die sich infolge dessen ausbildende Schwingungsantwort des Prüfobjekts wird sensorisch

²) In Bezug auf die Eigenschwingungen von Körpern fokussiert die Arbeit auf ungedämpfte lineare bzw. (reale Schwingungsvorgänge betreffend) auf nur schwach gedämpfte sowie zumindest annähernd lineare Schwingungen. Dies spiegelt sich in der aufgezeigten Theorie sowie in vielen Aussagen wider, die i. d. R. von diesem Fokus ausgehen – Aspekte wie deutliche Nichtlinearitäten werden zwar erwähnt, aber nicht im Detail behandelt. Mit *Eigenmoden* und *Eigenfrequenzen* sind außerdem immer die Eigenmoden und -frequenzen freier Körper ohne eingeschränkte Ränder bzw. mit solchen Randbedingungen gemeint, die für die Eigenmoden und -frequenzen nicht maßgeblich sind.

³) Dämpfung zeigt sich nicht nur im Abklingverhalten von Eigenschwingungen. Genau genommen sind auch die Eigenmoden und -frequenzen eines Körpers selbst dämpfungsabhängig. Dabei ist der Einfluss einer (aus physikalischer Sicht sehr) schwachen Dämpfung jedoch verhältnismäßig gering.

⁴) Die in Kap. 1 aufgearbeiteten Informationen zur ART basieren auf den referenzierten Quellen sowie auf eigenen Fachkenntnissen und langjährigen Erfahrungen. Weitere Ausführungen zur ART einschließlich des Stands der Technik folgen in Abschn. 2.1.

erfasst, z. B. indirekt über den abgestrahlten Luftschall, der mithilfe eines Mikrofons aufgezeichnet werden kann. Das so gewonnene, digitalisierte Antwortsignal wird schließlich mit einem anwendungsspezifischen Algorithmus analysiert, wobei für gewöhnlich jedoch nicht das Antwortsignal selbst, sondern daraus extrahierte Kennwerte ausgewertet werden, nämlich meist einige Eigenfrequenzen⁵ des Prüfobjekts und/oder Dämpfungswerte. Letztendlich resultiert auf diese Weise ein Prüfurteil, d. h. eine Aussage zur Beschaffenheit bzw. zum Qualitätszustand des Prüfobjekts. Bezugnehmend auf diese gängige ART-Variante, bei der durch Impulsanregung hervorgerufene Klangsignale analysiert werden, wird das Verfahren häufig auch als *Klangprüfung* bezeichnet. Abb. 1.1 skizziert das hier beschriebene Prinzip und den Ablauf einer solchen Klangprüfung.

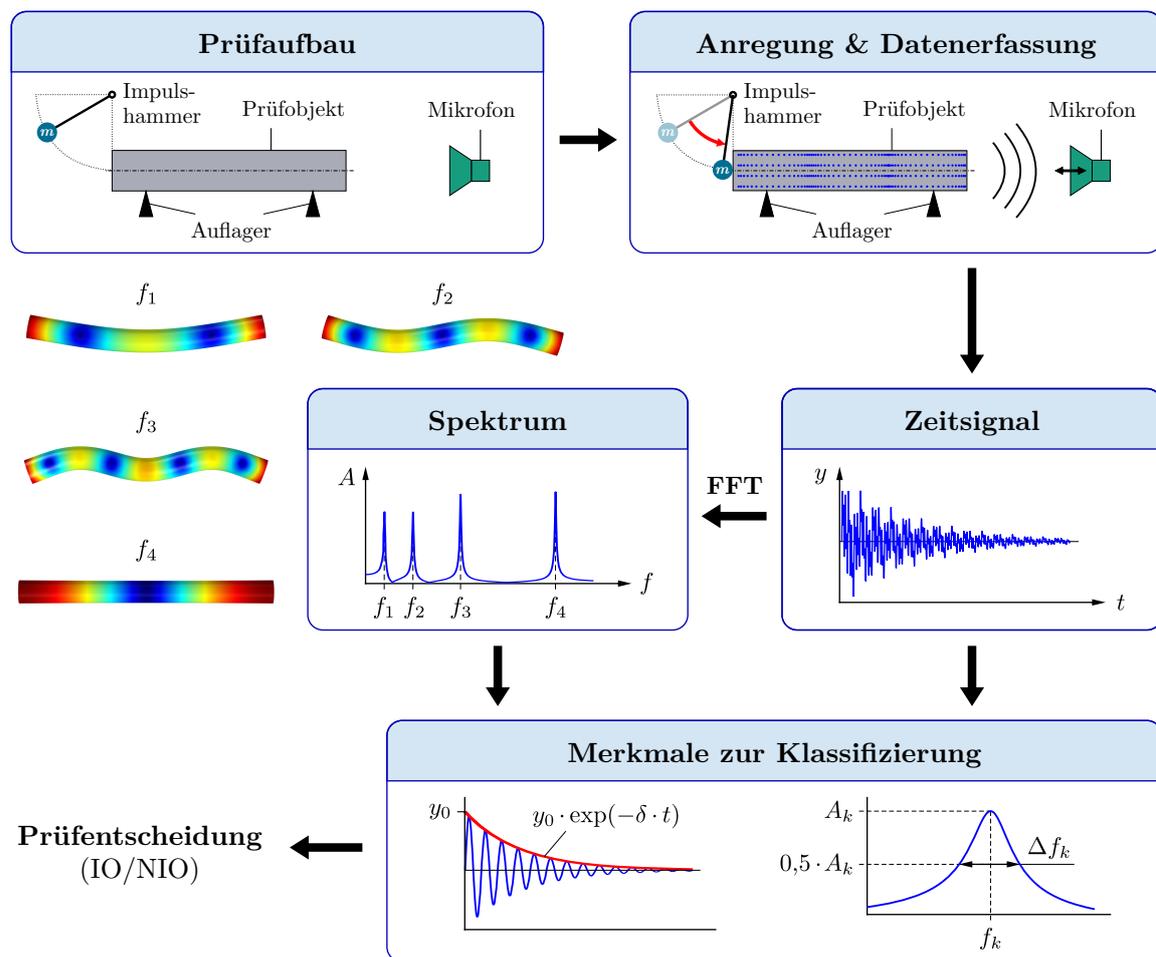


Abb. 1.1: Prinzip und Ablauf einer ART-Prüfung (\rightarrow Klangprüfung)

⁵⁾ Während die *Eigenfrequenzen* die Frequenzen beschreiben, mit denen ein Körper frei schwingen kann, werden im Kontext der ART die Frequenzen, die mit signifikanten Amplitudenüberhöhungen aus experimentellen Schwingungssignalen extrahiert werden können, als *Resonanzfrequenzen* bezeichnet. Die zwei Begriffe werden dabei jedoch häufig synonym verwendet. Unter anderem aufgrund des Fokus der Arbeit auf allenfalls schwach gedämpfte und zumindest annähernd lineare Schwingungen ist die Differenzierung zwischen Eigen- und Resonanzfrequenzen nicht notwendig, sodass in diesem Dokument, auch aus sprachlichen Gründen, immer der Begriff der Eigenfrequenz genutzt wird.

Das Prinzip der ART beruht darauf, dass die Schwingungsantwort eines angeregten Prüfobjekts von seiner strukturmechanischen **Beschaffenheit** abhängt, d. h. im Detail von der Geometrie und den ggf. über das Objektvolumen variierenden Materialeigenschaften (v. a. Dichte sowie Elastizität, aber auch Dämpfungsverhalten) einschließlich eventueller makroskopischer Diskontinuitäten.⁶ Darauf gestützt wird das Verfahren im industriellen Umfeld eingesetzt, um seriengefertigte Teile sekundenschnell, integral und kostengünstig auf qualitätsrelevante strukturmechanische **Anomalien** zu prüfen, also auf unzulässige Abweichungen gegenüber der Sollbeschaffenheit. Typischerweise zielt die ART dabei auf eine Auffälligkeitserkennung bzw. die Unterscheidung von Teilen nach unterschiedlichen Qualitätsabstufungen ab, wobei zumeist **IO/NIO-Prüfurteile** angestrebt werden.⁷ Das bedeutet, fehlerhafte NIO-Objekte mit qualitätsrelevanten Anomalien sollen identifiziert und von einwandfreien IO-Teilen separiert werden.

Industriell fokussiert die ART vorrangig auf das automatisierte und fertigungsintegrierte 100-%-Screening von metallischen oder keramischen Einzelteilen mittlerer Größe, die mit einem hohen Durchsatz produziert werden (siehe Abschn. 2.1). Dabei lassen sich Prüfungen auf verschiedenste **Anomalien** realisieren, wobei eine wesentliche Voraussetzung für die Einsetzbarkeit des Verfahrens darin besteht, dass die jeweiligen Anomalien akustisch relevant sind und sich deutlich im Eigenschwingungsverhalten entsprechender NIO-Teile widerspiegeln. Je nach ART-Prüfaufgabe können die aufzuspürenden Anomalien geometrischer Natur sein, sie können unzulässigen lokalen oder globalen Abweichungen in den Material- und Gefügeeigenschaften entsprechen oder es kann sich um »klassische« Fehler bzw. Defekte wie Risse oder Lunken handeln, die eventuell von Teil zu Teil in der Größe und/oder der Position variieren. Da die Übergänge teilweise fließend sind, ist eine scharfe Abgrenzung zwischen diesen verschiedenartigen Anomalien jedoch nicht immer möglich. Letzten Endes lassen sich die mit Anomalien bei einer ART-Prüfung assoziierten Effekte z. B. anhand von messtechnisch ermittelten Frequenz- oder Dämpfungswerten erkennen, wobei den Prüfentscheidungen sowohl lineare als auch nichtlineare Schwingungsvorgänge zugrunde liegen können.⁸

Eine charakteristische Herausforderung für den Einsatz der ART besteht darin, dass sich nominell gleiche Serienobjekte des identischen Typs nicht nur in dem Qualitätsmerkmal unterscheiden, auf das eine ART-Prüfung abzielt. Denn daneben treten i. d. R. von Teil zu Teil **tolerierbare Variationen** in Geometrie sowie Material auf, was u. a. auf nicht

⁶) Mit Bezeichnungen wie *strukturmechanische Beschaffenheit/Eigenschaften* oder *Bauteilstruktur* ist in diesem Dokument auf kompakte Weise die Gesamtheit der im Kontext der ART relevanten Eigenschaften eines Körpers gemeint, die maßgeblich dessen Eigenschwingungscharakteristika bestimmen bzw. sich z. B. in den Eigenfrequenzen oder im Dämpfungsverhalten widerspiegeln können.

⁷) IO → Qualitätszustand »in Ordnung«; NIO → Qualitätszustand »nicht in Ordnung«

⁸) Aus sprachlichen Gründen beziehen sich die Ausführungen oft auf ART-Prüfaufgaben, bei denen auf binäre IO/NIO-Prüfentscheidungen bzw. auf die Erkennung von NIO-Teilen abgezielt wird. Sinngemäß übertragen sollen die Erläuterungen dabei auch Prüfaufgaben einschließen, bei denen zwei gleichwertige bzw. mehr als zwei Qualitätsstufen zu unterscheiden sind. Weiterhin wird im Dokument regelmäßig der allgemeine Begriff *Anomalie* genutzt. Falls explizit lokale, nur über einen begrenzten Bauteilbereich ausgedehnte Anomalien gemeint sind, werden diese als *Defekte*, *Fehlstellen* oder *Fehler* bezeichnet.

beherrschbare, als zufällig interpretierbare Störeinflüsse bzw. auf die Genauigkeiten der eingesetzten Fertigungsverfahren zurückzuführen ist. Auch mit der Fertigungsreihenfolge korrelierte Drifts, z. B. durch Werkzeugverschleiß, und sprunghafte Chargeneffekte, die z. B. mit einem Werkzeugwechsel oder der Umstellung auf eine neue Materialcharge einhergehen, können diesbezüglich eine Rolle spielen. Solche zulässigen Variationen spiegeln sich jedenfalls in den per ART provozierten Eigenschwingungen entsprechender Objekte wider. Folglich und auch aufgrund messtechnischer Limitierungen variieren mittels ART erzeugte Eigenschwingungsdaten auch für Prüfobjekte, die derselben Qualitätsabstufung zuzuordnen sind. Letztlich können die aus ART-Schwingungssignalen zu extrahierenden qualitätsrelevanten Informationen in gewissen Maßen überlagert werden, was belastbare Rückschlüsse auf die Qualitätszustände von Serienteilen per ART wesentlich erschweren kann, v. a. im Fall stark ausgeprägter zulässiger Variationen.

Zur Umsetzung einer ART-Serienprüfung werden üblicherweise messtechnisch generierte **Trainingsdaten** genutzt, die das jeweilige Prüfproblem unter Beachtung zulässiger und und i. d. R. auch unzulässiger Bauteilprägungen in Form von Eigenschwingungsdaten beschreiben, auf deren Basis dann ein anwendungsspezifischer Algorithmus ermittelt bzw. berechnet wird. Entsprechend der meist angestrebten Separierung von Teilen nach unterschiedlichen Qualitätsstufen handelt es sich bei diesem Algorithmus um einen mehr oder weniger komplexen **Klassifikator**⁹, der im Rahmen des späteren industriellen Einsatzes letztendlich die Prüfentscheidungen trifft. Anschaulich gesehen »lernt« der Klassifikator auf Basis der Trainingsdaten, wie sich NIO-Teile (unter Berücksichtigung zulässiger fertigungsbedingter Variationen) hinsichtlich der Eigenschwingungscharakteristika von IO-Teilen unterscheiden und wie die unterschiedlichen Bauteilqualitäten anhand experimenteller ART-Daten voneinander getrennt werden können.

Die vielen in der Praxis anzutreffenden ART-Prüfapplikationen zeigen, dass der konventionelle Ansatz mit experimentell erzeugten Daten oft praktikabel ist, wobei ein IO/NIO-Prüfproblem im Idealfall bereits mithilfe eines einfachen, auf Basis einer überschaubaren Datenbasis parametrisierten Schwellwert-Klassifikators lösbar ist, der seine Prüfurteile auf ein einziges Merkmal stützt, z. B. eine einzige Eigenfrequenz. Nichtsdestotrotz gehen mit experimentellen Trainingsdaten gewisse **Nachteile** einher. Diese umfassen Aspekte, die generell problematisch sind und je nach Bedingungen und Anforderungen so weit reichen können, dass aus physikalischer Sicht realisierbare ART-Prüfungen aufgrund praktischer Herausforderungen oder Limitierungen ggf. nicht umgesetzt werden.

Zur Erzeugung experimenteller **ART-Trainingsdaten** werden repräsentative Teile, die bestmöglich das Spektrum der später zu prüfenden Serienteile einschließlich tolerierbarer Bauteilvariationen und ggf. auch qualitätsrelevanter Anomalien abdecken, aus der adressierten Fertigung entnommen und als Trainingsteile verwendet. Dabei werden an diesen Trainingsteilen nach dem Messprinzip der ART Eigenschwingungsdaten erzeugt. Zudem werden i. d. R. auch die Ist-Qualitätszustände der Teile begleitend festgestellt, auf deren

⁹⁾ in englischsprachigen Quellen u. a. auch als *sorting algorithm/module* bezeichnet

Basis die Schwingungsdaten dann auf geeignete Weise gelabelt werden können. Dazu ist ggf. ein aufwendiges Referenzverfahren notwendig. Ein genereller Nachteil des experimentellen Ansatzes besteht darin, dass die Datenerzeugung mit einem hohen Aufwand sowie erheblichen Kosten verbunden sein kann. So kann es je nach Komplexität der jeweiligen Prüfaufgabe erforderlich sein, eine recht große Anzahl an Teilen zu charakterisieren, die zudem möglichst vielfältige Zustände umfassen – ggf. unter Berücksichtigung kontinuierlicher Drifts und sprunghafter Chargeneinflüsse. Wenngleich eine umfassende Abbildung der möglichen Bauteilprägungen im Hinblick auf eine informationsreiche Trainingsdatenbasis und einen tauglichen, leistungsfähigen Klassifikator zielführend ist, ist dies u. a. für NIO-Teile aus einer Serienfertigung mit sehr geringem Ausschuss bzw. mit Rücksicht auf seltene Defektausprägungen unter Umständen nur mit Abstrichen realisierbar. Zwar können hierzu verschiedene Gegenmaßnahmen ergriffen werden, z. B. in der Form, dass künstliche Defekte in einige Objekte eingebracht werden, was aber mit zusätzlichem Aufwand und Limitierungen verbunden ist. Auch dass zur Datenerzeugung in einen funktionierenden Serienprozess eingegriffen wird und dass Teile im Zuge von Referenzanalysen ggf. mit zerstörenden Verfahren beschädigt werden, kann problematisch sein.

In Anbetracht des Aufwands, der Kosten und notwendiger Serieneingriffe bei der experimentellen Generierung von ART-Trainingsdaten muss in Betracht gezogen werden, dass eine entsprechende Datenbasis aus **statistischer Sicht** schlecht konditioniert sowie im Umfang zu gering ist. Dies gilt insbesondere, falls der Aufwand bei der Datenerzeugung gering gehalten wurde oder gewisse Qualitätszustände selten auftreten, sodass zu diesen höchstens vereinzelte Daten vorliegen. Ein limitierter oder verzerrter Informationsgehalt der Daten kann sich letztlich negativ auf den abgeleiteten ART-Klassifikator auswirken. Denn lässt sich der Klassifikator aufgrund der verfügbaren Trainingsdaten nur unpräzise schätzen, kann dies in einer geringen Klassifizierungsstärke bzw. in unzuverlässigen Prüfurteilen münden. Davon abgesehen kann die Auswahl der mathematischen Verfahren für den ART-Klassifikator durch die Daten limitiert werden – z. B. moderne, leistungsfähige KI- oder ML-Ansätze¹⁰ können je nach Datenumfang und -qualität ggf. nicht eingesetzt werden oder ihr Potential nur in begrenztem Maße entfalten.

Die ART, die wie zuvor geschildert meist zur IO/NIO-Bewertung eingesetzt wird, liefert zumeist **keine Zusatzinformationen** zur Art, Größe oder Position der vermeintlichen Anomalie bzw. des Defekts eines als NIO eingestuften Teils. Dies ist insofern nachteilig, als NIO-Prüfurteile i. Allg. nicht zielgerichtet (z. B. per bildgebendem ZfP-Verfahren mit einem Fokus auf lokal begrenzte Bauteilregionen) nachkontrolliert werden können, ohne die entsprechenden Teile umfassend zu analysieren. Weiterhin liefern die Prüfurteile der ART keine spezifischen Hinweise auf konkrete Qualitätsprobleme wie plötzlich vermehrt an ganz bestimmten Bauteilstellen auftretende Defekte. Letztlich lässt sich folgern, dass Rückschlüsse auf die Ausprägungen von Anomalien durch im Umfang zu geringe oder im Informationsgehalt eingeschränkte Trainingsdaten von vornherein ausgeschlossen werden. So würde die datenbasierte Ermittlung eines speziell modellierten Klassifikators, der z. B.

¹⁰⁾ KI → Künstliche Intelligenz; ML → Maschinelles Lernen

Mehrinformationen zu Defekten in Bezug auf deren Größen und Positionen zurückgeben könnte, zumindest diesbezüglich geeignet konditionierte Trainingsdaten erfordern. Diese müssten die Bandbreite der möglichen Defektausprägungen sehr detailliert und weitestgehend »vollständig« abbilden, was für experimentelle Trainingsdaten jedoch aufgrund der geschilderten Herausforderungen und Limitierungen bei der Datenerzeugung i. d. R. praktisch nicht realisierbar sein kann.

Lösungsansatz und Ziele der Arbeit

Angesichts der o. g. Limitierungen und Nachteile des konventionellen ART-Ansatzes mit experimentell generierten Trainingsdaten entstand die Vision eines alternativen Ansatzes mit synthetischen Trainingsdaten. Die vorliegende Arbeit verfolgt ein Konzept, das diese Vision aufgreift und das als **Konzept für ein simulationsbasiertes ART-Training** bezeichnet wird. Die Grundidee dieses Konzepts besteht darin, zur Ermittlung eines ART-Klassifikators synthetische ART-Trainingsdaten zu verwenden, die mithilfe einer Simulationssoftware berechnet und unter Einbeziehung weniger experimenteller Referenzdaten aus der »Simulationswelt« in die »Messwelt« transformiert werden.

Die konkreten **Ziele der Arbeit** umfassen die folgenden Punkte:

- 1) **Darlegung des Konzepts** für ein simulationsbasiertes ART-Training
- 2) **Demonstration des Konzepts** anhand eines fiktiven Anwendungsszenarios
- 3) **Diskussion des Konzepts** im Hinblick auf seine Praxistauglichkeit

Eine konkrete Umsetzung des Konzepts bzw. eines simulationsbasierten ART-Trainings für eine geplante ART-Serienanwendung wäre sicherlich nicht trivial und die Erzeugung geeigneter synthetischer Trainingsdaten würde zudem spezielles Know-how und zunächst auch signifikante Personalaufwände erfordern – u. a. zur Modellierung der anwendungsspezifischen Gegebenheit in einer Simulationssoftware sowie im Hinblick auf die i. d. R. unvermeidbaren Abweichungen zwischen Simulations- und Messdaten.

Allerdings bietet der simulationsbasierte Ansatz aufgrund vielfältiger Möglichkeiten und Freiräume bei der Datengenerierung potentiell **zahlreiche Vorteile** gegenüber dem konventionellen Ansatz. Die notwendigen Instanzen zur Datenerzeugung vorausgesetzt, wäre der Umfang simulationsbasiert erzeugbarer Trainingsdaten mit verhältnismäßig geringem personellen Aufwand gut skalier- sowie automatisierbar. Eingriffe in die Serienfertigung und aufwendige experimentelle Analysen ließen sich auf ein Minimum reduzieren. Somit könnten sehr umfangreiche Daten erzeugt werden. Die Daten könnten dabei so gestaltet werden, dass sie die erwarteten Ausprägungen der später mit ART zu bewertenden Teile sicher abdecken. Zudem ließen sich beim Datendesign detaillierte Abstufungen abbilden, sowohl zulässige Bauteilvariationen als auch qualitätsrelevante Anomalien betreffend. In der Serie nur selten vorkommende Qualitätszustände bzw. Defektausprägungen könnten gezielt vorgegeben werden. Folglich ließen sich synthetische Trainingsdaten erzeugen, die

im Vergleich zu experimentellen Daten eine wesentlich belastbarere und informationsreichere Datengrundlage bieten könnten. In letzter Konsequenz könnten umfangreiche und gut konditionierte synthetische ART-Trainingsdaten zu einem ART-Klassifikator führen, dessen Performance die eines auf Basis experimenteller Trainingsdaten ermittelten Klassifikators deutlich übertrifft – u. a. auch, da solche Daten im Hinblick auf ein komplexeres Design des Klassifikators bzw. für den Einsatz moderner Klassifikationsverfahren prädestiniert erscheinen, was für experimentelle Daten aufgrund des meist limitierten Umfangs und eingeschränkten Informationsgehalts i. Allg. nicht der Fall ist.

Das in der Arbeit verfolgte Konzept für ein simulationsbasiertes ART-Training soll einen praktischen Mehrwert für die ART bieten, welcher aus den oben genannten vorteilhaften Eigenschaften synthetischer Trainingsdaten folgt. Letztendlich soll es dazu beitragen, die Einsetzbarkeit und die Leistungsfähigkeit des Verfahrens in der Praxis zu steigern. Dabei zielt das Konzept primär auf Prüfaufgaben ab, die mit dem konventionellen ART-Ansatz bzw. experimentellen Trainingsdaten in Verbindung stehend bisher nicht oder zumindest nicht mit vertretbarem Aufwand mittels ART adressiert werden können. Damit ist u. a. jede **potentielle ART-Anwendung** gemeint, ...

- ... die an einer zu geringen Anzahl repräsentativer (NIO-)Trainingsteile scheitert.
- ... der der messtechnische Aufwand zur experimentellen Trainingsdatenerzeugung oder die dazu notwendigen Serieneingriffe im Wege stehen.
- ... die aufgrund komplizierter Verhältnisse, z. B. in Form geringer Defekteinflüsse bei gleichzeitig sehr ausgeprägten tolerierbaren Bauteilvariationen, extrem umfangreiche und/oder speziell designte Trainingsdaten zur Umsetzung erfordert.
- ... die aufgrund gelegentlicher konstruktiver Bauteilanpassungen ein regelmäßiges Update des ART-Klassifikators bzw. die Generierung zusätzlicher oder sogar neuer Trainingsdaten erfordert, um die veränderten Eigenschwingungscharakteristika der Prüfobjekte abzubilden, oder die zwecks einer zeitnahen Prüfümplementierung eine Trainingsdatengenerierung im Vorfeld des Produktionsstarts eines neuen Teiletyps voraussetzt, was experimentelle Trainingsdaten de facto ausschließt (weil diese erst gesammelt werden können, wenn die Produktion bereits angelaufen ist).
- ... bei der über reine IO/NIO-Klassifizierungen hinausgehende Mehrinformationen zu den zurückgewiesenen Objekten benötigt werden, z. B. in Bezug auf die Größen und Positionen der Defekte von NIO-Teilen.

Aufbau und Inhalte der Arbeit

Im weiteren Verlauf umfasst dieses Dokument die folgenden Kapitel und Inhalte:

- Kap. 2 behandelt den für die Arbeit maßgeblichen **Stand der Technik** und fasst einige zentrale **theoretische Grundlagen** zusammen.
- In Kap. 3 wird das im Rahmen der Arbeit entwickelte und verfolgte **Konzept** für ein simulationsbasiertes ART-Training erläutert (→ 1. Ziel der Arbeit).
- Die Kapitel 4 bis 6 befassen sich mit der **Konzeptdemonstration**, d. h. mit der Demonstration eines simulationsbasierten ART-Trainings auf der Grundlage eines fiktiven Anwendungsszenarios (→ 2. Ziel der Arbeit), und den dabei verwendeten Teilen bzw. Daten. Darüber hinaus werden Analysen erläutert, die nicht direkt in die Demonstration einfließen. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse waren jedoch für eine zielgerichtete, belastbare Konzeptdemonstration insofern sehr nützlich, als sie zu einem besseren Verständnis vieler Sachverhalte führten.

Das zentrale Anwendungsszenario stellt eine fiktive ART-Prüfaufgabe dar, bei der modellhafte Pleuel auf mögliche Defekte hin analysiert werden sollen. Die Konzeptdemonstration baut auf dieser Prüfaufgabe auf und verfolgt dabei eine empirische, datenbasierte Strategie, wie sie auch zur Realisierung industrieller ART-Prüfapplikationen auf Basis des konventionellen Ansatzes üblich ist – mit dem wesentlichen Unterschied, dass dem entwickelten Konzept entsprechend synthetische statt rein experimentell erzeugte ART-Trainingsdaten genutzt werden.¹¹ Das heißt, dass sich die Demonstration auf zahlreiche, stichprobenartig aus einer Grundgesamtheit ausgewählte Teile stützt. Im Detail werden dabei sog. virtuelle Pleuel, welche nur als Computermodelle existieren, und sog. reale Pleuel, d. h. maschinell gefertigte Teile, betrachtet. Die virtuellen Pleuel dienen v. a. als Grundlage für synthetische ART-Trainingsdaten, aus denen dann Klassifikatoren für die ART-Qualitätsprüfung von Pleueln abgeleitet werden. Die realen Pleuel werden u. a. im Rahmen einer quantitativen Anpassung der Trainingsdaten an Messdaten herangezogen. Daneben zielt die Demonstration im abschließenden Schritt auf die Prüfung bzw. Klassifizierung realer Pleuel per ART hinsichtlich eventuell vorliegender Defekte ab.

In Kap. 4 wird das Anwendungsszenario einschließlich des betrachteten Teile- und Defekttyps beschrieben, wobei neben den strukturmechanischen Eigenschaften der Pleuel auch auf die Eigenmoden und -frequenzen der Teile eingegangen wird. Auf Grundlage der dort aufgezeigten Bauteilstrukturmodelle werden in Kap. 5 die konkreten, zur Konzeptdemonstration genutzten virtuellen und realen Pleuel sowie die an diesen Teilen durchgeführten Simulationen und Messungen erläutert. In Kap. 6

¹¹⁾ Während das Anwendungsszenario eine Prüfaufgabe beschreibt, die theoretisch auf beliebige Weise angegangen werden kann, u. a. auch mit dem konventionellen ART-Ansatz bzw. mittels experimenteller Trainingsdaten, versteht sich die Konzeptdemonstration als Lösung des Prüfproblems auf Basis des entwickelten Konzepts für ein simulationsbasiertes ART-Training – also als konkretes simulationsbasiertes ART-Training mithilfe synthetischer ART-Trainingsdaten.

wird die Konzeptdemonstration schließlich in chronologischer Abfolge beschrieben, wobei auch die im letzten Schritt der Demonstration erzielten Resultate bzw. ART-Prüfentscheidungen dargelegt und evaluiert werden.

- In Kap. 7 folgt die **Diskussion** der Arbeit, wobei der Fokus zunächst auf der dargelegten Konzeptdemonstration liegt. Daran anknüpfend wird das Konzept für ein simulationsbasiertes ART-Training in Bezug auf seine Praxistauglichkeit bzw. eine industrielle Umsetzung einschließlich der dabei zu erwartenden Herausforderungen, Limitierungen und Chancen diskutiert (→ 3. Ziel der Arbeit).
- Kap. 8 beinhaltet die **Zusammenfassung** der Arbeit, in deren Rahmen abschließend ein kompakter, allgemeinerer **Ausblick** zur ART gegeben wird.
- Im **Anhang** finden sich Ausarbeitungen, die im Hauptteil aufgegriffen, jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit dort nicht im Detail präsentiert werden. In Anh. A werden die im Kontext dieser Arbeit zentralen Materialeigenschaften aufgearbeitet, wie sie für Aluminium bzw. eine Aluminiumlegierung typisch sind. In Anh. B sind detaillierte Visualisierungen der Eigenmoden des o. g. Bauteiltyps eines Pleuels zu finden. Anh. C behandelt die Temperaturabhängigkeiten bestimmter Bauteil- und Materialeigenschaften sowie die rechnerische Kompensation entsprechender Temperatureinflüsse. Anh. D umfasst einen Überblick über die abschnittsübergreifend zur Kennzeichnung der physischen Proben und konkreten Klassifikatoren dieser Arbeit verwendeten Kurzbezeichnungen.

Software zur Analyse von Simulations- und Messdaten

Zur Analyse der umfangreichen Simulations- und Messdaten dieser Arbeit, einschließlich aller weiterführenden, datenbasierten Berechnungen, wurde standardmäßig die Software **MATLAB**[®] (MathWorks, versch. Versionen bis R2022b) genutzt. Zur Automatisierung unterschiedlichster Aspekte der Datenanalyse wurde umfassender **MATLAB**[®]-Quellcode erstellt, wobei aus Gründen des Umfangs von der Darlegung der entsprechenden Skripte abgesehen wurde. Zentrale Schritte werden jedoch erläutert, ggf. unter Angabe essentieller **MATLAB**[®]-Funktionen. Weiterführende Informationen zu den Funktionen oder zur Software finden sich in der **MATLAB**[®]-Dokumentation [MAT22].

2 Stand der Technik & Grundlagen

Dieses Kapitel behandelt den für diese Arbeit wesentlichen Stand der Technik und fasst zudem zentrale Grundlagen zusammen. Es gliedert sich wie folgt:

- In Abschn. 2.1 werden, auf dem Einleitungskapitel aufbauend, zusätzliche Informationen zur ART zusammengefasst. Der für die vorliegende Arbeit relevante **Stand der Technik** wird dargelegt. Andere Forschungsarbeiten bzw. Veröffentlichungen werden eingeordnet und diese Arbeit wird vom Stand der Technik abgegrenzt. Die wissenschaftlich-technische Literatur umfasst zahlreiche Publikationen, welche sich mit den Eigenschwingungen verschiedenster Körper befassen. Der Schwerpunkt der durchgeführten Recherchen lag auf Arbeiten, die unmittelbar im Kontext der ART angesiedelt sind und mit den in Kap. 1 erläuterten Herausforderungen und Limitierungen in Verbindung stehen bzw. die Sachverhalte behandeln, die im Hinblick auf das im Verlauf der vorliegenden Arbeit entwickelte und demonstrierte Konzept für ein simulationsbasiertes ART-Training relevant sind.
- In Abschn. 2.2 werden theoretische **Grundlagen** sowie einige Formeln präsentiert. Sämtliche Ausführungen beschränken sich dabei stets auf die kompakte Darlegung zentraler bzw. wiederholt im Dokument behandelte Aspekte und Formeln; weiterführende Informationen sind in den jeweils angegebenen Quellen zu finden.¹² Zuerst wird knapp auf die Theorie zur linearen Elastizität von Festkörpern und die damit in enger Verbindung stehende Ausbreitung ebener Wellen in entsprechenden Materialien eingegangen (Abschn. 2.2.1). Anschließend werden theoretische Grundlagen in Bezug auf die Eigenmoden und die Eigenfrequenzen elastischer Körper dargelegt (Abschn. 2.2.2). Danach wird die FEM vorgestellt, wobei der Schwerpunkt auf der Berechnung von Eigenmoden und -frequenzen liegt (Abschn. 2.2.3). Es folgen ausgewählte mathematisch-statistische Grundlagen (Abschn. 2.2.4). Zuletzt wird auf binäre Klassifizierungsprobleme und die möglichen Fehlerurteile bei entsprechenden IO/NIO-Qualitätsprüfungen abgezielt (Abschn. 2.2.5).

¹²⁾ Über die in Abschn. 2.2 dargelegten Grundlagen hinausgehende Hintergründe und Formeln, die nur in einem engeren Zusammenhang relevant, jedoch nicht zentral für die Arbeit sind, werden im Kontext ihrer jeweiligen Verwendung an geeigneten Stellen im Dokument behandelt.

2.1 Stand der Technik und Abgrenzung der Arbeit

Bezüglich der akustischen Resonanzanalyse (ART) als ZfP-Verfahren zur schnellen und integralen Qualitätsanalyse von Serienteilen finden sich im Gegensatz zu vielen anderen ZfP-Verfahren bzw. Anwendungen keine allgemeinen internationalen Normen. Von der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP) wurde aber eine allgemeine **Richtlinie** publiziert [DGZfP]. Daneben behandeln mehrere US-amerikanische **ASTM-Standards** das Verfahren einschließlich der grundlegenden Aspekte [ASTMa; ASTMb; ASTMc; ASTMd]. Einige inhaltlich spezifischere Normen, Richtlinien sowie Empfehlungen thematisieren auf dem ART-Messprinzip beruhende Anwendungen, z. B. die experimentelle Bestimmung elastischer Konstanten oder Eigenfrequenzmessungen an Bremsscheiben, siehe [DINa; ASTMe; VDAa; VDAb].

Im Deutschen finden sich regelmäßig die **Bezeichnungen** *akustische Resonanzanalyse* und *Klangprüfung* für die ART, aber u. a. auch *akustisches Resonanzverfahren* [DGZfP]. In der englischsprachigen Literatur wird das Verfahren z. B. *acoustic resonance testing* oder *resonance/resonant inspection (RI)* genannt, wobei häufig auch der Begriff *process compensated resonance testing (PCRT)* genutzt wird.¹³ Kommerziell im Fachbereich der ART agierende Unternehmen verwenden häufig eigene Namen.

Die o. g. DGZfP-Richtlinie definiert die ART – im weiten Feld der **ZfP-Verfahren** ein volumenorientiertes akustisches Prüfverfahren [Her03; DGZfP] – als ein »*vergleichendes, zerstörungsfreies Prüfverfahren, das darauf beruht, dass jeder Körper nach einer äußeren Anregung in seinen Eigenfrequenzen schwingt*« [DGZfP]. Mit dem zentralen Aspekt der aktiven und integralen Anregung freier Eigenschwingungen entkoppelt gelagerter Einzelteile grenzt sich die ART gegenüber anderen akustischen ZfP-Verfahren und akustischen Analyseansätzen ab, beispielsweise von ...

- ... der Ultraschallprüfung [Deu99; Kra86; DINb], die auf einer aktiven Erzeugung lokaler akustischer Wellen und deren lokaler Interaktion mit den Materialeigenschaften bzw. Fehlstellen eines Prüfobjekts basiert.
- ... der Schallemissionsprüfung [Val03; DINc], die sich auf spontane akustische Ereignisse stützt, die durch eine Belastung des Prüfobjekts provoziert werden (und die z. B. auf spontanes Risswachstum unter Belastung zurückzuführen sind).
- ... Ansätzen, die auf die akustische Zustandsanalyse von Maschinen bzw. Anlagen oder ein akustisches Prozessmonitoring fokussieren, siehe u. a. [Del18; Sal18; Ye18; Cho19; Liu20; She20; Rag21; Nir22] – denn hierbei ist der Fokus auf zwangsläufig im Betrieb komplexerer Systeme (Zusammenbauten) oder während Prozessen entstehende Schwingungen bzw. akustische Emissionen anstatt auf gezielt angeregte Eigenschwingungen von Einzelteilen gerichtet.

¹³⁾ Die Benennung als PCRT geht auf das Unternehmen *Quasar International* und einen proprietären Algorithmus zurück [Sch05]. Der Begriff wird jedoch auch in einigen ASTM-Standards, siehe [ASTMb; ASTMc; ASTMd], sowie in vielen anderen Veröffentlichungen verwendet.

Es existieren Lösungen, mit denen die elastischen Eigenschaften von geometrisch wohldefinierten Proben »ART-artig« quantifiziert werden können [DINa; ASTM], d. h. auf Basis gezielt angeregter Eigenschwingungen. In diesem Kontext ist auch die *resonant ultrasound spectroscopy (RUS)* [Mig97; Mig01; Zad04] einzustufen – ein Verfahren, das für gewöhnlich zur Materialcharakterisierung auf Laborebene verwendet wird. Der Unterschied solcher Ansätze zur ART (die auf die Erkennung fehlerhafter Serienteile bzw. die Separierung strukturmechanisch unterschiedlicher Zustände abzielt) begründet sich u. a. durch die Probengeometrien und den Anwendungsfokus auf die Materialquantifizierung.¹⁴ Auch Resonanzanalysen an Einzelobjekten, siehe z. B. [Bau05], bzw. gewöhnliche Modalanalysen unterscheiden sich von der ART als ZfP-Verfahren für seriengefertigte Objekte in ihren Analysezielen oder dahingehend, dass kompliziertere und/oder lediglich einzelne Objekte untersucht werden.

Die DGZfP-Richtlinie, die ASTM-Standards und weitere allgemeine Veröffentlichungen, z. B. [Her03; Sch96; Han97; Stu05], erläutern u. a. das Grundprinzip und die praktische Umsetzung einer ART-Prüfung, relevante Einflussgrößen, die Auswirkungen bestimmter Defektarten auf die Eigenschwingungen von Prüfobjekten, industrielle Anwendungsbeispiele oder die Vor- und Nachteile des Verfahrens. So existieren bzgl. der **technischen Umsetzung** mehrere Möglichkeiten die Schwingungsanregung sowie die Erfassung der Schwingungsantwort betreffend, wobei die folgenden Kombinationen bzw. Varianten der ART in der Praxis üblich sind [ASTMa; Lai11]:

- »**Impuls-Methode**« (im Deutschen v. a. »Klangprüfung«, vgl. Abb. 1.1 & S. 2 in Kap. 1) → Impulsanregung mittels eines (automatisierten) Hammers sowie kontaktlose, indirekte Signalerfassung per Mikrofon
- »**Sweep-Methode**« → Anregung und Signalerfassung über die (piezoelektrischen) Auflager, die eine Sweep-Anregung in einem festgelegten Frequenzbereich umsetzen und die Schwingungsantworten in Kontakttechnik registrieren

Unter anderem in [Her03; Han97; Stu05; DGZfP] sind überblicksweise zahlreiche in der Praxis realisierte ART-Prüfapplikationen genannt. Demnach zielt die ART vorrangig auf einige Zentimeter bis mehrere Dezimeter große Einzelteile ab, die kein allzu ausgeprägtes Dämpfungsverhalten aufweisen. Konkret fokussiert die ART häufig auf keramische Teile wie z. B. Dachziegeln aus Ton oder Katalysatoren. Daneben adressiert die ART speziell metallische Komponenten, wobei die jeweiligen Teile viele verschiedene, mit unterschiedlichsten Fertigungsverfahren aus zahlreichen Werkstoffen hergestellte Produkte umfassen. Unter anderem werden (z. B. mittels Gieß- oder Schmiedeprozess urgeformte, im Rohzustand befindliche oder mechanisch endbearbeitete) Serienteile wie Bremsscheiben, Pleuel, Nockenwellen, Achsschenkel, Felgen oder Zahnstangen per ART bewertet. Da mit einem einzigen ART-Prüfsystem durchaus mehrere hundert Objekte pro Stunde geprüft werden

¹⁴⁾ Zu berücksichtigen ist, dass die Bezeichnung RUS in der Literatur auch im Sinne der ART bzw. im Zusammenhang mit der Prüfung geometrisch komplizierterer Teile auf Defekte genutzt wird, siehe z. B. die o. g. ASTM-Standards [ASTMa; ASTMb].

können, ist die ART als automatisier- und fertigungsintegrierbares Verfahren speziell für ein 100-%-Screening bei dementsprechend niedrigen Taktzeiten sowie hohen Stückzahlen prädestiniert. Hinsichtlich der konkreten Prüfziele umfasst das **Anwendungsspektrum** der ART u. a. Prüfungen auf Risse, Lunker oder Gieß- und Schmiedefehler, Gütebeurteilungen stoffschlüssiger Verbindungen, Analysen mit Fokus auf Materialverwechslungen oder geometrische Fehler und Prüfungen auf mikrostrukturelle Unregelmäßigkeiten bzw. qualitätskritische Gefügeentartungen.

Es wurden zahlreiche Einzelbeiträge aus den letzten rund anderthalb Dekaden gefunden, die neben dem Spektrum der industriellen ART-Anwendungen auch exotischere Ansätze aufzeigen. So wurde die ART u. a. zur Bewertung automobiler Teile hinsichtlich Rissen eingesetzt, wozu neuronale Netze und Support Vector Machines genutzt wurden [San11; San12]. Mit dem Ziel der Separierung von IO- und NIO-Zuständen wurden rohrförmige Komponenten mit ART geprüft, wobei neben akustischen Daten auch das Gewicht und die Härte der Objekte einbezogen wurden [Jos18]. Auch wurde die Qualität keramischer Fliesen mittels ART analysiert [Ere13; Bra22]. Per Metall-Spritzgussverfahren gefertigte Proben wurden mit ART quantifiziert und die Ergebnisse konnten mit zerstörend ermittelten Kennwerten belastbar korreliert werden [Sid13]. Mittels ART wurde auf Objekte abgezielt, die durch selektives Laserschmelzen hergestellt wurden [Pri16; Urb17; Oba23]. Zudem wurde die ART zur Analyse additiv gefertigter Gitterstrukturen bzw. von Metamaterialien herangezogen [Ibr18; Oba21; McG21; Boy21; Boy24]. Andere Autoren veranschaulichten ART-Analysen an additiv produzierten Teilen [Adk19; Liv20a] oder prüften Turbinenschaufeln hinsichtlich metallurgischer Aspekte und Herstellungsfehlern [Liv20b]. Weitere Papers befassen sich ebenfalls mit der Klassifizierung von Turbinenschaufeln auf Basis von Schwingungsdaten und legen den Fokus dabei auf Algorithmen zur Bewertung von ART-Daten, siehe u. a. [Che20; Che21a; Che21c; Che21b; Yag22; Che23]. Gegossene Proben wurden mittels ART auf mikrostrukturelle Gefügevariationen analysiert [Bis19]. Gesinterte Zahnräder wurden per ART mit Fokus auf Beschädigungen untersucht, wozu unterschiedliche Algorithmen des Maschinellen Lernens genutzt wurden [Ju22]. Die ART wurde im Hinblick auf die kombinierte Analyse von Simulations- und Messdaten zwecks Nachweis von Rissen in metallischen Platten evaluiert [Bra24]. Aus Polymeren gefertigte O-Ringe wurden anhand ihres Eigenschwingungsverhaltens in Bezug auf ihre Materialien klassifiziert [Liv19a]. Zudem wurden Objekte aus Faserverbundwerkstoffen mittels ART analysiert [Dan16; Gew16]. Auf Grundlage des fundamentalen Prinzips der ART wurde auf die Unterscheidung unbeschädigter und defekter Glasflaschen [Kra20b] sowie auf die Klassifizierung von Euromünzen [Kra20a] abgezielt. Vom typischen industriellen Einsatz abgesehen, befassten sich zahlreiche Arbeiten mit ART-Ansätzen für landwirtschaftliche Erzeugnisse wie Eier oder Früchte [Zha18; Sun20; Alb20].

Die Literatur beinhaltet unzählige Beiträge, welche sich (theoretisch oder experimentell) mit den **Eigenschwingungen einfacher Körper** befassen, z. B. [Gie33; Gud82; Kis00; Dou05; Nah05; Rab10; Bou11; Zho12; Zha17]. Diese u. a. auf Stäbe, Balken oder Platten ausgerichtete Publikationen sind für die ART mit ihrem Fokus auf geometrisch deutlich kompliziertere Serienteile (deren Eigenschwingungen zudem vielfältigen Fertigungs- und

Störeinflüssen unterliegen) zwar nur bedingt relevant, weswegen im Verlauf dieser Arbeit keine systematische Aufarbeitung entsprechender Veröffentlichungen erfolgte. Allerdings bieten die Arbeiten zu einfachen Körpern ungeachtet der im Detail analysierten Problemstellungen oftmals Informationen, die dem Grundverständnis dienen. So lassen sich z. B. die fundamentalen Abhängigkeiten der individuellen Eigenfrequenzen eines Körpers von Geometrie und Material oder die Einflüsse von Defekten nachvollziehen.

Die **Finite-Elemente-Methode (FEM)** wird im Kontext der ART oft verwendet, um das Eigenschwingungsverhalten betrachteter Objekte zu simulieren. Belege dazu finden sich häufig, u. a. in [Her06; Rab10; Lai11; Bie15; Goo17; Urb17; McG21; Boy24; Bra24]. Die Komplexität der vorgenommenen FEM-Modellierungen variiert dabei ebenso stark wie die Ziele der Simulationen, wobei oftmals die Identifikation von Eigenschwingungsformen oder Sensitivitätsanalysen unter Berücksichtigung geometrischer Einflüsse oder verschiedenster Defekte im Vordergrund stehen.

Die nachfolgend kompakt vorgestellten Publikationen bzw. Forschungsarbeiten sind für diese Arbeit aus verschiedenen Gründen von hoher Relevanz:

- SCHMIDT und STEINBUCH befassten sich mit den Einflüssen tolerierbarer Bauteilvariationen bzgl. Geometrie und Material sowie nicht tolerierbarer Defekte auf die Eigenfrequenzen verschiedener Bauteiltypen [Sch02; Ste05]. Damit adressierten sie die Problematik der ART, dass zulässige Variationen die Einflüsse der nachzuweisenden Anomalien maßgeblich überlagern können. Mit einem erarbeiteten Modellansatz schlossen sie anhand einiger Eigenfrequenzen auf die strukturmechanischen Eigenschaften von Teilen bzw. deren Abweichungen gegenüber einer als Referenz betrachteten Ausgangskonfiguration [Sch02]. Sie entwickelten Ansätze, die auf die Fragestellung abzielen, inwiefern ein Satz konkreter Eigenfrequenzen primär durch zulässige oder unzulässige, qualitätsrelevante Variationen bestimmt wurde [Ste05]. Die Demonstrationen der Arbeiten basieren auf Simulationsdaten.
- LAI ET AL. nutzten die FEM mit der Vision, die ART basierend auf Simulationen auf eine quantitativ belastbarere Grundlage zu stellen, den notwendigen Bedarf an experimentellen Trainingsdaten zu reduzieren und präzisere Prüfurteile zu erzielen [Lai11]. Dazu erfassten sie die Eigenmoden und Eigenfrequenzen eines automobilen Schmiedeteils mittels Laservibrometrie und ART und verglichen die Resultate mit FEM-simulierten Daten, die auf messtechnisch ermittelten Geometrie- und Materialeigenschaften des Objekts basieren. Dabei stellten sie eine gute Übereinstimmung fest. Später zielten sie auf lokale makroskopische Defekte ab [Lai12; Lai13; Xu15]. Basierend auf einem simulierten Datensatz, in dem die von einem kleinen Defekt positionsabhängig individuell beeinflussten Eigenfrequenzen für den untersuchten Bauteiltyp abgebildet wurden, schlossen sie invers auf die unbekannt Positionen eines oder mehrerer Defekte in FEM-simulierten Teilen [Lai12]. Sie erzielten häufig belastbare Aussagen zu den Defektpositionen, die in ihrer Qualität jedoch von der Anzahl der zu charakterisierenden Fehler und deren Abständen abhingen. In einer aufbauenden Arbeit entwickelten sie die Methode weiter und berücksichtigten u. a.

zusätzliche Defekttypen [Xu15]. Die Autoren wiesen darauf hin, dass die Übertragbarkeit der Methodik in die Praxis angesichts tolerierbarer Bauteilvariationen oder Limitierungen bei der simulationstechnischen Darstellung realer Bauteilstrukturen und Defekte eingeschränkt sein könnte. In einer weiteren Studie zielten sie auf die recheneffiziente Voraussage der Einflüsse strukturmechanischer Anomalien auf die Eigenfrequenzen eines FEM-simulierten Teils ab [Lai13].

- In einer Serie von Publikationen legten mehrere Autoren um BIEDERMANN ET AL. aufeinander aufbauende Arbeiten zur ART dar [Bie15; Bie16; Goo17; Bie17; Hef17; May18; Hef18; Ald18; May19; Hef19; Liv19b; Bie19]. Dabei zielten die Arbeiten auf synthetische Daten ab, auf deren Grundlage ausgewählte ART-Prüfaufgaben gelöst wurden. Damit wurden die fundamentalen Herausforderungen der ART im Zusammenhang mit experimentellen Trainingsdaten adressiert. Der Fokus der konkreten Anwendungen lag primär auf unzulässige Kriechverformungen (*creep deformation*) oder Kristallorientierungen. Einige der Arbeiten fokussierten insbesondere auf eine realitätsgetreue FEM-Modellierung entsprechender Anomalien und der analysierten Teile ab. Im Verlauf wurden diese Modellierungen schrittweise komplexer gestaltet und es wurden diverse Abgleiche mit gemessenen Schwingungsdaten unter Berücksichtigung zahlreicher Teile mit verschiedenen Qualitätsabstufungen durchgeführt. Auf Basis simulationsbasiert generierter Daten, in denen sowohl zulässige als auch unzulässige Bauteilvariationen und -ausprägungen nach dem Monte-Carlo-Prinzip abgebildet wurden, wurden Klassifikatoren trainiert. Diese wurden letztendlich für die ART-Qualitätsprüfung zahlreicher maschinell hergestellter Teile eingesetzt, die neben IO-Zuständen anteilig entweder durch unzulässig ausgeprägte Kriechverformungen oder durch nicht tolerierbare kristallografische Eigenschaften im Material gekennzeichnet sind. Dabei erzielten die Autoren meist belastbare sowie zufriedenstellende Klassifizierungen für die analysierten Objekte.

Zusammengefasst wurde die FEM im Rahmen der relevanten Forschungsarbeiten als geeignetes, performantes Tool für die Generierung synthetischer ART-Daten identifiziert [Lai11]. Die mit tolerierbaren Bauteilvariationen verknüpften Einschränkungen der ART wurden mittels spezieller Lösungsvorschläge adressiert [Sch02; Ste05] und Strategien zur Quantifizierung von Defekten hinsichtlich Größe und Position wurden entwickelt [Lai12; Xu15] – wobei die Autoren ihre Ansätze mithilfe simulierter Schwingungsdaten demonstrierten, ohne sie nachweislich in die Praxis überführt zu haben. Die relevanten Punkte dieser Veröffentlichungen werden in dieser Arbeit mit eigenen Lösungsstrategien für die verschiedenen Teilaspekte ganzheitlich berücksichtigt. Konkret wird dabei auf die ART-Qualitätsprüfung von Teilen im Hinblick auf lokale strukturmechanische Defekte sowie zusätzliche quantitative Rückschlüsse auf deren Größen und Positionen abgezielt. Eine synthetische, überwiegend simulationstechnisch per FEM erzeugte Datenbasis stellt die wesentliche Grundlage hierfür dar. Diese Arbeit grenzt sich außerdem mit dem Ziel der Demonstration eines simulationsbasierten ART-Ansatzes anhand maschinell gefertigter Teile ab, die ausgeprägte Geometrievariationen aufweisen.

In den Veröffentlichungen von BIEDERMANN ET AL. wurden simulationsbasierte ART-Ansätze mit synthetischen Trainingsdaten beschrieben und experimentell demonstriert, deren Ähnlichkeiten zu dem in dieser Arbeit entwickelten Konzept für ein simulationsbasiertes ART-Training nicht abzustreiten sind. So wurden im Detail u. a. Aspekte wie Monte-Carlo-Simulationen bedient, bei denen die Geometrie- und Materialeigenschaften der betrachteten Teile in mehrfachen FEM-Berechnungen variiert wurden, was auch die Lösungsstrategie der vorliegenden Arbeit betrifft. Jedoch fokussieren die in den Publikationen beschriebenen Prüfprobleme auf gänzlich andere Anomalien verglichen mit dieser Arbeit. Konkret wurde auf unzulässige Kriechverformungen sowie auf die Detektion von Teilen mit nicht tolerierbaren Kristallorientierungen abgezielt. Der Fokus lag dabei stets auf der binären IO/NIO-Trennung, allenfalls auf der Erkennung eines einzigen Zwischenzustands. Es ist anzunehmen, dass sich die betrachteten Anomalien tendenziell über ein verhältnismäßig großes Bauteilvolumen erstreckten, wobei die Effektstärken schwankten. Jedoch kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Eigenfrequenzen der analysierten NIO-Objekte von deutlich in ihren Positionen streuenden Anomalien beeinflusst wurden. Im Gegensatz dazu zielt diese Arbeit insbesondere auf lokale makroskopische Fehlstellen ab, die von NIO- zu NIO-Teil mit deutlich variierender Positionierung auftreten können. Wegen der hochgradig nichtlinearen Abhängigkeiten der Eigenfrequenzen eines Objekts von der Position eines lokalen Fehlers, stellt dies eine spezielle Herausforderung dar. Das betrifft bereits die ausschließlich binäre IO/NIO-Unterscheidung mittels ART. Vor allem aber fokussiert diese Arbeit auch auf quantitative Aussagen hinsichtlich der Größen und der Positionen von Defekten, was über den aktuellen Stand der Technik hinausgeht und womit sich diese Arbeit u. a. von den Tätigkeiten der Forscher um BIEDERMANN ET AL. auf wesentliche Weise abgrenzt.

In Ergänzung zu den o. g. Publikationen wurde eine aktuellere Veröffentlichung recherchiert, die sich ebenfalls mit der Lokalisation von Fehlern per ART befasst und dies für Aluminium-Druckgussteile demonstriert [Lec22]. Dazu wurde eine mittels FEM erstellte Datenbasis verwendet. In der Methodik bestehen aber grundlegende Unterschiede, denn die herangezogenen Daten ergaben sich, anders als in dieser Arbeit, nicht unter Vorgabe zufälliger Variationen, sondern die Defektposition wurde schrittweise variiert. Auch die algorithmische Analysestrategie ist eine andere. Auch berücksichtigt die Demonstration der vorliegenden Arbeit stark ausgeprägte Geometrievariationen, während in Bezug auf den »konkurrierenden« Ansatz die geometrischen Variationen der untersuchten Objekte nicht im Detail nachvollzogen werden konnten. Zudem wurde die Bauteilmasse bei den in [Lec22] dargelegten Analysen einbezogen, um Variationen in den Eigenfrequenzen von Teil zu Teil zu kompensieren. Diese Arbeit zielt zwar durch die optionale Einbeziehung von Geometrieinformationen bei der ART-Qualitätsprüfung auch auf eine vergleichbare Kompensation ab, jedoch ist dies nur optional und es werden darüber hinaus auch rein eigenfrequenzbasierte Prüfurteile angestrebt. Im Vergleich berücksichtigt die vorliegende Arbeit außerdem eine großzügige Defektverteilung sowie (absolut und auch bezogen auf die jeweiligen Bauteilabmessungen) nicht nur kleinere Defekte, sondern auch abgestufte Defektgrößen, auf die ebenfalls per ART geschlossen werden soll.

Schlussendlich bleibt festzuhalten, dass sich diese Arbeit in vielen spezifischen Punkten sowie mit der speziellen, ausführlich dargelegten Methodik gegenüber vergleichbaren, in der Literatur beschriebenen simulationsbasierten ART-Ansätzen abgrenzt.

In der Vergangenheit wurden **eigene Arbeiten** zur ART publiziert, die simulationsbasierte Ansätze entwickelten und dazu den auch im Rahmen dieser Arbeit hauptsächlich betrachteten Teiletyp nutzten. In einem Fall wurde anhand gemessener Frequenzwerte mittels Regressionsfunktionen, die auf Basis synthetischer Daten berechnet wurden, auf die geometrischen Abmessungen maschinell gefertigter Teile geschlossen [Hei20], was in diesem Dokument kompakt aufgezeigt wird. Dem vorausgegangen sind analoge Untersuchungen, die sich jedoch ausschließlich auf Simulationsdaten stützten [Hei15]. Daneben wurden synthetische Daten sowie verschiedene Klassifikationsverfahren testweise eingesetzt, um eigenfrequenzbasiert unzulässige Geometrieausprägungen zu erkennen [Zhe17]. Zudem wurden maschinell gefertigte IO- und NIO-Teile mit künstlichen Fehlern mittels ART-Klassifikatoren getrennt, die auf Grundlage synthetischer Daten berechnet wurden [Hei22]. Dies wurde in der vorliegenden Arbeit auf detaillierte Weise und in erweiterter Form behandelt, wobei im Nachgang der vorherigen Veröffentlichung in erster Linie auf die Quantifizierung von Defekten per ART abgezielt wurde.

2.2 Zentrale theoretische Grundlagen

2.2.1 Lineare Elastizität und Wellenausbreitung

Dass z. B. metallische Teile durch Eigenmoden und Eigenfrequenzen gekennzeichnet sind und sich in Eigenschwingungen versetzen lassen, hängt entscheidend mit der materiellen Elastizität zusammen. Für die vorliegende Arbeit genügte es, immer von einer **linearen Materialelastizität** auszugehen. Im Folgenden wird knapp auf die Theorie zur linearen Elastizität, die formale Beschreibung linear-elastischer Materialien sowie die theoretische Ausbreitung von ebenen Wellen in einem entsprechenden, allseitig ausgedehnten Körper eingegangen, wobei der Fokus mit der Isotropie und der Orthotropie auf besondere Fälle ausgerichtet ist. Die Ausführungen beruhen auf [Bec13; Aul73a; Eve01; Sti01] und unterliegen den in der linearen Theorie üblichen Annahmen (wie sehr kleinen, linearisierbaren Verformungen innerhalb der Elastizitätsgrenzen). Den Darlegungen liegt ein kartesisches Koordinatensystem mit den Achsen x_1^+ , x_2^+ und x_3^+ zugrunde.

Lineares Elastizitätsgesetz und formale Darstellungsweisen

Ein elastischer Festkörper verformt sich unter Belastung, womit gewisse Verschiebungen, Verzerrungen und Spannungen einhergehen. Die an einem materiellen Punkt des Körpers auftretenden Spannungen können mit dem Cauchyschen Spannungstensor $\boldsymbol{\sigma}$ beschrieben werden, der die Komponenten σ_{ij} einschließt (mit $i, j = 1, 2, 3$). Die Verzerrungen lassen sich mit dem linearisierten Verzerrungstensor $\boldsymbol{\varepsilon}$ darstellen, dessen Komponenten ε_{kl} sind (mit $k, l = 1, 2, 3$).¹⁵ Diese beiden Tensoren bzw. die Spannungen und die Verzerrungen sind bei einem linear-elastischen Material linear miteinander verknüpft, und zwar durch den **Elastizitätstensor** \mathbf{c} mit seinen Komponenten c_{ijkl} (mit $i, j, k, l = 1, 2, 3$). Gl. 2.1 zeigt dieses lineare Elastizitätsgesetz, das verallgemeinerte **Hookesche Gesetz**, sowohl mit den tensoriellen Größen als auch in Indexnotation¹⁶.

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (2.1)$$

Bei den Tensoren $\boldsymbol{\sigma}$ und $\boldsymbol{\varepsilon}$ handelt es sich jeweils um einen Tensor zweiter Stufe mit in Summe neun Komponenten, die sich in einer (3×3) -Matrix abbilden lassen. Da jedoch für die Spannungen $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ und für die Verzerrungen $\varepsilon_{kl} = \varepsilon_{lk}$ gilt, existieren in beiden Fällen nur sechs verschiedene Komponenten, die sich unter Verwendung der Voigtschen

¹⁵) Anhand eines infinitesimalen würfelförmigen Materialpartikels, der gedanklich jeweils senkrecht zur x_1^+ -, x_2^+ - und x_3^+ -Koordinatenachse freigeschnitten wurde, lässt sich die Bedeutung der Spannungskomponenten bzw. ihrer paarweisen Indizes veranschaulichen. Während der erste Index stets den Normalenvektor einer der gedachten Schnittebenen kennzeichnet, benennt der zweite Index die Wirkrichtung der jeweiligen Spannung. Somit handelt es sich bei den Spannungen mit gleichen Indizes, also σ_{11} , σ_{22} und σ_{33} , um Normalspannungen, die in x_1^+ -, x_2^+ - bzw. x_3^+ -Richtung wirken. Hingegen sind die Spannungen mit ungleichen Indizes (σ_{12} , σ_{13} , σ_{21} , σ_{23} , σ_{31} , σ_{32}) Schubspannungen. Analog dazu unterteilen sich die Verzerrungen in Dehnungen (ε_{11} , ε_{22} , ε_{33}) und Gleitungen (ε_{12} , ε_{13} , ε_{21} , ε_{23} , ε_{31} , ε_{32}).

¹⁶) verkürzte Schreibweise mithilfe der Einsteinschen Summenkonvention

Notation in einem Spaltenvektor anordnen lassen. Der Elastizitätstensor \mathbf{c} ist hingegen ein Tensor vierter Stufe mit insgesamt 81 Komponenten, von denen aber angesichts der genannten Symmetrien des Spannungs- und des Verzerrungstensors zunächst nur 36 verschieden sind ($c_{ijkl} = c_{jikl} = c_{ijlk} = c_{jilk}$). Diese **elastischen Konstanten** lassen sich nun in einer (6×6) -Matrix anordnen. Damit kann das lineare Elastizitätsgesetz, wie in Gl. 2.2 gezeigt, als Matrixgleichung dargestellt werden.¹⁷ Aufgrund der zusätzlich geltenden Symmetrieeigenschaft $c_{ijkl} = c_{klij}$ sind schlussendlich jedoch höchstens 21 der 36 in der (6×6) -Matrix enthaltenen Konstanten unabhängig voneinander, und zwar im vollständig anisotropen Fall ohne weitere Materialsymmetrien.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{2212} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3313} & C_{3312} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2313} & C_{2312} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1313} & C_{1312} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1213} & C_{1212} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Es ist gebräuchlich, die paarweisen Indizes ij und kl der Spannungen bzw. Verzerrungen zu jeweils einem Index »zusammenzuziehen« – analog werden dann auch die elastischen Konstanten neu indiziert. Die Neuindizierung bzw. Verknüpfung der »alten paarweisen« mit den »neuen einzelnen« Indizes erfolgt oft nach dem Schema $11 \rightarrow 1, 22 \rightarrow 2, 33 \rightarrow 3, 23 \rightarrow 4, 13 \rightarrow 5$ und $12 \rightarrow 6$ (vgl. die in Gl. 2.2 genutzte Sortierung). Gl. 2.3 zeigt das lineare Elastizitätsgesetz in Matrixschreibweise mit den neu indizierten Einträgen sowie unter Berücksichtigung der Symmetrie der (6×6) -Matrix.¹⁸ Die Materialelastizität wird dabei durch die **Elastizitätsmatrix** \mathbf{C} mit den max. 21 verschiedenen Einträgen bzw. elastischen Konstanten C_{IK} beschrieben (mit $I, K = 1, \dots, 6$ und $C_{IK} = C_{KI}$).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & \text{sym.} & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

¹⁷⁾ Neben der in Gl. 2.2 vorgenommenen Sortierung für die unabhängigen Spannungs- und Verzerrungskomponenten finden sich in der Literatur noch andere Varianten. Im Rahmen der Arbeit wurde jedoch durchgehend die in Gl. 2.2 genutzte Sortierreihenfolge angenommen.

¹⁸⁾ Zu berücksichtigen ist, dass die in Gl. 2.2 auftretenden Faktoren der Verzerrungen $\varepsilon_{23}, \varepsilon_{13}$ und ε_{12} in Gl. 2.3 infolge der Zuweisungen $\varepsilon_4 = 2\varepsilon_{23}, \varepsilon_5 = 2\varepsilon_{13}$ und $\varepsilon_6 = 2\varepsilon_{12}$ nicht mehr auftauchen.

Isotropes linear-elastisches Materialmodell

Die Elastizität isotroper linear-elastischer Materialien ist stets **richtungsunabhängig**. In Matrixschreibweise lässt sich dies entsprechend Gl. 2.4 ausdrücken. Zwar sind neun der max. 21 verschiedenen Komponenten der **Elastizitätsmatrix** \mathbf{C} ungleich null. Mit C_{11} , C_{44} und C_{12} treten aber nur drei verschiedene elastische Konstanten in der Matrix auf. Zudem sind lediglich zwei dieser drei Konstanten unabhängig voneinander. Gl. 2.5 gibt die Beziehung zwischen C_{11} , C_{44} und C_{12} an.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{44} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$C_{12} = C_{11} - 2C_{44} \quad (2.5)$$

In den Ingenieurwissenschaften werden häufig die **Ingenieurskonstanten** Elastizitätsmodul E , Schubmodul G und Poissonzahl ν verwendet, um die isotrope Elastizität eines Materials zu beschreiben. Erneut gilt, dass zwei dieser Größen die Elastizität vollständig quantifizieren, wobei Gl. 2.6 den Zusammenhang zwischen E , G und ν nennt.

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (2.6)$$

Auf Basis der elastischen Konstanten C_{11} , C_{44} und C_{12} können die Ingenieurskonstanten E , G und ν ermittelt werden und vice versa – schließlich handelt es sich um äquivalente Darstellungsweisen, worauf die auf der folgenden Seite dargelegten Tabellen fokussieren. Tab. 2.1 beinhaltet Berechnungsvorschriften, mit denen die elastischen Konstanten C_{11} , C_{44} und C_{12} jeweils mittels zwei der Ingenieurskonstanten E , G und ν bestimmt werden können. Tab. 2.2 zeigt analoge Formeln, mit denen die Konstanten C_{11} , C_{44} und C_{12} in die Ingenieurskonstanten E , G und ν überführt werden können.

Richtungsunabhängig können sich in einem ausgedehnten isotropen Festkörper nur zwei unterschiedliche Moden ebener Wellen ausbreiten, nämlich reine Longitudinal- und reine Transversalwellen. Deren nichtdispersive **Phasengeschwindigkeiten** v_L (Longitudinalwelle) und v_T (Transversalwelle) resultieren, wie in Gl. 2.7 dargelegt, aus der elastischen Konstante C_{11} bzw. C_{44} und der Dichte ρ des Materials (ergänzend zeigt Gl. 2.7 weitere geläufige Formulierungen auf Basis der Ingenieurskonstanten E , G und ν).

$$v_L = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} = \sqrt{\frac{G(4G - E)}{\rho(3G - E)}} = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (2.7a)$$

$$v_T = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.7b)$$

Tab. 2.1: Formeln zur Berechnung der elastischen Konstanten C_{11} , C_{44} und C_{12} (Zielgrößen) anhand von zwei der drei Ingenieurskonstanten E , G und ν (Eingangsgrößen)

Zielgröße	Eingangsgrößen		
	E und G	E und ν	G und ν
C_{11}	$\frac{G(4G - E)}{3G - E}$	$\frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$	$\frac{2G(1 - \nu)}{1 - 2\nu}$
C_{12}	$\frac{G(E - 2G)}{3G - E}$	$\frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$	$\frac{2G\nu}{1 - 2\nu}$
C_{44}	G	$\frac{E}{2(1 + \nu)}$	G

Tab. 2.2: Formeln zur Berechnung der Ingenieurskonstanten E , G und ν (Zielgrößen) anhand von zwei der drei elastischen Konstanten C_{11} , C_{44} und C_{12} (Eingangsgrößen)

Zielgröße	Eingangsgrößen		
	C_{11} und C_{44}	C_{11} und C_{12}	C_{44} und C_{12}
E	$\frac{C_{44}(3C_{11} - 4C_{44})}{C_{11} - C_{44}}$	$\frac{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})}{C_{11} + C_{12}}$	$\frac{C_{44}(3C_{12} + 2C_{44})}{C_{12} + C_{44}}$
G	C_{44}	$\frac{C_{11} - C_{12}}{2}$	C_{44}
ν	$\frac{C_{11} - 2C_{44}}{2(C_{11} - C_{44})}$	$\frac{C_{12}}{C_{11} + C_{12}}$	$\frac{C_{12}}{2(C_{12} + C_{44})}$

Orthotropes linear-elastisches Materialmodell

Ein orthotropes linear-elastisches Material besitzt eine **richtungsabhängige** Elastizität, wobei das Material durch drei senkrechte Symmetrieebenen gekennzeichnet ist. Um dem Rechnung zu tragen, bezieht sich die Darstellung der Elastizität praktischerweise auf ein Koordinatensystem, dessen Hauptrichtungen mit den Richtungen der materiellen Orthotropieachsen identisch sind. Jede der von einem Achsenpaar dieses Koordinatensystems aufgespannten Ebenen, also die $x_1^+-x_2^+$ -, die $x_1^+-x_3^+$ - und die $x_2^+-x_3^+$ -Ebene, entspricht einer Symmetrieebene des Materials.

Im orthotropen Fall kann zur Beschreibung der Elastizität eine **Elastizitätsmatrix \mathbf{C}** genutzt werden, wie sie in Gl. 2.8 gezeigt ist. Wie beim isotropen Material sind neun der max. 21 verschiedenen Einträge besetzt bzw. von null verschieden. Diese Komponenten sind hier jedoch unabhängig voneinander, sodass für ein orthotropes Material eben neun verschiedene elastische Konstanten C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} und C_{66} sowie C_{12} , C_{13} und C_{23} existieren (von abgeleiteten Spezialfällen wie z. B. einem transversal-isotropen oder einem isotropen Materialverhalten abgesehen).

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ \text{sym.} & & & & C_{55} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Die Wellenausbreitung in einem orthotropen Material folgt komplizierteren Lösungen als im isotropen Fall. So können sich neben den reinen Longitudinal- und Transversalwellen zusätzlich sog. Quasi-Longitudinal- und Quasi-Transversalwellen ausbreiten. Hier werden jedoch ausschließlich Wellen adressiert, deren Ausbreitungs- und Polarisationsrichtungen laut der Theorie stets exakt mit den Richtungen der drei materiellen Orthotropieachsen zusammenfallen. Pro Ausbreitungsrichtung sind dann insgesamt drei reine Wellenmoden möglich, die typischerweise mit individuellen Geschwindigkeiten fortschreiten, und zwar eine reine Longitudinal- und zwei reine Transversalwellen.

Nachfolgend wird eine ebene Welle in einem orthotropen Material betrachtet, die sich in x_i^+ -Richtung (mit $i = 1, 2, 3$) ausbreitet und in x_j^+ -Richtung (mit $j = 1, 2, 3$) polarisiert ist. Stimmen die zwei Richtungen überein (also falls $i = j$) handelt es sich um eine reine Longitudinalwelle, deren Phasengeschwindigkeit $v_{ii}^{(L)}$ beträgt. Sind beide Richtungen hingegen senkrecht zueinander orientiert (also falls $i \neq j$), liegt eine reine Transversalwelle mit der Geschwindigkeit $v_{ij}^{(T)}$ vor. Der jeweils erste Index der beiden Geschwindigkeiten $v_{ii}^{(L)}$ und $v_{ij}^{(T)}$ gibt also stets die Ausbreitungsrichtung und der zweite Index die dazu entweder identische oder senkrechte Polarisationsrichtung an.

Abhängig von den elastischen Konstanten und der Dichte ρ eines orthotropen Materials formuliert Gl. 2.9 die **Phasengeschwindigkeiten** der drei verschiedenen Wellenmoden bei einer Ausbreitung in x_1^+ -Richtung. Gl. 2.10 und Gl. 2.11 zeigen die entsprechenden Zusammenhänge bezüglich der x_2^+ - und x_3^+ -Richtung. Die genannten, nichtdispersiven Phasengeschwindigkeiten hängen jeweils nur von einer elastischen Konstante ab, wobei nur Hauptdiagonalelemente der Elastizitätsmatrix \mathbf{C} auftreten. Für die Phasengeschwindigkeiten der longitudinalen Wellen sind die Konstanten C_{11} , C_{22} und C_{33} relevant. Die Geschwindigkeiten der transversalen Wellen hängen hingegen von C_{44} , C_{55} und C_{66} ab. Die Geschwindigkeiten der zwei Transversalwellen, bei denen die jeweilige Ausbreitungs- und die Polarisationsrichtung gegeneinander vertauscht sind, sind laut der Theorie stets paarweise identisch, also $v_{12}^{(T)} = v_{21}^{(T)}$, $v_{13}^{(T)} = v_{31}^{(T)}$ und $v_{23}^{(T)} = v_{32}^{(T)}$.

$$v_{11}^{(L)} = \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \quad (2.9a)$$

$$v_{12}^{(T)} = \sqrt{\frac{C_{66}}{\rho}} \quad (2.9b)$$

$$v_{13}^{(T)} = \sqrt{\frac{C_{55}}{\rho}} \quad (2.9c)$$

$$v_{22}^{(L)} = \sqrt{\frac{C_{22}}{\rho}} \quad (2.10a)$$

$$v_{21}^{(T)} = \sqrt{\frac{C_{66}}{\rho}} \quad (2.10b)$$

$$v_{23}^{(T)} = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} \quad (2.10c)$$

$$v_{33}^{(L)} = \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}} \quad (2.11a)$$

$$v_{31}^{(T)} = \sqrt{\frac{C_{55}}{\rho}} \quad (2.11b)$$

$$v_{32}^{(T)} = \sqrt{\frac{C_{44}}{\rho}} \quad (2.11c)$$

2.2.2 Eigenmoden und Eigenfrequenzen freier Körper

In diesem Abschnitt wird knapp auf die lineare Theorie bezüglich der für diese Arbeit so zentralen **Eigenschwingungen** freier Festkörper aus linear-elastischen Materialien eingegangen, wobei Dämpfung vernachlässigt wird. Weiterführende Informationen zu dieser Thematik finden sich u. a. in [Aul73a; Aul73b; Mig97].

Der **linearen Theorie** zufolge liegt jeder ungedämpften Eigenschwingung eines Körpers aus einem (ggf. auch inhomogenen und/oder anisotropen) linear-elastischen Material die in Gl. 2.12 [Aul73b] angegebene Bewegungsgleichung bzw. lokale Form der Impulsbilanz zugrunde (die genutzten Symbole sind in der nach Gl. 2.12 folgenden Textbox erläutert). Diese Gleichung, die an jedem materiellen Punkt erfüllt sein muss, formuliert das Gleichgewicht zwischen den mechanischen Spannungen bzw. den daraus resultierenden Kräften (linke Seite der Gleichung) und den Trägheitskräften (rechte Seite der Gleichung), die in jedem Fall mit einer Schwingungsverformung eines Körpers einhergehen.¹⁹

Die für einen freien Körper ohne eingeschränkte Ränder zu seinen Eigenmoden (in Form der Verschiebungen \mathbf{u}_k an jedem materiellen Punkt) sowie Eigenkreisfrequenzen ω_k bzw. Eigenfrequenzen $f_k = \omega_k/(2\pi)$ führenden konkreten **Lösungen** (mit $k = 1, 2, \dots$) von Gl. 2.12 können jedoch nur in Spezialfällen analytisch gefunden werden – allen voran für geometrisch einfache Körper wie Stäbe, Balken, Platten etc. Vor allem bei komplizierten Gegebenheiten werden daher numerische Näherungsverfahren wie die FEM zur Lösungsfindung eingesetzt (siehe Abschn. 2.2.3).

$$\nabla \cdot (\mathbf{c} : \nabla_s \mathbf{u}) = -\omega^2 \rho \mathbf{u} \quad (2.12)$$

Symbole in Gl. 2.12 & Gl. 2.13 ... jeweils mit $\nabla_s \mathbf{u} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + \nabla^T \mathbf{u})$

Nabla-Operator $\nabla \cdot (\dots) \rightarrow$ Divergenz (div)

Nabla-Operator $\nabla(\dots) \rightarrow$ Gradient (grad)

- $\mathbf{u} \rightarrow$ Verschiebungsvektor
- $\omega \rightarrow$ (Eigen-)Kreisfrequenz
- $V \rightarrow$ Volumen des Körpers (nur in Gl. 2.13)
- $\rho \rightarrow$ Dichte des Materials
- $\mathbf{c} \rightarrow$ Elastizitätstensor des Materials

$$\omega^2 = \frac{\int_V \nabla_s \mathbf{u} : \mathbf{c} : \nabla_s \mathbf{u} \, dV}{\int_V \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} \, dV} \quad (2.13)$$

¹⁹⁾ Der in Gl. 2.12 verkürzt geschriebene Ausdruck $\nabla_s \mathbf{u} = (1/2)(\nabla \mathbf{u} + \nabla^T \mathbf{u})$ entspricht der Definition des linearisierten Verzerrungstensors $\boldsymbol{\varepsilon}$. Somit umfasst die linke Seite der Gleichung (in Form des Terms $\mathbf{c} : \nabla_s \mathbf{u}$) den Spannungstensor $\boldsymbol{\sigma}$, der hierbei durch das zuvor in Gl. 2.1 des Abschnitts 2.2.1 angegebene lineare Elastizitätsgesetz (also $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon}$) abgebildet wird.

Während Gl. 2.12 generell auch beliebige Randbedingungen abdeckt, lässt sich u. a. für Körper mit freien Rändern die am Ende von S. 25 in Gl. 2.13 [Aul73b] angegebene Formulierung herleiten (bzgl. der Symbole ist wieder auf die Textbox verwiesen). Auf Basis dieser Gleichung lässt sich nachvollziehen, dass die Eigenfrequenzen eines freien Körpers sowie die zugehörigen Eigenmoden theoretisch (im dämpfungsfreien Fall) rein durch die **Massen- und Steifigkeitsverteilung** des Körpers definiert werden.²⁰ Da die Massen- und die Steifigkeitsverteilung aus der Geometrie des Körpers sowie aus den Dichte- und Elastizitätseigenschaften seines Materials resultieren – und zusätzlich von eventuell vorhandenen makroskopischen Defekten bzw. Fehlstellen wie Rissen, Lunkern, Einschlüssen etc. abhängen – bestimmen alle diese Bauteilcharakteristika in Summe die Eigenmoden und Eigenfrequenzen des Körpers. Dabei lassen sich die entsprechenden Zusammenhänge im Detail daran erkennen, dass die Geometrie, die Materialeigenschaften und eventuelle makroskopische Fehlstellen des Körpers wie folgt in Gl. 2.13 einfließen:

- **Geometrie** → in Form des Integrals über das Objektvolumen V
- **Materialeigenschaften** → mittels der Dichte ρ und des Elastizitätstensors \mathbf{c}
- **Makroskopische Defekte** → Bei makroskopischen Fehlern wie Rissen, Lunkern oder Einschlüssen handelt es sich um Stellen mit vergleichsweise reduzierten bzw. erhöhten Massen- und Steifigkeitscharakteristika, d. h. lokale Diskontinuitäten im Volumen mit abweichender Dichte ρ und/oder abweichendem Elastizitätstensor \mathbf{c} . Bei einem Riss ist z. B. zumindest die Steifigkeit in einem schmalen Bereich signifikant reduziert, wohingegen bei einem Lunker sowohl Dichte als auch Steifigkeit in einem Teilvolumen des Körpers »gegen null gehen«, was sich schließlich mehr oder weniger deutlich in den charakteristischen Eigenmoden und Eigenfrequenzen eines entsprechend fehlerhaften Körpers widerspiegelt.

2.2.3 Finite-Elemente-Methode (FEM)

Zur numerischen Berechnung der Eigenmoden und Eigenfrequenzen von Körpern wurde im Verlauf der vorliegenden Arbeit die **Finite-Elemente-Methode (FEM)** eingesetzt. Da eine umfassende Darstellung der FEM-Theorie den Rahmen sprengen würde und die FEM zudem lediglich als leistungsstarkes Werkzeug zur Datenerzeugung genutzt wurde, wird hier nur in aller Kürze auf das Verfahren eingegangen. Die folgenden Informationen und Formeln basieren auf [Ste10; Kle15; Nas15].

Per FEM lassen sich numerische **Näherungslösungen** verschiedenster, mittels Differentialgleichungen formulierter physikalischer Problemstellungen ermitteln. Hierzu wird das Lösungsgebiet bzw. ein strukturmechanisch (z. B. hinsichtlich seiner Verformung infolge einer äußeren Belastung oder seiner Eigenfrequenzen) zu untersuchender Körper in einer

²⁰⁾ vgl. ein ungedämpftes Federpendel ($m\ddot{x} + cx = 0$), bestehend aus einer punktförmigen Masse sowie einer masselosen linearen Feder, das infolge einer einmaligen Auslenkung harmonisch mit einer nur von der Masse m und der Federkonstante c abhängigen Eigenkreisfrequenz $\omega_0 = \sqrt{c/m}$ schwingt

FEM-Software modelliert und zugleich in viele, geometrisch einfache finite (d. h. endlich kleine) Elemente diskretisiert, die über ihre Knotenpunkte verknüpft sind. Basierend auf der schwachen Formulierung der lokalen Impulsbilanz (wobei im Fall einer dynamischen Problemstellung bei der Formulierung der Gleichgewichtsbedingung neben inneren Spannungen und ggf. äußeren Belastungen auch beschleunigungsproportionale Trägheitskräfte sowie Dämpfung zu berücksichtigen sind) und den räumlichen Verknüpfungen der finiten Elemente wird ein diskretes Gleichungssystem assembliert. Dieses beschreibt die betrachtete Problemstellung konkret, d. h. entsprechend den in der FEM-Software eingestellten Geometrie- und Materialeigenschaften, Belastungen, Anfangs- und Randbedingungen etc. Das erstellte Gleichungssystem wird danach (eventuell zeitdiskretisiert) numerisch gelöst, wobei i. d. R. die Knotenpunktverschiebungen die primären Unbekannten darstellen und Verschiebungen auf Elementebene mit einfachen Ansatzfunktionen approximiert werden. Im Endeffekt führt die Lösung zum gesuchten Verschiebungsfeld und den damit verbundenen Verzerrungen und den Spannungen – bzw. je nach Problemstellung zu den Eigenmoden und Eigenfrequenzen des analysierten Körpers.

Im Kontext der FEM lässt sich die Problemstellung ungedämpfter linearer Bauteileigenschaften approximativ mittels eines diskreten **Gleichungssystems**, im Detail ein homogenes lineares Differentialgleichungssystem zweiter Ordnung, repräsentieren wie es in Gl. 2.14 angegeben ist. Hierbei sind \mathbf{M} und \mathbf{K} die aus den Einzelbeiträgen sämtlicher finiten Elemente zusammengesetzte Massenmatrix bzw. die Steifigkeitsmatrix des analysierten Systems bzw. Körpers. Der Vektor \mathbf{U} stellt die Knotenpunktverschiebungen und $\ddot{\mathbf{U}}$ deren zweite Ableitungen nach der Zeit, also die Beschleunigungen, dar.

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2.14)$$

Unter Verwendung eines harmonischen Lösungsansatzes vom Typ $\mathbf{U} = \boldsymbol{\varphi} \cdot \exp(i\omega t)$ für die von der Zeit t abhängigen Verschiebungen \mathbf{U} und der Forderung nach Gültigkeit zu allen Zeitpunkten ergibt sich aus Gl. 2.14 das in Gl. 2.15 formulierte Eigenwertproblem; $\boldsymbol{\varphi}$ stellt hierbei einen zeitunabhängigen Eigenvektor bzw. eine Eigenschwingungsform des jeweiligen Körpers und ω die zugehörige Eigenkreisfrequenz dar.

$$\left(\mathbf{K} - \omega^2 \cdot \mathbf{M}\right) \boldsymbol{\varphi} = 0 \quad (2.15)$$

Nichttriviale Lösungen von Gl. 2.15 erfordern die Erfüllung von Gl. 2.16. Dabei ist jede Lösung $\lambda_k = \omega_k^2$ (mit $k = 1, 2, \dots$) ein Eigenwert und $\omega_k = \sqrt{\lambda_k}$ ist die damit assoziierte Eigenkreisfrequenz, aus der die k -te Eigenfrequenz $f_k = \omega_k/(2\pi)$ des Körpers folgt. Wird die k -te Lösung $\lambda_k = \omega_k^2$ wieder in Gl. 2.15 eingesetzt, ergibt sich der k -te Eigenvektor $\boldsymbol{\varphi}_k$. Dieser beschreibt die k -te Eigenmode des analysierten Körpers bzw. die Knotenpunktverschiebungen, die die Schwingungsform charakterisieren.

$$\det\left(\mathbf{K} - \omega^2 \cdot \mathbf{M}\right) = 0 \quad (2.16)$$

2.2.4 Mathematisch-statistische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden Grundlagen aus dem Bereich der mathematischen **Statistik** zusammengefasst. Diese wurden u. a. herangezogen, um die Verteilungseigenschaften der im Rahmen des Anwendungsszenarios der Arbeit betrachteten Teile festzulegen oder um Daten statistisch zu quantifizieren. Da die hier getätigten Aussagen teilweise nur im Fall absolutstetiger reeller Zufallsvariablen gelten bzw. sinnvoll sind, für die außerdem sowohl ihre Erwartungswerte als auch ihre Varianzen existieren und endlich sind, sind hier auch immer ausschließlich ebensolche Zufallsvariablen gemeint.²¹ Die dargelegten Inhalte und Formeln (und vereinzelt weitere für die Arbeit herangezogene mathematisch-statistische Grundlagen) sind in einschlägigen Lehr- und Fachbüchern zu finden, siehe z. B. [Pap11; Sch12; Jan05; Mit11; Hei79; Boh92].

Dichte- und Verteilungsfunktion einer stetigen Zufallsvariablen

Die **Dichtefunktion** $f_X(x)$ einer stetigen Zufallsvariablen X charakterisiert deren Wahrscheinlichkeitsverteilung vollständig. Dasselbe gilt für die **Verteilungsfunktion** $F_X(x)$, die aus dem Integral über die Dichtefunktion folgt. Während die nichtnegative Dichtefunktion $f_X(x)$ die Verteilung von X mit einem Flächeninhalt von in Summe 1 angibt, beschreibt die stetige, monoton wachsende Verteilungsfunktion $F_X(x)$ mit einem Wertebereich von 0 bis 1 die Wahrscheinlichkeit P , dass der realisierte Wert von X maximal x beträgt, d. h. $F_X(x) = P(X \leq x)$. So lässt sich, wie in Gl. 2.17 dargelegt, mittels $f_X(x)$ bzw. $F_X(x)$ u. a. die Wahrscheinlichkeit angeben, dass die Zufallsvariable X einen Wert zwischen zwei reellen Zahlen a_1 und a_2 (mit $a_1 \leq a_2$) erzielt.

$$P(a_1 \leq X \leq a_2) = \int_{a_1}^{a_2} f_X(x) dx = F_X(a_2) - F_X(a_1) \quad (2.17)$$

Ein **p -Quantil** x_p der reellen Zufallsvariablen X bzw. ihrer Verteilung ist der Wert, der die per Dichtefunktion $f_X(x)$ beschriebene Fläche so aufteilt, dass unterhalb von x_p ein Anteil p und oberhalb davon der restliche Anteil $q = (1 - p)$ der Wahrscheinlichkeitsdichte liegt (mit $0 \leq p \leq 1$). Bei streng monotoner Verteilungsfunktion $F_X(x)$ resultiert das dann eindeutige p -Quantil x_p aus der Relation $F_X(x_p) = p$ durch Invertierung.

Zentrale Kennzahlen einer stetigen Zufallsvariablen

Zentrale Kennzahlen, die eine stetige Zufallsvariable X hinsichtlich Lage und Streuung ihrer Wahrscheinlichkeitsverteilung bzw. Wahrscheinlichkeitsdichte quantifizieren, sind der **Erwartungswert** μ_X und die **Varianz** σ_X^2 . Gl. 2.18 gibt an, wie Erwartungswert und Varianz mithilfe der Dichtefunktion $f_X(x)$ von X definiert sind. So beschreibt der

²¹⁾ Eine Zufallsvariable mit absolutstetiger Wahrscheinlichkeitsverteilung ist durch eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion beschreibbar. Im Text werden neben *Wahrscheinlichkeitsverteilung* und *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion* auch Synonyme wie *Verteilung* bzw. *Dichtefunktion* genutzt.

Erwartungswert μ_X (siehe Gl. 2.18a) der Zufallsvariablen X das Zentrum der Verteilung und damit den Wert, den X bei unendlichfacher Realisierung im Mittel erzielen würde. Die Varianz σ_X^2 (siehe Gl. 2.18b) quantifiziert die zu erwartende mittlere quadratische Abweichung von X zu ihrem Erwartungswert. Die **Standardabweichung** $\sigma_X = \sqrt{\sigma_X^2}$ ist die Quadratwurzel aus der Varianz. Sie beschreibt somit ebenfalls die Streuung von X bzw. die Breite der Verteilung, aber (im Gegensatz zur Varianz) in derselben Einheit wie X . Der **Variationskoeffizient** ist als die auf den Erwartungswert μ_X (nur für den Fall $\mu_X \neq 0$) normierte Standardabweichung σ_X definiert.

$$\mu_X = \text{Erwartungswert}(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f_X(x) \, dx \quad (2.18a)$$

$$\sigma_X^2 = \text{Varianz}(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_X)^2 \cdot f_X(x) \, dx \quad (2.18b)$$

Normalverteilte und stetig gleichverteilte Zufallsvariablen

Für die im Rahmen der Arbeit primär eingesetzten normalverteilten bzw. stetig gleichverteilten Zufallsvariablen, die als Wahrscheinlichkeitsverteilung eine Normalverteilung bzw. eine stetige Gleichverteilung aufweisen, gilt Folgendes:

- **Normalverteilung** → Gl. 2.19 umfasst die Dichtefunktion $f_X(x)$ einer normalverteilten Zufallsvariablen X . Die in der Gleichung auftretenden Parameter μ_X und σ_X^2 bzw. σ_X entsprechen unmittelbar dem Erwartungswert μ_X und der Varianz σ_X^2 bzw. der Standardabweichung σ_X von X . Normalverteilungen nehmen in vielen Bereichen eine zentrale Rolle ein, was u. a. daraus resultiert, dass Verteilungen, die sich aus zahlreichen (jeweils anteilig geringen und unabhängigen) Zufallseinflüssen ergeben, dem zentralen Grenzwertsatz zufolge näherungsweise normalverteilt sind. Normalverteilungen werden z. B. genutzt, um geometrische Maßabweichungen von Serienteilen oder zufällige Messwertvariationen zu beschreiben (bei welchen jeweils viele Einflussgrößen eine Rolle spielen). Eine normalverteilte Zufallsvariable X mit dem Erwartungswert $\mu_X = 0$ und der Varianz $\sigma_X^2 = 1$ wird als standardnormalverteilt bezeichnet und ihre Verteilung ist die Standardnormalverteilung. Jede mit einem beliebigen Erwartungswert μ_X und einer beliebigen Standardabweichung σ_X normalverteilte Zufallsvariable X lässt sich durch Standardisierung in eine Zufallsvariable $Y = (X - \mu_X)/\sigma_X$ mit Standardnormalverteilung transformieren.

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_X}{\sigma_X}\right)^2\right) \quad (\text{mit } -\infty < x < \infty) \quad (2.19)$$

- **Stetige Gleichverteilung** → Gl. 2.20 nennt die Dichtefunktion $f_X(x)$ einer auf dem Intervall von g_1 bis g_2 stetig gleichverteilten Zufallsvariablen X , die folglich Werte zwischen g_1 und g_2 annehmen kann. Für den Erwartungswert gilt in dem Fall $\mu_X = (g_1 + g_2)/2$ und die Varianz von X ist $\sigma_X^2 = (1/12)(g_2 - g_1)^2$.

$$f_X(x) = \frac{1}{g_2 - g_1} \quad (\text{für } x \in [g_1, g_2], \text{ sonst gilt } f_X(x) = 0) \quad (2.20)$$

Abb. 2.1 visualisiert die Dichtefunktion $f_X(x)$ und die Verteilungsfunktion $F_X(x)$ einer normalverteilten sowie einer gleichverteilten Zufallsvariablen X .

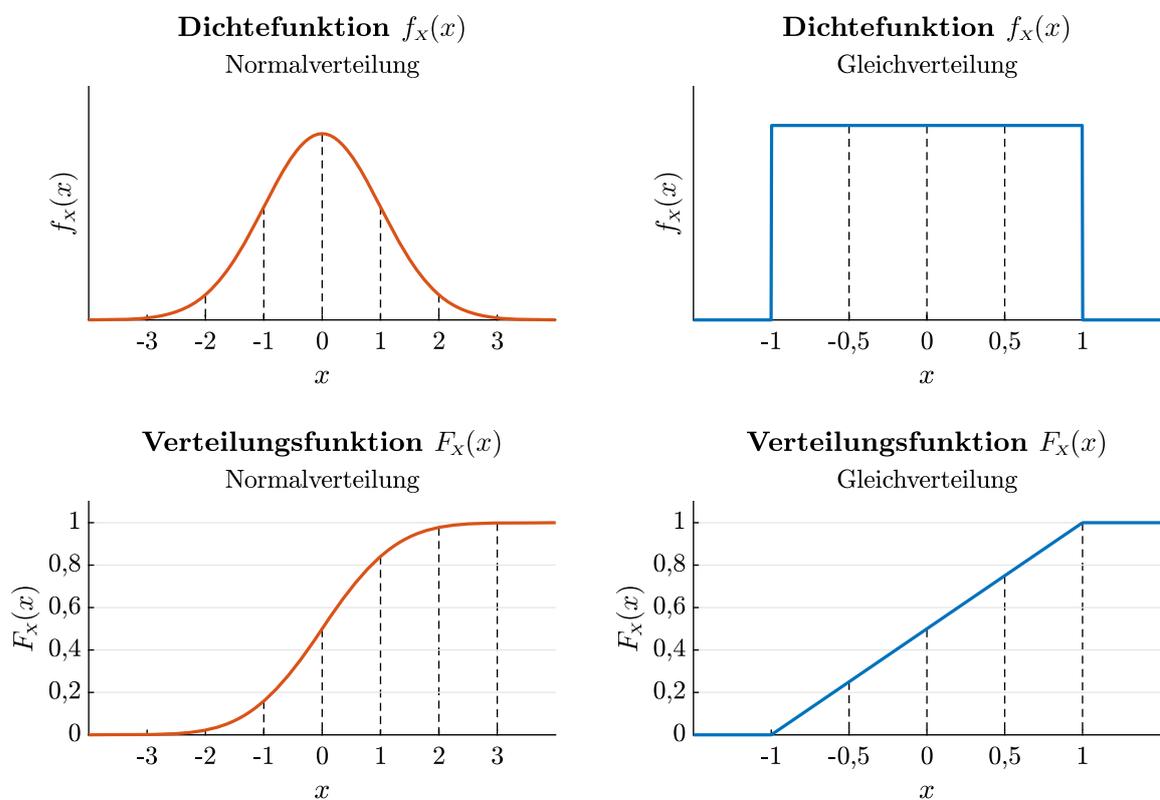


Abb. 2.1: Dichtefunktion $f_X(x)$ (oben) und Verteilungsfunktion $F_X(x)$ (unten) einer mit dem Erwartungswert $\mu_X = 0$ und der Standardabweichung $\sigma_X = 1$ normalverteilten (links) sowie einer auf dem Intervall $[-1, 1]$ stetig gleichverteilten (rechts) Zufallsvariablen X

Für normalverteilte Zufallsvariablen mit dem Erwartungswert μ_X sowie der Varianz σ_X^2 bzw. der Standardabweichung σ_X gilt, dass ihre Realisierungen zu ...

- ... ca. 68,27% im Intervall $\mu_X \pm 1\sigma_X$ liegen (»Ein-Sigma-Intervall«).
- ... ca. 95,45% im Intervall $\mu_X \pm 2\sigma_X$ liegen (»Zwei-Sigma-Intervall«).
- ... ca. 99,73% im Intervall $\mu_X \pm 3\sigma_X$ liegen (»Drei-Sigma-Intervall«).

Schätzfunktionen für den Erwartungswert und die Varianz

Eine Stichprobe, bestehend aus N zufallsbehafteten, stochastisch unabhängigen Werten x_1, \dots, x_N bzgl. eines Merkmals X (es könnte sich z. B. um die Abmessungen mehrerer Teile oder um streuende Daten aus wiederholten Messungen handeln) kann als wiederholte Realisierung einer stetigen Zufallsvariablen interpretiert werden. Tatsächlich wird aber jeder Einzelwert x_i als Realisierung einer eigenen **Stichprobenvariablen** X_i (mit $i = 1, \dots, N$) gesehen, sodass die N Werte x_1, \dots, x_N den beispielsweise im Rahmen von N Messungen festgestellten Realisierungen der N Stichprobenvariablen X_1, \dots, X_N entsprechen. Dabei werden X_1, \dots, X_N als unabhängig und stets mit dem Erwartungswert μ_X sowie der Varianz σ_X^2 identisch verteilt angenommen, wobei μ_X und σ_X^2 zugleich der Erwartungswert und die Varianz des betrachteten Merkmals X sind.

Auf Grundlage dieser statistischen Modellierung lassen sich das **Stichprobenmittel** \bar{X} nach Gl. 2.21a und die korrigierte **Stichprobenvarianz** S_X^2 nach Gl. 2.21b definieren, die Schätzfunktionen (auch Schätzer genannt) für den Erwartungswert μ_X und für die Varianz σ_X^2 des Merkmals X sind. Zu beachten ist, dass es sich weder bei \bar{X} noch bei S_X^2 um konkrete Werte handelt, sondern es sind Zufallsvariablen mit Verteilungen, deren Erwartungswerte dem zumeist unbekanntem (zu schätzenden) Erwartungswert μ_X bzw. der Varianz σ_X^2 des Merkmals X entsprechen. Folglich sind \bar{X} und S_X^2 erwartungstreue Schätzer, d. h. solche, die den Erwartungswert respektive die Varianz ohne einen systematischen Fehler und somit im statistischen Mittel richtig schätzen.

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (2.21a)$$

$$S_X^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \quad (2.21b)$$

Kennzahlen einer Stichprobe und Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit

Bezüglich der zahlreichen Kennzahlen und Methoden, mit denen eine Zufallsstichprobe bzw. N konkrete Ausprägungen x_1, \dots, x_N eines Merkmals X quantifiziert und zudem Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit gezogen werden können, sind für die Arbeit v. a. folgende Aspekte samt den in Gl. 2.22 angegebenen Formeln relevant:

- Der arithmetische **Mittelwert** \bar{x} (siehe Gl. 2.22a) der Werte x_1, \dots, x_N gibt die Lage dieser Werte an, während die empirische **Varianz** s_x^2 (siehe Gl. 2.22b) deren Streuung quantifiziert. Zusätzlich sind \bar{x} und s_x^2 Schätzwerte für den Erwartungswert μ_X und die Varianz σ_X^2 des Merkmals X auf Basis der o. g. Schätzer \bar{X} (Stichprobenmittel) und S_X^2 (Stichprobenvarianz). Mithilfe von s_x^2 lassen sich die empirische Standardabweichung $s_x = \sqrt{s_x^2}$ sowie der empirische Variationskoeffizient $v_x = (s_x/\bar{x})$ als weitere Streuungsmaße berechnen.

- Der aus der Standardabweichung s_x und der Anzahl N der Datenwerte x_1, \dots, x_N folgende empirische **Standardfehler** $u_x = (s_x/\sqrt{N})$ beschreibt die Unsicherheit des Mittelwerts \bar{x} (im Sinne einer Schätzung für μ_x) bezogen auf den unbekanntem Erwartungswert μ_x des Merkmals X . Unter der Annahme einer Normalverteilung von X gestattet der Standardfehler die Konstruktion eines **Konfidenzintervalls** der Form $\bar{x} \pm t_N \cdot u_x$ um den Mittelwert, das den wahren Erwartungswert μ_x von X mit einem spezifizierten Konfidenzniveau $q = (1 - p)$ enthält (wobei $0 \leq p \leq 1$ das Irrtumsniveau ist). Der Faktor t_N ist das $(1 - p/2)$ -Quantil der Studentischen t -Verteilung mit $N - 1$ Freiheitsgraden. Zum Beispiel resultiert mit $p = 0,05$ ein 95-%-Konfidenzintervall, sodass das Intervall $\bar{x} \pm t_N \cdot u_x$ den Erwartungswert μ_x des Merkmals X mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% beinhaltet.
- Falls die Werte x_1, \dots, x_N auf eine Normalverteilung des Merkmals X hindeuten, beschreiben die empirischen **Intervalle** $\bar{x} \pm 1s_x$, $\bar{x} \pm 2s_x$ und $\bar{x} \pm 3s_x$ die Wertebereiche, in denen rund zwei Drittel, ca. 95% oder fast alle Stichprobenwerte bzw. die möglichen Merkmalsausprägungen liegen (vgl. die oben genannten Ein-, Zwei- und Drei-Sigma-Intervalle bzgl. der Grundgesamtheit). Im Fall einer unbekanntem Verteilung von X bieten sich empirische **Quantile** wie z. B. das 0,25-Quantil $x_{0,25}$ (unteres Quartil), das 0,5-Quantil $x_{0,5}$ (Median) und das 0,75-Quantil $x_{0,75}$ (oberes Quartil) an, um Intervalle anzugeben, welche einen bestimmten Anteil der Werte abdecken. Hierbei gilt, dass ein empirisches p -Quantil aussagt, dass der Anteil p der Stichprobenwerte höchstens den Quantilswert aufweist.
- Der empirische **Korrelationskoeffizient** r_{xy} (siehe Gl. 2.22c) charakterisiert mit Werten zwischen -1 und 1 den Grad des linearen Zusammenhangs von zwei Stichproben bzw. Datenreihen x_1, \dots, x_N und y_1, \dots, y_N (in Gl. 2.22c sind \bar{x} und \bar{y} die jeweiligen Stichprobenmittelwerte). Je stärker der lineare Zusammenhang der Daten ist, desto zahlenmäßig größere Werte nimmt der Korrelationskoeffizient an, wobei das Vorzeichen zeigt, ob die Datenwerte positiv oder negativ korreliert sind. Kleine Werte deuten darauf hin, dass zumindest keine starke lineare Abhängigkeit zwischen den zugrundeliegenden Merkmalen X und Y existiert – jedoch sind diese dann nicht zwangsläufig stochastisch unabhängig, denn es könnte auch eine nicht-lineare Abhängigkeit vorliegen.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.22a)$$

$$s_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.22b)$$

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.22c)$$

2.2.5 IO/NIO-Klassifizierungen und Fehlrteile

ZfP-Qualitätsanalysen von Serienteilen zielen häufig auf **binäre Prüferscheidungen** ab. Das heißt, ein Prüfobjekt wird in letzter Instanz als IO bzw. Gut-Teil oder als NIO bzw. Schlecht-Teil eingestuft. Hierbei können getroffene Prüfurteile (verglichen mit den wahren Qualitätszuständen der untersuchten Objekte) entweder richtig oder falsch sein, sodass es sich ggf. um Fehlrteile bzw. **Fehlklassifizierungen** handelt. Abb. 2.2 veranschaulicht diese Problematik grafisch.

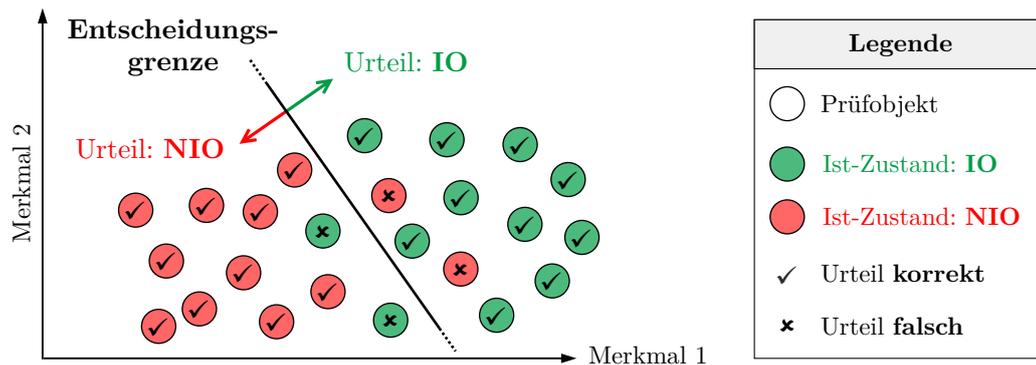


Abb. 2.2: Binäres IO/NIO-Prüfproblem und dabei mögliche Fehlklassifizierungen

In der Literatur sind zahlreiche **Gütekriterien** zu finden, mit denen ein binärer Klassifikator analysiert bzw. die Korrektheit der von ihm getroffenen IO/NIO-Prüfurteile auf statistische Weise quantifiziert werden kann, siehe z. B. [Sok09]. Zwei solcher Kriterien, die Werte zwischen 0 und 1 (0% bis 100%) annehmen können und die als Schätzer für entsprechende bedingte Wahrscheinlichkeiten fungieren, sind die folgenden:

- **TPR** (*true positive rate*, dt.: Richtig-positiv-Rate, Sensitivität)
 - Anteil der NIO-Teile, die korrekt als NIO klassifiziert wurden
 - $TPR = (\text{Anzahl NIO-bewerteter NIO-Teile}) / (\text{Anzahl geprüfter NIO-Teile})$
- **TNR** (*true negative rate*, dt.: Richtig-negativ-Rate, Spezifität)
 - Anteil der IO-Teile, die korrekt als IO klassifiziert wurden
 - $TNR = (\text{Anzahl IO-bewerteter IO-Teile}) / (\text{Anzahl geprüfter IO-Teile})$

In Form der Differenzen zu 100% implizieren die TPR und die TNR zugleich die Anteile der falsch beurteilten Objekte, d. h. den Anteil der fälschlicherweise als IO klassifizierten NIO-Objekte und den Anteil der als NIO bewerteten IO-Teile. Im medizinischen Bereich meint »positiv« meist das Vorhandensein einer Erkrankung, während »negativ« gesunde Individuen bezeichnet. Dies diene als Analogie für die Zuordnung der binären Qualitätsstufen zur »positiv-Gruppe« (→ NIO-Teile) bzw. zur »negativ-Kategorie« (→ IO-Teile). Aus mathematischer Perspektive spielt die Zuordnung keinerlei Rolle, sie ist im Grunde beliebig. Um Missverständnisse zu vermeiden, werden daher im Dokument anstatt TPR und TNR stets die zwei synonym gemeinten Begrifflichkeiten *IO-Erkennungsrate* (TNR) und *NIO-Erkennungsrate* (TPR) verwendet.

3 Konzept: Simulationsbasiertes ART-Training

Ausgehend von der in Kap. 1 erläuterten Vision eines alternativen ART-Ansatzes wurde ein eigenes **Konzept für ein simulationsbasiertes ART-Training** erarbeitet. Dieses Konzept wurde weitestgehend allgemeingültig gestaltet, sodass es vom Grundsatz her für beliebige ART-Prüfaufgaben passfähig ist.

Der zentrale Unterschied zum konventionellen ART-Ansatz besteht darin, dass sich das im Rahmen der Arbeit entwickelte Konzept bzw. ein entsprechendes simulationsbasiertes ART-Training auf **synthetische Trainingsdaten** stützt. Diese Daten werden, anstelle einer rein experimentell erzeugten Datenbasis, zur Ermittlung des für eine geplante ART-Serienprüfung notwendigen Klassifikators herangezogen. Die synthetischen Daten werden simulationsbasiert erzeugt. Das heißt, dass sie zwar primär mittels einer leistungsfähigen Simulationssoftware berechnet werden, der Prozess der Datenerzeugung darüber hinaus jedoch noch weitere optionale bzw. obligatorische Bausteine berücksichtigt. Die fertigen Trainingsdaten umfassen neben simulationsbasiert erzeugten synthetischen Eigenschwingungsdaten zahlreicher (nicht physisch existierender) IO- und NIO-Trainingsteile zudem deren zur Datenerzeugung spezifizierte Qualitätszustände als zugeordnete Zusatzinformationen. Es handelt sich somit, wie i. d. R. auch bei experimentellen ART-Trainingsdaten, um gelabelte Eigenschwingungsdaten, welche mit den bekannten Qualitätszuständen der Trainingsteile verknüpft sind.

Die Art und der notwendige Informationsgehalt der im Hinblick auf eine konkrete ART-Prüfaufgabe zu erzeugenden synthetischen **Eigenschwingungsdaten** sind anwendungsspezifisch, weshalb dieser unspezifische Begriff hier bewusst verwendet wird. Denn es ist entscheidend, wie sich die per ART zu prüfenden Teile schwingungstechnisch verhalten bzw. wie sich NIO-Teile mit qualitätsrelevanten Anomalien in ihren Eigenschwingungscharakteristika von IO-Objekten unterscheiden. Abhängig von den jeweiligen Anomalien gilt für NIO-Teile im Vergleich zu IO-Objekten (und für die daraus resultierenden Möglichkeiten zur IO/NIO-Trennung mittels ART) beispielsweise Folgendes:

- Lunckerartige Defekte sowie geometrische Fehler äußern sich erfahrungsgemäß v. a. in verschobenen (ggf. auch in fehlenden/zusätzlichen) Eigenfrequenzen. Wird also auf die Erkennung von Teilen mit solchen Anomalien abgezielt, kann es daher ziel führend und ausreichend sein, ausschließlich (ungedämpfte) **Eigenfrequenzwerte** zu berechnen und als synthetische Eigenschwingungsdaten zu nutzen.
- Mikrostrukturelle Unregelmäßigkeiten bzw. Gefügeentartungen können sich durch deutlich veränderte Dämpfungscharakteristika zeigen. Wird auf solche Anomalien fokussiert, sind ggf. die ursächlichen **Dämpfungsmechanismen** zu beachten und in geeigneter Form in den synthetischen Daten abzubilden.

- Falls die Identifizierung von Teilen mit schmalen Rissen angestrebt wird, kann es ungeachtet der simulationstechnischen Herausforderungen erforderlich sein, **Nicht-linearitäten** wie Rissufer-Reibung/Klappern im Zuge der Datengenerierung einzubeziehen und in die synthetischen Trainingsdaten zu integrieren.

Abb. 3.1 schematisiert das entwickelte Konzept mit den zentralen Schritten eines simulationsbasierten ART-Trainings. In den drei nach der Abbildung folgenden **Textboxen** sind die Schritte am Beispiel einer beliebigen ART-Prüfaufgabe beschrieben, bei der auf binäre IO/NIO-Prüfentscheidungen bzw. auf die Detektion von fehlerhaften Serienteilen mit qualitätskritischen Anomalien abgezielt wird.

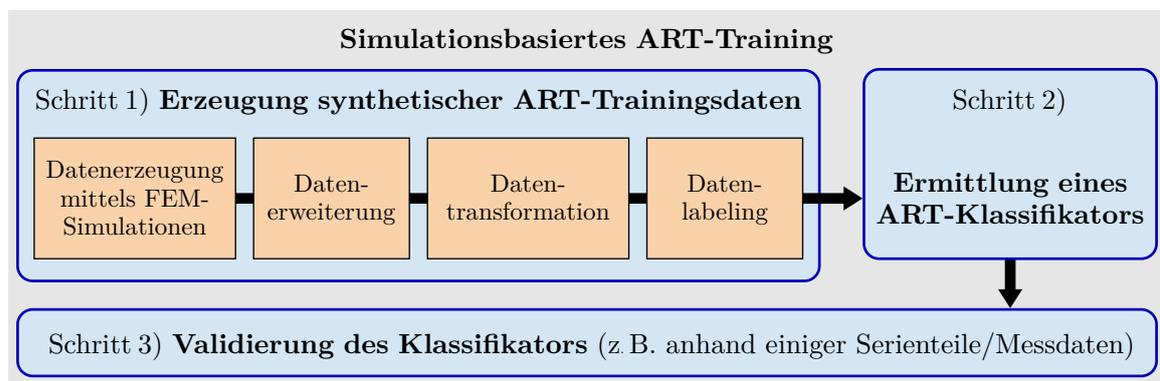


Abb. 3.1: Zentrale Schritte des Konzepts für ein simulationsbasiertes ART-Training

Schritt 1) Erzeugung synthetischer ART-Trainingsdaten

Der erste Schritt ist die **Erzeugung synthetischer ART-Trainingsdaten**. Hierbei sind die dem jeweiligen Prüfproblem zugrundeliegenden strukturmechanischen Gegebenheiten repräsentativ zu berücksichtigen, d. h. der adressierte Teiletyp, die zu erwartenden Geometrie- und Materialeigenschaften der zu analysierenden Teile einschließlich zulässiger Abweichungen von der Sollbeschaffenheit sowie qualitätsrelevante Anomalien mit ihren möglichen Variationen.

Unter Einbeziehung dieser Aspekte werden zahlreiche geringfügig unterschiedliche Trainingsteile beschrieben, die in ihren strukturmechanischen Eigenschaften variieren. Die Teile können dabei zufällig nach dem Prinzip der Monte-Carlo-Methode oder im Sinne eines voll- bzw. teilfaktoriellen Versuchsplans definiert werden. Die Trainingsteile werden schließlich im Hinblick auf ihr jeweiliges Eigenschwingungsverhalten simuliert, wozu die FEM als Mittel erster Wahl erachtet wird. Daraus resultieren berechnete, von der jeweiligen Bauteilstruktur abhängige synthetische Eigenschwingungsdaten. Die Simulationen sind dabei wie oben geschildert auf die Eigenschwingungscharakteristika auszurichten, auf Basis derer mutmaßlich belastbare IO/NIO-Klassifizierungen erreicht werden können.

Um den Umfang der Daten sowie den Detaillierungsgrad der simulationstechnisch abgebildeten Gegebenheiten mit geringem Berechnungsaufwand zu erhöhen, folgt optional eine effiziente Erweiterung der Daten. Diese kann z. B. per Interpolation zwischen den zuvor mittels einer leistungsfähigen Simulationssoftware berechneten Bauteilkonfigurationen umgesetzt werden.

Danach schließt sich eine obligatorische Datentransformation in die »Messwelt« an. Diese hat den Zweck, die (i. d. R. unvermeidbaren) grundsätzlichen Abweichungen der synthetischen Datenbasis gegenüber entsprechenden Messdaten bestmöglich zu eliminieren. Zur Umsetzung werden z. B. einige Teile aus der adressierten Serienfertigung entnommen und per ART charakterisiert. Auf Grundlage eines Vergleichs der gemessenen Schwingungsdaten mit Simulationsdaten, die sich auf digitale Zwillinge der Teile beziehen, kann dann eine Anpassungsstrategie erarbeitet und auf die umfangreichen synthetischen Eigenschwingungsdaten angewandt werden.

Zuletzt werden die generierten synthetischen Trainingsdaten geeignet strukturiert. Sie werden entsprechend der abgebildeten Qualitätszustände in ein zweckmäßiges Klassensystem eingeordnet bzw. dazu passend gelabelt. Für den hier betrachteten Fall einer angestrebten IO/NIO-Bewertung werden die IO-Trainingsteile und ihre Daten beispielsweise einer einzigen IO-Klasse und die NIO-Trainingsteile mit ihren Daten einer einzigen NIO-Klasse zugeordnet.

Schritt 2) Ermittlung eines ART-Klassifikators

Der zweite Schritt ist die **Ermittlung eines ART-Klassifikators** auf Basis der synthetischen Trainingsdaten. Wenngleich die diesbezügliche Herangehensweise im Detail wesentlich vom jeweiligen Prüfproblem abhängt, muss ein auf synthetischen Daten fußender Klassifikator nicht zwangsläufig vollkommen anders gestaltet bzw. ermittelt werden als auf Basis experimenteller Trainingsdaten. Je nach Design und Umfang der synthetischen Daten ergeben sich ggf. jedoch besondere Möglichkeiten. So könnte eine umfangreiche, geeignet konditionierte synthetische Datenbasis u. a. die Verwendung hochperformanter algorithmischer Methoden für den Klassifikator erlauben, z. B. den Einsatz von KI-Verfahren.

Schritt 3) Validierung des Klassifikators

Der finale dritte Schritt ist die (optionale) **Validierung** des ermittelten Klassifikators anhand einiger Serienteile bzw. experimentell an diesen erfassten Eigenschwingungsdaten. Sind die Ist-Qualitätszustände der Teile (durch Referenzanalysen etc.) bekannt, können seitens des Klassifikators bzgl. der Teile getroffene Prüfurteile im Vergleich evaluiert und statistisch analysiert werden.

Die Performance eines aus synthetischen ART-Trainingsdaten abgeleiteten Klassifikators steht und fällt sicherlich mit dem Umfang, dem Detaillierungsgrad, dem Informationsgehalt und der Qualität der Daten, wobei grundsätzlich ein, verglichen mit experimentellen Trainingsdaten, deutlich erhöhter Stichprobenumfang sowie eine wesentlich detailliertere Berücksichtigung unterschiedlicher Bauteilkonfigurationen als förderlich gesehen werden. Jedoch lassen sich gewisse **Anforderungen** identifizieren, die keineswegs leicht erfüllbar sind. So müssen synthetische ART-Trainingsdaten so gestaltet werden, dass ihr Informationsgehalt und ihre Qualität in mehreren Aspekten mit entsprechenden anwendungsspezifischen Experimentaldaten vergleichbar sind. Das heißt:

- Synthetische ART-Trainingsdaten müssen die später per ART zu prüfenden Teile in Bezug auf die **Geometrie**, das **Material** und potentielle **Anomalien** repräsentieren, und zwar möglichst realitätsgetreu. Sachverhalte wie zulässige Variationen in der Bauteilstruktur und mögliche qualitätskritische Defektausprägungen sollten integriert und hinreichend genau abgebildet werden. Idealerweise wird die gesamte Bandbreite der zu erwartenden IO- und NIO-Zustände »vollständig« sowie präzise durch die Trainingsdaten abgedeckt bzw. abgebildet.
- Die synthetischen ART-Trainingsdaten müssen gleichzeitig die spezifischen **Eigenschwingungscharakteristika** quantitativ präzise wiedergeben. Gegenüber experimentell ermittelten Schwingungsdaten bzw. entsprechenden Messwerten der später zu prüfenden Serienteile dürfen keine nennenswerten grundlegenden Abweichungen existieren. Im Zuge der obligatorischen Transformation in die »Messwelt« werden die simulationsbasiert generierten synthetischen Schwingungsdaten daher an Messdaten angepasst. Dabei müssen v. a. die systematischen Abweichungen bestmöglich eliminiert werden. Im Idealfall werden im Rahmen der Datentransformation zudem vermeintliche Zufallseffekte synthetisiert, die z. B. auf feinere, durch die vorherigen datenerzeugenden Schritte bzw. Simulationen nicht abbildbare Details der betrachteten Serienteile zurückzuführen sind, oder wie sie sich beispielsweise in wiederholt gemessenen Akustikdaten als Messwertschwankungen infolge nicht kontrollierbarer Zufalls- bzw. Störeinflüsse äußern können.

Das Design synthetischer ART-Trainingsdaten umfasst jedoch die Herausforderung, dass die **Verteilungscharakteristika** der zu prüfenden Objekte in Bezug auf die Geometrie, das Material sowie mögliche Anomalien i. d. R. nur näherungsweise bekannt sein dürften. Weiterhin können die strukturmechanischen Eigenschaften mit der Fertigungsreihenfolge korreliert abdriften und/oder sprunghaften Chargeneinflüssen unterliegen. Diese Aspekte stehen einer präzisen Simulationsdatenerzeugung (neben den grundlegenden simulationstechnischen Limitierungen) im Wege. Die eigentliche Absicht, möglichst realitätsgetreue Trainingsdaten auf der Grundlage vermeintlich sehr genau vorgegebener strukturmechanischer Bauteileigenschaften zu erzeugen, kann in letzter Konsequenz dazu führen, dass die tatsächlichen Ausprägungen der zu analysierenden Serienteile von den synthetischen Trainingsdaten eben nicht ausreichend abgedeckt oder nur verzerrt wiedergegeben werden.

Dies wird als nachteilig bzw. als von vornherein einschränkend für die Leistungsfähigkeit eines auf Basis solcher Daten berechneten ART-Klassifikators eingeschätzt.

Angesichts dieser Problematik wurde die Forderung nach einer realitätsgetreuen Datengestaltung in Bezug auf die strukturellen Eigenschaften aufgeweicht, und zwar zugunsten einer neutraleren Datengrundlage, die besser im Hinblick auf einen robusten, leistungsfähigen Klassifikator konditioniert ist. Konkret wird vorgeschlagen, die **Wertebereiche** der synthetischen Trainingsdaten, verglichen mit den vermeintlichen bzw. nur ungefähr bekannten strukturellen Eigenschaften der adressierten Serienobjekte, bewusst großzügiger zu gestalten, sodass die später zu prüfenden Teile sicher durch die Trainingsdaten abgedeckt werden. Zudem wird vorgeschlagen, die Bauteilstrukturen der Trainingsteile mittels **Gleichverteilungen** zu modellieren, was auf eine neutrale, idealerweise immer vergleichbar gute Performance eines aus den Trainingsdaten abgeleiteten Klassifikators abzielt, unabhängig davon, wo innerhalb der vorgegebenen Wertebereiche die Eigenschaften der Prüfobjekte tatsächlich gehäuft auftreten. Abb. 3.2 visualisiert die hier diskutierte Problematik einschließlich des Lösungsvorschlags in Form von gleichverteilten Trainingsdaten mit vergleichsweise breiteren Wertebereichen.

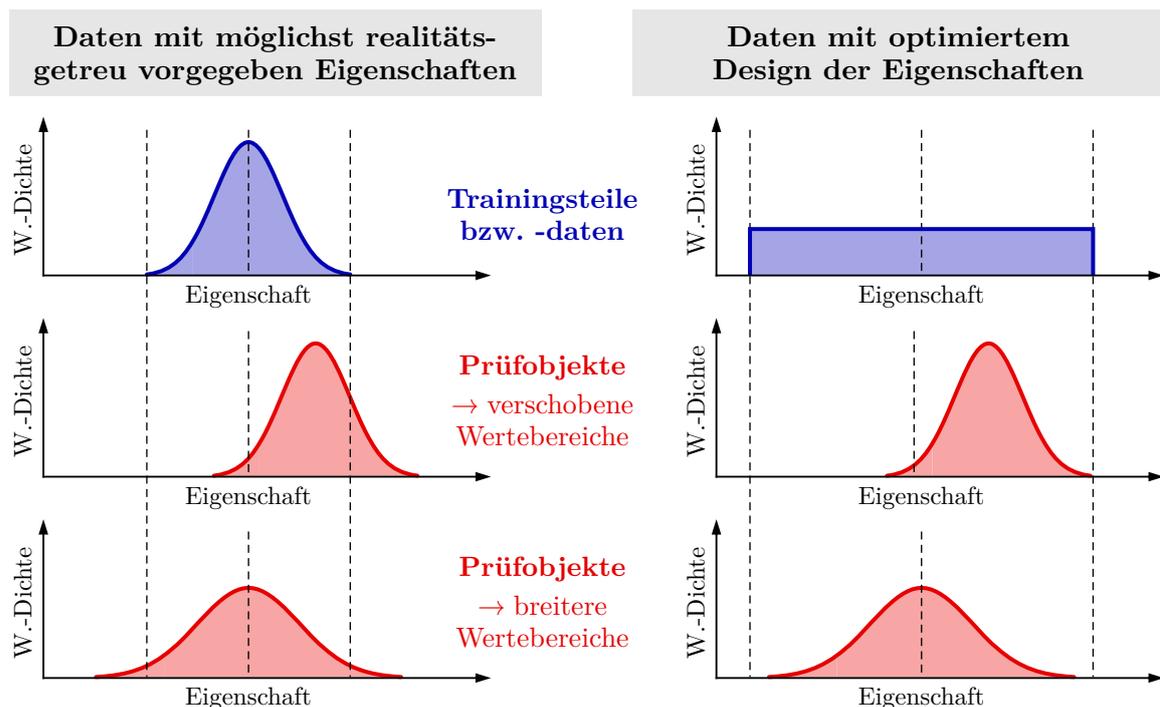


Abb. 3.2: Synthetische ART-Trainingsdaten mit möglichst realitätsgetreu modellierten Bauteilstrukturen (links) bzw. mit optimiertem Design der Verteilungseigenschaften (rechts)

Durch ein simulationsbasiertes Training gemäß dem Konzept lassen sich potentiell Prüfungsaufgaben erschließen, welche dem aktuellen Stand der Technik zufolge bisher nicht per ART umsetzbar sind (siehe Kap. 1). Als spezielles Highlight kann mittels des Konzepts theoretisch adressiert werden, dass die ART i. d. R. keine Informationen zu den Arten, Größen oder Positionen der Anomalien von NIO-Teilen liefert. Zwecks Erläuterung wird

nun eine Prüfaufgabe betrachtet, bei der NIO-Objekte mit lokalen Defekten identifiziert und zusätzlich hinsichtlich der Defektgrößen und der -positionen charakterisiert werden sollen – es werden also **quantitative Mehrinformationen** angestrebt. Diese Problemstellung wird schnell kompliziert, und zwar sobald pro NIO-Objekt mehrere Defekte auftreten (können). Deshalb beschränkt sich diese Arbeit auf einen Spezialfall, bei dem pro Teil höchstens ein einziger, ganz bestimmter Defekt vorliegt, der aber von NIO- zu NIO-Teil in seiner Größe und Position variieren kann. Als Strategie zur Lösung eines solchen Prüfproblems wird (gestützt auf die voranstehenden Erläuterungen des Konzepts für ein simulationsbasiertes ART-Training) Folgendes vorgeschlagen:

- Ein geeigneter ART-Trainingsdatensatz muss die **Bandbreite der Defekte** mit ihren möglichen Größen und Positionen in sehr detaillierten Abstufungen abbilden. Dazu werden Simulationen durchgeführt, bei denen die Fehler der NIO-Teile unter Berücksichtigung aller plausiblen Defektpositionen und verschiedener Defektgrößen über das Volumen des betrachteten Teiletyps variiert werden.
- Da eine umfassende simulationstechnische Abbildung vieler Defektgrößen in Kombination mit zahlreichen Defektpositionen, inklusive der ebenfalls zu berücksichtigenden tolerierbaren Bauteilvariationen, in einem immensen Berechnungsaufwand münden kann, bietet sich als Gegenmaßnahme eine effiziente **Datenerweiterung** an. Zum Beispiel könnten, jeweils von einer bestimmten Geometrie- und Materialkonfiguration sowie einer konkreten Defektposition ausgehend, wenige wiederholte Simulationen mit unterschiedlichen, allerdings nur grob abgestuften Defektgrößen durchgeführt werden. Weitere Teile mit zusätzlichen, wesentlich feiner abgestuften Defektgrößen könnten anschließend durch Interpolation aus den Simulationsdaten berechnet werden.
- Beim Labeln der synthetischen Trainingsdaten werden neben mindestens einer IO-Klasse **viele verschiedene NIO-Klassen** berücksichtigt. Jeder NIO-Klasse bzw. jedem unterschiedlichen NIO-Label werden dabei dann nur die NIO-Trainingsteile bzw. Datenreihen zugeordnet, die allesamt einen ähnlichen Defekt in Bezug auf die Größe und Position aufweisen. Dazu müssen die in den Daten abgebildeten Defektgrößen und -positionen geeignet diskretisiert werden. Letztendlich resultieren NIO-Labels, die jeweils die Größe und die Position des Defekts implizieren und die alle NIO-Trainingsteile/Datenreihen dahingehend abgestuft quantifizieren.
- Der anhand der Trainingsdaten abzuleitende **Klassifikator** wird schließlich unter Berücksichtigung der zahlreichen unterschiedlichen (NIO-)Labels der synthetischen Trainingsdaten trainiert. Bei seinem Einsatz könnte der Klassifikator dann (innerhalb physikalischer, messtechnischer sowie datenanalytischer Limitierungen) durch die Zuordnung eines jeden zurückgewiesenen Prüfobjekts zu einer der NIO-Klassen Mehrinformationen zu dem vermuteten Defekt hinsichtlich dessen Größe und Position liefern. Oder anders formuliert: Jedes vom Klassifikator zurückgegebene NIO-Urteil erfolgt in Form eines der NIO-Labels, das die geschätzte Größe und Position des vermuteten Defekts auf diskrete Weise beschreibt.

- Auch die **IO/NIO-Trennbarkeit** betreffend wird der hier erläuterte Ansatz mit eng abgestuften Defektausprägungen und zahlreichen NIO-Klassen als vorteilhaft postuliert. So lässt sich z. B. für die Eigenfrequenzen von NIO-Teilen beobachten, dass diese auf hochgradig nichtlineare Weisen von der Defektausprägung, also von der Defektgröße und insbesondere von der Defektposition, abhängen (vgl. Abb. 4.9 und Abb. 4.10 in Abschn. 4.3.2). Folglich bilden NIO-Teile in Bezug auf den jeweiligen Defekteinfluss i. Allg. keine homogene Klasse, die sich auf einheitliche Weise von der Gruppe der IO-Teile unterscheidet. Vielmehr kann jede Defektausprägung einen individuellen Einfluss auf die Eigenschwingungscharakteristika eines Körpers bedingen. Je nach Defektposition können beispielsweise die Eigenfrequenzen durch eine Fehlstelle kaum oder bis zu einem individuellen Maximum beeinflusst werden. Somit kann im Zuge der Ermittlung eines ART-Klassifikators eventuell keine klare globale Trennung zwischen binär gelabelten IO- und NIO-Trainingsteilen »gelernt« werden (was sich dementsprechend auch auf später getroffene Prüfurteile auswirkt). Werden die NIO-Trainingsdaten jedoch wie beschrieben detailliert gelabelt, ist die algorithmische Trennung zumindest theoretisch wesentlich klarer möglich – denn jede NIO-Klasse umfasst dann ausschließlich NIO-Teile, die sich im Defekteinfluss weitgehend einheitlich von den IO-Teilen unterscheiden.

4 Anwendungsszenario »Pleuel«

Dieses Kapitel befasst sich mit dem zentralen Anwendungsszenario der Arbeit, auf dem die Demonstration des Konzepts für ein simulationsbasiertes ART-Training basiert. Das Anwendungsszenario stellt eine fiktive **ART-Prüfungsaufgabe** dar, bei welcher geometrisch von Teil zu Teil zufällig variierende Pleuel auf Basis ihrer Eigenfrequenzen in Bezug auf einen möglichen makroskopischen Defekt bewertet werden sollen.

Die Ausführungen gliedern sich in die folgenden Abschnitte:²²

- In Abschn. 4.1 wird das Anwendungsszenario inklusive des betrachteten Teiletyps und des möglichen Defekts vorgestellt. Das Ziel der Prüfungsaufgabe wird konkretisiert. Es folgen einige Definitionen, u. a. bzgl. des Koordinatensystems und der Grundgesamtheit der Pleuel. Zuletzt werden zentrale Festlegungen und Idealisierungen vor dem Hintergrund der Konzeptdemonstration begründet.
- In Abschn. 4.2 werden die strukturmechanischen Eigenschaften der Pleuel und die diesbezüglich unterstellten Verteilungsannahmen behandelt. Im Detail fokussieren die Ausführungen auf die Geometrie (Abschn. 4.2.1), das Material (Abschn. 4.2.2) und den möglichen Defekt (Abschn. 4.2.3).²³
- In Abschn. 4.3 werden die Eigenmoden und Eigenfrequenzen der Pleuel betrachtet, wobei neben grundlegenden Aspekten zunächst die Pleuel-Eigenmoden thematisiert werden (Abschn. 4.3.1). Anschließend wird der Einfluss einzelner Bauteilparameter auf die Eigenfrequenzen der Pleuel beschrieben (Abschn. 4.3.2). Es wird geschildert, welchen Verteilungen die Eigenfrequenzen in der Grundgesamtheit der Pleuel folgen und wie sie von Teil zu Teil variieren (Abschn. 4.3.3).
- In Abschn. 4.4 wird erläutert, inwiefern die fiktive ART-Prüfungsaufgabe mithilfe eines einfachen Schwellwert-Klassifikators umsetzbar ist.

²²⁾ Bei den in den Abschnitten 4.3 und 4.4 analysierten Eigenfrequenzwerten handelt es sich um FEM-simulierte Daten (vgl. Abschn. 5.1.2), welche aufgrund des Näherungscharakters der FEM fehlerbehaftet sind (siehe Abschn. 5.1.3). Dies muss in diesem Kapitel allerdings nicht berücksichtigt werden, denn die analysierten Frequenzen sind mehrere Größenordnungen größer als die FEM-assoziierten Fehler. Zudem sind die Fehler vorwiegend systematisch, sodass sie durch im Rahmen mehrerer Analysen durchgeführte Vergleiche/Differenzbildungen oftmals ohnehin weitestgehend eliminiert wurden. Weiterhin basieren die Ausführungen stellenweise auf zufälligen Stichprobendaten. Daraus abgeleitete Werte und Rückschlüsse auf die zugrundeliegenden Verteilungen sind somit unsicherheitsbehaftet, was hier jedoch ebenfalls nicht explizit berücksichtigt werden muss, da die statistischen Unsicherheiten aufgrund der umfangreichen Stichprobenumfänge verhältnismäßig gering sind.

²³⁾ Die in den drei Abschnitten 4.2.1, 4.2.2 und 4.2.3 präsentierten Modelle werden in ihrer Gesamtheit im Text auch als (*statistische*) *Bauteilstrukturmodelle* bezeichnet.

4.1 Überblick, Anwendungsziel und Definitionen

Das Anwendungsszenario dieser Arbeit, eine fiktive, in vielen Punkten idealisierte **ART-Prüfaufgabe**, stützt sich auf Teile aus einer theoretisch unendlich großen Grundgesamtheit, in welcher die strukturmechanischen Eigenschaften der Teile zufällig variieren. Der dabei betrachtete Teiletyp stellt modellhaft ein **Pleuel** aus einem homogenen und linear-elastischen Aluminiumwerkstoff dar. Pro Pleuel kann ein einzelner künstlicher Defekt als qualitätsrelevante strukturmechanische Anomalie vorliegen, konkret eine verhältnismäßig kleine, stets zufällig positionierte **Durchgangsbohrung**. Von Teil zu Teil treten zudem deutlich ausgeprägte, jedoch tolerierbare Zufallsvariationen in der Geometrie auf, sodass sich die Pleuel in Bezug auf ihre exakten geometrischen Abmessungen unterscheiden. Die Materialeigenschaften der Teile sind hingegen konstant bzw. einheitlich. Die spezifizierte Prüfaufgabe zielt darauf ab, solche Pleuel belastbar, d. h. überwiegend korrekt, per ART im Hinblick auf einen möglichen Durchgangsbohrungs-Defekt zu beurteilen. Dabei sollen die teilespezifischen **Eigenfrequenzen** der Pleuel bis rund 30 kHz als Grundlage für die zu treffenden Prüfentscheidungen genutzt werden.

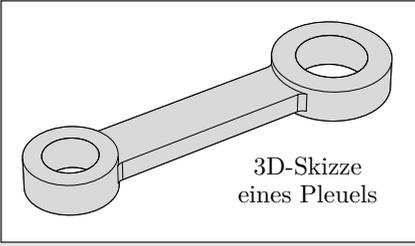
Im Detail umfasst das **Prüfziel** die folgenden zwei Aspekte:

- 1) **IO/NIO-Klassifizierung** → IO-Pleuel und NIO-Pleuel, also Teile ohne bzw. mit je einem Defekt, sollen nach IO und NIO separiert werden, wobei Erkennungsraten von mindestens 90 %, idealerweise von über 95 %, gefordert werden.
- 2) **Rückschluss auf Defektausprägung** → Zudem sollen quantitative Aussagen zu den Defekten der NIO-Teile getätigt werden, wobei sowohl die jeweilige Defektgröße als auch die -position zu schätzen ist.

In der Praxis wird die Nichterkennung qualitativ unzulänglicher Teile gewöhnlich anders bewertet als das fälschliche Aussortieren von Gut-Teilen. Welche dieser möglichen **Fehlklassifizierungen** schwerer wiegt, hängt dabei von den individuellen Anforderungen ab. Zum Beispiel müssen fehlerhafte Objekte im Fall von sicherheitskritischen Komponenten mit sehr hoher Verlässlichkeit detektiert werden, oder aus wirtschaftlichen Gründen wird eine gewisse Fehlerquote in den fertigen Erzeugnissen in Kauf genommen. Da das hier betrachtete Anwendungsszenario fiktiv ist, wurden neutrale Vorgaben für den Umgang mit Fehlerurteilen definiert. Konkret wurde festgelegt, dass jegliche IO/NIO-Fehlklassifizierung in gleichem Maße kritisch ist (also sowohl die fälschliche Einstufung eines IO-Objekts als NIO als auch die Beurteilung eines NIO-Teils als IO). Fehlklassifizierungen in Bezug auf die Defektgrößen und -positionen von korrekt als NIO identifizierten NIO-Teilen sind dagegen im Kontext dieser Arbeit vergleichsweise weniger kritisch zu sehen, da bereits eine ungefähre Aussage zur Ausprägung eines Defekts einen entscheidenden Mehrwert gegenüber dem üblichen Leistungsspektrum der ART bieten würde.

Abb. 4.1 fasst die o. g. **Kernaspekte** des Anwendungsszenarios zusammen.

Anwendungsszenario »Pleuel«



3D-Skizze
eines Pleuels

- Geometrie:** Pleuel (siehe Skizze), zufällige Geometrievierungen von Teil zu Teil
- Material:** Aluminiumwerkstoff (homogen, linear-elastisch), konstant von Teil zu Teil
- möglicher Defekt:** Durchgangsbohrung (klein, zufällig positioniert)

→ **individuelle Eigenfrequenzen** (abhängig von Geometrie und Qualitätszustand)

Prüfziel: Qualitätsbewertung von Pleueln auf Basis ihrer Eigenfrequenzen bis ca. 30 kHz

→ 1) IO/NIO-Klassifizierung

→ 2) Rückschluss auf Defektausprägung

Abb. 4.1: Kernaspekte des fiktiven Anwendungsszenarios (→ idealisierte ART-Prüfaufgabe)

Abb. 4.2 skizziert die **grundsätzliche Form** der Pleuel. Wie zu sehen ist, setzt sich die Pleuel-Geometrie aus drei einfachen Volumenkörpern zusammen, welche als *Zylinderring-Segment R1*, *Zylinderring-Segment R2* sowie *Steg-Segment S* bezeichnet werden. An den Übergängen des quaderförmigen Steg-Segments zu den Zylinderring-Segmenten befinden sich dabei insgesamt vier tangential angeschlossene Kantenverrundungen.

Darüber hinaus skizziert Abb. 4.2 die Ausrichtung eines Pleuels in einem rechtshändigen kartesischen **Koordinatensystem** mit den Achsen x , y und z . Zwecks Abgrenzung von anderen in der Arbeit verwendeten Koordinatensystemen wird dieses Koordinatensystem im Folgenden als *Pleuel-Koordinatensystem* (Pleuel-KOS) bezeichnet.

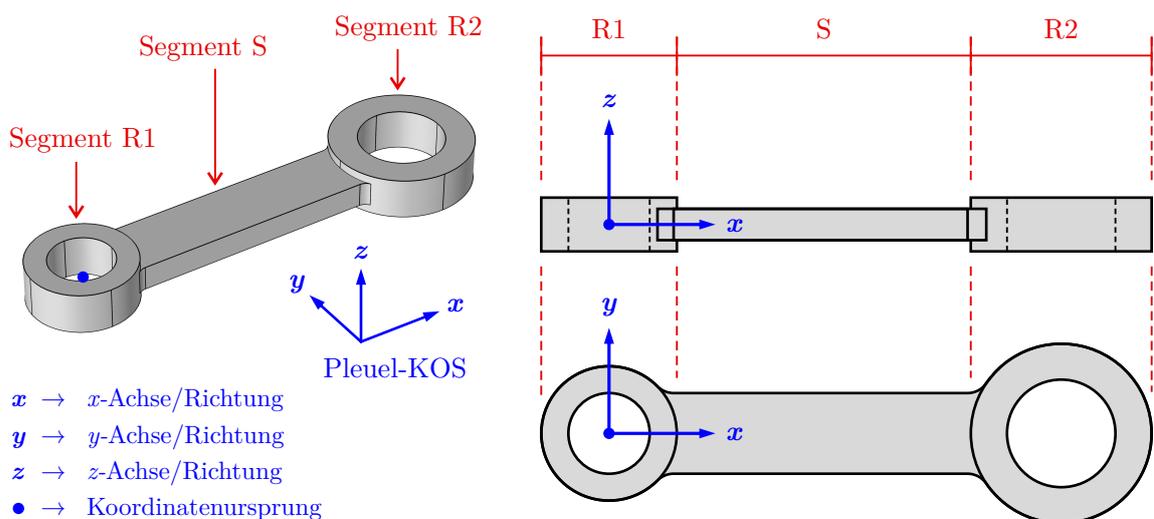


Abb. 4.2: Grundsätzliche Form eines Pleuels und Pleuel-Koordinatensystem (Pleuel-KOS)

Zur Vermeidung umständlicher Umschreibungen werden in diesem Dokument häufig die folgenden Bezeichnungen verwendet, die sich auf die Grundgesamtheit der betrachteten Pleuel bzw. auf eine spezielle Bauteilkonfiguration beziehen:

- Die definierte **Grundgesamtheit** der in Bezug auf die Geometrie sowie einen möglichen Defekt zufälligen Pleuel des Anwendungsszenarios wird *Anwendungsszenario-Grundgesamtheit (AGG)* genannt. Die *AGG* fasst die Verteilungscharakteristika der hinsichtlich eines Defekts per ART zu klassifizierenden Zufallspleuel auf abstrakte, idealisierte Weise zusammen. Das bedeutet, dass die *AGG* die Geometrie- und die Materialeigenschaften der möglichen Pleuel und deren Qualitätszustände statistisch und modellhaft beschreibt, ohne dabei praxisrelevante Einflüsse und Limitierungen zu berücksichtigen, wie sie für die im finalen Schritt der Konzeptdemonstration zu analysierenden realen Pleuel eine Rolle spielen. Ein Zufallspleuel aus der *AGG* wird nachfolgend auch *AGG-Pleuel/Teil* genannt.
- Im Hinblick auf grundlegende Analysen wurde eine besondere Bauteilkonfiguration definiert, die als *Referenzkonfiguration* bezeichnet wird. Es handelt sich hierbei um eine **IO-Konfiguration**, welche die Geometrie- und die Materialeigenschaften der zufälligen *AGG*-Pleuel im Mittel repräsentiert.
- Die Verteilungscharakteristika der *AGG* und die Referenzkonfiguration werden im Verlauf der weiteren Abschnitte dieses Kapitels konkretisiert.

Viele spezifizierte Sachverhalte und dass im Rahmen dieser Arbeit überhaupt eine fiktive Prüfaufgabe betrachtet wurde haben **praktische Hintergründe**. Der alternative Fokus auf Serienteile bzw. ein ART-Prüfproblem aus der industriellen Praxis hätte Hürden mit sich gebracht, die eine erstmalige, zielgerichtete Demonstration des in Kap. 3 vorgestellten Konzepts erschwert hätten.²⁴ Die wesentlichen Festlegungen und Idealisierungen des Anwendungsszenarios beruhen im Detail u. a. auf den folgenden Punkten:

- Der betrachtete Teiletyp ist ein Kompromiss zwischen ART-relevanten Serienteilen und einfachen Körpern wie Stäben oder Platten. Verglichen mit den Pleueln hätten kompliziertere seriengefertigte Objekte zahlreiche praktische Herausforderungen mit sich gebracht, z. B. bei der Geometriemodellierung in einer FEM-Software oder der experimentellen Charakterisierung komplexer Geometrien. Weitere praxisrelevante Aspekte, die mit einem realen ART-Prüfproblem bzw. mit Serienteilen einhergehen können, z. B. ein inhomogenes Material, zufällig variierende Materialeigenschaften oder nicht beeinflussbare Drifts und Chargeneffekte, hätten die Konzeptdemonstration negativ beeinträchtigen können. Mit dem fiktiven Anwendungsszenario wurde darüber hinaus auch die Zugänglichkeit zu sämtlichen relevanten Bauteildaten und

²⁴) Auf der Konzeptdemonstration anhand des fiktiven Anwendungsszenarios und den dabei erlangten Erkenntnissen aufbauend wird in Kap. 7 die Realisierung eines simulationsbasierten ART-Trainings im Hinblick auf eine ART-Prüfaufgabe aus der industriellen Praxis diskutiert.

- informationen sichergestellt, und außerdem die Möglichkeit geschaffen, die wesentlichen Eigenschaften konkreter Teile gezielt einzustellen.
- Der Praxisbezug sowie die Herausforderungen der definierten Prüfaufgabe beruhen u. a. auf den vorgegebenen Geometrievariationen. Denn aufgrund dieser streuen die Eigenfrequenzen der zu beurteilenden Pleuel nicht nur mit den Qualitätszuständen, sondern v. a. auch geometriebedingt von Teil zu Teil, was die eigenfrequenzbasierte Identifizierung von NIO-Pleueln deutlich erschwert.
 - Um die Komplexität der ersten Konzeptdemonstration zu begrenzen, wurden keine Materialvariationen vorgegeben und das Materialmodell wurde außerdem möglichst einfach gehalten. Für die realen Pleuel wären von Teil zu Teil variierende Materialeigenschaften, im Gegensatz zu den zufälligen Geometrievariationen, ohnehin nicht ohne Weiteres gezielt einstellbar gewesen.
 - Da die realen Pleuel aus wirtschaftlichen und fertigungstechnischen Gründen (und unter Beachtung des werkstoffspezifischen Korrosionsverhaltens) aus einer Aluminiumlegierung hergestellt wurden, wurde das Anwendungsszenario dementsprechend im Hinblick auf das Material spezifiziert.
 - Die Auswahl der Durchgangsbohrung als künstlicher Defekttyp beruht v. a. darauf, dass entsprechende Defekte (im Gegensatz zu anderen, geometrisch komplizierteren Fehlerarten) leicht in FEM-Modelle implementiert und durch Bohren präzise in ein Objekt eingebracht werden können.
 - Dass die Prüfurteile auf den Eigenfrequenzen der Pleuel basieren sollen, ist darauf zurückzuführen, dass sich in den Eigenfrequenzen eines Teils zahlreiche Anomalien widerspiegeln. Eigenfrequenzen spielen daher bei der ART regelmäßig eine zentrale Rolle. Insbesondere ist auch durch die Durchgangsbohrungs-Defekte eine deutliche Beeinflussung der Pleuel-Eigenfrequenzen, nicht aber des Dämpfungsverhaltens zu erwarten (zudem provoziert dieser Defekttyp, anders als z. B. schmale Risse, keine nichtlinearen Schwingungsphänomene). Der Beschränkung auf den Frequenzbereich bis ca. 30 kHz liegen dabei Limitierungen der verfügbaren Gerätetechnik sowie der übliche Fokus der ART auf den Hörschall- bzw. den niederfrequenten Ultraschallbereich zugrunde.

4.2 Strukturmechanische Eigenschaften der Pleuel

4.2.1 Geometriemodell und zufällige Abmessungen

Die betrachteten Pleuel können, unter der Annahme von Symmetrien bzgl. der x - y - und x - z -Ebene des Pleuel-KOS (sowie weiterer noch erläuterter Idealisierungen), mithilfe der acht in Abb. 4.3 skizzierten **Geometrieparameter** geometrisch eindeutig quantifiziert werden. Diese unabhängigen Parameter, die nachfolgend auch *Hauptgeometrieparameter* genannt werden, beziehen sich wie folgt auf die Pleuel-Geometrie:

- Die vier Parameter d_{R1} und d_{R2} bzw. D_{R1} und D_{R2} definieren die inneren bzw. die äußeren Durchmesser der zwei Zylinderring-Segmente R1 und R2.
- Die einheitliche Höhe der beiden Zylinderring-Segmente wird mithilfe des Parameters h_R (Zylinderringhöhe) beschrieben.
- Der Parameter l_R kennzeichnet den Abstand der auf die inneren Konturen der zwei Zylinderring-Segmente bezogenen Achsen. Anschaulich betrachtet beschreibt dieser Parameter die funktionelle Bauteillänge.
- Die Breite und die Höhe des Steg-Segments S werden mit den zwei Parametern b_S (Stegbreite) und h_S (Steghöhe) abgebildet.

Den vier Kantenverrundungen wurden identische 3-mm-Radien zugewiesen. Bei der Definition des Anwendungsszenarios wurden keine Form- oder Lageabweichungen der Pleuel-Geometrie gegenüber der symmetrischen, idealisierten Form vorgesehen. Folglich weisen alle zylindrischen Elemente kreisförmige Querschnitte auf, sämtliche Zylinderachsen sind exakt in z -Richtung orientiert und die inneren sowie die äußeren Mantelflächen sind bei beiden Zylinderring-Segmenten paarweise konzentrisch zueinander ausgerichtet. Von den Kantenverrundungen sowie den Mantelflächen abgesehen, sind alle Oberflächen parallel zur x - y - bzw. x - z -Ebene orientiert und eben.

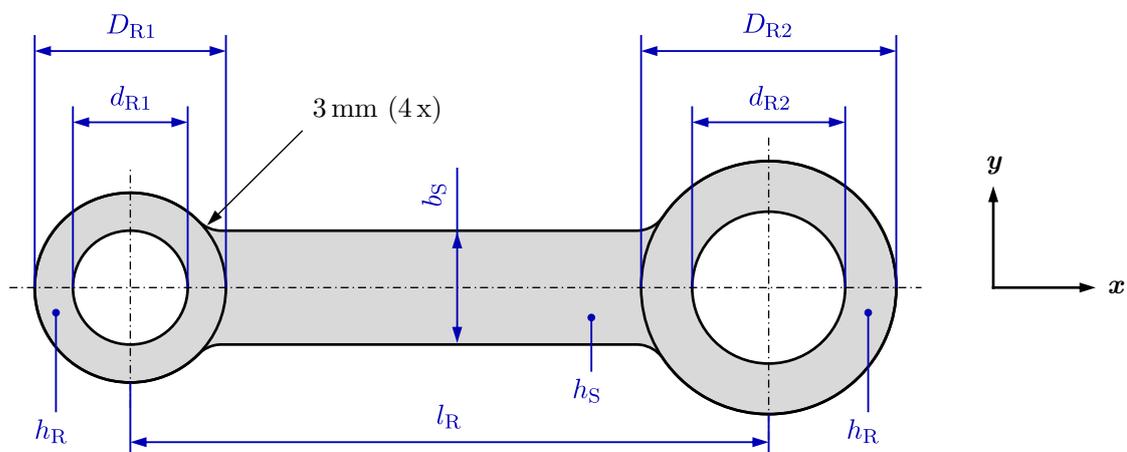


Abb. 4.3: Hauptgeometrieparameter eines idealisierten, symmetrischen Pleuels

Für das Anwendungsszenario ist es zentral, dass die Abmessungen konkreter Pleuel bzgl. der acht Hauptgeometrieparameter in gewissem Maße zufällig sind und in der *AGG* von Teil zu Teil variieren. Um dies zu modellieren, wurden allen Hauptgeometrieparametern stochastisch unabhängige Zufallsvariablen mit individuellen Verteilungseigenschaften zugewiesen. Zur realitätsnahen Abbildung zufälliger **Geometrievariationen** wurde dabei für jeden der acht zentralen Geometrieparameter eine Normalverteilung vorgegeben, die durch einen spezifischen Erwartungswert μ_G und eine zugehörige Standardabweichung σ_G nach Tab. 4.1 quantifiziert wird. Die Erwartungswerte liegen zwischen 7 mm und 100 mm. Die Standardabweichungen betragen 0,15 mm bis 0,4 mm bzw. (auf die Erwartungswerte bezogen und somit als Variationskoeffizienten angegeben) 0,4 % bis etwas mehr als 2,1 %. Für die zufälligen *AGG*-Pleuel gilt, dass mit ca. 99,7 % fast alle Teile Ausprägungen bzgl. eines betrachteten Geometrieparameters aufweisen, die maximal um drei Standardabweichungen vom Erwartungswert abweichen (Drei-Sigma-Intervall $\mu_G \pm 3\sigma_G$ als *wesentlicher Geometrie-Wertebereich*, siehe Tab. 4.1).²⁵

Tab. 4.1: Erwartungswert μ_G , Standardabweichung σ_G und Variationskoeffizient zur Quantifizierung der normalverteilten Variationen der Pleuel-Geometrie sowie Wertebereich der i. d. R. zu erwartenden Abmessungen in Abhängigkeit vom Geometrieparameter

Geometrie- parameter	Erwartungs- wert μ_G	Standardab- weichung σ_G	Variations- koeffizient	Werte- bereich ^(*)
d_{R1}	18 mm	0,15 mm	0,83 %	17,55 – 18,45
D_{R1}	30 mm	0,20 mm	0,67 %	29,40 – 30,60
d_{R2}	24 mm	0,15 mm	0,63 %	23,55 – 24,45
D_{R2}	40 mm	0,20 mm	0,50 %	39,40 – 40,60
h_R	12 mm	0,15 mm	1,25 %	11,55 – 12,45
l_R	100 mm	0,40 mm	0,40 %	98,80 – 101,20
b_S	18 mm	0,20 mm	1,11 %	17,40 – 18,60
h_S	7 mm	0,15 mm	2,14 %	6,55 – 7,45

(*) Drei-Sigma-Intervall $\mu_G \pm 3\sigma_G$ mit ca. 99,7 % der möglichen Ausprägungen (in mm)

Die Pleuel-Geometrie, bei der die Abmessungen bzgl. der Hauptgeometrieparameter den Erwartungswerten aus Tab. 4.1 entsprechen, wird nachfolgend als *Referenzgeometrie* bezeichnet. Die Referenzkonfiguration weist die Referenzgeometrie auf.

²⁵⁾ Bezogen auf die durch die Erwartungswerte spezifizierte mittlere Pleuel-Geometrie führen die durch die Standardabweichungen quantifizierten Geometrievariationen zu Maßabweichungen, die für fast alle Teile, je nach Geometrieparameter, nicht extremer sind als $\pm 0,45$ mm bis $\pm 1,2$ mm. Diese Abweichungen sind durch die Toleranzklasse »g (grob)« bzw. »v (sehr grob)« gemäß DIN ISO 2768-1 abgedeckt, siehe [DINd]. Die Variationen sind somit zwar ausgeprägt, jedoch nicht realitätsfern.

4.2.2 Materialmodell und Materialkennwerte

Der betrachtete Teiletyp besteht aus einem **homogenen, linear-elastischen Material** mit isotroper Elastizität (siehe Abschn. 2.2.1). Bezüglich der *AGG* wurde angenommen, dass die Materialeigenschaften verschiedener Pleuel nicht variieren, sondern dass sie von Teil zu Teil konstant sind. Somit wurden für alle *AGG*-Pleuel einheitliche Materialkennwerte vorgegeben, die größenordnungsmäßig einen typischen Aluminiumwerkstoff (siehe Anh. A) beschreiben. Konkret wurden die in Tab. 4.2 genannten Werte für die Dichte ρ sowie den Elastizitätsmodul E , den Schubmodul G und die Poissonzahl ν bzw. die elastischen Konstanten C_{11} , C_{44} und C_{12} des Pleuel-Materials festgelegt.

Tab. 4.2: Dichte und elastische Eigenschaften des homogenen und isotropen Pleuel-Materials mit von Teil zu Teil konstanten Eigenschaften (\rightarrow Aluminiumwerkstoff)

Dichte	Ingenieurskonstanten			Elastische Konstanten		
ρ	E	G	ν	C_{11}	C_{44}	C_{12}
2700 kg/m ³	70 GPa	26,12 GPa	0,34	107,7 GPa	26,12 GPa	55,50 GPa

Das homogene und isotrope Material mit den konkreten Kennwerten laut Tab. 4.2 wird im Text als *Referenzmaterial* bezeichnet. Die Referenzkonfiguration weist, wie auch alle *AGG*-Pleuel, das Referenzmaterial auf.

4.2.3 Defektmodell und IO/NIO-Wahrscheinlichkeiten

Für das Anwendungsszenario ist es elementar, dass ein Pleuel einen einzigen künstlichen Defekt aufweisen kann. Als **Defekttyp** wurde eine kreiszylindrische Durchgangsbohrung mit einer in z -Richtung des Pleuel-KOS orientierten Achse ausgewählt. Der maßgebliche Durchmesserbereich reicht von 1 mm bis 3 mm – der Defekt ist also klein gegenüber den geometrischen Abmessungen. Bezüglich der Defektpositionierung wurden insgesamt drei *Defektbereiche* definiert, d. h. Bauteilbereiche, in denen ein Durchgangsbohrungs-Defekt auftreten kann. In Abb. 4.4 sind diese Defektbereiche skizziert.

Wie in Abb. 4.4 zu sehen ist, kann sich der Defekt eines NIO-Pleuels in einem der beiden Zylinderring-Segmente befinden, exakt mittig zwischen innerer und äußerer Zylinderringkontur (die Projektion der Defektachse ist auf einem der skizzierten Kreise positioniert). Alternativ liegt der Defekt im Steg-Segment, wobei die Defektachse zur Vermeidung von Durchbrüchen und zur Wahrung einer sinnvollen Restwandstärke mindestens 4 mm von allen freien Rändern des Steg-Segments sowie den angrenzenden Zylinderring-Segmenten entfernt ist (die Projektion der Defektachse liegt innerhalb des skizzierten Rechtecks bzw. höchstens auf dessen Begrenzungslinien).

Für reale Serienfertigungen ist anzunehmen, dass IO-Teile i. d. R. häufiger auftreten als fehlerhafte NIO-Objekte und dass gewisse Qualitätszustände bzw. bestimmte Anomalien außerdem wahrscheinlicher sind als andere. Für das fiktive Anwendungsszenario wurden

hierzu neutrale Festlegungen getroffen. Im Detail wurden bzgl. der *AGG* sowohl für IO- als auch für NIO-Teile **Auftretenswahrscheinlichkeiten** von jeweils 50 % unterstellt. Bezüglich der NIO-Pleuel wurde zudem angenommen, dass der Defekt in jedem der drei Defektbereiche mit einer identischen Wahrscheinlichkeit von 1/3 auftritt und dass dabei generell keine Defektausprägung wahrscheinlicher ist als eine andere. Das heißt, dass der Defektdurchmesser einer stetigen Gleichverteilung mit Werten zwischen 1 mm und 3 mm folgt. Die genaue Defektpositionierung ist innerhalb jedes Defektbereichs ebenfalls stetig gleichverteilt. Abb. 4.5 gibt die festgelegten Wahrscheinlichkeiten an.

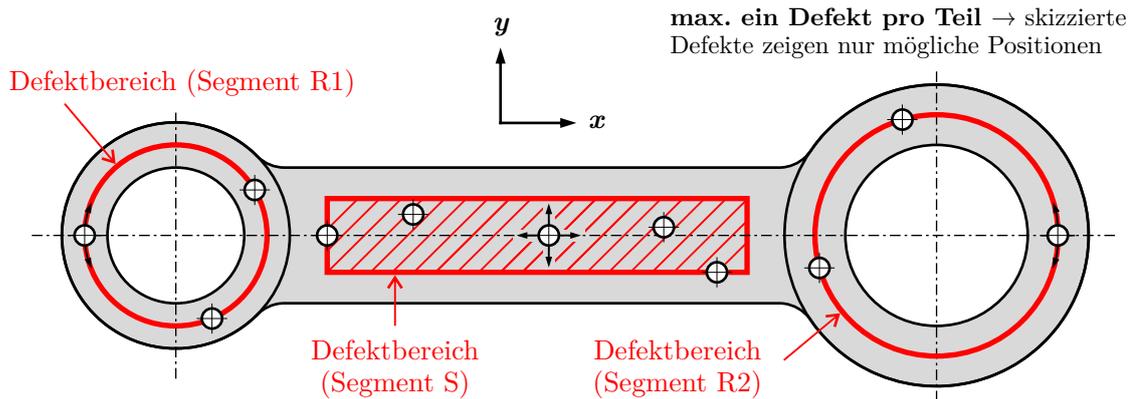


Abb. 4.4: Mögliche Positionen eines Durchgangsbohrungs-Defekts in einem der Zylinderring-Segmente R1 oder R2 bzw. im Steg-Segment S eines NIO-Pleuels (-> Defektbereiche)

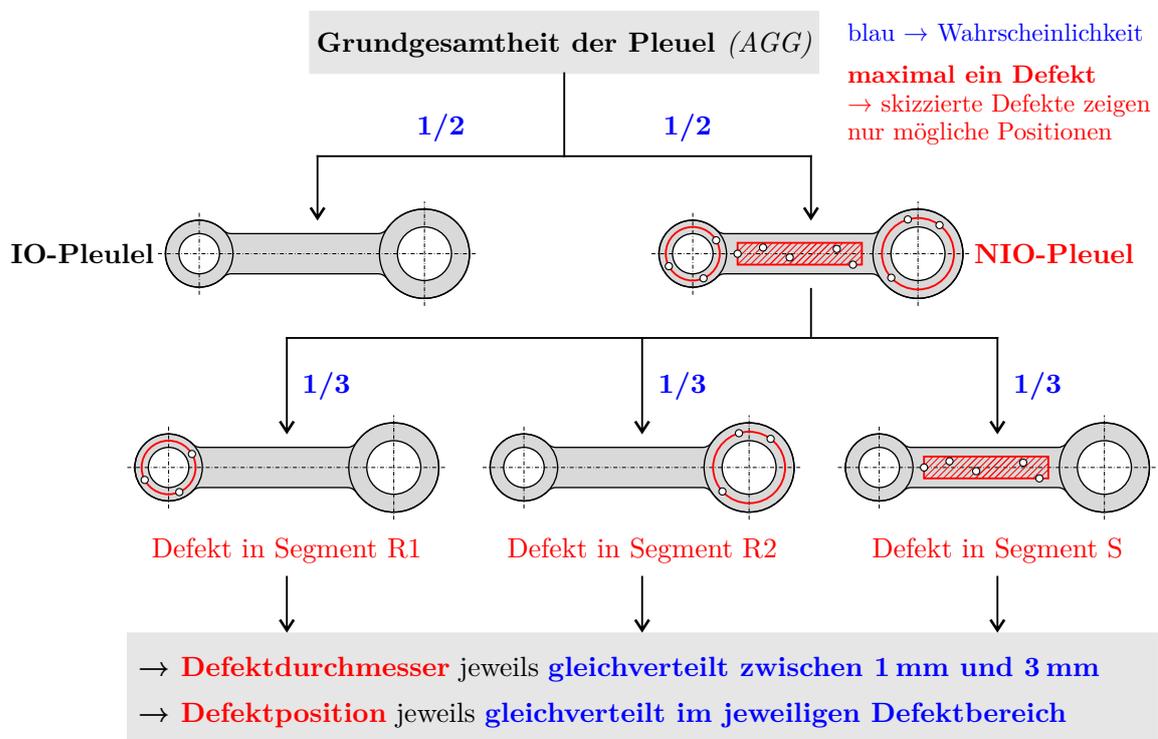


Abb. 4.5: Auftretenswahrscheinlichkeiten für IO-Pleuel und für NIO-Teile mit jeweils einem Defekt in einem der Zylinderring-Segmente R1 oder R2 bzw. im Steg-Segment S

4.3 Eigenmoden und Eigenfrequenzen der Pleuel

4.3.1 Eigenmoden und grundsätzliche Charakteristika

Ein Pleuel als kontinuierliches, linear-elastisches sowie schwingungsfähiges System weist theoretisch unendlich viele Eigenmoden und -frequenzen auf, die unter Vernachlässigung von Dämpfung und Randbedingungen lediglich aus der Geometrie, dem Material und ggf. einem Defekt resultieren. Für den im Rahmen der Arbeit explizit betrachteten Frequenzbereich bis 30 kHz liefert eine FEM-Simulation eines IO-Teils mit Referenzkonfiguration 18 unabhängige Eigenmoden sowie Eigenfrequenzen. Die **Eigenmoden** werden nach den zugehörigen, aufsteigend geordneten Frequenzwerten, wie sie für die IO-Referenzkonfiguration beobachtet werden können, mit $Mode-1, \dots, Mode-18$ und die Eigenfrequenzen bzw. die **Eigenfrequenzmerkmale** mit f_1, \dots, f_{18} bezeichnet. Allgemein sind $Mode-m$ und f_m die Pleuel-Eigenmode und das Eigenfrequenzmerkmal mit der Modennummer m , wobei die Referenz für die Indizierung in diesem Dokument immer ein FEM-berechnetes IO-Teil mit Referenzkonfiguration ist.²⁶

Abb. 4.6 illustriert die **Schwingungsformen** $Mode-1$ bis $Mode-18$ auf Basis einer FEM-Simulation der IO-Referenzkonfiguration und gibt die zugehörigen Frequenzen an (siehe Anh. B für weitere Ansichten und Erläuterungen zur Darstellungsweise).

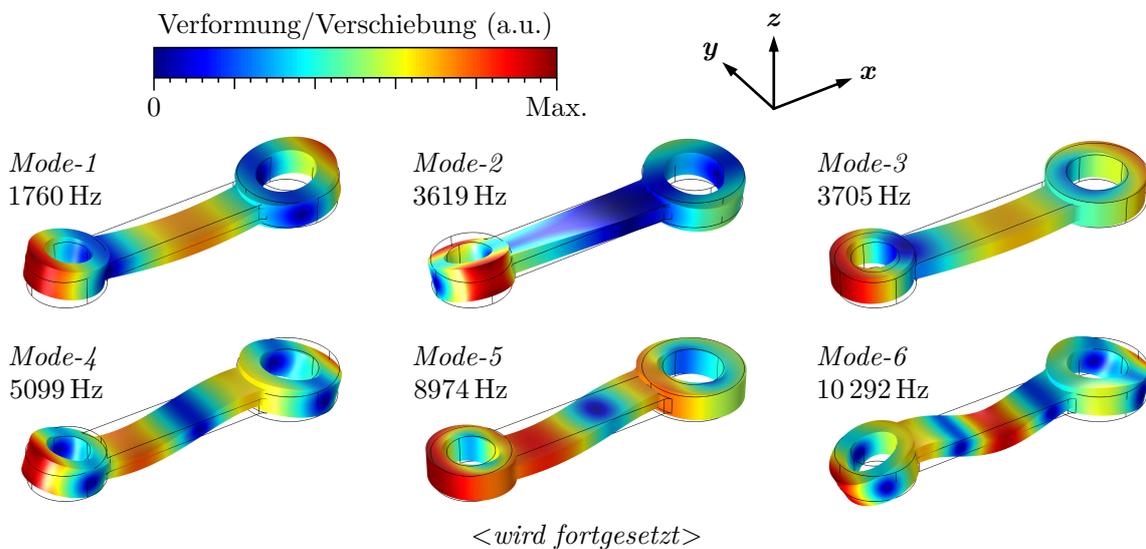


Abb. 4.6: Eigenschwingungsformen $Mode-1, \dots, Mode-18$ eines Pleuels auf Basis einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration und Eigenfrequenzen dieser speziellen Bauteilkonfiguration

²⁶⁾ Der Begriff *Eigenfrequenzmerkmal* betont in Verbindung mit der Modennummer m , dass jede Eigenfrequenz mit einer Eigenmode verknüpft ist – das Merkmal f_m immer mit der Schwingungsform $Mode-m$. Die Modennummer m wird u. a. in Diagrammen verwendet, um Inhalte modenspezifisch anzugeben, d. h. gesondert für die Merkmale f_1, \dots, f_{18} . Darüber hinaus fungiert der Begriff des Eigenfrequenzmerkmals (sofern in einem Kontext überhaupt entscheidend) zur Abgrenzung gegenüber konkreten Frequenzen, die dann ggf. auch als *Eigenfrequenzwerte* bezeichnet werden.

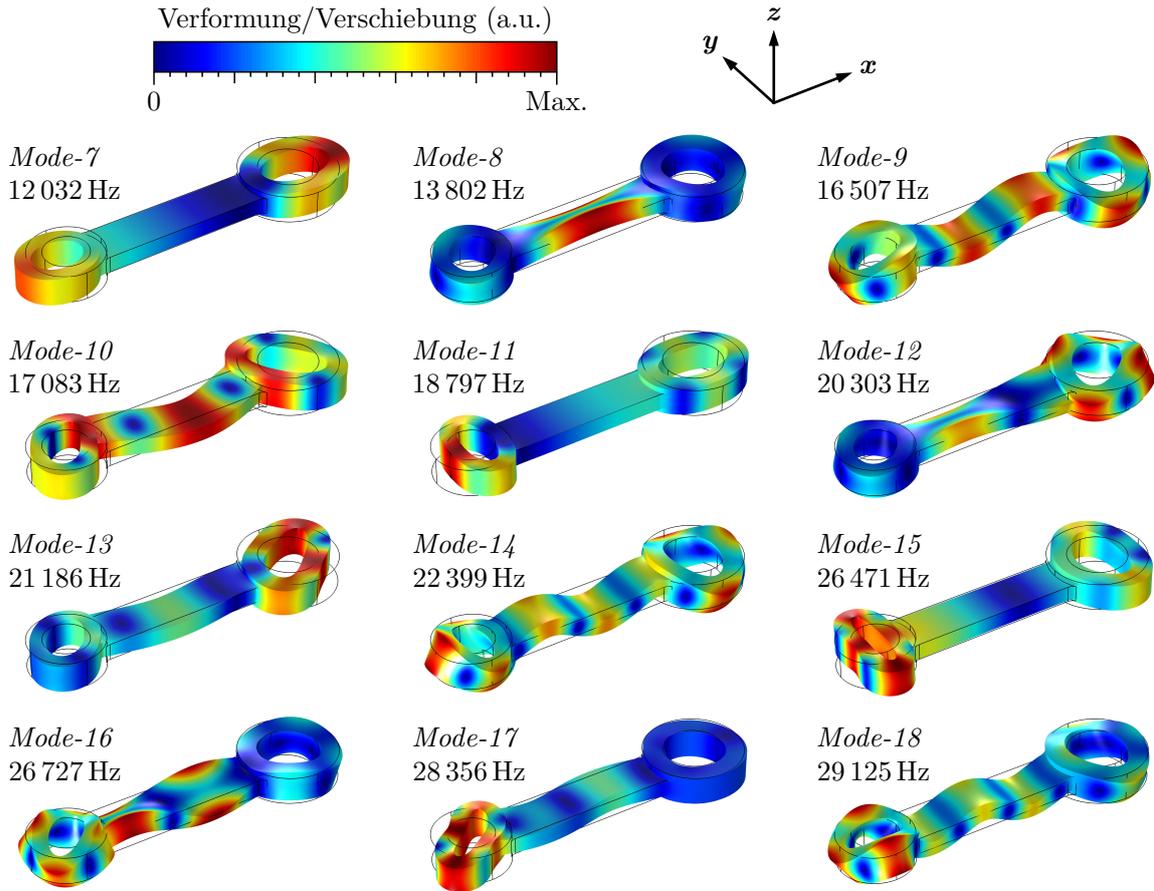


Abb. 4.6: Eigenschwingungsformen *Mode-1*, ..., *Mode-18* eines Pleuels auf Basis einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration und Eigenfrequenzen dieser speziellen Bauteilkonfiguration <Fortsetzung>

In Abb. 4.6 ist erkennbar, dass die Pleuel-Eigenmoden bzgl. der x - y - und x - z -Ebene des Pleuel-KOS jeweils symmetrisch oder antisymmetrisch sind. Damit einhergehend weisen die Schwingungsformen entweder einen Longitudinal-, einen Torsions- oder einen Biegecharakter auf, wobei im letztgenannten Fall zusätzlich nach der Richtung unterschieden werden kann. In Tab. 4.3 sind die verschiedenen **Modentypen** inkl. Kurzbezeichnungen sowie die Symmetrieeigenschaften angegeben und den Eigenmoden *Mode-1* bis *Mode-18* bzw. der Modennummer m (mit $m = 1, \dots, 18$) zugeordnet.

Tab. 4.3: Verschiedenartige Modentypen eines Pleuels und Symmetrieeigenschaften in Bezug auf die x - y -/ x - z -Ebene des Pleuel-KOS in Abhängigkeit von der Modennummer m

Modentyp (Kürzel)	Symmetrieeigenschaften bzgl.		m
	x - y -Ebene	x - z -Ebene	
Longitudinalmode (L)	symmetrisch	symmetrisch	7, 11, 15
Torsionsmode (T)	antisymmetrisch	antisymmetrisch	2, 8, 12, 16
y -Biegemode (B- y)	symmetrisch	antisymmetrisch	3, 5, 10, 13, 17
z -Biegemode (B- z)	antisymmetrisch	symmetrisch	1, 4, 6, 9, 14, 18

Auch für Pleuel, deren Abmessungen gegenüber der Referenzgeometrie um einige wenige Prozent abweichen, und für NIO-Pleuel, existieren laut FEM Eigenmoden, die denen der IO-Referenzkonfiguration entsprechen. Die für die Schwingungsformen charakteristischen Verschiebungen (bzw. deren Verhältnismäßigkeiten) variieren dabei unwesentlich mit der Bauteilstruktur, sodass die Verformungen lokal im Vergleich etwas schwächer oder etwas stärker ausgeprägt sein können. Obwohl qualitativ vergleichbare Eigenmoden somit auch für jedes Zufallspleuel aus der *AGG* beobachtet werden können, weisen unterschiedliche Pleuel meist signifikante Unterschiede in ihren (zufälligen)²⁷ Eigenfrequenzen auf, welche zudem nicht zwangsläufig auf den Bereich bis maximal 30 kHz begrenzt sind.

Im Gegensatz zu einem IO-Pleuel mit Referenzkonfiguration treten die Schwingungsformen eines zufälligen *AGG*-Pleuels jedoch, wenn sie nach ihren zugehörigen (aufsteigend sortierten) Frequenzen angeordnet werden, i. Allg. nicht in der Reihenfolge *Mode-1*, ..., *Mode-18* auf (folglich gilt $f_1 < f_2 < \dots < f_{18}$ nicht i. Allg.). Dieser Effekt, der auf die spezifischen Abhängigkeiten der verschiedenen Eigenfrequenzen von der Bauteilstruktur zurückzuführen ist, wird in diesem Dokument als **Modenvertauschung** bezeichnet. In allen Analysen der Arbeit wurden Pleuel-Eigenfrequenzen genutzt, die entsprechend der Merkmale f_1, \dots, f_{18} (bzw. nach den Schwingungsformen in der Reihenfolge *Mode-1*, ..., *Mode-18*) und somit nach aufsteigender Modennummer m sortiert wurden – und eben nicht zwingend nach aufsteigenden Frequenzwerten.

4.3.2 Sensitivitäten der Eigenfrequenzen

Die Eigenfrequenzen eines Pleuels, das sich in Bezug auf die Geometrie oder durch einen Defekt von einem IO-Pleuel mit Referenzkonfiguration unterscheidet, weichen i. d. R. in gewissem Maße von denen der Referenzkonfiguration ab. Mithilfe der FEM wurden daher die Einflüsse einzelner Geometrieänderungen bzw. eines Defekts auf die relevanten Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} untersucht. Die Analysen stützten sich meist auf schrittweise Variationen in den Simulationen, was die anschauliche Darstellung der **Eigenfrequenz-Sensitivitäten** in Form von Kurvenverläufen ermöglichte.

Abb. 4.7 stellt die geometriebedingten Eigenfrequenzänderungen dar, welche sich infolge einer isolierten Änderung einer einzelnen Pleuel-Abmessung um +1 % ausgehend von der IO-Referenzkonfiguration ergeben. Dabei ist der **Geometrieinfluss** auf die 18 Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} für jeden der acht Hauptgeometrieparameter separat in Form prozentualer Frequenzänderungen angegeben.²⁸ Es ist zu erkennen, dass sowohl negative als auch positive Korrelationen existieren, wobei die 18 Eigenfrequenzänderungen je nach

²⁷⁾ Je nach Sichtweise sind die Eigenfrequenzen eines Zufallspleuels zufällig oder, unter Nichtbeachtung von Unsicherheiten bei der Frequenzermittlung, nicht zufällig. Die Zufälligkeit der Frequenzen ist dann jedoch auf die zufällige Auswahl eines Pleuels (mit zufälliger Bauteilstruktur) zurückzuführen, denn für jede konkrete Bauteilkonfiguration sind die Frequenzen deterministischer Natur.

²⁸⁾ Es ist zu beachten, dass Abb. 4.7 auf prozentual einheitlichen +1-%-Geometrieänderungen gegenüber der Referenzkonfiguration basiert. Die normalverteilten Geometrievariationen des Anwendungsszenarios wurden hingegen mit Standardabweichungen definiert, die sich prozentual gesehen, d. h. auf die Erwartungswerte bezogen, je nach Geometrieparameter deutlich unterscheiden (siehe Tab. 4.1).

Geometrieänderung entweder gleichgerichtet sind oder in ihren Vorzeichen variieren. Die Effektstärke hängt signifikant vom variierten Geometrieparameter und vom betrachteten Frequenzmerkmal ab. Eigenfrequenzen, die demselben Modentyp zuzuordnen sind, zeigen dabei i. Allg. keine identischen oder sehr ähnlichen Sensitivitäten.

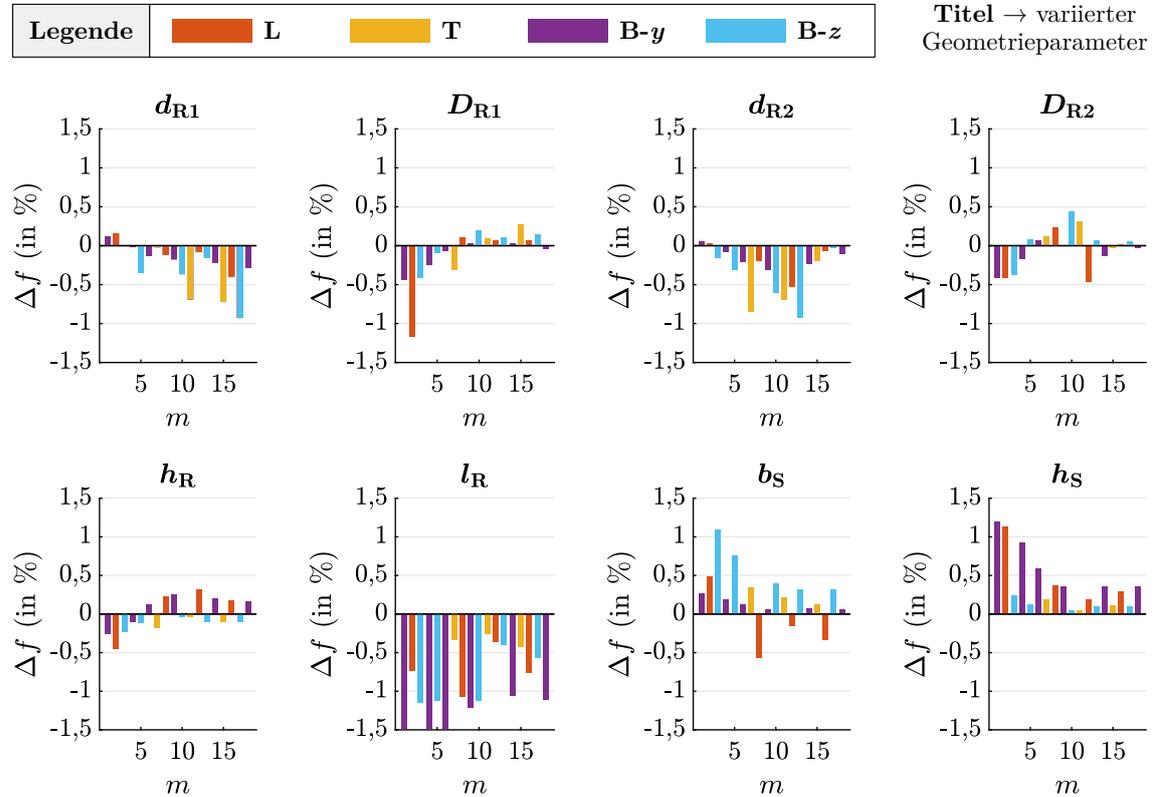


Abb. 4.7: Geometriebedingte Eigenfrequenzänderung Δf (Geometrieinfluss) infolge einer um +1% geänderten Ausprägung des Geometrieparameters d_{R1} , D_{R1} , d_{R2} , D_{R2} , h_R , l_R , b_S bzw. h_S in Abhängigkeit von der Modennummer m , jeweils bezogen auf ein IO-Teil mit Referenzkonfiguration (L, T, B-y & B-z → Modentypen nach Tab. 4.3)

Den Abhängigkeiten der Pleuel-Eigenfrequenzen von einzelnen, isolierten Geometrieänderungen liegen genau genommen **keine linearen Zusammenhänge** zugrunde. In vielen Fällen lassen sich aber zumindest annähernd lineare Relationen erkennen (innerhalb der für das Anwendungsszenario vorgegebenen Geometrie-Wertebereiche). Je nach Eigenfrequenz und variiertem Geometrieparameter können teilweise aber auch deutlichere Nichtlinearitäten beobachtet werden, speziell im Fall von ausgeprägten Geometrieänderungen. Ausgehend von der IO-Referenzkonfiguration zeigt Abb. 4.8 (links) solch ein deutlicheres nichtlineares Verhalten für zwei Frequenzmerkmale in Abhängigkeit von der Steghöhe h_S . Für die Darstellungen wurde dabei eine maximale Geometrieänderung um das Dreifache der zugehörigen Geometrieparameter-Standardabweichung gewählt, um die obere Grenze des wesentlichen Geometrie-Wertebereichs zu erreichen (vgl. Tab. 4.1). Zwecks Vergleich sind im Diagramm Geraden mit Steigungen entsprechend der Gradienten bei $h_S = 7$ mm (Steghöhe der Referenzkonfiguration) gezeigt.

Darüber hinaus können oft individuelle **Wechselwirkungen** beobachtet werden, sobald mehrere verschiedene Geometrieparameter gleichzeitig variieren. Somit ist die Änderung einer betrachteten Eigenfrequenz infolge mehrerer synchron veränderter Geometriewerte i. Allg. nicht identisch mit der Summe der Frequenzänderungen, die durch isolierte Geometrieänderungen hervorgerufen werden. Abb. 4.8 (rechts) zeigt dies für zwei Frequenzmerkmale bezogen auf die IO-Referenzkonfiguration. Dabei sind die Frequenzänderungen visualisiert, die sich durch eine synchrone Vergrößerung von Steghöhe h_S und -breite b_S um je maximal das Dreifache der zugehörigen Geometrieparameter-Standardabweichung einstellen (vgl. Tab. 4.1). Zum grafischen Vergleich ist jeweils die Summe der Frequenzänderungen skizziert, die infolge separater Geometrieänderungen der Steghöhe »sowie der Stegbreite resultieren.

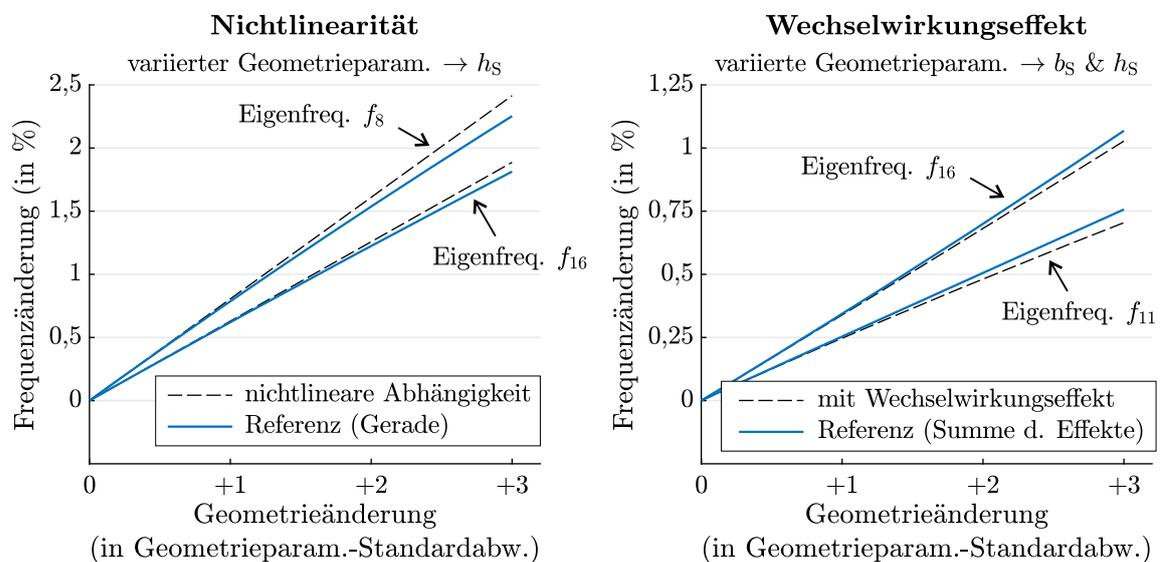


Abb. 4.8: Mögliche Nichtlinearitäten (links, Frequenzmerkmale f_8 und f_{16} in Abhängigkeit von der Steghöhe h_S) geometriebedingter Eigenfrequenzänderungen und mögliche Wechselwirkungseffekte (rechts, Frequenzmerkmale f_{11} und f_{16} in gekoppelter Abhängigkeit von der Steghöhe h_S und -breite b_S), jeweils bezogen auf ein IO-Teil mit Referenzkonfiguration

Abb. 4.9 zeigt, wie die Pleuel-Eigenfrequenzen von einem Durchgangsbohrungs-Defekt in Abhängigkeit von der Defektposition beeinflusst werden, wobei der Bezug erneut die IO-Referenzkonfiguration ist.²⁹ Für jedes der Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} ist dabei die positionsabhängige Auswirkung eines im Zylinderring-Segment R1 bzw. Steg-Segment S platzierten und wie skizziert in der Position variierten 2-mm-Fehlers dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die defektbedingte Eigenfrequenzänderung, d. h. der **Defekteinfluss** auf eine betrachtete Eigenfrequenz, entscheidend von der **Defektposition** abhängt. Dies ist auf die lokal variierenden Verformungen, Verzerrungen und Spannungen zurückzuführen, die mit den unterschiedlichen Pleuel-Eigenmoden einhergehen. Somit kann ein Defekt je

²⁹⁾ In den Abbildungen 4.9 und 4.10 sind die in den einzelnen Diagrammen jeweils individuell skalierten Ordinatenachsen zu beachten. Dies soll der besseren Erkennbarkeit der einzelnen Kurvenverläufe dienen, muss aber bei quantitativen Vergleichen berücksichtigt werden.

nach Positionierung eine Eigenfrequenz annähernd nicht bzw. vergleichsweise wenig oder mit einem individuellen Maximum beeinflussen. Die im Betrag maximale defektbedingte Frequenzänderung ist für jedes Eigenfrequenzmerkmal individuell. Das heißt, dass einige Eigenfrequenzen potentiell eine höhere Sensitivität gegenüber dem für das Anwendungsszenario spezifizierten Defekt aufweisen als andere Frequenzen. Auffällig ist, dass einige Eigenfrequenzmerkmale durch einen Defekt positionsabhängig alternierend negativ oder positiv beeinflusst werden. Je nach Defektposition wird ein betrachtetes Merkmal durch den Defekt im Frequenzwert also entweder reduziert oder jedoch erhöht, wohingegen die anderen Eigenfrequenzen defektbedingt überwiegend bzw. (fast) ausschließlich zu niedrigeren Werten hin verschoben werden.

Abb. 4.10 visualisiert, wie die Eigenfrequenzen eines Pleuels verglichen mit denen der IO-Referenzkonfiguration durch einen Defekt in Abhängigkeit von dessen Größe beeinflusst werden.²⁹ Für jedes der Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} ist der durchmesserabhängige Einfluss eines im Zylinderring-Segment R1 bzw. im Steg-Segment S wie skizziert positionierten Defekts veranschaulicht, wobei **Defektdurchmesser** zwischen 1 mm und 3 mm berücksichtigt sind. Zu erkennen ist, dass sich der Einfluss eines Defekts auf die Pleuel-Eigenfrequenzen mit zunehmendem Durchmesser i. d. R. überproportional verstärkt. Bei vorgegebener Defektposition ist die defektbedingte Änderung des betrachteten Frequenzmerkmals zumeist also durchgehend negativ oder positiv ausgeprägt (im Rahmen des für das Anwendungsszenario festgelegten Defektgrößen-Wertebereichs). Abweichungen demgegenüber wurden nur für den Fall festgestellt, dass mit einer bestimmten Defektposition eine generell eher geringe Sensitivität einer betrachteten Eigenfrequenz gegenüber einem Durchgangsbohrungs-Defekt einhergeht. So lässt sich vereinzelt feststellen, dass sich der Defekteinfluss mit ansteigendem Defektdurchmesser auch wieder abschwächen kann bzw. dass sich die defektbedingten Frequenzänderungen ab einer gewissen Defektgröße gar im Vorzeichen umkehren können.

Der Vergleich von Abb. 4.9 und Abb. 4.10 zeigt, dass der isolierte Einfluss der Defektposition komplizierter beherrschbar bzw. beschreibbar ist als der Einfluss der Defektgröße. Die Abhängigkeiten der defektbedingten Eigenfrequenzänderungen von der Defektgröße folgen offensichtlich zwar keinen identischen Funktionen. Der Defektgrößeneinfluss kann jedoch bei gegebener Defektposition (angesichts des überwiegend monotonen Verhaltens) in guter Näherung mit einem Polynom zweiten oder dritten Grades mit verhältnismäßig wenigen Stützstellen abgebildet werden. Hingegen sind die Zusammenhänge zwischen der Defektposition und den Frequenzänderungen allenfalls in engen Bereichen mit einfachen Funktionen und wenigen Stützstellen näherungsweise darstellbar.

Der Vollständigkeit wegen wird zuletzt erwähnt, dass die Pleuel-Eigenfrequenzen gewisse **Wechselwirkungseffekte** zwischen aller hier betrachteten Bauteileigenschaften wiedergeben, insbesondere auch zwischen den dargelegten Geometrie- und Defekteinflüssen bzw. die geometrie- und defektbedingten Frequenzänderungen betreffend.

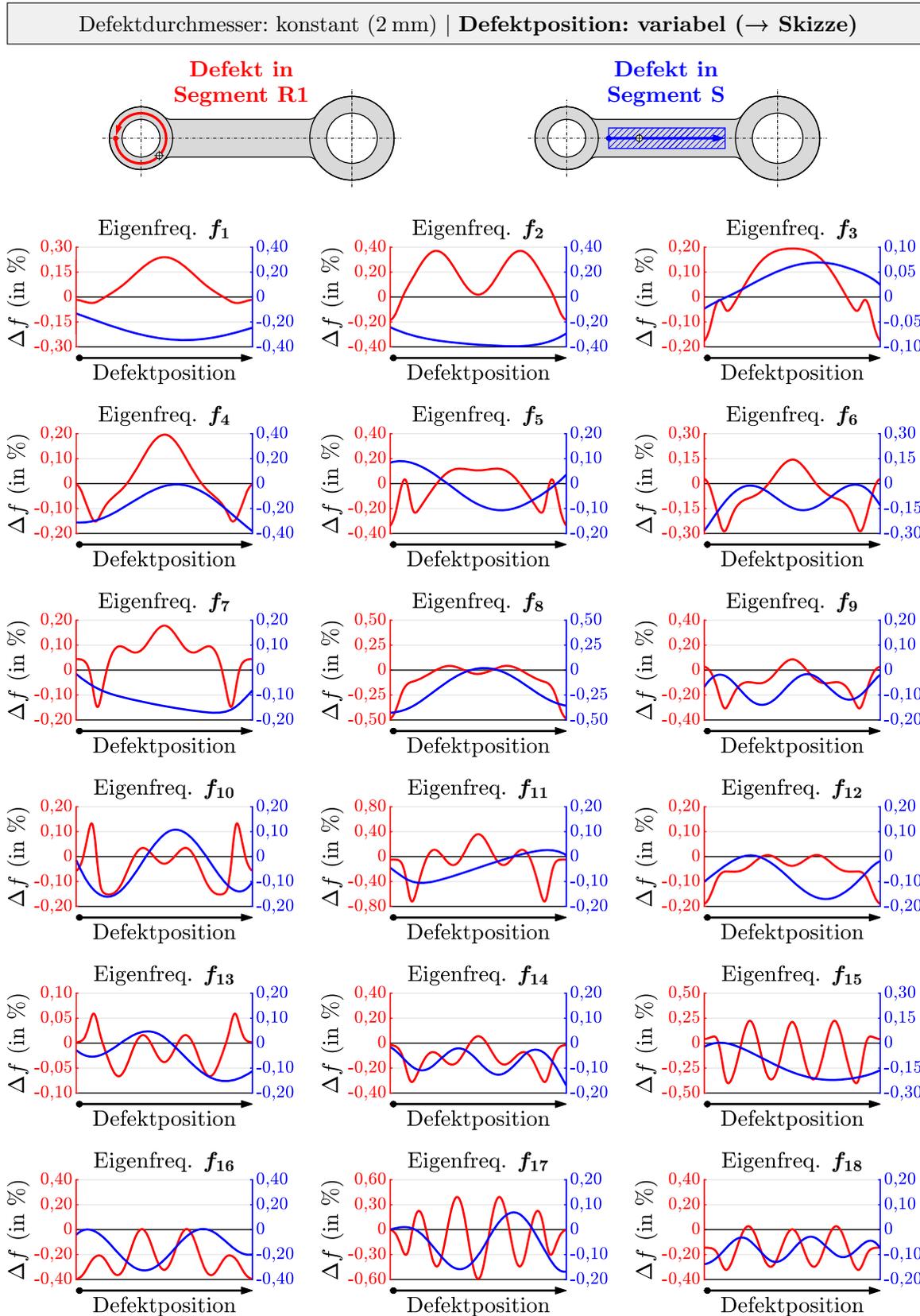


Abb. 4.9: Defektbedingte Eigenfrequenzänderung Δf (Defekteinfluss, Frequenzmerkmale f_1 bis f_{18}) durch einen 2-mm-Durchgangsbohrungs-Defekt in Abhängigkeit von dessen Position (→ Skizze), jeweils bezogen auf ein IO-Teil mit Referenzkonfiguration

Defektdurchmesser: variabel (1,0 ... 3,0 mm) | Defektposition: konstant (→ Skizze)

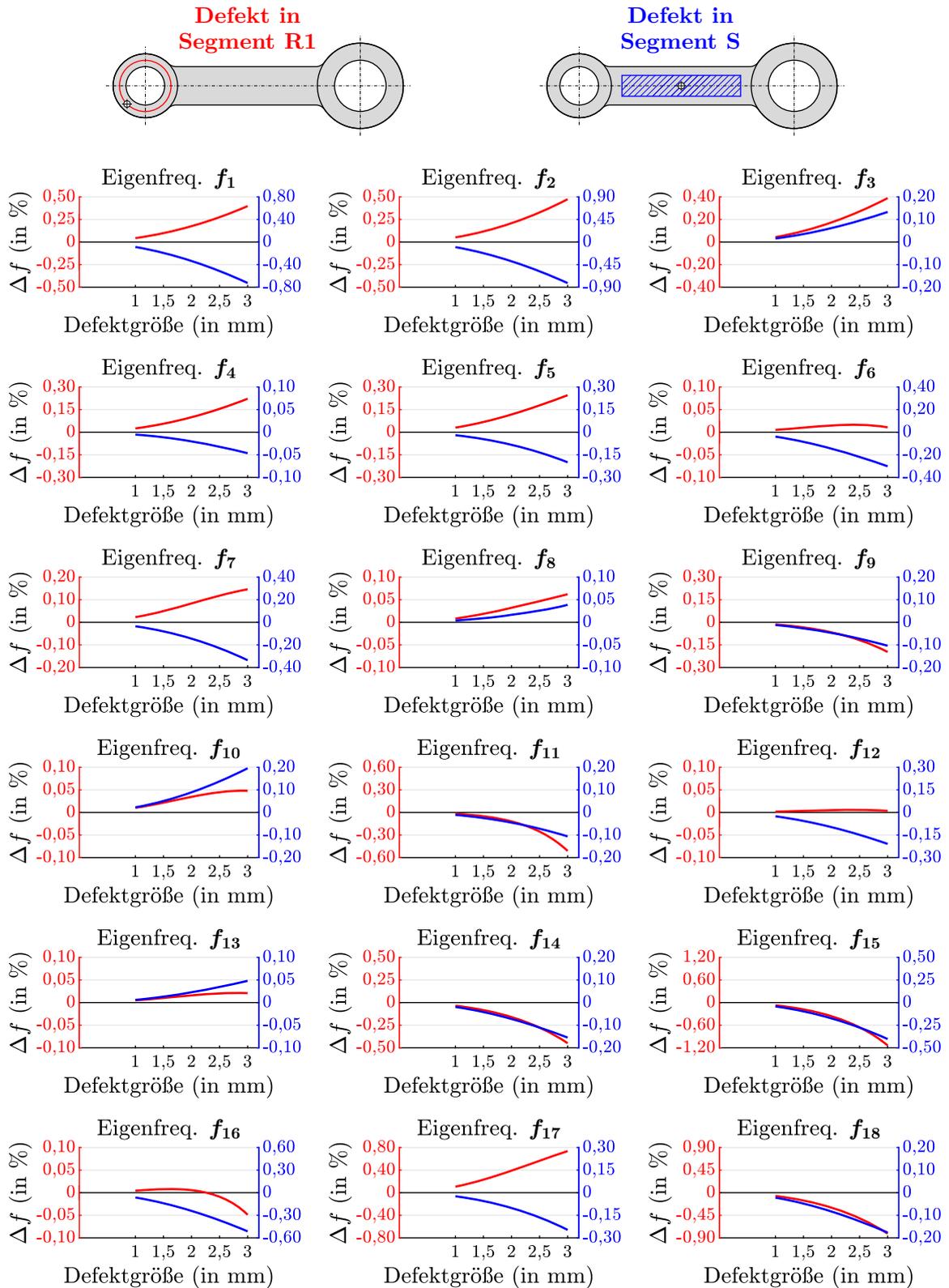


Abb. 4.10: Defektbedingte Eigenfrequenzänderung Δf (Defekteinfluss, Frequenzmerkmale f_1 bis f_{18}) durch einen Durchgangsbohrungs-Defekt in Abhängigkeit von dessen Größe (→ Position wie skizziert), jeweils bezogen auf ein IO-Teil mit Referenzkonfiguration

4.3.3 Verteilungseigenschaften der Eigenfrequenzen

Mit den für die zufälligen *AGG*-Pleuel des Anwendungsszenarios hinsichtlich Geometrie, des Materials und eines möglichen Defekts spezifizierten Verteilungscharakteristika geht einher, dass auch die aus diesen strukturmechanischen Eigenschaften resultierenden Pleuel-Eigenfrequenzen ganz bestimmte Verteilungen zeigen. Die entsprechenden, für die *AGG* charakteristischen **Verteilungseigenschaften** wurden mit Fokus auf die Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} analysiert. Dazu wurden FEM-simulierte Zufallspleuel herangezogen, wobei folgenden Darlegungen 1000 IO-Teile und/oder eine oder mehrere Gruppen von 1000 NIO-Teilen mit jeweils einem zufälligen Durchgangsbohrungs-Defekt zugrunde liegen. Jede Gruppe à 1000 NIO-Pleuel ist dabei durch dieselben 1000 Zufallsgeometrien wie die 1000 IO-Teile gekennzeichnet, was vielfältige Möglichkeiten bei der Datenanalyse eröffnete (Vergleiche, Differenzbildungen).

Nachfolgend werden zunächst **IO-Pleuel** aus der *AGG* betrachtet. Deren Eigenfrequenzen sind **normalverteilt**. Darauf wurde auf Grundlage von Histogrammen geschlossen, von denen eines in Abb. 4.11 (links) abgebildet ist. Mithilfe geeigneter Hypothesentests konnten die Normalverteilungsannahmen untermauert werden. Die Tests erfolgten mit den MATLAB®-Funktionen `adtest` (»Anderson-Darling test«), `chi2gof` (»Chi-square goodness-of-fit test«), `jbttest` (»Jarque-Bera test«) und `lillietest` (»Lilliefors test«). Für keines der 18 Eigenfrequenzmerkmale wurde die Nullhypothese, wonach die Eigenfrequenzen normalverteilt sind, zu einem Signifikanzniveau von 0,05 abgelehnt. Folglich wird von Normalverteilungen ausgegangen. Die verschiedenen Eigenfrequenzen variieren allerdings nicht unabhängig voneinander, sondern sie sind meist (sehr) stark positiv und nur vereinzelt schwach negativ **korreliert**. Für den Korrelationskoeffizienten wurden je nach Paarung Werte zwischen ca. $-0,21$ und $+0,99$ ermittelt. Abb. 4.11 (rechts) verdeutlicht die vorherrschenden Korrelationen grafisch.

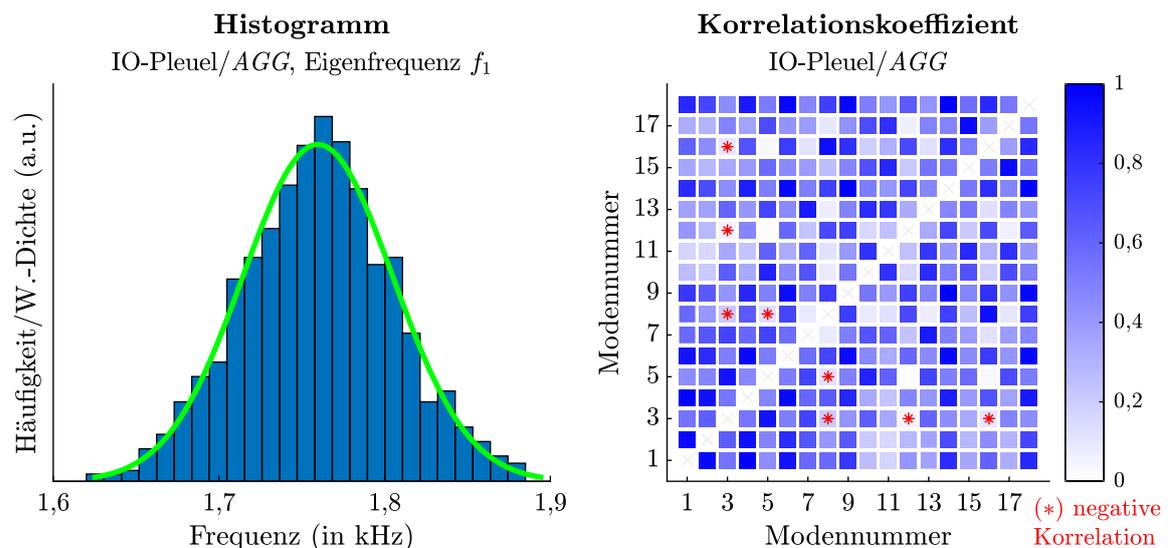


Abb. 4.11: Histogramm (links, Frequenzmerkmal f_1 , 1000 Teile/25 Klassen) und Korrelationskoeffizienten (rechts, Frequenzmerkmale f_1 bis f_{18}) für IO-Pleuel aus der *AGG*

Tab. 4.4 gibt die **Erwartungswerte** und **Standardabweichungen** der (nicht stochastisch unabhängigen) Frequenzmerkmale f_1 bis f_{18} für defektfreie *AGG*-Pleuel an. Bei den Werten handelt es sich um die aus den FEM-Daten der simulierten IO-Teile berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen, die Schätzwerte für die Erwartungswerte sowie Standardabweichungen der 18 Eigenfrequenzmerkmale hinsichtlich der Grundgesamtheit der möglichen IO-Zufallspleuel sind. Die statistischen Unsicherheiten dieser Schätzwerte sind in der Tabelle in Form von 95-%-Konfidenzintervallen quantifiziert.

Die Eigenfrequenzen eines IO-Teils mit Referenzkonfiguration (siehe Abb. 4.6) liegen innerhalb der in Tab. 4.4 genannten Erwartungswert-Konfidenzintervalle. Demnach repräsentiert die IO-Referenzkonfiguration die *AGG* nicht nur geometrisch im Mittel, sondern näherungsweise auch in Bezug auf die Eigenfrequenzen.³⁰

Tab. 4.4: Eigenfrequenz-Erwartungswert und Standardabweichung inkl. 95-%-Konfidenzintervallen für IO-Pleuel aus der *AGG* in Abhängigkeit von der Modennummer m

m	Erwartungswert ^(*)	Standardabweichung ^(*)	m	Erwartungswert ^(*)	Standardabweichung ^(*)
1	1759,7 ($\pm 2,8$)	45,3 $\begin{pmatrix} -1,9 \\ +2,1 \end{pmatrix}$	10	17 083,6 ($\pm 9,1$)	146,8 $\begin{pmatrix} -6,2 \\ +6,7 \end{pmatrix}$
2	3618,6 ($\pm 5,8$)	93,9 $\begin{pmatrix} -3,9 \\ +4,3 \end{pmatrix}$	11	18 801,1 ($\pm 9,2$)	148,3 $\begin{pmatrix} -6,2 \\ +6,8 \end{pmatrix}$
3	3704,6 ($\pm 3,5$)	56,0 $\begin{pmatrix} -2,3 \\ +2,6 \end{pmatrix}$	12	20 297,7 ($\pm 8,7$)	140,0 $\begin{pmatrix} -5,9 \\ +6,4 \end{pmatrix}$
4	5097,8 ($\pm 6,4$)	102,5 $\begin{pmatrix} -4,3 \\ +4,7 \end{pmatrix}$	13	21 192,4 ($\pm 10,2$)	164,3 $\begin{pmatrix} -6,9 \\ +7,5 \end{pmatrix}$
5	8973,0 ($\pm 6,1$)	98,0 $\begin{pmatrix} -4,1 \\ +4,5 \end{pmatrix}$	14	22 395,5 ($\pm 12,6$)	202,5 $\begin{pmatrix} -8,5 \\ +9,3 \end{pmatrix}$
6	10 288,7 ($\pm 8,8$)	141,6 $\begin{pmatrix} -5,9 \\ +6,5 \end{pmatrix}$	15	26 481,7 ($\pm 12,2$)	196,6 $\begin{pmatrix} -8,3 \\ +9,0 \end{pmatrix}$
7	12 031,7 ($\pm 6,2$)	100,1 $\begin{pmatrix} -4,2 \\ +4,6 \end{pmatrix}$	16	26 723,3 ($\pm 14,3$)	230,6 $\begin{pmatrix} -9,7 \\ +10,6 \end{pmatrix}$
8	13 800,0 ($\pm 9,7$)	156,1 $\begin{pmatrix} -6,6 \\ +7,2 \end{pmatrix}$	17	28 362,8 ($\pm 16,4$)	265,0 $\begin{pmatrix} -11,1 \\ +12,2 \end{pmatrix}$
9	16 503,0 ($\pm 9,7$)	156,2 $\begin{pmatrix} -6,6 \\ +7,2 \end{pmatrix}$	18	29 120,3 ($\pm 16,3$)	262,9 $\begin{pmatrix} -11,0 \\ +12,1 \end{pmatrix}$

(*) alle Werte in der Einheit »Hertz« (Hz)

³⁰⁾ Weitere Untersuchungen zeigten, dass die Frequenzen der IO-Referenzkonfiguration nicht exakt mit den Eigenfrequenz-Erwartungswerten defektfreier *AGG*-Teile übereinstimmen. Ursächlich dafür sind die nichtlinearen Zusammenhänge sowie Wechselwirkungseffekte (vgl. Abschn. 4.3.2) gesehen.

Abb. 4.12 visualisiert die Verteilungseigenschaften der Eigenfrequenzen für IO-Pleuel aus der AGG. Ausgehend von den Normalverteilungsannahmen sind in der oberen Hälfte der Abbildung **Wahrscheinlichkeitsdichten** zu den Frequenzmerkmalen dargestellt. Es ist zu sehen, dass sich die üblichen Wertebereiche teilweise überlappen, was ein notwendiges, wegen der Korrelationen jedoch kein hinreichendes Kriterium dafür ist, dass es zu Modenvertauschungen (siehe Abschn. 4.3.1) kommen kann. Im unteren Teil der Abbildung sind die Erwartungswerte, die Standardabweichungen und die Variationskoeffizienten für alle analysierten Eigenfrequenzen angegeben. Erwähnenswert ist, dass die absolute Streuung (Standardabweichung) mit der Modennummer m tendenziell zwar ansteigt, die relative Streuung (Variationskoeffizient) jedoch für einige Merkmale mit niedriger Modennummer vergleichsweise deutlich stärker ausgeprägt ist.

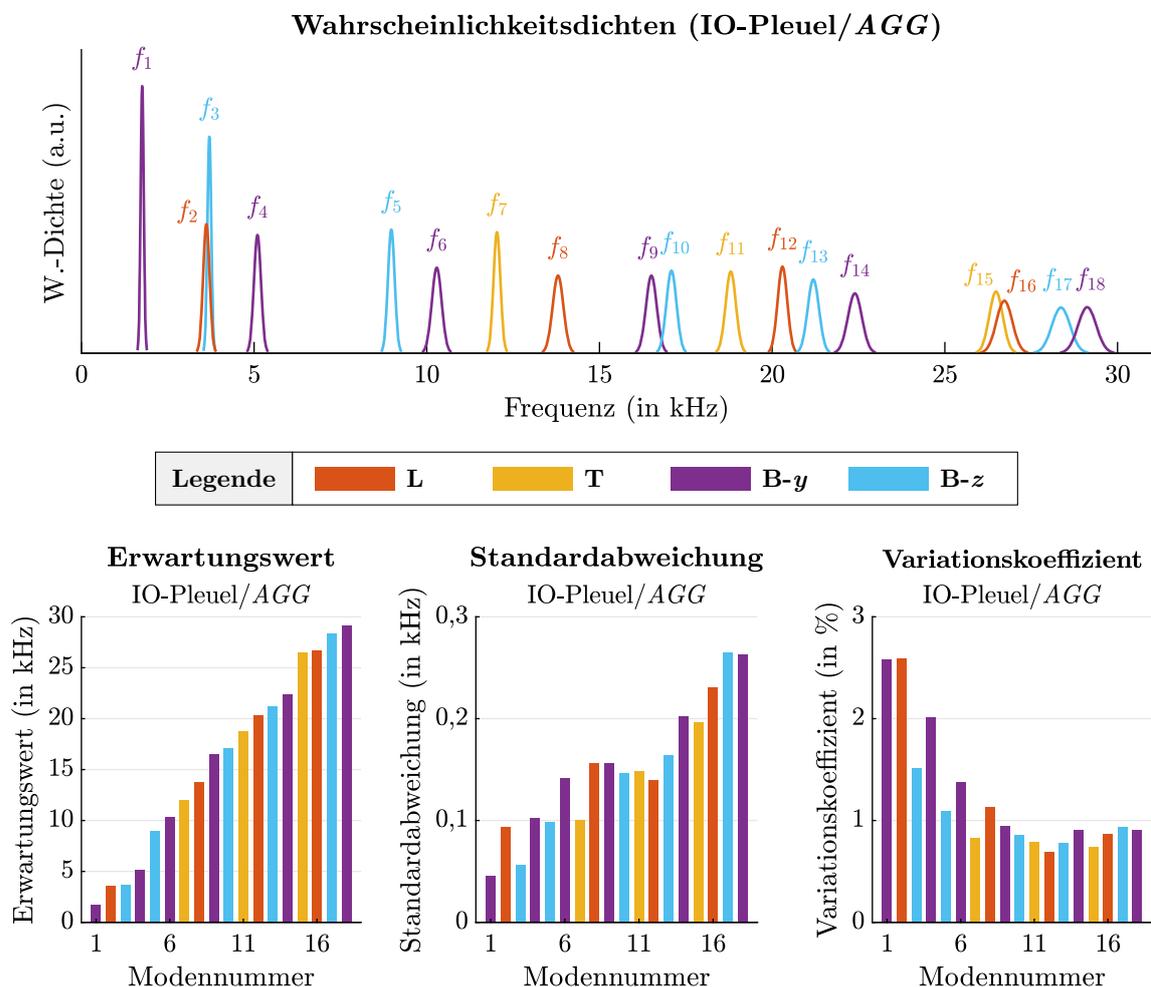


Abb. 4.12: Verteilungseigenschaften der Frequenzmerkmale f_1 bis f_{18} für IO-Pleuel aus der AGG, quantifiziert mittels Wahrscheinlichkeitsdichten (oben) sowie mittels Erwartungswert, Standardabweichung und Variationskoeffizient (unten) in Abhängigkeit von der Modennummer (L, T, B-y & B-z → Modentypen nach Tab. 4.3)

Nachfolgend werden nun die Eigenfrequenzen von **NIO-Teilen** aus der *AGG* beleuchtet. Dabei werden neben den Eigenfrequenzen selbst auch extrahierte Defekteinflüsse betrachtet, d. h. die in den Eigenfrequenzen eines jeden NIO-Pleuels verglichen mit einem sonst identischen IO-Teil sich widerspiegelnden Auswirkungen des jeweiligen Defekts.³¹ Sofern nicht anders angegeben, sind die Defekte aller im Folgenden angesprochenen NIO-Pleuel sowohl bzgl. ihrer Größe als auch in der Position stetig gleichverteilt (vgl. Abb. 4.5). Die modenspezifische Auswertung der Eigenfrequenzen der NIO-Pleuel bzw. der extrahierten Defekteinflüsse führte zu den folgenden Erkenntnissen:

- **Verteilungstypen** → Die Eigenfrequenzen von NIO-Pleueln wurden anhand von Histogramm-Plots und Hypothesentests als annähernd normalverteilt eingeschätzt. Zwar wurde die Normalverteilungshypothese durch die Tests vereinzelt abgelehnt, aber die Abweichungen gegenüber Normalverteilungen sind gering (trotz ggf. statistischer Signifikanz). Die extrahierten Defekteinflüsse sind hingegen (ausgenommen des Spezialfalls einer von NIO- zu NIO-Teil in der Größe und Position konstanten Defektausprägung) eindeutig nicht normalverteilt – je nach Frequenzmerkmal sind individuelle Verteilungen erkennbar. Dass die Eigenfrequenzen annähernd Normalverteilungen folgen, obwohl sie die nicht normalverteilten Defekteinflüsse enthalten, liegt an den größenordnungsmäßig nicht maßgeblichen Defekteinflüssen, welche die aufgrund der Geometrieviationen primär normalverteilten Streuungen nur wenig beeinflussen (vgl. Abb. 4.15 im folgenden Abschn. 4.4).
- **Korrelationen** → Zwischen den verschiedenen Eigenfrequenzmerkmalen können auch für NIO-Pleuel teilweise starke Korrelationen beobachtet werden, ähnlich wie für die IO-Teile. Die Defekteinflüsse bzgl. der verschiedenen Eigenfrequenzen sind meist ebenfalls stark miteinander korreliert. Zwischen den extrahierten Defekteinflüssen der NIO-Pleuel und den Eigenfrequenzen sonst identischer IO-Teile liegen keine nennenswerten Korrelationen vor, sie sind annähernd linear unabhängig (da die Eigenfrequenzen von NIO-Pleueln die Defekteinflüsse selbst beinhalten, zeigen sich diese Paarungen hingegen meist schwach korreliert). Zwar existieren Wechselwirkungen der Defekte mit der zufälligen Pleuel-Geometrie, aber die Effektstärken sind sehr gering und die Korrelationen werden durch eine von Teil zu Teil zufällige Defektausprägung deutlich überlagert (wieder ausgenommen des Spezialfalls einer von NIO- zu NIO-Teil konstanten Defektausprägung).

Abb. 4.13 quantifiziert die **Erwartungswerte** sowie die **Standardabweichungen** der betrachteten Frequenzmerkmale für NIO-Pleuel aus der *AGG*. Die Verteilungsparameter sind dabei jedoch nicht als Absolutwerte (in Hz), sondern als prozentuale, defektbedingte Abweichungen gegenüber den entsprechenden Kennzahlen, wie sie für IO-Teile bestimmt wurden, angegeben. Es ist zu erkennen, dass von Teil zu Teil zufällig variierende Defekte verglichen mit den IO-Teilen nur zu geringfügig verschobenen Erwartungswerten führen,

³¹⁾ Die Defekteinflüsse wurden ermittelt, indem die Differenzen zwischen den Eigenfrequenzen der NIO-Teile und den entsprechenden Frequenzen geometrisch identischer IO-Teile berechnet wurden.

denn im Einzelfall verhältnismäßig extreme Defekteinflüsse (durch vergleichsweise große Defekte bzw. Defekte an Stellen, für die ein betrachtetes Frequenzmerkmal sehr sensitiv ist) werden im Mittel abgeschwächt. Die Zufälligkeit der Defektausprägung von Teil zu Teil zeigt sich jedoch in signifikant erhöhten Standardabweichungen, denn die defektbedingten Streuungen der Frequenzwerte erhöhen die geometriebedingten Variationen. Das bedeutet, dass die Eigenfrequenzen von NIO-Pleueln mit zufälligen Fehlern etwas stärker streuen als die Frequenzen ansonsten identischer IO-Teile.

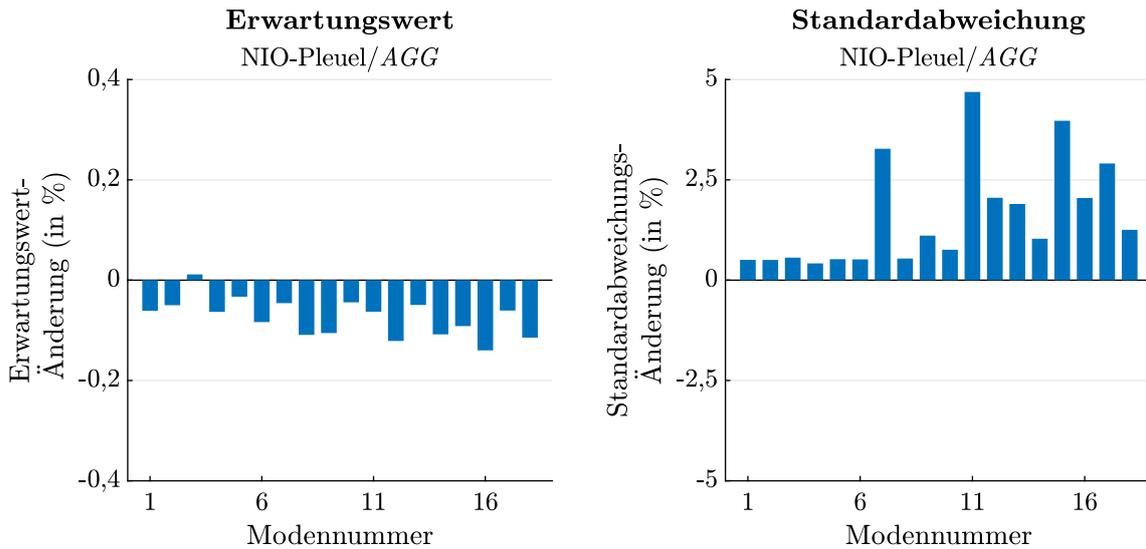


Abb. 4.13: Verteilungseigenschaften der Eigenfrequenzen für fehlerhafte NIO-Pleuel aus der AGG in Abhängigkeit der von Modennummer, quantifiziert mittels prozentualer Änderungen bzw. Abweichungen der Erwartungswerte (links) und Standardabweichungen (rechts) verglichen mit den für IO-Teile festgestellten Erwartungswerten/Standardabweichungen

Abb. 4.14 (oben links) charakterisiert die aus den Eigenfrequenzen defekter AGG-Pleuel extrahierten **Defekteinflüsse** mithilfe empirischer Quantile. Zu sehen ist, dass von Teil zu Teil zufällige Defekte deutlich variierende Defekteinflüsse bedingen. Je nach Eigenfrequenzmerkmal sind die Werte dabei unsymmetrisch oder annähernd symmetrisch verteilt, wobei entweder bevorzugt nur negative oder sowohl negative als auch positive Werte auftreten. Die mit Medianen angegebenen mittleren Defekteinflüsse liegen allerdings zumeist im negativen Bereich. Wenngleich der jeweilige Wertebereich mit dem Frequenzmerkmal variiert, sind die Defekteinflüsse in ihren Beträgen meist viel geringer als 1% – nur sehr vereinzelt bzw. bei verhältnismäßig großen Defekten lassen sich ausgeprägtere Defekteinflüsse beobachten. Vor dem Hintergrund des betrachteten Anwendungsszenarios und der Tatsache, dass die eigenfrequenzbasierte Erkennung defekter Teile erst ab einer gewissen Defektgröße möglich sein kann, umfasst Abb. 4.14 drei zusätzliche, darstellungstechnisch analoge Diagramme (oben rechts und untere Zeile). Jedes dieser Diagramme bezieht sich auf die Defekteinflüsse, die mit zufällig platzierten Defekten einhergehen, die jedoch von Teil zu Teil durch eine konstante 1-mm-, 2-mm- bzw. 3-mm-Defektgröße gekennzeichnet sind. Die Darstellungen zeigen anschaulich, wie wenig insbesondere kleinere Defekte die Pleuel-Eigenfrequenzen beeinflussen.

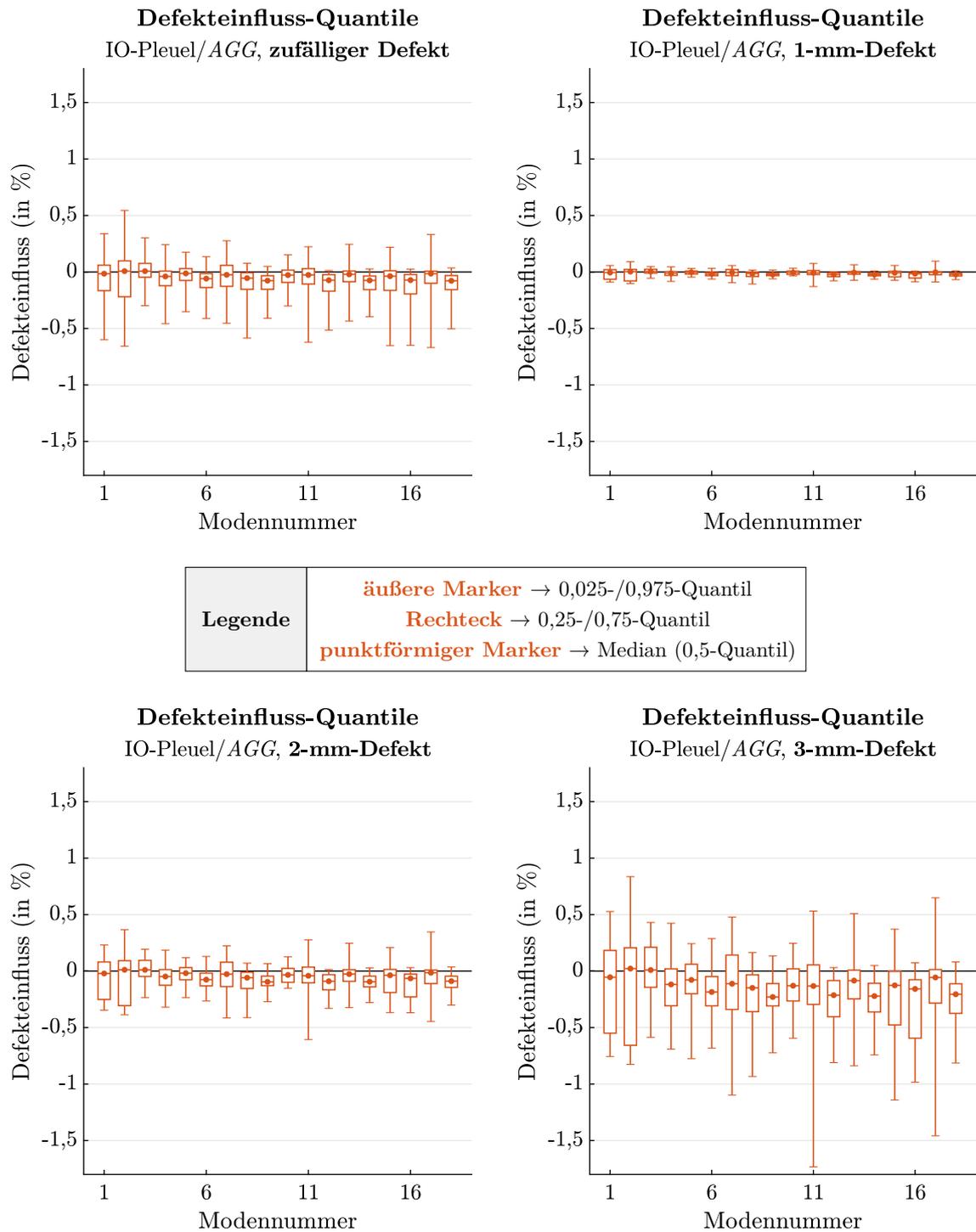


Abb. 4.14: Verteilungseigenschaften der Eigenfrequenz-Defekteinflüsse für fehlerhafte NIO-Pleuel aus der AGG in Abhängigkeit von der Modennummer und der Defektausprägung von Teil zu Teil (zufällige oder konstante 1-mm-, 2-mm- oder 3-mm-Defektgröße wie angegeben), quantifiziert mittels verschiedener Quantile

4.4 Limitierungen einer Schwellwert-Klassifizierung

Mittels FEM-Daten wurde untersucht, ab welcher Defektgröße theoretisch eine überwiegend korrekte IO/NIO-Trennung defektfreier IO-Pleuel und defekter NIO-Teile mithilfe einfacher **Schwellwert-Klassifikatoren** möglich ist – d. h. mit Klassifikatoren, die auf die separate (nicht kombinierte) Analyse eines der 18 Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} fokussieren. Zwar kann im Einzelfall bereits eine einzige, signifikant durch einen Defekt beeinflusste Eigenfrequenz ausreichen, um ein NIO-Teil als solches zu identifizieren. Die allgemeine Voraussetzung dafür ist aber, dass der Defekteinfluss verglichen mit der geometriebedingten Variation im analysierten Eigenfrequenzmerkmal im statistischen Mittel groß ist, da der nachzuweisende Effekt sonst dominierend von den Geometrievariationen überlagert wird bzw. werden kann.

Aus Abschn. 4.3.3 kann für die *AGG*-Pleuel des Anwendungsszenarios gefolgert werden, dass die in den Eigenfrequenzen der Teile abgebildeten **Geometrieinflüsse** zusätzliche **Defekteinflüsse** meist stark überlagern. So können die geometriebedingten Variationen der Eigenfrequenzen von IO-Teilen mit Variationskoeffizienten zwischen knapp 0,7 % und etwas mehr als 2,5 % quantifiziert werden (siehe Abb. 4.12). In Anbetracht der Normalverteilungen weist folglich knapp ein Drittel der IO-Teile Werte bzgl. eines betrachteten Eigenfrequenzmerkmals auf, die mindestens um 0,7 %, im Extremfall sogar um mehr als 2,5 %, vom jeweiligen Erwartungswert abweichen. Im Vergleich dazu sind die Defekteinflüsse meist von deutlich geringerem Ausmaß (siehe Abb. 4.14). Nur bei verhältnismäßig großen 3-mm-Fehlern wurden defektbedingte Frequenzänderungen in der Größenordnung von 1 % bis 1,5 % bzw. vereinzelt etwas mehr beobachtet. Die Einflüsse kleinerer 2-mm- oder gar 1-mm-Defekte auf die Eigenfrequenzen betragen hingegen meist maximal 0,5 % bzw. etwa 0,1 %. Aus dieser Gegenüberstellung erschließt sich, dass die Eigenfrequenzen fehlerhafter *AGG*-Pleuel mehrheitlich innerhalb der für die IO-Pleuel typischen Wertebereiche liegen. Die IO/NIO-Unterscheidung mithilfe einzelner Eigenfrequenz-Schwellwerte scheint dem ersten Eindruck nach somit stark limitiert zu sein.

Abb. 4.15 zeigt die Frequenzen 50 zufälliger NIO-Teile aus der *AGG* bzgl. ausgewählter Eigenfrequenzmerkmale im Vergleich mit den Eigenfrequenzen von (geometrisch identischen) IO-Pleueln, wobei die NIO-Objekte zufällig positionierte Fehler mit einheitlichen Durchmesserwerten von 1 mm, 2 mm bzw. 3 mm aufweisen. Die Streubereiche der Eigenfrequenzen der IO-Teile sind in den Diagrammen mittels der horizontalen Linien gekennzeichnet (Ein-, Zwei- bzw. Drei-Sigma-Intervalle). Es ist zu sehen, dass die geometriebedingten die defektbedingten Frequenzvariationen sehr deutlich überlagern, selbst im Fall der 3-mm-Defekte. Weiterhin ist im Hinblick auf einfache Schwellwert-Klassifikatoren zu bedenken, dass sich ein Defekt in stark nichtlinearer Abhängigkeit von seiner Position in den Eigenfrequenzen abbildet (siehe Abb. 4.9). In letzter Konsequenz hat das zur Folge, dass ein betrachtetes Merkmal gegenüber einer gegebenen Defektposition ggf. nicht bzw. kaum sensitiv ist. Somit kann ein einziger Schwellwert-Klassifikator nur im Hinblick auf spezielle Defektpositionen zielführend sein.

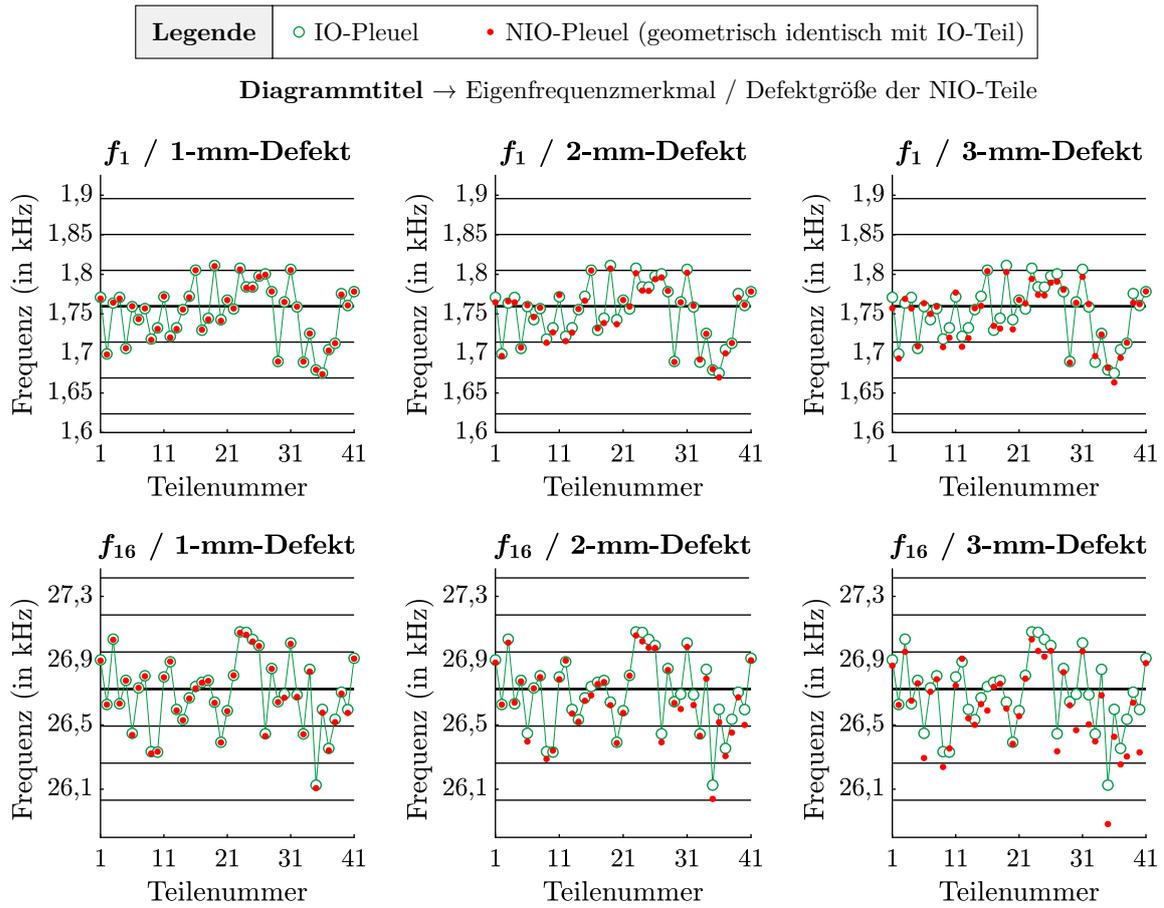


Abb. 4.15: Vergleich der Eigenfrequenzen von IO-Pleueln und geometrisch identischen NIO-Pleueln mit je einem zufällig positionierten 1-mm-, 2-mm- oder 3-mm-Defekt am Beispiel der zwei Eigenfrequenzmerkmale f_1 (oben) und f_{16} (unten)

Die **binäre Problemstellung** einer IO/NIO-Schwellwert-Klassifizierung wird an dieser Stelle zunächst als kurzer, allgemeiner Exkurs betrachtet. Abb. 4.16 (links) skizziert die Verteilung eines beliebigen Merkmals für IO- sowie für NIO-Teile, wobei dieses Merkmal die Basis zur IO/NIO-Bewertung entsprechender Teile darstellt. Je nach Entscheidungsgrenze bzw. Schwellwert und je nachdem, wie deutlich sich die IO- und NIO-Objekte im betrachteten Merkmal unterscheiden, treten Fehlklassifizierungen auf. Fälschlicherweise können die IO-Objekte als defekt und die NIO-Objekte als defektfrei klassifiziert werden (siehe Abschn. 2.2.5). Die Wahrscheinlichkeiten für diese zwei verschiedenen Fehlklassifizierungen sind negativ miteinander korreliert und können durch die Entscheidungsgrenze in die eine oder andere Richtung gelenkt werden. In Abb. 4.16 (rechts) ist eine mögliche Schwellwert-Festlegung auf Grundlage der Verteilungseigenschaften der IO-Teile dargestellt. Abhängig davon, ob ein Defekt die Merkmalswerte einseitig nach unten oder nach oben beeinflusst, bietet es sich z. B. an, die Entscheidungsgrenze mithilfe eines Quantils so festzulegen, dass ein geringer, definierter Anteil p der IO-Objekte fälschlicherweise als defekt klassifiziert wird. Der verbleibende Anteil $q = (1 - p)$ wird folglich korrekt eingestuft. Inwiefern NIO-Objekte damit einhergehend korrekt bzw. falsch klassifiziert werden, hängt von deren Verteilung ab.

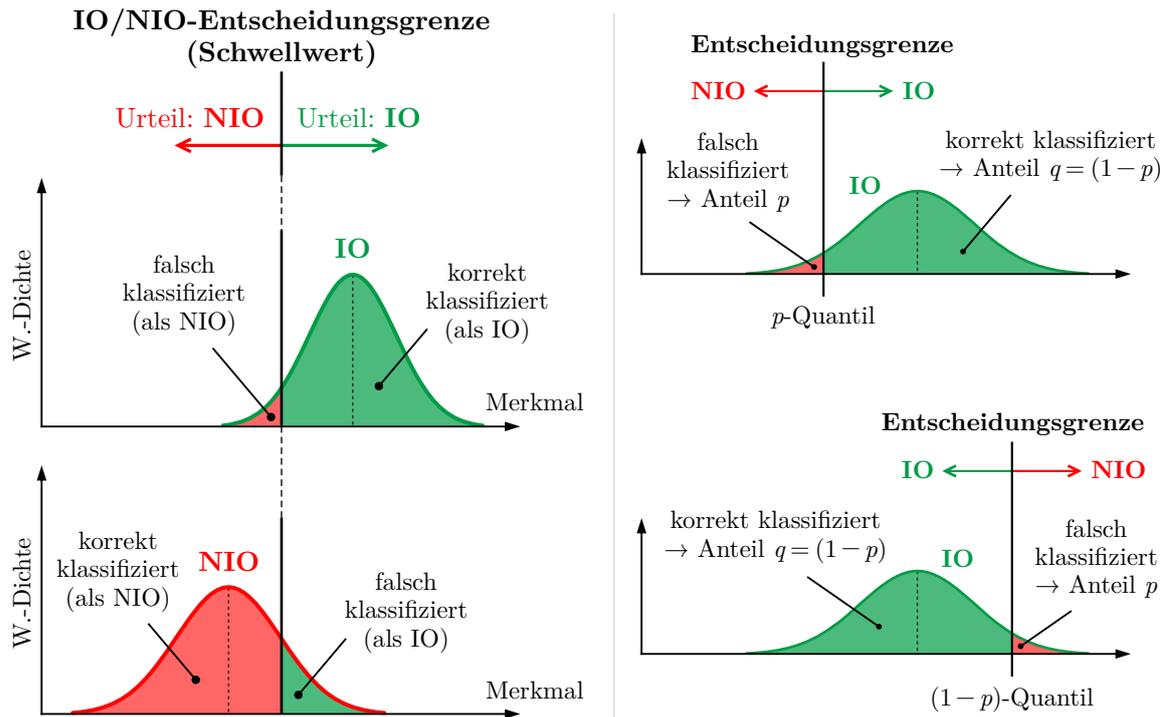


Abb. 4.16: Mögliche Fehlklassifizierungen bei der IO/NIO-Klassifizierung beliebiger Objekte (links) sowie Fallunterscheidung im Hinblick auf geeignete IO/NIO-Entscheidungsgrenzen mit vorgegebenem Anteil p für die Fehlklassifizierungen von IO-Objekten (rechts)

Um die **Limitierungen** einer primitiven Schwellwert-Klassifizierung von IO- und NIO-Pleueln aus der AGG belastbar quantifizieren zu können, wurde der Spezialfall einer von NIO- zu NIO-Teil einheitlichen, zentral im Steg-Segment platzierten Durchgangsbohrung näher betrachtet. Mittels Vergleichen wurde erkannt, dass das Eigenfrequenzmerkmal f_{16} unter allen Merkmalen die höchste Sensitivität gegenüber einem zentral im Steg-Segment platzierten 1-mm-, 2-mm- und 3-mm-Defekt im Verhältnis zur geometriebedingten, für IO-Teile typischen Eigenfrequenzvariation aufweist. Folglich genügte die Betrachtung dieses Eigenfrequenzmerkmals. Dabei ist der Defekteinfluss im konkreten Fall so gerichtet, dass die Frequenzen defekter Teile zu niedrigeren Werten hin verschoben sind. Somit handelt es sich bei dem IO/NIO-Klassifizierungsproblem auf Basis der Eigenfrequenz f_{16} um das in Abb. 4.16 oben rechts skizzierte Szenario, bei dem eine geeignete Entscheidungsgrenze dem p -Quantil des IO-Falls entspricht. Es wurde $p = 0,05$ gewählt, was als Konsequenz mit sich bringt, dass Fehlerurteile für 5% der IO-Teile zu erwarten sind. Damit wurde die IO-Erkennungsrate (siehe Abschn. 2.2.5) gleichzeitig auf 95% festgelegt. Ausgehend vom Erwartungswert (26,723 kHz) und der Standardabweichung (0,231 kHz) dieses normalverteilten Frequenzmerkmals für IO-Pleuel (siehe Tab. 4.4) sowie einem Wert von ca. 1,645 für das 0,05-Quantil der Standardnormalverteilung befindet sich die Entscheidungsgrenze bei etwa 26,344 kHz. Weist ein Pleuel im Eigenfrequenzmerkmal f_{16} nun einen geringeren Wert auf, ist es als NIO/defekt, andernfalls als IO/defektfrei zu klassifizieren.

Abb. 4.17 visualisiert die Verteilung des Eigenfrequenzmerkmals f_{16} für IO-Teile aus der AGG per Wahrscheinlichkeitsdichte-Kurve. Für NIO-Teile mit je einem zentral im Steg-

Segment platzierten Durchgangsbohrungs-Defekt sind analoge Kurven unter Berücksichtigung unterschiedlicher, von Teil zu Teil konstanter Defektdurchmesser dargestellt. Die Kurvenverläufe beruhen dabei auf Normalverteilungsannahmen sowie Erwartungswerten und Standardabweichungen, die auf Basis von Simulationsdaten geschätzt wurden.

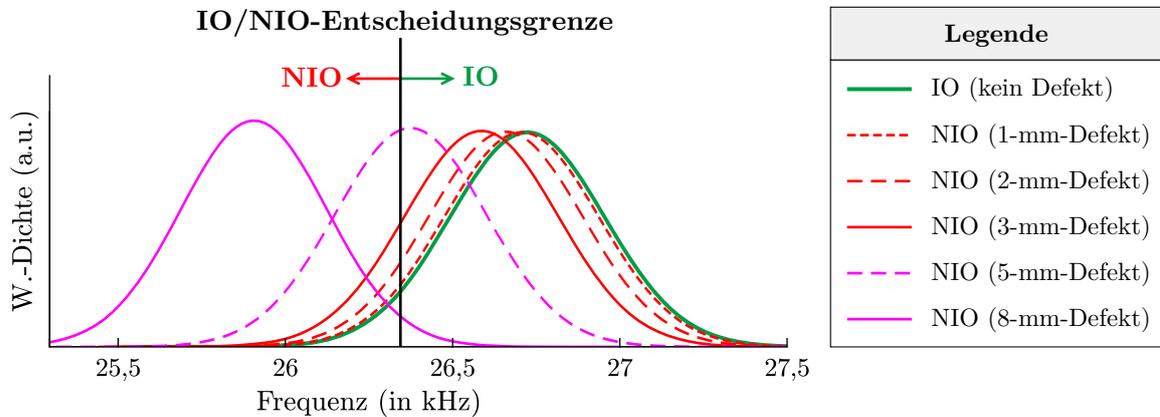


Abb. 4.17: Wahrscheinlichkeitsdichte bzgl. des Eigenfrequenzmerkmals f_{16} für IO-Pleuel aus der AGG und für NIO-Pleuel mit jeweils einem zentral im Steg-Segment positionierten Defekt in Abhängigkeit von der konstanten Defektgröße der NIO-Teile

Wie Abb. 4.17 zeigt, überdecken die auf NIO-Pleuel mit einzelnen, einheitlich platzierten 1-mm-, 2-mm- bzw. 3-mm-Defekten bezogenen Verteilungen die für defektfreie AGG-Teile gültige Verteilung deutlich. Somit ist im Fall der für das Anwendungsszenario relevanten Defektgrößen von 1 mm bis 3 mm keine einfache IO/NIO-Trennung anhand des herangezogenen Eigenfrequenzmerkmals f_{16} möglich, selbst nicht unter der stark vereinfachenden Annahme einer konstanten statt einer jeweils zufälligen Defektposition. Im Detail können mit dem festgelegten Schwellwert bei einer Defektgröße von 1 mm, 2 mm oder 3 mm nur ungefähr 5,8 %, 8,6 % bzw. 14,5 % aller NIO-Pleuel korrekt als defekt klassifiziert werden. Sogar Teile, die einen 5-mm-Defekt aufweisen, werden statistisch gesehen in weniger als der Hälfte der Fälle als defekt erkannt. Erst bei einer Mindestdefektgröße zwischen 7 mm und 8 mm lässt sich erstmals für die NIO-Pleuel eine zufriedenstellende NIO-Erkennungsrate (siehe Abschn. 2.2.5) von 90 % bzw. sogar von 95 % beobachten (dann überschreitet der festgelegte Schwellwert erstmalig das defektgrößenabhängige 0,9- bzw. 0,95-Quantil der Verteilung der NIO-Teile).

Letztlich wird als **Fazit** aus diesem Abschnitt mitgenommen, dass einfache Schwellwert-Klassifikatoren keine belastbare IO/NIO-Klassifizierung der adressierten Pleuel im Sinne des definierten Anwendungsszenarios bzw. Prüfziels bieten können. Denn einerseits sind sie jeweils auf die Detektion von NIO-Teilen mit Fehlern an ganz bestimmten Positionen beschränkt. Zum anderen liegen die Nachweisgrenzen bzw. die Defektgrößen, die zur verlässlichen, schwellwertbasierten Identifizierung defekter Teile mindestens notwendig sind, deutlich oberhalb der als maßgeblich festgelegten Defektgrößen. Davon abgesehen liefern einfache Schwellwert-Klassifikatoren ohne Weiteres keine quantitativen Aussagen zu den Defekten von NIO-Pleueln, wie es das Anwendungsszenario fordert.

5 Simulationen & Messungen

Dieses Kapitel behandelt die zur Konzeptdemonstration verwendeten konkreten **Pleuel** sowie die zugehörigen konkreten **Simulations- und Messdaten**. In dieser Arbeit wird zwischen sog. virtuellen Pleueln und sog. realen Pleueln unterschieden, wobei sämtliche konkreten Teile auf Basis des in Kap. 4 erläuterten Anwendungsszenarios definiert bzw. hergestellt wurden, d. h. unter Berücksichtigung der dargelegten Bauteilstrukturmodelle sowie der *Anwendungsszenario-Grundgesamtheit (AGG)*.

Die **virtuellen Pleuel** sind idealisierte Teile, welche nicht physisch, sondern basierend auf parametrischen Beschreibungen ihrer individuellen Bauteilstrukturen ausschließlich als (Computer-)Modelle existieren. Die Eigenfrequenzen der virtuellen Teile wurden per FEM simuliert. Die **realen Pleuel** existieren hingegen physisch. Sie wurden nach speziellen Vorgaben maschinell aus einem Aluminiumwerkstoff gefertigt und im Verlauf der Arbeit umfassend experimentell charakterisiert, u. a. mit ART hinsichtlich ihrer Eigenfrequenzen. Abb. 5.1 stellt ein virtuelles und ein reales Pleuel gegenüber.



Abb. 5.1: Gegenüberstellung eines virtuellen Pleuels (links, Screenshot aus der verwendeten FEM-Software) und eines maschinell gefertigten realen Pleuels (rechts, Fotoaufnahme)

Dieses Kapitel umfasst die folgenden Abschnitte, in denen die präsentierten Inhalte zum besseren Verständnis stellenweise in den Kontext der in Kap. 6 chronologisch erläuterten Konzeptdemonstration eingeordnet werden:

- Abschn. 5.1 zielt auf die virtuellen Pleuel der Arbeit und deren synthetische Daten ab. Zuerst werden die konkreten virtuellen Pleuel vorgestellt und es wird erläutert, wie die Bauteilstrukturen der Teile definiert wurden (Abschn. 5.1.1). Danach wird beschrieben, wie die Eigenfrequenzen der Teile mittels FEM berechnet wurden und welche wesentlichen Datenverarbeitungsschritte sich an die FEM-Simulationen anschlossen (Abschn. 5.1.2). Abschließend wird aufgezeigt, inwiefern die berechneten Frequenzen fehlerbehaftet sind (Abschn. 5.1.3).

- Abschn. 5.2 behandelt die realen Pleuel dieser Arbeit sowie größtenteils experimentelle Analysen und die dabei generierten Daten. Zunächst werden die realen Pleuel sowie einige zusätzliche Materialproben vorgestellt und die Herstellung der Objekte wird beschrieben (Abschn. 5.2.1). Es wird erläutert, wie Temperatureinflüsse rechnerisch kompensiert, Ausreißer identifiziert und Größtfehler im Zuge der quantitativen Betrachtungen abgeschätzt wurden (Abschn. 5.2.2). Experimentelle Analysen bezüglich der Dichte und der elastischen Eigenschaften des eingesetzten Werkstoffs werden beschrieben (Abschn. 5.2.3 und Abschn. 5.2.4). Darüber hinaus werden die Resultate aus einigen röntgentechnischen Referenzanalysen gezeigt (Abschn. 5.2.5) und es wird erläutert, wie die Teile geometrisch vermessen wurden (Abschn. 5.2.6). Danach wird eine Untersuchung beschrieben, bei der die Eigenmoden eines Pleuels per Laservibrometrie analysiert wurden (Abschn. 5.2.7). Neben den experimentellen Analysen durchgeführte FEM-Simulationen mit Fokus auf die Eigenfrequenzen der realen Pleuel werden dargelegt (Abschn. 5.2.8). Zuletzt wird erklärt, wie die Pleuel-Eigenfrequenzen mittels ART erfasst wurden (Abschn. 5.2.9).
- Abschn. 5.3 befasst sich mit den grundlegenden Abweichungen zwischen den FEM-simulierten Eigenfrequenzen virtueller und den ART-gemessenen Frequenzen realer Pleuel. Am Beispiel ausgewählter Teile werden dabei zunächst die vorherrschenden Abweichungen zwischen Simulations- und Messdaten analysiert (Abschn. 5.3.1). Es wird dargelegt, inwiefern die Abweichungen durch eine präzisere simulationstechnische Modellierung der Teile reduziert werden können (Abschn. 5.3.2). Danach wird ein Ansatz zur Anpassung berechneter Frequenzdaten via Korrekturfaktoren vorgestellt (Abschn. 5.3.3) und schließlich evaluiert (Abschn. 5.3.4).

5.1 Virtuelle Pleuel und simulationstechnische Analysen

5.1.1 Übersicht und Definition konkreter Teile

Die im Rahmen der Konzeptdemonstration herangezogenen virtuellen Pleuel unterteilen sich in sog. **virtuelle Trainingspleuel** und **virtuelle Validierpleuel**. In beiden Fällen handelt es sich um IO- und NIO-Zufallspleuel, also um Teile mit zufälligen Abmessungen sowie ggf. jeweils einem zufällig positionierten Defekt. Die Geometrie- und Materialeigenschaften der Teile sowie mögliche Defekte wurden mithilfe der dem Anwendungsszenario zugrundeliegenden Bauteilstrukturmodelle inkl. Bezug zur *AGG* spezifiziert (vgl. Kap. 4 und insb. Abschn. 4.2). Die virtuellen Trainings- und Validierpleuel nahmen im Zuge der Konzeptdemonstration die folgenden Rollen ein:

- **Virtuelle Trainingspleuel** → Diese Pleuel bildeten die zentrale Grundlage zur Erzeugung synthetischer ART-Trainingsdaten, auf deren Basis Klassifikatoren für die ART-Qualitätsprüfung von Pleueln berechnet wurden. Mit dem Ziel möglichst neutraler Trainingsdaten und schließlich robuster, leistungsfähiger Klassifikatoren beschreiben die Trainingspleuel die erwartbaren *AGG*-Bauteilkonfigurationen vergleichsweise großzügiger sowie gleichverteilt (vgl. S. 38 f. in Kap. 3).
- **Virtuelle Validierpleuel** → Diese *AGG*-Teile dienten der Überprüfung der ermittelten Klassifikatoren hinsichtlich deren theoretischen Performances. Die Teile sind stochastisch unabhängig von den Trainingspleueln.

Insgesamt wurden 50 000 virtuelle Trainingspleuel und 16 000 Validierpleuel beschrieben. Die **Materialeigenschaften** aller dieser Pleuel sind einheitlich, wobei sämtlichen Teilen, konsistent zur *AGG*, das homogene, isotrope Referenzmaterial mit den in Tab. 4.2 (siehe Abschn. 4.2.2) angegebenen Kennwerten zugewiesen wurde.

Wie auch in der *AGG* sind die **Geometrien** der virtuellen Trainings- und Validierpleuel idealisiert (v. a. symmetrische Form ohne Form- und Lageabweichungen, 3-mm-Kantenradien). Die Abmessungen der Teile bzgl. ihrer acht Hauptgeometrieparameter variieren von Pleuel zu Pleuel zufällig. Diesbezüglich unterliegen die Trainingspleuel und die Validierpleuel jedoch individuellen Verteilungsvorgaben. Abb. 5.2 skizziert die vorgegebenen Verteilungen, wobei für jeden der Hauptgeometrieparameter Folgendes gestützt auf den jeweiligen *AGG*-Erwartungswert μ_G sowie die zugehörige *AGG*-Standardabweichung σ_G unterstellt wurde (vgl. Tab. 4.1 in Abschn. 4.2.1):

- **Trainingspleuel-Abmessungen** → Die Abmessungen unterliegen einer stetigen Gleichverteilung, deren Grenzen sich aus dem *AGG*-Erwartungswert μ_G abzüglich respektive zuzüglich des 4,5-fachen der *AGG*-Standardabweichung σ_G ergeben. Der Wertebereich beträgt also $\mu_G \pm 4,5\sigma_G$. Die Trainingspleuel stammen somit aus einer Grundgesamtheit, die abweichend zur normalverteilten *AGG* durch gleichverteilte Geometrievariationen in 50 % breiteren Streubereichen verglichen mit den wesentlichen Geometrie-Wertebereichen der *AGG* gekennzeichnet ist. Damit überdecken

die Trainingspleuel-Geometrien die meisten *AGG*-Geometrien und mittlere Abmessungen treten zudem nicht häufiger auf als extremere Ausprägungen.

- **Validierpleuel-Abmessungen** → Den Abmessungen liegt eine Normalverteilung mit dem Erwartungswert μ_G sowie der Standardabweichung σ_G der *AGG* zugrunde. Der wesentliche Geometrie-Wertebereich mit 99,73% der zu erwartenden Realisierungen beträgt $\mu_G \pm 3\sigma_G$. Somit entstammen die Validierpleuel aus geometrischer Sicht unmittelbar der *AGG*.

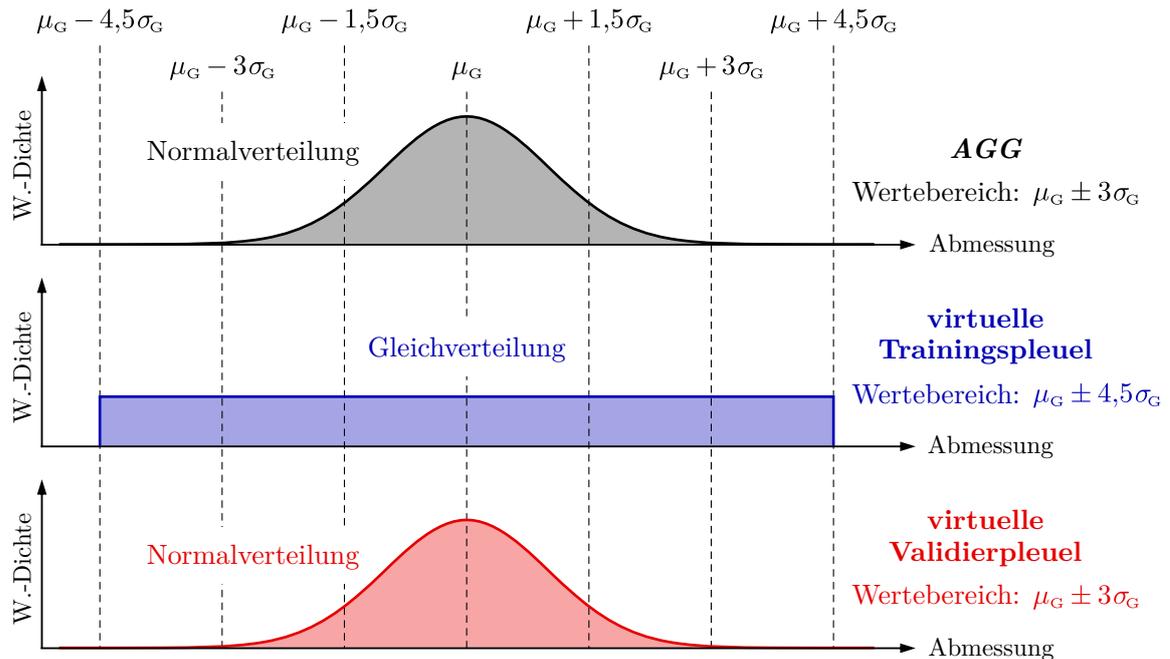


Abb. 5.2: Verteilungsvorgaben für die geometrischen Abmessungen der virtuellen Trainings- und Validierpleuel bezüglich der acht Hauptgeometrieparameter auf Grundlage des jeweiligen *AGG*-Erwartungswerts μ_G und der zugehörigen *AGG*-Standardabweichung σ_G

Stichprobenartig wurden zufällige **Geometrieconfigurationen** beschrieben, und zwar 5000 Trainingspleuel- und 1000 Validierpleuel-Geometrien. Den dargelegten Verteilungsvorgaben folgend wurden die Trainingspleuel-Abmessungen mittels stetig gleichverteilter Zufallszahlen definiert, die mit der MATLAB[®]-Funktion `unifrnd` («continuous uniform random numbers») generiert wurden. Die Zufallsabmessungen der Validierpleuel wurden hingegen durch normalverteilte Zahlen festgelegt, wofür die Funktion `normrnd` («normal random numbers») diente.³² Die zwei Funktionen wurden dabei so initialisiert, dass alle generierten Zufallsabmessungen stochastisch unabhängig sind. Demnach bestehen weder Abhängigkeiten zwischen den spezifischen Geometrieconfigurationen noch zwischen den acht Abmessungen bzgl. der verschiedenen Hauptgeometrieparameter.

³²⁾ Bei den per `normrnd` und `unifrnd` erzeugten Zahlen handelt es sich um Pseudozufallszahlen. Beide Funktionen verwenden als internen Zufallszahlengenerator standardmäßig den sog. Mersenne-Twister [MAT22], der auch zur Zahlenerzeugung im Rahmen dieser Arbeit genutzt wurde.

Auf Basis der 5000 Trainingspleuel-Geometrien wurden die in Summe 50 000 **virtuellen Trainingspleuel** geometrisch spezifiziert, wozu die Geometriekonfigurationen mehrfach verwendet wurden. Konkret resultierten zum einen 5000 fehlerfreie IO-Teile, die die 5000 verschiedenen Geometrien aufweisen. Zum anderen wurden $9 \times 5000 = 45\,000$ NIO-Teile geometrisch beschrieben, denen wiederholt dieselben 5000 Geometriekonfigurationen wie den IO-Teilen zugewiesen wurden und für die zudem je ein zufällig positionierter 1-mm-, 2-mm- oder 3-mm-Durchgangsbohrungs-Defekt festgelegt wurde. Im Detail ergaben sich die nachfolgend genannten Trainingspleuel, die innerhalb jeder der Gruppen à 5000 Teile durch dieselben 5000 Zufallsgeometrien gekennzeichnet sind:

- **5000 IO-Pleuel (defektfrei)**
- **3×5000 NIO-Pleuel (Defekt in Segment R1)** → konst. 1-mm-, 2-mm- bzw. 3-mm-Defektdurchmesser für je 5000 Teile, zufällige Defektpositionierung
- **3×5000 NIO-Pleuel (Defekt in Segment R2)** → konst. 1-mm-, 2-mm- bzw. 3-mm-Defektdurchmesser für je 5000 Teile, zufällige Defektpositionierung
- **3×5000 NIO-Pleuel (Defekt in Segment S)** → konst. 1-mm-, 2-mm- bzw. 3-mm-Defektdurchmesser für je 5000 Teile, zufällige Defektpositionierung

Die **Durchgangsbohrungs-Defekte** der virtuellen NIO-Trainingspleuel wurden mittels gleichverteilter Zufallszahlen positioniert, und zwar unabhängig von den Geometriekonfigurationen. Dadurch wurden sie konform zu den entsprechenden Verteilungsannahmen der *AGG* gleichmäßig über die drei definierten Defektbereiche in den zwei Zylinderring-Segmenten R1 und R2 sowie im Steg-Segment S verteilt (vgl. Abb. 4.4 in Abschn. 4.2.3). Zur Zahlenerzeugung diente erneut die MATLAB®-Funktion `unifrnd`. Hinsichtlich der drei Defektbereiche wurden die Defektpositionen aber jeweils nur einmalig (und für die drei Bereiche unabhängig voneinander) über Sequenzen von Zufallszahlen fixiert, wobei die konkreten Positionen wiederholt für die je 3×5000 Teile mit einer konstanten 1-mm-, 2-mm- bzw. 3-mm-Defektgröße genutzt wurden. Zu jedem virtuellen IO-Trainingspleuel existieren somit neun geometrisch identische NIO-Teile, die alle Kombinationen aus den drei konstanten Defektdurchmessern sowie drei zufälligen Defektpositionen umfassen. Zu jedem NIO-Trainingspleuel gibt es ebenfalls neun geometrisch identische Teile, darunter ein IO-Teil sowie zwei NIO-Teile mit jeweils identischer Defektposition, jedoch mit unterschiedlichen Defektgrößen.³³

Um die wiederholte Verwendung der per Zufallszahlen definierten Geometriekonfigurationen und Defektausprägungen zu verdeutlichen, schematisiert Abb. 5.3 die 10×5000 Bauteilkonfigurationen der virtuellen IO- und NIO-Trainingspleuel.

³³⁾ Die NIO-Trainingspleuel decken nur 1-mm-, 2-mm- und 3-mm-Defekte ab, wohingegen die Defektgröße in der *AGG* stetig gleichverteilt ist. Bei der Konzeptdemonstration wurden interpolationsartig weitere Trainingspleuel beschrieben, wodurch enger abgestufte und breiter streuende Defektgrößen implementiert wurden. Die NIO-Teile wurden zur detaillierten Abbildung der Defekte zudem überrepräsentiert, was bei der späteren Ermittlung der ART-Klassifikatoren berücksichtigt wurde.

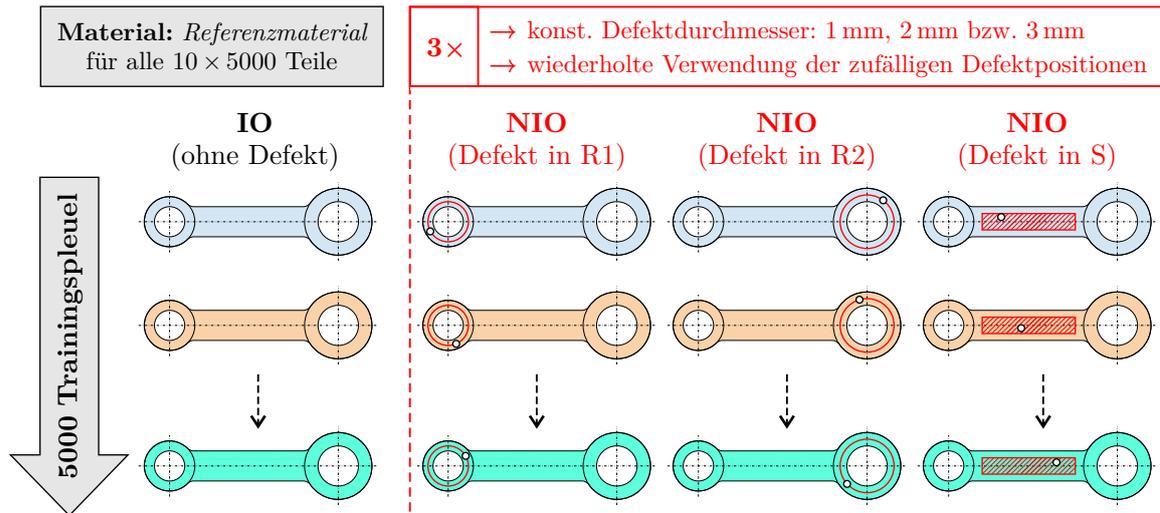


Abb. 5.3: Bauteilkonfigurationen der virtuellen Trainingspleuel bezüglich Geometrie, Material und Qualitätszustand/Defekt (gleiche Farbe kennzeichnet identische Geometrie)

Grundsätzlich analog wurde für die **virtuellen Validierpleuel** vorgegangen. Die 1000 Validierpleuel-Geometrie Konfigurationen wurden ebenfalls wiederholt genutzt, um 1000 IO-Teile und 15×1000 NIO-Teile geometrisch zu definieren. Auch die Defektpositionen der NIO-Teile wurden mit mehrfach verwendeten Zufallszahlen beschrieben. Im Gegensatz zu den Trainingspleueln wurden allerdings noch zwei weitere Defektgrößen berücksichtigt, und zwar 1,5 mm und 2,5 mm.

Abschließend beinhaltet Tab. 5.1 eine Gegenüberstellung der virtuellen Trainings- und Validierpleuel, womit sowohl die Gemeinsamkeiten (in schwarzer Schrift) als auch die Unterschiede (in blauer/roter Schrift) zusammengefasst werden.

Tab. 5.1: Vergleichende Gegenüberstellung der virtuellen Trainings- und Validierpleuel

	Virtuelle Trainingspleuel	Virtuelle Validierpleuel
Anzahl	5000 IO- & 45 000 NIO-Teile	1000 IO- & 15 000 NIO-Teile
Geometrie (vgl. Abschn. 4.2.1)	idealisierte Geometrien (u. a. keine Form-/Lageabweichungen) → Zufallsabmessungen bzgl. der Hauptgeometrieparameter gleichverteilte Abmessungen (50 % breitere Wertebereiche als in Tab. 4.1 angegeben)	normalverteilte Abmessungen (Erwartungswerte & Standardabweichungen laut Tab. 4.1)
Material (vgl. Abschn. 4.2.2)	Referenzmaterial (homogen & isotrop, Kennwerte laut Tab. 4.2) → konstante Materialeigenschaften von Teil zu Teil	
Defekt (vgl. Abschn. 4.2.3)	Durchgangsbohrungs-Defekte (ein einzelner Defekt pro NIO-Teil) → diskrete Durchmesser (konstant für je 15 000 bzw. 3000 Teile) → zufällige Positionen (stetig gleichverteilt, siehe Abb. 4.4) 1-mm-, 2-mm- bzw. 3-mm-Defekt	1-mm-, 1,5-mm-, 2-mm-, 2,5-mm- bzw. 3-mm-Defekt

5.1.2 FEM-Eigenfrequenzsimulationen und Modenerkennung

Die aus den strukturmechanischen Eigenschaften der definierten virtuellen Pleuel resultierenden Eigenmoden und Eigenfrequenzen wurden mittels **FEM** (siehe Abschn. 2.2.3) berechnet. Dazu wurde die FEM-Software **COMSOL Multiphysics**[®] (COMSOL AB, nachfolgend: COMSOL[®]) in der Version 5.2a genutzt, wobei 3D-Modellierungen vorgenommen und Eigenfrequenz-Studien (*Eigenfrequency*) mithilfe des Festkörpermechanik-Interface (*Solid Mechanics*) des Strukturmechanik-Moduls (*Structural Mechanics*) der Software durchgeführt wurden. Konkret wurden stets Eigenmoden und -frequenzen berechnet, die sich auf ungedämpfte Eigenschwingungen freier Pleuel beziehen. Nachfolgend werden die FEM-Modellierung sowie die gewählten Softwareeinstellungen dargelegt, wobei bzgl. nicht angesprochener Punkte die Standardeinstellungen der Software verwendet wurden. Diese und weiterführende Informationen zu COMSOL[®] finden sich in der Dokumentation der Software [COM16].

Zunächst wurde die **Modellierung** des Teiletyps eines Pleuels in COMSOL[®] umgesetzt. Hierzu wurden in der Software globale Parametervariablen für alle maßgeblichen Bauteilparameter definiert. Die Geometrie wurde dann in Abhängigkeit der Parametervariablen aufgebaut, v. a. aus primitiven Elementen und mit booleschen Operatoren. Der optionale Durchgangsbohrungs-Defekt wurde z. B. mittels eines Zylinders dargestellt, welcher von der restlichen Geometrie subtrahiert wurde. Zudem wurde dem FEM-Modell ein linear-elastisches Materialmodell mit isotroper Elastizität sowie homogenen Eigenschaften zugewiesen. Danach wurden die **Randbedingungen** festgelegt, wobei keinerlei Lagerung, Einspannung oder äußere Kräfte vorgegeben wurden – sämtliche Oberflächen, Kanten und Punkte des aufgebauten Modells wurden als frei definiert.

Zur **Pleuel-Diskretisierung** wurde eine freie Vernetzung mit 3D-Tetraederelementen gewählt (quadratische Lagrange-Elemente), die wie folgt quantifiziert wurde:

- »**Maximale Elementgröße**« → 1,1 mm
- »**Minimale Elementgröße**« → 0,01 mm
- »**Maximale Element-Wachstumsrate**« → 1,2
- »**Krümmungsfaktor**« → 0,6 (nur relevant für NIO-Pleuel)
- »**Auflösung kleiner Bereiche**« → 0 (ohne Relevanz für die Pleuel)

Die ersten drei der o. g. **Diskretisierungsparameter** legen die maximale und minimale Elementkantenlänge und den Faktor fest, um den benachbarte Elemente höchstens wachsen dürfen. Das Produkt aus dem Krümmungsfaktor und dem Radius einer gekrümmten Kontur bestimmt die maximale Elementgröße entlang dieser Kontur. In Anbetracht des gewählten Werts sowie der im Modell auftretenden Radien ist der Krümmungsfaktor für die Diskretisierung von IO-Pleueln irrelevant. Für NIO-Pleuel mit je einem Durchgangsbohrungs-Defekt hat die Einstellung hingegen eine detaillierte Abbildung des Defekts in Form einer lokal dichteren Diskretisierung zur Folge.

Abb. 5.4 zeigt die anhand der o. g. Einstellungen erzielte Diskretisierung eines virtuellen Pleuels. Zudem ist die lokal **dichtere Vernetzung** im Bereich eines kleinen Defekts am Beispiel einer 1-mm-Durchgangsbohrung abgebildet.

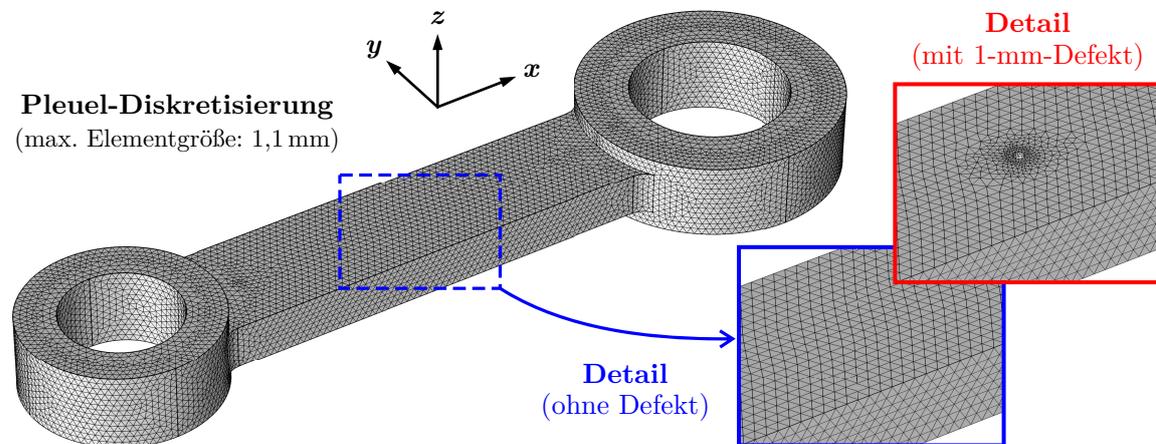


Abb. 5.4: FEM-Diskretisierung eines virtuellen Pleuels inkl. einer lokal dichteren Vernetzung im Bereich eines kleinen Durchgangsbohrungs-Defekts (Durchmesser: 1 mm)

Die Pleuel-Diskretisierung wurde empirisch mit dem Ziel einer homogenen Vernetzung spezifiziert, aber ohne kleine Defekte zu ignorieren. Dabei sollte die homogene Diskretisierung letztendlich allen Pleuel-Eigenmoden, die durch lokal individuelle Verschiebungen, Verzerrungen und Spannungen gekennzeichnet sind, in ähnlichem Maße gerecht werden. Die Festlegung der max. Elementgröße auf 1,1 mm basiert auf dem Kompromiss zwischen dem Rechenaufwand/Zeitbedarf und der Genauigkeit der Simulationsergebnisse. Dieser Kompromiss war notwendig, um im Rahmen der Arbeit das Eigenschwungsverhalten zehntausender Pleuel mittels FEM berechnen zu können.³⁴

In den **Studien-Einstellungen** wurde konkretisiert, dass COMSOL[®] pro Pleuel die 40 frequenzniedrigsten Lösungen berechnet. Die aus dieser Vorgabe folgenden Eigenmoden und -frequenzen decken sicher die relevanten Schwingungsformen *Mode-1* bis *Mode-18* bzw. die zu den Merkmalen f_1 bis f_{18} gehörenden Frequenzwerte ab. Für einen räumlich nicht fixierten Körper ermittelt COMSOL[®] jedoch immer auch sechs Starrkörpermoden bei ca. 0 Hz (Translationen und Rotationen des undeformierten Körpers). Die Anzahl der eigentlichen Eigenmoden/-frequenzen beträgt daher nur 34 pro Teil.³⁵

³⁴⁾ Im Fall der IO-Referenzkonfiguration mündet eine Elementgröße von max. 1,1 mm in einer Diskretisierung aus etwa $2,9 \cdot 10^5$ Elementen sowie in einem zu lösenden Gleichungssystem mit rund $1,2 \cdot 10^6$ Freiheitsgraden. Mit den gewählten Einstellungen und der genutzten Computerhardware liegt der Zeitbedarf für die Lösung des einzelnen Teils bei ca. 7 min. Die Dauer einer sonst identischen Simulation mit einer max. Elementgröße von 0,8 mm beträgt hingegen bereits ca. 30 min.

³⁵⁾ Die Anzahl der zu berechnenden Frequenzen wurde festgelegt, bevor der Fokus auf den Frequenzbereich bis ca. 30 kHz gelegt wurde, dann aber im Hinblick auf eine umfangreiche Datenbasis für andere Arbeiten beibehalten. Aufgrund möglicher Modenvertauschungen war zwar nicht zu erwarten, dass die 18 niedrigsten Frequenzen jedes Pleuels stets den 18 Eigenfrequenzmerkmalen f_1 bis f_{18} zuzuordnen sind (vgl. Abschn. 4.3.1). Jedoch ist dieser Effekt für die Pleuel bei Weitem nicht so ausgeprägt, als dass die Ermittlung der 34 niedrigsten Eigenfrequenzen notwendig gewesen wäre.

Weitere für die Simulationsergebnisse maßgebliche Einstellungen wurden nicht explizit gewählt, sondern es wurden die vorkonfigurierten Softwareeinstellungen verwendet (u. a. Solver: MUMPS, relative Toleranz der Lösung: $1 \cdot 10^{-6}$).

Zur effizienten Eigenschwingungssimulation der zehntausenden virtuellen Pleuel wurde auf die »**Parametersweep**«-Funktionalität von COMSOL[®] zurückgegriffen. Diese ermöglicht es, den global in der Software definierten Parametervariablen jeweils mehrere Werte zuzuweisen, welche dann als Berechnungsgrundlage in nacheinander geschalteten Einzelsimulationen berücksichtigt werden. Zur Umsetzung wurden die Zahlenwerte, die die in Bezug auf die Geometrien, das Material und die Qualitätszustände spezifizierten Konfigurationen vieler zusammengehöriger virtueller Pleuel beschreiben, per MATLAB[®] in einer geeignet strukturierten Parameterdatei abgelegt (aus praktischen Gründen wurden die Teile in Pakete von einigen hundert Pleueln aufgeteilt). Durch den Import solch einer Parameterdatei wurden dann die vorgegebenen Eigenschaften zahlreicher Teile mit sehr geringem manuellen Aufwand synchron in COMSOL[®] implementiert. Anschließend konnten die eigentlichen FEM-Berechnungen gestartet werden.

Nach Simulationsabschluss erfolgte jeweils ein **Datenexport** aus COMSOL[®]. Zum einen wurden die FEM-berechneten Eigenfrequenzen der betrachteten virtuellen Pleuel exportiert (COMSOL[®]-Variable: `solid.freq`). Zum anderen wurden die als Simulationsinput genutzten Daten zu den Geometrien, dem Material und den Qualitätszuständen der Teile abgespeichert. Zusammengehörige Daten, z. B. die Daten bzgl. 5000 virtueller Trainings- oder 1000 virtueller Validierpleuel, wurden in MATLAB[®] importiert und in einer Strukturvariable mit mehreren Datenfeldern abgelegt. Jedes dieser Felder wurde in Matrixform aufgebaut und beinhaltet in der i -ten Zeile Daten zum i -ten der N Pleuel. Die jeweils 34 niedrigsten Eigenfrequenzen der N Pleuel wurden z. B. in eine $(N \times 34)$ -Frequenzmatrix \mathbf{f}_a überführt. Diese weist entsprechend der Exportreihenfolge von COMSOL[®] pro Zeile eine aufsteigende Sortierung auf, sodass die FEM-simulierten Eigenfrequenzen für jedes Teil zuerst nur aufsteigend sortiert vorlagen (vgl. S. 54 in Abschn. 4.3.1).

Somit mussten für jedes virtuelle Pleuel aus seinen 34 aufsteigend sortierten Frequenzen genau die Werte identifiziert und entsprechend zugewiesen werden, die den betrachteten Eigenfrequenzmerkmalen f_1 bis f_{18} bzw. den 18 Schwingungsformen *Mode-1* bis *Mode-18* zuzuordnen sind. Dazu war eine automatisierte **Modenidentifizierung** erforderlich, d. h. eine Klassifizierung der FEM-berechneten Schwingungsformen.

Zwecks Modenidentifizierung wurden aus der FEM-Software zusätzlich teile- und modenspezifische x -, y - und z -Verschiebungswerte exportiert (COMSOL[®]-Variablen: \mathbf{u} , \mathbf{v} und \mathbf{w}). Diese Verschiebungen beziehen sich auf automatisch im Modell erzeugte Geometriepunkte, die mit Elementknotenpunkten der diskretisierten Strukturen zusammenfallen und dabei die Eigenmoden bzw. die FEM-berechneten Eigenvektoren der virtuellen Pleuel partiell charakterisieren. Abb. 5.5 zeigt die Positionen der Geometriepunkte für ein Pleuel ohne Defekt. Die Modenidentifizierung stützte sich jeweils auf die 24 in der Abbildung blau eingefärbten Punkte in den beiden Zylinderring-Segmenten bzw. auf die zugehörigen 72 modenspezifischen Verschiebungswerte pro Teil.

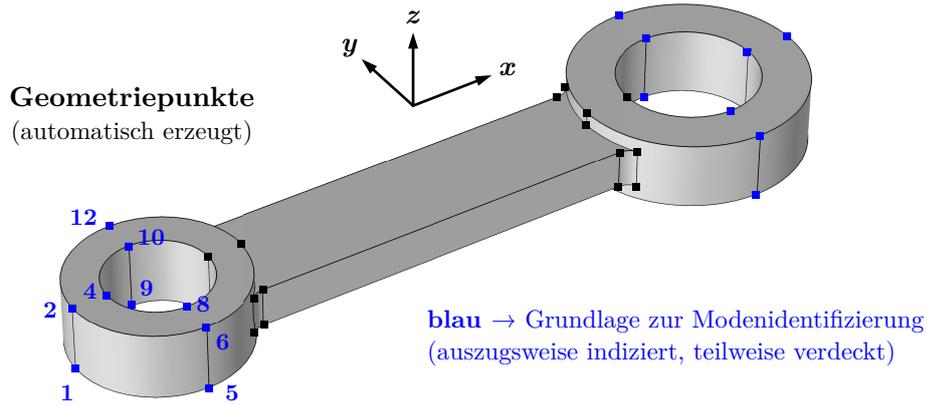


Abb. 5.5: Geometriepunkte zur Identifizierung FEM-simulierter Pleuel-Eigenmoden basierend auf entsprechenden modenspezifischen x -, y - und z -Verschiebungswerten

Die Verschiebungswerte, welche die k -te aufsteigend sortierte Eigenfrequenz bzw. die k -te unbekannte, zu identifizierende Eigenschwingungsform eines i -ten Pleuels repräsentieren, wurden in einem Vektor \mathbf{p}_k^i abgelegt (mit $i = 1, \dots, N$ und $k = 1, \dots, 34$). Als **Referenz** zur Modenidentifizierung diente die IO-Referenzkonfiguration, denn für diesen Fall sind die Eigenmoden per Definition bekannt (siehe Abschn. 4.3.1). Mittels FEM wurden für diese spezielle Konfiguration ebenfalls die 72 modenspezifischen Verschiebungswerte bzgl. der 24 Geometriepunkte berechnet. Die Verschiebungen, die dem Eigenfrequenzmerkmal f_m bzw. der bekannten Eigenschwingungsform *Mode- m* zugeordnet sind, wurden dabei in einem Referenzvektor $\mathbf{p}_m^{\text{Ref}}$ abgelegt (mit $m = 1, \dots, 34$).

Die Modenidentifizierung basierte nun darauf, zu jedem Vektor \mathbf{p}_k^i (unbekannte Schwingungsform) genau den Referenzvektor $\mathbf{p}_m^{\text{Ref}}$ (bekannte Schwingungsform *Mode- m*) mit der maximalen Übereinstimmung zu bestimmen. Als **Kriterium** wurde dazu das in Gl. 5.1 angegebene »Abstandsmaß« verwendet, das die Ähnlichkeit zweier Vektoren mithilfe des Korrelationskoeffizienten der Vektoreinträge beschreibt.³⁶

$$\text{Abstand}(\mathbf{p}_k^i, \mathbf{p}_m^{\text{Ref}}) = 1 - \text{Betrag} \left(\text{Korrelationskoeffizient}(\mathbf{p}_k^i, \mathbf{p}_m^{\text{Ref}}) \right) \quad (5.1)$$

Bei einer hohen Übereinstimmung zweier Moden, d. h. falls die Komponenten der entsprechenden Vektoren sehr stark positiv oder negativ korreliert sind, nimmt der Korrelationskoeffizient in Gl. 5.1 einen Wert von fast +1 oder fast -1 an. Mit der Betragsfunktion resultiert in beiden Fällen ein Wert von annähernd +1. Folglich ist das Abstandsmaß nur geringfügig größer als 0 und es ist plausibel, dass beide Vektoren einander entsprechende Schwingungsformen repräsentieren. Der Hintergrund der Betragsfunktion ist hierbei, dass COMSOL[®] die Eigenmoden bzw. die Verschiebungen »nicht einheitlich« exportiert. Aus

³⁶⁾ Die Formulierung des Kriteriums und die Benennung als Abstandsmaß hängen mit der Umsetzung per Nächste-Nachbarn-Klassifikator zusammen. Der Korrelationskoeffizient als maßgebliche Komponente ist aus mathematischer Sicht verwandt mit dem sog. *modal assurance criterion (MAC)*, vgl. z. B. [All03; Pas12], mit dem die Ähnlichkeit von Schwingungsformen bewertet werden kann.

Benutzersicht ist es nämlich stets zufällig, ob die Verschiebungswerte bzgl. einer berechneten Eigenmode, anschaulich gesehen, einen um 90° oder einem um 270° zur Ruhelage phasenverschobenen Schwingungszustand beschreiben. Zwischen den Verschiebungen zu zwei phänomenologisch identischen Moden kann daher entweder eine stark positive oder eine stark negative Korrelation beobachtet werden.

Die Modenidentifizierung und **Zuweisung** der FEM-simulierten Eigenfrequenzen zu den Eigenfrequenzmerkmalen f_1 bis f_{18} wurde folgendermaßen umgesetzt:

- 1) Die zuvor genannte Strukturvariable wurde um eine leere ($N \times 18$)-Frequenzmatrix \mathbf{f}_M erweitert (für die den Eigenmoden *Mode-1*, \dots , *Mode-18* bzw. den Eigenfrequenzmerkmalen f_1, \dots, f_{18} zuzuweisenden Frequenzwerte).
- 2) Mit der MATLAB[®]-Funktion `fitcknn` (»fit k -nearest neighbor classifier«) wurde ein Nächste-Nachbarn-Klassifikator berechnet, der mit den Referenzvektoren $\mathbf{p}_m^{\text{Ref}}$ ($m = 1, \dots, 34$) so trainiert wurde, dass er zu einem Vektor \mathbf{p}_k^i primär den Index m des Referenzvektors $\mathbf{p}_m^{\text{Ref}}$ zurückgibt, der das Kriterium nach Gl. 5.1 minimiert. Die von \mathbf{p}_k^i repräsentierte, unbekannte Eigenmode wird damit als *Mode- m* klassifiziert. Das zugehörige Eigenfrequenzmerkmal ist folglich f_m .
- 3) In einer äußeren Schleife ($i = 1, \dots, N$) wurde das i -te Pleuel betrachtet. In einer inneren Schleife ($k = 1, \dots, 34$) wurde die durch den Vektor \mathbf{p}_k^i repräsentierte, unbekannte k -te Eigenmode identifiziert. Sobald alle relevanten Schwingungsformen *Mode-1* bis *Mode-18* für das i -te Pleuel erkannt wurden, konnte die innere Schleife verlassen werden. Zur Vermeidung grober Fehler wurden Nebenbedingungen implementiert. So durften *Mode-1* bis *Mode-18* pro Teil jeweils nur einmalig zugeordnet werden. Die unbekannte k -te Eigenmode wurde zudem nur im Fall $|k - m| \leq 5$ mit *Mode- m* gepaart. Bei der Verletzung einer Nebenbedingung wurde eine unbekannte Schwingungsform als die Pleuel-Eigenmode identifiziert, welche das Kriterium nach Gl. 5.1 als »zweitbestes«, »drittbestes« usw. erfüllt.
- 4) Entsprechend der Modenidentifizierung wurden die FEM-berechneten Frequenzen den 18 Eigenfrequenzmerkmalen f_1 bis f_{18} zugeordnet. Dazu wurde der (i,k) -te Frequenzwert aus der $(N \times 34)$ -Frequenzmatrix \mathbf{f}_a (also die k -te aufsteigend sortierte Eigenfrequenz des i -ten Pleuels) an der (i, m) -ten Stelle der $(N \times 18)$ -Frequenzmatrix \mathbf{f}_M eingetragen. Der k -te Frequenzwert des i -ten Pleuels wurde auf diese Weise dem Eigenfrequenzmerkmal f_m zugewiesen.

Die **Verlässlichkeit** der o. g. Vorgehensweise zur Modenidentifizierung wurde überprüft. Unter anderem wurden hierzu ca. zwei Dutzend FEM-simulierte virtuelle Zufallspleuel herangezogen. Deren Eigenmoden wurden sowohl automatisiert identifiziert als auch manuell klassifiziert. Im Vergleich wurde eine ausnahmslose Übereinstimmung festgestellt, was die Tauglichkeit der geschilderten Vorgehensweise bestätigte.

5.1.3 Unsicherheiten und Fehler simulierter Frequenzdaten

Die **Bauteilstrukturen** der virtuellen Pleuel wurden in COMSOL® exakt so umgesetzt, wie sie zuvor definiert wurden. Den FEM-berechneten Eigenfrequenzen der Pleuel liegen somit exakte Geometrien, Materialeigenschaften und Defektausprägungen zugrunde, die gegenüber den idealisierten Vorgaben nicht unsicherheitsbehaftet sind (von vernachlässigbaren softwareseitigen Abbildungsfehlern abgesehen).

Die **FEM-berechneten Eigenfrequenzen** der virtuellen Pleuel sind hingegen fehlerbehaftet. Das heißt, dass sie gegenüber den unbekannt exakten Kontinuumslösungen der idealisierten Problemstellungen abweichen. Für die Abweichungen der berechneten Frequenzwerte von den exakten Lösungen spielen Modellierungsfehler im Sinne von unpräzisen Bauteilrepräsentationen zwar keine Rolle (wegen der exakten Modellierungen der ohnehin idealisierten Bauteilstrukturen). Jedoch bestimmte die Diskretisierung die Detaillierungsgrade der zu lösenden FEM-Gleichungssysteme und damit auch die Simulationsergebnisse signifikant. Der Diskretisierungseinfluss bzw. die durch die Vernetzung bedingten Diskretisierungsfehler der FEM-berechneten Pleuel-Eigenfrequenzen wurden empirisch untersucht.³⁷

Jede konkrete Pleuel-Diskretisierung wurde auf Basis der vorgegebenen Diskretisierungseinstellungen erzeugt (vgl. Abschn. 5.1.2). Sie kann dennoch als **zufällige Vernetzung** interpretiert werden. Denn im Detail, z. B. die Anzahl der Elemente sowie die Positionen der Knotenpunkte betreffend, wurden die virtuellen Pleuel automatisch durch COMSOL® und damit aus Benutzersicht zufällig diskretisiert. Folglich wurde jeweils ein in gewissem Maße zufälliges FEM-Gleichungssystem gelöst, sodass die simulierten Frequenzwerte stets zufällig gegenüber mittleren, von Zufallseffekten freien Lösungen abweichen.

Zwecks Analyse der Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} hinsichtlich der **Diskretisierungsfehler** wurden zahlreiche FEM-Berechnungen eines IO-Teils mit Referenzkonfiguration durchgeführt. Dabei wurde die **max. Elementgröße**, für die sonst ein Wert von 1,1 mm genutzt wurde, schrittweise von 1,5 mm ausgehend reduziert. Für max. Elementgrößen von 0,75 mm oder weniger konnte das vollständige FEM-Modell aufgrund von Limitierungen der Rechenhardware nicht mehr gelöst werden, sodass stattdessen ein »Viertel-Modell« verwendet wurde. Das heißt, dass nur ein Viertel der Pleuel-Geometrie unter Beachtung der x - y - und x - z -Symmetrie in COMSOL® modelliert wurde, wobei auf die Schnittflächen des Modells (separat für jeden der vier Modentypen) geeignete Symmetriebedingungen entsprechend Tab. 4.3 appliziert wurden. Mit dem reduzierten Modell konnte letztlich ein Minimalwert von 0,4 mm als max. Elementgröße genutzt werden. Bei den Simulationen wurden zu jeder eingestellten max. Elementgröße immer 100 wiederholte Berechnungen

³⁷⁾ Neben dem Diskretisierungseinfluss wurden u. a. Integrations- und Rundungsfehler der FEM-Software und ein Einfluss des FEM-Solvers als (mit-)ursächlich für die Abweichungen der FEM-berechneten Eigenfrequenzen von den exakten Lösungen in Betracht gezogen. Solche Faktoren wurden aber, soweit möglich, mittels Simulationen, bei denen anstelle der ansonsten verwendeten COMSOL®-Standardeinstellungen abweichende Einstellungen genutzt wurden, als vergleichsweise unwesentlich eingestuft (u. a. Solvertyp, relative Toleranz der Lösung, max. Anzahl von Iterationsschritten).

durchgeführt. Bei jeder Wiederholung wurde die Geometrie zufällig, jedoch unwesentlich im Bereich von $\pm 1 \cdot 10^{-9}$ mm variiert, was jeweils eine neue (gleichwertige) Vernetzung und damit einhergehende Frequenzvariationen provozierte.

Abb. 5.6 veranschaulicht die **Abhängigkeiten** mehrerer Eigenfrequenzen von der max. Elementgröße, wobei die runden Marker die über die wiederholten Simulationen gemittelten Frequenzen kennzeichnen. Zu sehen ist, dass die Eigenfrequenzen mit einer feineren Diskretisierung in jedem Fall abnehmen – entweder annähernd linear oder es ist bereits ein typisches Konvergenzverhalten zu erkennen. Mit der Zufälligkeit der Diskretisierung gekoppelt, variieren die Frequenzwerte bei jeder max. Elementgröße annähernd normalverteilt, wobei teils deutliche Korrelationen zwischen den zu verschiedenen Merkmalen gehörenden Frequenzen beobachtet wurden. Die Streuungen der Eigenfrequenzen sind in der Abbildung mittels Fehlerbalken quantifiziert (Drei-Sigma-Intervalle). Die Streuungen nehmen mit feinerer Vernetzung tendenziell ab, wobei im Fall der standardmäßigen max. Elementgröße von 1,1 mm je nach Frequenzmerkmal Werte zwischen rund $2,3 \cdot 10^{-4}$ % und $2 \cdot 10^{-3}$ % für den Variationskoeffizienten festgestellt wurden.

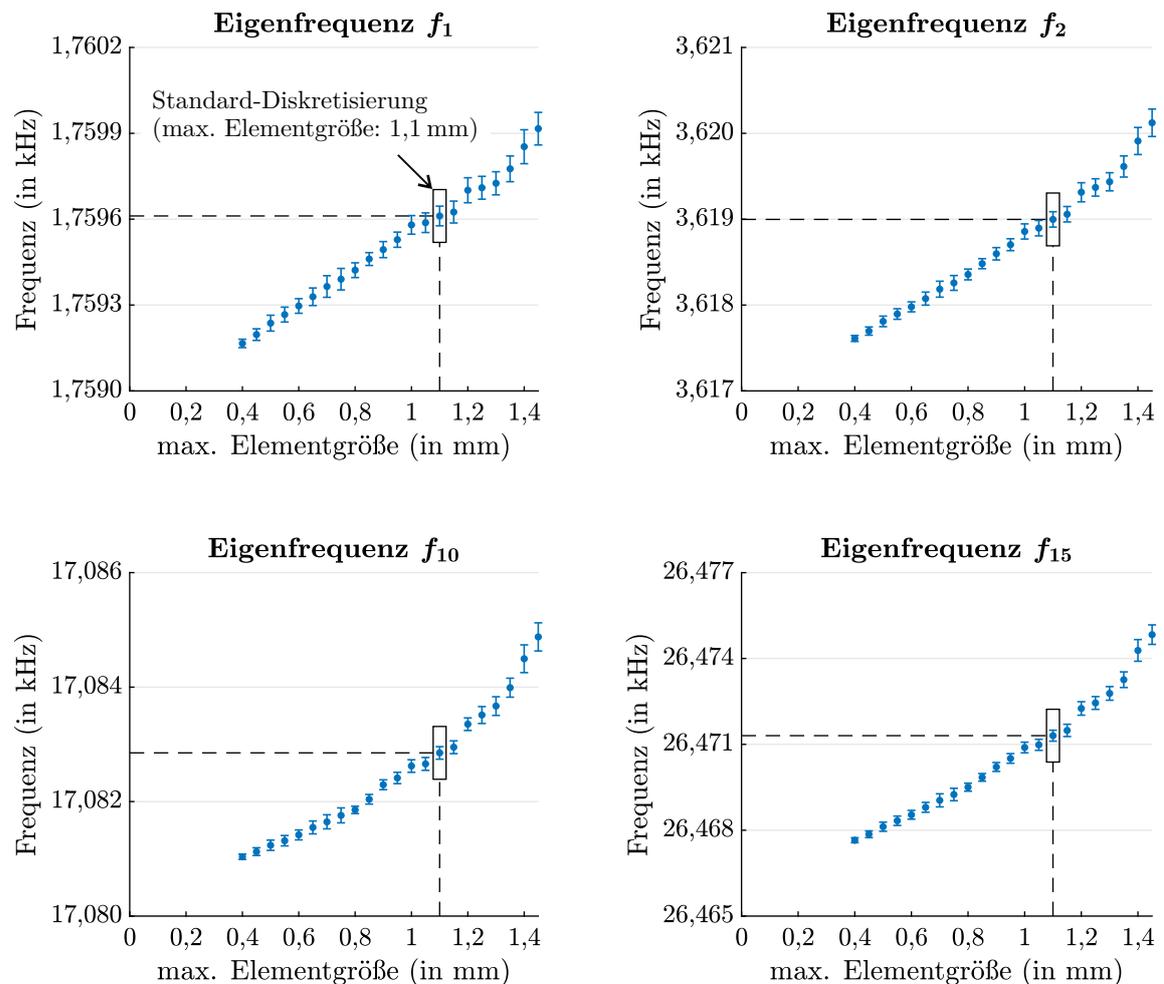


Abb. 5.6: FEM-simulierte Pleuel-Eigenfrequenzen (Eigenfrequenzmerkmale f_1 , f_2 , f_{10} und f_{15}) in Abhängigkeit von der max. Elementgröße bei der FEM-Berechnung

Die Diskretisierungsfehler der FEM-berechneten Pleuel-Eigenfrequenzen wurden mithilfe modenspezifischer **Minimal- und Maximalabschätzungen** quantifiziert. Dazu wurde das Konvergenzverhalten analysiert, das ausgehend von der standardmäßig eingestellten max. Elementgröße von 1,1 mm infolge einer schrittweisen Reduzierung auf den nutzbaren Minimalwert (0,4 mm) beobachtet wurde. Schließlich wurde das unbekannte Verhalten für den theoretischen Fall einer weiteren globalen Netzverfeinerung extrapoliert. Dabei wurde unterstellt, dass die FEM-berechneten Frequenzen bei zunehmend feinerer Diskretisierung gegen die unbekanntes exakten Kontinuumslösungen konvergieren. Die Minimal- und die Maximalabschätzungen der Diskretisierungsfehler grenzen die Abweichungen der mit der standardmäßigen max. Elementgröße von 1,1 mm berechneten Eigenfrequenzen in Bezug auf die exakten Lösungen dabei folgendermaßen ein:

- Die **Minimalabschätzungen** basieren auf der Annahme, dass die mit einer max. Elementgröße von 0,4 mm berechneten Frequenzen bereits gegen die Kontinuumslösungen konvergiert sind (bzw. dass die exakten Lösungen nicht oberhalb der mit der feinsten Diskretisierung erzielten FEM-Lösungen liegen). Folglich entsprechen die Minimalabschätzungen den Frequenzänderungen, die sich durch eine Reduzierung der max. Elementgröße von 1,1 mm auf 0,4 mm zeigten.
- Die **Maximalabschätzungen** gehen davon aus, dass die Eigenfrequenzen durch immer dichtere Diskretisierungen mit max. Elementgrößen unter 0,4 mm linear weiterhin so abfallen, wie es für den analysierten Bereich im Mittel beobachtet werden konnte (bzw. dass die exakten Lösungen zumindest nicht unterhalb der linear aus den FEM-Daten extrapolierten Frequenzwerte liegen). Eine Gerade, die durch die mit max. Elementgrößen von 0,4 mm sowie 1,1 mm erzielten Simulationsergebnisse verläuft, diene jeweils zur Extrapolation an der Stelle 0 mm.

Abb. 5.7 (links) visualisiert die **Methodik** zur Abschätzung der Diskretisierungsfehler. Abb. 5.7 (rechts) stellt die ermittelten Minimal- und Maximalabschätzungen bzgl. der 18 relevanten Eigenfrequenzmerkmale dar. Außerdem sind mittlere Schätzungen angegeben, die aus den Minimal- und Maximalabschätzungen gemittelt wurden. Zu sehen ist, dass die Diskretisierungsfehler stark mit den zugehörigen Eigenfrequenzmerkmalen variieren. Der Einfluss der Diskretisierung auf die FEM-berechneten Frequenzen korreliert zudem deutlich mit dem Modentyp (vgl. Abschn. 4.3.1). Für Eigenfrequenzen, deren zugehörige Eigenmoden signifikante Verformungen in z -Richtung des Pleuel-KOS aufweisen (d. h. Torsionsmoden und z -Biegemoden), sind die Diskretisierungsfehler durchweg deutlicher ausgeprägt als für die mit anderen Schwingungsformen (d. h. Longitudinalmoden sowie y -Biegemoden) verknüpften Frequenzmerkmale.³⁸

³⁸⁾ Durch eine anisotrope Diskretisierung könnte das Konvergenzverhalten hinsichtlich aller betrachteten Pleuel-Eigenmoden optimiert werden, wozu aber keine Analysen im Rahmen der Arbeit erfolgten.

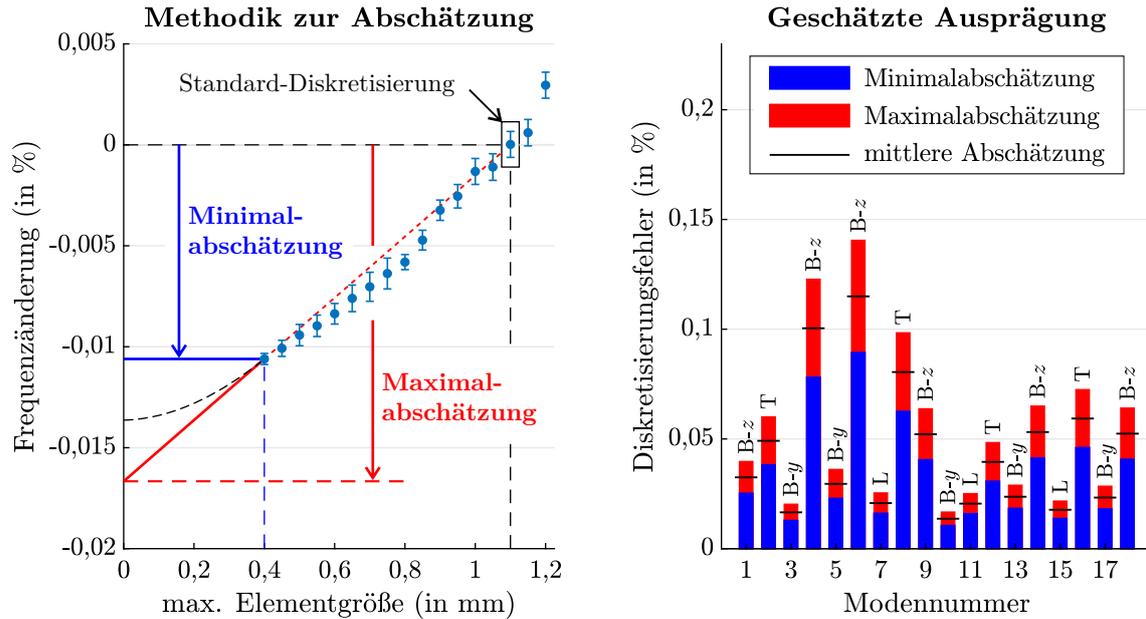


Abb. 5.7: Methodik zur Abschätzung der Diskretisierungsfehler der FEM-simulierten Pleuel-Eigenfrequenzen (links) sowie geschätzte Ausprägung dieses Fehlers in Abhängigkeit von der Modennummer (rechts; L, T, B-y & B-z → Modentypen nach Tab. 4.3)

Die Minimal- und Maximalabschätzungen stützen sich auf die gemittelten Daten aus den wiederholten Simulationen eines IO-Pleuels mit Referenzkonfiguration. Dabei grenzen sie die generellen Effektstärken schätzungsweise ein. Sie berücksichtigen jedoch nicht die durch die Zufälligkeit der Vernetzung bedingten Frequenzstreuungen bzw. die Unsicherheiten für den Fall einer einzelnen FEM-Simulation. Werden diese Unsicherheiten mittels Drei-Sigma-Intervallen einbezogen, liegen die **Diskretisierungsfehler** der FEM-berechneten Eigenfrequenzen eines virtuellen Pleuels (je nach Eigenfrequenzmerkmal und auf Basis der mittleren Abschätzungen) zwischen $+0,014 (\pm 0,001) \%$ (Merkmal f_{10}) und $+0,115 (\pm 0,006) \%$ (Merkmal f_6). Selbst mit den Maximalabschätzungen sowie den ungünstigsten, i. d. R. maximal erwartbaren Ausprägungen der zufälligen Fehleranteile (»plus drei Sigma«) ergeben sich nur vereinzelt Diskretisierungsfehler von $+0,1 \%$ bis rund $+0,15 \%$. Für die meisten Eigenfrequenzmerkmale sind die Fehler jedoch immer deutlich geringer.

Die Diskretisierungsfehler werden von den generellen Effektstärken dominiert, welche die zufälligen Fehleranteile immer um (sehr viel) mehr als das Zehnfache übertreffen. Weitere Analysen lassen zwar auf geringfügige Abhängigkeiten der Diskretisierungsfehler von der individuellen Bauteilstruktur schließen, insbesondere von der exakten Pleuel-Geometrie. Jedoch sind die Fehler größtenteils systematischer Natur. Die Diskretisierungsfehler sind nicht nur in Bezug auf die FEM-berechneten Eigenfrequenzwerte sehr gering, sondern sie sind letztlich auch unproblematisch für diese Arbeit.³⁹

³⁹⁾ Für jedes virtuelle Pleuel kann von vergleichbaren, weitgehend systematischen Diskretisierungsfehlern ausgegangen werden. Der Diskretisierungseinfluss steht daher einer physikalisch sinnvollen Abbildung kleiner Bauteilvariationen mittels FEM nicht im Wege, denn die Zusammenhänge zwischen den individuellen Bauteilstrukturen und den Eigenfrequenzen werden nicht maßgeblich überlagert.

Den Einfluss einer **lokal dichteren Vernetzung** im Bereich eines Durchgangsbohrungs-Defekts (siehe Abb. 5.4) betreffend gilt, dass dieser für die per FEM simulierten Eigenfrequenzen vernachlässigbar ist. Diese Erkenntnis basiert auf Vergleichen FEM-berechneter Eigenfrequenzen von NIO-Pleueln, in die an verschiedenen Positionen jeweils ein Defekt implementiert wurde, mit den simulierten Eigenfrequenzen sonst identischer IO-Objekte. Hierzu wurden die Eigenfrequenzen der IO-Pleuel einerseits unter Berücksichtigung der gewöhnlichen Diskretisierung berechnet. Andererseits wurden lokale Netzverfeinerungen realisiert, die den lokal feineren Diskretisierungen der NIO-Pleuel in den Bereichen ihrer Defekte entsprechen. Auf Basis dieser Vergleiche wurde erkannt, dass der Einfluss einer lokal dichteren Vernetzung bereits verglichen mit dem (verhältnismäßig geringen) Einfluss eines 1-mm-Defekts deutlich vernachlässigbar ist. Die für die virtuellen Pleuel per FEM abgebildeten Defekteinflüsse sind folglich keine Artefakte einer lokal feineren Diskretisierung, sondern es sind in hohem Maße »echte« physikalische Effekte.

5.2 Reale Pleuel und messtechnische Analysen

5.2.1 Übersicht und maschinelle Fertigung

Bei den zur Konzeptdemonstration eingesetzten realen Teilen wird zwischen sog. **realen Referenzpleueln** und **realen Validierpleueln** unterschieden. Spezielle Fertigungsvorgaben dienten dazu, die strukturmechanischen Eigenschaften der realen Pleuel möglichst gezielt einzustellen, wozu abermals die Bauteilstrukturmodelle des Anwendungsszenarios unter Berücksichtigung der *AGG* verwendet wurden (vgl. Kap. 4 und insb. Abschn. 4.2). Insbesondere wurde für jedes reale Pleuel eine Sollgeometrie spezifiziert. Während es sich bei den realen Referenzpleueln um fehlerfreie IO-Objekte handelt, wurden in mehrere der realen Validierpleuel im Verlauf der Analysen einzelne Defekte durch Bohren eingebracht. Die Validierpleuel umfassen somit IO- und NIO-Zustände. Die realen Referenz- und Validierpleuel wurden wie folgt bei der Konzeptdemonstration genutzt:

- **Reale Referenzpleuel** → Diese Pleuel dienten vorrangig der Analyse der Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Eigenfrequenzdaten, auf deren Basis die synthetischen ART-Trainingsdaten später in die »Messwelt« überführt wurden. Die Teile wurden nach dem Vorbild der IO-Referenzkonfiguration gefertigt, die die Bauteilstrukturen defektfreier *AGG*-Pleuel im Mittel beschreibt.
- **Reale Validierpleuel** → Diese Teile sind die im abschließenden Demonstrationschritt per ART hinsichtlich eines möglichen Defekts analysierten Objekte, wobei für deren Klassifizierungen die zuvor auf Basis synthetischer Trainingsdaten ermittelten Klassifikatoren eingesetzt wurden. Die realen Validierpleuel sind maschinell hergestellte Abbilder möglicher *AGG*-Zufallspleuel, die neben zufälligen Geometrievariationen auch mögliche Defektausprägungen wiedergeben.

Im Rahmen der Arbeit wurden in Summe **30 reale Pleuel** betrachtet, und zwar sechs Referenz- und 24 Validierpleuel, die folgendermaßen bezeichnet werden:⁴⁰

- **Reale Referenzpleuel** → $R-1, R-2, \dots, R-5$ (sowie $R-6$)⁴¹
- **Reale Validierpleuel** → $V-1, V-2, \dots, V-24$

Im Unterschied zu den virtuellen Teilen konnten die **Materialeigenschaften** der realen Pleuel nicht gezielt eingestellt werden. Die nominellen Kennwerte des eingesetzten Werkstoffs sind jedoch größenordnungsmäßig mit den Kennwerten des theoretischen Referenzmaterials (siehe Tab. 4.2 in Abschn. 4.2.2) der *AGG* vergleichbar, wobei zur Herstellung der realen Teile gewalztes Plattenmaterial aus der **Aluminiumlegierung** EN AW 6082

⁴⁰⁾ Einige weitere reale Pleuel wurden für verschiedene Abgleiche genutzt, u. a. um Chargeneinflüsse zu analysieren, worauf in diesem Dokument jedoch nicht explizit eingegangen wird.

⁴¹⁾ Das Referenzpleuel $R-6$ wurde während einer frühzeitigen LDV-Analyse (siehe Abschn. 5.2.7) durch eine tausendfache Anregung mit einem automatisierten Impulshammer beschädigt. Es wurde daher von allen anderen im Hauptteil dieses Dokuments dargelegten Analysen ausgeschlossen.

verwendet wurde (Werkstoffzustand T651, d. h. lösungsgeglüht und durch kontrolliertes Recken entspannt).⁴² Alle hier vorgestellten Teile wurden dabei vom selben Hersteller⁴³ aus einer Materialcharge bzw. aus einer einzigen Materialplatte gefertigt, sodass sie aus material- und fertigungstechnologischer Sicht aus einer Charge stammen.

Konsistent zur *AGG* sind die **Sollgeometrien** sämtlicher realen Pleuel idealisiert (v. a. symmetrische Form ohne Form-/Lageabweichungen, 3-mm-Kantenverrundungen). Dabei entspricht die einheitliche Sollgeometrie der realen Referenzpleuel der Referenzgeometrie (siehe Abschn. 4.2.1). Hingegen streuen die Sollabmessungen der realen **Validierpleuel** bzgl. der acht Hauptgeometrieparameter zufällig. Konkret wurden die Sollgeometrien der Validierpleuel folgendermaßen spezifiziert, wobei für jeden der Hauptgeometrieparameter der jeweilige *AGG*-Erwartungswert μ_G und die zugehörige *AGG*-Standardabweichung σ_G aufgegriffen wurden (vgl. Tab. 4.1 in Abschn. 4.2.1):

- Den Pleueln *V-1* bis *V-12* wurden zur *AGG* konsistente, stochastisch unabhängige **Normalverteilungen** in Bezug auf die Hauptgeometrieparameter unterstellt. Als Verteilungsparameter wurden dabei immer der jeweilige *AGG*-Erwartungswert μ_G und die zugehörige *AGG*-Standardabweichung σ_G gewählt. Somit entstammen die Sollgeometrien der Teile *V-1* bis *V-12* unmittelbar der *AGG*.
- Bezüglich der Pleuel *V-13* bis *V-24* wurde für jeden der Hauptgeometrieparameter eine **stetige Gleichverteilung** vorgegeben. Deren Intervallgrenzen wurden durch den jeweiligen Erwartungswert μ_G der *AGG* ab- bzw. zuzüglich des Dreifachen der zugehörigen *AGG*-Standardabweichung σ_G definiert. In Anbetracht der begrenzten Anzahl an Pleueln wurden durch die Gleichverteilungen die Wahrscheinlichkeiten für extremere, näher an den Rändern der Wertebereiche auftretende Abmessungen erhöht, während normalverteilte Werte gehäuft in der Nähe des Erwartungswerts liegen. Da die Wertebereiche der Gleichverteilungen $\mu_G \pm 3\sigma_G$ betragen, stimmen diese jedoch mit den (wesentlichen) Geometrie-Wertebereichen der *AGG* überein (vgl. Tab. 4.1). Demnach könnten die Geometrien der Teile *V-13* bis *V-24*, isoliert betrachtet, ebenfalls direkt aus der normalverteilten *AGG* stammen.
- Entsprechend den Verteilungsannahmen wurden mit den MATLAB®-Funktionen `normrnd` (»normal random numbers«) und `unifrnd` (»continuous uniform random numbers«) normalverteilte bzw. gleichverteilte **Zufallszahlen** erzeugt, mit denen die Sollabmessungen der Validierpleuel vorläufig festgelegt wurden.⁴⁴
- Im Fall der Teile *V-8* bis *V-12* und *V-20* bis *V-24* wurde jeweils ein einzelnes Maß auf den entsprechenden *AGG*-Erwartungswert μ_G minus bzw. plus des Vierfachen der zugehörigen Standardabweichung σ_G gesetzt. Dadurch sollten gezielt Ausreißer außerhalb der üblichen Wertebereiche vorgegeben werden.

⁴²⁾ weitere Bezeichnungen (teils veraltet): 3.2315, AlSi1MgMn, AlMgSi1

⁴³⁾ Hersteller: *HSF Feinmechanik und Maschinenbau GmbH*, Sulzbach/Saar

⁴⁴⁾ Die als Sollmaße der realen Validierpleuel erzeugten Zufallszahlen sind stochastisch unabhängig von den Zahlen, die für die in Abschn. 5.1.1 beschriebenen virtuellen Pleuel verwendet wurden.

- Mit der Absicht eines einfacheren Datenhandlings wurden die mittels Zufallszahlen beschriebenen Sollabmessungen vor der Übergabe an den Hersteller auf ganzzahlige **Vielfache** von 0,05 mm gerundet.

Tab. 5.2 nennt die finalen **Sollabmessungen** aller realen Referenz- und Validierpleuel, wobei die nicht zufälligen, manuell festgelegten Werte hervorgehoben sind.

Tab. 5.2: Sollabmessungen der maschinell gefertigten realen Pleuel bezüglich der acht Hauptgeometrieparameter (blau & fett → manuell definierte, nicht zufällige Werte)

Pleuel	Sollabmessung bzgl. Geometrieparameter ... (in mm)							
	d_{R1}	D_{R1}	d_{R2}	D_{R2}	h_R	l_R	b_S	h_S
<i>R-1 bis R-6</i>	18,00	30,00	24,00	40,00	12,00	100,00	18,00	7,00
<i>V-1</i>	18,40	29,90	23,90	40,05	11,80	99,70	18,30	7,30
<i>V-2</i>	18,10	29,90	24,00	39,95	11,90	100,25	18,15	6,70
<i>V-3</i>	17,95	30,00	23,95	40,05	12,35	99,70	17,70	7,25
<i>V-4</i>	17,95	30,15	24,20	40,05	11,90	100,45	17,85	7,05
<i>V-5</i>	17,85	30,30	23,90	40,10	12,00	99,90	18,10	7,15
<i>V-6</i>	17,90	30,20	23,85	39,85	11,85	100,45	18,15	6,90
<i>V-7</i>	18,05	29,85	24,00	39,90	12,05	100,10	17,80	6,80
<i>V-8</i>	18,25	30,80	23,85	40,05	12,15	99,65	18,10	7,00
<i>V-9</i>	18,10	29,70	24,10	40,80	12,10	99,80	18,10	7,15
<i>V-10</i>	18,00	29,80	24,00	39,75	11,40	99,85	17,80	7,00
<i>V-11</i>	17,95	30,15	24,10	40,00	12,60	99,90	18,25	7,05
<i>V-12</i>	17,85	29,85	24,25	39,95	12,15	99,30	18,80	7,05
<i>V-13</i>	17,90	29,45	24,45	39,85	11,55	99,00	17,95	6,85
<i>V-14</i>	18,25	29,70	24,20	39,45	12,20	99,40	17,90	7,40
<i>V-15</i>	18,20	30,00	24,25	40,25	11,60	99,10	18,00	6,90
<i>V-16</i>	18,20	29,70	24,30	40,30	12,10	99,40	17,60	7,35
<i>V-17</i>	18,40	29,90	24,45	39,70	11,90	100,25	18,55	7,25
<i>V-18</i>	18,25	29,85	23,60	39,75	11,55	100,10	17,85	7,30
<i>V-19</i>	18,00	29,55	24,45	40,55	11,60	99,90	17,55	6,75
<i>V-20</i>	17,75	29,20	23,75	40,45	11,65	99,60	17,65	7,40
<i>V-21</i>	17,90	30,00	23,65	40,80	12,10	98,85	18,55	6,60
<i>V-22</i>	17,85	30,10	23,85	40,55	11,40	99,25	17,55	7,25
<i>V-23</i>	18,40	29,60	24,05	40,45	12,60	100,65	18,15	7,30
<i>V-24</i>	18,10	29,95	23,95	39,90	11,70	100,50	17,20	7,05

Für die **Fertigung** der Pleuel wurde die verwendete Materialplatte so in quaderförmige Blöcke zersägt, dass die Hauptrichtungen dieser Stücke mit der Walz-, der Dicken- und der Querrichtung des Walzmaterials zusammenfallen. Aus diesen Blöcken wurden dann die Pleuel mittels CNC-Maschinen⁴⁵ zerspanend gefertigt. Dabei oblag die Auswahl der Maschinenteknik sowie der Fertigungsstrategie im Detail dem Hersteller, wobei jedoch eine konstante Vorgehensweise mit dem Ziel einer stets einheitlichen Fertigungsqualität einzuhalten war. Um systematische Effekte bzw. mit der Bauteilbezeichnung korrelierte Charakteristika zu unterbinden, erfolgte die Herstellung randomisiert (zufällige Auswahl eines Materialstücks und zufällige Fertigungsreihenfolge). Hinsichtlich der Maßhaltigkeit gegenüber den Sollabmessungen wurde eine Toleranz von $\pm 0,02$ mm vorgegeben. Zudem sollte die Fertigung im Rahmen der technischen/wirtschaftlichen Möglichkeiten mit dem Ziel einer präzisen Einhaltung der Geometrievorgaben bei gleichzeitig minimalen Form- und Lageabweichungen gestaltet werden. Die produzierten Pleuel bzw. das Pleuel-KOS sind in Bezug auf das gewalzte Material wie folgt orientiert:

- ***x*-Achse (Pleuel-KOS)** → Querrichtung des Materials
- ***y*-Achse (Pleuel-KOS)** → Dickenrichtung des Materials
- ***z*-Achse (Pleuel-KOS)** → Walzrichtung des Materials

Abb. 5.8 zeigt eine Fotoaufnahme der fünf Referenzpleuel *R-1* bis *R-5*. Rein visuell sind die gefertigten Pleuel nicht voneinander unterscheidbar, wobei die Oberflächenqualitäten hoch sind und keines der Pleuel äußerliche Auffälligkeiten aufweist.

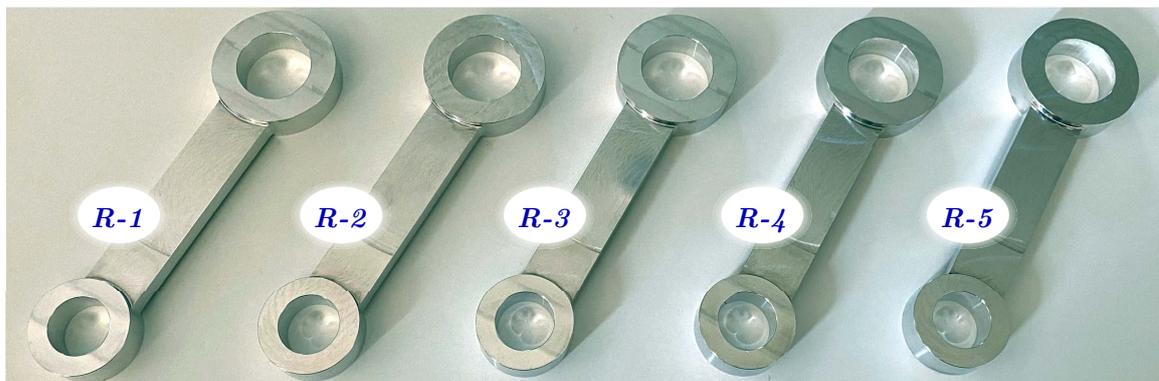


Abb. 5.8: Fotoaufnahme der fünf realen Referenzpleuel *R-1* bis *R-5*

Die gefertigten Teile wurden umfassend messtechnisch charakterisiert, u. a. mittels ART hinsichtlich ihrer Eigenfrequenzen. Danach wurden in die Validierpleuel *V-1* bis *V-7* und *V-13* bis *V-19* per Ständerbohrmaschine jeweils ein einzelner künstlicher Defekt in Form einer **Durchgangsbohrung** eingebracht. Die Defektpositionen wurden dabei, mit Rücksicht auf die *x-z*-Bauteilsymmetrie, möglichst breit über die vorgegebenen Defektbereiche

⁴⁵) CNC → *computerized numerical control*, dt.: rechnergestützte numerische Steuerung

(siehe Abb. 4.4 in Abschn. 4.2.3) gestreut, sodass in Anbetracht des recht geringen Stichprobenumfangs ähnliche Positionen vermieden wurden. Abb. 5.9 zeigt die Positionierung des künstlichen Defekts je nach Teil (da die Defekte manuell eingebohrt wurden, können die Ist-Positionen in lateraler Richtung um ca. 1 mm von den Sollpositionen abweichen). Initial wurden Bohrungen mit nominellen Durchmessern von 1,0 mm eingebracht, wobei diese im Verlauf in 0,5-mm-Schritten bis auf Durchmesser von 3,0 mm erweitert wurden. Für jede Defektgröße wurden die Eigenfrequenzen der entsprechenden Pleuel erneut per ART bestimmt. Abb. 5.10 zeigt die realen Validierpleuel mit den eingebohrten Defekten, die hier jeweils den finalen Durchmesser von 3 mm aufweisen.

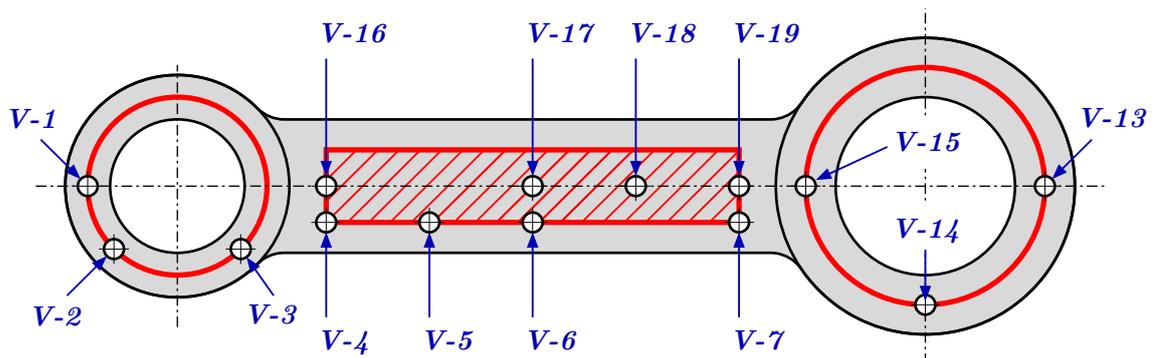


Abb. 5.9: Defektpositionen für die 14 realen Validierpleuel V-1 bis V-7 und V-13 bis V-19 mit eingebrachten Durchgangsbohrungs-Defekten je nach Bauteilbezeichnung



Abb. 5.10: Fotoaufnahme der 14 realen Validierpleuel V-1 bis V-7 und V-13 bis V-19 mit je einem Durchgangsbohrungs-Defekt in der finalen Größe von 3 mm

Neben den realen Pleueln wurden aus derselben Materialplatte mehrere Materialproben hergestellt, die für experimentelle Materialcharakterisierungen vorgesehen wurden, u. a. hinsichtlich der Dichte und der Elastizität. Konkret wurden aus drei, verglichen mit den zur Pleueelfertigung genutzten Blöcken etwas größeren Materialstücken, die an möglichst weit voneinander entfernten Stellen aus der eingesetzten Materialplatte herausgetrennt wurden, je ein Satz mehrerer **Materialproben** gefertigt. Jeder der Probensätze umfasst einen kleineren Würfel (ca. 12 mm Kantenlängen) sowie drei etwas größere Quader (ca. 30 mm × 30 mm × 15 mm). Letztere wurden so in drei verschiedenen Orientierungen hergestellt, dass die kleinste Dimension, also die 15-mm-Probendickenrichtung, entweder der Walz-, der Dicken- oder der Querrichtung des gewalzten Materials sowie gleichzeitig einer der Hauptrichtungen des Pleuel-KOS entspricht. Die drei würfelförmigen Materialproben werden in diesem Dokument als *Mat-a*, *Mat-b* und *Mat-c* bezeichnet, wobei die Kürzel mittels der Kleinbuchstaben das verwendete Materialstück bzw. den Bereich der Materialplatte implizieren, aus dem die Proben herausgetrennt wurden. Daran angelehnt werden die 3 × 3 größeren Quader als *Mat-a/x*, *Mat-a/y* und *Mat-a/z*, *Mat-b/x*, *Mat-b/y* und *Mat-b/z* sowie *Mat-c/x*, *Mat-c/y* und *Mat-c/z* bezeichnet. Dabei kennzeichnen diese Benennungen zusätzlich, ob die geringste 15-mm-Dimension bzw. Probendickenrichtung mit der *x*-, der *y*- oder der *z*-Richtung des Pleuel-KOS zusammenfällt.

In Tab. D.1 des Anhangs Anh. D sind alle in diesem Abschnitt beschriebenen Objekte (reale Pleuel sowie Materialproben) einschließlich der zur Kennzeichnung in diesem Dokument verwendeten Kurzbezeichnungen zusammenfassend aufgelistet.

5.2.2 Störeinflüsse, Zufallseffekte und Unsicherheiten

5.2.2.1 Temperatureinflüsse und Temperaturkompensation

Die im Rahmen der experimentellen Analysen an den realen Pleueln und Materialproben quantitativ untersuchten Bauteil- bzw. Materialeigenschaften sind temperaturabhängig. Angesichts dessen wurden die entsprechenden experimentellen Ergebniswerte stets unter Berücksichtigung begleitend erfasster Ist-Temperaturen rechnerisch auf die einheitliche Bezugstemperatur $\vartheta_0 = 20\text{ °C}$ korrigiert, wozu ein lineares Modell inklusive spezifischer Temperaturkoeffizienten verwendet wurde. Die **Temperaturkompensation**, d. h. die rechnerische Korrektur experimenteller Werte auf die Bezugstemperatur, erfolgte jedoch nicht zwingend in Bezug auf die Zielgröße einer Analyse. So war es teilweise zielführend, Daten frühzeitig um Temperatureinflüsse zu bereinigen und sie daraufhin als korrigierte Eingangswerte für die Berechnung von Zielwerten einzusetzen.

Gl. 5.2 gibt die zur Temperaturkompensation angewendete **Modellgleichung** an (siehe Anh. C.1). Dabei ist ξ_1 ein bei der Ist-Temperatur ϑ_1 experimentell beobachteter Wert einer temperaturabhängigen Größe $\xi(\vartheta)$, während ξ_0 die gesuchte, rechnerisch zu ermittelnde Ausprägung von $\xi(\vartheta)$ bei der Bezugstemperatur ϑ_0 kennzeichnet. Daneben ist k_ξ der zugehörige Temperaturkoeffizient, der die relative Temperaturabhängigkeit von $\xi(\vartheta)$ quantifiziert, und $\Delta\vartheta = (\vartheta_1 - \vartheta_0)$ ist die Differenz der beiden Temperaturen.

$$\xi_0 = \frac{\xi_1}{1 + k_\xi \cdot \Delta\vartheta} \quad (5.2)$$

Obwohl bei jeder Temperaturkompensation als Ist-Temperatur ϑ_1 die jeweilige **Objekttemperatur** erforderlich war, wurde diese aus praktischen Gründen nicht direkt erfasst. Stattdessen wurden die Temperaturen der realen Pleuel im Rahmen der ART-Analysen beispielsweise indirekt über die Lufttemperatur gemessen, wohingegen die Temperaturen der Materialproben stets anhand der Temperatur eines Wasserbads ermittelt wurden, in dem die Proben aufbewahrt wurden (und aus dem sie nur kurzzeitig und einzeln für die jeweilige messtechnische Datenerfassung entnommen wurden).

Zur **Temperaturbestimmung** wurde ein Messgerät vom Typ *testo 635* (Testo, Titisee-Neustadt) genutzt. Im relevanten Temperaturbereich beträgt dessen Genauigkeit je nach Temperaturfühler $\pm 0,2\text{ K}$ (Lufttemperaturfühler) bzw. $\pm 0,3\text{ K}$ (Wassertemperaturfühler), wobei zusätzlich die Auflösung von $0,1\text{ K}$ zu berücksichtigen ist. Insbesondere im Fall der o. g. indirekten Temperaturmessung auf Basis der Lufttemperatur gilt generell, dass die Temperatur eines analysierten Objekts von der gemessenen Temperatur abweichen kann, da die Objekttemperatur der Lufttemperatur zeitlich versetzt folgt. Dieser Effekt wurde jedoch auf maximal $\pm 0,2\text{ K}$ geschätzt, da die jeweiligen Untersuchungen in einem Raum erfolgten, der nur relativ geringen Lufttemperaturschwankungen unterliegt (im tageszeitlichen Verlauf wurden Schwankungen von weniger als $\pm 1\text{ K}$, innerhalb einer Stunde von $\pm 0,1\text{ K}$ bis $\pm 0,2\text{ K}$, beobachtet). Ebenso wurde in Bezug auf die Temperaturbestimmung anhand der Wassertemperatur eine, wegen des höheren Wärmeübergangs zwischen Was-

ser und Metall geringere, Abweichung von maximal $\pm 0,1$ K unterstellt. Letztlich wurden alle diese Faktoren bzw. Unsicherheitsbeiträge additiv zusammengefasst. Dadurch ergab sich ein Wert von $\pm 0,5$ K, der standardmäßig als **Genauigkeit** jeder indirekt erfassten Objekttemperatur angenommen wurde.

Die zur Temperaturkompensation dienenden **Temperaturkoeffizienten** wurden überwiegend theoretisch auf der Basis physikalischer Zusammenhänge hergeleitet und unter Einbeziehung einiger Literaturwerte berechnet (siehe Anhänge C.2 und C.3). Abhängig von der betrachteten Größe $\xi(\vartheta)$, also je nach Bauteil- bzw. Materialeigenschaft, beläuft sich die durch den jeweiligen Temperaturkoeffizienten k_ξ charakterisierte Temperaturabhängigkeit auf einige Hundertstel bis einige Zehntel Promille pro Temperaturanstieg um ± 1 K. Die Unsicherheiten der theoretischen Koeffizienten wurden auf höchstens ± 10 % geschätzt. Einzig die Temperaturkoeffizienten der Pleuel-Eigenfrequenzen wurden durch messtechnische Analysen bestimmt (siehe Anh. C.4). Dabei wurde pro Temperaturdelta von $+1$ K ein Frequenzabfall um etwa ein viertel Promille beobachtet, wobei die Abhängigkeiten je nach Frequenzmerkmal leicht variieren. Die Größtfehler der Eigenfrequenz-Temperaturkoeffizienten wurden auf $\pm 1,2$ % bis $\pm 2,5$ % geschätzt.

Aufgrund unsicherheitsbehafteter Temperaturkoeffizienten sowie der stets nur auf $\pm 0,5$ K genauen Temperaturbestimmung ging mit jeder rechnerischen Temperaturkompensation eine **Unsicherheit** einher, für die zudem die Differenz der beobachteten Ist-Temperatur zur Bezugstemperatur eine gewisse Rolle spielt. Vor diesem Hintergrund wurde im Zuge der Auswertung experimenteller Daten jeweils eine entsprechende, stets großzügige und für alle quantifizierten Bauteil-/Materialeigenschaften pauschale Größtfehlerabschätzung auf Grundlage einer hergeleiteten Formel (siehe Anh. C.5) durchgeführt. Dabei wurde in jedem Fall ein gegenwärtiges Temperaturdelta von $\Delta\vartheta = \pm 5$ K angenommen, was dem aufgerundeten Extremwert aus den beobachteten Temperaturdifferenzen entspricht. Mit der Unsicherheit von ± 10 % für jeden theoretisch hergeleiteten Temperaturkoeffizienten konnte schließlich der auf die Temperaturkompensation zurückzuführende **Größtfehler** berechnet werden, wobei für diesen der im Betrag maximale Ergebniswert notiert wurde, der sich auf Basis der ungünstigsten Vorzeichenkombination der Eingangswerte ergab.⁴⁶ Relativ gesehen liegt der überschlägig geschätzte Größtfehler in der Größenordnung des Zahlenwerts $\{k_\xi\}$ des Temperaturkoeffizienten k_ξ der analysierten Größe $\xi(\vartheta)$. Im Detail beträgt der mit einer Temperaturkompensation verknüpfte Größtfehler, als Prozentwert angegeben, $\pm\{k_\xi\} \cdot 105$ % der experimentellen, temperaturkompensierten Ausprägung ξ_0 der Größe $\xi(\vartheta)$. Im Unterschied dazu wurde für die gemessenen Pleuel-Eigenfrequenzen aufgrund etwas anderer Gegebenheiten, nämlich beobachteter Temperaturabweichungen von maximal ± 2 K und Temperaturkoeffizienten-Unsicherheiten von höchstens $\pm 2,5$ %, eine separate, jedoch analoge Abschätzung vorgenommen. Demzufolge liegen die entsprechenden Größtfehler der Eigenfrequenzen in der Größenordnung der halben Zahlenwerte (± 56 %) ihrer modenspezifischen Temperaturkoeffizienten.

⁴⁶⁾ betragsmäßig maximales Ergebnis von Gl. C.11 mit $\delta_k = \pm 10$ %, $\delta_\vartheta = \pm 0,5$ K und $\Delta\vartheta = \pm 5$ K

5.2.2.2 Zufällige Messwertschwankungen und Erkennung von Ausreißern

Bei den auf quantitative Bauteil- und Materialeigenschaften abzielenden experimentellen Untersuchungen an den realen Pleueln und Materialproben wurden regelmäßig mehrfach **wiederholte Messungen** durchgeführt. Unter statistischen Gesichtspunkten entspricht solch eine Vorgehensweise der Ziehung einer Zufallsstichprobe stochastisch unabhängiger Beobachtungs- bzw. Messwerte. Hierbei gilt, dass entsprechende Werte naturgemäß nicht nur in gewissem Maße variieren, sondern dass auch Ausreißer auftreten können, d. h. vereinzelte Ausprägungen, die außerhalb des üblichen Streubereichs liegen.

Mehrfach experimentell erhobene Daten wurden stets auf Ausreißer hin analysiert, wobei gefundene Ausreißer eliminiert wurden. Die Ausreißererkennung und -eliminierung folgte in allen Fällen im Anschluss an die rechnerische Temperaturkompensation. Dabei wurde sie, je nach Zweckmäßigkeit und Analyse, entweder hinsichtlich der jeweiligen Zielgröße oder auf die zur Berechnung von Zielwerten herangezogenen Eingangsdaten angewandt. Die **Ausreißererkennung** erfolgte nach einer verbreiteten (z. B. in [Sch12] erläuterten) Regel, die auf dem Interquartilsabstand der empirischen Daten basiert. Zur Erläuterung wird eine Stichprobe bestehend aus N zusammengehörigen Werten x_1, \dots, x_N angenommen, die durch mehrfache Messungen erfasst wurden. Der Regel nach werden das untere Quartil $x_{0,25}$, das obere Quartil $x_{0,75}$ und der Interquartilsabstand $d_x^Q = (x_{0,75} - x_{0,25})$ der Daten bestimmt. Als Ausreißer ist jeder Wert x_i (mit $i = 1, \dots, N$) einzustufen, für den $x_i < (x_{0,25} - 1,5 \cdot d_x^Q)$ oder $x_i > (x_{0,75} + 1,5 \cdot d_x^Q)$ gilt, d. h. jeder Wert, der über das 1,5-fache des Quartilsabstands hinaus vom unteren Quartil nach unten oder vom oberen Quartil nach oben hin abweicht. Die Umsetzung der Regel erfolgte mit der MATLAB®-Funktion `isoutlier` (»find outliers in data«, Argument: 'quartiles').

Wenn Messdaten wiederholt erhoben wurden, wurde der Mittelwert \bar{x} der (temperaturkompensierten und um Ausreißer bereinigten) N Einzelwerte x_1, \dots, x_N berechnet und als finaler Mess- bzw. Ergebniswert dokumentiert. Dieser ist jedoch in gewissem Maße zufällig, wobei \bar{x} aus statistischer Sicht gegenüber dem unbekanntem Erwartungswert μ_x des betrachteten Merkmals umso präziser ist, je größer der Stichprobenumfang N ist.⁴⁷ Die Quantifizierung der statistischen Unsicherheit von \bar{x} (als Schätzwert für μ_x) stützte sich jeweils auf ein Konfidenzintervall der Form $\bar{x} \pm t_N \cdot u_x$, wobei $u_x = (s_x / \sqrt{N})$ der aus der Standardabweichung s_x der Einzelwerte x_1, \dots, x_N folgende Standardfehler ist, während der Faktor t_N ein geeignetes Quantil der t -Verteilung ist (siehe Abschn. 2.2.4). Der **Größtfehler** in Bezug auf den als Mess- bzw. Ergebniswert dienenden Mittelwert, d. h. das Intervall $\pm t_N \cdot u_x$ um \bar{x} , wurde, von der üblichen Normalverteilungsannahme ausgehend, dann immer unter der Vorgabe eines Konfidenzniveaus von 99% ermittelt. Mit dem Ziel einer einfacheren Handhabung wurde dabei jedoch standardmäßig $t_N = 3$ verwendet, sofern (unter Berücksichtigung des jeweiligen Stichprobenumfangs N) damit das geforderte Konfidenzniveau auch erreicht bzw. überschritten wurde.

⁴⁷⁾ Bei theoretisch unendlich oft wiederholter Datenerhebung würde $\bar{x} = \mu_x$ folgen, wobei μ_x allerdings vom physikalisch wahren Wert abweichen kann.

5.2.2.3 Unsicherheiten und Größtfehlerabschätzung

Mit dem Ziel, die **Unsicherheiten** der an den realen Pleueln und Materialproben messtechnisch ermittelten Ergebniswerte zu quantifizieren, wurden Größtfehlerabschätzungen durchgeführt. Dabei stand jeweils die Ermittlung großzügig geschätzter, aber plausibler Fehlerintervalle im Vordergrund, sodass die abgeleiteten **Größtfehler** die auf der Basis begründeter Annahmen geschätzten Extremabweichungen zwischen den experimentellen Ergebnissen und den unbekanntem wahren Werten angeben. Der Fokus lag dabei jedoch nicht auf exakten, sondern vielmehr auf praktikablen Lösungen und der Frage nach der Größenordnung. Je nach betrachteter Bauteil-/Materialeigenschaft war die Herangehensweise individuell, wobei nach Möglichkeit Unsicherheitsbeiträge bzw. Größtfehlerkomponenten hinsichtlich folgender Aspekte berücksichtigt wurden:

- 1) Unsicherheit infolge der rechnerischen **Temperaturkompensation**
→ wie in Abschn. 5.2.2.1 erläutert
- 2) Statistische Unsicherheit im Zusammenhang mit **Messwertschwankungen**
→ wie in Abschn. 5.2.2.2 erläutert
- 3) Unsicherheit aufgrund **methoden-/gerätespezifischer Einflussfaktoren**
→ Je nach experimenteller Methode, Vorgehensweise sowie Gerätetechnik wurden spezifische Gegebenheiten und Sachverhalte berücksichtigt. Unter anderem wurden Angaben aus Datenblättern sowie Faktoren, deren Einflüsse auf die Ergebniswerte sinnvoll quantifiziert werden konnten, einbezogen.

Die jeweiligen Fehlerkomponenten wurden abschließend zu einem **Gesamtgrößtfehler** zusammengefasst. Sofern sich die einzelnen Beiträge bereits auf die analysierte Zielgröße bezogen, wurden diese addiert. Dabei wurden gegenseitige Abhängigkeiten der verschiedenen Fehlerkomponenten (in Anbetracht der durchweg geringen Unsicherheiten) durch die einfache Addition vernachlässigt. Teilweise betrafen die betrachteten Unsicherheitsbeiträge jedoch Werte, die als Eingangswerte weiterverarbeitet wurden. In diesen Fällen erfolgte die Zielwertberechnung unter »Mitnahme« der auf die Eingangswerte bezogenen Unsicherheiten im Sinne einer Fehlerfortpflanzung.

Durch den Größtfehlercharakter bzw. durch stets großzügige Abschätzungen sollten auch unbekannte oder nicht quantifizierbare Unsicherheiten bzw. Einflüsse abgegolten werden. Bei allen Betrachtungen wurde angenommen, dass keine **groben Fehler** vorliegen (z. B. menschliche Fehler, Funktionsfehler von Geräten). Sofern unterschiedliche Werte für eine untere und obere Unsicherheitsgrenze bestimmt wurden, wurde schließlich der im Betrag größere Wert für die Angabe eines symmetrischen Intervalls genutzt.

Zu berücksichtigen ist, dass die experimentellen Analysen meist auf spezifischen physikalischen **Modellannahmen** beruhen. Die in der Realität unvermeidbaren Abweichungen gegenüber den jeweiligen Annahmen werden durch die abgeschätzten Größtfehler i. d. R. nicht berücksichtigt, was bei deren Interpretation zu beachten ist.

5.2.3 Materialcharakterisierung: Dichte

Die Dichte des zur Fertigung der realen Pleuel und der Materialproben genutzten Aluminiumwerkstoffs wurde experimentell quantifiziert. Die hierzu erfolgten Analysen basieren auf dem **Archimedischen Prinzip**, das besagt, dass ein Körper in einem Medium eine Auftriebskraft in Höhe der Gewichtskraft des vom Körper verdrängten Mediums erfährt. Dies kann zur messtechnischen Bestimmung der Dichte eines Körpers verwendet werden, indem dieser in zwei Medien mit unterschiedlichen Dichten gewogen wird, z. B. zuerst in Luft und danach eingetaucht in Wasser. Auf Basis dessen kann die Dichte ρ des Körpers mithilfe von Gl. 5.3 [Jon02] ermittelt werden. Dabei sind W_L und W_W die von einer Waage angezeigten Werte, welche sich beim Wiegen des Körpers in Luft bzw. Wasser einstellen. Die Dichten der beiden Medien sind ρ_L (Luft) und ρ_W (Wasser).

$$\rho = \frac{W_L \cdot \rho_W - W_W \cdot \rho_L}{W_L - W_W} \quad (5.3)$$

Zur Dichtebestimmung wurden die drei würfelförmigen **Materialproben** *Mat-a*, *Mat-b* und *Mat-c* herangezogen. Mit einer **Waage** des Typs *PCE-AB-200C* (PCE Instruments, Meschede) wurde jede der Materialproben je 20-mal in Luft sowie in demineralisiertem, entgastem Wasser gewogen. In Anbetracht dessen, dass sämtliche in Gl. 5.3 auftretenden Dichten temperaturabhängig sind, wurden die Temperaturen der Messmedien begleitend zu den Wägungen erfasst, wobei Temperaturen zwischen 22,5 °C und 23,7 °C (Luft) bzw. zwischen 21,9 °C und 22,7 °C (Wasser) erkannt wurden. Da die Materialproben während der Dauer der Messkampagne im Wasser gelagert und aus diesem nur einzeln für wenige Sekunden entnommen wurden, um sie, nachdem sie vorsichtig trockengetupft wurden, in Luft zu wiegen, wurde die Wassertemperatur zugleich als Proben temperatur notiert. Die jeweils paarweisen Wägewerte und die zugehörigen, auf Basis der protokollierten Temperaturen berechneten Dichten der beiden Messmedien wurden dann in Gl. 5.3 eingesetzt.⁴⁸ Auf diese Weise ergaben sich pro Materialprobe jeweils 20 Dichtewerte, die abschließend unter Berücksichtigung der jeweiligen Proben temperatur mithilfe eines Temperaturkoeffizienten von $-7,08 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ rechnerisch auf die Bezugstemperatur von 20 °C korrigiert wurden (vgl. Abschn. 5.2.2.1).

Abb. 5.11 stellt die **Ergebnisse** der experimentellen Dichtebestimmung dar. Obwohl die analysierten Proben von verschiedenen Stellen der verwendeten Materialplatte stammen, zeigt die Abbildung einen einheitlichen Wertebereich (ohne Ausreißer). Somit konnte das Material als makroskopisch homogen eingestuft werden. Basierend auf dieser Erkenntnis wurde der Mittelwert der Einzelwerte berechnet, womit ein Wert von ca. 2705,14 kg/m³ für die Dichte ρ des Aluminiumwerkstoffs bzw. für alle aus diesem Material gefertigten Objekte, d. h. die realen Pleuel und Materialproben, ermittelt wurde.

⁴⁸⁾ Die temperaturabhängigen Dichten der Messmedien wurden auf Basis geeigneter Formeln berechnet, siehe z. B. [Nat08], wobei von trockener Luft als ideales Gas (spezifische Gaskonstante: 287,058 J/(kg K), Luftdruck: 1013,25 hPa) sowie reinem, entgastem Wasser ausgegangen wurde.

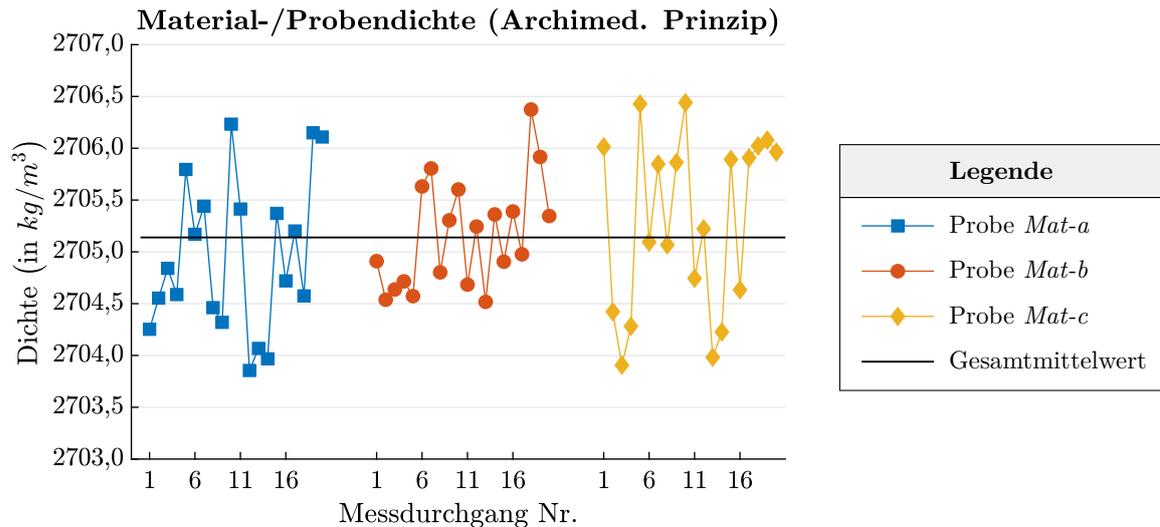


Abb. 5.11: Experimentell anhand der Materialproben *Mat-a*, *Mat-b* und *Mat-c* ermittelte Materialdichte des eingesetzten Aluminiumwerkstoffs

Die **Unsicherheit** der messtechnisch bestimmten Materialdichte wurde per Größtfehler quantifiziert (vgl. Abschn. 5.2.2.3). Dabei wurde für die durch die Temperaturkompensation bedingte Unsicherheit ein anteiliger Größtfehler von $\pm 0,20 \text{ kg/m}^3$ bzw. $\pm 7,4 \cdot 10^{-3} \%$ geschätzt. Daneben wurde die statistische Unsicherheit des aus Einzelwerten gemittelten Dichtewerts durch eine Größtfehlerkomponente von ca. $\pm 0,28 \text{ kg/m}^3$ bzw. $\pm 1,0 \cdot 10^{-2} \%$ quantifiziert. Um zudem die Unsicherheiten der Eingangswerte (Wägewerte, Dichten der Messmedien) abzubilden, wurden die Berechnungen auf Grundlage von Gl. 5.3 mehrfach wiederholt. Dabei wurden Eingangsunsicherheiten unter Berücksichtigung der möglichen Variationen und Vorzeichenkombinationen einbezogen. Im Detail wurden die Wägewerte um $\pm 1,1 \text{ mg}$ beaufschlagt, was der ungünstigsten Summe aus dem Eichwert der Waage ($\pm 1 \text{ mg}$) und ihrer Anzeigegenauigkeit ($0,1 \text{ mg}$) entspricht und was als großzügige Genauigkeitsschätzung diente. Zudem wurden die Dichten der zwei Messmedien variiert, deren temperaturabhängige Werte dazu auf Basis von Temperaturen berechnet wurden, welche um $\pm 1 \text{ K}$ von den erfassten Temperaturen abweichen, wobei mittels dieses ausgeprägten Temperaturdeltas indirekt die idealisierten Annahmen von trockener Luft sowie reinem, entgastem Wasser abgegolten werden sollten. Schließlich wurde die im Betrag extremste Abweichung der Ergebnisse aus den wiederholten Berechnungen gegenüber der eigentlich ermittelten Materialdichte als Größtfehlerbeitrag infolge unsicherer Eingangswerte herangezogen. Dieser beträgt ungefähr $\pm 3,47 \text{ kg/m}^3$ bzw. $\pm 1,3 \cdot 10^{-1} \%$.

Weitere mögliche Störeinflüsse bzw. Unsicherheiten, z. B. kleinste, an den in Wasser eingetauchten Proben anhaftende Luftbläschen, konnten lediglich identifiziert, jedoch nicht quantifiziert werden. Allerdings wurden die Messdaten durch nicht berücksichtigte Störeinflüsse vermutlich höchstens unwesentlich beeinflusst, sodass die Unsicherheit des o. g. Dichtewerts mit einem finalen Größtfehler (Summe der drei dargelegten Fehlerbeiträge) von gut $\pm 3,9 \text{ kg/m}^3$ bzw. knapp $\pm 0,15 \%$ eingegrenzt werden kann.

5.2.4 Materialcharakterisierung: Elastizität

Der zur Fertigung der realen Pleuel und der Materialproben eingesetzte Aluminiumwerkstoff wurde messtechnisch im Hinblick auf seine **Elastizität** untersucht. Hierzu wurden Laufzeitmessungen mit Ultraschall (US) an den neun ca. 30 mm × 30 mm × 15 mm großen Materialproben vorgenommen. Auf Basis der dabei ermittelten Schallgeschwindigkeiten sowie der zuvor ebenfalls experimentell bestimmten Dichte wurde die Materialelastizität schließlich rechnerisch unter der Annahme bestimmter Materialsymmetrien quantifiziert, und zwar mithilfe der in Abschn. 2.2.1 aufgeführten Formeln für ein isotropes Material (siehe Gl. 2.7) sowie ein orthotropes Material (siehe Gl. 2.9 bis Gl. 2.11). Dieser inverse Ansatz zur Berechnung elastischer Konstanten ist z. B. in [Ros99; Eve01] mit Rücksicht auf verschiedene Materialsymmetrien detailliert beschrieben.

Die **US-Laufzeitmessungen** an den o. g. neun Materialproben erfolgten einseitig nach dem Impuls-Echo-Verfahren. Als US-Sender/Empfänger wurden piezoelektrische 1/4"-US-Prüfköpfe der Typen *V110* (Longitudinalwellen-) und *V156* (Transversalwellen-Prüfkopf) mit Mittenfrequenzen von 5 MHz eingesetzt (Panametrics, Billerica/MA/USA). Als Kopplmittel wurden Öl bzw. Honig genutzt. Ein US-Pulser des Typs *5900PR* (Panametrics) diente der Erzeugung von elektrischen Anregesignalen und der Verstärkung der analogen Empfangssignale. Letztere wurden mit einem Oszilloskop vom Typ *WaveRunner 204Xi* (LeCroy, Chestnut Ridge/NY/USA) mit einer Abtastfrequenz von 10 GS/s digitalisiert, wobei jeweils über zehn Einzelmessungen gemittelt wurde.

Die **Materialproben** wurden stets in ihre jeweilige 15-mm-Richtung durchschallt, die je nach Probe der x -, der y - oder der z -Richtung des Pleuel-KOS und gleichzeitig der Quer-, der Dicken- bzw. der Walzrichtung des eingesetzten Plattenmaterials entspricht. Pro US-Zeitsignal wurden dabei die ersten zwei Rückwandechos abgebildet. In der Folge wurden die digitalisierten Signale exportiert und zur weiteren Datenverarbeitung in die Software MATLAB[®] importiert, wo sie initial mittels der Funktion `movmean` (»moving mean«) per gleitendem Mittelwert geglättet wurden. Begleitend wurden die Proben Temperaturen indirekt anhand der Temperatur eines Wasserbads gemessen, in dem die Proben aufbewahrt und nur einzeln zur Erfassung der US-Daten entnommen wurden. Dabei wurden Temperaturen zwischen 24,4 °C und 24,7 °C notiert. Mit einer Messschraube wurden zudem die Ist-Maße der Proben in die maßgeblichen 15-mm-Richtungen ermittelt.

Während der **Messkampagne** wurden wiederholt US-Daten an den o. g. neun Materialproben erzeugt. So wurden mittels des Longitudinalwellen-Prüfkopfs pro Probe immer 20 US-Signale aufgezeichnet. Dabei wurde der stets händisch applizierte Prüfkopf vor jeder Messwiederholung von der Probenoberfläche abgehoben und erneut aufgesetzt, um damit die unvermeidbaren, mit der manuellen Durchführung verknüpften Variationen und Störeinflüsse in den Signalen abzubilden. Anschließend wurde der Transversalwellen-Prüfkopf genutzt, mit dem pro Probe 2 × 20 US-Messungen durchgeführt wurden. Bei den ersten 20 dieser Messungen wurde der Prüfkopf so auf die Probe aufgesetzt, dass die zur Ausbreitungsrichtung senkrechte Polarisationsrichtung in eine der zwei anderen Hauptrichtungen gelegt wurde, also je nach Probe in die x -, die y - oder die z -Richtung, jeweils bezogen auf

das Pleuel-KOS. Für die folgenden 20 Messungen wurde der Prüfkopf um ca. 90° rotiert, um damit eine Polarisation in die zweite zur Ausbreitungsrichtung senkrechte Hauptrichtung zu erzielen. Auch der Transversalwellen-Prüfkopf wurde vor jeder einzelnen Messung neu positioniert und dabei mit dem Ziel einer präzisen Ausrichtung auf der Probe zusätzlich leicht hin und her rotiert, um klare Echoformen zu »züchten«.

Abb. 5.12 visualisiert ein **Zeitsignal** einer an der Materialprobe *Mat-a/x* eingeschallten und messtechnisch aufgezeichneten US-Longitudinalwelle. Die beiden Detaildarstellungen zeigen das erste und das zweite Rückwandecho des Signals.

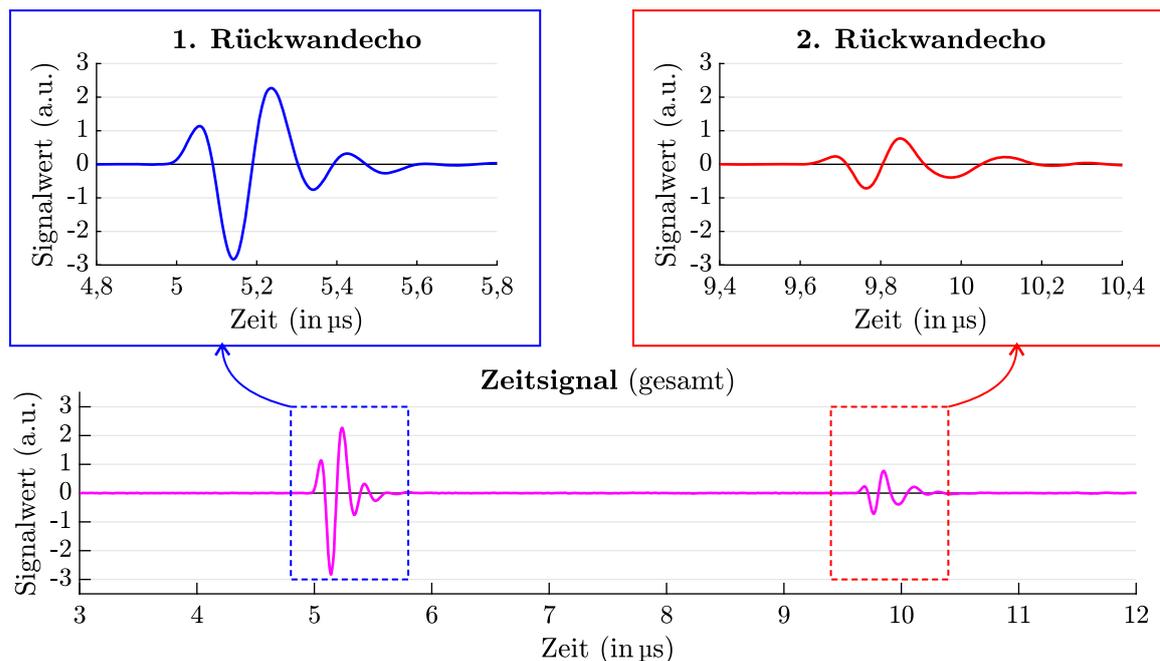


Abb. 5.12: Zeitsignal einer longitudinalen US-Welle am Beispiel der Materialprobe *Mat-a/x* einschließlich Detaildarstellungen des ersten und des zweiten Rückwandechos

Bei der Auswertung der aufgenommenen Zeitsignale wurden zuerst die **US-Laufzeiten** der longitudinalen Wellen aus den Messdaten extrahiert, wobei aus jedem der einzelnen Signale die Laufzeit der Welle zwischen dem ersten und zweiten Rückwandecho ermittelt wurde. Hierbei dienen die Nulldurchgänge, die jeweils zwischen dem ersten lokalen Minimum und dem darauffolgenden Maximum der beiden Echos liegen, als Bezugspunkte zur Laufzeitbestimmung (vgl. Abb. 5.12). Unter Berücksichtigung der jeweiligen Probendicke wurden die longitudinalen Schallgeschwindigkeiten letztlich mithilfe des Zusammenhangs » $Schallgeschwindigkeit = 2 \cdot Probendicke / US-Laufzeit$ « berechnet. Die wie erläutert aus den US-Rohdaten extrahierten longitudinalen Geschwindigkeiten wurden unter Einbeziehung der begleitend gemessenen Temperaturen sowie eines Temperaturkoeffizienten von ca. $-2,01 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ daraufhin rechnerisch auf die Bezugstemperatur von 20°C korrigiert (vgl. Abschn. 5.2.2.1). Nach einer probenspezifischen Entfernung von Ausreißern wurde, für jede Materialprobe separat, der Mittelwert aus den verbliebenen der je 20 Geschwindigkeitswerte gebildet (vgl. Abschn. 5.2.2.2).

Abb. 5.13 veranschaulicht die **Longitudinalwellengeschwindigkeiten**, die anhand der neun Materialproben ermittelt wurden. Dabei sind die Geschwindigkeiten, abhängig von der Durchschallungsrichtung, symbolisch mit $v_{xx}^{(1)}$, $v_{yy}^{(1)}$ und $v_{zz}^{(1)}$ gekennzeichnet, wobei die Indizes die Ausbreitungsrichtung (1. Index) und die (für den Fall der hier zugrundeliegenden Longitudinalwellen immer nominell identische) Polarisationsrichtung (2. Index) bezogen auf das Pleuel-KOS angeben. Die gruppierten, einheitlich eingefärbten Geschwindigkeitswerte wurden zwar an drei verschiedenen Proben, jedoch in dieselbe Richtung in Bezug auf das Pleuel-KOS bzw. in dieselbe Materialrichtung bestimmt. Die Fehlerbalken quantifizieren dabei die Unsicherheiten der Geschwindigkeiten in Form von Größtfehlern, deren Werte sich auf ungefähr $\pm 0,1\%$ bis etwa $\pm 0,15\%$ belaufen (vgl. Abschn. 5.2.2.3). Jedem dieser Fehlerbalken liegen im Detail drei additiv kombinierte Fehlerkomponenten zugrunde. So wurde neben der Unsicherheit infolge der Temperaturkompensation sowie der statistischen Unsicherheit des jeweiligen aus Einzelwerten gemittelten Ergebniswerts immer auch ein Größtfehlerbeitrag einbezogen, der auf Basis von Eingangsunsicherheiten hinsichtlich der Probendicke und der US-Laufzeiten geschätzt wurde.

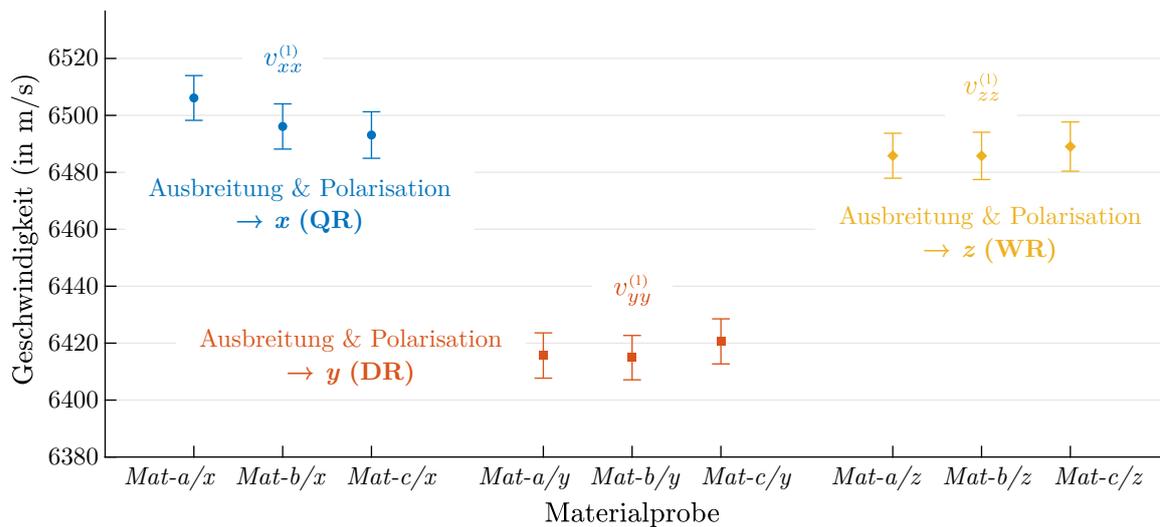


Abb. 5.13: Geschwindigkeiten $v_{xx}^{(1)}$, $v_{yy}^{(1)}$ und $v_{zz}^{(1)}$ longitudinaler Wellen, ermittelt an den Proben *Mat-a/x*, *Mat-a/y* und *Mat-a/z*, den Proben *Mat-b/x*, *Mat-b/y* und *Mat-b/z* sowie den Proben *Mat-c/x*, *Mat-c/y* und *Mat-c/z* (WR → Material-Walzrichtung, QR → Material-Querrichtung, DR → Material-Dickenrichtung)

Anhand von Abb. 5.13 ist zu sehen, dass die Longitudinalwellengeschwindigkeiten, die in dieselbe Materialrichtung bestimmt wurden, unter Berücksichtigung der Fehlerbalken nahezu gleich sind. Da die entsprechenden US-Messungen an drei Proben erfolgten, die aus unterschiedlichen Bereichen der zur Fertigung der Pleuel und Materialproben genutzten Materialplatte stammen, wurde geschlossen, dass das Material hinsichtlich der Schallausbreitung sowie der Elastizität annähernd **homogen** ist. Hingegen zeigt ein Vergleich der in die verschiedenen Richtungen gemessenen Geschwindigkeiten, dass das Material **nicht isotrop** ist. So wurden richtungsabhängige Unterschiede in den longitudinalen Schallgeschwindigkeiten von teilweise über ± 80 m/s bzw. signifikant mehr als $\pm 1\%$ erkannt. Da

zur Materialherstellung ein Walzprozess eingesetzt wurde und die US-Messungen in Richtungen erfolgten, die mit der Walz-, der Quer- und der Dickenrichtung des Materials zusammenfallen, erscheint auf Basis der bisherigen Ergebnisse insbesondere eine orthotrope, jedoch keine isotrope Elastizität plausibel.

Während der weiteren Analysen wurden die Geschwindigkeiten der **Transversalwellen** aus den mit dem entsprechenden Prüfkopf erzeugten US-Daten extrahiert. Nachdem am Beispiel der longitudinalen Geschwindigkeitswerte erkannt wurde, dass sich die an unterschiedlichen Stellen der Materialplatte herausgetrennten Probensätze im Hinblick auf die Schallausbreitung annähernd identisch verhalten, beschränkten sich die weiteren Auswertungen auf die an einem der drei Materialprobensätze generierten Daten. Konkret wurde dabei auf die Proben *Mat-a/x*, *Mat-a/y* und *Mat-a/z* fokussiert. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der transversalen Schallgeschwindigkeiten entsprach weitgehend der zuvor für die Longitudinalwellen beschriebenen Herangehensweise, wobei zur Temperaturkompensation jedoch ein Temperaturkoeffizient von ca. $-2,46 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ verwendet wurde. Auf Basis der 2×20 Messungen pro Materialprobe wurden unter Berücksichtigung der jeweils zwei Polarisationsrichtungen zwei arithmetisch gemittelte US-Geschwindigkeiten für jede der Proben bestimmt.

Abb. 5.14 visualisiert die anhand der Proben *Mat-a/x*, *Mat-a/y* und *Mat-a/z* bestimmten **Transversalwellengeschwindigkeiten**, wobei die insgesamt sechs verschiedenen Schallgeschwindigkeiten durch die sechs Symbole $v_{xy}^{(t)}$, $v_{xz}^{(t)}$, $v_{yx}^{(t)}$, $v_{yz}^{(t)}$, $v_{zx}^{(t)}$ und $v_{zy}^{(t)}$ repräsentiert werden. Wiederum gilt, dass die Indizes der Symbole die Ausbreitungsrichtung (1. Index) und die (im Fall der analysierten Transversalwellen nun senkrecht dazu orientierte) Polarisationsrichtung (2. Index) in Bezug auf das Pleuel-KOS kennzeichnen. Die Fehlerbalken der visualisierten Geschwindigkeiten beruhen auf analogen Größtfehlerabschätzungen, wie sie zuvor im Kontext der Longitudinalwellen beschrieben wurden. Die geschätzten Größtfehler der Transversalwellengeschwindigkeiten liegen dabei erneut im Bereich von $\pm 0,1\%$ bis $\pm 0,15\%$. Für die (verglichen mit Abb. 5.13) in Abb. 5.14 geringer wirkenden Unsicherheiten ist der hier viel größere Wertebereich in der Diagrammdarstellung ursächlich. So wurden richtungsabhängige Unterschiede in den Geschwindigkeiten der verschiedenen transversalen Wellen von teilweise mehr als $\pm 150 \text{ m/s}$ erkannt, was prozentual gesehen immerhin einer Größenordnung von $\pm 5\%$ entspricht.

Zuvor wurde spekuliert, dass der zur Fertigung der Pleuel und Materialproben genutzte Aluminiumwerkstoff elastisch **orthotrop** ist. Laut der Theorie müssten dann aber stets die Schallgeschwindigkeiten der beiden transversalen Wellen übereinstimmen, bei denen die Ausbreitungs- und die Polarisationsrichtung wechselseitig vertauscht sind – welche das wären, ist in Abb. 5.14 mit Pfeilen gekennzeichnet. Angesichts der in der Abbildung skizzierten Fehlerbalken können die entsprechenden experimentell ermittelten Geschwindigkeiten der Transversalwellen (außer in einem Fall) allerdings keinesfalls als paarweise identisch angesehen werden. Somit repräsentiert auch das orthotrope Materialmodell die Gegebenheiten augenscheinlich nicht korrekt.

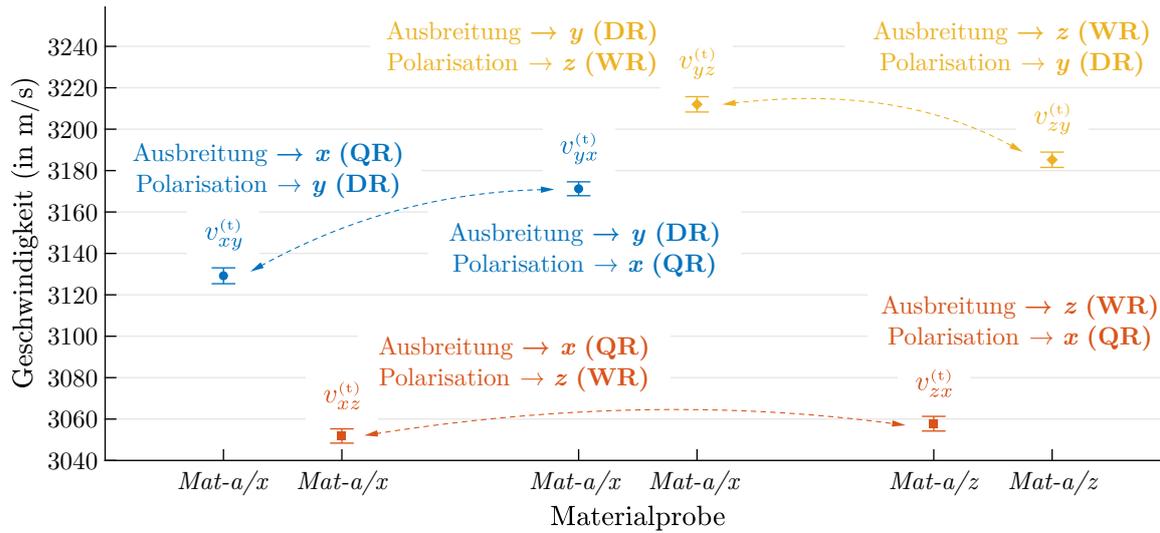


Abb. 5.14: Geschwindigkeiten $v_{xy}^{(t)}$, $v_{xz}^{(t)}$, $v_{yx}^{(t)}$, $v_{yz}^{(t)}$, $v_{zx}^{(t)}$ und $v_{zy}^{(t)}$ transversaler Wellen, ermittelt an den Proben *Mat-a/x*, *Mat-a/y* und *Mat-a/z* (WR → Material-Walzrichtung, QR → Material-Querrichtung, DR → Material-Dickenrichtung)

Tab. 5.3 fasst die messtechnisch ermittelten **Schallgeschwindigkeiten** zusammen. Die genannten Werte fußen ausschließlich auf den US-Messungen an den drei Materialproben *Mat-a/x*, *Mat-a/y* und *Mat-a/z*. Die Unsicherheiten der Geschwindigkeiten sind in Form von Größtfehlern aufgeführt. Zudem gibt die Tabelle jeweils den zugeordneten Wellentyp sowie dessen Ausbreitungs- und Polarisationsrichtung an, jeweils bezogen auf das Pleuel-KOS und die durch den Walzprozess definierten Materialrichtungen.

Tab. 5.3: Experimentell anhand der Materialproben *Mat-a/x*, *Mat-a/y* und *Mat-a/z* ermittelte Schallgeschwindigkeiten $v_{xx}^{(l)}$, $v_{yy}^{(l)}$ und $v_{zz}^{(l)}$ (Longitudinalwellen) sowie $v_{xy}^{(t)}$, $v_{xz}^{(t)}$, $v_{yx}^{(t)}$, $v_{yz}^{(t)}$, $v_{zx}^{(t)}$ und $v_{zy}^{(t)}$ (Transversalwellen) des eingesetzten Aluminiumwerkstoffs (WR → Material-Walzrichtung, QR → Material-Querrichtung, DR → Material-Dickenrichtung)

Geschwindigkeit	Wert & Größtfehler (in m/s)	Wellentyp ^(*)	Ausbreitungsrichtung	Polarisationsrichtung
$v_{xx}^{(l)}$	6506,12 (±7,86)	L	<i>x</i> (QR)	<i>x</i> (QR)
$v_{yy}^{(l)}$	6415,65 (±7,95)	L	<i>y</i> (DR)	<i>y</i> (DR)
$v_{zz}^{(l)}$	6485,83 (±7,90)	L	<i>z</i> (WR)	<i>z</i> (WR)
$v_{xy}^{(t)}$	3129,20 (±3,83)	T	<i>x</i> (QR)	<i>y</i> (DR)
$v_{xz}^{(t)}$	3051,82 (±3,45)	T	<i>x</i> (QR)	<i>z</i> (WR)
$v_{yx}^{(t)}$	3171,22 (±3,35)	T	<i>y</i> (DR)	<i>x</i> (QR)
$v_{yz}^{(t)}$	3212,00 (±3,70)	T	<i>y</i> (DR)	<i>z</i> (WR)
$v_{zx}^{(t)}$	3057,76 (±3,54)	T	<i>z</i> (WR)	<i>x</i> (QR)
$v_{zy}^{(t)}$	3185,22 (±3,70)	T	<i>z</i> (WR)	<i>y</i> (DR)

(*) L → Longitudinalwelle; T → Transversalwelle

Obwohl gezeigt wurde, dass das analysierte Material eindeutig nicht isotrop ist und offenbar auch Abweichungen gegenüber einem idealen orthotropen Material bestehen, wurden die experimentell ermittelten Schallgeschwindigkeiten gemäß Tab. 5.3 verwendet, um die elastischen Konstanten eines isotropen und eines orthotropen Materials mit dem Ziel von **Näherungslösungen** zu quantifizieren. Hierbei wurde zudem der messtechnisch festgestellte Dichtewert von ca. $2705,14 \text{ kg/m}^3$ (siehe Abschn. 5.2.3) aufgegriffen. Für den Fall der Isotropie resultieren durch Umstellen von Gl. 2.7 die Zusammenhänge $C_{11} = (\rho \cdot v_L^2)$ sowie $C_{44} = (\rho \cdot v_T^2)$, mit denen sich die elastischen Konstanten C_{11} und C_{44} eines isotropen Materials auf Grundlage der Dichte ρ sowie der Phasengeschwindigkeiten v_L und v_T der reinen longitudinalen bzw. transversalen Welle berechnen lassen. Es war naheliegend, für die Geschwindigkeit v_L der Longitudinalwelle ersatzweise den arithmetischen Mittelwert aus allen experimentell ermittelten longitudinalen Geschwindigkeiten zu verwenden. Analog wurde für die Geschwindigkeit v_T der Transversalwelle der Mittelwert aus sämtlichen experimentellen Geschwindigkeiten mit transversalem Charakter genutzt. Somit wurden die folgenden Zuordnungen gebildet, um die Konstanten C_{11} und C_{44} für das ersatzweise angenommene isotrope Materialmodell zu berechnen:

- $v_L \rightarrow \text{Mittelwert}(v_{xx}^{(l)}, v_{yy}^{(l)}, v_{zz}^{(l)}) \approx 6469,20 \text{ m/s}$
- $v_T \rightarrow \text{Mittelwert}(v_{xy}^{(t)}, v_{xz}^{(t)}, v_{yx}^{(t)}, v_{yz}^{(t)}, v_{zx}^{(t)}, v_{zy}^{(t)}) \approx 3134,54 \text{ m/s}$

Ähnlich wurde vorgegangen, um die elastischen Konstanten eines orthotropen Materials zu berechnen. Konkret wurden Gl. 2.9 bis Gl. 2.11 nach den elastischen Konstanten C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} und C_{66} umgeformt. Die zur Berechnung benötigten Schallgeschwindigkeiten $v_{11}^{(L)}$, $v_{22}^{(L)}$ und $v_{33}^{(L)}$ gehören zu den drei reinen Longitudinalwellen, welche sich entlang der senkrechten Orthotropieachsen x_1^+ , x_2^+ und x_3^+ im orthotropen Material ausbreiten können. Diesen wurden ersatzweise die longitudinalen Geschwindigkeiten gemäß Tab. 5.3 zugewiesen, die in Richtung der materiellen Hauptrichtungen ermittelt wurden. Die weiteren Schallgeschwindigkeiten $v_{12}^{(T)}$, $v_{13}^{(T)}$, $v_{21}^{(T)}$, $v_{23}^{(T)}$, $v_{31}^{(T)}$ sowie $v_{32}^{(T)}$ lassen sich im orthotropen Material reinen Transversalwellen zuordnen, wobei die Ausbreitung und die Polarisation jeweils in zwei der drei Hauptrichtungen orientiert sind. Wie oben erläutert schreiten laut der Theorie stets zwei Transversalwellen mit identischer Geschwindigkeit fort, und zwar falls Ausbreitungsrichtung und Polarisationsrichtung vertauscht werden, sodass theoretisch $v_{12}^{(T)} = v_{21}^{(T)}$, $v_{13}^{(T)} = v_{31}^{(T)}$ und $v_{23}^{(T)} = v_{32}^{(T)}$ gilt. Da jedoch solch ein Effekt hier nicht beobachtet werden konnte, wurden stets die zwei paarweisen Werte gemittelt, die bei einem orthotropen Material hätten zusammenfallen müssen. So wurden folgende Zuordnungen definiert, um die elastischen Konstanten C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} und C_{66} für den näherungsweise unterstellten Fall der Orthotropie zu berechnen:

- $v_{11}^{(L)} \rightarrow v_{xx}^{(l)} \approx 6506,12 \text{ m/s}$
- $v_{12}^{(T)} = v_{21}^{(T)} \rightarrow \text{Mittelwert}(v_{xy}^{(t)}, v_{yx}^{(t)}) \approx 3150,21 \text{ m/s}$
- $v_{22}^{(L)} \rightarrow v_{yy}^{(l)} \approx 6415,65 \text{ m/s}$
- $v_{13}^{(T)} = v_{31}^{(T)} \rightarrow \text{Mittelwert}(v_{xz}^{(t)}, v_{zx}^{(t)}) \approx 3054,79 \text{ m/s}$
- $v_{33}^{(L)} \rightarrow v_{zz}^{(l)} \approx 6485,83 \text{ m/s}$
- $v_{23}^{(T)} = v_{32}^{(T)} \rightarrow \text{Mittelwert}(v_{yz}^{(t)}, v_{zy}^{(t)}) \approx 3198,61 \text{ m/s}$

Das orthotrope Materialmodell betreffend konnten keine experimentellen Werte für die Konstanten C_{12} , C_{13} und C_{23} bestimmt werden. Deren Quantifizierung hätte, abgesehen von den materiellen Hauptachsen, z. B. auch Durchschallungen in 45°-Richtungen bzw. Diagonalrichtungen erfordert. Dazu wurden die Materialproben jedoch nicht ausgelegt. Um für weiterführende Analysen dennoch Werte zu generieren, wurde den elastischen Konstanten C_{12} , C_{13} sowie C_{23} als grobe Ersatzlösung für die fehlenden Informationen der identische Wert 60,05 GPa zugewiesen. Denn dieser lässt sich aus den Daten unter der Annahme eines isotropen Materials für dessen elastische Konstante C_{12} berechnen, die in der Elastizitätsmatrix an genau den Stellen auftaucht, an denen im orthotropen Fall die Konstanten C_{12} , C_{13} und C_{23} stehen.

Tab. 5.4 fasst die anhand der Materialproben *Mat-a/x*, *Mat-a/y* und *Mat-a/z* ermittelten **Elastizitätskennwerte** zusammen. Für das idealisiert angenommene isotrope Materialmodell wurden, unter Verwendung der in Abschn. 2.2.1 angegebenen Formeln, neben den Konstanten C_{11} , C_{44} und C_{12} zudem der Elastizitätsmodul E , der Schubmodul G sowie die Poissonzahl ν berechnet. Für das näherungsweise unterstellte orthotrope Materialmodell sind alle entsprechenden neun elastischen Konstanten C_{11} , C_{22} , C_{33} , C_{44} , C_{55} und C_{66} sowie C_{12} , C_{13} und C_{23} quantitativ angegeben. Zum Vergleich sind in Tab. 5.4 auch die theoretischen Kennwerte des (in der Arbeit u. a. für FEM-Berechnungen genutzten) isotropen Referenzmaterials (siehe Abschn. 4.2.2) aufgeführt.

Tab. 5.4: Experimentell anhand der Materialproben *Mat-a/x*, *Mat-a/y* und *Mat-a/z* mittels US-Laufzeitmessungen abgeleitete Elastizitätskennwerte unter der Annahme eines isotropen bzw. eines orthotropen linear-elastischen Verhaltens des eingesetzten Aluminiumwerkstoffs

Materialeigenschaft	Materialmodell		
	isotrop ^(*) (theoretisch)	isotrop (experimentell)	orthotrop (experimentell)
Elastizitätsmodul E	(70 GPa)	71,58 GPa	–
Schubmodul G	(26,12 GPa)	26,58 GPa	–
Poissonzahl ν	(0,34)	0,3466	–
elast. Konstante C_{11}	(107,74 GPa)	113,21 GPa	114,51 GPa
elast. Konstante C_{22}	–	–	111,35 GPa
elast. Konstante C_{33}	–	–	113,79 GPa
elast. Konstante C_{44}	(26,12 GPa)	26,58 GPa	27,68 GPa
elast. Konstante C_{55}	–	–	25,24 GPa
elast. Konstante C_{66}	–	–	26,85 GPa
elast. Konstante C_{12}	(55,50 GPa)	60,05 GPa	60,05 GPa
elast. Konstante C_{13}	–	–	60,05 GPa
elast. Konstante C_{23}	–	–	60,05 GPa

(*) Kennwerte des theoretischen Referenzmaterials (siehe Abschn. 4.2.2) zum Vergleich

Da die Elastizitätskennwerte gemäß Tab. 5.4 u. a. aus unsicherheitsbehafteten Schallgeschwindigkeiten und einer unsicheren Dichte abgeleitet wurden, sind auch sie **unsicher**. Grundsätzlich ließen sich Größtfehler für alle elastischen Konstanten berechnen. Darauf wurde jedoch verzichtet, da die zugrundeliegenden theoretischen Materialmodelle nicht zum realen Materialverhalten bzw. den vorliegenden Daten passen. Die experimentellen Daten wurden letztlich u. a. per Mittelwertbildungen in die Modelle »reingezwängt«, um überhaupt Kennwerte unter idealisierten Annahmen zu erhalten. Darüber hinaus fehlten für die vollständige Quantifizierung eines orthotropen Materialmodells wesentliche Informationen, sodass einige elastische Konstanten nur ersatzweise geschätzt werden konnten. Vor diesem Hintergrund (sowie der vielen weiteren Unsicherheiten und Modellannahmen z. B. in Bezug auf die experimentelle Ermittlung der Schallgeschwindigkeiten) wurde es nicht als zielführend angesehen, die berechneten Elastizitätskennwerte durch Größtfehler einzugrenzen und damit eine falsche Sicherheit zu implizieren. Dennoch, zur ganz groben quantitativen Einordnung: Werden z. B. die elastischen Konstanten C_{11} und C_{44} für ein isotropes Materialmodell nicht wie beschrieben auf Basis der gemittelten longitudinalen bzw. transversalen Geschwindigkeiten berechnet, sondern werden stattdessen die jeweiligen Minima und Maxima aus Tab. 5.4 verwendet, resultieren (inkl. Einbeziehung der quantifizierten Unsicherheiten der Schallgeschwindigkeiten und der Dichte) Elastizitätskennwerte, die im Extremfall um ca. $\pm 2\%$ bzw. $\pm 5,5\%$ von den eigentlich berechneten Kennwerten abweichen. Letztlich wird festgehalten, dass die experimentell bestimmten elastischen Konstanten durch hohe Unsicherheiten gekennzeichnet sind, die jedoch nicht ausschließlich quantitativer Natur sind.

5.2.5 Durchstrahlungsprüfung per Röntgentechnik

Zwecks Bewertung der inneren Strukturen der realen Pleuel bzw. des zu ihrer Fertigung verwendeten Werkstoffs wurden 2D-Durchstrahlungsaufnahmen mittels Röntgentechnik erstellt. Konkret wurden Röntgenbilder der neun etwa $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ großen **Materialproben** aufgezeichnet, wobei die Proben in die jeweilige 15-mm-Dickenrichtung durchstrahlt wurden. Zudem wurden Röntgenbilder von den **realen Pleueln** angefertigt, wozu die Teile in z -Richtung des Pleuel-KOS durchstrahlt wurden. Um die Erkennbarkeit makroskopischer Defekte zu quantifizieren, wurden sechs kleine, in z -Richtung orientierte Flachbodenbohrungen in das Steg-Segment des Referenzpleuels *R-5* eingebohrt, bevor das Teil erneut geröntgt wurde.⁴⁹

Für die Analysen diente eine **Röntgenanlage** des Fraunhofer IZFP, Saarbrücken, in der ein Röntgenstrahler vom Typ *XWT-240-SE* (X-RAY WorX, Garbsen) sowie ein digitaler Detektor des Typs *XRD 1611 xP* (PerkinElmer, Waltham/MA/USA) verbaut sind, wobei jeweils eine Röntgenspannung von 100 kV und ein -strom von 200 μA vorgegeben wurden. Die effektive Beleuchtungsdauer wurde dabei auf mindestens 3 min eingestellt (bis zu 180 gemittelte Einzelbilder à 1 s bis 2 s pro aufgenommenem Röntgenbild).

Der Detektor bzw. jedes der angefertigten 2D-Röntgenbilder umfasst 2048×2048 Pixel. Aufwandsbedingt wurden die neun Materialproben gemeinsam durchstrahlt. Ebenso wurden immer bis zu zehn Pleuel gemeinsam abgebildet. Um den Detektor dabei bestmöglich mit dem Ziel einer optimierten **Ortsauflösung** auszunutzen, wurden je nach Anzahl der bei einer Aufnahme berücksichtigten Objekte und deren Dimensionen geeignete Vergrößerungen der Projektionen auf dem Detektor realisiert. Daraus folgte eine unterschiedliche räumliche Auflösung in den Bildern. Im Fall der Materialproben entspricht der Abstand zwischen benachbarten Bildpixeln knapp $60\text{ }\mu\text{m}$, während für die Pleuel eine örtliche Auflösung von weniger als $150\text{ }\mu\text{m}$ erzielt wurde (u. a. wegen der manuellen Optimierung der Vergrößerungseinstellungen variiert die Auflösung zwischen knapp $132\text{ }\mu\text{m}$ und ca. $146\text{ }\mu\text{m}$). Die Pixel aller erstellten Röntgenbilder sind mit 16 bit digitalisiert, wobei mit steigender Intensität der registrierten Röntgenstrahlung ein höherer Wert, nachfolgend als Grauwert bezeichnet, einhergeht (Integer-Werte zwischen 0 und 65 535).

Alle nachfolgend präsentierten Röntgenbilder wurden mit der Software *VolumePlayerPlus* (Fraunhofer EZRT, Fürth, Version 8.1.5) generiert. Diese Software diente u. a. dazu, die Bilddaten der einzelnen Objekte aus den Gesamtaufnahmen zu extrahieren. Zudem wurde der Wertebereich der 16-bit-Grauwerte jeweils manuell auf einen geeigneten Teilbereich beschränkt. Dies zielte auf eine gute visuelle Erkennbarkeit feinsten Inhomogenitäten ab, die mit nur geringfügig variierenden Schwächungen der Röntgenstrahlung einhergehen. Die Bilddaten wurden als Grafiken mit 8 bit Auflösung abgespeichert, wobei der jeweils eingestellte Grauwertbereich in linearen Graustufen zwischen schwarz (Minimum der registrierten Strahlung, d. h. maximale Schwächung) und weiß (Maximum der erfass-

⁴⁹⁾ Diese zusätzliche Aufnahme wurde nach den ART-Messungen angefertigt, sodass die Eigenfrequenzen des Pleuels *R-5* vor dem Einbringen der Flachbodenbohrungen ermittelt werden konnten.

ten Strahlung, d. h. minimale Schwächung) dargestellt ist.⁵⁰ Zusätzliche Bearbeitungsoptionen wie Filter- oder Glättungsoperatoren wurden nicht genutzt.

Abb. 5.15 zeigt die Röntgenbilder der **Materialproben** *Mat-a/x*, *Mat-a/y* und *Mat-a/z*. Die bei den Röntgenaufnahmen dieser Proben jeweils durchstrahlte 15-mm-Probendickenrichtung entspricht der *x*-, der *y*- bzw. der *z*-Richtung des Pleuel-KOS. Diese Richtungen fallen zugleich mit der Quer-, der Dicken- bzw. der Walzrichtung der zur Herstellung der Pleuel und Materialproben verwendeten Materialplatte zusammen.

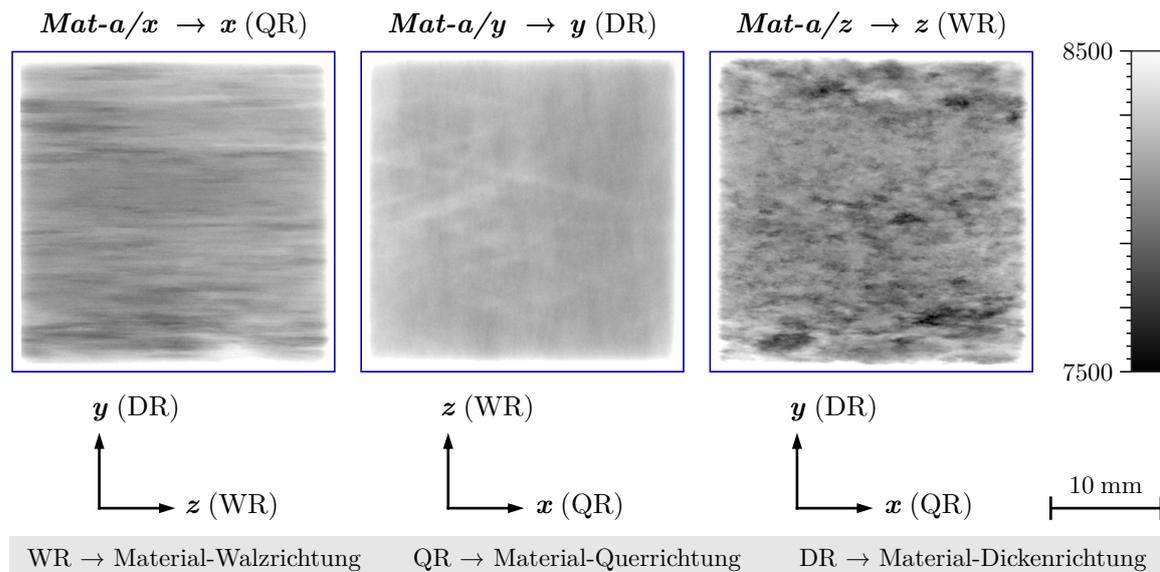


Abb. 5.15: Röntgenbilder der Materialproben *Mat-a/x*, *Mat-a/y* und *Mat-a/z*

In Abb. 5.15 sind **richtungsabhängige Strukturen** zu sehen. Diese sind schlüssig für eine Walztextur, die in Anbetracht des im Zuge der Materialherstellung durchgeführten Walzprozesses so erwartet werden konnte. Dabei lässt sich im Bild der Probe *Mat-a/x* ein horizontal verlaufendes, streifiges Muster erkennen, was der Walzrichtung des Materials bzw. einer entsprechenden Gefügeausrichtung zugeordnet werden kann. Etwas schwächer ausgeprägt ist dieselbe Struktur auch im Röntgenbild der Probe *Mat-a/y* zu sehen, und zwar als vertikal verlaufendes Streifenmuster (die im Bild diagonal orientierten Schlieren korrelieren mit optisch sichtbaren Kratzspuren auf der Probenoberfläche, die vermutlich im Rahmen der vorangegangenen US-Messungen verursacht wurden). Im Bild der Probe *Mat-a/z* ist hingegen eine fleckige, kontrastreiche Struktur abgebildet, wobei die zu erkennenden Flecken in die im Bild horizontal verlaufende Material-Querrichtung ausgedehnter sind als in die hier vertikal ausgerichtete Dickenrichtung des Materials. Dies deutet auch auf eine deutliche Vorzugsrichtung in Walzrichtung, welche der Durchstrahlungsrichtung entspricht, sowie eine Stauchung des Gefüges in die Material-Dickenrichtung hin, was als plausibel für die Herstellungshistorie bewertet wurde.

⁵⁰⁾ Die gezeigten Röntgenbilder sind abbildungsübergreifend nur qualitativ, nicht aber quantitativ bzgl. der Grauwerte vergleichbar. Ursächlich dafür sind u. a. variierende Abstände zwischen der Röntgenröhre und dem -detektor aufgrund zwischenzeitlich anderweitiger Einsätze der Röntgenanlage.

Die Röntgenanalysen der Materialproben untermauern die per Ultraschalluntersuchungen (siehe Abschn. 5.2.4) gewonnene Erkenntnis, wonach die Elastizität des Materials, offensichtlich infolge des Walzprozesses, **anisotrop** ist. Die hier nicht gezeigten Röntgenbilder der anderen sechs Materialproben zeigen analoge Strukturen. Anhand der guten Übereinstimmung der drei Materialprobensätze in den Röntgenabbildungen und den Ergebnissen der experimentellen Dichtebestimmung (siehe Abschn. 5.2.3) wurde geschlossen, dass im kleineren Maßstab von einigen wenigen Millimetern zwar gewisse Inhomogenitäten vorliegen, das Material makroskopisch(er) gesehen jedoch **homogen** ist.

Abb. 5.16 visualisiert die Röntgenaufnahmen der **Referenzpleuel** *R-1*, *R-2* und *R-3*. Die Röntgendaten bzw. die Grauwerte wurden bei der Erstellung der Bilder so eingeschränkt, dass entweder die inneren Strukturen der dünneren Steg-Segmente oder die der dickeren Zylinderring-Segmente kontrastreich erkennbar sind.

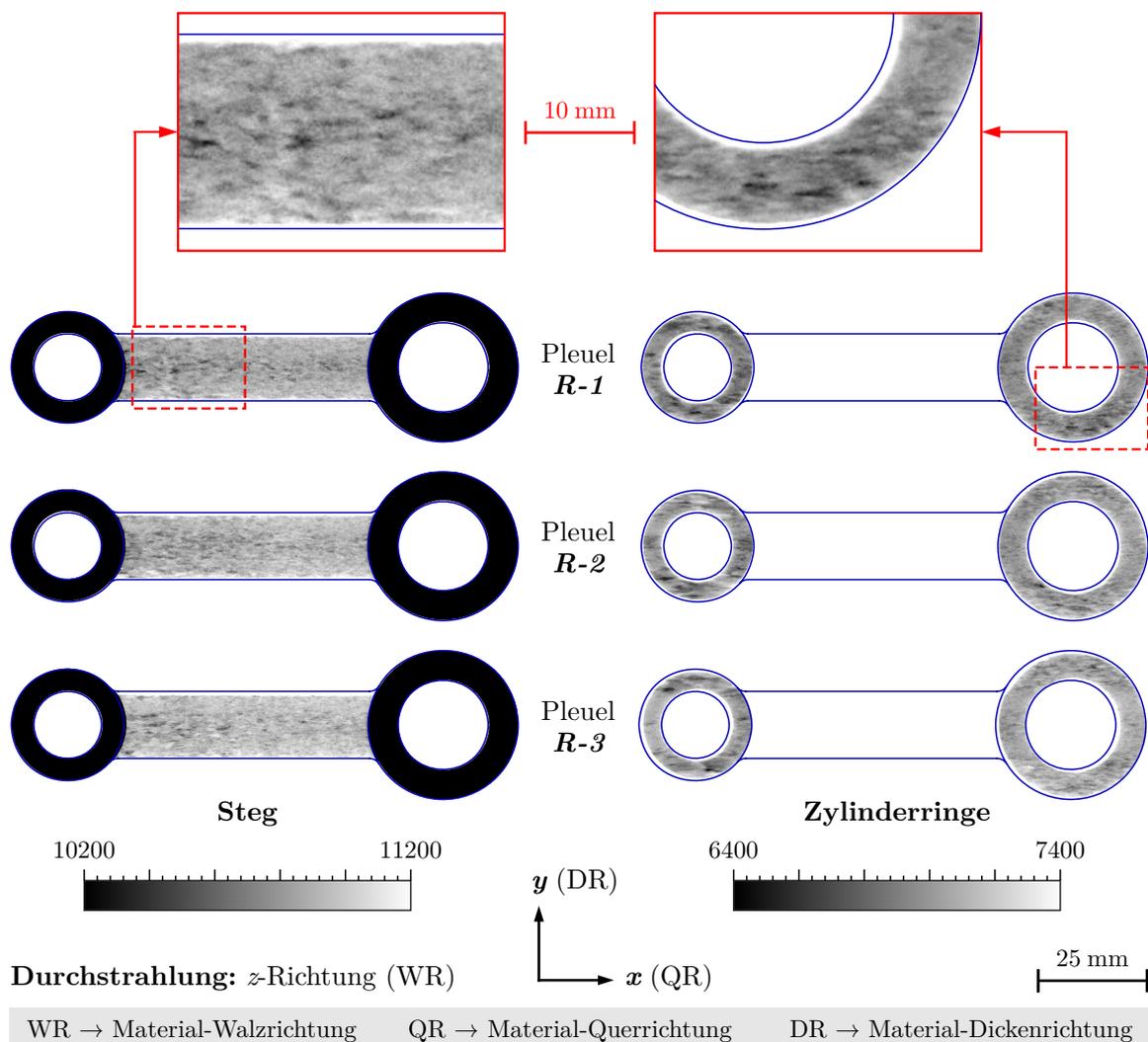


Abb. 5.16: Röntgenbilder der realen Referenzpleuel *R-1*, *R-2* und *R-3*

In Abb. 5.16 ist jeweils, wie auch in den nicht gezeigten Abbildungen der anderen Pleuel, ein charakteristisches Muster zu erkennen, das sich qualitativ ebenso im Röntgenbild der Materialprobe *Mat-a/z* (siehe Abb. 5.15, rechts) äußert. Dass für alle realen Pleuel grundsätzlich analoge innere Strukturen erkannt wurden, ist insofern nicht verwunderlich, als in allen Fällen dieselbe Durchstrahlungsrichtung genutzt und die technologisch identische Bauteilrichtung, nämlich die z -Richtung des Pleuel-KOS bzw. die Material-Walzrichtung, abgebildet wurde. Dennoch untermauert diese Beobachtung, dass die Fertigung der Pleuel bezogen auf die gewalzte Materialplatte entsprechend den Orientierungsvorgaben erfolgte und dass alle Teile eine **konsistente Ausrichtung** des anisotropen Materials aufweisen. Mittels der Röntgenanalysen wurden über die geschilderten Strukturen hinaus **keinerlei Inhomogenitäten oder Anomalien** erkannt. Im Vergleich lassen sich somit alle realen Pleuel als unauffällig einstufen.

Abb. 5.17 zeigt das Röntgenbild des Referenzpleuels *R-5*, welches aufgenommen wurde, nachdem sechs **Flachbodenbohrungen** mit nominellen Durchmessern von 0,6 mm und Tiefen zwischen 0,3 mm und 0,8 mm in das Steg-Segment des Teils implementiert wurden. Alle Bohrungen sind im Röntgenbild mit deutlichem Kontrast zu sehen. Dies geht auch aus dem Diagramm hervor, in dem die Grauwerte aller in der Detaildarstellung berücksichtigten Bildpixel visualisiert sind. Die blau gekennzeichneten Datenpunkte beziehen sich dabei auf die Pixel, die bei der Aufnahme keinem Bohrungseinfluss unterlagen, und die gestrichelten Linien kennzeichnen den Wertebereich der entsprechenden Grauwerte. Die roten Punkte quantifizieren hingegen die Grauwerte der Pixel, die das Pleuel jeweils im Bereich einer Bohrung abbilden (jeweils 5×5 Pixel, wobei als mittlerer Pixel stets der Bildpunkt mit dem lokal höchsten Grauwert ausgewählt wurde). Der Grauwertunterschied bzw. die lokale Überhöhung der Grauwerte steigt mit zunehmender Bohrungstiefe an, wobei sich in guter Näherung ein linearer Zusammenhang zwischen der Bohrungstiefe und der lokal maximal registrierten Röntgenintensität erkennen lässt.

In Abb. 5.17 zeigt sich die Flachbodenbohrung mit der geringsten Tiefe von 0,3 mm schon mit herausragenden 16-bit-Grauwerten. Über die von der Bohrungstiefe annähernd linear abhängigen Grauwerte und die lokalen Grauwertschwankungen in den Bildbereichen ohne Bohrungseinflüsse wurde geschätzt, dass vermutlich bereits eine 0,2 mm tiefe Bohrung im Steg-Segment erkennbar gewesen wäre. Über das Verhältnis der Materialstärken des Steg-Segments (ca. 7 mm) und der Zylinderring-Segmente (ca. 12 mm) wurde geschlossen, dass auch in den Zylinderring-Segmenten entsprechende Flachbodenbohrungen ab Tiefen von 0,4 mm bis 0,5 mm verlässlich erkennbar gewesen wären. Weiterhin müsste sich ein Defekt bei ausreichender Tiefe schon ab einer lateralen Ausdehnung von 2×2 Pixeln signifikant im Röntgenbild zeigen, also bei der erzielten Ortsauflösung von etwas weniger als 150 μm bereits ab einem Durchmesser von ca. 0,3 mm. Letztlich lässt sich folgern, dass mittels der Röntgenanalysen sehr wahrscheinlich **Volumendefekte** in den realen Pleueln erkennbar gewesen wären, falls sie in jede Richtung eine **Mindestgröße** von 0,5 mm überschreiten würden – möglicherweise wären sie sogar schon ab einer Größe von ca. 0,3 mm detektier-

bar gewesen.⁵¹ Da in keinem Röntgenbild eine darauf hindeutende Auffälligkeit zu sehen ist, ist anzunehmen, dass keines der Teile einen entsprechenden makroskopischen Defekt aufweist. Auf Basis der Röntgenanalysen können jedoch weder kleinere porenartige Fehlstellen noch schmale, rissartige, aber in einzelne Richtungen ausgedehnte Defekte ausgeschlossen werden, die eine Mindestabmessung unterhalb von 0,3 mm aufweisen. Außerdem lässt sich nicht ausschließen, dass räumlich ausgedehnte Fehlstellen existieren, an denen die für diese Arbeit zentralen Materialeigenschaften (Dichte, Elastizität) lokal gegenüber den sonstigen Eigenschaften deutlich abweichen, sich dabei jedoch mit einem zu geringen Kontrast in den Röntgenbildern widerspiegeln.

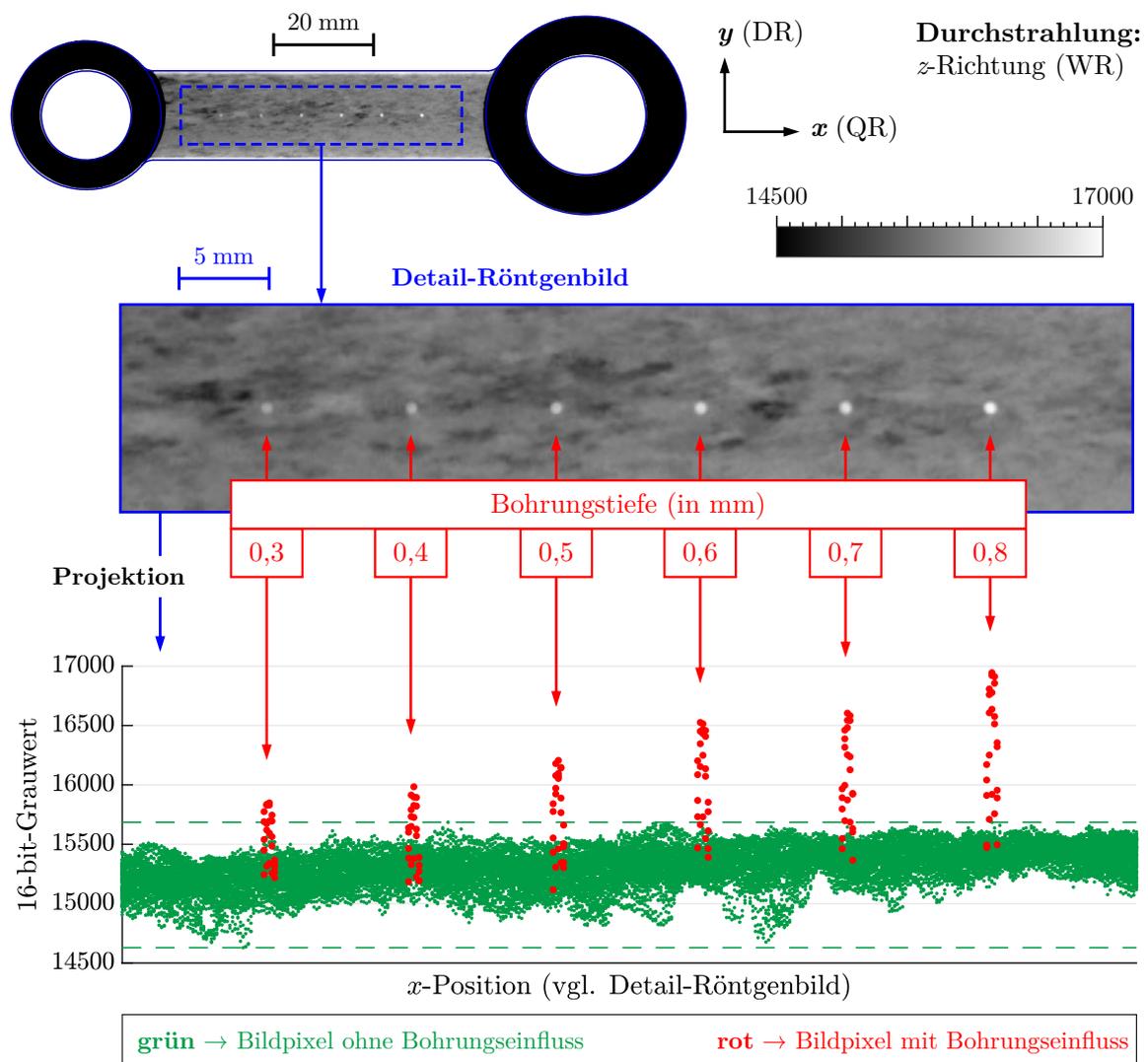


Abb. 5.17: Röntgenbild des realen Referenzpleuels *R-5* mit Flachbodenbohrungen

⁵¹⁾ Diese Abschätzung bezieht sich auf poren-/lunkerartige Volumendefekte, also auf Diskontinuitäten mit »harten« Übergängen bzw. auf Fehlstellen, an denen überhaupt kein Material vorhanden ist.

5.2.6 Taktile Geometrievermessung der Pleuel

Die realen Pleuel wurden geometrisch vermessen, um die zwangsläufig von der jeweiligen Sollgeometrie abweichenden **Ist-Geometrien** der Objekte zu bestimmen. Der Fokus lag dabei auf der Quantifizierung der Pleuel in Bezug auf die acht Hauptgeometrieparameter (siehe Abb. 4.3 in Abschn. 4.2.1). Darüber hinaus wurden die Teile auf weitere geometrische Eigenschaften wie Form- und Lageabweichungen hin analysiert.

Als Gerätetechnik für die Geometrievermessung wurde ein **3D-Koordinatenmessgerät** des Typs *PRISMO 7/9/5 HTG* (Carl Zeiss, Oberkochen) inkl. der zugehörigen Software *CALYPSO 2014* in der Version 5.8 eingesetzt. Vor der geometrischen Vermessung wurde das zu analysierende Pleuel zuallererst mit schmalen Spannbacken fixiert. Danach wurde die Lage des Teils im Raum erfasst, wozu bestimmte Bauteilbereiche per Messtaster mit einer 3-mm-Kugelspitze taktil angefahren wurden. Auf Basis dessen legte die Software ein Messkoordinatensystem so fest, dass dessen drei Achsenrichtungen weitgehend denen des Pleuel-KOS (bzw. den Hauptrichtungen des Pleuels) entsprechen. Daraufhin erfolgte die eigentliche Vermessung bzw. Erfassung der Geometriedaten, wobei im Vorfeld zahlreiche Messfeatures definiert wurden, d. h. linien- oder kreisförmige Elemente, die die Messstrategie und die per Messtaster abzutastenden Bereiche festlegen. Entlang der Messfeatures wurden schließlich die 3D-Koordinaten tausender Geometriepunkte registriert. Zusätzlich wurde die Pleuel-Temperatur indirekt mithilfe von Thermoelementen gemessen, die nahe den Spannbacken appliziert waren. Basierend auf der jeweiligen Temperatur sowie einem Längenausdehnungskoeffizienten von $-2,36 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ wurden die erfassten Punktdaten auf die Bezugstemperatur von 20°C korrigiert (vgl. Abschn. 5.2.2.1).

Abb. 5.18 visualisiert die insgesamt 20 **Messfeatures**. Je nach Zweck eines Messfeatures wurden, auf Basis vorgegebener x - und y -Koordinatenwerte, vorrangig die z -Koordinaten entlang der Bauteilkontur bestimmt (in Abb. 5.18 rot hervorgehoben). Alternativ lag der Fokus auf der Erfassung der y -Koordinaten bzw. der x - und y -Koordinaten (in Abb. 5.18 blau hervorgehoben). In der Abbildung ist angegeben, welche(n) Geometrieparameter die Features jeweils adressieren und wie sie konkret im Messkoordinatensystem, das sich aus praktischen Gründen v. a. im Ursprung vom Pleuel-KOS unterscheidet, definiert wurden. Pro Messfeature (und Pleuel) wurden jeweils die 3D-Koordinaten von rund 500 einzelnen Geometriepunkten erfasst und temperaturkompensiert abgespeichert.

Nach der Erfassung wurden die Punktdaten exportiert und zur weiterführenden Analyse in die Software MATLAB[®] geladen, wo zunächst alle zu einem Pleuel gehörenden Daten gemeinsam weiterverarbeitet wurden. Im ersten Analyseschritt wurden die (im Messkoordinatensystem) vorhandenen Punktwolken ins Pleuel-KOS überführt. Die dazu notwendigen **Transformationen** basierten auf teilespezifischen Analysen der Punktdaten (bzw. auf mehreren anhand der Daten mittels der Methode der kleinsten Quadrate bestimmten Ebenen und Vektoren). Da die Realgeometrien der Teile durch gewisse Welligkeiten und Verkipnungen gekennzeichnet sind, was sich in den aufgezeichneten Daten widerspiegelt, erwies sich die zielgerichtete Überführung der Datenpunkte ins Pleuel-KOS im Detail als anspruchsvoll. Letztlich erfolgten die Koordinatentransformationen auf Basis einer empi-

rischen, teileübergreifend einheitlich realisierten Kompromisslösung, wobei das Ziel darin bestand, die durch die Gesamtheit der jeweiligen Punktdaten beschriebenen Geometrien bestmöglich zu den Achsen des Pleuel-KOS auszurichten.

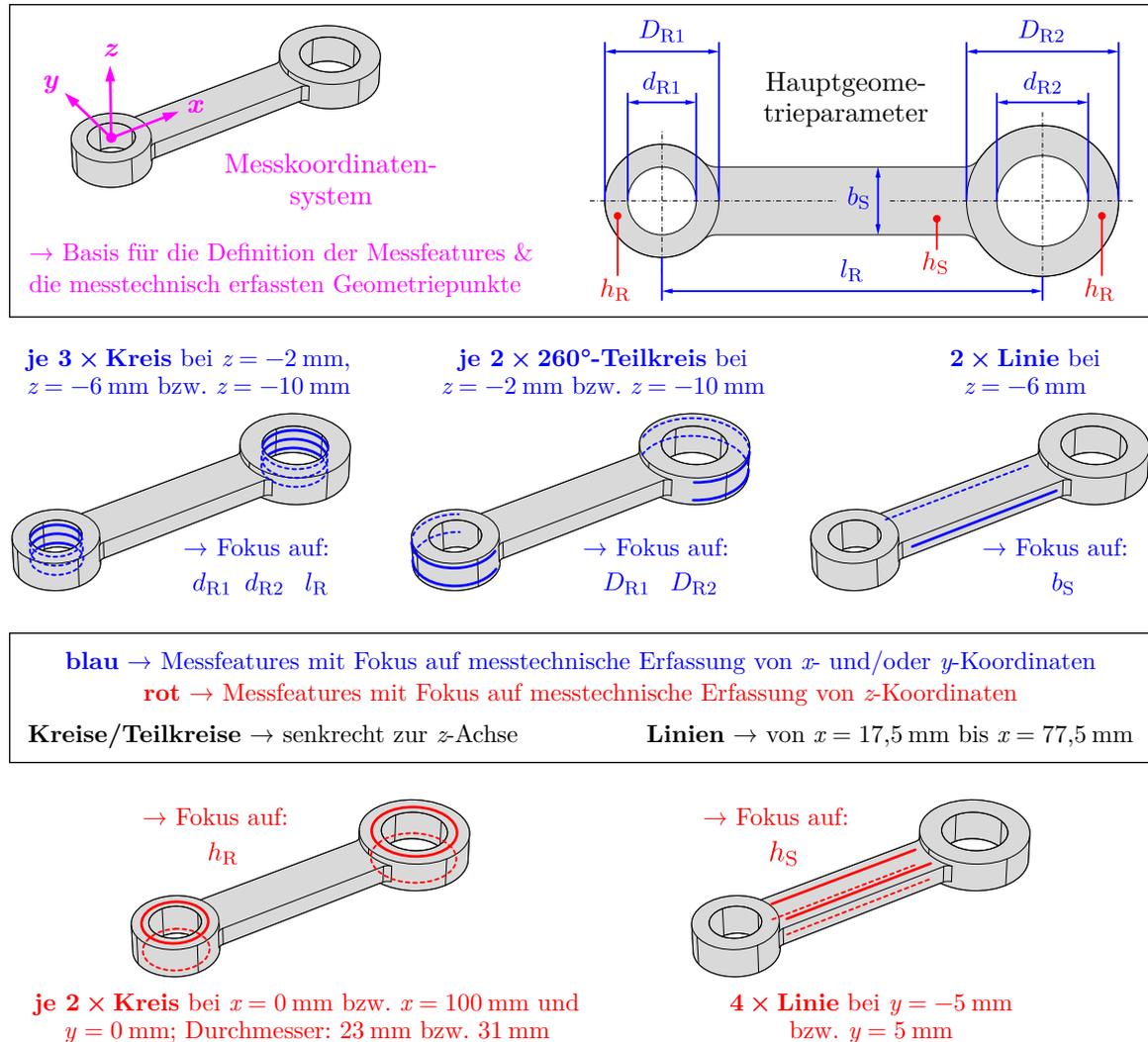


Abb. 5.18: Messfeatures für die taktile Geometrievermessung der realen Pleuel mittels Koordinatenmessgerät einschließlich Definitionen und Erläuterungen

Im zweiten Schritt wurden dann die Maße der Pleuel in Bezug auf die **Hauptgeometrieparameter** aus den Daten extrahiert. Dazu wurden die 3D-Punktdaten des betrachteten Teils anteilig auf eine geeignete Ebene des Pleuel-KOS projiziert, und zwar je nach analysiertem Geometrieparameter auf die x - y -Ebene (Parameter d_{R1} , D_{R1} , d_{R2} , D_{R2} , l_R und b_S) oder auf die x - z -Ebene (Parameter h_R und h_S). Dabei wurden alle Punkte berücksichtigt, die auf den zwei bis vier für den analysierten Geometrieparameter gemäß Abb. 5.18 relevanten Messfeatures basieren. Auf dieser Grundlage wurde dann die jeweilige Abmessung des betrachteten Teils ermittelt, wobei für die Höhe h_R der beiden Zylinderring-Segmente pro Pleuel zunächst zwei separate Messwerte extrahiert wurden, aus denen durch Mittelwertbildung schließlich der finale Ergebniswert resultierte.

Die Ermittlung der Pleuel-Abmessungen auf Basis der Punktdaten wird nun am Beispiel des Geometrieparameters b_S (Stegbreite) erläutert, wobei Abb. 5.19 die zugrundeliegende Methodik skizziert. Im konkreten Fall wurden die auf die x - y -Ebene des Pleuel-KOS projizierten Punktdaten des untersuchten Teils bzgl. der beiden auf den gegenüberliegenden Seitenflächen des Steg-Segments positionierten Messfeatures analysiert. Dabei wurde für jede der zwei linienförmigen Punktwolken einzeln der Mittelwert der y -Koordinatenwerte berechnet, wobei die Mittelwerte die über die jeweiligen Punkte gemittelten y -Positionen der beiden Seitenflächen quantifizieren. Als gesuchte Stegbreite wurde dann die Differenz der zwei Mittelwerte notiert. Darüber hinaus wurden für jede Bauteilseite das Minimum sowie das Maximum der y -Koordinatenwerte erfasst, um die extremsten y -Positionen der Seitenflächen zu bestimmen (d. h. in der 2D-Projektion zur x -Achse parallele Linien, die gerade noch so vollständig »im Material« bzw. gerade komplett außerhalb davon liegen). Danach wurden anhand der Extrema durch Differenzbildungen eine auf Basis der Daten plausible Unter- sowie eine Obergrenze bzgl. der Stegbreite berechnet. Um Verzerrungen durch lokale Ausreißer zu vermeiden, wurden diese vor der Berechnung der Mittelwerte, Minima und Maxima aus den Daten eliminiert. Hierzu wurden jedoch nicht die y -Werte der Punktdaten direkt bewertet, denn deren Streuungen sind nicht nur zufällig, sondern hängen wesentlich von der jeweiligen Realgeometrie und der Beschaffenheit der analysierten Bauteiloberfläche ab. Um dies zu adressieren, wurde die MATLAB®-Funktion `csaps` (»cubic smoothing spline«) verwendet, mit der die makroskopischen Charakteristika der y -Koordinatenwerte entlang der x -Achse funktional abgebildet wurden. Auf die Differenzen zwischen den y -Werten der Punktdaten und den Funktionswerten konnte schließlich die standardmäßig verwendete Ausreißerregel (siehe Abschn. 5.2.2.2) angewandt werden, wodurch die übermäßig stark vom gewöhnlichen Verlauf der y -Koordinatenwerte entlang der x -Richtung abweichenden Werte identifiziert wurden.

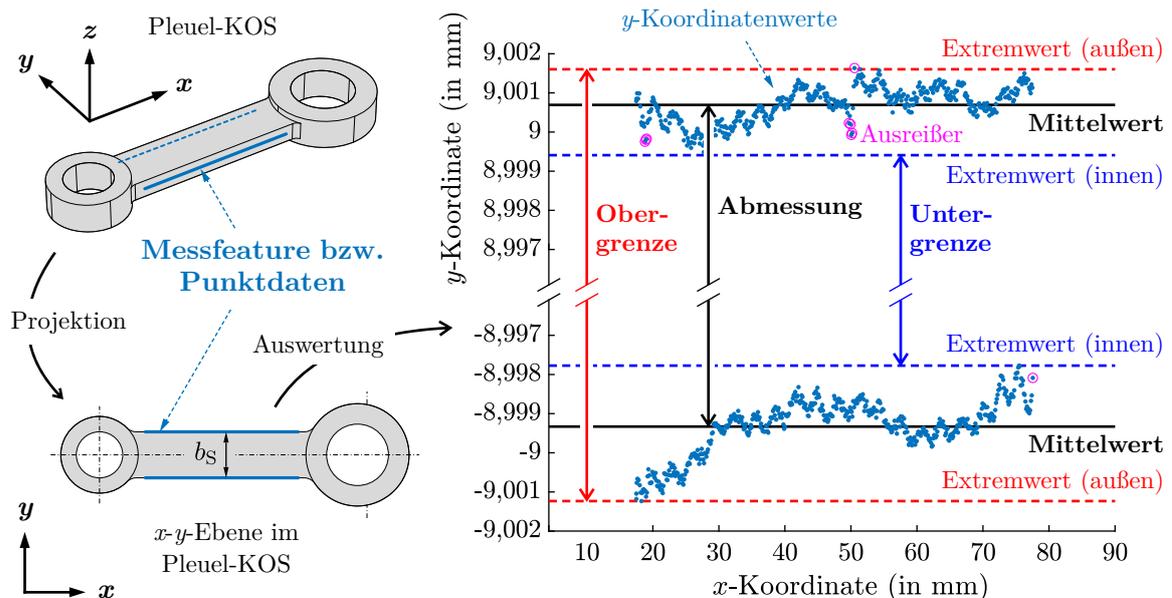


Abb. 5.19: Auswertestrategie zur Bestimmung der geometrischen Abmessungen eines realen Pleuels basierend auf gemessenen 3D-Punktdaten am Beispiel der Stegbreite b_S

Hinsichtlich der Geometrieparameter h_R und h_S wurde vom Grundsatz her analog vorgegangen, wie es zuvor für den Parameter b_S erläutert wurde. Um die Abmessungen bzgl. der Parameter d_{R1} , D_{R1} , d_{R2} und D_{R2} (innere und äußere Durchmesser der Zylinderring-Segmente) zu erhalten, wurde hingegen mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate für jeden dieser Parameter ein einziger Kreis auf Basis der jeweiligen, auf die x - z -Ebene des Pleuel-KOS projizierten Punktdaten geschätzt. Die damit berechneten Kreisdurchmesser entsprachen unmittelbar den gesuchten Abmessungen. Unter Berücksichtigung der ebenfalls geschätzten Kreismittelpunkte wurden ferner minimale und maximale Durchmesserwerte ermittelt, die wieder Unter- und Obergrenzen bzgl. der extrahierten Abmessungen darstellen. Begleitend dazu wurde die funktionelle Bauteillänge l_R anhand des Abstands der in Bezug auf die beiden inneren Zylinderringkonturen berechneten Kreismittelpunkte in x -Richtung bestimmt. Ähnlich wie zuvor beschrieben wurden die Punktdaten vor der Ermittlung der Abmessungen iterativ um Ausreißer bereinigt.

Außer den acht Hauptgeometrieparameter-Abmessungen wurden anhand der Punktdaten pro Teil jeweils sieben Geometriewerte ermittelt, die die **Lageabweichungen** primitiver Geometrielemente zueinander bzw. zum Ursprung des Pleuel-KOS beschreiben. Konkret wurde die Lageverschiebung der äußeren Kontur von Zylinderring-Segment R1 sowohl in x - als auch in y -Richtung bestimmt, wobei für Zylinderring-Segment R2 zwei äquivalente Werte abgeleitet wurden. Außerdem wurden bzgl. der Zylinderring-Segmente zwei Werte ermittelt, die deren Lageverschiebungen in z -Richtung beschreiben. Zusätzlich wurde der Versatz des Steg-Segments in y -Richtung festgestellt.

Die bzgl. der Hauptgeometrieparameter extrahierten Abmessungen wurden einschließlich der Lageabweichungen analysiert. Dabei wurden folgende Charakteristika erkannt, die in Summe zeigen, dass die realen Pleuel eine hohe Fertigungsqualität aufweisen:

- **Zylinderringhöhen** → Die Höhe des Zylinderring-Segments R1 ist im Mittel systematisch um ca. 0,017 mm größer als die des Segments R2, wobei die abgeleiteten Differenzen von Teil zu Teil zwischen 0,014 mm und 0,020 mm schwanken.
- **Maßabweichungen** → Keine der Hauptgeometrieparameter-Abmessungen weicht über das Intervall von $-0,007$ mm bis $+0,013$ mm hinaus vom spezifischen Sollwert laut Tab. 5.2 ab. Dies gilt für alle Pleuel sowie alle Geometrieparameter, sofern die teilespezifisch gemittelten Zylinderringhöhen betrachtet werden.
- **Unter- und Obergrenzen der Maße** → Die anhand der Messdaten abgeleiteten Unter- und Obergrenzen bzgl. der Hauptgeometrieparameter-Abmessungen grenzen die Realgeometrien der Teile ein. Dabei weichen die einzelnen Grenzwerte in jedem Fall um weniger als $\pm 0,02$ mm von den ermittelten Abmessungen ab, hinsichtlich einiger Geometrieparameter sogar wesentlich weniger.
- **Lageabweichungen** → Die Lageabweichungen sind minimal, wobei nur geringere Systematiken erkennbar und die beobachteten Ausprägungen offenbar überwiegend zufällig sind. Die jeweils sieben extrahierten Verschiebungswerte variieren über alle Pleuel betrachtet in Bereichen von kaum mehr als $\pm 0,01$ mm.

Neben den zuvor geschilderten Analysen wurden die **Kantenverrundungen** der Pleuel mittels einer Radienlehre analysiert. Dabei konnten die Radien, von der Vorgabe (3 mm) abweichend, für alle Pleuel auf Werte zwischen 2,5 mm und 2,75 mm eingegrenzt werden. Folglich stellt der arithmetische Mittelwert dieser Werte, also 2,625 mm, einen zweckmäßigen, einheitlichen Schätzwert für sämtliche Ist-Radien dar.

Die **Unsicherheiten** der für die acht Hauptgeometrieparameter messtechnisch erfassten Pleuel-Abmessungen wurden mittels Größtfehlern charakterisiert (vgl. Abschn. 5.2.2.3). Dabei wurde berücksichtigt, dass die extrahierten Maße bereits aufgrund der begrenzten Genauigkeiten der Punktdaten unsicher sind. So ging mit der Temperaturkompensation der Daten eine Unsicherheit für die Position jedes Geometriepunkts und somit auch für die ermittelten Abmessungen einher, die auf höchstens $\pm 2,5 \cdot 10^{-3} \%$ geschätzt wurde. Zudem beträgt die Genauigkeit des Koordinatenmessgeräts im relevanten Temperaturbereich » $1,9 \mu\text{m} + (\text{Längenmaß in mm}/300) \cdot \mu\text{m}$ «. Zur Quantifizierung der mit diesen zwei Aspekten verbundenen Unsicherheiten genügte es, die Steghöhe h_S und die funktionelle Bauteillänge l_R mit Nennwerten von 7 mm bzw. 100 mm zu betrachten, denn diese Werte entsprechen dem kleinsten bzw. dem größten Nennmaß der Pleuel (vgl. Tab. 4.1). Auf Basis dieser Extremwerte lässt sich der auf die Unsicherheit der Punktdaten zurückzuführende Größtfehler einer messtechnisch ermittelten Pleuel-Abmessung, je nach Maß des jeweiligen Geometrieparameters, wie folgt eingrenzen:

- **minimales Maß (ca. 7 mm)** $\rightarrow \pm 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ bzw. $\pm 3,0 \cdot 10^{-2} \%$
- **maximales Maß (ca. 100 mm)** $\rightarrow \pm 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ bzw. $\pm 4,7 \cdot 10^{-3} \%$

Letztlich bringen die Temperaturkompensation und die Gerätegenauigkeit also Unsicherheiten bzgl. der ermittelten Pleuel-Abmessungen mit sich, die höchstens $\pm 0,005 \text{ mm}$ und gleichzeitig nicht mehr als $\pm 0,03 \%$ betragen. Dabei wurden jedoch keine zufälligen Messwertschwankungen berücksichtigt und auch nicht, dass die festgestellten Geometriewerte in gewissem Maße von der Auswertestrategie abhängen können. Vermutlich hätte jedoch auch eine Größtfehlerabschätzung unter Einbeziehung dieser Faktoren ergeben, dass die Unsicherheiten der Abmessungen dennoch auf enge Intervalle von höchstens $\pm 0,01 \text{ mm}$ eingegrenzt werden könnten. Davon ausgehend wurden zusätzlich die geschätzten Unter- und Obergrenzen von höchstens $\pm 0,02 \text{ mm}$ um die ermittelten Abmessungen sowie Lageverschiebungen mit Werten in Bereichen von $\pm 0,01 \text{ mm}$ berücksichtigt. Werden all diese Effekte bzw. die jeweiligen Unsicherheitsbeiträge aufsummiert, lässt sich folgern, dass ein auf der Grundlage messtechnisch bestimmter Abmessungen gemäß dem Geometriemodell nach Abschn. 4.2.1 (z. B. im Rahmen einer FEM-Simulation) idealisiert modelliertes Teil höchstens im Bereich von $\pm 0,03 \text{ mm}$ bis $\pm 0,04 \text{ mm}$ lokal von der tatsächlichen Geometrie abweicht. Vor dem Hintergrund der auf gewisse Bauteilbereiche beschränkten Geometrieabtastung ist aber zu beachten, dass diese Abschätzung rein auf den erfassten Messdaten der realen Pleuel dieser Arbeit beruht.

5.2.7 LDV-Analyse der Pleuel-Eigenmoden

Um ein Verständnis für das tatsächliche Schwingungsverhalten bzw. für die Eigenmoden der realen Pleuel zu erlangen, wurde eines der Pleuel per **Laser-Doppler-Vibrometrie** (LDV, auch Laservibrometrie) untersucht. Die LDV dient der berührungslosen Analyse und der Visualisierung von Schwingungsvorgängen, siehe z. B. [Kut15; Zel09; Pol24]. Sie macht sich zunutze, dass ein Laserstrahl, welcher auf die Oberfläche eines schwingenden Messobjekts auftrifft und von dort zurück reflektiert wird, aufgrund des Doppler-Effekts eine Frequenzverschiebung erfährt. Diese hängt von der in Strahlrichtung gegenwärtigen Schwinggeschwindigkeit ab. Die Ermittlung der Frequenzverschiebung basiert dabei auf der Aufteilung des Laserstrahls in einen Mess- und einen Referenzstrahl. Der vom Messobjekt reflektierte, frequenzverschobene Messstrahl wird nun mit dem Referenzstrahl auf einem Detektor überlagert. Die Auswertung des sich infolge der Überlagerung ausbildenden Interferenzmusters erlaubt dann die Quantifizierung der Schwingung am Messpunkt hinsichtlich der Schwinggeschwindigkeit. Die Bestimmung der Bewegungsrichtung stützt sich dabei auf eine Frequenzverschiebung des Referenzstrahls, die per akusto-optischem Modulator (Bragg-Zelle) eingestellt wird.

In dieser Arbeit wurde ein **3D-Scanning-Vibrometer** des Typs *PSV-400-3D* (Polytec, Waldbronn) mit einer zugehörigen Software in der Version 9.1 genutzt. Dieses System ist durch drei unter verschiedenen Winkeln angeordnete Messköpfe, deren Messlaserstrahlen synchron auf denselben Messpunkt auf einem Messobjekt fokussiert werden, in der Lage, registrierte Schwingungsvorgänge in ein kartesisches Koordinatensystem zurückzuführen und anschließend dreidimensional zu visualisieren. Zudem können die Austrittswinkel der Laserstrahlen über integrierte Spiegel gelenkt werden. Dies ermöglicht das Abrastern der Messobjektoberfläche und damit eine Schwingungsmessung an zahlreichen Messpunkten nacheinander. Das Gerät verfügt über eine auf das Messobjekt gerichtete Kamera, deren Videobild u. a. der Definition von Messpunkten dient.

Mit der o. g. Gerätetechnik wurde das Schwingungsverhalten des **Referenzpleuels R-6** qualitativ untersucht, wobei zusätzlich auch die für die ART-Messungen genutzte Hardware (siehe Abschn. 5.2.9) eingesetzt wurde. Das Teil wurde auf den mit Gummi-Spitzen versehenen ART-Auflagern positioniert. Um eine reproduzierbare Schwingungsanregung sicherzustellen, erfolgte diese mit einem automatisierbaren Impulshammer. Dieser wurde zur optimierten Anregung der verschiedenen Pleuel-Eigenmoden im Rahmen zahlreicher LDV-Messdurchgänge jeweils unterschiedlich positioniert bzw. orientiert. Um dabei eine phasengleiche Datenaufzeichnung an sehr vielen Messpunkten sicherzustellen, wurde der Luftschall, der infolge jeder Impulsanregung des Pleuels abgestrahlt wurde, per Mikrophon registriert. Eine zuvor empirisch festgelegte Mikrofonsignalschwelle wurde schließlich zur Triggerung des LDV-Geräts genutzt. Angesichts der verhältnismäßig starken Impulsanregung wurde das Pleuel mit doppelseitigem Klebeband punktuell an den Auflagern fixiert, um Verschiebungen auf den Auflagern und ein Herunterfallen von diesen zu verhindern.⁵²

⁵²⁾ Die durch das Verkleben des untersuchten Teils an den Auflagern zusätzlich eingebrachte Steifigkeit wurde angesichts der viel höheren Bauteilsteifigkeit als vernachlässigbar eingestuft.

Zudem wurde die Objektoberfläche zur Optimierung der LDV-Signale partiell mit einer Reflektorfolie beklebt.⁵³ Im Videobild der LDV-Software wurden 295 Messpunkte auf der Oberfläche des Teils definiert. In der Gerätesoftware wurde der FFT-Messmodus gewählt, mit dem die erfassten Schwingungsvorgänge unter Annahme harmonischer Schwingungen frequenzabhängig visualisiert werden können. Dabei stellten geeignete Einstellungen der Bandbreite und der Frequenzauflösung eine ausreichende Abdeckung bzw. Auflösung des im Rahmen der Arbeit betrachteten Frequenzbereichs bis ca. 30 kHz sicher.

Abb. 5.20 zeigt das Videobild der LDV-Software. Neben dem untersuchten Teil und den 295 auf dessen Oberfläche definierten Messpunkten sind zudem die Auflager, der Impulshammer in einer der umgesetzten Anordnungen sowie das zur phasengleichen Triggerung verwendete Mikrofon in der Abbildung zu sehen.

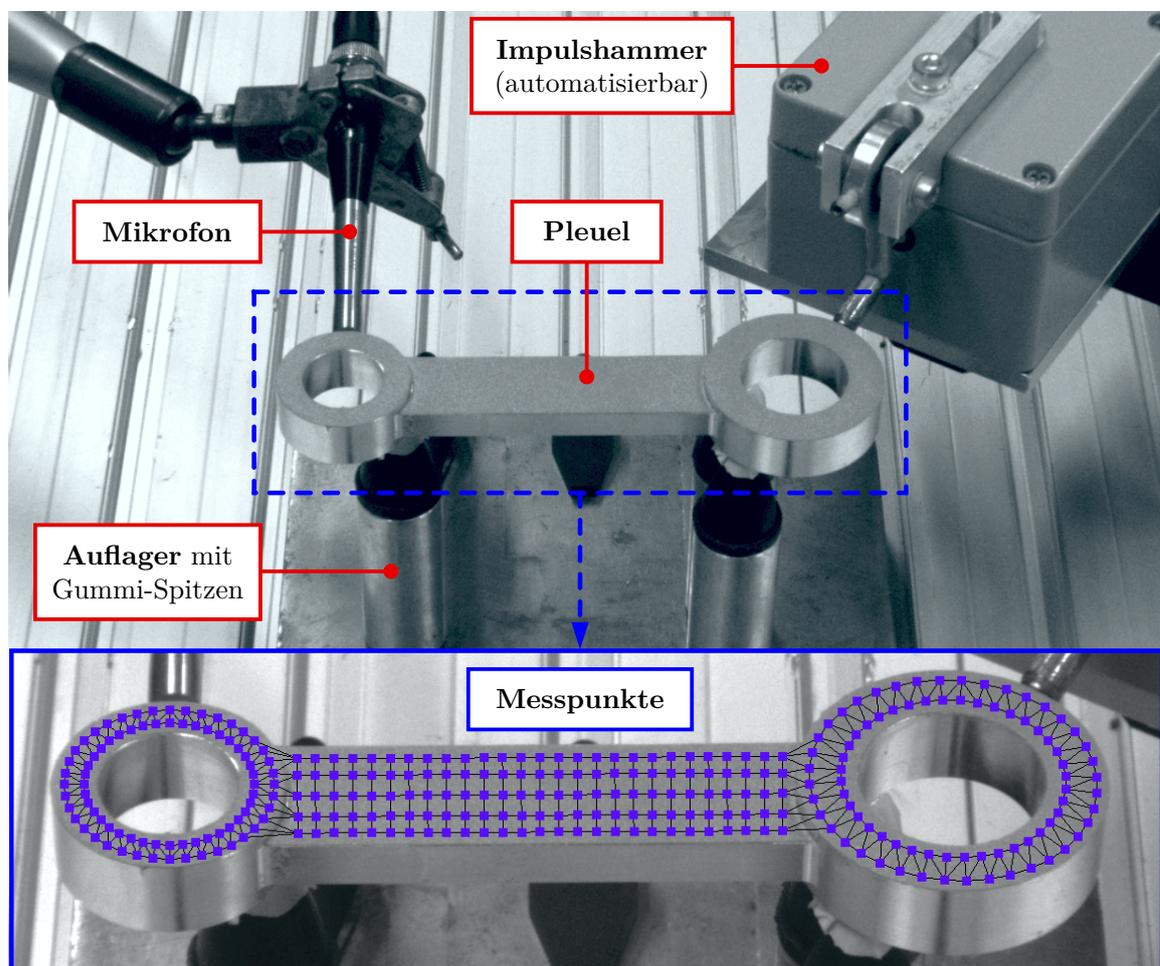


Abb. 5.20: Videobild der LDV-Gerätesoftware mit einer partiellen Abbildung des experimentellen Setups einschließlich der Messpunktanordnung auf dem analysierten Pleuel

⁵³⁾ Störeinflüsse durch die Reflektorfolie auf die Eigenschwingungscharakteristika des analysierten Teils, z. B. durch die zusätzliche Masse der Reflektorfolie, wurden als vernachlässigbar angesehen.

Für das reale Referenzpleuel *R-6* wurden mittels LDV 18 **Eigenmoden** im analysierten Frequenzbereich detektiert. Diese konnten den aus der FEM-Simulation eines virtuellen Pleuels mit Referenzkonfiguration bekannten Schwingungsmoden *Mode-1*, ..., *Mode-18* qualitativ eindeutig zugeordnet werden (vgl. Abschn. 4.3.1 und Anh. B). Abb. 5.21 visualisiert die experimentell erfassten Eigenmoden perspektivisch und farblich verdeutlicht. Dabei ist jeweils eine sehr stark überzeichnete Momentaufnahme der modenspezifischen dynamischen Eigenschwingungsverformung des untersuchten Pleuels gegenüber der mit schwarzen Linien gekennzeichneten Ruhelage gezeigt. Die zu den Messpunkten aus den LDV-Messsignalen extrahierten Schwingungsauslenkungen bzw. Verschiebungen wurden für die Darstellungen mit einem in der LDV-Gerätesoftware integrierten Filter geglättet und dazwischenliegende Bereiche interpoliert.

Aus der qualitativ guten **Übereinstimmung** zwischen den messtechnisch mittels LDV erkannten Schwingungsformen und den FEM-simulierten Pleuel-Eigenmoden lassen sich die folgenden hilfreichen Rückschlüsse ableiten:

- **Praktische Zugänglichkeit** → Im relevanten Frequenzbereich bis rund 30 kHz können potentiell alle Eigenmoden und -frequenzen eines maschinell hergestellten realen Pleuels angeregt und messtechnisch erfasst werden.
- **Plausibilität der FEM-Simulationsdaten** → Die für die FEM-Berechnungen eingesetzte Software COMSOL® bzw. die gewählte Vorgehensweise ermöglicht die Erzeugung von qualitativ realitätsgetreuen Simulationsdaten.

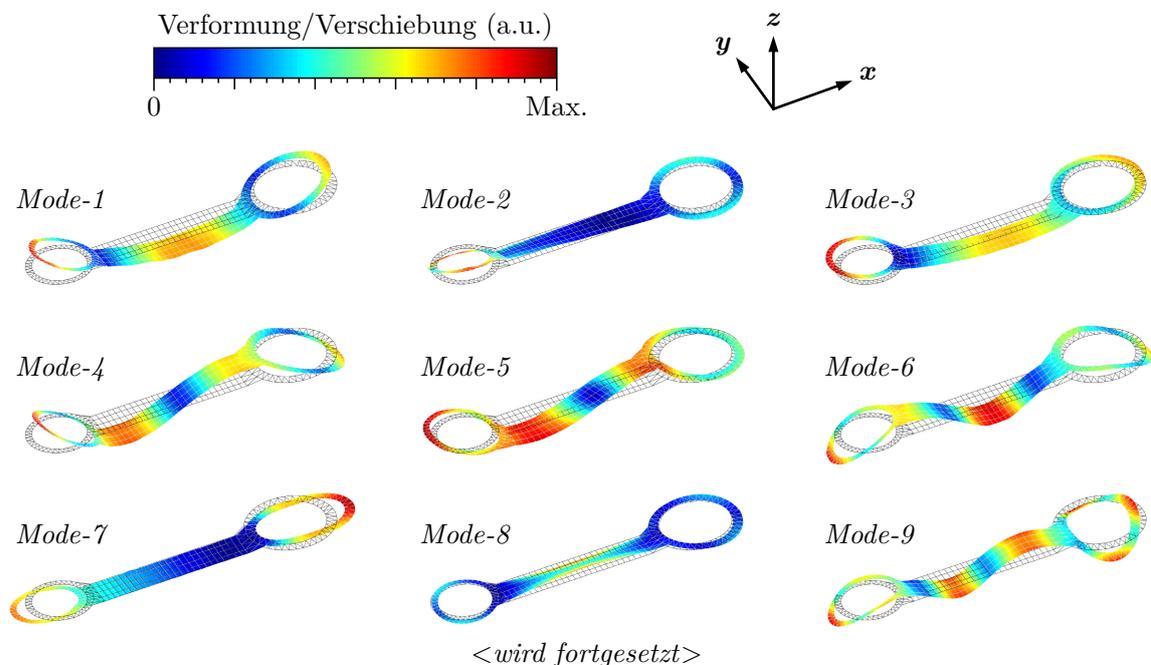


Abb. 5.21: Eigenschwingungsformen *Mode-1*, ..., *Mode-18* eines Pleuels auf Basis einer experimentellen LDV-Analyse des realen Referenzpleuels *R-6*

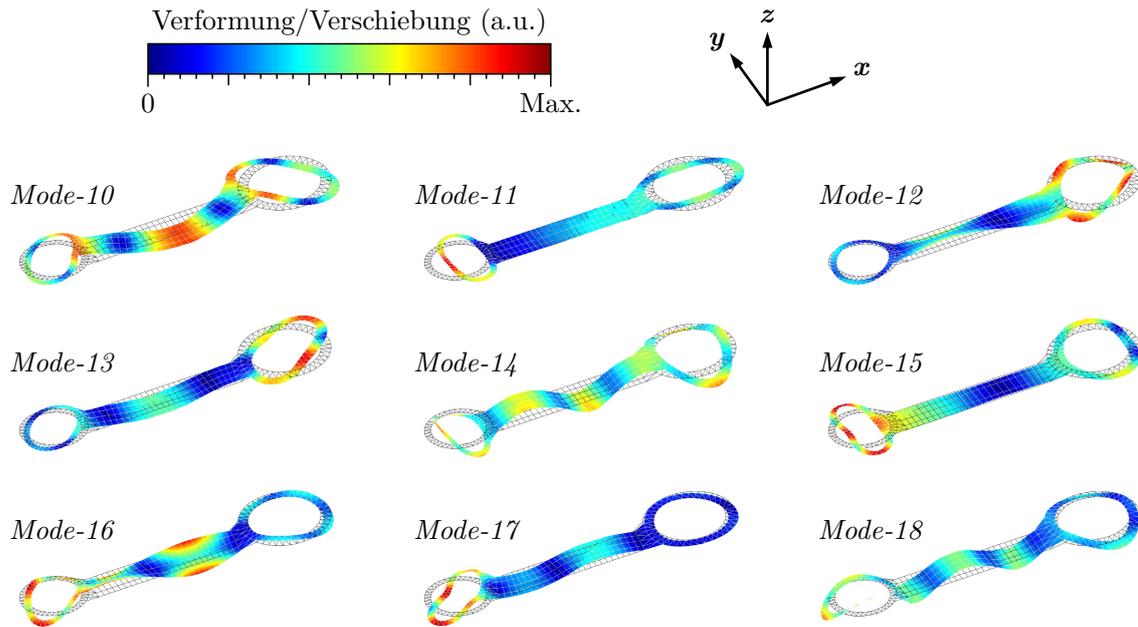


Abb. 5.21: Eigenschwingungsformen *Mode-1*, ..., *Mode-18* eines Pleuels auf Basis einer experimentellen LDV-Analyse des realen Referenzpleuels *R-6* <Fortsetzung>

5.2.8 FEM-Eigenfrequenzsimulationen für die Pleuel

Die **theoretischen Eigenfrequenzen** der realen Pleuel wurden per FEM quantifiziert. Hierzu wurden digitale Zwillinge aller realen Referenz- und Validierpleuel modelliert, die die gefertigten Teile abbilden und deren Eigenfrequenzen (Merkmale f_1 bis f_{18}) berechnet wurden. Für diese FEM-Simulationen wurde wieder die Software COMSOL[®] mit den in Abschn. 5.1.2 beschriebenen Einstellungen eingesetzt.

Die realen Pleuel bzw. deren digitale Zwillinge wurden unter Berücksichtigung derselben **Idealisierungen** modelliert und FEM-simuliert, denen auch die virtuellen Pleuel unterliegen (vgl. Abschn. 5.1.1). Folglich wurden Geometrien ohne Form-/Lageabweichungen und mit 3-mm-Kantenverrundungen aufgebaut. Dabei wurden für die Abmessungen der acht Hauptgeometrieparameter jeweils die teilespezifischen Geometriewerte entsprechend der Geometrievermessung (siehe Abschn. 5.2.6) berücksichtigt, sodass jedes FEM-Modell individuelle, geringfügig unterschiedliche geometrische Maße aufweist. Dies gilt auch für die zwei Zylinderring-Segmente pro Teil, denen aber jeweils der einheitliche Wert für die Zylinderringhöhe zugewiesen wurde, der im Rahmen der geometrischen Vermessung des jeweiligen Teils über die beiden separat vermessenen Zylinderringhöhen gemittelt wurde. In Bezug auf das Material wurden standardmäßig die Kennwerte des isotropen Referenzmaterials (siehe Abschn. 4.2.2) genutzt. Hinsichtlich der Validierpleuel mit eing Bohrten Defekten wurden sowohl die IO- als auch sämtliche NIO-Zustände mit den Defektgrößen zwischen 1 mm und 3 mm bei den Simulationen berücksichtigt.

5.2.9 ART-Eigenfrequenzmessungen an den Pleueln

Die **Eigenfrequenzen** der realen Pleuel bzgl. der relevanten Merkmale f_1 bis f_{18} wurden messtechnisch per ART ermittelt. Die Frequenzen der Teile mit im Verlauf eing Bohrten Defekten wurden dabei qualitätsabhängig bestimmt (d. h. sowohl in den IO- als auch in den NIO-Zuständen mit den fünf verschiedenen Defektgrößen zwischen 1 mm und 3 mm). Grundsätzlich wurde zur ART-Datenerfassung eine kurze impulshafte Schwingungsanregung vorgenommen, woraufhin die Schwingungsantwort indirekt über den abgestrahlten Luftschall registriert wurde (Klangprüfung, siehe Kap. 1).

Die **Schwingungsanregung** erfolgte händisch mit einem Impulshammer, der aus einem Kabelbinder mit einer angeklebten (und als Hammerkopf dienenden) 4-mm-Keramik kugel besteht. Dieser manuelle Ansatz fokussierte auf eine variable Schwingungsanregung der Teile an mehreren Stellen bzw. mit verschiedenen Orientierungen. Zur **Signalerfassung** wurde ein 1/4"-Freifeld-Mikrofon des Typs *MI17* (AVM Mess- u. Prüfgeräte für Akustik und Vibration, Büttelborn) genutzt. Dessen Frequenzbereich reicht laut Datenblatt von 20 Hz bis 20 kHz, wobei Tests aber zeigten, dass auch Signale bzw. Frequenzen oberhalb von 30 kHz mit noch ausreichender Signalstärke registrierbar sind. Außerdem wurde zur Datenaufnahme ein **ART-Prüfsystem** des Typs *SigTestBox* (RTE Akustik + Prüftechnik, Pfnztal) inklusive PC mit der zugehörigen Prüfsoftware *SonicTC* in der Version 4.9 eingesetzt, woran das Mikrofon angeschlossen wurde. Mittels dieser Software wurde u. a. die Datenerfassung parametrisiert und aufgezeichnete Daten wurden exportiert, wobei die weiterführende Datenverarbeitung in der Software MATLAB[®] erfolgte.

Abb. 5.22 zeigt den grundlegenden **ART-Aufbau**. Zur Messdurchführung wurde das zu analysierende Pleuel auf drei mit Gummi-Spitzen versehenen Auflagern platziert, die auf der Grundplatte des Prüfsystems arretiert waren. Jede ART-Messung umfasste im Detail 18 unmittelbar aufeinanderfolgende **ART-Einzelmessungen**. Das heißt, das analysierte Pleuel wurde in Summe 18-mal mit dem Impulshammer angeregt, wobei unterschiedliche Impulsanregungen realisiert wurden, die sich bezüglich Position und Orientierung unterschieden. Durch die Einzelmessungen bzw. die verschiedenen dabei umgesetzten Impulsanregungen wurde sichergestellt, dass alle relevanten Eigenfrequenzen bzw. Eigenmoden, die durch spezifische Verformungen in verschiedene Richtungen sowie charakteristische Schwingungsknoten und -bäuche gekennzeichnet sind, experimentell zugänglich waren.⁵⁴ Die mithilfe des Mikrofons registrierten Schwingungsantworten wurden digitalisiert und als 18 einzelne Zeitsignale abgespeichert. Dazu wurde im Vorfeld der Messkampagne empirisch eine geeignete Ausrichtung für das Mikrofon ermittelt, die als Kompromisslösung allen relevanten Eigenschwingungsformen mit ihren jeweils individuellen Schallabstrahlcharakteristika gerecht werden sollte.

⁵⁴) Dass auf 18 Pleuel-Eigenfrequenzen abgezielt wurde und bei den ART-Messungen ebenso viele Einzelmessungen bzw. unterschiedliche Anregungen durchgeführt wurden, hat keinen kausalen Zusammenhang. Theoretisch wäre eine geringere Vielfalt bei der experimentellen Durchführung ausreichend gewesen, um die 18 relevanten Eigenfrequenzen zu erfassen, jedoch wurde u. a. für den Fall einer vereinzelt schlechten Datenqualität auf redundante Daten abgezielt.

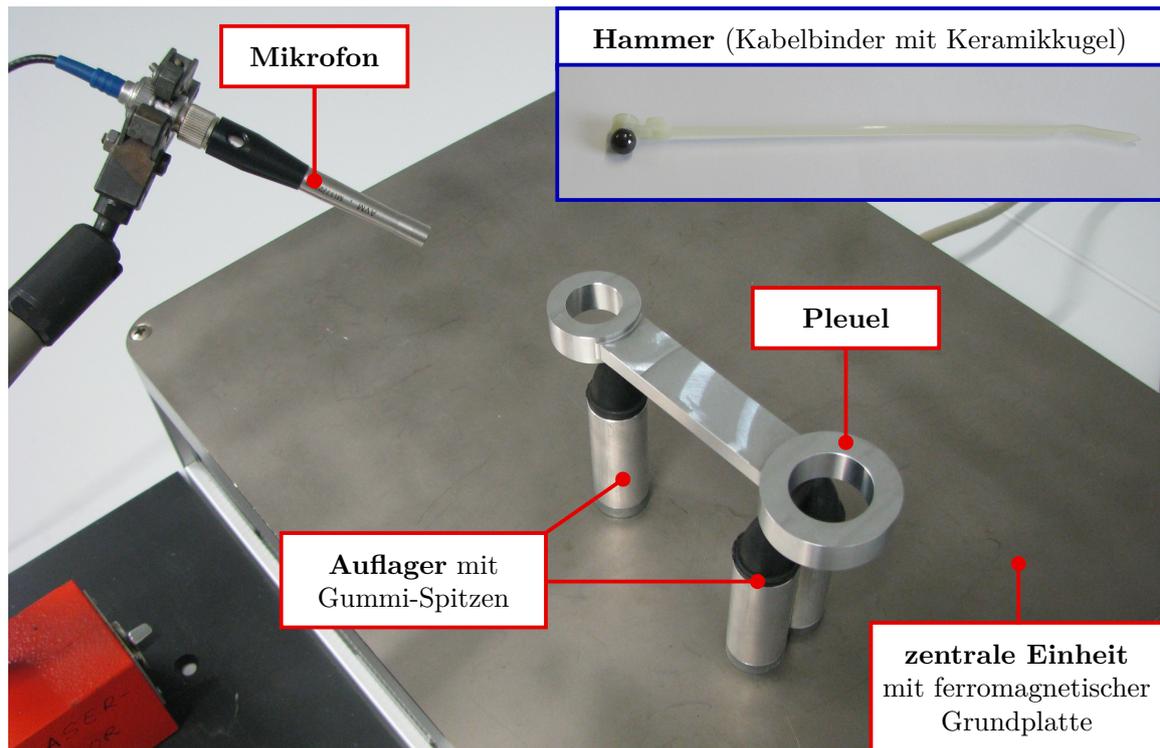


Abb. 5.22: Experimenteller ART-Messaufbau mit den wesentlichen Hardwarekomponenten

Abb. 5.23 skizziert die Auflagerpunkte und die Positionierung des Mikrofons. Zudem ist dargestellt, an welchen Stellen und mit welchen Orientierungen die **Impulsanregungen** vorgenommen wurden. So umfasste jede ART-Messung an einem Pleuel insgesamt neun Einzelmessungen, bei denen die Anregung an verschiedenen Positionen der Zylinderring-Segmente bzw. des Steg-Segments in Richtung der z -Achse des Pleuel-KOS durchgeführt wurde. Bei den weiteren neun Einzelmessungen fand die Anregung danach senkrecht zur z -Koordinatenachse statt, also entweder in x -Richtung, in y -Richtung oder unter ca. 45° zu diesen. Das jeweilige Teil wurde dabei an den äußeren Mantelflächen der Zylinderring-Segmente bzw. an einer Seitenfläche des Steg-Segments angeschlagen.

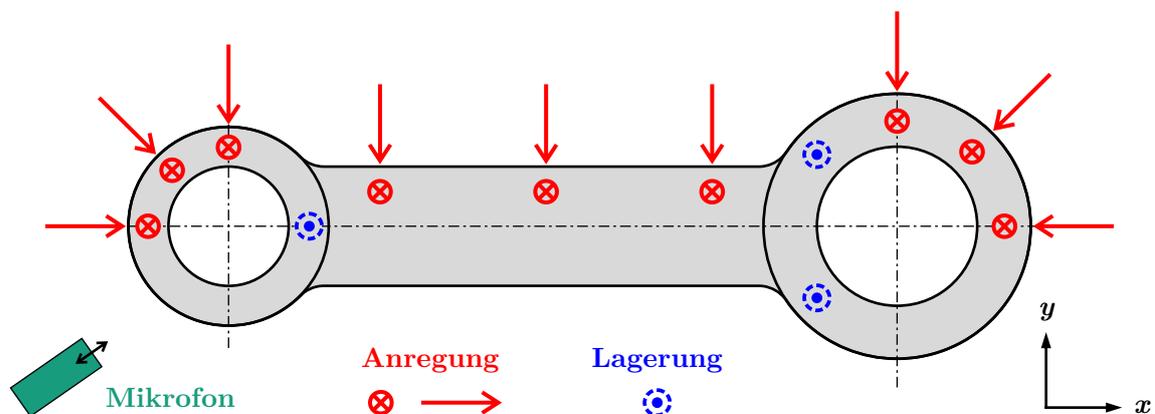


Abb. 5.23: Positionen und Orientierungen für die manuelle ART-Impulsanregung der realen Pleuel per Impulshammer (zudem sind die Auflagerpunkte und das Mikrophon skizziert)

Bei jeder ART-Einzelmessung wurde das Mikrofonsignal über eine Aufnahmedauer von 1000 ms mit einer Samplerate von 100 kS/s digitalisiert. Die Signaltriggerung erfolgte auf Basis einer geeigneten Signalschwelle so, dass die Datenaufnahme unmittelbar nach der Schwingungsanregung (bzw. nachdem der emittierte Schall das Mikrofon erreicht hatte) startete. Aus dem aufgezeichneten **Zeitsignal** wurde mit der MATLAB[®]-Funktion `fft` (»fast Fourier transform«) ein **FFT-Spektrum**⁵⁵ berechnet, welches entsprechend der Samplerate und des Abtasttheorems bis zur maximalen Frequenz von 50 kHz reicht. Im Spektrum ist der von der Anregungsposition sowie -orientierung abhängige Frequenzinhalt des jeweiligen Zeitsignals aufgelöst, wobei dominante Frequenzen, also insbesondere die Eigenfrequenzen des jeweiligen Teils, in Form ausgeprägter Überhöhungen bzw. **Peaks** erkennbar sind. Im Vorfeld der FFT wurde das Zeitsignal mit dem Ziel einer interpolationsartig verbesserten Frequenzauflösung durch das Anhängen von Nullen so erweitert, dass die Anzahl der Signalpunkte danach einer Zweierpotenz entsprach und gleichzeitig eine spektrale Frequenzauflösung von stets etwas weniger als 0,1 Hz erreicht wurde. Die 18 zusammengehörigen FFT-Einzelspektren, die sich anhand der 18 Zeitsignale aus den aufeinanderfolgenden ART-Einzelmessungen an einem Pleuel ergaben, wurden dann zu einem gemittelten FFT-Spektrum zusammengeführt. Um zu gewährleisten, dass hierbei kein Einzelspektrum einen unproportional hohen bzw. niedrigen Beitrag lieferte, wurde jedes Spektrum zuvor auf den maximalen Amplitudenwert normiert.

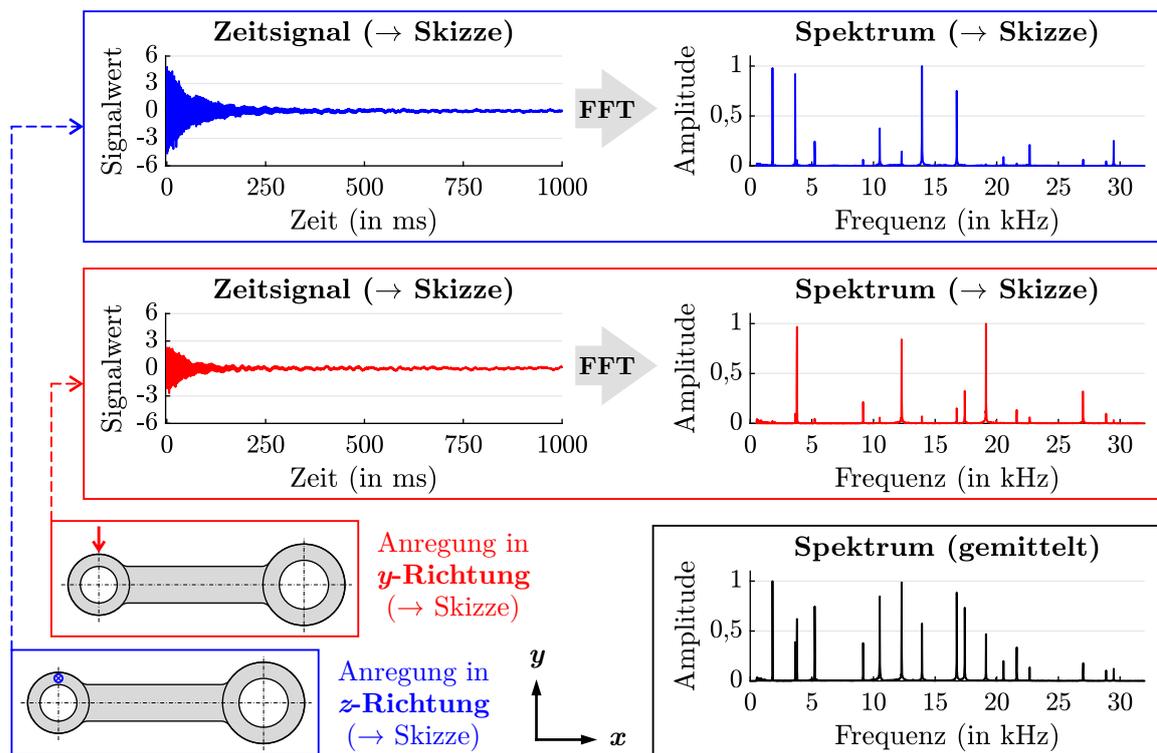


Abb. 5.24: Zeitsignale (links) und FFT-Spektren (rechts) aus zwei ART-Einzelmessungen am realen Referenzpleuel *R-1* je nach vorgenommener Impulsanregung (→ Skizzen) sowie über 18 ART-Einzelmessungen gemitteltes Spektrum (rechts unten)

⁵⁵) FFT → *fast Fourier transform*, dt.: schnelle Fourier-Transformation

Abb. 5.24 stellt ART-Daten am Beispiel des Referenzpleuels *R-1* dar. Abgebildet sind die Zeitsignale aus zwei ART-Einzelmessungen mit unterschiedlich ausgeführten Anregungen sowie die daraus berechneten FFT-Einzelspektren. Daneben ist das finale FFT-Spektrum gezeigt, das über die 18 Einzelmessungen an dem Teil gemittelt wurde und das somit auf allen zuvor erläuterten Anregepositionen und -orientierungen beruht. Anhand der beiden Einzelspektren ist der mit der Impulsanregung variierende Frequenzinhalt der Signale zu sehen, womit einhergeht, dass sich einige Peaks bzw. Eigenfrequenzen kaum vom Grundrauschen abheben. Hingegen sind im gemittelten Spektrum alle erwarteten Eigenfrequenzen als deutliche Peaks zu erkennen (einige Peaks liegen paarweise so dicht beieinander, dass sie nur in einer Detaildarstellung visuell separierbar sind).

Bei der Datenanalyse war die Extraktion der Eigenfrequenzen aus den gemittelten FFT-Spektren sowie speziell deren Zuordnung zu den Eigenfrequenzmerkmalen f_1 bis f_{18} bzw. zu den Schwingungsformen *Mode-1* bis *Mode-18* von besonderer Wichtigkeit. Schließlich unterliegen die realen Pleuel (wie die virtuellen Teile) eventuellen Modenvertauschungen (vgl. S. 54 in Abschn. 4.3.1). Als Grundlage für die **Eigenfrequenzextraktion** und die **Modenidentifizierung**, also zwecks Zuordnung von Peaks bzw. Frequenzwerten zu den Pleuel-Eigenfrequenzmerkmalen und Eigenmoden, wurde eines der Referenzpleuel näher analysiert. Die 18 maßgeblichen Eigenfrequenzen dieses Teils wurden manuell aus einem gemittelten FFT-Spektrum des Teils ausgelesen und identifiziert. Die notwendige Identifizierung wurde dabei primär durch den Vergleich der ART-gemessenen Frequenzen mit FEM-simulierten Frequenzwerten (siehe Abschn. 5.2.8) erreicht, für die die zugehörigen Schwingungsformen bekannt sind. In Bezug auf vereinzelt sehr dicht zusammenliegende Peaks erfolgte die Modenidentifizierung final durch eine geeignete vergleichende Analyse der Einzelspektren (siehe hierzu folgende Absätze). Auf Basis der identifizierten experimentellen Eigenfrequenzwerte des Referenzpleuels und der zugehörigen Simulationswerte wurden schließlich vorläufige Korrekturfaktoren für die Anpassung von FEM-simulierten an ART-gemessene Eigenfrequenzen realer Pleuel berechnet.

Die vorläufigen Korrekturfaktoren wurden anschließend im Kontext der automatisierten Eigenfrequenzextraktion und Modenidentifizierung für die anderen realen Pleuel genutzt. Dabei wurden zu jedem gemittelten FFT-Spektrum außerdem – unter Berücksichtigung des analysierten Teils einschließlich eines möglichen NIO-Zustands – die teilespezifischen FEM-Simulationsdaten (siehe Abschn. 5.2.8) herangezogen. Im Zuge der entsprechenden Analysen wurden die FEM-berechneten Eigenfrequenzen zuallererst mit den vorläufigen Korrekturfaktoren multipliziert. Um die faktoriell angepassten Simulationswerte wurden danach Suchfenster mit Breiten von je $\pm 1\%$ im gemittelten FFT-Spektrum aufgespannt, wobei benachbarte Fenster im Fall einer Überlappung kombiniert wurden. Anschließend konnten die gesuchten experimentellen Eigenfrequenzwerte aus dem Spektrum extrahiert und zugewiesen werden, wozu die MATLAB[®]-Funktion `findpeaks` (»find local maxima«) verwendet wurde. Sofern in einem Fenster nur eine einzige Eigenfrequenz gesucht wurde, handelte es sich bei dem zu ermittelnden Frequenzwert um die Frequenz mit dem maximalen Amplitudenwert im analysierten Frequenzbereich. Dieser wurde dann demjenigen Eigenfrequenzmerkmal bzw. der Eigenmode zugeordnet, die, basierend auf den jeweiligen

FEM-Daten mit bekannten Eigenmoden, der Definition des Suchfensters diene. Wurden in einem Fenster jedoch mehrere Peaks erwartet, so wurde die Funktion `findpeaks` mit zielführenden Nebenbedingungen parametrisiert (u. a. Peak-Mindesthöhe/Mindestabstand). Allerdings mussten danach die (in dem Fall mehreren) extrahierten Frequenzwerte noch jeweils einem der 18 Eigenfrequenzmerkmale bzw. einer Pleuel-Eigenmode entsprechend den FEM-Daten zugeordnet werden, auf deren Basis das (kombinierte) Suchfenster festgelegt wurde. Dahingehend wurde der jeweilige Frequenzbereich der FFT-Einzelspektren hinsichtlich der Amplituden in Abhängigkeit der zur ART-Datenaufnahme verwendeten Anregepositionen und -orientierungen analysiert. Je nachdem, ob eine der in Frage kommenden Pleuel-Eigenmoden an einer zur Anregung berücksichtigten Stelle eine deutliche Auslenkung in die entsprechende Richtung aufweist oder nicht, konnte eine zu klassifizierende experimentelle Eigenfrequenz ebendieser Eigenmode bzw. dem jeweiligen Merkmal zugeordnet werden oder die Zugehörigkeit ließ sich ausschließen.⁵⁶

Abb. 5.25 skizziert das auf der vergleichenden Auswertung der Amplitudenwerte aus den FFT-Einzelspektren basierende Prinzip der Modenidentifizierung. Hierzu sind zwei Peaks visualisiert, die in den Einzelspektren, abhängig von der Ausführung der Impulsanregung, mit jeweils individuellen Amplituden zu sehen sind. Diesen Peaks sind die Eigenfrequenzmerkmale f_2 und f_3 bzw. die Pleuel-Eigenmoden *Mode-2* und *Mode-3* zuzuordnen, jedoch mit anfänglich unklarer Detailzuordnung. Unter Beachtung der umgesetzten Anregungen in y - bzw. in z -Richtung und den jeweiligen Schwingungsformen – bei *Mode-2* handelt es sich um eine Torsionsmode mit primären Auslenkungen in z -Richtung, während *Mode-3* eine y -Biegemode mit signifikanten Verformungen in y -Richtung ist – wurden die in der Abbildung angegebenen Zuordnungen vorgenommen.

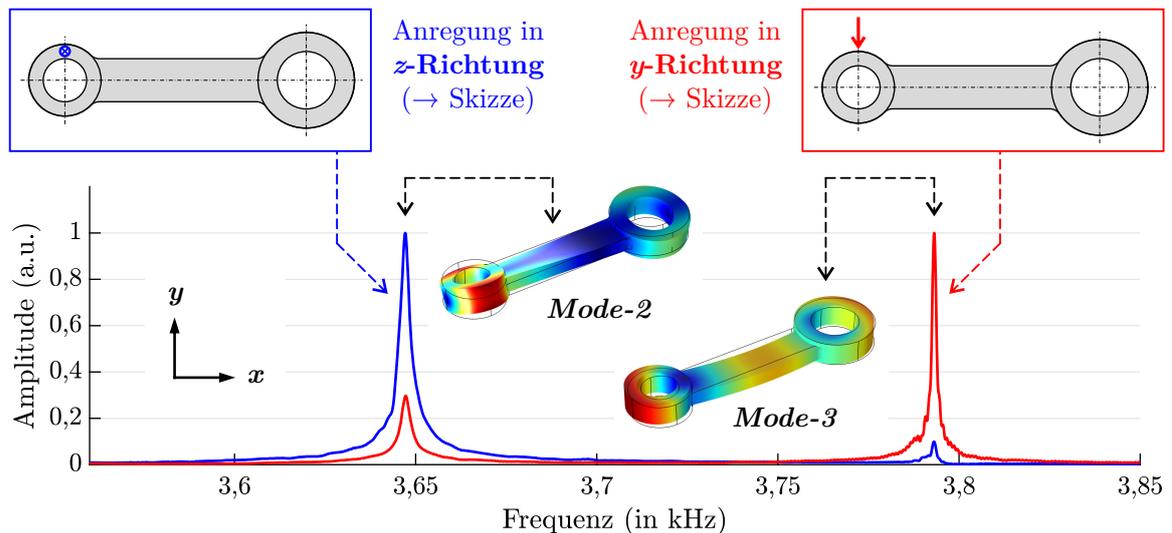


Abb. 5.25: Prinzip zur Modenidentifizierung für ART-gemessene Pleuel-Eigenfrequenzen auf Basis vergleichender Analysen der Amplitudenwerte aus den FFT-Einzelspektren

⁵⁶⁾ Für den seltenen Fall, dass zwar zwei Peaks in einem Fenster gesucht wurden, aber nur ein einzelner Peak erkennbar war, wurde der identische Frequenzwert doppelt zugewiesen. Es musste davon ausgegangen werden, dass sich die Peaks bei einem nahezu identischen Frequenzwert überlagern.

Im Rahmen von insgesamt **45 Messreihen** wurden wiederholt Eigenschwingungsdaten mittels ART an den realen Pleueln erfasst. Im Verlauf wurden die Durchgangsbohrungs-Defekte in die Validierpleuel *V-1* bis *V-7* sowie *V-13* bis *V-19* gebohrt und schrittweise vergrößert. Diesbezüglich wurde durch die (pro Qualitätszustand mehrmalig wiederholte) Datenerfassung sichergestellt, dass alle notwendigen Daten generiert wurden, da frühere Zustände ohne Fehler bzw. mit kleineren Defektgrößen später nicht mehr nachgemessen werden konnten. Wenngleich aus Gründen des Umfangs nicht jedes der Teile in allen 45 Messdurchgängen berücksichtigt wurde, wurden die Eigenfrequenzen der Referenzpleuel *R-1* bis *R-5* zweimal pro Messreihe erfasst, was auf einen erhöhten Datenumfang zwecks statistischer Analysen abzielte. Tab. 5.5 listet auf, wie viele ART-Messungen pro Pleuel bzw. pro Qualitätszustand durchgeführt wurden.

Tab. 5.5: Anzahl der ART-Messungen an den Pleueln in Abhängigkeit vom Qualitätszustand bzw. vom Durchmesser eines ggf. eingebrachten Durchgangsbohrungs-Defekts

Pleuel	Anzahl der ART-Messungen in Abhängigkeit vom Qualitätszustand (IO/NIO bzw. Defektgröße)					
	IO	NIO				
	(0 mm)	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	3 mm
Referenzpleuel <i>R-1</i> bis <i>R-5</i>	90	–	–	–	–	–
Validierpleuel <i>V-1</i> bis <i>V-7</i>	10	7	7	7	7	7
Validierpleuel <i>V-8</i> bis <i>V-12</i>	20	–	–	–	–	–
Validierpleuel <i>V-13</i> bis <i>V-19</i>	10	7	7	7	7	7
Validierpleuel <i>V-20</i> bis <i>V-24</i>	20	–	–	–	–	–

Begleitend zu den ART-Messungen wurde die **Pleuel-Temperatur** indirekt anhand der Lufttemperatur gemessen, wobei Temperaturen zwischen 19,5 °C und 22 °C protokolliert wurden. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Ist-Temperatur wurden die experimentell bestimmten Eigenfrequenzen der realen Pleuel schließlich rechnerisch auf die Bezugstemperatur von 20 °C korrigiert, wozu experimentelle Eigenfrequenz-Temperaturkoeffizienten mit modenspezifischen Werten zwischen ca. $-2,52 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ und $-2,86 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ verwendet wurden (vgl. Abschn. 5.2.2.1). Zuletzt wurden die mehrfach gemessenen Eigenfrequenzen sowohl teile- als auch modenspezifisch (und separat unter Berücksichtigung der jeweils sechs Qualitätszustände der Validierpleuel mit eingebrachten Defekten) gemittelt, wobei Ausreißer vor der Bildung der Mittelwerte entfernt wurden (vgl. Abschn. 5.2.2.2). Letztlich resultierte zu jedem realen Pleuel und pro Qualitätszustand/Defektgröße genau ein Satz bestehend aus 18 in Bezug auf die relevanten Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} messtechnisch per ART ermittelten Frequenzwerten.

Die **Unsicherheiten** der ART-gemessenen Frequenzdaten wurden mittels Größtfehlern quantifiziert, wobei die Fehler separat für jedes Pleuel bzw. jeden Qualitätszustand und jedes Eigenfrequenzmerkmal ermittelt wurden (vgl. Abschn. 5.2.2.3). Dabei wurden stets

drei Größtfehlerkomponenten additiv kombiniert. Im Detail wurden neben den Unsicherheiten infolge der Temperaturkompensationen auch die statistischen Unsicherheiten der aus den wiederholt erfassten Eigenfrequenzen gebildeten Mittelwerte einbezogen. Zudem wurde berücksichtigt, dass die Frequenzwerte aufgrund der Frequenzauflösung der FFT-Spektren von etwa 0,1 Hz nur in ebensolchen diskreten Abstufungen aus den Messdaten extrahiert werden konnten. Abb. 5.26 gibt die ermittelten Größtfehler für die 18 betrachteten Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} am Beispiel der fünf Referenzpleuel $R-1$ bis $R-5$ an, wobei die dargestellten Werte über die fünf Teile gemittelt wurden. Zu erkennen ist, dass die **Größtfehler** der anhand der Referenzpleuel per ART erfassten Eigenfrequenzwerte in prozentualen Größenordnungen von ca. $\pm 0,016\%$ (Merkmal f_{17}) bis $\pm 0,021\%$ (Merkmal f_1) liegen. Zwar wurden für die Validierpleuel etwas größere Fehlerwerte ermittelt, die jedoch maximal das Anderthalbfache der in Abb. 5.26 angegebenen Größtfehler betragen (was v. a. auf den geringeren Stichprobenumfang und die damit etwas höheren statistischen Unsicherheiten zurückzuführen ist).

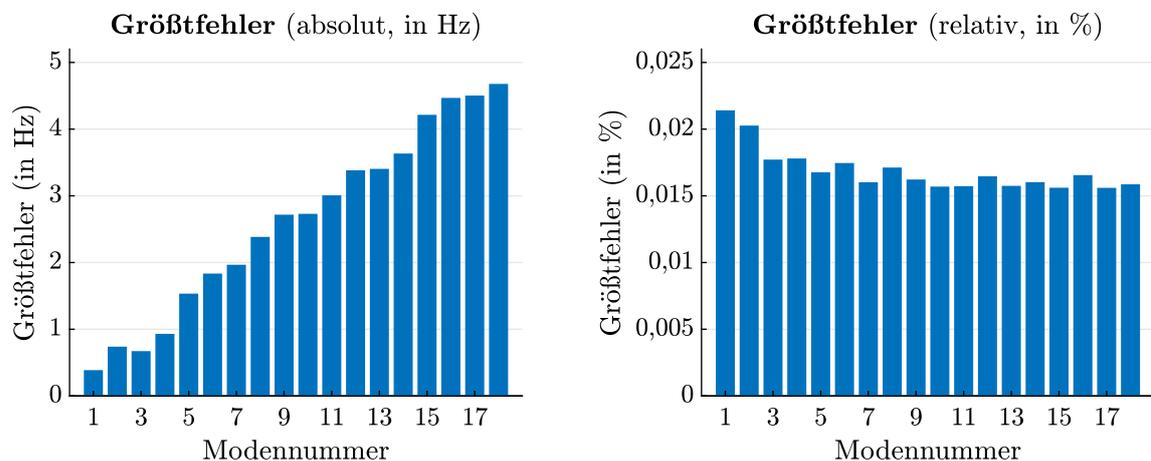


Abb. 5.26: Größtfehler der ART-gemessenen Eigenfrequenzen der fünf realen Referenzpleuel $R-1$ bis $R-5$ in Abhängigkeit von der Modennummer (gemittelte Fehlerwerte)

In Anbetracht der zentralen Rolle der ART-gemessenen Pleuel-Eigenfrequenzen für diese Arbeit wird abschließend betont, dass in die Berechnungen der Größtfehler ausschließlich die drei zuvor genannten Unsicherheitsbeiträge eingeflossen sind. Grundsätzlich ist nicht auszuschließen, dass sich weitere Faktoren wie das messtechnische Prinzip, die genutzte Gerätetechnik oder die Datenauswertestrategie in gewissem Maße in den per ART ermittelten Eigenfrequenzwerten widerspiegeln, und zwar möglicherweise systematisch. Dahingehende Analysen wurden allerdings nicht durchgeführt, da die entsprechenden Einflussfaktoren ohnehin nicht ohne Weiteres quantifizierbar gewesen wären. Dabei ist ferner zu beachten, dass die aus den gemessenen Schwingungssignalen extrahierten Frequenzwerte die Schwingungseigenschaften der realen Pleuel auf Basis modellhafter Annahmen, z. B. linearer, harmonischer Schwingungen, beschreiben. Das reale Eigenschwingungsverhalten der Teile mit ggf. geringfügig nichtlinearen Charakteristika wird durch die Eigenfrequenzwerte folglich genau genommen nur näherungsweise bzw. idealisiert abgebildet, was auch im Hinblick auf die o. g. Größtfehler zu bedenken ist.

5.3 Simulierte vs. gemessene Eigenfrequenzen

5.3.1 Frequenzabweichungen und mögliche Ursachen

Ein zentraler Punkt bei der Generierung synthetischer ART-Trainingsdaten im Rahmen der Konzeptdemonstration war die notwendige **Transformation** der simulationsbasiert erzeugten Daten aus der »Simulationswelt« in die »Messwelt«. So wäre die Applikation eines direkt auf Basis der synthetischen Daten der virtuellen Trainingspleuel ermittelten Klassifikators auf die abschließend zu bewertenden realen Validierpleuel von vornherein zum Scheitern verurteilt gewesen. Die Ursache hierfür ist, dass sich die virtuellen Pleuel (vgl. Abschn. 5.1) und die realen Pleuel (vgl. Abschn. 5.2) in mehreren Aspekten unterscheiden. Dabei betreffen die Unterschiede speziell auch die Eigenfrequenzen der Pleuel, sodass grundsätzliche, charakteristische Abweichungen zwischen den FEM-berechneten Eigenfrequenzen virtueller und den ART-gemessenen Frequenzen realer Pleuel zu erwarten waren. Unter anderem gilt für die verschiedenartigen Teile Folgendes:

- **Virtuelle Pleuel** → Die Eigenfrequenzen der virtuellen Pleuel wurden auf Basis idealisierter Geometrien sowie isotroper Materialeigenschaften per FEM berechnet. Bei diesen simulierten Frequenzwerten handelt es sich um systematisch fehlerhafte Näherungslösungen, wobei die FEM-Berechnungen zudem unter Vernachlässigung von Dämpfung erfolgten und die virtuellen Teile frei modelliert wurden, d. h. ohne äußere Einschränkungen oder Kräfte.
- **Reale Pleuel** → Die Ist-Geometrien der realen Teile weichen aufgrund von Fertigungseinflüssen gegenüber ihren idealisierten Sollgeometrien ab. Die Materialeigenschaften der Pleuel konnten lediglich indirekt über die Werkstoffauswahl eingestellt werden. Annahmen wie ein homogenes sowie von Teil zu Teil einheitliches Material gelten genau genommen nur annähernd. Außerdem wurde das Material experimentell als eindeutig anisotrop charakterisiert. Jegliche messtechnische Quantifizierung der Teile unterlag experimentellen Zufalls- und Störeinflüssen. Temperatureinflüsse wurden zwar rechnerisch korrigiert, was allerdings u. a. durch die Genauigkeit der Temperaturbestimmung limitiert wurde. Die Eigenfrequenzen der realen Pleuel, in denen sich alle diese Charakteristika widerspiegeln, wurden mittels ART, und zwar in der Variante der Klangprüfung, erfasst. Gewisse Einflüsse des Messprinzips, der Gerätetechnik oder des experimentellen Setups auf die extrahierten Frequenzwerte sind nicht auszuschließen. Zudem unterliegen die Eigenfrequenzen der realen Teile in geringerem Maße verschiedenen Dämpfungseffekten.

Die Unterschiede zwischen den virtuellen und den realen Pleueln bzw. die grundlegenden Abweichungen zwischen FEM-simulierten und ART-gemessenen Pleuel-Eigenfrequenzen wurden zunächst quantifiziert. Darauf aufbauend wurde empirisch eine Strategie für die Anpassung von Simulationsdaten virtueller Pleuel an Messdaten realer Pleuel entwickelt. Zur Feststellung des Status quo wurden die **realen Referenzpleuel** *R-1* bis *R-5* (siehe

Abschn. 5.2) herangezogen. Im Detail wurden dabei als konkrete Frequenzdaten hinsichtlich dieser im Folgenden detailliert betrachteten Teile die ...

- ... experimentell per **ART** gemessenen Eigenfrequenzen der Pleuel verwendet (vgl. Abschn. 5.2.9), die als Bezug dienten, sowie die ...
- ... auf Basis der digitalen Zwillinge der Teile numerisch mittels **FEM** berechneten Eigenfrequenzen herangezogen (vgl. Abschn. 5.2.8), deren Abweichungen gegenüber den ART-Messwerten der Pleuel quantitativ analysiert wurden. Dabei beruhen die betrachteten simulierten Frequenzwerte auf idealisierten FEM-Modellierungen, die in ihren Grundsätzen vollumfänglich konsistent zu den Modellierungen der virtuellen Trainings- und Validierpleuel der Arbeit sind.

Abb. 5.27 zeigt die prozentualen **Abweichungen** der FEM-simulierten Eigenfrequenzen von den ART-gemessenen Frequenzen der Referenzpleuel $R-1$ bis $R-5$, und zwar separat für alle analysierten Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} und gesondert für jedes der Teile. Dabei gilt, dass sich die simulierten Werte um mindestens etwa $-0,73\%$ und im Extremfall sogar um ca. $-2,65\%$ von den messtechnisch bestimmten Frequenzen unterscheiden. Die simulierten Frequenzwerte sind also stets etwas kleiner als die gemessenen Eigenfrequenzen, wobei die Abweichungen zwischen den Simulations- und Messdaten signifikant mit dem betrachteten Eigenfrequenzmerkmal variieren.

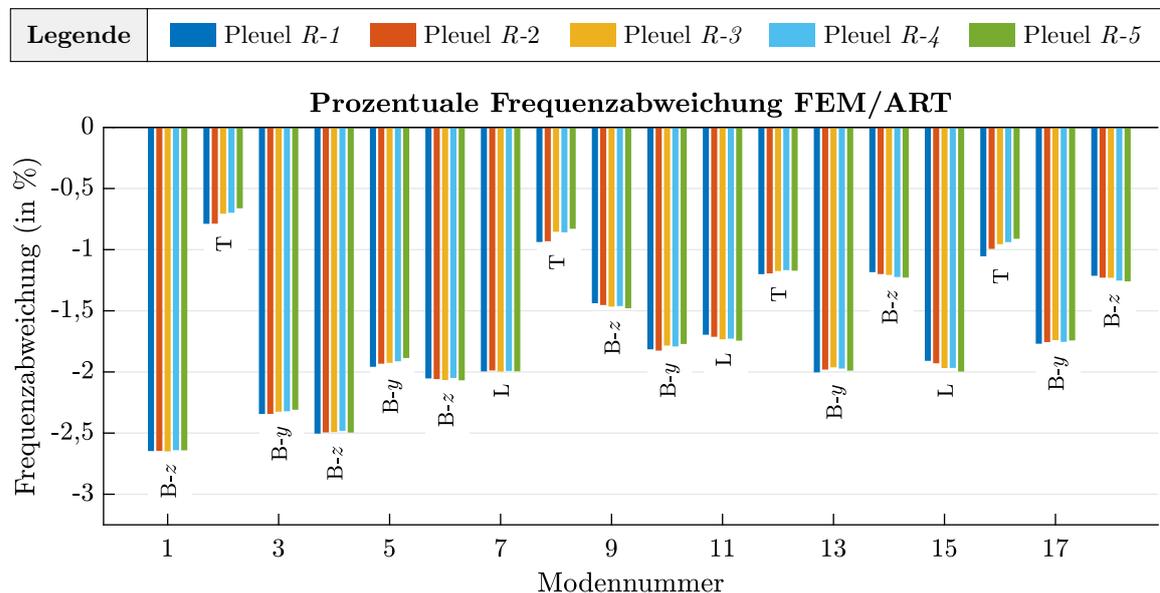


Abb. 5.27: Prozentuale Abweichungen der FEM-simulierten Eigenfrequenzen von den ART-gemessenen Frequenzen der fünf realen Referenzpleuel $R-1$ bis $R-5$ in Abhängigkeit von der Modennummer sowie des betrachteten Teils (L, T, B-y & B-z \rightarrow Modentypen nach Tab. 4.3)

Sowohl die gemessenen als auch die simulierten Pleuel-Eigenfrequenzen sind (aus statistischer Sicht) unsicherheitsbehaftet. Allerdings sind die jeweiligen Unsicherheiten sehr viel kleiner, als dass sie die in Abb. 5.27 dargelegten Abweichungen nur ansatzweise erklären

könnten (vgl. Abschn. 5.1.3 und Abschn. 5.2.9). Die Abweichungen müssen folglich (u. a. auch, da für die fünf verschiedenen Teile sehr ähnliche Resultate erzielt wurden) größtenteils **systematischer Natur** sein. Wenngleich die FEM-simulierten Eigenfrequenzwerte im Vergleich mit den exakten Kontinuumslösungen der theoretischen Problemstellungen systematisch fehlerhaft sind, was v. a. auf die FEM-Diskretisierung zurückgeführt wurde (vgl. Abschn. 5.1.3), kann dies nicht die Hauptursache für die erkannten Abweichungen zwischen Simulations- und Messdaten sein. Schließlich sind die Diskretisierungsfehler der FEM-berechneten Frequenzen vergleichsweise wesentlich geringer ausgeprägt, wobei sich die bestehenden Frequenzabweichungen in Abwesenheit der Diskretisierungsfehler sogar noch etwas verschärfen würden (da die FEM-simulierten Frequenzwerte im Vergleich zu den exakten Lösungen systematisch zu hoch liegen).

Letztlich werden die systematischen Abweichungen der berechneten von den gemessenen Pleuel-Eigenfrequenzen vorrangig auf die vielfältigen **Idealisierungen** und **Annahmen** im Kontext der FEM-Simulationen zurückgeführt, also auf Modellfehler in Bezug auf die Realität. Diesbezüglich wurden im Detail die folgenden Punkte identifiziert:

- **Geometrie** → Für die gezeigten Analysen wurden zwar Simulationsdaten genutzt, die auf Messdaten aus der Geometrievermessung der realen Pleuel basieren. Jedoch wurden bei den FEM-Modellierungen nicht alle erfassten Informationen umgesetzt, sondern einige Aspekte wurden idealisiert. So wurden gemittelte Zylinderringhöhen und 3-mm-Kantenverrundungen vorgegeben. Form- und Lageabweichungen wurden nicht abgebildet. Die tatsächlichen Geometrien der Teile unterscheiden sich demgegenüber (siehe Abschn. 5.2.6). Unter anderem wurden für die realen Pleuel geringe systematische Differenzen zwischen den jeweils zwei Zylinderringhöhen beobachtet und die Ist-Radien der Kantenverrundungen wurden auf 2,5 mm bis 2,75 mm eingegrenzt. Zudem wurden minimale Lageabweichungen identifiziert sowie Welligkeiten und Verkippungen detektiert. Außerdem stützen sich die FEM-Modellierungen auf experimentelle Daten, die per se unsicherheitsbehaftet sind, wobei die geometrische Charakterisierung auf die Abtastung ausgewählter Bauteilbereiche beschränkt war. Die experimentellen Geometrieeinformationen sind somit unvollständig, womit eine Unsicherheit einhergeht. Sowohl die quantifizierbaren systematischen Unterschiede (Zylinderringhöhen, Kantenradien sowie Lageverschiebungen) als auch kompliziertere Diskrepanzen zwischen den umgesetzten FEM-Modellierungen und den realen Geometrien spiegeln sich in den simulierten Eigenfrequenzwerten und somit in den festgestellten Frequenzabweichungen wider. Daher kann definitiv ein unbestimmter Anteil der erkannten Unterschiede zwischen berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen mit der Geometrie in Verbindung gebracht werden. Die Fertigungsqualität der realen Teile ist allerdings hoch und im Rahmen einer Unsicherheitsbetrachtung konnten die Realgeometrien durch enge Unter- und Obergrenzen bis auf einige hundertstel Millimeter eingegrenzt werden (unter der Annahme, dass die abgetasteten Bauteilbereiche diesbezüglich aussagekräftig sind). Letzten Endes ist es nicht plausibel, dass eine unzureichend präzise Geometriemodellierung bei den Simulationen hauptverantwortlich für die festgestellten Frequenzabweichungen ist.

- **Material** → Den hier analysierten Simulationsdaten bzgl. der realen Pleuel liegt ein homogenes, linear-elastisches Material mit theoretischen Kennwerten zugrunde. Zwar zeigten experimentelle Analysen, dass der zur Fertigung der Pleuel genutzte Werkstoff auf makroskopischer Ebene annähernd homogen ist (siehe Abschn. 5.2.3 bis Abschn. 5.2.5). Allerdings sind in Röntgenbildern auf mikrostruktureller Ebene Texturen und feine Inhomogenitäten zu erkennen, die in den Simulationen ebenso wenig abgebildet wurden wie mögliche Eigenspannungen sowie ein evtl. geringfügig nichtlineares Materialverhalten, wobei diese Punkte als vernachlässigbar eingestuft wurden. Weiterhin wurde messtechnisch ein Dichtewert ermittelt, der lediglich im Promillebereich von der bei den FEM-Simulationen vorgegebenen Dichte abweicht. Dies kann für die beobachteten Frequenzabweichungen nicht maßgeblich sein. Sehr schwer wiegt hingegen, dass der zur Fertigung der realen Pleuel genutzte Werkstoff aufgrund eines Walzprozesses anisotrop ist (siehe Abschn. 5.2.4 und Abschn. 5.2.5). Somit existieren zwischen dem Realmaterial mit anisotroper Elastizität und dem in den Simulationen eingestellten isotropen Material wesentliche Unterschiede, quantitativ wie auch qualitativ. Im Gegensatz zur Geometrie wurden bei der Berechnung der für die dargelegten Vergleiche herangezogenen Simulationsdaten keine aus den experimentellen Analysen des Materials abgeleiteten Kennwerte einbezogen. Somit ist es in Summe plausibel, dass die idealisierte Materialmodellierung wesentlich zu den beobachteten Frequenzabweichungen beigetragen hat.
- **Makroskopische Defekte** → Mittels Röntgentechnik wurde festgestellt, dass die realen Pleuel keine Volumendefekte mit einer Mindestgröße von 0,5 mm aufweisen, wobei kleinere Volumendefekte sowie sehr feine Risse nicht ausgeschlossen werden konnten (siehe Abschn. 5.2.5). Somit lässt sich auch keine Beeinflussung der messtechnisch beobachteten Eigenfrequenzen der realen Teile durch kleinere Fehlstellen ausschließen. Damit makroskopische Fehler aber signifikant zu den systematischen Frequenzabweichungen beigetragen haben könnten, müssten sie für die evaluierten Referenzpleuel vergleichbar ausgeprägt sein, was beispielsweise theoretisch auf den reproduzierten Fertigungsprozess zurückgeführt werden könnte. Allerdings gibt es keine belastbaren Hinweise darauf, dass die gegenwärtigen Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Pleuel-Eigenfrequenzen zu einem substantziellen Anteil durch kleinere makroskopische Fehler erklärbar sind, die im Rahmen der Röntgenanalysen nicht zu erkennen waren.
- **Dämpfung/ART-Auflager** → Reale Eigenschwingungen unterliegen Dämpfung aufgrund innerer Reibung und Schallabstrahlung. Die bei den ART-Messungen der realen Teile genutzten ART-Auflager bedingten eine zusätzliche äußere Dämpfung und brachten eine zusätzliche Steifigkeit ein. Bei den Simulationen wurde hingegen Dämpfung vernachlässigt. Daneben wurden keinerlei Randbedingungen spezifiziert. Die durch die Auflager eingebrachte Steifigkeit ist jedoch vernachlässigbar, da die Steifigkeit der mit Gummi-Spitzen versehenen Auflager die der Pleuel um mehrere Größenordnungen unterschreitet. Die Einflüsse der ART-Auflager wurden dennoch experimentell analysiert, auch im Hinblick auf die Dämpfung. Dazu wurden ART-

Messungen an einem realen Pleuel unter Verwendung unterschiedlich ausgeführter Auflagerkonzepte (Gummi-Auflager mit verschiedenen Positionierungen, Lagerung auf gespannten Nylon-Schnüren) durchgeführt. Obwohl hierbei, subjektiv beurteilt, stark unterschiedliche Dämpfungen bzw. Abklingverhalten erkannt wurden, zeigte die objektive Auswertung der entsprechenden ART-Messdaten zwar nachweisbare, jedoch nur geringfügige Einflüsse auf die Frequenzwerte (allenfalls im Bereich von ein bis zwei Promille). Auf Grundlage dessen wurden die Einflüsse der Auflager als nicht wesentlich eingestuft. Was die Dämpfung generell betrifft, ist die Aluminiumlegierung der Pleuel aus physikalischer Sicht schwach dämpfend. In Summe ist es nicht plausibel, dass Dämpfung bzw. deren Vernachlässigung bei den Simulationen die beobachteten Frequenzabweichungen hauptsächlich erklären könnte. Außerdem zeigt die einfache Analogiebetrachtung eines Federpendels, dass Dämpfung die Frequenz(en), verglichen mit einem ungedämpften System, zu niedrigeren Werten hin verschiebt. Übertragen auf die Pleuel wären die Frequenzabweichungen infolge der Berücksichtigung von Dämpfung in den Simulationen also betragsmäßig sogar noch geringfügig erhöht worden. Nichtsdestotrotz sollten die Dämpfungseffekte bzw. die ART-Auflager einen kleineren Beitrag zu den aufgezeigten Frequenzabweichungen geleistet haben, sicherlich aber nicht in entscheidendem Maße.

- **ART-relevante Einflussgrößen** → Einflüsse des Messprinzips, der eingesetzten Gerätetechnik, des experimentellen Aufbaus etc. auf die messtechnisch bestimmten Frequenzwerte sind per se nicht auszuschließen. Verschiedene Variationen im experimentellen Messaufbau (u. a. Mikrofonpositionierung und Lagerung) einschließlich umfangreicher testweiser Variationen im Kontext der Auswertung der Messsignale zeigten, dass alle diese Faktoren vergleichsweise vernachlässigbare Einflüsse auf die per ART bestimmten Eigenfrequenzwerte der Pleuel haben. Die Verwendung eines gänzlich anderen Datenaufnahmekonzepts oder anderer Hardware für vergleichende Analysen war im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht möglich. Somit kann z. B. ein geringer systematischer Einfluss der Gerätetechnik nicht ausgeschlossen werden. Es ist ungewiss, inwiefern die angesprochenen Aspekte für die beobachteten Frequenzabweichungen zwischen den simulierten und den gemessenen Daten mitverantwortlich sind. Jedoch sind diese sicherlich nicht maßgeblich.

Es bleibt festzuhalten, dass zahlreiche eventuelle Ursachen für die am Beispiel der realen Referenzpleuel festgestellten Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Pleuel-Eigenfrequenzen identifiziert wurden. Wahrscheinlich leisten viele oder zumindest einige der oben diskutierten Sachverhalte (deren Einflüsse sich dabei teilweise auch wieder ausgleichen können) einen gewissen Beitrag. Während die meisten der Faktoren bzw. deren simulationstechnische Vernachlässigung oder Idealisierung gewiss nicht entscheidend für die aufgezeigten systematischen Eigenfrequenzabweichungen sind, scheinen insbesondere die materielle Beschaffenheit der realen Pleuel bzw. die entsprechenden, im Rahmen der FEM-Simulationen idealisiert modellierten Charakteristika der virtuellen Pleuel eine entscheidende Rolle zu spielen.

5.3.2 Anpassung mittels optimierter Modellierungen

Um die in Abschn. 5.3.1 aufgezeigten Frequenzabweichungen zwischen Simulations- und Messdaten (siehe Abb. 5.27) zu verstehen und eventuell mittels angepasster, optimierter FEM-Modellierungen zu reduzieren, wurden weiterführende Analysen an den fünf realen Referenzpleueln *R-1* bis *R-5* vorgenommen. Mit dem Ziel einer **präziseren Abbildung** der Pleuel per FEM wurden zusätzliche Simulationen durchgeführt, bei denen die modellierungstechnische Komplexität durch die Berücksichtigung mehrerer Kombinationen aus detaillierteren Geometrie- und Materialmodellierungen schrittweise gesteigert wurde. Die dabei realisierten FEM-Modellierungen werden nachfolgend als *Geo-1*, *Geo-2* und *Geo-3* (Geometriemodellierungen) sowie *Mat-1*, *Mat-2* und *Mat-3* (Materialmodellierungen) bezeichnet und nach dem folgenden Schema kombiniert im Text angegeben:

- »FEM-Modellierung« = »Geometriemodellierung« + / + »Materialmodellierung«

Die für Abschn. 5.3.1 herangezogenen FEM-Daten beruhen auf einer **standardmäßigen FEM-Modellierung** (siehe Abschn. 5.2.8), die konsistent zur grundsätzlichen Modellierung der tausenden virtuellen Pleuel der Arbeit ist (vgl. Abschn. 5.1.2). Konkret wurden in Bezug auf die acht Hauptgeometrieparameter der Teile bisher stets die auf acht Maße reduzierten Daten aus der Geometrievermessung einschließlich teilespezifisch gemittelter Zylinderringhöhen verwendet, um die individuellen Geometrien der realen Pleuel mittels FEM abzubilden. Dabei wurden durchweg 3-mm-Kantenverrundungen vorgegeben, Form- und Lageabweichungen wurden nicht repräsentiert, und als Material wurde das isotrope Referenzmaterial (siehe Abschn. 4.2.2) eingestellt. Dieser bisherige Modellierungstyp entspricht, mit den o. g. Kürzeln angegeben, der Variante *Geo-1/Mat-1*.

Zuerst wurde das bestehende **FEM-Modell** (siehe Abschn. 5.1.2) schrittweise erweitert. Dabei wurde die Geometrie, die ursprünglich mit acht unabhängigen Parametervariablen (Hauptgeometrieparameter) konkretisiert werden konnte (\rightarrow *Geo-1*), zur Abbildung von uneinheitlichen Zylinderringhöhen und Kantenverrundungen mit variablen Radien unter Einbeziehung von zwei weiteren, also insgesamt zehn Parametern modelliert (\rightarrow *Geo-2*). Um auch einfache Lageverschiebungen abbilden zu können, wurde die Geometrie zuletzt mittels sieben weiterer Parametervariablen und damit in Abhängigkeit von 17 unabhängigen Parametern aufgebaut (\rightarrow *Geo-3*). Die Materialelastizität wurde mit neun anstelle von zwei Parametern modelliert, sodass neben einer isotropen (\rightarrow *Mat-1* & *Mat-2*) auch eine orthotrope Elastizität (\rightarrow *Mat-3*) berücksichtigt werden konnte. Danach wurden die Eigenfrequenzen der Referenzpleuel *R-1* bis *R-5* basierend auf relevanten Kombinationen aus den drei Geometrie- und drei Materialmodellierungen FEM-simuliert. Zur Abbildung der individuellen Ist-Geometrien der realen Pleuel wurden dabei die jeweiligen Daten aus der Geometrievermessung der Teile (siehe Abschn. 5.2.6) herangezogen. Hinsichtlich des einheitlichen Materials wurden neben den Kennwerten des Referenzmaterials auch messtechnisch ermittelte Kennwerte (siehe Abschn. 5.2.3 und Abschn. 5.2.4) genutzt. Zuletzt wurden die auf Basis der angepassten Modellierungen per FEM berechneten Frequenzen erneut im Vergleich mit den ART-gemessenen Eigenfrequenzen der Referenzpleuel analysiert, wobei stets über die fünf betrachteten Teile gemittelt wurde.

Abb. 5.28 zeigt die Abweichungen der berechneten von den gemessenen Eigenfrequenzen der Referenzpleuel in Abhängigkeit von der **Geometriemodellierung** auf. Dabei ist der zuvor betrachtete Status quo, der auf der standardmäßigen Modellierung (*Geo-1/Mat-1*) basiert, als Referenz abgebildet. Der erste Optimierungsschritt (*Geo-2/Mat-1*), der darin bestand, für jedes Teil die zwei geringfügig voneinander abweichenden Zylinderringhöhen gemäß den Ergebnissen der Geometrievermessung und 2,625-mm- anstatt 3-mm-Kantenverrundungen zu implementieren, führte zu Änderungen in den berechneten Frequenzen, die sich, noch gut erkennbar, in etwas veränderten Frequenzabweichungen in Bezug auf den Status quo zeigen. Allerdings erhöhten sich die Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und den Messwerten infolge der modifizierten Modellierung in geringem Maße, anstatt sich wie erhofft zu reduzieren. Die Auswirkungen des darauf aufbauenden, zweiten Optimierungsschritts (*Geo-3/Mat-1*), bei dem zusätzlich jeweils sieben Werte zur simulationstechnischen Darstellung der einfachen, im Rahmen der Geometrievermessung der betrachteten Pleuel festgestellten Lageabweichungen einbezogen wurden, lassen sich hingegen nur bei sehr genauer Betrachtung der Abbildung erkennen.

Abb. 5.29 stellt die Abweichungen der berechneten von den gemessenen Eigenfrequenzen der Referenzpleuel je nach umgesetzter **Materialmodellierung** dar, wobei die finale der zuvor analysierten Geometriemodellierungen mit dem höchsten Detaillierungsgrad beibehalten wurde. Folglich dient die Modellierung *Geo-3/Mat-1*, welche sich auf das isotrope Referenzmaterial stützt, in Abb. 5.29 als Referenz. Bei den optimierten Materialmodellierungen wurde für die Materialdichte anstelle des standardmäßig verwendeten Werts von 2700 kg/m^3 die experimentell bestimmte Dichte von $2705,14 \text{ kg/m}^3$ (siehe Abschn. 5.2.3) ausgewählt. Darüber hinaus wurde im ersten auf die Materialbeschaffenheit fokussierten Optimierungsschritt wiederum ein elastisch isotropes Material vorgegeben, dessen Kennwerte jedoch auf Grundlage der entsprechenden experimentellen Analysen im Sinne einer groben Näherungslösung unter idealisierten Annahmen abgeleitet wurden (*Geo-3/Mat-2*, Kennwerte gemäß mittlerer Spalte in Tab. 5.4). Der zweite Optimierungsschritt bestand schließlich in der simulationstechnischen Umsetzung eines orthotropen Materials, dessen Kennwerte ebenfalls anhand der experimentellen Daten abgeleitet wurden (*Geo-3/Mat-3*, Kennwerte laut letzter Spalte in Tab. 5.4). Für den Fall des theoretischen Referenzmaterials lassen sich Eigenfrequenzabweichungen zwischen ca. $-0,74\%$ und $-2,65\%$ erkennen (*Geo-3/Mat-1*). Die durch die experimentellen Analysen gewonnenen Materialkennwerte führten hingegen zu weniger deutlichen Abweichungen, welche sich, je nach analysiertem Eigenfrequenzmerkmal, über Intervalle von circa $-1,64\%$ bis $+0,04\%$ bzw. $-0,97\%$ bis $+0,03\%$ erstrecken (*Geo-3/Mat-2* bzw. *Geo-3/Mat-3*). Über sämtliche hier betrachteten Abweichungswerte arithmetisch gemittelt, reduzierten sich die Differenzen zwischen den mittels FEM simulierten und der per ART gemessenen Frequenzwerten von zunächst ca. $-1,73\%$ auf ungefähr $-0,77\%$ und zuletzt auf rund $-0,5\%$ mit den graduell angepassten Materialmodellierungen. Auch die Wertebereiche der modenspezifischen Frequenzabweichungen, die durch die Diagrammbalken aufgespannt werden, wurden von ca. $1,91\%$ auf ungefähr $1,69\%$ und zum Schluss auf fast genau 1% verringert.

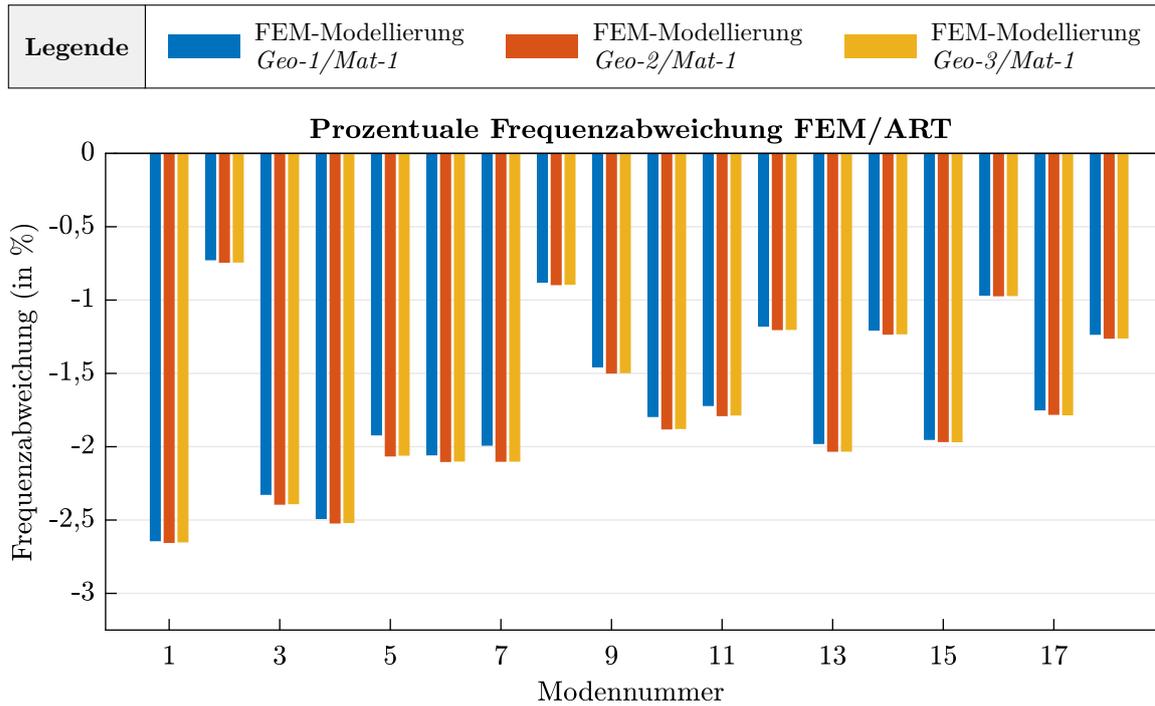


Abb. 5.28: Prozentuale Abweichungen der mit verschiedenen Geometriemodellierungen FEM-simulierten Eigenfrequenzen von den ART-gemessenen Frequenzen der realen Referenzpleuel in Abhängigkeit von der Modennummer

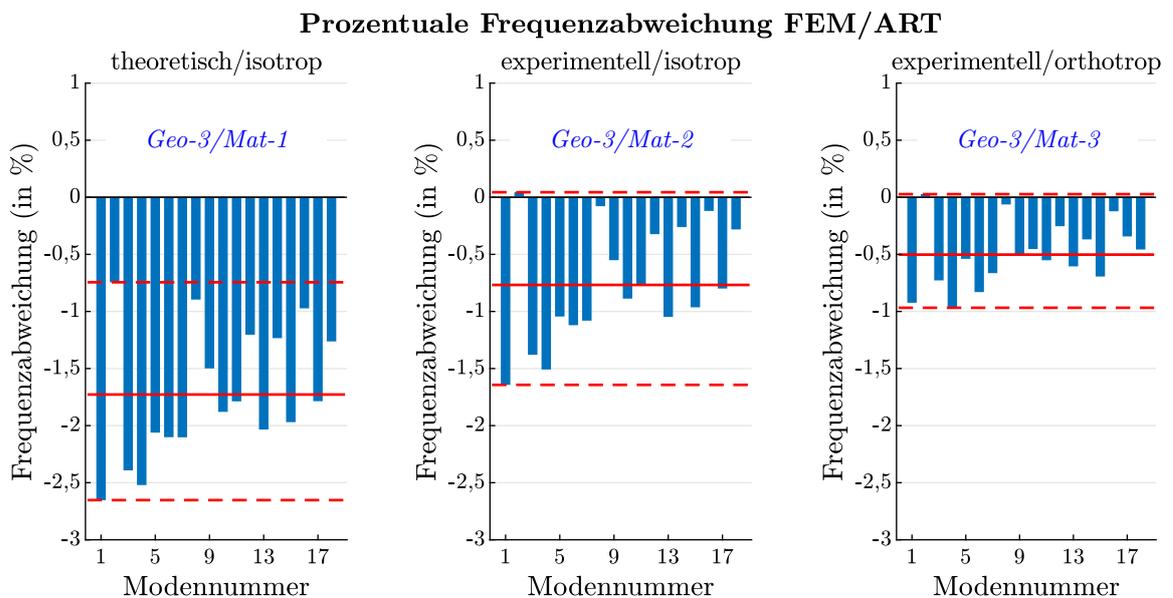
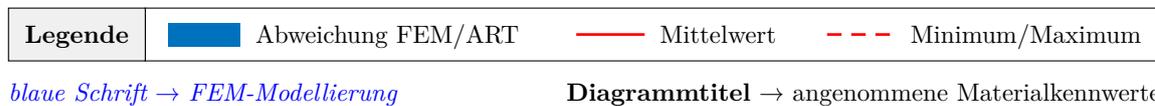


Abb. 5.29: Prozentuale Abweichungen der mit verschiedenen Materialmodellierungen FEM-simulierten Eigenfrequenzen von den ART-gemessenen Frequenzen der realen Referenzpleuel in Abhängigkeit von der Modennummer

Auf Grundlage der im finalen Iterationsschritt realisierten **optimierten Modellierung** konnten die systematischen Unterschiede zwischen den simulierten und den gemessenen Pleuel-Eigenfrequenzen im Mittel um ungefähr zwei Drittel der Ausgangswerte reduziert werden. Zusätzlich wurden insofern deutlich homogenere Abweichungswerte erreicht, als die Abweichungen zwischen den Simulations- und den Messdaten zuvor (also im Fall der standardmäßigen Modellierung) wesentlich ausgeprägter mit dem Eigenfrequenzmerkmal variierten. Vor allem das Potential in Bezug auf die FEM-Materialmodellierung ist offensichtlich auch noch nicht ausgeschöpft. So wurden die messtechnisch beobachteten Geometriecharakteristika der betrachteten Pleuel, abgesehen von geringen Ungenauigkeiten, z. B. durch die Vernachlässigung der minimalen Welligkeiten und Verkippungen, bereits mit hoher Präzision simulationstechnisch abgebildet. Obwohl das Optimierungspotential marginal erscheint, verbleibt eine gewisse Restunsicherheit, die auf die lediglich partielle Erfassung der Geometrien im Rahmen der Geometrievermessung zurückzuführen ist. Die schrittweise optimierte Modellierung der Materialeigenschaften mündete letztlich in den deutlich reduzierten Frequenzabweichungen. Bei den experimentellen Analysen in Bezug auf die materielle Elastizität wurde allerdings festgestellt, dass selbst das im Kontext der finalen FEM-Modellierung herangezogene orthotrope Materialmodell nur näherungsweise zu den diesbezüglichen US-Daten passt. Die für die FEM-Berechnungen herangezogenen Materialkennwerte weisen von daher nicht nur quantitative Unsicherheiten auf, sondern das Materialmodell ist im Grunde sogar falsch (vgl. Abschn. 5.2.4).

Demnach wird – auch unter Berücksichtigung, dass die angepasste Materialmodellierung bereits zu deutlich reduzierten Frequenzabweichungen führte, obwohl die messtechnisch extrahierten Materialkennwerte auf zahlreichen Idealisierungen basieren und letztendlich nur näherungs- bzw. ersatzweise bestimmt werden konnten – geschlossen, dass weiterhin ein hohes **Optimierungspotential** durch eine noch detailliertere simulationstechnische Abbildung der Materialeigenschaften der Pleuel besteht. Darüber hinaus könnte die Einbeziehung zusätzlicher Aspekte, wie sie im voranstehenden Abschnitt diskutiert wurden, ebenfalls dazu beitragen, die Abweichungen der simulierten von den gemessenen Pleuel-Eigenfrequenzen weiter zu reduzieren. Dies wurde jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt, da die jeweiligen Herausforderungen bei der FEM-Modellierung genügend Potential für eigenständige Forschungsarbeiten bieten würden. Zudem wären früher oder später ohnehin gewisse Limitierungen erreicht worden, die der Erzeugbarkeit quantitativ präziser Eigenschwingungsdaten per FEM im Wege gestanden hätten.

Auf Grundlage der in diesem Abschnitt präsentierten Untersuchungen wird festgehalten, dass im Rahmen der Arbeit erwartungsgemäß keine rein physikalisch basierte Erzeugung von ausreichend präzisen Eigenfrequenzdaten per FEM umgesetzt werden konnte, wie es letztlich im Hinblick auf die Konzeptdemonstration notwendig gewesen wäre.

5.3.3 Anpassung mittels Korrekturfaktoren

Um die im Kontext der Erzeugung synthetischer ART-Trainingsdaten notwendige, möglichst präzise Anpassung der per FEM erzeugten Daten der virtuellen Trainingspleuel an ART-gemessene Eigenfrequenzen realer Pleuel zu erzielen, wurde eine effektive Methode gesucht. Letztendlich wurde, mit dem Ziel der **Minimierung** der systematischen Unterschiede zwischen simulierten und gemessenen Pleuel-Eigenfrequenzen, ein pragmatischer Ansatz gewählt, der sich auf modenspezifische Korrekturfaktoren stützt.

Die Lösungsstrategie via **Korrekturfaktoren** basiert darauf, dass für die Referenzpleuel *R-1* bis *R-5* Abweichungen zwischen Simulations- und Messdaten detektiert wurden, die zwar modenspezifisch sind, sich also hinsichtlich der 18 betrachteten Frequenzmerkmale deutlich unterscheiden, dabei jedoch von Pleuel zu Pleuel nur geringfügig variieren (vgl. Abb. 5.27). Zur Ermittlung der Korrekturfaktoren wurden erneut die fünf Referenzpleuel herangezogen – denn sie stammen aus exakt derselben Charge wie die bei der Konzeptdemonstration final per ART zu analysierenden realen Validierpleuel. Im Detail wurden dazu sowohl die simulierten als auch die gemessenen Frequenzen zuerst modenspezifisch über die fünf Referenzteile gemittelt.⁵⁷ Durch die Berechnung der paarweisen Quotienten aus den gemittelten Messwerten und den Simulationsdaten resultierten schließlich direkt die gesuchten, in Tab. 5.6 angegebenen Korrekturfaktoren.

Tab. 5.6: Korrekturfaktoren zur Anpassung von FEM-simulierten an ART-gemessene Pleuel-Eigenfrequenzen in Abhängigkeit von der Modennummer m

m	Korrekturfaktor	m	Korrekturfaktor	m	Korrekturfaktor
1	1,0272	7	1,0203	13	1,0202
2	1,0073	8	1,0089	14	1,0122
3	1,0238	9	1,0148	15	1,0199
4	1,0256	10	1,0183	16	1,0098
5	1,0196	11	1,0175	17	1,0178
6	1,0210	12	1,0120	18	1,0125

Die Tauglichkeit der Korrekturfaktormethode wurde mittels der fünf Referenzpleuel *R-1* bis *R-5* selbst überprüft. Hierzu wurden die Faktoren mehrfach berechnet, wobei jedoch jeweils eines der Pleuel im Sinne einer sauberen statistischen Analyse ausgelassen wurde. Die auf Basis der anderen vier Pleuel ermittelten Faktoren wurden danach auf die FEM-simulierten Frequenzwerte des ausgelassenen Pleuels angewandt. Die auf diese Weise angepassten Simulationswerte wurden zuletzt erneut mit den ART-gemessenen Frequenzen des Teils abgeglichen. Abb. 5.30 gibt die relativen Abweichungen der simulierten und im Anschluss mithilfe der Faktoren korrigierten Eigenfrequenzen von den ART-Messwerten

⁵⁷⁾ Hierzu wurden erneut die Simulationsdaten der digitalen Zwillinge verwendet, die denselben modellierungstechnischen Idealisierungen unterliegen wie die virtuellen Trainingspleuel (also die in Abschn. 5.3.1 betrachteten und nicht die zusätzlichen, in Abschn. 5.3.2 analysierten Daten).

separat für jedes (dabei zur Berechnung der Faktoren ignorierte) Referenzpleuel an. Obwohl erwartungsgemäß geringe **Residuen** nach den faktoriellen Anpassungen verblieben, führte die Korrekturfaktormethode zu sehr zufriedenstellenden Resultaten. So liegen die relativen Abweichungen der angepassten Simulationswerte von den gemessenen Eigenfrequenzen der Teile meist im Intervall von $\pm 0,1\%$ bzw. $\pm 1\%$.

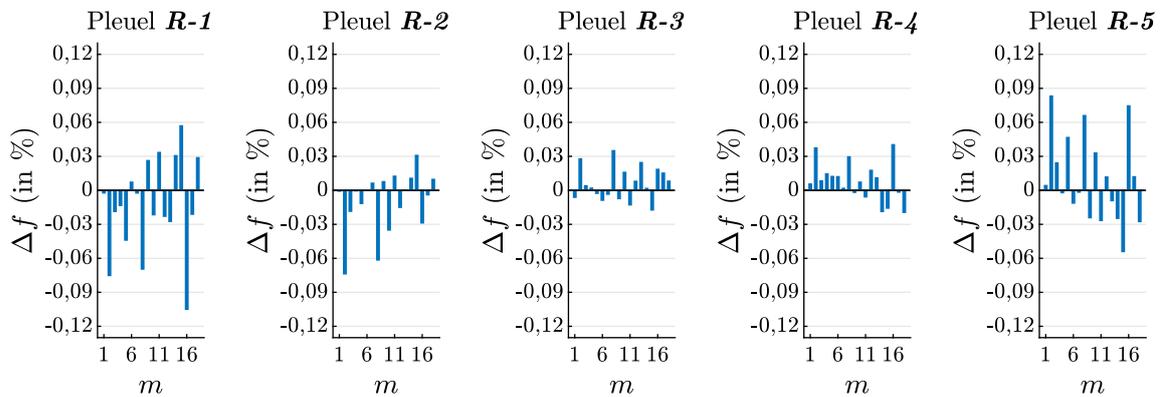


Abb. 5.30: Prozentuale Abweichungen Δf der FEM-simulierten und anschließend mit Korrekturfaktoren angepassten Eigenfrequenzen von den ART-gemessenen Frequenzen der fünf realen Referenzpleuel *R-1* bis *R-5* in Abhängigkeit von der Modennummer *m*

5.3.4 Überprüfung der Korrekturfaktormethode

Anhand der realen Referenzpleuel wurde gezeigt, dass die ermittelten Korrekturfaktoren eine quantitativ belastbare Transformation simulierter Pleuel-Eigenfrequenzdaten in die »Messwelt« ermöglichen könnten. Die Referenzteile wurden allerdings nach dem Vorbild der geometrisch mittleren Referenzkonfiguration gefertigt, während die als Grundlage für die zu transformierenden synthetischen Trainingsdaten berechneten virtuellen Trainingspleuel in ihren Geometrien variieren. Um zu überprüfen, ob die Korrekturfaktoren auch für Teile mit Zufallsgeometrien eine sinnvolle Anpassung von FEM-simulierten an ART-gemessene Frequenzwerte erlauben, wurden die Faktoren auf die **realen Validierpleuel** *V-1* bis *V-24* (siehe Abschn. 5.2) appliziert. Die mithilfe digitaler Zwillinge der Validierpleuel per FEM simulierten Frequenzen wurden hierzu mit den in Tab. 5.6 angegebenen Korrekturfaktoren multipliziert. Abb. 5.31 stellt die prozentualen Abweichungen der faktoriell angepassten Simulationswerte von den mittels ART bestimmten Eigenfrequenzen der realen Validierpleuel (ohne eingebaute Defekte) dar.

Abb. 5.31 vermittelt, dass die **Korrekturfaktormethode** auch im Fall der geometrisch variierenden Validierpleuel in einer grundsätzlich zuverlässigen Anpassung mündete. Die Abweichungen der korrigierten Simulations- von den Messwerten liegen meist im Bereich von $\pm 0,1\%$ und somit in dem Rahmen, der zuvor auch schon für die Referenzpleuel beobachtet wurde (vgl. Abb. 5.30). Für die Mehrheit der Validierpleuel führte die Korrekturfaktormethode nur vereinzelt zu etwas deutlicher ausgeprägten residualen Abweichungen. Davon ausgenommen sind die Pleuel *V-2*, *V-8* und *V-20*. So wurden für diese Teile nicht nur deutlich größere Abweichungen festgestellt, die je nach Frequenzmerkmal im Bereich

von $-0,3\%$ bis $+0,5\%$ liegen. Vielmehr weisen die verbliebenden Frequenzabweichungen auch einen systematischen Charakter auf, denn in den entsprechenden Diagrammen zeigt sich ein wiederkehrendes Muster, das nicht durch Zufall erklärbar ist.

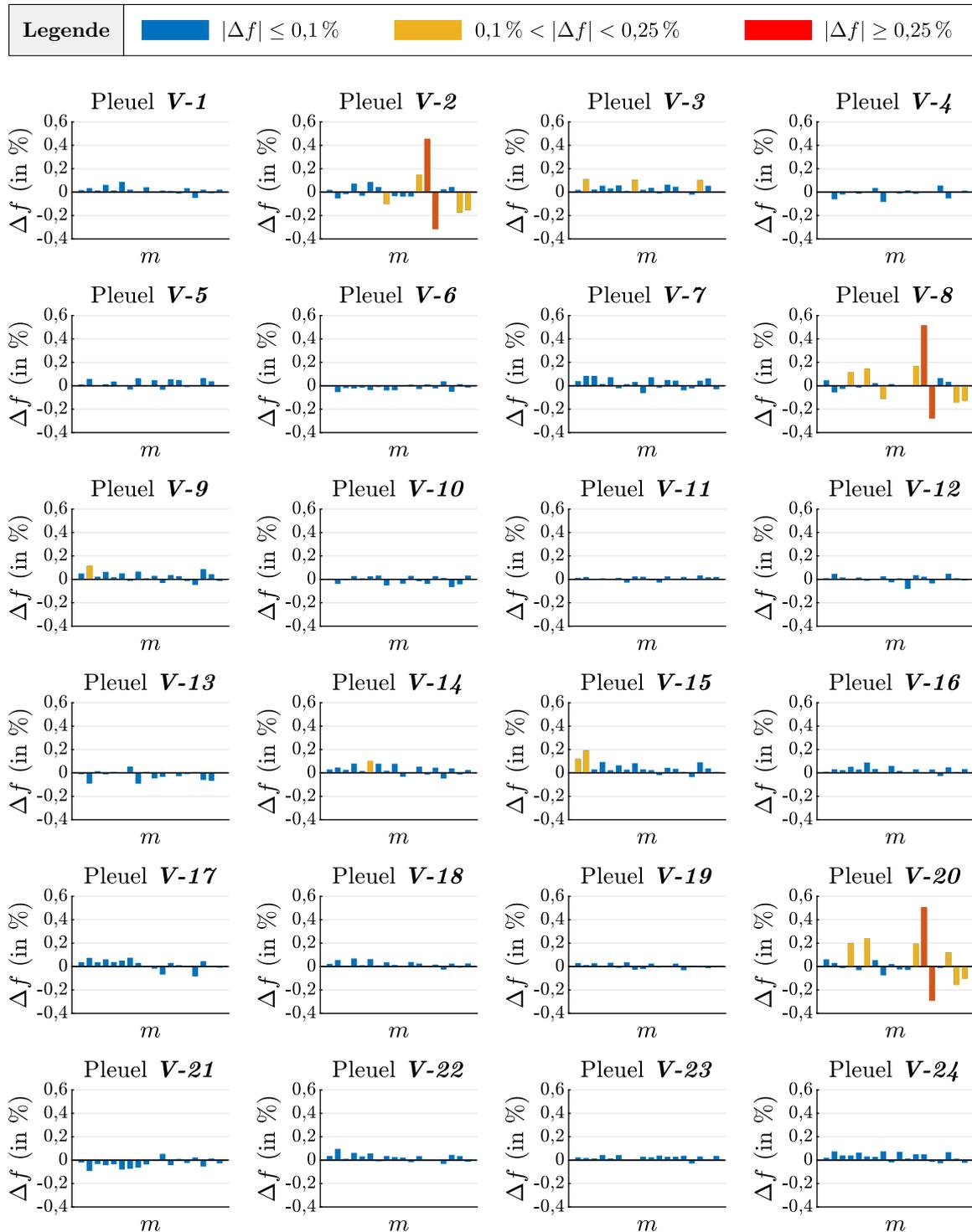


Abb. 5.31: Prozentuale Abweichungen Δf der FEM-simulierten und anschließend mit Korrekturfaktoren angepassten Eigenfrequenzen von den ART-gemessenen Frequenzen der 24 realen Validierpleuel V-1 bis V-24 in Abhängigkeit von der Modennummer m

Die Ursache für das auffällige **systematische Verhalten** der Teile *V-2*, *V-8* und *V-20* ist unbekannt. Weder weisen sie besonders extreme Abmessungen auf, noch sind sie sich geometrisch ähnlich. Optisch sind die Pleuel unauffällig und auch in den Röntgenbildern lassen sich keinerlei Anomalien erkennen, die auf abweichende Texturen im Vergleich zu den anderen gefertigten Teilen oder auf makroskopische Fehler hindeuten. Zudem zeigen weder die Geometriemessdaten der auffälligen Pleuel noch die ART-Zeitsignale bzw. die daraus abgeleiteten FFT-Spektren Besonderheiten, die die beobachteten Charakteristika erklären könnten. Daneben wurden die Messdaten einschließlich aller Schritte der Datenverarbeitung gründlich auf eventuelle Zuordnungs- und Auswertefehler überprüft, jedoch ohne dabei eine plausible Ursächlichkeit für die erkannten Systematiken zu identifizieren. Unter Umständen wurden die drei Pleuel, entgegen der Vereinbarung mit dem Hersteller bzw. infolge einer Verwechslung, aus einer anderen Materialcharge gefertigt. Zudem ist nicht auszuschließen, dass die drei Teile während der Fertigung einer (z. B. thermischen) Belastung ausgesetzt waren, welche sich systematisch in den materiellen Eigenschaften manifestierte, oder dass im Rahmen der Herstellung kleinere Fehler entstanden sind, die mittels Röntgentechnik nicht detektierbar waren. Jedenfalls wird es als nahezu gesichert angesehen, dass die auffälligen Validierpleuel *V-2*, *V-8* und *V-20* systematischen, jeweils vergleichbaren **strukturmechanischen Anomalien** unterliegen, die die anderen realen Pleuel der Arbeit in dieser Form nicht aufweisen.

Obwohl die FEM-simulierten Pleuel-Eigenfrequenzen, nachdem sie mit den individuellen Korrekturfaktoren multipliziert wurden, meist nur noch in Bereichen von $\pm 0,1\%$ gegenüber entsprechenden Messdaten abweichen, ist es ohne weitere Belege fraglich, ob diese Präzision im Hinblick auf die Erzeugung synthetischer ART-Trainingsdaten (bzw. einen daraus abgeleiteten ART-Klassifikator) ausreicht. Um die Korrekturfaktormethode fundierter zu überprüfen, wurde eine erste »kleine« **Demonstration** durchgeführt, bei der auf Basis synthetischer Daten auf die geometrischen Merkmale realer Pleuel geschlossen werden sollte. Konkret sollten anhand der ART-gemessenen Eigenfrequenzen der realen Validierpleuel (ohne eingebrachte Defekte) invers deren Ist-Abmessungen bzgl. der acht Hauptgeometrieparameter (siehe Abb. 4.3) geschätzt werden. Bezüglich der mathematischen Methode wurde dazu multiple lineare Regressionsanalyse [Aue11; Fah09] genutzt. Dem Ansatz liegt dabei zugrunde, dass die Eigenfrequenzen geometrisch zufälliger Teile bei ansonsten einheitlichen Gegebenheiten von Teil zu Teil theoretisch nur geometriebedingt schwanken sollten. Folglich sollten ausreichend viele Eigenfrequenzen einen Rückschluss auf die Geometrie erlauben können. Gl. 5.4 gibt die unterstellte Modellgleichung an, wobei neben den Eigenfrequenzen auch alle verschiedenen paarweisen Produktterme einbezogen wurden, um nichtlineare Zusammenhänge und Wechselwirkungseffekte abzubilden (vgl. Abschn. 4.3.2). Hierbei sind f_1, \dots, f_{18} die Pleuel-Eigenfrequenzmerkmale, während b_0 eine Konstante ist und b_1, \dots, b_{18} sowie $b_{1/1}, \dots, b_{18/18}$ die zu berechnenden Koeffizienten der Eigenfrequenzen bzw. der Produktterme darstellen.

$$\begin{aligned} \text{Geometrie} \approx & b_0 + b_1 \cdot f_1 + b_2 \cdot f_2 + \dots + b_{18} \cdot f_{18} + \\ & b_{1/1} \cdot f_1^2 + b_{1/2} \cdot f_1 \cdot f_2 + b_{1/3} \cdot f_1 \cdot f_3 + \dots + b_{18/18} \cdot f_{18}^2 \end{aligned} \quad (5.4)$$

Als synthetische Trainingsdaten für die oben genannte Demonstration wurden die FEM-simulierten Eigenfrequenzwerte und die Abmessungen aller virtuellen IO-Trainingspleuel herangezogen (vgl. Abschn. 5.1). Auf Grundlage dieser Daten wurden unter Verwendung der MATLAB®-Funktion `fitlm` (»fit linear regression model«, Argument: 'quadratic') **Regressionsfunktionen** bezugnehmend auf Gl. 5.4 modelliert und geschätzt. Für jeden der Hauptgeometrieparameter wurde eine separate Funktion ermittelt, wobei die synthetischen, FEM-simulierten Eigenfrequenzen des Trainingsdatensatzes zuvor mittels der in Tab. 5.6 angegebenen Korrekturfaktoren transformiert wurden. Danach wurden die ART-gemessenen Eigenfrequenzen der 24 Validierpleuel (IO-Zustände) in die Regressionsfunktionen eingesetzt, wodurch sich dann Schätzwerte bzgl. der geometrischen Abmessungen der Teile ergaben. Abb. 5.32 stellt die auf Basis der gemessenen Frequenzen der Validierpleuel $V-1$ bis $V-24$ ermittelten Geometrieschätzwerte den entsprechenden Ist-Maßen der Teile gegenüber. Für die Geometrieparameter h_R und l_R sind im Vergleich etwas größere Abweichungen zwischen den geschätzten und den tatsächlichen Abmessungen erkennbar. Hinsichtlich der anderen Parameter sind die Ergebnisse allerdings sehr zufriedenstellend, sodass die Korrekturfaktormethode dieser ersten Überprüfung standhielt. Partiiell ausgenommen hiervon sind die (in den Diagrammen gekennzeichneten) Resultate, die sich auf die drei auffälligen Pleuel $V-2$, $V-8$ und $V-20$ beziehen.

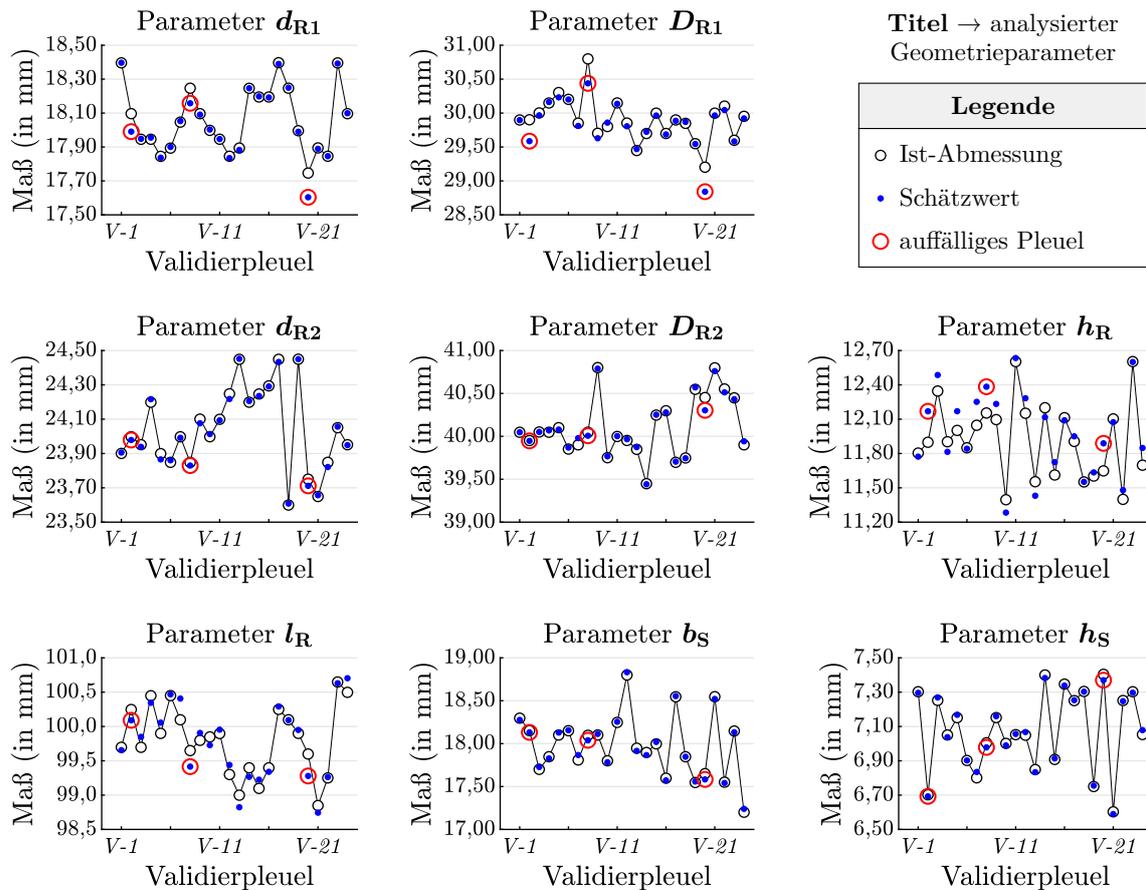


Abb. 5.32: Schätzwerte für die Abmessungen der realen Validierpleuel in Bezug auf die acht Hauptgeometrieparameter auf Basis ART-gemessener Eigenfrequenzen

6 Konzeptdemonstration »Pleuel«

In diesem Kapitel wird das in Kap. 3 präsentierte Konzept für ein simulationsbasiertes ART-Training in chronologischer Abfolge demonstriert. Inhaltlich verfolgt die **Konzeptdemonstration** das in Kap. 4 beschriebene Anwendungsszenario, dessen Fokus auf der qualitativen sowie quantitativen ART-Qualitätsbewertung von Pleueln im Hinblick auf einen möglichen Durchgangsbohrungs-Defekt liegt. Dabei stützt sich die Demonstration konkret auf die in Kap. 5 erläuterten virtuellen und realen Pleuel (die unter Berücksichtigung der Festlegungen und Verteilungsannahmen des Anwendungsszenarios spezifiziert respektive gefertigt wurden) bzw. auf deren Simulations- und Messdaten.

Abb. 6.1 veranschaulicht, wie die Konzeptdemonstration auf dem Konzept, dem Anwendungsszenario sowie den konkreten Pleueln bzw. Daten aufbaut und wie die Inhalte der entsprechenden Kapitel 3 bis 6 in Verbindung stehen. Außerdem fasst die Abbildung die zentralen Aspekte des Anwendungsszenarios zusammen.

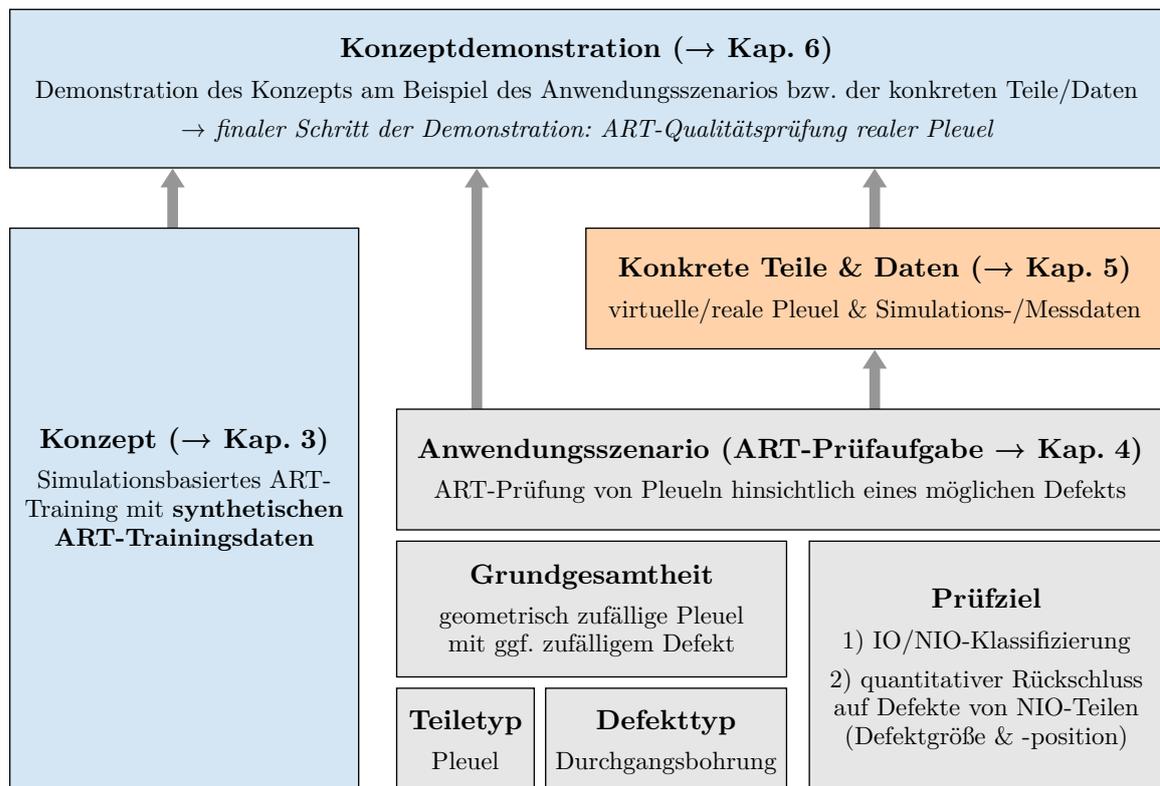


Abb. 6.1: Konzeptdemonstration und zentrale Aspekte des Anwendungsszenarios

Im Rahmen des im Folgenden beschriebenen simulationsbasierten ART-Trainings wurde im finalen Demonstrationsschritt auf die ART-Qualitätsprüfung bzw. Klassifizierung der maschinell gefertigten realen Validierpleuel fokussiert. Primär wurden dazu mehrere auf Grundlage synthetischer ART-Trainingsdaten berechnete Klassifikatoren eingesetzt, die ihre Prüfentscheidungen auf die kombinierte (und ausschließliche) Analyse der teilespezifischen Ausprägungen der Pleuel-Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} stützen. Angesichts der erheblichen Geometrieviationen der betrachteten Pleuel wurde darüber hinaus ein **multimodaler Ansatz** verfolgt, der auf der Grundidee einer gemeinsamen Auswertung von Eigenschwingungs- und Geometriedaten basiert. Damit wurde beabsichtigt, die überlagernden Geometrieviationen der Pleuel durch die Einbeziehung von entsprechendem Vorwissen rechnerisch zu kompensieren und letztlich die erzielbare Prüfqualität zu erhöhen. Hierzu wurden schließlich weitere Klassifikatoren ermittelt und eingesetzt, die neben den Eigenfrequenzen auch Geometriedaten der zu bewertenden Prüfobjekte als Basis für die zu treffenden IO/NIO- bzw. Defekt-Klassifizierungen verwenden.

Der Aufbau dieses Kapitels orientiert sich an den drei zentralen Schritten des Konzepts für ein simulationsbasiertes ART-Training. Das heißt konkret:

- 1) In Abschn. 6.1 wird die Erzeugung synthetischer ART-Trainingsdaten dargelegt.
- 2) In Abschn. 6.2 wird die Ermittlung von ART-Klassifikatoren für die eigenfrequenzbasierte ART-Qualitätsprüfung von Pleueln auf Basis der Trainingsdaten erläutert, was u. a. auch eine theoretische Überprüfung der Klassifikatoren mittels simulierter Daten (virtuelle Validierpleuel) beinhaltet.
- 3) In Abschn. 6.3 wird die Validierung der ART-Klassifikatoren anhand realer Pleuel (reale Validierpleuel) beschrieben, wozu die Klassifikatoren auf die zu bewertenden Teile appliziert und die getroffenen Prüfurteile analysiert wurden.

Zum besseren Verständnis werden nachfolgend Punkte, welche die konkreten Pleuel und die simulationstechnische und experimentelle Datenerzeugung an diesen Teilen betreffen und die bereits ausführlich in den voranstehenden Kapiteln betrachtet wurden, auszugsweise in kompakter Form wiederholt. Dabei werden die wieder aufgegriffenen virtuellen und realen Pleuel im Vergleich mit den *AGG*-Pleueln beschrieben – also den gemäß der Definition des Anwendungsszenarios zu bewertenden Teile aus der *Anwendungsszenario-Grundgesamtheit (AGG)*, die die Bandbreite der möglichen IO- und NIO-Pleuel mithilfe statistischer Modelle wiedergibt und die letztendlich den Dreh- und Angelpunkt für alle konkreten virtuellen und realen Pleuel der Arbeit darstellt.

6.1 Erzeugung synthetischer ART-Trainingsdaten

Der initiale Schritt des simulationsbasierten ART-Trainings beinhaltet die **Erzeugung synthetischer ART-Trainingsdaten**, die die relevanten Eigenschaften der später mit ART zu beurteilenden Pleuel bestmöglich abbilden (vgl. Kap. 3). Vor dem Hintergrund der angestrebten eigenfrequenzbasierten ART-Qualitätsprüfung geometrisch variierender Pleuel wurden bei der Datenerzeugung, neben qualitätsrelevanten Defekten sowie einem einheitlichen Material, auch die zulässigen Geometrievariationen der Teile berücksichtigt. Die fertigen Trainingsdaten umfassen zum einen die Eigenfrequenzen vieler repräsentativer Pleuel. Zum anderen geben die Daten die Qualitätszustände sowie die geometrischen Abmessungen der Teile wieder.

FEM-simulierte Trainingspleuel als zentrale Datengrundlage

Die in Abschn. 5.1 vorgestellten **virtuellen Trainingspleuel** bildeten die maßgebliche Grundlage zur Erzeugung der synthetischen ART-Trainingsdaten. Die Geometrien, das Material und die Qualitätszustände dieser nicht physisch existierenden 50 000 Teile wurden unter Berücksichtigung aller grundsätzlichen Festlegungen und Idealisierungen des Anwendungsszenarios vorgegeben. Die Eigenfrequenzen der Trainingspleuel wurden per FEM numerisch berechnet.

Die idealisierten Geometrien der virtuellen Trainingspleuel variieren stetig gleichverteilt bzgl. der acht Hauptgeometrieparameter. Die **zufälligen Abmessungen** der Teile, die mit gleichverteilten Zufallszahlen definiert wurden, streuen in 50 % breiteren Intervallen im Vergleich zu den wesentlichen Geometrie-Wertebereichen (Drei-Sigma-Intervalle) der geometrisch normalverteilt variierenden, gemäß den modellhaften Vorgaben des Anwendungsszenarios zu klassifizierenden *AGG*-Teile (bzw. im Vergleich zu denen der final zu prüfenden realen Validierpleuel). Allen virtuellen Trainingspleueln wurde ein homogenes, isotropes linear-elastisches **Material** mit einheitlichen Eigenschaften zugewiesen, wie es auch für die *AGG*-Pleuel spezifiziert wurde. Dabei beschreiben die festgelegten Materialkennwerte, an die zur mechanischen Fertigung der realen Pleuel verwendete Aluminiumlegierung angelehnt, einen Aluminiumwerkstoff.

Die 50 000 virtuellen Trainingspleuel umfassen 5000 geometrisch zufällige IO-Teile und 45 000 NIO-Teile. Den 9×5000 NIO-Teilen mit jeweils einem **Durchgangsbohrungs-Defekt** wurden wiederholt dieselben 5000 zufälligen Geometrieconfigurationen zugewiesen wie den IO-Teilen. Hinsichtlich der Defektausprägungen der NIO-Teile wurden zum einen die drei Defektdurchmesser 1 mm, 2 mm und 3 mm vorgegeben. Zum anderen wurden mittels gleichverteilter Zufallszahlen zu jeder Geometrieconfiguration drei zufällige Defektpositionen erzeugt (je eine Position im Zylinderring-Segment R1, im Zylinderring-Segment R2 und im Steg-Segment S). Kombinatorisch ergaben sich pro Geometrieconfiguration, neben einem IO-Teil, neun NIO-Teile, die sich ausschließlich in den Defekten unterscheiden (3 Defektgrößen \times 3 jeweils zufällige Defektpositionen).

Die von der jeweils individuellen Bauteilstruktur abhängigen **Eigenfrequenzen** der virtuellen Trainingspleuel bzgl. der relevanten Merkmale f_1 bis f_{18} wurden abschließend mit der FEM-Software COMSOL[®] berechnet.

Datenerweiterung per Inter-/Extrapolation der Simulationsdaten

Mittels der FEM-simulierten Trainingspleuel wurden die zulässigen Geometrievariationen des Anwendungsszenarios nicht nur großzügiger und gleichverteilt abgebildet, sondern zugleich in vielen Abstufungen (5000 unterschiedliche Geometrien). Auch die möglichen Defektpositionen wurden detailliert beschrieben (3×5000 unterschiedliche Defektpositionen). Allerdings wurden bei den Simulationen lediglich die drei grob abgestuften Defektgrößen 1 mm, 2 mm und 3 mm berücksichtigt. Dieser Aspekt wurde daher in Form einer interpolationsartigen **Datenerweiterung** adressiert. Dabei wurde dann ausgenutzt, dass neben jedem IO-Pleuel neun geometrisch identische NIO-Pleuel simuliert wurden, wobei immer drei dieser NIO-Teile den jeweiligen (im Durchmesser unterschiedlichen) Defekt an einer identischen Position aufweisen. Auf dieser Basis wurden die **Frequenzabhängigkeiten** vom Defekt(-durchmesser) mithilfe der MATLAB[®]-Funktion `spline` (»cubic spline data interpolation«) ausgedrückt, was separat für jede Geometrieconfiguration, jede Defektposition und jedes der Merkmale f_1 bis f_{18} erfolgte. Hierbei wurden immer vier Stützstellen berücksichtigt, und zwar der Frequenzwert eines IO-Teils bzgl. eines betrachteten Eigenfrequenzmerkmals sowie die entsprechenden Frequenzen der drei geometrisch identischen NIO-Pleuel, die einen untereinander konsistent positionierten 1-mm-, 2-mm- bzw. 3-mm-Defekt an der betrachteten Defektposition aufweisen.

Interpolationsartig wurden schließlich weitere virtuelle NIO-Trainingspleuel strukturellmechanisch beschrieben. Diese (nicht FEM-simulierten) Pleuel sind durch dieselben Geometrieconfigurationen und dieselben Defektpositionen wie auch die 50 000 FEM-simulierten Teile gekennzeichnet. Sie weisen jedoch zusätzliche, feiner abgestufte Defektgrößen auf. Im Detail wurden **Defektdurchmesser** von 0,8 mm bis 3,6 mm mit konstanter Schrittweite von 0,1 mm vorgegeben (ausgenommen die im Zuge der FEM-Simulationen bereits gewählten Defektgrößen). Um den für das Anwendungsszenario definierten Defektgrößen-Wertebereich von 1 mm bis 3 mm großzügig abzudecken, wurden somit also bis zu 20 % kleinere bzw. größere Defektdurchmesser berücksichtigt. Die Eigenfrequenzen der zusätzlichen NIO-Trainingspleuel wurden abschließend mithilfe der zuvor empirisch ermittelten Frequenzabhängigkeiten auf Grundlage der Simulationsdaten der insgesamt 50 000 FEM-berechneten Trainingspleuel inter- bzw. extrapoliert.

Abb. 6.2 veranschaulicht den wesentlichen Schritt der Datenerweiterung, d. h. die Inter- bzw. Extrapolation der simulierten Frequenzdaten zwecks Abbildung weiterer Trainingspleuel mit detaillierter abgestuften Defektgrößen. Dabei beziehen sich die Diagramme auf eine zufällige Geometrieconfiguration sowie eine zufällige Defektposition im Zylinderring-Segment R1 bzw. im Steg-Segment S.

Legende	◆ Stützstelle (FEM-simuliert)	— Spline-Funktion	● inter-/extrapolierter Wert
----------------	-------------------------------	-------------------	------------------------------

Diagrammtitel → Eigenfrequenzmerkmal / Defektposition (Segment R1, R2 oder S)

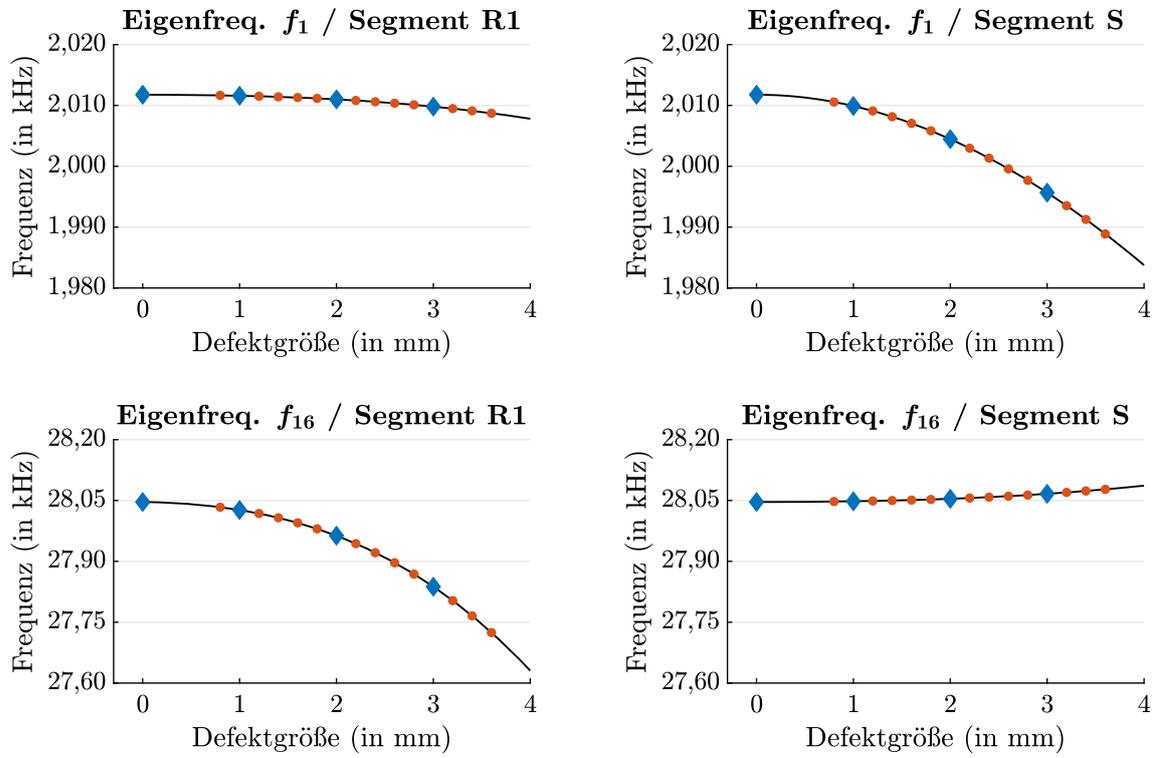


Abb. 6.2: Inter-/Extrapolation FEM-simulierter Eigenfrequenzen zur Beschreibung zusätzlicher virtueller NIO-Trainingspleuel am Beispiel der Eigenfrequenzmerkmale f_1 (oben) und f_{16} (unten), einer zufälligen Geometrieconfiguration sowie eines ebenfalls zufällig im Segment R1 (links) bzw. im Segment S (rechts) positionierten Defekts (aus visuellen Gründen ist nur jeder zweite inter-/extrapolierte Frequenzwert dargestellt)

Mittels der dargelegten Datenerweiterung konnte die **Datenmenge** auf effiziente Weise signifikant vergrößert werden. Ausgehend von den drei in den FEM-Simulationen einbezogenen Defektgrößen bilden die Trainingsdaten nun 26 zusätzliche und somit insgesamt 29 unterschiedliche Defektgrößen ab. Dabei beschreiben die erweiterten Daten in Summe 440 000 virtuelle Trainingspleuel, und zwar weiterhin 5000 IO-Pleuel sowie nun 435 000 NIO-Pleuel (5000 Geometrien \times 29 äquidistant abgestufte Defektdurchmesser zwischen 0,8 mm und 3,6 mm \times 3 jeweils zufällige Defektpositionen).

Die im Umfang nun vollständigen Trainingsdaten wurden im Hinblick auf die Weiterverarbeitung geeignet strukturiert, wobei die Frequenzdaten aller virtuellen Trainingspleuel in einer (440 000 \times 18)-Matrix abgelegt wurden. Diese bezieht sich zeilenweise auf die in Summe 440 000 Teile und spaltenweise auf die 18 maßgeblichen Eigenfrequenzmerkmale f_1, \dots, f_{18} . Auf analoge Weise wurden die auf die Qualitätszustände der Trainingspleuel bezogenen Informationen (IO/NIO bzw. Defektgrößen und -positionen) sowie die individuellen geometrischen Abmessungen der Teile zusammengeführt.

Referenzpleuel für Abgleiche zwischen ART- und FEM-Frequenzdaten

Zur Analyse der fundamentalen Abweichungen zwischen den FEM-simulierten Eigenfrequenzen virtueller und den ART-gemessenen Frequenzdaten realer Pleuel wurden die in Abschn. 5.2 beschriebenen **realen Referenzpleuel** $R-1$ bis $R-5$ zugrunde gelegt. Diese Teile wurden nach dem Vorbild der IO-Referenzkonfiguration gefertigt, die die strukturellen Eigenschaften der defektfreien *AGG*-Pleuel des Anwendungsszenarios im Mittel abbildet. Die Referenzpleuel bestehen aus demselben Aluminiumwerkstoff wie die final zu klassifizierenden realen Validierpleuel, wobei alle diese realen Teile aus material- und fertigungstechnologischer Sicht aus derselben Charge stammen. Die Eigenfrequenzen der realen Referenzpleuel bzgl. der relevanten Merkmale f_1 bis f_{18} wurden mittels ART bestimmt. Zusätzlich wurden die theoretisch zu erwartenden Eigenfrequenzen der Pleuel per FEM simuliert, wozu digitale Zwillinge der Teile unter Berücksichtigung ihrer messtechnisch charakterisierten Ist-Geometrien erstellt wurden. Die FEM-Modellierungen der Pleuel wurden dabei unter Beachtung sämtlicher Idealisierungen umgesetzt, denen auch die virtuellen Trainingspleuel unterliegen.

Datentransformation aus der »Simulationswelt« in die »Messwelt«

Unter anderem da die simulationsbasiert erzeugten Trainingspleuel-Eigenfrequenzen auf gewissen Idealisierungen basieren, unterscheiden sie sich wesentlich von entsprechenden Messdaten. Dieser Sachverhalt wurde ausführlich in Abschn. 5.3 am Beispiel der realen Referenzpleuel $R-1$ bis $R-5$ behandelt. Als Lösungsstrategie zur Eliminierung systematischer Abweichungen bzw. zwecks Transformation der Daten aus der »Simulationswelt« in die »Messwelt« wurden **Korrekturfaktoren** ermittelt, die auf Basis eines Vergleichs der gemessenen Eigenfrequenzen der Referenzpleuel mit den simulierten Frequenzwerten ihrer digitalen Zwillinge berechnet wurden. Dabei wurde ausgenutzt, dass die Referenzpleuel aus derselben Charge stammen wie die im letzten Demonstrationsschritt zu analysierenden realen Validierpleuel und dass bei den begleitenden FEM-Simulationen zudem Idealisierungen berücksichtigt wurden, die denen der virtuellen Trainingspleuel entsprechen. Folglich verknüpfen die Referenzpleuel beide »Welten«. Zur eigentlichen quantitativen Anpassung der Trainingspleuel-Eigenfrequenzen wurden diese mit den in Tab. 5.6 angegebenen modenspezifischen Korrekturfaktoren multipliziert.

Eine testweise Justage der FEM-simulierten Referenzpleuel-Eigenfrequenzen mittels der Korrekturfaktoren führte zur Erkenntnis, dass geringfügige **residuale Abweichungen** zwischen faktoriell korrigierten synthetischen und gemessenen Pleuel-Eigenfrequenzen zu erwarten sind, schätzungsweise in der Größenordnung von meist höchstens $\pm 0,1\%$ (vgl. Abb. 5.30). Um diesen Punkt zu adressieren, wurden im Verlauf der Demonstration drei Trainingsdaten-Varianten eingesetzt, die sich nur in den Frequenzwerten unterscheiden. Als erste Variante wurden die faktoriell angepassten synthetischen Eigenfrequenzen der Trainingspleuel ohne Weiteres verwendet, d. h. ohne die charakteristischen Residuen zu berücksichtigen. Für die zweite und dritte Variante wurden die Frequenzen hingegen im Anschluss an die faktorielle Anpassung mit stochastisch unabhängigen, gleichverteilten

Zufallszahlen verrauscht. Dadurch sollten praxisrelevante Einflüsse unbekannter Natur, die sich in den Messdaten realer Pleuel widerspiegeln, bzw. die residualen Abweichungen abgebildet werden. Im Detail wurde dabei im Fall der zweiten Trainingsdaten-Variante ein **Rauschniveau** von $\pm 0,1\%$ vorgegeben, was einer realitätsgetreuen Größenordnung in Anlehnung an die für die Referenzpleuel festgestellten Residuen entspricht. Im Gegensatz dazu wurde in die dritte Trainingsdaten-Variante ein bewusst übermäßiges Rauschniveau implementiert, wobei die synthetischen Eigenfrequenzwerte mit Zufallseffekten in Intervallen von $\pm 0,3\%$ beaufschlagt wurden.

Die o. g. drei **Trainingsdaten-Varianten** werden im weiteren Verlauf des Dokuments folgendermaßen mit Kürzeln bezeichnet und wie angegeben umschrieben:

- **Variante »T0«** → Daten ohne Rauschen → »unverrauschte Trainingsdaten«
- **Variante »T1«** → Daten mit realitätsgetreuem Rauschen in Bereichen von $\pm 0,1\%$ → »realitätsgetreu verrauschte Trainingsdaten«
- **Variante »T3«** → Daten mit übermäßigem Rauschen in Bereichen von $\pm 0,3\%$ → »übermäßig verrauschte Trainingsdaten«

Klassensystem und Zuordnung der Daten (qualitätsabhängige Labels)

Die transformierten synthetischen ART-Trainingsdaten wurden zuletzt in ein geeignetes **Klassensystem** eingeordnet bzw. dementsprechend gelabelt, was primär darauf abzielte, neben binären IO/NIO-Prüfurteilen später auch quantitative Aussagen zu den Defekten von NIO-Teilen treffen zu können. Konkret wurden insgesamt 610 mit unterschiedlichen Qualitätsabstufungen verknüpfte Klassen definiert, und zwar eine einzige IO-Klasse, der alle 5000 virtuellen IO-Trainingspleuel bzw. deren Daten zugeordnet wurden, sowie 609 NIO-Klassen, denen die NIO-Trainingspleuel bzw. Datenreihen zugewiesen wurden. Die 609 NIO-Klassen bzw. die unterschiedlichen NIO-Labels separieren dabei wie folgt nach Defektgröße und Defektposition:

- 1) Die 29 in den Trainingsdaten abgebildeten **Defektdurchmesser** (0,8 mm, 0,9 mm, ..., 3,6 mm) wurden verwendet, um die NIO-Pleuel/Datenreihen initial in Abhängigkeit von der jeweiligen Ist-Defektgröße zu labeln.
- 2) Die drei in den Zylinderring-Segmenten bzw. im Steg-Segment festgelegten Defektbereiche (siehe Abb. 4.4) wurden zur Diskretisierung der stetig gleichverteilt in den Trainingsdaten abgebildeten **Defektpositionen** in je sieben äquidistante Sektoren segmentiert, wobei die Bauteilsymmetrie berücksichtigt wurde.⁵⁸ Abb. 6.3 skizziert die insgesamt 21 resultierenden Sektoren. Die Labels der NIO-Teile/Daten wurden schließlich jeweils um eine eindeutige Bezeichnung entsprechend des Sektors erweitert, in dem der jeweilige Durchgangsbohrungs-Defekt liegt.

⁵⁸⁾ Aufgrund der Symmetrie der Pleuel-Geometrie hinsichtlich der x - z -Ebene des Pleuel-KOS kann eine Defektposition nicht von einer an dieser Ebene gespiegelten Position unterschieden werden.

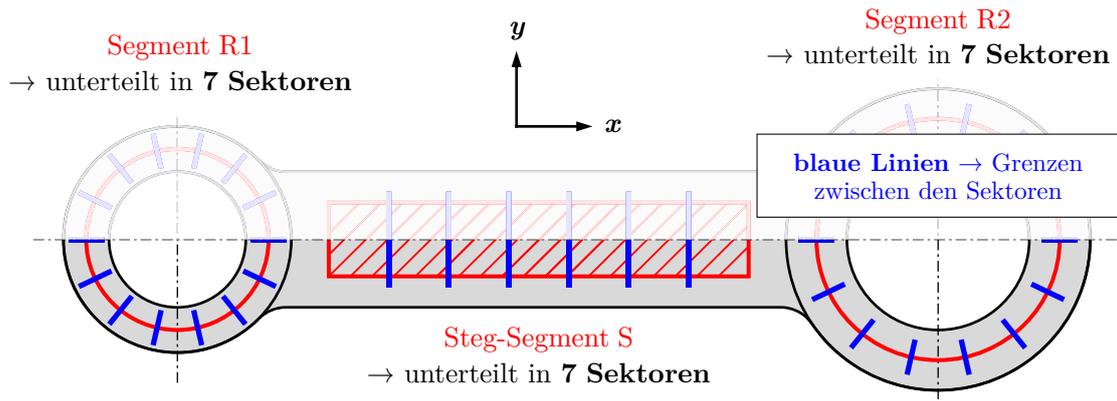


Abb. 6.3: Sektoren zur Beschreibung der Position des Durchgangsbohrungs-Defekts in einem NIO-Pleuel mit dem Ziel der Diskretisierung der möglichen Defektpositionen

Die 609 NIO-Klassen (29 diskrete Defektgrößen \times 21 Sektoren bzgl. der Defektposition) sind jeweils mit einer individuellen, diskretisierten **Defektausprägung** verknüpft. Das heißt, dass jede NIO-Klasse nur die Datenreihen bzw. die NIO-Trainingspleuel umfasst, die allesamt einen identischen Defektdurchmesser aufweisen und deren jeweiliger Defekt zugleich in einem identischen Sektor liegt. Jedes NIO-Label benennt also eine bestimmte Defektgröße sowie eine diskretisierte Defektposition.

Das Klassensystem konnte aber nicht beliebig komplex gestaltet werden. Denn bei einer testweisen Klassifikator-Berechnung wurde ein rapide mit der Anzahl der Klassen ansteigender Bedarf an Rechenleistung/Arbeitsspeicher erkannt. Mit dem definierten Klassensystem wurde bereits annähernd die Leistungsgrenze der genutzten Computerhardware erreicht, zumindest bei den Berechnungen einiger der später in Abschn. 6.2 dargelegten Klassifikatoren. Zudem wurde der Trainingsdatenumfang ab einer gewissen Komplexität der Klassifikatoren als limitierend gesehen. So entfallen auf die IO-Klasse 5000, auf jede der 609 NIO-Klassen aber nur ca. $15\,000/21 \approx 714$ Trainingspleuel (wegen der zufälligen Defektpositionierung im rechnerischen Mittel).⁵⁹ Da die Klassifikatoren der Arbeit bis zu 54 Eingangsgrößen einbeziehen, mussten umfangreiche Modelle mit zahlreichen Modellparametern berechnet werden. Mit dem gewählten Klassensystem geht einher, dass auf jede Eingangsgröße in jedem Fall mindestens noch etwas mehr als zehn Trainingspleuel bzw. Datenreihen aus jeder NIO-Klasse entfallen, was als noch ausreichend eingeschätzt wurde, um überangepasste Klassifikatoren zu vermeiden.

⁵⁹⁾ Zu jeder der diskreten Defektgrößen existieren 3×5000 NIO-Trainingspleuel. Die Defektpositionen dieser Teile streuen dabei gleichmäßig über die insgesamt 3×7 Sektoren, womit schließlich ebenso viele NIO-Klassen pro diskret abgestufter Defektgröße einhergehen.

6.2 Ermittlung mehrerer ART-Klassifikatoren

Der zweite Schritt des simulationsbasierten ART-Trainings bestand in der **Ermittlung eines ART-Klassifikators** für die Qualitätsprüfung von Pleueln auf Basis der synthetischen ART-Trainingsdaten (vgl. Kap. 3). Genau genommen wurden mehrere Klassifikatoren aus den in Abschn. 6.1 beschriebenen synthetischen ART-Daten abgeleitet, die sich zum einen in Bezug auf die Eingangsgrößen und zum anderen im Rauschniveau der zugrundeliegenden Trainingsdaten unterscheiden.

Sämtliche Klassifikatoren wurden so ausgelegt, dass sie, neben binären Prüfurteilen, für NIO-Pleuel auch quantitative Aussagen zur jeweiligen Defektgröße und -position zurückgeben können. Nachdem die synthetischen Trainingsdaten entsprechend dem erläuterten Klassensystem bereits auf geeignete Weise gelabelt wurden (eine IO-Klasse und 609 NIO-Klassen verknüpft mit unterschiedlichen, diskretisierten Defektausprägungen), waren im Prinzip hierzu keine speziellen Aufwände beim Design der Klassifikatoren mehr erforderlich. Die Klassifikatoren mussten im Wesentlichen lediglich auf Grundlage der gelabelten Daten berechnet werden, sodass sie die möglichen Klassenlabels bzw. die diskretisierten Pleuel-Qualitätszustände »lernen« konnten.

Mathematische Methode zur Klassifizierung (Klassifikationsverfahren)

Der Fokus lag nicht auf der Auswahl oder Entwicklung des leistungsfähigsten Klassifikationsverfahrens, sondern auf der grundsätzlichen Demonstration. Die konkrete mathematische Methode wurde daher als obligatorisches Werkzeug gesehen, sodass ein prinzipiell tauglicher, aber nicht unbedingt der »beste« Klassifizierungsansatz den Anforderungen genüge. In Anbetracht dessen wurde die Eignung standardmäßiger Verfahren empirisch analysiert. Hierbei fiel die Wahl auf die quadratische **Diskriminanzanalyse**, siehe z. B. [Eck13; Bac18]. Zur Umsetzung, d. h. zur Berechnung entsprechender konkreter Klassifikatoren, kam die MATLAB[®]-Funktion `fitcdiscr` (»fit discriminant analysis classifier«, Argumente: 'DiscrimType', 'pseudoquadratic') zum Einsatz.

Modellierung der Klassifikatoren hinsichtlich der Eingangsgrößen

Als **Eingangsgrößen** (d. h. als die zum Ziel der Ermittlung von Prüfurteilen analysierten Parameter bzw. Merkmale) wurden bei den Modellierungen der Klassifikatoren stets die 18 Pleuel-Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} implementiert. Optional wurden darüber hinaus einige Hauptgeometrieparameter (siehe Abb. 4.3) als zusätzliche Eingangsgrößen berücksichtigt – entweder alle acht oder lediglich vier dieser Parameter, wobei dann die Innendurchmesser d_{R1} und d_{R2} der zwei Zylinderring-Segmente, die Stegbreite b_S und die Steghöhe h_S verwendet wurden. Zwecks optionaler Abbildung von Wechselwirkungseffekten wurden außerdem die Quadratwurzeln aller paarweisen Produktterme aus den implementierten Geometrieparametern einbezogen, was schließlich (nach den Regeln der Kombinatorik) in 28 bzw. in sechs weiteren Eingangsgrößen mündete.

Zur Kennzeichnung der Klassifikatoren hinsichtlich der Eingangsgrößen wurden Kürzel definiert, wobei »F« die standardmäßige Implementierung der Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} als Eingangsgrößen angibt. Mit »g« bzw. »G« wird die Berücksichtigung von vier bzw. allen acht Hauptgeometrieparametern als weitere Eingangsgrößen gekennzeichnet; ergänzend geben »1« oder »2« an, ob ein Klassifikator die Geometrie zur Entscheidungsfindung nur unmittelbar oder auch in Form von Produkt- bzw. Wechselwirkungstermen einbezieht. Im Detail wurden letztlich folgende **Eingangsgrößen-Varianten** umgesetzt (in Klammern: Anzahl der jeweiligen Eingangsgrößen):

- **Variante »F«** → nur Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} (18)
→ insgesamt **18 Eingangsgrößen**
- **Variante »F-g1«** → Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} (18) & Hauptgeometrieparameter d_{R1} , d_{R2} , b_S und h_S (4) ohne Wechselwirkungsterme
→ insgesamt **22 Eingangsgrößen**
- **Variante »F-g2«** → Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} (18) & Hauptgeometrieparameter d_{R1} , d_{R2} , b_S und h_S (4) zzgl. Wechselwirkungstermen (6)
→ insgesamt **28 Eingangsgrößen**
- **Variante »F-G1«** → Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} (18) & sämtliche Hauptgeometrieparameter (8) ohne Wechselwirkungsterme
→ insgesamt **26 Eingangsgrößen**
- **Variante »F-G2«** → Eigenfrequenzmerkmale f_1 bis f_{18} (18) & sämtliche Hauptgeometrieparameter (8) zzgl. Wechselwirkungstermen (28)
→ insgesamt **54 Eingangsgrößen**

Berechnung konkreter Klassifikatoren für die Pleuel-Qualitätsbewertung

Auf Basis der o. g. fünf Eingangsgrößen-Varianten (F , $F-g1$, $F-g2$, $F-G1$, $F-G2$) und der drei in Abschn. 6.1 erläuterten Trainingsdaten-Varianten ($T0$, $T1$, $T3$) wurden unter Berücksichtigung aller Kombinationen **15 konkrete Klassifikatoren** berechnet. Zu deren Benennung wurden die mit den Eingangsgrößen-/Trainingsdaten-Varianten verknüpften Kürzel paarweise kombiniert, z. B. zu $F/T1$, $F-g2/T1$ und $F-G2/T1$.⁶⁰

In Anh. D ist die Benennung der Klassifikatoren erneut knapp erläutert, wobei Tab. D.2 die Kurzbezeichnungen der den Klassifikatoren zugrundeliegenden Eingangsgrößen- und Trainingsdaten-Varianten einschließlich kurzer Beschreibungen zusammenfasst.

⁶⁰⁾ Die drei hier exemplarisch genannten Klassifikatoren $F/T1$, $F-g2/T1$ und $F-G2/T1$ stützen sich auf die realitätsgetreu verrauschten Daten. Sie beziehen entweder ausschließlich die Eigenfrequenzen ($F/T1$) ein, oder sie nutzen zusätzlich die Geometriedaten bzgl. vier ($F-g2/T1$) bzw. bzgl. allen acht ($F-G2/T1$) Hauptgeometrieparametern, jeweils einschließlich paarweiser Wechselwirkungsterme.

Bei den **Berechnungen** der Klassifikatoren wurden die Auftretenswahrscheinlichkeiten der unterschiedlichen Pleuel-Qualitätszustände (siehe Abb. 4.5) bzw. die Wahrscheinlichkeiten der mit den Qualitätszuständen verbundenen 610 Klassen berücksichtigt. Damit wurde zugleich rechnerisch korrigiert, dass die NIO-Teile/Datenreihen in den Trainingsdaten deutlich überrepräsentiert wurden, wohingegen für das Anwendungsszenario eine 50/50-Aufteilung der Grundgesamtheit in IO- und NIO-Teile unterstellt wurde. Zudem wurden die bei der Qualitätsprüfung der Pleuel möglichen Fehlklassifizierungen in Form von Strafpunkten berücksichtigt, wozu neutrale Vorgaben genutzt wurden (vgl. S. 44 in Abschn. 4.1). Konkret wurde Nachfolgendes spezifiziert, wobei der algorithmische Fokus der Berechnungen darin bestand, die Summe der für die Trainingspleuel vergebenen und über die Wahrscheinlichkeiten gewichteten Strafpunkte zu minimieren:

- **Auftretenswahrscheinlichkeiten nach Klassen (»prior«)**
 - 50 % für die einzige IO-Klasse
 - 0,082 % für jede der 609 NIO-Klassen⁶¹ (→ 50 %/609 \approx 0,082 %)
- **Gewichtung von Fehlklassifizierungen mit Strafpunkten (»cost«)**
 - 0 Punkte bei korrekter IO-Bewertung eines IO-Teils
 - 1 Punkt bei irrtümlicher NIO-Bewertung eines IO-Teils
 - 0 Punkte bei korrekter Einstufung eines NIO-Teils in die richtige NIO-Klasse
 - 0,01 Punkte bei unpräziser Einstufung eines NIO-Teils in die falsche NIO-Klasse
 - 1 Punkt bei irrtümlicher IO-Bewertung eines NIO-Teils

Die 15 ermittelten Klassifikatoren sind Funktionen, die Aussagen zum Qualitätszustand eines Pleuels treffen können. Hierzu werden einem Klassifikator die Eigenfrequenzen des zu analysierenden Pleuels übergeben – und je nach Klassifikator auch die zusätzlich von ihm erwarteten Geometriedaten. Der Klassifikator gibt daraufhin eine konkrete Klassifizierung zurück (im Text vor dem ZfP-Anwendungshintergrund v. a. auch als Prüfurteil oder Prüfentscheidung bezeichnet). Das heißt, er stuft das Teil in das definierte Klassensystem ein, wobei er genau genommen die Klasse benennt, der er das Teil auf Basis der ihm übergebenen Bauteildaten zuordnet. Anhand dieses geschätzten Klassenlabels lässt sich erkennen, ob das Teil als IO oder NIO eingestuft wurde. Bei einer NIO-Beurteilung gehen aus dem Label außerdem diskrete Schätzwerte (609 mögliche NIO-Klassen/Labels) für die Größe und die Position des unterstellten Defekts hervor.

⁶¹⁾ Aus den Gleichverteilungen von Defektgröße und -position folgt in Verbindung mit dem definierten Klassensystem (in konstanten Schritten abgestufte Defektgröße sowie Diskretisierung der Defektposition in äquidistante Sektoren) dieselbe Wahrscheinlichkeit für jede NIO-Klasse.

FEM-simulierte Validierpleuel zur Klassifikator-Überprüfung

Mit dem Ziel, die theoretischen Performances der Klassifikatoren zu überprüfen, wurden die in Abschn. 5.1 dargelegten **virtuellen Validierpleuel** genutzt. Diese Validierpleuel sind (nicht physisch existierende) Realisierungen der gemäß der Konzeption des Anwendungsszenarios zu beurteilenden *AGG*-Pleuel; es handelt sich um konkrete *AGG*-Pleuel. Die Geometrien der Teile variieren in den Abmessungen bzgl. der acht Hauptgeometrieparameter mit den *AGG*-Erwartungswerten und Standardabweichungen normalverteilt. Die von Teil zu Teil konstanten Materialeigenschaften der virtuellen Validierpleuel sind identisch mit denen der Trainingspleuel (isotroper Aluminiumwerkstoff). Die virtuellen Validierpleuel umfassen neben 1000 IO-Pleueln auch 5×3000 NIO-Pleuel mit je einem Durchgangsbohrungs-Defekt. Innerhalb jeder der fünf Gruppen à 3000 NIO-Teile ist der Defektdurchmesser einheitlich. Dieser beträgt 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm oder 3 mm, womit der als relevant festgelegte Defektgrößen-Wertebereich des Anwendungsszenarios in Stufen abgedeckt wird. Die Defektpositionen der NIO-Teile sind zufällig. Die Defekte streuen in allen Gruppen stetig gleichverteilt über die drei Defektbereiche, wobei sie sich zu gleichen Anteilen auf das Zylinderring-Segment R1, das Zylinderring-Segment R2 und das Steg-Segment S verteilen. Die Eigenfrequenzen der virtuellen Validierpleuel bzgl. der relevanten Merkmale f_1 bis f_{18} wurden per FEM berechnet.

Überprüfung: Ermittlung und Analyse von Prüfurteilen

Im ersten Schritt der Klassifikator-Überprüfung wurden die virtuellen Validierpleuel mithilfe aller Klassifikatoren hinsichtlich ihrer Qualitätszustände klassifiziert. Dazu wurden den Klassifikatoren die maßgeblichen Bauteildaten der Pleuel übergeben, d. h. die Eigenfrequenzen bzgl. der Frequenzmerkmale f_1 bis f_{18} und ggf. auch die je nach Klassifikator zusätzlich analysierten Geometriedaten. Da alle Klassifikatoren auf synthetischen Eigenfrequenzdaten fußen, die mit modenspezifischen Korrekturfaktoren transformiert wurden, wurden dieselben Faktoren auch auf die FEM-simulierten Eigenfrequenzen der virtuellen Validierpleuel angewandt. Dies ermöglichte schließlich die unmittelbare Verwendung der Klassifikatoren hinsichtlich der virtuellen Validierpleuel.

Im zweiten Schritt der Überprüfung wurden die von den Klassifikatoren bereitgestellten **Prüfurteile** analysiert. Die Prüfurteile bzw. die damit verbundenen, geschätzten Qualitätsausprägungen wurden mit den bekannten Ist-Zuständen der virtuellen Validierpleuel abgeglichen. Statistische Kennwerte wurden abgeleitet, um die theoretischen (auf Basis simulierter Daten erzielten) Performances der 15 Klassifikatoren zu quantifizieren. Dabei standen u. a. folgende Fragestellungen im Raum: *Inwiefern wurden die Qualitätszustände der Teile korrekt geschätzt? Ermöglichen die Klassifikatoren theoretisch eine verlässliche IO/NIO-Trennung von Pleueln bzw. präzise Aussagen zur Größe/Position eines Defekts? Von welchen Nachweisgrenzen ist auszugehen?*

Überprüfung: Analyse der Prüfurteile (→ IO/NIO-Trennung)

Die Prüfurteile wurden zuerst mit Fokus auf die binäre **IO/NIO-Trennung** analysiert. Im Detail wurde untersucht, inwiefern die virtuellen Validierpleuel korrekterweise als IO bzw. grundsätzlich korrekt als NIO klassifiziert wurden (ohne dabei zu beachten, ob die als NIO erkannten NIO-Teile auch der jeweils richtigen der 609 NIO-Klassen zugeordnet wurden). Um die Performances der ermittelten Klassifikatoren zu quantifizieren, wurden IO-Erkennungsraten (TNR) sowie defektgrößenspezifische NIO-Erkennungsraten (TPR) auf Basis der Prüfurteile abgeleitet (vgl. Abschn. 2.2.5). Tab. 6.1 und Abb. 6.4 geben die für die virtuellen Validierpleuel festgestellten Erkennungsraten tabellarisch bzw. grafisch an, jeweils separat für die 15 eingesetzten Klassifikatoren sowie in Abhängigkeit von den Ist-Qualitätszuständen der Teile (IO bzw. NIO/Ist-Defektgröße).

Tab. 6.1: IO-Erkennungsrate (TNR) und NIO-Erkennungsraten (TPR, abhängig von der Ist-Defektgröße) für die virtuellen Validierpleuel in Abhängigkeit vom Klassifikator

Klassifi- kator	Eingangsgrößen				TNR (IO- Pleuel)	TPR abhängig von der Ist-Defektgröße (NIO-Pleuel)				
	Eigenfrequenzen	Geometrieparam.	WW-Terme ^(*)	Trainingsdaten- Rauschniveau		1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	3 mm
<i>F/T0</i>	✓	✗	✗	✗	100 %	18,9 %	65,6 %	92,4 %	99,0 %	>99,9 %
<i>F-g1/T0</i>	✓	4/8	✗	✗	100 %	31,1 %	84,8 %	97,5 %	100 %	100 %
<i>F-g2/T0</i>	✓	4/8	✓	✗	100 %	54,4 %	93,9 %	99,6 %	100 %	100 %
<i>F-G1/T0</i>	✓	8/8	✗	✗	100 %	35,9 %	89,2 %	99,2 %	100 %	100 %
<i>F-G2/T0</i>	✓	8/8	✓	✗	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
<i>F/T1</i>	✓	✗	✗	±0,1 %	100 %	0 %	17,8 %	63,0 %	93,4 %	98,3 %
<i>F-g1/T1</i>	✓	4/8	✗	±0,1 %	100 %	0 %	31,3 %	83,4 %	97,1 %	100 %
<i>F-g2/T1</i>	✓	4/8	✓	±0,1 %	100 %	0 %	46,2 %	90,0 %	99,3 %	100 %
<i>F-G1/T1</i>	✓	8/8	✗	±0,1 %	100 %	0 %	35,5 %	90,7 %	100 %	100 %
<i>F-G2/T1</i>	✓	8/8	✓	±0,1 %	100 %	9,9 %	96,7 %	100 %	100 %	100 %
<i>F/T3</i>	✓	✗	✗	±0,3 %	100 %	0 %	0 %	14,9 %	42,5 %	78,7 %
<i>F-g1/T3</i>	✓	4/8	✗	±0,3 %	100 %	0 %	0 %	24,5 %	74,0 %	94,2 %
<i>F-g2/T3</i>	✓	4/8	✓	±0,3 %	100 %	0 %	0 %	32,5 %	80,4 %	95,6 %
<i>F-G1/T3</i>	✓	8/8	✗	±0,3 %	100 %	0 %	0 %	34,4 %	89,2 %	100 %
<i>F-G2/T3</i>	✓	8/8	✓	±0,3 %	100 %	0 %	19,9 %	93,5 %	100 %	100 %

^(*) WW-Terme → Wechselwirkungsterme (bzgl. der implementierten Geometrieparameter)

Formatierung TPR/TNR-Werte: rot → 0 % bis 37,5 %, orange → 37,5 % bis 75 %, gelb → 75 % bis 90 %, hellgrün → 90 % bis 95 %, dunkelgrün → 95 % bis 100 %, fett → »perfekte« Klassifikation (100 %)

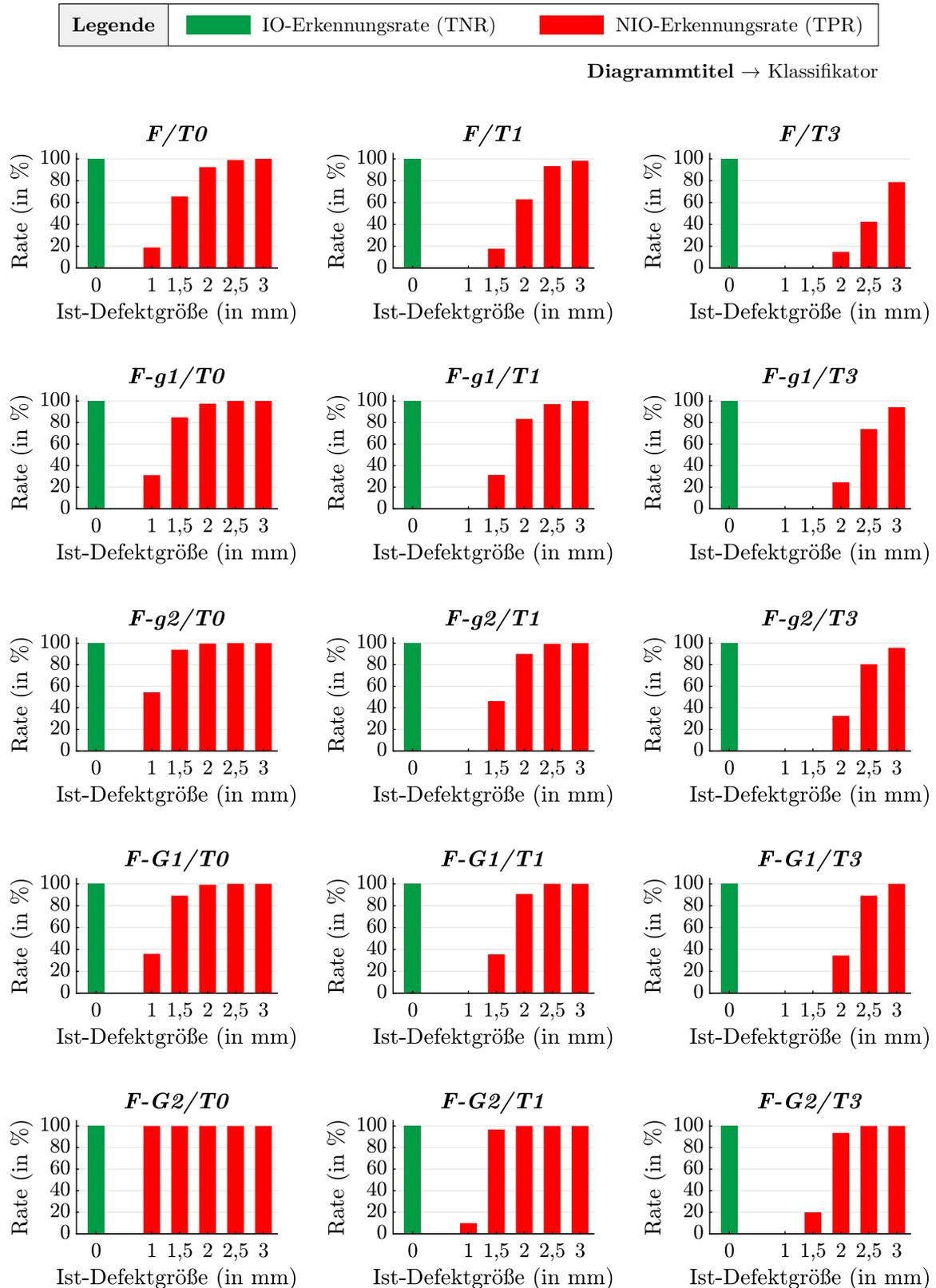


Abb. 6.4: IO-Erkennungsrate (TNR) und NIO-Erkennungsrate (TPR, abhängig von der Ist-Defektgröße) für die virtuellen Validierpleuel in Abhängigkeit vom Klassifikator (→ grafische 1:1-Interpretation der in Tab. 6.1 aufgeführten Erkennungsrate)

Wie Tab. 6.1 und Abb. 6.4 zeigen, erkannte jeder der 15 Klassifikatoren sämtliche virtuellen **IO-Validierpleuel** als defektfrei. Die für die **NIO-Pleuel** generierten Ergebnisse variieren hingegen mit dem eingesetzten Klassifikator (bzw. mit den zur Klassifizierung genutzten Eingangsdaten und dem Rauschniveau der zugrundeliegenden Trainingsdaten). In vielen Fällen erhöhte die ergänzende klassifikatorische Einbeziehung teilespezifischer Geometriedaten neben den Pleuel-Eigenfrequenzen die NIO-Erkennungsraten, wobei die Berücksichtigung der Abmessungen bzgl. sämtlicher acht Hauptgeometrieparameter den maximalen Mehrwert zur Folge hatte und zusätzlich einbezogene Wechselwirkungsterme die Anteile der als defekt identifizierten NIO-Pleuel weiter erhöhten. Mit einem höheren Rauschniveau der synthetischen Trainingsdaten gingen dabei regelmäßig vergleichsweise (deutlich) reduzierte NIO-Erkennungsraten einher.

Auf Basis der **unverrauschten Trainingsdaten** erzielte der Klassifikator $F/T0$ ab einer Defektgröße von 2 mm (2,5 mm) erstmalig die gemäß Abschn. 4.1 angestrebte NIO-Erkennungsrate von mindestens 90 % (95 %), und zwar ausschließlich durch die Analyse der Eigenfrequenzen. Der Klassifikator $F-g2/T0$ identifizierte mittels zusätzlich einbezogener anteiliger Geometriedaten inkl. Wechselwirkungstermen mehr als 90 % (95 %) der NIO-Teile ab der kleineren Defektgröße von 1,5 mm (2 mm) korrekterweise als beschädigt. Der Klassifikator $F-G2/T0$ erreichte mithilfe der vollständigen zur Verfügung stehenden Geometrieinformationen stets perfekte NIO-Erkennungsraten von 100 % – sogar im Fall der kleinsten Defektgröße von 1 mm. Verglichen damit erkannten die bzgl. der Eingangsgrößen analog designten, auf Basis der **realitätsgetreu verrauschten** Trainingsdaten berechneten Klassifikatoren $F/T1$, $F-g2/T1$ und $F-G2/T1$ mindestens 90 % (95 %) der NIO-Teile hingegen erstmals ab etwas (um je 0,5 mm) größeren Defektdurchmessern von 2,5 mm (3 mm), 2 mm (2,5 mm) bzw. 1,5 mm (1,5 mm). Die **übermäßig verrauschten** Trainingsdaten mündeten darin, dass der rein eigenfrequenzbasiert urteilende Klassifikator $F/T3$ in keinem der betrachteten Fälle eine zufriedenstellende NIO-Erkennungsrate erzielen konnte. Mittels der Klassifikatoren $F-g2/T3$ und $F-G2/T3$ wurden durch die zusätzliche anteilige bzw. vollständige Berücksichtigung aller verfügbaren Geometriedaten aber immerhin mehr als 90 % (95 %) der defekten Teile ab einer Defektgröße von 3 mm (3 mm) bzw. 2 mm (2,5 mm) als NIO erkannt.

Überprüfung: Analyse der Prüfurteile (→ Rückschlüsse auf Defekte)

Schließlich wurde analysiert, wie belastbar die erzielten Prüfurteile im Hinblick auf quantitative Aussagen zu den **Defektgrößen und -positionen** der NIO-Pleuel sind. Hierzu wurde aus den Prüfurteilen bzgl. der korrekt als NIO eingestuften NIO-Teile ausgelesen, welche NIO-Klasse jeweils zurückgegeben bzw. welche Defektausprägung damit einhergehend geschätzt wurde (Defektdurchmesser in Abstufungen von 0,1 mm sowie Defektposition diskretisiert in einen der 21 Sektoren). Die geschätzten Defektausprägungen wurden in der Folge dann mit den Ist-Defektausprägungen der Teile abgeglichen bzw. statistisch analysiert. Nachdem die Einbeziehung von Geometrie-Wechselwirkungstermen zuvor als förderlich erkannt wurde, werden im weiteren Verlauf die sechs Klassifikatoren ignoriert, die zwar Geometrieinformationen, jedoch keine Wechselwirkungseffekte berücksichtigen.

Weiterhin wurden – unter Beachtung der durchweg erzielten IO-Erkennungsrate (TNR) von 100 % und der Tatsache, dass algorithmische Rückschlüsse auf die Defektausprägungen der NIO-Pleuel nicht zielführend sind, sofern keine belastbare IO/NIO-Trennbarkeit gegeben ist – vorrangig die Kombinationen aus Klassifikator und Ist-Defektdurchmesser betrachtet, für die eine NIO-Erkennungsrate (TPR) von zumindest 90 % erreicht wurde (hell- bzw. dunkelgrün in Tab. 6.1 unterlegte TPR-Werte).

Tab. 6.2 gibt in Form von bedingten Wahrscheinlichkeiten an, für wie viele Prozent der als NIO identifizierten virtuellen NIO-Validierpleuel die jeweils geschätzte **Defektgröße** um höchstens $\pm 0,2$ mm vom jeweiligen Ist-Defektdurchmesser abweicht. Dabei sind die Resultate separat für jede Kombination aus Klassifikator und Ist-Defektgröße angegeben. Die Prozentwerte in blauer (bzw. in zusätzlich fetter) Schrift weisen darauf hin, dass im jeweiligen Fall 90 % (bzw. 95 %) oder mehr der defekten Validierpleuel irgendeiner, aber nicht unbedingt der in Bezug auf die Größe des Fehlers richtigen NIO-Klasse zugeordnet wurden (die in schwarzer Schrift formatierten Werte beziehen sich auf die nicht maßgeblichen Kombinationen, für welche keine NIO-Erkennungsrate von 90 % ermittelt wurde). Es ist erkennbar, dass, sofern 90 % oder mehr der NIO-Pleuel korrekterweise aussortiert wurden, umso präzisere Rückschlüsse auf die Defektgrößen erreicht wurden, je niedriger das Rauschniveau der den Klassifikatoren zugrundeliegenden Trainingsdaten vorgegeben wurde. Daneben ist zu sehen, dass die Verwendung von Geometriedaten als zusätzlicher Klassifizierungsinput die Aussagekraft der Klassifikatoren in Bezug auf die Defektgröße erhöhte. Eine belastbare IO/NIO-Trennung vorausgesetzt, wurde die Defektgröße dabei, je nach Klassifikator, immer für mindestens 87 % und meist sogar für deutlich mehr als 90 % der als NIO erkannten NIO-Teile präzise geschätzt.

Tab. 6.2: Anteil der als NIO identifizierten virtuellen NIO-Validierpleuel mit zugleich präzise geschätzter Defektgröße in Abhängigkeit vom Klassifikator und der Ist-Defektgröße (blau bzw. zus. fett \rightarrow TPR \geq 90 % bzw. TPR \geq 95 %; schwarz & in Klammern \rightarrow TPR $<$ 90 %)

Klassifikator	NIO-bewertete NIO-Teile mit präzise geschätzter Defektgröße ($\rightarrow \pm 0,2$ -mm-Präzision) in Abhängigkeit von der Ist-Defektgröße				
	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	3 mm
<i>F/T0</i>	(99,5 %)	(92,8 %)	90,1 %	93,2 %	96,1 %
<i>F-g2/T0</i>	(100 %)	95,0 %	98,0 %	99,4 %	99,9 %
<i>F-G2/T0</i>	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
<i>F/T1</i>	–	(99,1 %)	(85,9 %)	87,2 %	88,1 %
<i>F-g2/T1</i>	–	(99,4 %)	92,2 %	93,6 %	98,3 %
<i>F-G2/T1</i>	(100 %)	98,5 %	99,7 %	100 %	100 %
<i>F/T3</i>	–	–	(99,1 %)	(85,0 %)	(80,4 %)
<i>F-g2/T3</i>	–	–	(99,1 %)	(88,0 %)	87,1 %
<i>F-G2/T3</i>	–	(97,5 %)	86,7 %	96,7 %	99,8 %

Tab. 6.3 beinhaltet analoge Resultate zu den virtuellen NIO-Validierpleueln hinsichtlich der **Defektposition**, erneut in Abhängigkeit vom Klassifikator und der Ist-Defektgröße (identische Formatierung der Werte wie in Tab. 6.2). Dabei ist angegeben, für wie viele Prozent der als NIO bewerteten virtuellen NIO-Validierpleuel der geschätzte Sektor mit dem Sektor übereinstimmt, in dem sich der jeweilige Defekt tatsächlich befindet. Erneut gilt, wenn auch nicht so ausgeprägt wie im Hinblick auf die Defektgröße, dass mit einem niedrigeren Rauschniveau der zugrundeliegenden Trainingsdaten etwas präzisere Urteile einhergingen. Zusätzlich einbezogene Geometriedaten verbesserten die Aussagekraft der Klassifikatoren bzgl. der Defektposition in gewissem Maße. Für fast alle der analysierten Kombinationen wurde, sofern auch zumindest 90 % der NIO-Teile als solche identifiziert wurden, die Position des jeweiligen Defekts für mehr als 90 % der als NIO klassifizierten NIO-Teile korrekt geschätzt. Eine weitergehende Analyse vor dem Hintergrund, dass ein zufälliger Defekt nahe an der Grenze zwischen zwei benachbarten Sektoren liegen kann, zeigte, dass fast immer zumindest ein benachbarter Sektor des Sektors geschätzt wurde, in dem der Defekt tatsächlich liegt. Eine belastbare IO/NIO-Trennbarkeit vorausgesetzt, wurde die Defektposition lediglich vereinzelt deutlich falsch vorausgesagt, meist für viel weniger als 1,5 % der zurückgewiesenen NIO-Teile und überwiegend bei verhältnismäßig kleinen Defekten mit einem Durchmesser von 2 mm oder weniger.

Tab. 6.3: Anteil der als NIO identifizierten virtuellen NIO-Validierpleuel mit zugleich präzise geschätzter Defektposition in Abhängigk. vom Klassifikator und der Ist-Defektgröße (blau bzw. zus. fett → TPR \geq 90 % bzw. TPR \geq 95 %; schwarz & in Klammern → TPR $<$ 90 %)

Klassifikator	NIO-bewertete NIO-Teile mit präzise geschätzter Defektposition (→ korrekter Sektor) in Abhängigkeit von der Ist-Defektgröße				
	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	3 mm
<i>F/T0</i>	(78,1 %)	(87,1 %)	90,1 %	93,9 %	96,4 %
<i>F-g2/T0</i>	(86,9 %)	91,0 %	95,9 %	97,3 %	98,0 %
<i>F-G2/T0</i>	96,0 %	97,9 %	98,0 %	98,3 %	98,2 %
<i>F/T1</i>	–	(86,5 %)	(89,5 %)	92,2 %	93,5 %
<i>F-g2/T1</i>	–	(92,9 %)	92,0 %	95,5 %	97,7 %
<i>F-G2/T1</i>	(89,2 %)	91,2 %	95,5 %	97,9 %	98,5 %
<i>F/T3</i>	–	–	(88,4 %)	(90,3 %)	(91,7 %)
<i>F-g2/T3</i>	–	–	(93,1 %)	(92,3 %)	93,6 %
<i>F-G2/T3</i>	–	(82,6 %)	86,2 %	92,6 %	95,5 %

Die am Ende dieses Abschnitts aufgeführten Abbildungen 6.5 und 6.6 umfassen weitere Resultate mit Fokus auf die für die virtuellen NIO-Validierpleuel geschätzten Defektgrößen und Defektpositionen, wobei sie die folgenden Informationen beinhalten:

- Die Abbildungen beschränken sich auf die Resultate zu den NIO-Teilen, da die IO-Teile von allen Klassifikatoren zu 100 % als IO erkannt wurden. Die Darstellungen beziehen sich außerdem nur auf die Prüfurteile der Klassifikatoren $F/T1$, $F-g2/T1$ und $F-G2/T1$, die auf den realitätsgetreu verrauschten Daten fußen. Da keiner der Klassifikatoren die Pleuel mit 1-mm-Defekten verlässlich identifizieren konnte, sind die entsprechenden Resultate ebenfalls nicht visualisiert.
- Jedes der Diagramme nimmt Bezug auf einen der Klassifikatoren ($F/T1$, $F-g2/T1$, $F-G2/T1$) sowie eine Ist-Defektgröße (1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm, 3 mm). Die rote Linie gibt die jeweilige NIO-Erkennungsrate (TPR) an (vgl. Tab. 6.1/Abb. 6.4).
- Die Diagrammbalken quantifizieren die prozentualen Anteile der NIO-Teile, für die die Defektgröße (Abb. 6.5) bzw. die Defektposition (Abb. 6.6) exakt oder mit einer Präzision entsprechend der aufgetragenen Kategorien geschätzt wurde. Je nach Abbildung wird die Präzision als Vielfaches $\pm 0,1$ mm (Defektgröße, Abb. 6.5) oder als Anzahl von Sektoren (Defektposition, Abb. 6.6)⁶² angegeben.
- Jeder Diagrammbalken gibt den Anteil der mit der jeweiligen Präzision erkannten NIO-Pleuel bezogen auf alle NIO-Teile an, also im Sinne unbedingter Wahrscheinlichkeiten (anders als in Tab. 6.2 und Tab. 6.3, wo die Resultate mittels bedingter Wahrscheinlichkeiten angegeben sind, d. h. als die Anteile der präzise detektierten NIO-Pleuel bezogen auf die als NIO identifizierten NIO-Teile). Demnach gilt, dass die aufsummierte Höhe aller in einem Diagramm dargestellten Balken dem Niveau der roten Linie (NIO-Erkennungsrate) entspricht.

Fazit der theoretischen Klassifikator-Überprüfung

Die theoretische Überprüfung der auf Basis der synthetischen Trainingsdaten ermittelten Klassifikatoren führte zu vielversprechenden Ergebnissen. Zum einen wurde in vielen der untersuchten Fälle eine belastbare binäre Trennung zwischen den virtuellen IO- und den NIO-Validierpleueln erzielt. Dabei wurde beobachtet, dass die Identifizierbarkeit defekter Teile nicht nur von der Defektgröße abhängt, sondern erwartungsgemäß auch signifikant mit dem eingesetzten Klassifikator (bzw. mit den implementierten Eingangsgrößen sowie dem Rauschniveau der genutzten ART-Trainingsdaten) variiert. Zum anderen schlossen alle Klassifikatoren i. d. R. mit hoher Präzision auf die Defektausprägungen (Größen und Positionen) der korrekterweise aussortierten NIO-Teile. Die bisherigen Resultate deuten letztendlich ein großes Potential für die ART-Qualitätsprüfung der realen Validierpleuel mithilfe derselben Klassifikatoren an.

⁶²⁾ Die Präzision »0« bedeutet, dass der Sektor, in dem sich der Defekt eines NIO-Teils befindet, exakt geschätzt wurde, » ± 1 « heißt, dass ein benachbarter Sektor des richtigen Sektors geschätzt wurde, » ± 2 « meint, dass ein übernächster Nachbar des korrekten Sektors geschätzt wurde usw.

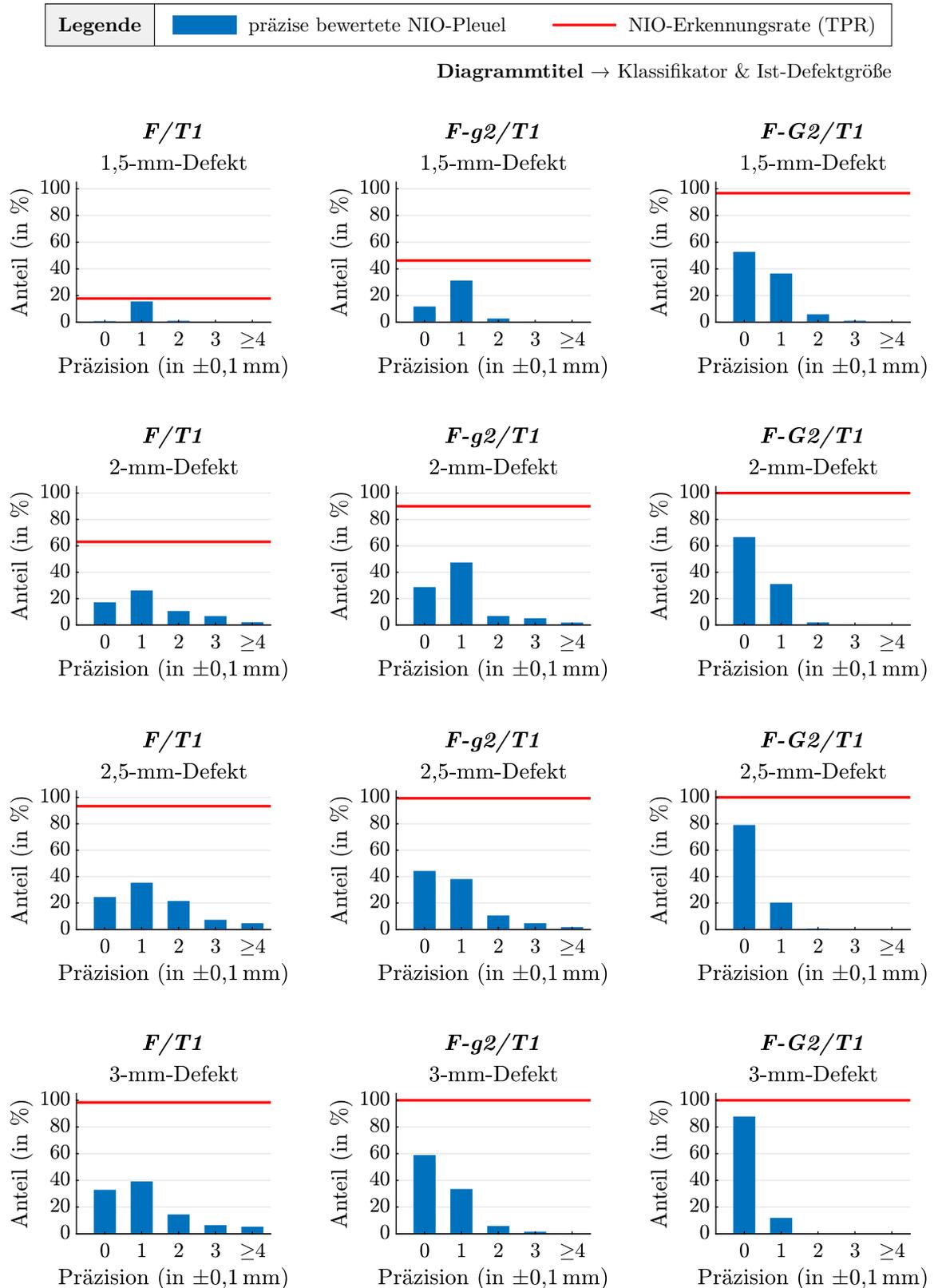


Abb. 6.5: Relativer Anteil der virtuellen NIO-Validierpleuel mit präzise geschätzter Defektgröße in Abhängigkeit vom Klassifikator, der Ist-Defektgröße und der erreichten Präzision (in Vielfachen von $\pm 0,1$ mm) sowie zugehörige NIO-Erkennungsrate

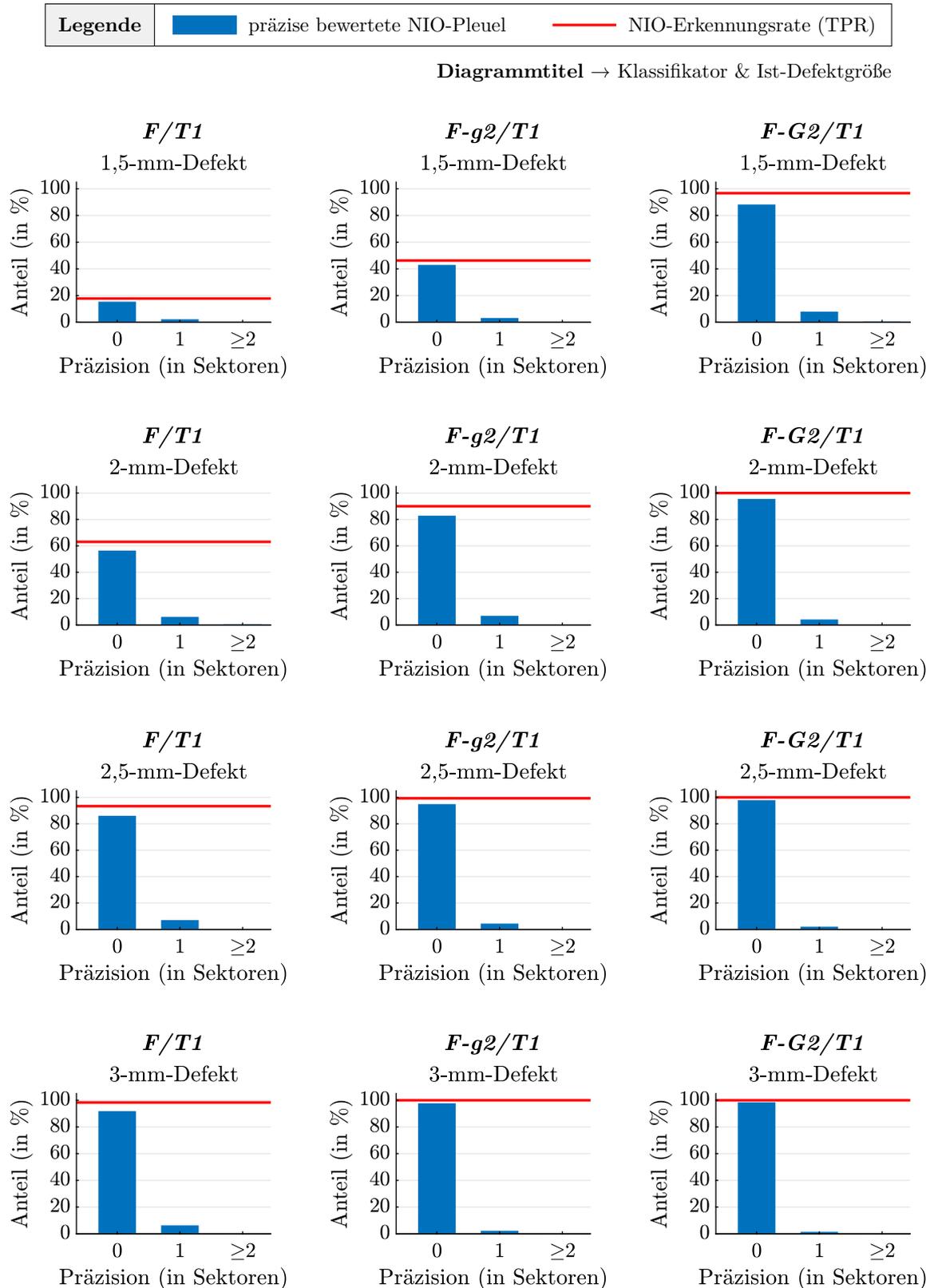


Abb. 6.6: Relativer Anteil der virtuellen NIO-Validierpleuel mit präzise geschätzter Defektposition in Abhängigkeit vom Klassifikator, der Ist-Defektgröße und der erreichten Präzision (in Anzahl von Sektoren) sowie zugehörige NIO-Erkennungsrate

6.3 Validierung anhand gefertigter Pleuel

Der finale dritte Schritt des simulationsbasierten ART-Trainings war die **Validierung** der zuvor auf Basis der synthetischen ART-Trainingsdaten berechneten Klassifikatoren anhand realer Pleuel bzw. experimenteller Daten (vgl. Kap. 3).

ART-gemessene Validierpleuel als finale Prüfobjekte

Die Validierung stützt sich auf die in Abschn. 5.2 vorgestellten **realen Validierpleuel** *V-1* bis *V-24*, bei denen es sich um reale Abbilder der gemäß der Definition des Anwendungsszenarios zu analysierenden *AGG*-Pleuel handelt. Die realen Validierpleuel wurden nach gewissen Geometrievorgaben aus der Aluminiumlegierung EN AW 6082 hergestellt und hinterher geometrisch vermessen. Die Eigenfrequenzen dieser Teile in Bezug auf die Merkmale f_1 bis f_{18} wurden per ART erfasst. In die 14 Pleuel *V-1* bis *V-7* und *V-13* bis *V-19* wurde im Verlauf jeweils ein individuell positionierter Durchgangsbohrungs-Defekt mit einer initialen Größe von 1 mm eingebracht, wobei die Defekte in 0,5-mm-Schritten bis auf finale Durchmesser von 3 mm erweitert wurden. Begleitend wurden die Eigenfrequenzen der entsprechenden Validierpleuel jeweils erneut ermittelt. Die experimentellen Daten decken somit nicht nur die IO-Zustände aller 24 realen Validierpleuel ab, sondern sie umfassen auch die Eigenfrequenzen zu den jeweils fünf verschiedenen NIO-Zuständen der 14 Pleuel *V-1* bis *V-7* und *V-13* bis *V-19*.⁶³

Drei der 24 realen Validierpleuel (*V-2*, *V-8* und *V-20*) wurden zuvor als auffällig identifiziert (siehe Abschn. 5.3.4). Die Eigenfrequenzen der Teile unterliegen nämlich einer im Detail unbekannt, aber nachweislich systematischen **Anomalie**. Ursächlich hierfür ist unter Umständen ein menschlicher Fehler wie die Fertigung der Teile aus einer anderen Materialcharge entgegen der Vorgabe. Um die Ergebnisse der Konzeptdemonstration in Anbetracht der vorliegenden Indizien und der Ungewissheit nicht zu verfälschen, wurden die drei Pleuel bei den nachfolgend gezeigten Analysen zunächst ausgelassen. Sie werden jedoch am Ende dieses Abschnitts gesondert behandelt. Damit reduziert sich die Anzahl der im Folgenden primär betrachteten Validierpleuel von 24 auf 21 (IO-Zustände/Teile) bzw. von 14 auf 13 (NIO-Zustände/Teile).

Validierung: Ermittlung und Analyse von Prüfurteilen

Um **Prüfurteile** für die realen Validierpleuel zu ermitteln, wurden die in Bezug auf die Merkmale f_1 bis f_{18} qualitätsabhängig ART-gemessenen Eigenfrequenzen der Teile an die Klassifikatoren übermittelt, einschließlich der je nach Klassifikator zusätzlich erwarteten Geometriedaten. Die von den Klassifikatoren zurückgegebenen Urteile wurden daraufhin im Vergleich mit den bekannten Ist-Qualitätszuständen der Pleuel analysiert, um festzustellen, inwiefern die getroffenen Entscheidungen korrekt sind.

⁶³⁾ Zur sprachlichen Vereinfachung werden die Pleuel mit den im Verlauf eingebrachten Defekten qualitätsabhängig als IO- oder als NIO-Pleuel bezeichnet, obwohl es sich bei den Teilen genau genommen um dieselben, in unterschiedlichen Zuständen wiederholt betrachteten Pleuel handelt.

Validierung: Analyse der Prüfurteile (→ IO/NIO-Trennung)

Auch die Prüfurteile bzgl. der realen Validierpleuel wurden zunächst im Hinblick auf die binäre **IO/NIO-Trennung** untersucht. Konkret wurde wieder analysiert, inwiefern die IO-Pleuel der IO-Klasse und die NIO-Teile irgendeiner der 609 NIO-Klassen zugeordnet wurden. Dazu wurden auf Basis der Prüfurteile erneut IO-Erkennungsraten (TNR) und defektgrößenspezifische NIO-Erkennungsraten (TPR) ermittelt, mit welchen die Performances der genutzten Klassifikatoren quantifiziert wurden (vgl. Abschn. 2.2.5). Tab. 6.4 und Abb. 6.7 stellen die für die realen Validierpleuel erreichten Erkennungsraten tabellarisch bzw. grafisch dar, wobei die Ergebnisse wieder gesondert für die 15 Klassifikatoren sowie in Abhängigkeit von den Ist-Qualitätszuständen der betrachteten Pleuel (IO bzw. NIO/Ist-Defektgröße) angegeben sind.

Tab. 6.4: IO-Erkennungsrate (TNR) und NIO-Erkennungsraten (TPR, abhängig von der Ist-Defektgröße) für die realen Validierpleuel in Abhängigkeit vom Klassifikator

Klassifikator	Eingangsgrößen			Trainingsdaten-Rauschniveau	TNR (IO-Pleuel)	TPR abhängig von der Ist-Defektgröße (NIO-Pleuel)				
	Eigenfrequenzen	Geometrieparam.	WW-Terme ^(*)			1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	3 mm
<i>F/T0</i>	✓	✗	✗	✗	19/21	3/13	10/13	13/13	13/13	13/13
<i>F-g1/T0</i>	✓	4/8	✗	✗	11/21	7/13	12/13	13/13	13/13	13/13
<i>F-g2/T0</i>	✓	4/8	✓	✗	9/21	8/13	12/13	13/13	13/13	13/13
<i>F-G1/T0</i>	✓	8/8	✗	✗	12/21	9/13	12/13	13/13	13/13	13/13
<i>F-G2/T0</i>	✓	8/8	✓	✗	3/21	13/13	13/13	13/13	13/13	13/13
<i>F/T1</i>	✓	✗	✗	±0,1%	21/21	0/13	3/13	9/13	13/13	13/13
<i>F-g1/T1</i>	✓	4/8	✗	±0,1%	21/21	0/13	7/13	12/13	13/13	13/13
<i>F-g2/T1</i>	✓	4/8	✓	±0,1%	21/21	1/13	8/13	13/13	13/13	13/13
<i>F-G1/T1</i>	✓	8/8	✗	±0,1%	21/21	0/13	9/13	13/13	13/13	13/13
<i>F-G2/T1</i>	✓	8/8	✓	±0,1%	21/21	5/13	13/13	13/13	13/13	13/13
<i>F/T3</i>	✓	✗	✗	±0,3%	21/21	0/13	0/13	2/13	6/13	11/13
<i>F-g1/T3</i>	✓	4/8	✗	±0,3%	21/21	0/13	0/13	4/13	12/13	13/13
<i>F-g2/T3</i>	✓	4/8	✓	±0,3%	21/21	0/13	0/13	5/13	12/13	13/13
<i>F-G1/T3</i>	✓	8/8	✗	±0,3%	21/21	0/13	0/13	8/13	13/13	13/13
<i>F-G2/T3</i>	✓	8/8	✓	±0,3%	21/21	1/13	9/13	13/13	13/13	13/13

^(*) WW-Terme → Wechselwirkungsterme (bzgl. der implementierten Geometrieparameter)

Formatierung TPR/TNR-Werte: rot → 0% bis 37,5%, orange → 37,5% bis 75%, gelb → 75% bis 90%, hellgrün → 90% bis 95%, dunkelgrün → 95% bis 100%, fett → »perfekte« Klassifikation (100%)

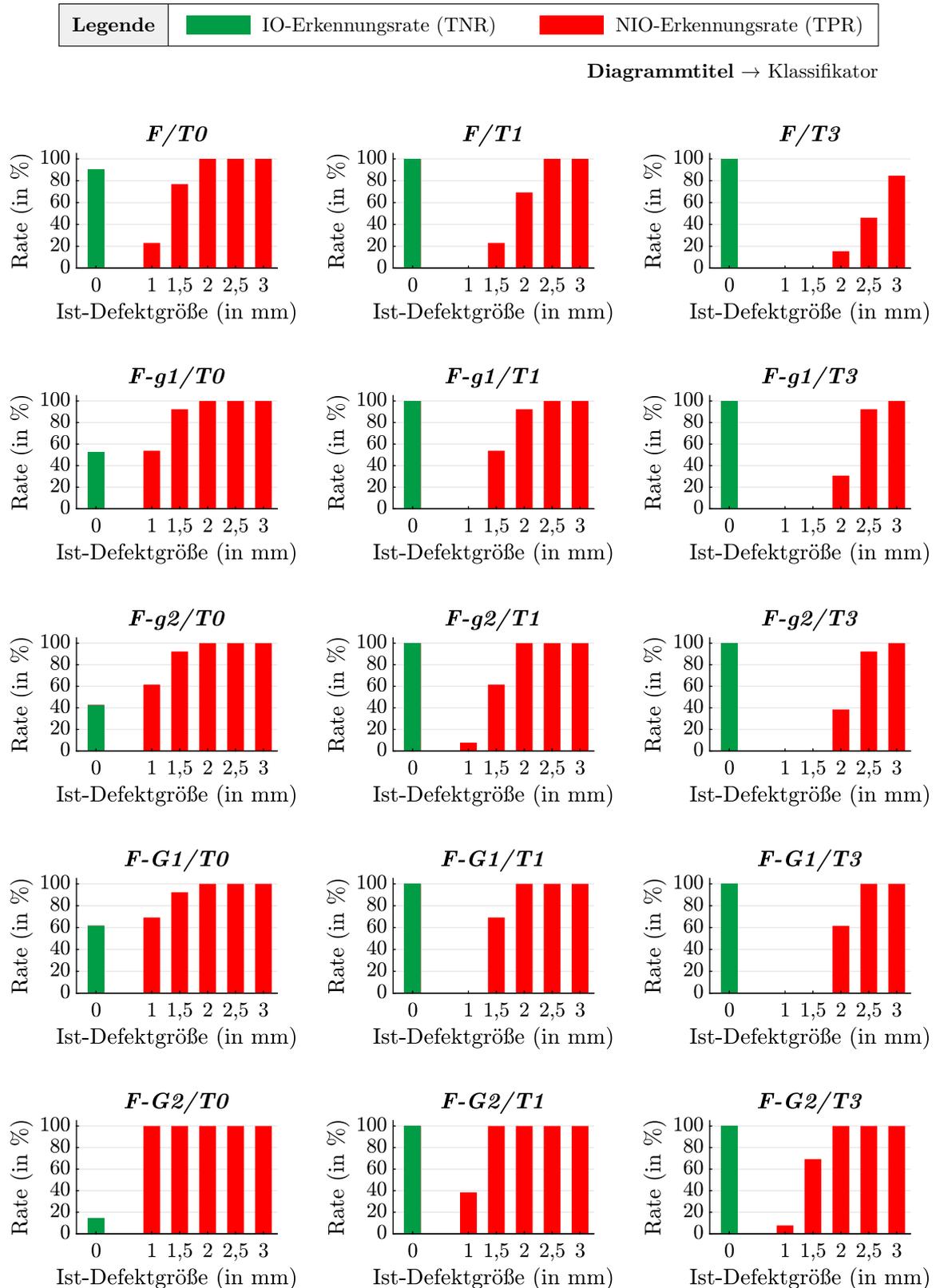


Abb. 6.7: IO-Erkennungsrate (TNR) und NIO-Erkennungsraten (TPR, abhängig von der Ist-Defektgröße) für die realen Validierpleuel in Abhängigkeit vom Klassifikator (→ grafische 1:1-Interpretation der in Tab. 6.4 aufgeführten Erkennungsraten)

Der Vergleich der in Tab. 6.4 und Abb. 6.7 für die realen Validierpleuel genannten NIO-Erkennungsraten mit den entsprechenden Ergebnissen zu den virtuellen Validierpleueln (siehe Tab. 6.1/Abb. 6.4 in Abschn. 6.2) zeigt die folgenden Gemeinsamkeiten in Bezug auf die zur Ermittlung der Prüfurteile analysierten Eingangsgrößen bzw. Eingangsdaten und das Rauschniveau der synthetischen Trainingsdaten:

- **Eingangsgrößen-Variante** → Die Verwendung teilespezifischer Geometriedaten als zusätzlicher Klassifizierungsinput neben den Eigenfrequenzen der Pleuel führte in etlichen Fällen zu vergleichsweise (ggf. deutlich) höheren NIO-Erkennungsraten. Wechselwirkungsterme verstärkten den Mehrwert der berücksichtigten Geometrieinformationen dabei meist mehr oder weniger deutlich.
- **Trainingsdaten-Variante** → Je niedriger das Rauschniveau der Trainingsdaten eingestellt wurde, desto höhere NIO-Erkennungsraten wurden regelmäßig erreicht, insbesondere im Hinblick auf kleinere oder mittelgroße Defekte.

Obwohl für die realen Validierpleuel oftmals ähnliche Erkennungsraten wie bei der theoretischen Überprüfung der Klassifikatoren erzielt wurden, zeigen Tab. 6.4 und Abb. 6.7 auch einige spezielle Charakteristika. So führten die **unverrauschten Trainingsdaten** zu Klassifikatoren, die zwar vergleichsweise hohe NIO-Erkennungsraten bzgl. der realen Validierpleuel erreichten. Durch die entsprechenden fünf Klassifikatoren wurden alle 13 NIO-Pleuel ab einem Defektdurchmesser von 2 mm als defekt erkannt und mehrheitlich wurden auch die NIO-Teile mit Defektgrößen von 1,5 mm korrekt als NIO beurteilt. Der Klassifikator $F-G2/T0$ stufte durch die Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden Geometriedaten einschließlich Wechselwirkungstermen sogar alle NIO-Teile als NIO ein, auch im Fall der kleinsten 1-mm-Fehler. Allerdings lieferten die aus den unverrauschten Trainingsdaten abgeleiteten Klassifikatoren, die Geometriedaten der Pleuel einbeziehen, in hohem Maße fehlerhafte Urteile die IO-Validierpleuel betreffend – die Klassifikatoren sind somit unbrauchbar. Lediglich der Klassifikator $F/T0$, der seine Entscheidungen rein eigenfrequenzbasiert trifft, führte auf Grundlage der unverrauschten Daten zu passablen Prüfurteilen für die IO-Pleuel. Im Detail identifizierte er 19 der 21 IO-Pleuel korrekt als defektfrei und erkannte außerdem alle 13 NIO-Pleuel ab einer Defektgröße von 2 mm als beschädigt (sowie auch rund drei Viertel der Pleuel mit 1,5-mm-Defekten).

Die anhand der **übermäßig verrauschten Trainingsdaten** berechneten Klassifikatoren identifizierten stets alle 21 IO-Pleuel korrekt als solche. Allerdings gingen mit dieser Trainingsdaten-Variante deutlich niedrigere NIO-Erkennungsraten bei kleineren Defektgrößen einher. Während der rein eigenfrequenzbasiert urteilende Klassifikator $F/T3$ für keine Defektgröße eine zufriedenstellende NIO-Erkennungsrate erzielte, wurden mithilfe der anteiligen Geometriedaten die meisten bzw. alle NIO-Teile ab einer Defektgröße von 2,5 mm bzw. 3 mm korrekt als defekt bewertet (Klassifikatoren $F-g1/T3$ und $F-g2/T3$). Die Berücksichtigung sämtlicher verfügbaren Geometriedaten ermöglichte es schließlich, alle 13 NIO-Pleuel mit einem Defekt ab einer Größe von 2,5 mm bzw. 2 mm als NIO zu identifizieren (Klassifikatoren $F-G1/T3$ und $F-G2/T3$).

Die **hochwertigsten IO/NIO-Klassifizierungen** wurden mithilfe der Klassifikatoren erzielt, die auf Basis der realitätsgetreu verrauschten Trainingsdaten berechnet wurden. Auf dieser Datengrundlage stufen wiederum alle fünf Klassifikatoren sämtliche 21 realen IO-Validierpleuel korrekterweise als IO ein. Dabei erreichte der Klassifikator $F/T1$ eine fehlerfreie NIO-Bewertung aller 13 Pleuel mit NIO-Zuständen ab einer Defektgröße von 2,5 mm, und zwar ausschließlich anhand der Frequenzdaten. Die partielle Einbeziehung teilespezifischer Geometrieinformationen führte mittels der Klassifikatoren $F-g1/T1$ und $F-g2/T1$ zu einer gänzlich richtigen IO/NIO-Trennung ab einem Defektdurchmesser von 2,5 mm bzw. 2 mm. Auf Basis aller zur Verfügung stehenden Geometriedaten erkannten die Klassifikatoren $F-G1/T1$ und $F-G2/T1$ schließlich alle NIO-Pleuel ab einem Defektdurchmesser von 2 mm bzw. sogar ab 1,5 mm als defekt. Nur die NIO-Zustände mit den kleinsten 1-mm-Defekten verblieben unabhängig vom eingesetzten Klassifikator mehrheitlich bzw. gänzlich unidentifiziert.

Validierung: Analyse der Prüfurteile (→ Rückschlüsse auf Defekte)

Schließlich wurde untersucht, ob sich auch für die realen NIO-Validierpleuel verlässliche Aussagen zur jeweiligen **Defektgröße und Defektposition** aus den Prüfurteilen extrahieren lassen. Hierzu wurde wieder die per Klassifikator geschätzte NIO-Klasse bzw. die dieser Klasse zugeordnete Defektausprägung (Defektgröße und Sektor der Defektposition) mit der tatsächlichen Defektausprägung jedes als NIO eingestuften NIO-Teils verglichen. Die Analysen beschränkten sich auf die Prüfentscheidungen der Klassifikatoren, die auf Basis der realitätsgetreu verrauschten Trainingsdaten berechnet wurden, nachdem diese (letztlich favorisierten) Klassifikatoren die hochwertigsten binären IO/NIO-Trennungen erzielten. Zudem werden im Folgenden nur die drei Klassifikatoren $F/T1$, $F-g2/T1$ und $F-G2/T1$ adressiert, die ihre Prüfentscheidungen ausschließlich auf die Eigenfrequenzen der analysierten Teile bzw. darüber hinaus auf geometrische Informationen einschließlich Wechselwirkungstermen stützen. Erneut wurden dabei nun die Kombinationen aus Klassifikator und Ist-Defektdurchmesser als maßgeblich erachtet, für die auch eine belastbare IO/NIO-Trennung beobachtet wurde, d. h. neben einer hohen IO-Erkennungsrate (TNR) von hier immer 100 % bzw. 21/21 auch eine hohe NIO-Erkennungsrate (TPR) von 90 % oder mehr (wobei in dem Fall im Detail sogar stets eine NIO-Erkennungsrate von 100 % bzw. 13/13 erzielt wurde, dunkelgrün in Tab. 6.4 unterlegte TPR-Werte).

Tab. 6.5 gibt die Präzisionen an, mit denen die **Defektgrößen** der realen NIO-Validierpleuel verglichen mit dem jeweiligen Ist-Defektdurchmesser geschätzt wurden. Abhängig vom Klassifikator und der Ist-Defektgröße ist hier aufgelistet, für wie viele der maximal 13 korrekt als defekt identifizierten NIO-Teile der Ist-Defektdurchmesser exakt bzw. mit einer Abweichung von $\pm 0,1$ mm, $\pm 0,2$ mm, $\pm 0,3$ mm usw. geschätzt wurde. Die Werte in fetter blauer Schrift weisen dabei darauf hin, dass für die entsprechenden Kombinationen aus Klassifikator und Ist-Defektdurchmesser alle 13 NIO-Validierpleuel irgendeiner, aber nicht unbedingt einer hinsichtlich der Defektgröße richtigen NIO-Klasse zugeordnet wurden (die eingeklammerten Werte in schwarzer Schrift beziehen sich auf die hier nicht maßgeblichen Fälle mit geringen NIO-Erkennungsraten von weniger als 12/13). Es ist zu

sehen, dass die geschätzten Defektgrößen meist um höchstens $\pm 0,2$ mm (Klassifikatoren $F/T1$ und $F-g2/T1$) bzw. $\pm 0,3$ mm (Klassifikator $F-G2/T1$) von der jeweiligen Ist-Größe abweichen. Nur vereinzelt wurden etwas extremere Abweichungen beobachtet, allerdings von nicht mehr als $\pm 0,6$ mm.

Tab. 6.5: Anteil der als NIO identifizierten realen NIO-Validierpleuel mit zugleich präzise geschätzter Defektgröße in Abhängigk. vom Klassifikator, der Ist-Defektgröße und der erreichten Präzision (blau und fett \rightarrow TPR = 13/13; schwarz & in Klammern \rightarrow TPR < 12/13)

Klassifikator	Defekt ^(*)	NIO-bewertete NIO-Teile mit präzise geschätzter Defektgröße (\rightarrow variable Präzision wie angegeben)				
		± 0 mm	$\pm 0,1$ mm	$\pm 0,2$ mm	$\pm 0,3$ mm	$\pm 0,4$ mm ^(**)
$F/T1$	1 mm	–	–	–	–	–
	1,5 mm	(1/3)	(1/3)	–	–	(1/3)
	2 mm	(2/9)	(3/9)	(3/9)	(1/9)	–
	2,5 mm	5/13	3/13	5/13	–	–
	3 mm	5/13	6/13	1/13	1/13	–
$F-g2/T1$	1 mm	–	–	(1/1)	–	–
	1,5 mm	(1/8)	(4/8)	–	(2/8)	(1/8)
	2 mm	6/13	3/13	4/13	–	–
	2,5 mm	6/13	3/13	3/13	–	1/13
	3 mm	3/13	8/13	1/13	1/13	–
$F-G2/T1$	1 mm	(1/5)	(1/5)	–	(1/5)	(2/5)
	1,5 mm	4/13	1/13	3/13	3/13	2/13
	2 mm	5/13	4/13	1/13	3/13	–
	2,5 mm	2/13	3/13	7/13	1/13	–
	3 mm	3/13	7/13	2/13	1/13	–

(*) Ist-Defektgröße; (**) einschließlich extremerer Abweichungen

Bei der Auswertung der geschätzten **Sektoren**, in denen die Defekte der realen Validierpleuel auftreten, wurde eine fast perfekte Übereinstimmung mit der Realität festgestellt. Dies ist in Tab. 6.6 dargelegt, wobei abhängig vom Klassifikator und der Ist-Defektgröße angegeben ist, für wie viele der als defekt klassifizierten NIO-Pleuel der in Bezug auf die jeweilige Ist-Defektposition korrekte Sektor zurückgegeben wurde (analoge Formatierung der Werte wie in Tab. 6.5). Anhand der Tabelle ist für die maßgeblichen Fälle mit einer zufriedenstellenden IO/NIO-Trennung zu sehen, dass der Klassifikator $F/T1$ den Sektor für die 13 NIO-Teile exakt schätzte und auch der Klassifikator $F-g2/T1$ die jeweilige Ist-Defektposition stets dem korrekten Sektor zuordnete. Zudem erreichte der Klassifikator $F-G2/T1$ immer korrekte Positionsvorhersagen für NIO-Pleuel mit einer Defektgröße ab 2 mm – lediglich im Fall der 1,5-mm-Defektgröße wurde für eines der 13 NIO-Teile eine ungenaue Aussage getroffen. Allerdings ist dieses Urteil nicht gänzlich falsch, da ein be-

nachbarter Sektor desjenigen Sektors vorausgesagt wurde, in dem der Defekt tatsächlich liegt. Auch wenn keine zufriedenstellende IO/NIO-Separierung erzielt wurde, wurde die Defektposition bzw. der zugehörige Sektor für die korrekt als defekt klassifizierten Teile mehrheitlich exakt geschätzt. Von den vier Fehlurteilen wurde zweimal ein benachbarter Sektor des korrekten Sektors zurückgegeben und in den übrigen Fällen wurde immerhin richtig geurteilt, dass ein Defekt im Steg-Segment vorliegt.

Tab. 6.6: Anteil der als NIO identifizierten realen NIO-Validierpleuel mit zugleich präzise geschätzter Defektposition in Abhängigkeit vom Klassifikator und der Ist-Defektgröße (blau und fett → TPR = 13/13; schwarz & in Klammern → TPR < 12/13)

Klassifikator	NIO-bewertete NIO-Teile mit präzise geschätzter Defektposition (→ korrekter Sektor) in Abhängigkeit von der Ist-Defektgröße				
	1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	3 mm
<i>F/T1</i>	–	(2/3)	(8/9)	13/13	13/13
<i>F-g2/T1</i>	(0/1)	(8/8)	13/13	13/13	13/13
<i>F-G2/T1</i>	(4/5)	12/13	13/13	13/13	13/13

Validierung: Analyse der Prüfurteile (→ auffällige Pleuel V-2, V-8 und V-20)

Abschließend werden die **auffälligen Pleuel V-2, V-8 und V-20** aufgegriffen, die zuvor zurückgestellt wurden. Diese Pleuel wurden mittels der fünf aus den realitätsgetreu verauschten Trainingsdaten abgeleiteten Klassifikatoren bewertet, nachdem sich zuvor am Beispiel aller anderen realen Validierpleuel zeigte, dass diese Trainingsdaten-Variante in den hochwertigsten IO/NIO-Trennungen mündete. Daher wurden die Urteile der entsprechenden Klassifikatoren auch für die auffälligen Teile als maßgeblich erachtet. Trotz der Abwesenheit eines Durchgangsbohrungs-Defekts bewerteten alle fünf Klassifikatoren die drei gefertigten Validierpleuel V-2, V-8 und V-20 als NIO. Dies ist insofern sehr positiv, als dieselben Klassifikatoren die anderen realen IO-Validierpleuel in allen Fällen korrekt als unbeschädigt einschätzten. Wengleich keine Durchgangsbohrungen, sondern andere Anomalien für die vergleichsweise ungewöhnlich ausgeprägten Eigenfrequenzen der drei Teile ursächlich sind, wurden sie letztlich begründbar zurückgewiesen.

7 Diskussion des Konzepts

Die **Demonstration** (siehe Kap. 6) eines simulationsbasierten ART-Trainings mündete für die maschinell gefertigten realen Validierpleuel in aussagekräftigen und hochwertigen ART-Prüfurteilen (siehe Abschn. 6.3). Dabei sind insbesondere die zur Qualitätsprüfung der Pleuel eingesetzten, letztendlich favorisierten Klassifikatoren hervorzuheben, die auf Basis der realitätsgetreu verrauschten Trainingsdaten berechnet wurden und auf die sich die folgenden Aussagen vorrangig beziehen (vgl. Abschn. 6.1 und Abschn. 6.2). Konkret trennte der aus diesen synthetischen Daten abgeleitete Klassifikator $F/T1$ die IO-Pleuel und die NIO-Teile ab einer Defektgröße von 2,5 mm ausschließlich anhand der per ART gemessenen Eigenfrequenzen der Objekte vollumfänglich korrekt nach IO und NIO. Die Klassifikatoren $F-g2/T1$ und $F-G2/T1$ separierten die IO- und die NIO-Pleuel sogar ab einer Defektgröße von 2 mm bzw. 1,5 mm vollständig richtig nach den binären Qualitätsstufen, wozu sie neben den Eigenfrequenzen der Pleuel zusätzlich teilespezifische Geometrieinformationen einbezogen. In einem solchen multimodalen Ansatz – der kombinierten Analyse von Eigenschwingungs- mit weiteren Bauteildaten – wird daher vom Grundsatz her großes Potential für die ART gesehen.

Die an den maschinell gefertigten Validierpleueln festgestellten IO/NIO-Trennleistungen der favorisierten Klassifikatoren überschreiten die geschätzte Leistungsfähigkeit eines einfachen Schwellwert-Klassifikators bei Weitem (vgl. Abschn. 4.4). Die ermittelten Trennleistungen liegen dabei auf den Niveaus der theoretischen, mithilfe von Simulationsdaten abgeschätzten Performances der Klassifikatoren (vgl. Abschn. 6.2) – bzw. übertreffen die theoretischen Performances sogar (was aber angesichts des geringen Stichprobenumfangs der realen Validierpleuel sowie der später noch angesprochenen Rolle des Rauschniveaus der Trainingsdaten hier nicht weiter thematisiert wird). Zudem erzielten die eingesetzten Klassifikatoren durchweg präzise Rückschlüsse auf die Defektgrößen und -positionen der als defekt erkannten NIO-Pleuel. Dies geht über das übliche Leistungsspektrum der ART hinaus (siehe Kap. 1). Auch dass drei vermeintliche IO-Pleuel, welche jedoch höchstwahrscheinlich Anomalien unbekannter Art aufweisen, durchgängig als NIO beurteilt wurden, verdeutlicht die Leistungsfähigkeiten der favorisierten Klassifikatoren.

Der Schwerpunkt der Demonstration lag auf der Erzeugung der **synthetischen ART-Trainingsdaten** (siehe Abschn. 6.1). Diese waren von besonders hoher Wichtigkeit, da sie die Grundlage für die zur Qualitätsbewertung der Pleuel eingesetzten Klassifikatoren bildeten und somit auch deren Performances maßgeblich bestimmten. Letztendlich kann jede korrekte IO/NIO-Bewertung sowie jede präzise geschätzte Defektgröße oder Defektposition in gewisser Weise mit den synthetischen Trainingsdaten in Verbindung gebracht werden. Dabei lässt sich die zentrale Rolle der synthetischen Daten wie folgt an den aufeinander aufbauenden Teilaspekten der Datengenerierung verdeutlichen, wobei einige der

Aussagen speziell mit Rücksicht auf die Diskriminanzanalyse als algorithmische Methode der Klassifikatoren getroffen wurden – andere Klassifikationsverfahren stellen ggf. auch andere Anforderungen an die Trainingsdaten:

- 1) Die zehntausenden virtuellen Trainingspleuel (siehe Abschn. 5.1) bildeten mit ihren FEM-berechneten Eigenfrequenzen die wesentliche Datengrundlage. Denn mithilfe der **FEM-Simulationen** wurden die physikalischen Abhängigkeiten der Eigenfrequenzen von der Bauteilstruktur – im Detail von den individuellen Geometrien der Pleuel und von den Defekten der NIO-Teile – abgebildet (vgl. Abschn. 4.3). Dabei wurden die Geometrievariationen der Trainingsteile mittels großzügig spezifizierter Gleichverteilungen festgelegt, wie es bei der Vorstellung des Konzepts für ein simulationsbasiertes ART-Training vorgeschlagen wurde (siehe S. 38 f. in Kap. 3). Dies schaffte insofern einen Praxisbezug, als auf diese Weise beim Datendesign berücksichtigt wurde, dass die Verteilungscharakteristika realer, per ART zu bewertender Serienteile i. d. R. nur näherungsweise bekannt sind und mit der Fertigungsreihenfolge korreliert abdriften können. Um die möglichen Defektpositionen im Hinblick auf belastbare ART-Prüferteile mit Mehrinformationen zu den Defekten von NIO-Pleueln detailliert abzubilden, wurden die Defekte der NIO-Trainingspleuel gleichmäßig über die Geometrien gestreut (vgl. S. 39 f. in Kap. 3). Schlussendlich wurde durch die Simulation von insgesamt 50 000 virtuellen Trainingspleueln ein extrem großer Umfang an Simulationsdaten erzeugt, wobei jedoch nicht untersucht wurde, ob nicht schon eine geringere Datenmenge ausreichend viele physikalische Informationen geliefert hätte. Möglicherweise wäre eine vergleichbare Prüfqualität, wie sie für die realen Validierpleuel letztendlich erzielt wurde, also bereits mittels weniger umfangreicher Simulationsdaten erreichbar gewesen.
- 2) Die interpolationsartige **Datenerweiterung** (siehe S. 146 in Abschn. 6.1) lieferte zwar keine neuen physikalischen Informationen. Allerdings bildete sie, nachdem der Fokus der vorherigen FEM-Simulationen auf der detaillierten Darstellung der Geometrievariationen sowie möglicher Defektpositionen lag, zusätzliche, enger diskretisierte Defektgrößen ab. Dies war dann einer der Faktoren, der es den auf Basis der Trainingsdaten berechneten ART-Klassifikatoren ermöglichte, detaillierte Aussagen zu den Defektgrößen von NIO-Teilen treffen zu können. Dass die Datenerweiterung auf die Defektgröße (und z. B. nicht auf die Defektposition) fokussierte, liegt daran, dass die entsprechenden Abhängigkeiten vergleichsweise einfach funktional darstellbar sind (siehe Abb. 4.9 und Abb. 4.10 sowie S. 57 in Abschn. 4.3.2). Dabei dauerte die Datenerweiterung selbst nur einige Sekunden, wohingegen die FEM-Simulation eines einzelnen Pleuels bereits mehrere Minuten einschließlich einer hohen Rechenkapazität beanspruchte. Durch die Datenerweiterung konnte letztlich (im Vergleich zur vollständigen FEM-Simulation sämtlicher Teile) knapp 90 % an Rechenzeit und Rechenaufwand eingespart werden. Die Voraussetzung für die Datenerweiterung in der vorgestellten Form war, dass den Trainingspleueln im Vorfeld der Simulationen mehrfach wiederholt dieselben Zufallsgeometrien sowie dieselben zufälligen Defektpositionen zugewiesen wurden.

- 3) Die **Transformation** der synthetischen Trainingsdaten in die »Messwelt« (siehe Abschn. 5.3.3 und S. 148 f. in Abschn. 6.1) im Hinblick auf systematische Abweichungen zwischen FEM-berechneten und ART-gemessenen Pleuel-Eigenfrequenzen wurde mithilfe geeigneter Korrekturfaktoren realisiert. Obwohl dieser Ansatz recht pragmatisch ist, war er entscheidend für die erzielten Ergebnisse. So mündete eine testweise Berechnung von (ansonsten identisch designten) ART-Klassifikatoren auf Basis nicht faktoriell angepasster Daten in gänzlich unbrauchbaren Klassifikatoren bzw. falschen Prüfentscheidungen für die realen Validierpleuel. Ursächlich dafür ist, dass die Klassifikatoren ihre Prüfurteile auf absolute Frequenzwerte stützen, sodass die Trainingsdaten die Eigenschwingungscharakteristika der maschinell gefertigten Prüfobjekte nicht verzerrt wiedergeben durften (vgl. S. 38 in Kap. 3).

Wie geschildert, wurden die hochwertigsten Prüfurteile bzgl. der realen Pleuel mittels der o. g. favorisierten, anhand der realitätsgetreu verrauschten Trainingsdaten ermittelten Klassifikatoren erzielt. Mit dem entsprechenden Rauschniveau wurden Aspekte wie feinere, durch die idealisierten FEM-Modellierungen nicht berücksichtigte Details der realen Pleuel sowie sonstige Zufalls- und Störeinflüsse ersatzweise nachgebildet – die Verteilungscharakteristika der generierten synthetischen Daten wurden durch das zusätzlich implementierte Rauschen also weiter im Hinblick auf entsprechende reale ART-Trainingsdaten optimiert. Unverrauschte Trainingsdaten führten zwar zu relativ hohen NIO-Erkennungsraten, mündeten gleichzeitig jedoch häufig bis überwiegend in Fehlentscheidungen für die defektfreien maschinell gefertigten Pleuel. Dies lässt sich anschaulich damit erklären, dass die in den Messdaten der realen Teile zwangsläufig enthaltenen Realeinflüsse teilweise als Defekteinflüsse fehlinterpretiert wurden, sofern die Klassifikatoren derartige Charakteristika nicht »kennen lernten«, also falls sie aus zu stark idealisierten Trainingsdaten abgeleitet wurden. Übermäßig verrauschte Trainingsdaten führten dagegen zu Klassifikatoren, die zwar alle IO-Pleuel als solche identifizierten, dabei aber vergleichsweise geringe Sensitivitäten zeigten. Das Rauschniveau der synthetischen Daten kann somit auch als Stellschraube gesehen werden, mit der sich steuern lässt, ob bevorzugt IO- oder NIO-Teile korrekt erkannt werden.

Die o. g. Erkenntnis einer niedrigen IO-Erkennungsrate betrifft alle aus den unverrauschten Daten berechneten Klassifikatoren, die neben den Eigenfrequenzen auch Geometriedaten nutzen, um Prüfurteile zu treffen. Lediglich ein einziger, rein eigenfrequenzbasiert urteilender Klassifikator erzielte auch auf Basis der unverrauschten Daten passable Urteile. So klassifizierte er alle maschinell gefertigten NIO-Teile ab einer Defektgröße von 2 mm korrekt und erkannte zudem rund 90 % der IO-Pleuel als IO. Dies zeigt auf, dass die Performance eines ART-Klassifikators von verschiedenen Faktoren, die sowohl die Datenbasis als auch das Design des Klassifikators betreffen, abhängt. Diese Faktoren wechselwirken miteinander, sodass immer eine ganzheitliche Betrachtung erforderlich ist. Das bedeutet, dass die Datenerzeugung sowie die Modellierung des Klassifikators sinnvoll aufeinander abgestimmt werden müssen und nicht gesondert betrachtet werden dürfen.

- 4) Die Einteilung der synthetischen Trainingsdaten in eine einzige IO-Klasse und 609 mit unterschiedlichen, präzise diskretisierten Defektausprägungen verknüpfte **NIO-Klassen** (siehe S. 149 f. in Abschn. 6.1) war mitentscheidend für die Performances der Klassifikatoren. Dabei war die Vorgabe zahlreicher NIO-Klassen zum einen die Voraussetzung, um überhaupt quantitative Rückschlüsse auf die Defekte von NIO-Pleueln treffen zu können. Zum anderen wurde die Vielzahl der NIO-Klassen, aufgrund der Gruppierung der NIO-Teile nach physikalisch ähnlichen Defekteinflüssen, auch für die IO/NIO-Bewertung der Pleuel als vorteilhaft eingeschätzt (vgl. S. 41 in Kap. 3). Dass diese Annahme tatsächlich zutreffend ist, lässt sich anhand der in Tab. 7.1 für die realen Validierpleuel aufgeführten Erkennungsraten nachvollziehen, die auf zwei unterschiedlichen Klassensystemen bzw. dementsprechend gestalteten Klassifikatoren basieren. Im Detail wurden neben den favorisierten Klassifikatoren, deren zugrundeliegende Trainingsdatenbasis unter Berücksichtigung der 609 NIO-Klassen gelabelt wurden, auch ansonsten analog designte Klassifikatoren eingesetzt, deren einziger Unterschied darin besteht, dass die Trainingsdaten anstatt auf Basis des präzisen Klassensystems auf Grundlage eines binären IO/NIO-Systems gelabelt wurden. Zu erkennen ist, dass das detailliertere Klassensystem zu teilweise deutlich höheren NIO-Erkennungsraten führte. Ob ein noch umfangreicheres Klassensystem die Performances der Klassifikatoren weiter erhöht hätte, wurde nicht systematisch analysiert sodass sich hier noch Potential verbergen könnte.

Trotz der ansonsten sehr positiven Ergebnisse konnte keiner der favorisierten Klassifikatoren die maschinell gefertigten NIO-Validierpleuel mit den kleinsten **1-mm-Defekten** zuverlässig identifizieren. Allerdings liegt der Einfluss solch eines Defekts auf die Pleuel-Eigenfrequenzen meist in der Größenordnung von maximal 0,1 % (siehe Abb. 4.14). Der Defekteinfluss wird dabei nicht nur extrem dominierend von den zufälligen Geometrievariationen der Pleuel überlagert (was aber auch bei etwas größeren Defekten immer noch der Fall ist, siehe Abb. 4.15), sondern er liegt damit zugleich in der Größenordnung des zufälligen Rauschens, wie es im Zuge der Datenerzeugung mittels gleichverteilter Zufallszahlen in die Trainingsdaten implementiert wurde, aus denen die favorisierten Klassifikatoren abgeleitet wurden. Da jedoch die Auswirkungen eines Defekts auf die verschiedenen Eigenfrequenzmerkmale nicht unabhängig voneinander sind, muss das Rauschniveau der Trainingsdaten nicht unbedingt als Nachweisgrenze aufgefasst werden. Somit könnte ein geeigneter Algorithmus geringfügigere Defekteinflüsse eventuell dennoch extrahieren und folglich Teile mit kleineren Fehlern auffindbar machen. Entsprechenden algorithmischen Lösungen wurde in dieser Arbeit allerdings nicht weiter nachgegangen.

Tab. 7.1: IO-Erkennungsrate (TNR) und NIO-Erkennungsrate (TPR, abhängig von der Ist-Defektgröße) für die realen Validierpleuel in Abhängigkeit vom Klassifikator einschließlich des Einflusses des zum Labeln der ART-Trainingsdaten vorgegebenen Klassensystems

Klassifi- kator	Eingangsgrößen			Trainingsdaten- Rauschniveau	TNR (IO- Pleuel)	TPR abhängig von der Ist-Defektgröße (NIO-Pleuel)				
	Eigenfrequenzen	Geometrieparam.	WW-Terme			1 mm	1,5 mm	2 mm	2,5 mm	3 mm
<i>F/T1</i>	✓	✗	✗	±0,1 %	21/21	0/13	2/13	6/13	12/13	13/13
<i>F-g1/T1</i>	✓	4/8	✗	±0,1 %	21/21	0/13	2/13	9/13	12/13	13/13
<i>F-g2/T1</i>	✓	4/8	✓	±0,1 %	21/21	0/13	4/13	9/13	13/13	13/13
<i>F-G1/T1</i>	✓	8/8	✗	±0,1 %	21/21	0/13	2/13	10/13	13/13	13/13
<i>F-G2/T1</i>	✓	8/8	✓	±0,1 %	21/21	0/13	5/13	13/13	13/13	13/13

↓

**Erweiterung des
Klassensystems von einer NIO-
Klasse auf 623 NIO-Klassen**

↑ 1 IO-Klasse & 1 NIO-Klasse ↑

↓ 1 IO-Klasse & 629 NIO-Klassen ↓

<i>F/T1</i>	✓	✗	✗	±0,1 %	21/21	0/13	3/13	9/13	13/13	13/13
<i>F-g1/T1</i>	✓	4/8	✗	±0,1 %	21/21	0/13	7/13	12/13	13/13	13/13
<i>F-g2/T1</i>	✓	4/8	✓	±0,1 %	21/21	1/13	8/13	13/13	13/13	13/13
<i>F-G1/T1</i>	✓	8/8	✗	±0,1 %	21/21	0/13	9/13	13/13	13/13	13/13
<i>F-G2/T1</i>	✓	8/8	✓	±0,1 %	21/21	5/13	13/13	13/13	13/13	13/13

Wenngleich die Konzeptdemonstration eine erfolgreiche **Lösung** der betrachteten ART-Prüfaufgabe zeigte, erhebt sie keinesfalls den Anspruch der perfekten Lösung. Sie diene vielmehr der entwicklungsstechnischen Ausgestaltung, der Erlangung von grundlegendem Verständnis und der Veranschaulichung des Konzepts für ein simulationsbasiertes ART-Training, wobei eine weitere Optimierung angesichts der bereits sehr zufriedenstellenden Ergebnisse (und auch aufgrund der zahlreichen Stellschrauben) nicht angestrebt wurde. Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausschließlich etablierte, standardmäßige Klassifikationsverfahren testweise verwendet bzw. in Form der Diskriminanzanalyse schließlich eingesetzt wurden, wird speziell die Algorithmik betreffend noch Potential vermutet, z. B. durch den Einsatz von Methoden aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz sowie des Maschinellen Lernens. Letztendlich konnte gezeigt werden, dass das vorgestellte Konzept zumindest auf Laborebene auf maschinell gefertigte Teile zielführend anwendbar ist und ein simulationsbasiertes ART-Training dabei zu einem performanten ART-Klassifikator führen kann, der neben einer hochwertigen IO/NIO-Trennung auch präzise quantitative Aussagen zu den Fehlern von NIO-Objekten erzielen kann. Die potentiellen Vorteile des simulationsbasierten verglichen mit dem konventionellen Ansatz bzw. von synthetischen

gegenüber experimentellen ART-Trainingsdaten wurden benannt (siehe S. 7 f. in Kap. 1), und sie erschließen sich aus der Demonstration und den Resultaten.

Während der Durchführung dieser Arbeit war stets auch der Hintergedanke präsent, ein simulationsbasiertes ART-Training gemäß dem Konzept für die Umsetzung einer realen **ART-Serienprüfung** zu nutzen, sodass die Fragestellung nach den damit verbundenen Herausforderungen, Limitierungen und Chancen aufkam. Unter Berücksichtigung dessen, dass die Demonstrationsergebnisse auf Idealisierungen sowie Vereinfachungen verglichen mit der Praxis basieren, wurden ART-relevante Serienteile analysiert. Dies zielte darauf ab, die Konzeptdemonstration und das fiktive Anwendungsszenario vor dem Hintergrund des perspektivischen Ziels, der industriellen Umsetzung eines simulationsbasierten ART-Trainings, fundiert einordnen zu können. Bei den hierzu analysierten Serienteilen handelt es sich um gegossene, nicht endbearbeitete Schaltgabeln (siehe Abb. 7.1), die im Rahmen einer externen Machbarkeitsstudie hinsichtlich der Nachweisbarkeit von Rissen per ART untersucht wurden. Die folgenden Ausführungen stützen sich auf bis zu 142 dieser Schaltgabeln aus fünf Chargen, und zwar 135 IO-Teile und sieben mittels Magnetpulverprüfung als NIO identifizierte Teile mit Rissen. Im Detail liegen den Analysen sowohl ein aus der Machbarkeitsstudie stammender Datensatz, der u. a. Eigenfrequenzen der 142 Teile umfasst, als auch eigene, an 28 physisch verfügbaren Schaltgabeln experimentell generierte Daten zugrunde, wobei die Teile u. a. geometrisch vermessen wurden.⁶⁴



Abb. 7.1: ART-relevantes Serienteil in Form einer gegossenen Schaltgabel

⁶⁴⁾ Datensatz und Schaltgabeln wurden von der Firma *RTE Akustik + Prüftechnik*, Pfnzthal, zur Verfügung gestellt. Es ist unbekannt, ob die Teile die betrachtete Serienfertigung repräsentativ widerspiegeln oder ob sie nach bestimmten Kriterien demgegenüber abweichend zusammengestellt wurden. Somit war kein eindeutiger Rückschluss auf die Grundgesamtheit der Schaltgabeln möglich bzw. es ist ungewiss, ob die im Rahmen der Analysen quantifizierten Eigenschaften die tatsächlichen Gegebenheiten repräsentativ beschreiben. Die angegebenen Werte sollten daher lediglich als grobe Orientierung für die in der Serienfertigung vorherrschenden Bauteileigenschaften und -variationen aufgefasst werden.

Nachfolgend werden die wichtigsten Informationen und Analyseergebnisse zu den Schaltgabeln aufgelistet, wobei die ausführlich in der Arbeit behandelten Pleuel gegenüber den Schaltgabeln abgegrenzt und Gemeinsamkeiten aufgezeigt werden:

- Die Schaltgabel-Geometrie kann großzügig von einem $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ großen Quader umschlossen werden. Demgegenüber sind die Pleuel mit ihren ungefähren äußeren Abmessungen zwischen 12 mm und 135 mm (siehe Abschn. 4.2.1) je nach Richtung etwas kleiner bzw. größer. Wenngleich die Abmessungen der beiden Teiletypen in ähnlichen Größenordnungen liegen, weisen die Geometrien der Schaltgabeln im Detail wesentlich kompliziertere Konturen auf.
- Die Schaltgabeln wurden mittels Gießprozess aus einem nicht näher spezifizierten Gusseisenwerkstoff produziert. In Anbetracht des Herstellungsverfahrens ist nicht nur eine anisotrope Elastizität, sondern auch eine gewisse Heterogenität der Materialeigenschaften anzunehmen. Die analysierten Schaltgabeln wurden lediglich lokal mechanisch bearbeitet, sodass ihre Oberflächen größtenteils eine raue Gussstruktur aufweisen. Die realen Pleuel wurden zerspanend mittels CNC-Maschinen aus einem Aluminiumwerkstoff produziert und weisen hohe Oberflächenqualitäten auf (siehe Abschn. 5.2.1). Der Werkstoff der Pleuel ist auf makroskopischer Ebene homogen, wobei eine anisotrope Elastizität festgestellt wurde, die aus der Materialherstellung per Walzprozess herrührt (siehe Abschn. 5.2.3 bis Abschn. 5.2.5).
- Die qualitätsrelevanten Anomalien der Schaltgabeln sind natürliche Fehler in Form von Rissen, wobei jedoch keine Informationen hinsichtlich der Größe und möglicher Positionen vorliegen. Inwiefern weitere Diskontinuitäten wie Poren und Lunker auftreten können, ist unbekannt. Der für die Pleuel relevante, künstliche Defekttyp ist eine Durchgangsbohrung (siehe Abschn. 4.2.3 und Abschn. 5.2.1). Zumindest natürliche Volumendefekte mit einer Mindestgröße von $0,5\text{ mm}$ ließen sich für die realen Pleuel ausschließen (siehe Abschn. 5.2.5).
- In Anbetracht der vorliegenden Informationen und Teile ist anzunehmen, dass die Schaltgabeln fertigungsbedingt deutlich und auf komplizierte Weise in Geometrie und Material variieren. Die Geometrievariationen der Pleuel wurden hingegen vorgegeben (siehe Abschn. 4.2.1 und Abschn. 5.2.1), wobei tatsächliche Fertigungstoleranzen und insbesondere auch Form-/Lageabweichungen in Bezug auf die realen Pleuel unerheblich sind (siehe Abschn. 5.2.6). Für die realen Teile spielen Materialvariationen keine Rolle, da sie alle aus einer einzigen (makroskopisch homogenen) Materialplatte hergestellt wurden (siehe Abschn. 5.2.1).
- Die Masse eines Körpers spiegelt seine Geometrie in Form des Volumens und seine Materialdichte wider. Die 28 verfügbaren Schaltgabeln wurden daher gewogen, um einen ersten Eindruck von den fertigungsbedingten Variationen zu erlangen. Dabei wurden Massen zwischen etwas mehr als 272 g und ca. 284 g bestimmt. Der Variationskoeffizient dieser Einzelwerte beträgt rund $1,1\%$. Die realen Pleuel wiegen mit Massewerten zwischen knapp 60 g und ca. 67 g im Vergleich weniger als ein Viertel.

Aus den Bauteilstrukturmodellen des Anwendungsszenarios wurde abgeleitet, dass die Masse defektfreier Pleuel (rein geometriebedingt) mit einem nur etwas höheren Variationskoeffizienten von knapp 1,5 % normalverteilt ist, sodass die entsprechenden Streuungen bzgl. der beiden Teiletypen vergleichbar sind.

- Mittels Messschieber und Messschraube wurden die 28 Schaltgabeln an elf charakteristischen (mechanisch bearbeiteten und unbearbeiteten) Stellen geometrisch vermessen, wobei über wiederholte Messungen gemittelt wurde und die Analysen u. a. wegen der teilweise rauen Oberflächen mit relativ hohen Unsicherheiten verbunden waren. Je nach Geometrieparameter der Schaltgabeln wurden dabei Variationen in Bereichen von mehr als $\pm 0,1$ mm bis ungefähr $\pm 0,6$ mm (meist aber von $\pm 0,2$ mm bis $\pm 0,3$ mm) um die Mittelwerte festgestellt. Die Streuungen der Geometriewerte wurden mit Variationskoeffizienten zwischen rund 0,1 % und ca. 2,5 % quantifiziert, wobei der Variationskoeffizient in mehr als der Hälfte der analysierten Fälle größer als 1 % ist. Im Gegensatz dazu variieren die zufälligen Maße der Pleuel zumeist in Bereichen von $\pm 0,45$ mm bis $\pm 0,6$ mm um die Erwartungswerte und nur für einen der Geometrieparameter im breiteren Intervall von $\pm 1,2$ mm (siehe Tab. 4.1). Die Variationskoeffizienten der zufälligen Pleuel-Abmessungen betragen 0,4 % bis rund 2,1 %, wobei sie für drei der acht Geometrieparameter größer als 1 % sind. Absolut gesehen sind die Geometrievariationen der Schaltgabeln zwar etwas geringer als die der Pleuel, prozentual betrachtet liegen die jeweiligen Variationen jedoch auf dem annähernd gleichen Niveau.
- Die Schaltgabeln sind durch jeweils 28 Eigenfrequenzen bis etwas mehr als 30 kHz gekennzeichnet. Demgegenüber weisen die Pleuel mit 18 Eigenfrequenzen bis rund 30 kHz (siehe Abschn. 4.3.1) um etwa ein Drittel weniger Frequenzen auf.
- Abb. 7.2 (oben) visualisiert ausgewählte Eigenfrequenzen der Schaltgabeln, wobei die Werte nach Gießdaten bzw. Chargen gruppiert wurden und die Frequenzen der NIO-Teile markiert sind. Zu erkennen ist, dass sich die rissbehafteten NIO-Teile in den Eigenfrequenzen i. Allg. nicht von den IO-Teilen abheben. Die Defekteinflüsse sind also, wie auch bei den Pleueln mit ihren Durchgangsbohrungs-Defekten, klein im Vergleich zu den durch sonstige strukturmechanische Variationen hervorgerufenen Frequenzstreuungen und werden i. d. R. überlagert (vgl. Abschn. 4.4 und insb. Abb. 4.15). Zwar können je nach Eigenfrequenz ggf. chargenspezifische Wertebereiche erkannt werden, was aber nicht notwendigerweise der Fall sein muss; teilweise streuen die Eigenfrequenzen chargenübergreifend nicht stärker als innerhalb einiger Chargen. Für die realen Pleuel spielen chargenbedingte Frequenzunterschiede aufgrund der Fertigung der Teile aus einer einzigen Materialcharge einschließlich einer konstanten Fertigungsstrategie keine Rolle.
- Abb. 7.2 (unten) veranschaulicht die Frequenzstreuung bzgl. der IO-Schaltgabeln mittels Variationskoeffizienten in Abhängigkeit vom Eigenfrequenzmerkmal, wobei die Koeffizienten gesondert für zwei Chargen berechnet wurden. Zu sehen ist, dass die Streuung je nach Eigenfrequenz mit einem Variationskoeffizienten von weniger

als 0,2 % bis max. ca. 0,8 % angegeben werden kann. Obwohl gewisse Unterschiede zwischen den Chargen erkennbar sind, wurden die Chargen als zumindest ähnlich bzgl. der Frequenzvariationen eingestuft. Chargenübergreifend wurden Variationskoeffizienten zwischen mehr als 0,3 % und etwa 1,5 % festgestellt. Die auf Basis von FEM-Daten ermittelten Variationskoeffizienten der Pleuel-Eigenfrequenzen sind in Abwesenheit eines Defekts im Vergleich etwas höher, jedoch sind sie nicht fernab der für die Schaltgabeln ermittelten Werte – für niederfrequenterer Eigenfrequenzmerkmale betragen sie vereinzelt mehr als 2 %, aber für höherfrequente Merkmale liegen sie i. d. R. unterhalb von 1 % (siehe Abb. 4.12 in Abschn. 4.3.3).

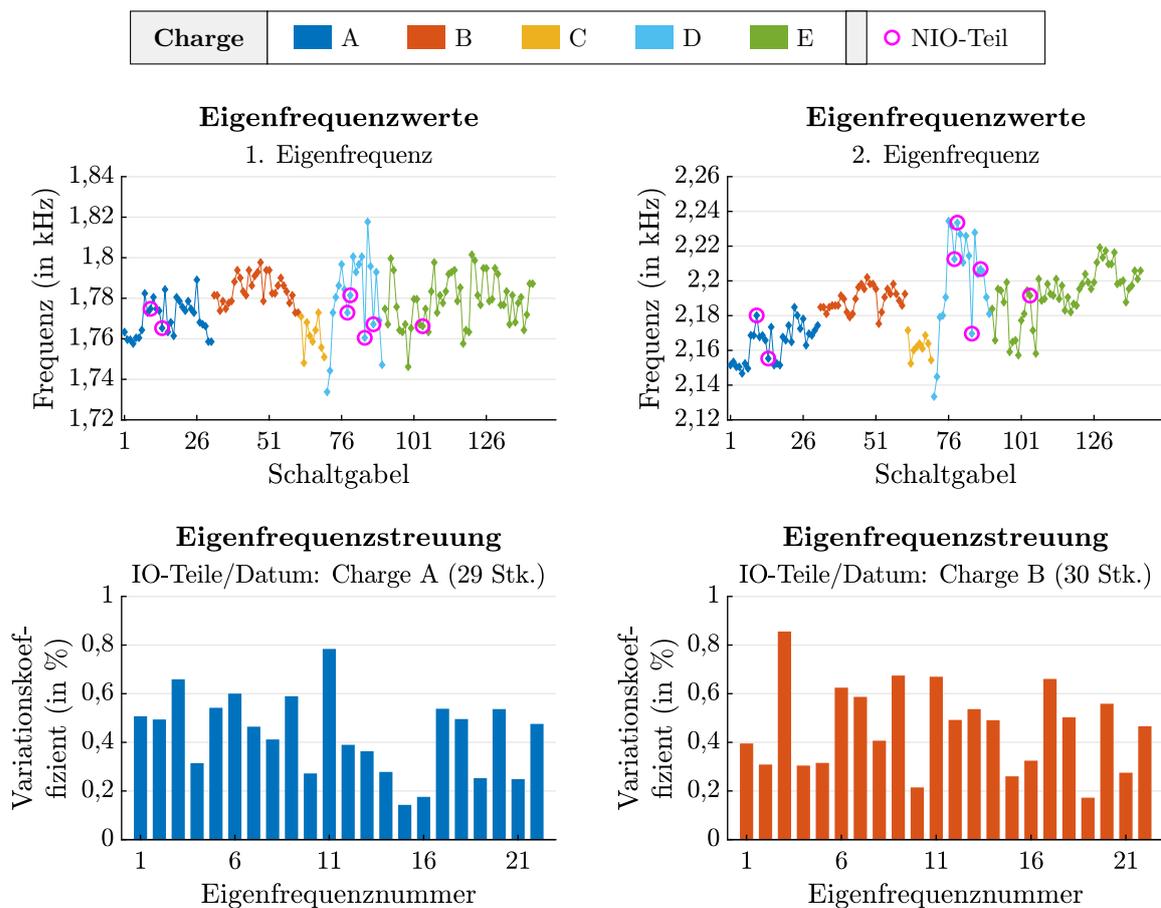


Abb. 7.2: ART-gemessene Schaltgabel-Eigenfrequenzen (oben) und auf Basis der Frequenzen berechnete Variationskoeffizienten (unten) nach verschiedenen Chargen

Die voranstehenden Ausführungen zeigen, dass die Schaltgabeln in einigen Punkten eine **höhere Komplexität** als die Pleuel der Arbeit aufweisen – was aber auch zu erwarten war, nachdem vor dem Hintergrund praktischer Herausforderungen bewusst eine fiktive, in mehreren Aspekten idealisierte ART-Prüfungsaufgabe herangezogen wurde (vgl. S. 46 f. in Abschn. 4.1). Nichtsdestotrotz sind die Variationen der Schaltgabeln hinsichtlich Geometrie und Eigenfrequenzen quantitativ vergleichbar mit denen der Pleuel. Wenngleich die Schaltgabeln nur ein einziges Beispiel sind, wurde das Anwendungsszenario offensichtlich

nicht realitätsfern in Bezug auf die für ART-relevante Serienteile möglichen Bauteilvariationen festgelegt. Somit bilden die Resultate der Konzeptdemonstration in Kombination mit den anhand der Schaltgabeln gewonnenen Erkenntnisse eine solide Grundlage für die Diskussion einer industriellen Umsetzung des in dieser Arbeit verfolgten Konzepts für ein simulationsbasiertes ART-Training.

Grundsätzlich erscheint das in Kap. 3 beschriebene Konzept insbesondere dann für eine **praktische Anwendung** prädestiniert zu sein, falls eine geplante ART-Prüfapplikation nicht auf konventionelle Weise realisierbar ist (siehe S. 8 in Kap. 1). Somit bietet es sich hinsichtlich Prüfaufgaben an, die zwar aus physikalischer Sicht mittels ART angegangen werden könnten, die aber nicht oder zumindest nicht mit vertretbarem Aufwand auf der Grundlage experimenteller Trainingsdaten umsetzbar sind, z. B. wegen eines Mangels an repräsentativen Trainingsteilen oder einer komplexeren Problemstellung mit dem Bedarf einer umfangreichen, eventuell speziell designten Datenbasis. Um darüber hinaus zusätzliche (oder als eigenes Prüfziel geforderte) Rückschlüsse auf die Defektausprägungen von NIO-Teilen zu ermöglichen, wurde eine Strategie vorgeschlagen (siehe S. 39 f. in Kap. 3). Letztendlich könnte eine erstmalige praktische Umsetzung des Konzepts Anreize schaffen, mittels synthetischer Trainingsdaten weitere bisher nicht per ART lösbare Prüfprobleme für das Verfahren zu akquirieren, gänzlich neue Prüfanwendungen zu erschließen, auf verlässlichere Prüfentscheidungen abzielen, Prüfurteile nachvollziehbarer zu gestalten und das Vertrauen in die ART zu steigern. Eine auf synthetischen Trainingsdaten basierende, erwiesenermaßen belastbare Quantifizierbarkeit von Defekten per serienintegrierter ART-Prüfung könnte hierzu ein impulsgebender Meilenstein sein.

Wenngleich das entwickelte Konzept zahlreiche Chancen bietet, erfordert eine praktische Umsetzung mit Sicherheit die Bewältigung gewisser **Herausforderungen**, die zu großen Teilen die Generierung geeigneter Trainingsdaten betreffen. Die anhand der Schaltgabeln erfolgten Analysen verdeutlichen, dass die strukturmechanischen Beschaffenheiten ART-relevanter Serienteile komplizierter sein können, als es für die zur Konzeptdemonstration betrachteten Pleuel der Fall ist, was die Generierung synthetischer Trainingsdaten bzw. die simulationstechnische Modellierung entsprechender Teile erschweren würde. Dabei ist zu beachten, dass andere in der Literatur beschriebene simulationsbasierte ART-Ansätze vom Grundsatz her denselben Herausforderungen unterliegen, was sich auch daran zeigt, dass Ansätze mit synthetischen ART-Trainingsdaten zwar vereinzelt untersucht wurden, aber keineswegs den Stand der Technik in der Serie definieren.

Die Erzeugung synthetischer Trainingsdaten hinsichtlich einer realen ART-Prüfaufgabe würde, neben der grundsätzlichen Modellierung des betrachteten Bauteiltyps, die simulationstechnische Abbildung **zulässiger Bauteilvariationen** erfordern. Dabei könnten Serienteile mit komplizierten Geometrien bzw. Geometrievariationen angetroffen werden. Zudem könnte die Materialbeschaffenheit je nach Prüfproblem anspruchsvoll sein, z. B. bei gegossenen oder geschmiedeten Teilen mit einem anisotropen und/oder inhomogenen Material, wobei sich die Situation verkomplizieren würde, falls die Materialeigenschaften von Teil zu Teil variieren. Bei der Konzeptdemonstration wurde das Material der Pleuel

vereinfacht modelliert. Obwohl die gefertigten Teile eine anisotrope Elastizität aufweisen (siehe Abschn. 5.2.4 und Abschn. 5.2.5), wurden zur Datenerzeugung per FEM isotrope Eigenschaften vorgegeben (siehe Abschn. 5.1). Dies trug wesentlich zu den beobachteten systematischen Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Eigenfrequenzen bei (siehe Abschn. 5.3.1 und Abschn. 5.3.2). Diese Abweichungen wurden letztlich auf pragmatische Weise mithilfe von Korrekturfaktoren eliminiert (siehe Abschn. 5.3.3 und S. 148 in Abschn. 6.1), was in geeigneten Trainingsdaten sowie belastbaren Prüfentscheidungen mündete (siehe Abschn. 6.3). Diese Erkenntnis könnte auch auf die Praxis übertragen werden. So könnte es ausreichend sein, anspruchsvolle Geometrie- und Materialeigenschaften in gewissem Maße gezielt vereinfacht zu modellieren und den Fokus der Modellierung auf die Abbildung der vorherrschenden Variationen bzw. der Verhältnismäßigkeiten zu legen. Die dann resultierenden, vorrangig systematischen Abweichungen zwischen Simulations- und Messdaten ließen sich nachgeschaltet anderweitig minimieren – zumal die Transformation der Daten aus der »Simulationswelt« in die »Messwelt« bzw. eine entsprechende Anpassung im Rahmen der Datengenerierung (angesichts unvermeidbarer Abweichungen zwischen Simulations- und Messdaten) ohnehin notwendig erscheint.

Ein weiterer offener Punkt bei der Erzeugung synthetischer ART-Trainingsdaten ist die Modellierung geometrisch oder schwingungstechnisch komplizierterer **Realdefekte**, z. B. von schmalen Rissen, die mit nichtlinearen Effekten einhergehen können. Es ist fraglich, welche Präzision diesbezüglich bei der Modellierung notwendig wäre. Ein Lösungsansatz könnte in der Implementierung idealisierter »Dummy-Defekte« liegen. Als Referenz wird auf die Konzeptdemonstration verwiesen, bei der drei auffällige Teile als NIO klassifiziert wurden, obwohl sie nicht den in den Trainingsdaten beschriebenen Defekttyp aufweisen, sondern durch andere Anomalien gekennzeichnet sind (siehe Abschn. 5.3.4 und S. 169 in Abschn. 6.3). Somit wäre eventuell gar keine sehr präzise Defektmodellierung notwendig, um eine belastbare ART-Qualitätsprüfung mittels eines anhand synthetischer Trainingsdaten abgeleiteten Klassifikators industriell realisieren zu können.

Um die Schwierigkeiten bei der Modellierung von Defekten bzw. Anomalien zu umgehen, könnte in der Praxis ein simulationsbasiertes ART-Training angestrebt werden, das sich ausschließlich auf IO-Trainingsteile bzw. dementsprechende synthetische Trainingsdaten stützt. Mit solchen Daten ließen sich zulässige Variationen und somit die Bandbreite der möglichen IO-Teile abbilden. Der algorithmische Fokus wäre in diesem Fall auf eine Auffälligkeitserkennung gerichtet, wobei anhand gemessener ART-Daten die Prüfobjekte zu identifizieren wären, die nicht zur Klasse der IO-Teile »passen« (so wie es teilweise auch auf Basis experimenteller Trainingsdaten in der Praxis gehandhabt wird, vgl. [ASTMc]). Damit ließe sich zudem der Berechnungsaufwand reduzieren, da bei der Datenerzeugung keine NIO-Teile simuliert werden müssten. Allerdings ginge dann einer der wesentlichen Vorteile des Konzepts verloren, wonach potentiell auf die Anomalien bzw. die Defektausprägungen von NIO-Teilen geschlossen werden kann.

Bei der Datenerzeugung bzw. bei der Modellierung sind **Drifts** und **Chargeneinflüsse**, die sich in den Bauteileigenschaften von ART-Prüfobjekten abbilden können, zusätzliche

Punkte, die im Zuge einer Umsetzung des Konzepts in der Praxis herausfordernd wären. Dabei stellt sich die Frage, ob synthetische Trainingsdaten in Bezug auf die abgebildeten Bauteilstrukturen von vornherein so großzügig gestaltet werden sollten, dass sie bzw. ein anhand der Daten abgeleiteter ART-Klassifikator kontinuierliche Drifts oder sprunghafte Chargeneffekte abdecken. Alternativ könnte von Zeit zu Zeit oder von Charge zu Charge eine Anpassung der synthetischen Trainingsdatenbasis mit nachfolgender Neuberechnung des jeweiligen ART-Klassifikators erfolgen, um den individuellen bzw. sich verändernden Gegebenheiten gerecht zu werden. Es ist ungewiss, welche dieser Strategien zielführender ist. Dabei ist allerdings zu bedenken, dass Drifts und Chargeneinflüsse keine spezifischen Aspekte im Zusammenhang mit synthetischen Trainingsdaten sind – der konventionelle Ansatz mit experimentellen Daten steht vor analogen Herausforderungen.

Über die simulationstechnischen Aspekte der Modellierung hinausgehend ist fraglich, ob die zur Erzeugung synthetischer Trainingsdaten abzubildenden Bauteilstrukturen, deren fertigungsbedingte Geometrie- und Materialvariationen und die in der Serie auftretenden Anomalien hinsichtlich eines konkreten Prüfproblems ausreichend präzise bekannt wären oder ob eine praktische Umsetzung des Konzepts entsprechende Aufwände zur Charakterisierung der Gegebenheiten erfordern würde. Diesbezüglich sieht das Konzept jedenfalls bereits eine Modellierung der strukturmechanischen Bauteileigenschaften mittels Gleichverteilungen unter Vorgabe großzügig gewählter Wertebereiche als Lösungsvorschlag vor, sodass die abzubildenden Eigenschaften nicht exakt bekannt sein müssten (siehe S. 38 in Kap. 3). Die zu modellierenden Bauteilstrukturen sowie die Größenordnungen der umzusetzenden Bauteilvariationen müssten aber zumindest ungefähr bekannt sein. Zudem ist nicht abzusehen, wie großzügig die Modellierung im Hinblick auf belastbare synthetische ART-Trainingsdaten maximal erfolgen sollte bzw. dürfte.

Auch die oben schon mehrfach angesprochene Transformation bzw. die **Anpassung** von Simulations- an Messdaten ist ein Aspekt, der eine wesentliche Rolle bei der Generierung synthetischer ART-Trainingsdaten spielt. Prinzipiell könnte hierzu die im Rahmen dieser Arbeit herangezogene Strategie (Korrekturfaktoren und Verrauschen, siehe Abschn. 5.3.3 und S. 148 f. in Abschn. 6.1) auch in der industriellen Praxis genutzt werden. Allerdings würde dies Aufwände zur experimentellen Charakterisierung einiger Serienteile erfordern, um darauf basierend eine detaillierte Simulationsdatenerzeugung hinsichtlich dieser Teile und anschließend einen Abgleich mit gemessenen ART-Daten zu ermöglichen, wobei die Anpassung einschließlich einer Neuberechnung des ART-Klassifikators ggf. regelmäßig zu wiederholen wäre (z. B. im Fall sprunghafter Chargeneffekte). Vielleicht lassen sich aber auch wesentlich effizientere sowie leistungsfähigere Anpassungsstrategien finden, was für die industrielle Umsetzung eines simulationsbasierten ART-Trainings eine große Chance wäre bzw. die Anwendung des Konzepts deutlich vereinfachen könnte.

Abgesehen von der Datenerzeugung wären **zusätzliche Herausforderungen** mit einer industriellen Konzeptumsetzung verbunden. Um den potentiell hohen Informationsgehalt synthetischer ART-Trainingsdaten letztendlich in hochwertige Prüfurteile ummünzen zu können, wäre es sicherlich zielführend bzw. erforderlich, bei den ART-Messungen an den

zu prüfenden Serienteilen zum einen eine hohe Datenqualität anzustreben – die in einer Industrieumgebung auftretenden Störeinflüsse sollten in ihren Auswirkungen bestmöglich minimiert werden, was u. a. durch eine reproduzierbare Messdurchführung einschließlich einer rechnerischen Kompensation thermischer Effekte erreicht werden könnte. Inwiefern praxisrelevante Störeinflüsse die industrielle Nutzung synthetischer ART-Trainingsdaten generell einschränken würden, lässt sich angesichts der unter Laborbedingungen durchgeführten Konzeptdemonstration nicht fundiert abschätzen. Zum anderen wäre es je nach Prüfaufgabe angebracht, den messtechnischen Aufbau sowie die experimentelle Datenerfassung gleichzeitig so zu gestalten, dass die objektspezifischen Messdaten ebenfalls einen hohen Informationsgehalt aufweisen, sodass z. B. viele verschiedene Eigenfrequenzen der Prüfobjekte aus den ART-Daten extrahiert werden können. Dies wäre die Voraussetzung für den Einsatz eines entsprechend komplex modellierten, leistungsfähigen Klassifikators, der zuvor auf Basis synthetischer Daten berechnet wurde. In diesem Kontext stellt sich auch die Frage nach einem geeigneten Klassifikationsverfahren im Hinblick auf konkrete ART-Prüfprobleme aus der industriellen Praxis. Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Verfahren aus den Fachbereichen der Künstlichen Intelligenz und des Maschinellen Lernens genutzt wurden, bleibt ungeklärt, welchen Mehrwert entsprechende Methoden in Verbindung mit synthetischen ART-Daten bieten könnten und in welchem Umfang bzw. wie sie das Potential solcher Daten konkret ausschöpfen könnten.

Grundsätzlich müsste ein simulationsbasiertes ART-Training im Hinblick auf eine reale ART-Prüfaufgabe nicht haarklein der in Kap. 3 beschriebenen Herangehensweise folgen, woraus sich wiederum neue Möglichkeiten und Chancen ergeben könnten. So wurde das Konzept zwar allgemein formuliert, jedoch mit einem gewissen Fokus auf die spezifische Konzeptdemonstration – je nach Gegebenheiten bzw. Anforderungen könnten Abwandlungen sinnvoll oder notwendig sein, die nicht vorhersehbar sind. Ungeachtet möglicher Optimierungen wird auf Grundlage der gesammelten Erkenntnisse jedenfalls als generell äußerst wichtig erachtet, dass synthetische ART-Trainingsdaten bzw. deren Erzeugung sowie der aus diesen Daten abzuleitende Klassifikator mit dem Ziel einer bestmöglichen Performance wohl aufeinander abgestimmt und ganzheitlich betrachtet werden. Da jede ART-Prüfaufgabe individuellen Randbedingungen und Zielen unterliegt, lassen sich allgemein keine eindeutigen Limitierungen eines simulationsbasierten ART-Trainings bzw. einer entsprechenden ART-Prüfung (wie etwa maximal erreichbare Nachweisgrenzen für bestimmte Anomalien) angeben und auch die jeweils erforderliche Lösungsstrategie (einschließlich des Designs und des notwendigen Umfangs der synthetischen Trainingsdaten) hängt im Detail sicher vom Einzelfall ab. Vor dem Hintergrund, dass synthetische Daten heutzutage in den verschiedensten Zusammenhängen erzeugt werden und dabei u. a. auch als Trainingsdaten fungieren, existieren mutmaßlich bereits Lösungen aus anderen Fachbereichen fernab der ART, die auch hinsichtlich synthetischer ART-Daten herangezogen oder angepasst werden könnten. Angesichts der Komplexität sowie der Vielfältigkeit der Thematik konnten im Rahmen dieser Arbeit jedoch keine detaillierten, weiterführenden Recherchen hierzu erfolgen.

8 Zusammenfassung & Ausblick

Die **akustische Resonanzanalyse (ART)** ist ein ZfP-Verfahren, das ein schnelles und integrales 100-%-Qualitätsscreening von Einzelteilen auf strukturmechanische Anomalien ermöglicht. Im industriellen Umfeld wird die ART v. a. zur automatisierten, fertigungsintegrierten Qualitätsprüfung von metallischen oder keramischen, mit hohem Durchsatz produzierten Serienteilen eingesetzt. Üblicherweise zielt das Verfahren auf eine Auffälligkeitserkennung bzw. IO/NIO-Klassifizierung ab – fehlerhafte Objekte sollen identifiziert und schließlich aussortiert werden. Zur Ermittlung entsprechender Prüfurteile werden an den Prüfobjekten erzeugte Eigenschwingungssignale bzw. daraus extrahierte Kennwerte, z. B. einige Eigenfrequenzen der Teile, analysiert, wozu ein speziell auf die jeweilige Prüfaufgabe ausgerichteter Klassifikator verwendet wird. Dabei macht sich die ART zunutze, dass das Eigenschwingungsverhalten eines Körpers von seiner Beschaffenheit abhängt. So spiegeln sich neben den Geometrie- und Materialeigenschaften bzw. tolerierbaren Abweichungen von der Sollbeschaffenheit ggf. auch unzulässige Anomalien wie makroskopische Defekte in den Eigenschwingungen eines Prüfobjekts wider.

Die Lösung eines ART-Prüfproblems erfolgt i. d. R. mithilfe experimenteller **Trainingsdaten**, die messtechnisch an repräsentativen Trainingsteilen (d. h. aus der betrachteten Serienfertigung entnommene Teile) generiert werden. Diese Daten beschreiben die Eigenschwingungscharakteristika des zu prüfenden Teiletyps unter Beachtung der spezifischen Gegebenheiten wie zulässiger fertigungsbedingter Bauteilvariationen bzgl. Geometrie und Material, meist einschließlich qualitätsrelevanter Anomalien bzw. Defekte. Auf Basis der Trainingsdaten wird schließlich ein geeigneter Klassifikator ermittelt, der dann zur ART-Qualitätsprüfung des zu analysierenden Teiletyps eingesetzt wird.

Wenngleich der auf experimentellen Trainingsdaten basierende konventionelle Ansatz im Hinblick auf die Umsetzung industrieller ART-Prüfanwendungen oftmals praktikabel ist, lassen sich grundlegende **Limitierungen und Nachteile** der üblichen Lösungsstrategie benennen. So erfordert eine experimentelle Trainingsdatenerzeugung gewisse Eingriffe in die jeweilige Serienfertigung. Sie kann dabei mit einem recht hohen Aufwand verbunden sein, insbesondere dann, wenn (z. B. aufgrund komplizierter Gegebenheiten) eine größere Datenmenge an zahlreichen Teilen generiert werden muss, um ein Prüfproblem lösen zu können. Zudem ist es häufig notwendig, die Ist-Qualitätszustände der Trainingsteile mit potentiell aufwendigen oder gar zerstörenden Referenzverfahren zu bestimmen. Unter anderem selten in der Serie vorkommende Anomalien bzw. Qualitätszustände limitieren die experimentelle Generierbarkeit geeigneter Trainingsdaten. Letztendlich lässt sich folgern, dass messtechnisch erhobene Trainingsdaten aus statistischer Sicht unzureichende Stichprobenumfänge aufweisen sowie schlecht konditioniert sein können. Auch die nachteilige Charakteristik, dass die ART i. d. R. keinen Rückschluss auf die Art, die Größe oder die

Position der vermeintlichen Anomalie eines als NIO klassifizierten Teils ermöglicht, lässt sich mit einer im Umfang bzw. im Informationsgehalt eingeschränkten (experimentellen) Trainingsdatenbasis in Zusammenhang bringen.

Trotz der spezifischen Vorteile gegenüber anderen ZfP-Verfahren werden der industrielle Einsatz sowie die Akzeptanz der ART in der Praxis in Verbindung mit experimentellen Trainingsdaten limitiert. Aus physikalischer Sicht realisierbare ART-Prüfungen werden ggf. nicht umgesetzt. Diese Problematik wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit einem Konzept für ein **simulationsbasiertes ART-Training** adressiert. Das Konzept unterscheidet sich von anderen simulationsbasierten Lösungsansätzen v. a. durch einen besonderen Fokus auf lokale, von NIO- zu NIO-Teil in der Größe und/oder der Position variierende Fehlstellen. Konkret wurde eine Strategie beschrieben und demonstriert, die es neben einer belastbaren IO/NIO-Klassifizierbarkeit von Prüfobjekten ermöglichen soll, innerhalb gewisser Grenzen auf die Größe und die Position eines Defekts in einem jeden per ART als fehlerhaft bewerteten Teil zu schließen.

Wesentlich für ein simulationsbasiertes ART-Training gemäß dem entwickelten Konzept (und als zentrale Abgrenzung zum konventionellen experimentellen Ansatz dienend) sind **synthetische ART-Trainingsdaten**, die primär simulationstechnisch erzeugt werden und die im Hinblick auf eine angestrebte ART-Serienprüfung zu erwartenden zulässigen und unzulässigen Bauteilstrukturen in Form von sehr vielen, nicht physisch existierenden Trainingsteilen wiedergeben. Das Konzept beschreibt die folgenden drei Schritte, welche individuell auf das jeweilige Prüfproblem auszurichten sind:

- 1) Simulationsbasierte **Erzeugung synthetischer ART-Trainingsdaten**
- 2) **Ermittlung eines ART-Klassifikators** auf Basis der synthetischen Daten
- 3) **Validierung** bzw. praktische Überprüfung des Klassifikators (optional)

Dem Konzept zufolge sind bei der **Datenerzeugung** im Rahmen von zahlreichen FEM-Simulationen der betrachtete Bauteiltyp einschließlich tolerierbarer fertigungsbedingter Geometrie- und Materialvariationen sowie die für die geplante ART-Prüfung relevanten qualitätskritischen Anomalien einzubeziehen. Angesichts modellierungstechnischer Limitierungen und da die Verteilungscharakteristika der später mit ART zu prüfenden Teile i. d. R. nicht im Detail bekannt sein dürften oder abdriften können, erscheint ein gleichverteiltes Datendesign mit bewusst großzügig vorgegebenen Wertebereichen zielführend, um die tatsächlichen Eigenschaften der Prüfobjekte vergleichsweise neutral abzudecken. Die aus diesen FEM-Simulationen resultierenden synthetischen Eigenschwingungsdaten, deren Umfang optional per Interpolation etc. auf recheneffiziente Weise noch signifikant erweitert wird, bilden die anwendungsspezifischen Gegebenheiten ab. Um die grundlegenden Unterschiede zwischen der »Simulationswelt« und der »Messwelt« zu kompensieren, werden die berechneten Schwingungsdaten schließlich quantitativ an reale Messdaten angepasst. Falls die adressierte ART-Prüfaufgabe auf zusätzliche quantitative Aussagen zu den Anomalien bzw. Defekten von NIO-Teilen abzielt, können bei den Simulationen sehr

viele, über die relevanten Bauteilbereiche variierende Fehlstellen vorgegeben werden. Die generierten synthetischen Daten lassen sich dann unter Berücksichtigung zahlreicher, auf diskretisierte Defektausprägungen bezogene NIO-Klassen labeln. Dadurch kann u. a. die positionsabhängige Nichtlinearität lokaler Defekteinflüsse abgebildet und die Grundlage geschaffen werden, um später ART-Prüfurteile mit quantitativen Mehrinformationen zu den zurückgewiesenen Teilen und ihren mutmaßlichen Defekten zu erzielen.

Zur Demonstration des Konzepts wurde ein konkretes **Anwendungsszenario** in Form einer fiktiven ART-Prüfaufgabe genutzt, das sich auf einen modellhaft definierten Teiletyp (Pleuel) und einen künstlichen Defekttyp (zufällig positionierte Durchgangsbohrung mit einem Durchmesser zwischen 1 mm und 3 mm) stützt. Das hierbei verfolgte Prüfziel umfasst sowohl die Identifizierung von NIO-Teilen mit je einem einzigen Defekt als auch zusätzliche quantitative Aussagen zur jeweiligen Defektausprägung für NIO-Teile, jeweils auf der Grundlage der teilespezifischen Eigenfrequenzen bis ca. 30 kHz. Die Herausforderungen dieser Aufgabenstellung rühren u. a. daher, dass deutlich ausgeprägte, allerdings tolerierbare Zufallsvariationen hinsichtlich der Bauteilgeometrie vorgegeben wurden, die sich, neben einem möglichen Defekt, in den Pleuel-Eigenfrequenzen widerspiegeln. Dass daher – und wegen der nichtlinearen Abhängigkeit des Defekteinflusses insbesondere von der Defektposition – keine belastbare IO/NIO-Trennung mithilfe einfacher Schwellwert-Klassifikatoren erzielbar ist, wurde mit Simulationsdaten gezeigt.

Auf Basis der modellhaften Beschreibung des definierten Teiletyps einschließlich zentraler Verteilungsannahmen wurden mehrere Pleuel nach individuellen Geometrievorgaben maschinell aus einem Aluminiumwerkstoff gefertigt, die dann im Rahmen der Konzeptdemonstration als konkrete **Untersuchungsobjekte** verwendet wurden. Dabei dienten einige der Teile (Referenzpleuel) primär dem Abgleich von Simulations- und Messdaten. Die übrigen maschinell produzierten Teile (Validierpleuel) galt es, im finalen Schritt der Demonstration per ART auf einen möglichen Defekt hin zu prüfen, wobei im Verlauf in ausgewählte Validierpleuel einzelne, unterschiedlich positionierte Defekte durch Bohren eingebracht und schrittweise vergrößert wurden.

Im Rahmen der Demonstration wurden zunächst **synthetische ART-Trainingsdaten** erstellt, wozu tausende Trainingsteile (Trainingspleuel) beschrieben wurden, deren strukturelle mechanische Eigenschaften gleichverteilt in breiteren Wertebereichen im Vergleich zu den später analysierten Validierpleueln streuen. Die Eigenfrequenzen der Trainingspleuel wurden per FEM berechnet. Unter der Vorgabe von Geometrievariationen wurden dabei neben IO-Teilen auch NIO-Teile mit je einem zufällig positionierten 1-mm-, 2-mm- bzw. 3-mm-Durchgangsbohrungs-Defekt berücksichtigt. Zusätzliche NIO-Trainingspleuel mit enger abgestuften Defektgrößen wurden daraufhin aus den Simulationsdaten inter- bzw. extrapoliert. Zwecks Anpassung der synthetischen Trainingspleuel-Daten an Messdaten wurden die Referenzpleuel genutzt, die mittels ART in Bezug auf ihre Eigenfrequenzen quantifiziert und deren theoretische Eigenfrequenzen gestützt auf digitale Zwillinge der Teile simuliert wurden. Ein Vergleich der simulierten mit den experimentell ermittelten Referenzpleuel-Eigenfrequenzen zeigte v. a. systematische Abweichungen, die primär auf

simulationstechnischen Idealisierungen beruhen und die durch präzisere Modellierungen nicht hinreichend eliminiert werden konnten. Die quantitative Anpassung der synthetischen Trainingspleuel-Eigenfrequenzen wurde daher pragmatisch via Korrekturfaktoren gelöst, die anhand der Referenzpleuel ermittelt wurden. Mit dem Ziel, die Verteilungseigenschaften der synthetischen Eigenfrequenzdaten bestmöglich denen echter Messdaten anzugleichen, wurden die Daten zudem optional bzw. unter Berücksichtigung mehrerer Niveaus mit gleichverteilten Zufallszahlen verrauscht. Daraus resultierten schlussendlich drei Trainingsdatensätze, die sich nur im implementierten Rauschniveau unterscheiden. Zuletzt wurden die generierten Daten bzw. die zugrundeliegenden Trainingspleuel qualitätsabhängig gelabelt, wobei die defektfreien Pleuel einer einzigen IO-Klasse zugeordnet wurden. Für die defekten Trainingsteile wurden hingegen, im Hinblick auf spätere NIO-Prüfurteile mit quantitativen Mehrinformationen, hunderte NIO-Klassen spezifiziert, die nach diskretisierten Defektausprägungen separieren.

Mittels Diskriminanzanalyse wurden mehrere **ART-Klassifikatoren** auf Grundlage der gelabelten synthetischen Trainingsdaten berechnet, wobei neben den o. g. drei Trainingsdatensätzen auch fünf unterschiedliche Modellierungen in Bezug auf die Eingangsgrößen vorgenommen wurden, anhand derer die Klassifikatoren ihre Prüfentscheidungen treffen. Im Detail umfassen die Eingangsgrößen der Klassifikatoren standardmäßig die 18 Pleuel-Eigenfrequenzen bis ca. 30 kHz, wobei einige der Klassifikatoren zusätzlich vier bzw. alle acht Geometrieparameter der Pleuel als weitere Eingangsgrößen berücksichtigen. Dieser multimodale Ansatz in Form der kombinierten Auswertung von Eigenschwingungs- und Geometriedaten zielte auf die rechnerische Kompensation der überlagernden Geometrievariationen der Pleuel durch die Einbeziehung von geeignetem Vorwissen ab. Die theoretischen Performances der ermittelten Klassifikatoren wurden abschließend noch mithilfe zusätzlicher Simulationsdaten überprüft.

Im letzten Demonstrationsschritt, der **Validierung**, wurden die Klassifikatoren auf die maschinell hergestellten Validierpleuel bzw. deren qualitätsabhängig per ART ermittelte Eigenfrequenzen (sowie die je nach Klassifikator zusätzlich analysierten, zuvor ebenfalls messtechnisch erfassten Geometriedaten) appliziert. Die von den Klassifikatoren zurückgegebenen Prüfurteile bzw. die algorithmisch geschätzten Qualitätsabstufungen wurden anschließend evaluiert, indem sie im Vergleich mit den Ist-Qualitätszuständen der Pleuel statistisch ausgewertet wurden. Dabei wurde beobachtet, dass die anhand eines der drei Trainingsdatensätze abgeleiteten Klassifikatoren die effektivste IO/NIO-Trennung erzielten. Im Detail stuften die entsprechenden Klassifikatoren sämtliche 21 IO-Validierpleuel korrekt als defektfrei ein. Zudem erkannten sie alle 13 NIO-Pleuel ab einer bestimmten, von den je nach Klassifikator zur Qualitätsbeurteilung genutzten Eingangsdaten abhängigen Mindestdefektgröße als fehlerhaft – konkret ab einer Defektgröße von 2,5 mm rein eigenfrequenzbasiert sowie ab einer Größe von 2 mm bzw. 1,5 mm durch die zusätzliche Einbeziehung anteiliger bzw. aller verfügbaren Geometrieinformationen. Darüber hinaus trafen sämtliche Klassifikatoren meist präzise Aussagen zu den Defektausprägungen der als NIO identifizierten NIO-Teile, also zur Größe und zur Position der jeweiligen Durchgangsbohrung, was die übliche Leistungsfähigkeit der ART übertrifft.

Im Vorfeld der Validierung wurden auffällige Systematiken in den Eigenfrequenzen dreier weiterer maschinell gefertigter Validierpleuel erkannt. Ursächlich dafür sind mutmaßlich strukturmechanische **Anomalien unbekannter Art**, weswegen die drei Teile gesondert analysiert wurden – möglicherweise wurden sie entgegen der Fertigungsvorgabe aus einer anderen Materialcharge produziert. Jedenfalls schätzten die eigentlich auf die Erkennung von Pleueln mit Durchgangsbohrungs-Defekten ausgelegten ART-Klassifikatoren die drei auffälligen Teile auch in Abwesenheit solcher Defekte als NIO ein. Die Teile wurden also in gewisser Hinsicht korrekterweise zurückgewiesen, obwohl keine Durchgangsbohrungen, sondern andere Anomalien für die NIO-Urteile kausal sind.

Im Rahmen der Konzeptdemonstration wurden viele Aspekte beleuchtet und verstanden, wozu auch die zahlreichen theoretischen und experimentellen Untersuchungen beitrugen, die nicht direkt in die Demonstration einfließen. Vor dem Hintergrund, dass eine fiktive, idealisierte ART-Prüfaufgabe auf Laborebene betrachtet wurde, wurden die erarbeiteten Ergebnisse schließlich mit der Vision der **industriellen Umsetzung** eines simulationsbasierten ART-Trainings diskutiert. Auf Grundlage einiger Analysen an ART-relevanten Gussteilen wurde die i. d. R. höhere Komplexität von Serienteilen bzw. realer ART-Prüfprobleme verglichen mit den Pleueln bzw. der fiktiven Prüfaufgabe der Arbeit aufgezeigt, was u. a. dazu diente, das Anwendungsszenario und die Demonstration besser einordnen zu können. Dabei wurden Punkte identifiziert, die bei einer Anwendung des entwickelten Konzepts in der industriellen Praxis herausfordernd sein werden. Diese betreffen speziell die simulationsbasierte Erzeugung belastbarer synthetischer ART-Trainingsdaten. So ist u. a. offen, wie geometrisch komplizierte Realgeometrien und reale (ggf. inhomogene und anisotrope) Materialbeschaffenheiten einschließlich der von Teil zu Teil fertigungsbedingt auftretenden Variationen modelliert werden sollten bzw. wie präzise dies dann geschehen müsste. Dasselbe gilt auch für die Modellierung (geometrisch oder schwingungstechnisch) komplizierter Defekte in einer Simulationssoftware. Ferner stellt sich die Frage, ob die in synthetischen Trainingsdaten abzubildenden Bauteilstrukturen sowie deren Verteilungseigenschaften in einem konkreten Fall ausreichend genau bekannt wären oder wie sie mit vertretbarem Aufwand zugänglich gemacht werden könnten. Auch sprunghafte Chargeneinflüsse und abdriftende Eigenschaften stellen Herausforderungen in der Praxis dar, die im Zuge der Demonstration nicht explizit einbezogen wurden. In diesem Zusammenhang ist weiterhin eine effiziente, praxistaugliche Strategie zur Anpassung synthetischer Daten an Messdaten notwendig. Für einige der noch offenen Punkte wurden mehr oder weniger konkrete **Lösungsvorschläge** aufgezeigt.

Der **simulationsbasierte ART-Ansatz** der Arbeit mit synthetischen Trainingsdaten fokussiert speziell auf die Quantifizierung qualitätsrelevanter Anomalien bzw. makroskopischer Defekte per ART. In Anbetracht der diesbezüglichen Einschränkungen der ART und der äußerst positiven Demonstrationsergebnisse wird ungeachtet der o. g. Herausforderungen großes Potential für das erläuterte Konzept gesehen. Denn synthetische ART-Trainingsdaten können vom Grundsatz her hervorragend skaliert, automatisiert erzeugt und gezielt im Hinblick auf konkrete ART-Prüfaufgaben designt werden. Damit könnten sie auch den Einsatz leistungsfähiger Klassifikationsverfahren ermöglichen, die aufgrund

limitierter experimenteller Trainingsdaten bisher nicht eingesetzt werden. Perspektivisch könnten mittels synthetischer Trainingsdaten neue Prüfaufgaben und Anwendungsfelder für die ART erschlossen werden, die dem Verfahren bisher noch nicht zugänglich waren. Um das entwickelte Konzept, dessen Chancen und Möglichkeiten im Rahmen der Arbeit bei Weitem noch nicht ausgeschöpft wurden, ggf. weiter zu optimieren und im Idealfall eine industrielle Umsetzung zu verwirklichen, sind sicherlich weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie Recherchen zielführend. Um ein konkretes simulationsbasiertes ART-Training auf industrieller Ebene zu realisieren, könnte allerdings auch ein pragmatischer Lösungsweg im Sinne von »Learning by Doing« beschritten werden – also es bei der nächsten sich bietenden Gelegenheit einfach anzugehen und dabei schrittweise neue Erkenntnisse zu erlangen sowie (Teil-)Lösungen zu erarbeiten.

Da der Informationsgehalt akustischer Schwingungsdaten sehr umfangreich ist und sich verschiedenste Anomalien in den Eigenschwingungscharakteristika eines zu bewertenden Prüfobjekts widerspiegeln können, ist das **Potential der ART** immens – was am Ende der Arbeit nochmals deutlich hervorgehoben wird. Dabei liegt die wesentliche Herausforderung »lediglich« darin, die passenden Informationen zu extrahieren und auf geeignete Weise zu nutzen bzw. eine belastbare Qualitätsaussage aus entsprechenden objektspezifischen Schwingungsdaten zu ermitteln. Hierzu könnten u. a. synthetische Trainingsdaten in Kombination mit dem technischen Fortschritt im Bereich der Künstlichen Intelligenz und des Maschinellen Lernens sowie der fortschreitenden Digitalisierung von zunehmend stärker vernetzten und mit zahlreichen Sensoren ausgerüsteten Produktionsumgebungen einen entscheidenden Mehrwert für die ART bieten.

Ausblicksweise wurden die nachfolgend kompakt umschriebenen Punkte identifiziert, in denen der Autor dieser Arbeit hervorragende **Chancen** für die »zukünftige ART« sieht. Es handelt sich hierbei um grundlegendere, strategisch orientierte Vorschläge, zu denen keine speziellen Recherchen im Rahmen dieser Arbeit erfolgten. Um ggf. entsprechende Entwicklungen im Kontext der ART zielgerichtet und effizient vorantreiben zu können, erscheint insbesondere auch ein Blick in fachfremde Publikationen, welche die jeweiligen Punkte losgelöst von der ART adressieren, zielführend.

- Zukünftige Entwicklungen könnten verstärkt auf leistungsfähige **KI-Algorithmen** für die ART fokussieren. Dabei bieten sich entsprechende Ansätze jedoch nicht nur als Klassifikationsverfahren bzw. algorithmische Methoden für ART-Klassifikatoren an. Darüber hinaus könnte auch auf die KI-basierte Erzeugung synthetischer ART-Trainingsdaten abgezielt werden – entweder um den manuellen oder den rechnerischen Aufwand zu reduzieren oder um die bestmögliche Datenqualität zu erreichen. Neben einer überwiegend vollständigen Generierung von Trainingsdaten mittels KI als Alternative zur FEM könnten auch bestimmte Teilaspekte der Datenerzeugung mithilfe moderner Algorithmen adressiert werden, z. B. die Modellierung komplexer Bauteilstrukturen und -variationen als zentrale Grundlage für anschließende FEM-Simulationen oder die i. d. R. erforderliche, möglichst präzise Transformation einer FEM-berechneten Datenbasis in die »Messwelt«.

- Perspektivisch scheint ein **hybrider ART-Ansatz** erstrebenswert, der die jeweiligen Vorteile experimenteller und synthetischer Trainingsdaten vereint. Die Grundlage hierzu könnte in der Bündelung aller Bauteil- und Prozessdaten liegen, die in einer modernen Serienfertigung anfallen (Stichworte: Digitalisierung, Industrie 4.0, Big Data). Bei der Generierung synthetischer Trainingsdaten im Hinblick auf eine zu realisierende ART-Prüfung könnten solche z. B. in Form digitaler Produktakten strukturierte Daten (sofern sie geeignete teilespezifische Geometriedaten, Materialinformationen etc. umfassen) als umfangreiche Vorlage zur simulationstechnischen Modellierung des per ART zu prüfenden Teiletyps und dessen fertigungsbedingter Variationen dienen. Beinhaltend die fertigungsbegleitend gesammelten Daten auch ART-gemessene Eigenschwingungsdaten, könnte die in dem Fall schon vorhandene experimentelle Datengrundlage mit synthetischen Daten substanziell angereichert und dabei v. a. um solche Datenreihen erweitert werden, die in der Serie nur selten vorkommende Qualitätszustände beschreiben (in Form von Eigenschwingungsdaten und ggf. weiteren Bauteildaten). Weitergedacht könnte aus solchen hybriden Daten ein Klassifikator berechnet werden, der sich eben nicht nur auf eine hybride Datenbasis stützt, sondern der im Sinne einer **multimodalen Qualitätsprüfung** neben akustischen Daten der Prüfobjekte auch verschiedene weitere Bauteil- und Prozessinformationen mit dem Ziel einer optimierten Prüfqualität einbezieht.

Literatur & Quellen

- [Adk19] Adkins, G.; Little, C.; Meyerhofer, P. u. a.: *Characterizing Dynamics of Additively Manufactured Parts*. In: 37th Conference and Exposition on Structural Dynamics (IMAC 2019), 28.–31.01.2019, Orlando, USA. Proceedings. Springer Nature, Cham, 2019, S. 171–183. ISBN: 978-3-030-12684-1.
- [Alb20] Albert-Weiß, D.; Hajdini, E.; Heinrich, M. u. a.: *CNN for Ripeness Classification of Watermelon Fruits Based on Acoustic Testing*. In: 3rd International Symposium on Structural Health Monitoring and Nondestructive Testing (SHM-NDT 2020), 25.–26.11.2020, Quebec, Kanada [virtuell]. *e-Journal of Nondestructive Testing* 25.12 (2020), S. 1–9. ISSN: 1435-4934.
- [Ald18] Aldrin, J. C.; Mayes, A.; Jauriqui, L. u. a.: *Uncertainty Quantification of Resonant Ultrasound Spectroscopy for Material Property and Single Crystal Orientation Estimation on a Complex Part*. In: 44th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE 2017), 16.–21.07.2017, Provo, USA. *AIP Conference Proceedings* 1949.1 (2018), Art. 140010. ISSN: 0094-243X.
- [All03] Allemang, R. J.: *The Modal Assurance Criterion – Twenty Years of Use and Abuse*. In: *Sound & Vibration* 37.8 (2003), S. 14–21. ISSN: 1541-0161.
- [Alu98] Aluminium-Zentrale Düsseldorf (Hrsg.): *Aluminium Taschenbuch – Band 1: Grundlagen und Werkstoffe*. Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 1998. ISBN: 978-3-87017-241-1.
- [ASTMa] ASTM E2001-18. *Standard Guide for Resonant Ultrasound Spectroscopy for Defect Detection in Both Metallic and Non-Metallic Parts*. ASTM-Standard. ASTM, West Conshohocken, 2018.
- [ASTMb] ASTM E2534-20. *Standard Practice for Targeted Defect Detection Using Process Compensated Resonance Testing via Swept Sine Input for Metallic and Non-Metallic Parts*. ASTM-Standard. ASTM, West Conshohocken, 2020.
- [ASTMc] ASTM E3081-21. *Standard Practice for Outlier Screening Using Process Compensated Resonance Testing via Swept Sine Input for Metallic and Non-Metallic Parts*. ASTM-Standard. ASTM, West Conshohocken, 2021.
- [ASTMd] ASTM E3213-19. *Standard Practice for Part-to-Itself Examination Using Process Compensated Resonance Testing via Swept Sine Input for Metallic and Non-Metallic Parts*. ASTM-Standard. ASTM, West Conshohocken, 2019.
- [ASTMe] ASTM E1876-22. *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. ASTM-Standard. ASTM, West Conshohocken, 2022.

-
- [Aue11] Auer, L. von: *Ökonometrie. Eine Einführung*. Springer, Berlin, 2011. ISBN: 978-3-642-19994-3.
- [Aul73a] Auld, B. A.: *Acoustic Fields and Waves in Solids – Volume 1*. Wiley, New York, 1973. ISBN: 978-0-471-03700-2.
- [Aul73b] Auld, B. A.: *Acoustic Fields and Waves in Solids – Volume 2*. Wiley, New York, 1973. ISBN: 978-0-471-03701-9.
- [Bac18] Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W. u. a.: *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*. Springer Gabler, Berlin, 2018. ISBN: 978-3-662-56654-1.
- [Bar98] Barron, T. H. K.: *Generalized Theory of Thermal Expansion of Solids*. In: Ho, C. Y. u. a. (Hrsg.): *Thermal Expansion of Solids*. CINDAS Data Series on Material Properties. ASM International, Materials Park, 1998, S. 1–108. ISBN: 978-0-87170-623-2.
- [Bau05] Bauer, J.; Schmidt, L.; Kotterba, B.: *Einfluss der Glockenzier auf den Klang von Kirchenglocken*. In: *Bautechnik* 82.10 (2005), S. 724–727. ISSN: 0932-8351.
- [Bec13] Becker, W.; Gross, D.: *Mechanik elastischer Körper und Strukturen*. Springer, Berlin, 2013. ISBN: 978-3-642-56124-5.
- [Bie15] Biedermann, E.; Jauriqui, L.; Aldrin, J. C. u. a.: *Resonance Ultrasound Spectroscopy Forward Modeling and Inverse Characterization of Nickel-Based Superalloys*. In: 41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE 2014), 20.–25.07.2014, Boise, USA. *AIP Conference Proceedings* 1650.1 (2015), S. 835–844. ISSN: 0094-243X.
- [Bie16] Biedermann, E.; Jauriqui, L.; Aldrin, J. C. u. a.: *Uncertainty Quantification in Modeling and Measuring Components with Resonant Ultrasound Spectroscopy*. In: 42nd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE 2015), 26.–31.07.2015, Minneapolis, USA. *AIP Conference Proceedings* 1706.1 (2016), Art. 070008. ISSN: 0094-243X.
- [Bie17] Biedermann, E.; Heffernan, J.; Mayes, A. u. a.: *Process Compensated Resonance Testing Modeling for Damage Evolution and Uncertainty Quantification*. In: 43rd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE 2016), 17.–22.07.2016, Atlanta, USA. *AIP Conference Proceedings* 1806.1 (2017), Art. 090005. ISSN: 0094-243X.
- [Bie19] Biedermann, E.; Jauriqui, L.; Heffernan, J. u. a.: *Validation of Model-Trained Process Compensated Resonance Testing Inspection for Creep Deformation*. In: 46th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE 2019), 14.–18.07.2019, Portland, USA. *Proceedings. ISTUDP, Ames, 2019*, Art. QNDE2019–7038.
- [Bis19] Biswas, S.; Monroe, C.: *Identifying Cast Iron Microstructure Variation Using Acoustic Resonance Techniques*. In: *International Journal of Metalcasting* 13.1 (2019), S. 26–46. ISSN: 1939-5981.

- [Boh92] Bohley, P.: *Statistik. Einführendes Lehrbuch für Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler*. Oldenbourg, München, 1992. ISBN: 978-3-486-22356-9.
- [Bou11] Bouboulas, A. S.; Anifantis, N. K.: *Finite Element Modeling of a Vibrating Beam with a Breathing Crack: Observations on Crack Detection*. In: *Structural Health Monitoring* 10.2 (2011), S. 131–145. ISSN: 1475-9217.
- [Boy21] Boyadzhieva, S. M.: *Acoustic Resonance Testing of Additively Manufactured Mechanical Metamaterials*. Masterthesis. Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2021.
- [Boy24] Boyadzhieva, S. M.; Gutmann, F.; Fischer, S. C.: *Simulation-Based Approach to Estimate Influencing Factors on Acoustic Resonance Spectra of Additively Manufactured Mechanical Metamaterials*. In: *Journal of Sound and Vibration* 585 (2024), Art. 118436. ISSN: 0022-460X.
- [Bra22] Brauner, Y.; Herfert, D.; Lemke, A. u. a.: *Acoustic Resonance Testing on Production Lines with the Smart Impulse Hammer WaveHitMAX*. In: 40th Conference and Exposition on Structural Dynamics (IMAC 2022), 07.–10.02.2022, Orlando, USA. Proceedings. Springer Nature, Cham, 2022, S. 63–70. ISBN: 978-3-031-05415-0.
- [Bra24] Braun, N.; Kennedy, J.; Lishchenko, N. u. a.: *Examining the Feasibility of Acoustic Resonance Testing (ART) for Quality Control in Manufacturing*. In: 39th International Manufacturing Conference (IMC39), 24.–25.08.2023, Londonderry, UK. *Engineering Proceedings* 65.1 (2024), Art. 10. ISSN: 2673-4591.
- [Che20] Cheng, L.; Yaghoubi, V.; Paepegem, W. V. u. a.: *On the Influence of Reference Mahalanobis Distance Space for Quality Classification of Complex Metal Parts Using Vibrations*. In: *Applied Sciences* 10.23 (2020), Art. 8620. ISSN: 2076-3417.
- [Che21a] Cheng, L.; Yaghoubi, V.; Van Paepegem, W. u. a.: *Mahalanobis Classification System (MCS) Integrated with Binary Particle Swarm Optimization for Robust Quality Classification of Complex Metallic Turbine Blades*. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 146 (2021), Art. 107060. ISSN: 0888-3270.
- [Che21b] Cheng, L.; Yaghoubi, V.; Van Paepegem, W. u. a.: *Quality Inspection of Complex-Shaped Metal Parts by Vibrations and an Integrated Mahalanobis Classification System*. In: *Structural Health Monitoring* 20.6 (2021), S. 3075–3091. ISSN: 1475-9217.
- [Che21c] Cheng, L.; Yaghoubi, V.; Van Paepegem, W. u. a.: *Vibrational Quality Classification of Metallic Turbine Blades Under Measurement Uncertainty*. In: 2nd European NDT & CM Days (ENDT&CM 2021), 04.–07.10.2021, Prag, Tschechien. *arXiv.org* (2021), Art. arXiv:2110.09099. ISSN: 2331-8422.
- [Che23] Cheng, L.; Yaghoubi, V.; Van Paepegem, W. u. a.: *Integrated Interval Mahalanobis Classification System for the Quality Classification of Turbine Blades Based on Vibrational Data Incorporating Measurement Uncertainty*. In: *Structural Health Monitoring* 22.1 (2023), S. 166–179. ISSN: 1475-9217.

- [Cho19] Choudhary, A.; Goyal, D.; Shimi, S. L. u. a.: *Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review*. In: *Archives of Computational Methods in Engineering* 26.4 (2019), S. 1221–1238. ISSN: 1134-3060.
- [COM16] Dokumentation der Software COMSOL Multiphysics® (Version 5.2a). COMSOL AB, 2016. (abrufbar über die Software).
- [Dan16] Dannemann, M.; Kostka, P.; Kolbe, F. u. a.: *Akustisch basiertes Diagnosesystem zur Beurteilung des Bauteilzustandes*. In: 42. Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA 2016), 14.–17.03.2016, Aachen. Tagungsband. DEGA, Berlin, 2016, S. 806–808. ISBN: 978-3-939296-10-2.
- [Del18] Delvecchio, S.; Bonfiglio, P.; Pompoli, F.: *Vibro-Acoustic Condition Monitoring of Internal Combustion Engines: A Critical Review of Existing Techniques*. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 99 (2018), S. 661–683. ISSN: 0888-3270.
- [Deu99] Deutsch, V.; Deutsch, W.; Schuster, V. u. a.: *Die Ultraschallprüfung*. Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung – ZfP kompakt und verständlich – Band 1. Castell, Wuppertal, 1999. ISBN: 978-3-934255-01-2.
- [DGZfP] Richtlinie US 06. *Akustische Resonanzverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung – Prinzip, Vorgehensweise, Merkmale, Validierung*. DGZfP-Richtlinie. DGZfP, Berlin, 2009.
- [DINa] DIN EN ISO 12680-1:2007-05. *Verfahren zur Prüfung von feuerfesten Erzeugnissen – Teil 1: Bestimmung des dynamischen E-Moduls durch Schwingungs-Impulsanregung (ISO 12680-1:2005)*. Norm. Beuth, Berlin, 2007.
- [DINb] DIN EN ISO 16810:2014-07. *Zerstörungsfreie Prüfung – Ultraschallprüfung – Allgemeine Grundsätze (ISO 16810:2012)*. Norm. Beuth, Berlin, 2014.
- [DINc] DIN EN 13554:2011-04. *Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Allgemeine Grundsätze*. Norm. Beuth, Berlin, 2011.
- [DINd] DIN ISO 2768-1:1991-06. *Allgemeintoleranzen; Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung*. Norm. Beuth, Berlin, 1991.
- [Dou05] Douka, E.; Hadjileontiadis, L. J.: *Time-Frequency Analysis of the Free Vibration Response of a Beam with a Breathing Crack*. In: *NDT & E International* 38.1 (2005), S. 3–10. ISSN: 0963-8695.
- [Eck13] Eckey, H.-F.; Kosfeld, R.; Rengers, M.: *Multivariate Statistik. Grundlagen – Methoden – Beispiele*. Gabler, Wiesbaden, 2013. ISBN: 978-3-322-84476-7.
- [Ere13] Eren Gültekin, E.; Kurama, S.; Stultz, G. u. a.: *Resonant Inspection of Ceramic Tiles*. In: 3rd International Conference on Testing and Evaluation of Inorganic Materials (TEIM 2012), 15.–18.10.2012, Jingdezhen, China. *Key Engineering Materials* 544 (2013), S. 450–454. ISSN: 1662-9795.

- [Eve01] Every, A. G.: *The Elastic Properties of Solids: Static and Dynamic Principles*. In: Every, A. G. u. a. (Hrsg.): *Handbook of Elastic Properties of Solids, Liquids, and Gases – Volume 1: Dynamic Methods for Measuring the Elastic Properties of Solids*. Academic Press, San Diego, 2001, S. 3–36. ISBN: 978-0-12-445761-4.
- [Fah09] Fahrmeir, L.; Kneib, T.; Lang, S.: *Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen*. Springer, Berlin, 2009. ISBN: 978-3-642-01836-7.
- [Ger10] Meschede, D. (Hrsg.): *Gerthsen Physik*. Springer, Berlin, 2010. ISBN: 978-3-642-12894-3.
- [Gew16] Geweth, C. A.; Saati Khosroshahi, F.; Sepahvand, K. u. a.: *Fehlererkennung mittels Eigenfrequenzanalyse bei mehrschichtigen Faserverbundwerkstoffen*. In: 42. Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA 2016), 14.–17.03.2016, Aachen. Tagungsband. DEGA, Berlin, 2016, S. 1066–1067. ISBN: 978-3-939296-10-2.
- [Gie33] Giebe, E.; Blechschmidt, E.: *Experimentelle und theoretische Untersuchungen über Dehnungseigenschwingungen von Stäben und Rohren*. In: *Annalen der Physik* 410.4 (1933), S. 417–456. ISSN: 0003-3804.
- [Goo17] Goodlet, B. R.; Torbet, C. J.; Biedermann, E. J. u. a.: *Forward Models for Extending the Mechanical Damage Evaluation Capability of Resonant Ultrasound Spectroscopy*. In: *Ultrasonics* 77 (2017), S. 183–196. ISSN: 0041-624X.
- [Gud82] Gudmundson, P.: *Eigenfrequency Changes of Structures Due to Cracks, Notches or Other Geometrical Changes*. In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 30.5 (1982), S. 339–353. ISSN: 0022-5096.
- [Han97] Hands, G.: *Resonant Inspection for Mass Production Industries*. In: *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 39.12 (1997), S. 871–873. ISSN: 1354-2575.
- [Hef17] Heffernan, J. V.; Jauriqui, L.; Biedermann, E. u. a.: *Process Compensated Resonance Testing Models for Quantification of Creep Damage in Single Crystal Nickel-Based Superalloys*. In: *Materials Evaluation* 75.7 (2017), S. 941–952. ISSN: 0025-5327.
- [Hef18] Heffernan, J.; Biedermann, E.; Mayes, A. u. a.: *Detection and Quantification of Creep Strain Using Process Compensated Resonance Testing (PCRT) Sorting Modules Trained with Modeled Resonance Spectra*. In: 44th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE 2017), 16.–21.07.2017, Provo, USA. *AIP Conference Proceedings* 1949.1 (2018), Art. 140006. ISSN: 0094-243X.
- [Hef19] Heffernan, J.; Biedermann, E.; Mayes, A. u. a.: *Validation of Process Compensated Resonance Testing (PCRT) Sorting Modules Trained with Modeled Data*. In: 45th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE 2018), 15.–19.07.2018, Burlington, USA. *AIP Conference Proceedings* 2102.1 (2019), Art. 020020. ISSN: 0094-243X.

- [Hei15] Heinrich, M.; Rabe, U.; Grabowski, B. u. a.: *Methodische Entwicklung der akustischen Resonanzanalyse zur zerstörungsfreien Erkennung von ur- oder umgeformten Serienteilen mit unzulässigen Geometrieabweichungen – simulationbasierte Modellüberlegungen*. In: DACH-Jahrestagung 2015, 11.–13.05.2015, Salzburg, Österreich. Berichtsband BB 152. DGZfP, Berlin, 2015, Art. Mi.2.A.3. ISBN: 978-3-940283-68-9.
- [Hei20] Heinrich, M.; Rabe, U.; Valeske, B.: *Simulation-Based Generation of Representative and Valid Training Data for Acoustic Resonance Testing*. In: *Applied Sciences* 10.17 (2020), Art. 6059. ISSN: 2076-3417.
- [Hei22] Heinrich, M.; Valeske, B.; Rabe, U.: *Efficient Detection of Defective Parts with Acoustic Resonance Testing Using Synthetic Training Data*. In: *Applied Sciences* 12.15 (2022), Art. 7648. ISSN: 2076-3417.
- [Hei79] Heinhold, J.; Gaede, K.-W.: *Ingenieur-Statistik*. Oldenbourg, München, 1979. ISBN: 978-3-486-31744-2.
- [Her01] Hermann, W.; Sockel, H.-G.: *Torsional and Flexural Vibrations of Rods*. In: Every, A. G. u. a. (Hrsg.): *Handbook of Elastic Properties of Solids, Liquids, and Gases – Volume 1: Dynamic Methods for Measuring the Elastic Properties of Solids*. Academic Press, San Diego, 2001, S. 299–327. ISBN: 978-0-12-445761-4.
- [Her03] Hertlin, I.: *Akustische Resonanzanalyse*. Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung – ZfP kompakt und verständlich – Band 5. Castell, Wuppertal, 2003. ISBN: 978-3-934255-06-7.
- [Her06] Hertlin, I.: *Acoustic Resonance Analysis Using FEM and Laser Scanning for Defect Characterization in In-Process NDT*. In: 9th European Conference on Non-destructive Testing (ECNDT 2006), 25.–29.09.2006, Berlin. Berichtsband BB 103. DGZfP, Berlin, 2006, Art. We.4.8.1. ISBN: 978-3-931381-86-8.
- [Her12] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: *Physik für Ingenieure*. Springer, Berlin, 2012. ISBN: 978-3-642-22569-7.
- [Her30] Hersey, M. D.: *Effect of Small Changes in Temperature on the Properties of Bodies*. In: *Bureau of Standards Journal of Research* 4.1 (1930), S. 137–156. ISSN: 0091-1801.
- [Ibr18] Ibrahim, Y.; Li, Z.; Davies, C. M. u. a.: *Acoustic Resonance Testing of Additive Manufactured Lattice Structures*. In: *Additive Manufacturing* 24 (2018), S. 566–576. ISSN: 2214-8604.
- [Jan05] Jann, B.: *Einführung in die Statistik*. Oldenbourg, München, 2005. ISBN: 978-3-486-57687-0.
- [Jon02] Jones, F. E.; Schoonover, R. M.: *Handbook of Mass Measurement*. CRC Press, Boca Raton, 2002. ISBN: 978-0-8493-2531-1.
- [Jos18] Joshi, A. K.; Patre, B. M.: *Sorting of Portable Small Metallic Components Using Machine Learning Technique*. In: *International Journal of Applied Engineering Research* 13.23 (2018), S. 16282–16287. ISSN: 0973-4562.

- [Ju22] Ju, Y. C.; Kraljevski, I.; Neunübel, H. u. a.: *Acoustic Resonance Testing of Small Data on Sintered Cogwheels*. In: *Sensors* 22.15 (2022), Art. 5814. ISSN: 1424-8220.
- [Kis00] Kisa, M.; Brandon, J.: *The Effects of Closure of Cracks on the Dynamics of a Cracked Cantilever Beam*. In: *Journal of Sound and Vibration* 238.1 (2000), S. 1–18. ISSN: 0022-460X.
- [Kle15] Klein, B.: *FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015. ISBN: 978-3-658-06054-1.
- [Kra20a] Kraljevski, I.; Duckhorn, F.; Ju, Y. C. u. a.: *Acoustic Resonance Recognition of Coins*. In: IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I²MTC 2020), 25.–28.05.2020, Dubrovnik, Kroatien [virtuell]. Proceedings. IEEE, Piscataway, 2020, S. 1–6. ISBN: 978-1-7281-4460-3.
- [Kra20b] Kraljevski, I.; Duckhorn, F.; Ju, Y. C. u. a.: *Acoustic Resonance Testing of Glass IV Bottles*. In: 16th IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI 2020), 05.–07.06.2020, Neos Marmaras, Griechenland [virtuell]. Proceedings. Springer Nature, Cham, 2020, S. 195–206. ISBN: 978-3-030-49186-4.
- [Kra86] Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H.: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. Springer, Berlin, 1986. ISBN: 978-3-540-15754-0.
- [Kut15] Kuttner, T.: *Praxiswissen Schwingungsmesstechnik*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015. ISBN: 978-3-658-04638-5.
- [Lai11] Lai, C.; Sun, X.; Dasch, C. u. a.: *Quantify Resonance Inspection with Finite Element-Based Modal Analyses*. In: *Journal of Vibration and Acoustics* 133.3 (2011), Art. 031004. ISSN: 1048-9002.
- [Lai12] Lai, C.; Xu, W.; Sun, X.: *Development of an Inverse Algorithm for Resonance Inspection*. In: *Journal of Vibration and Acoustics* 134.5 (2012), Art. 051017. ISSN: 1048-9002.
- [Lai13] Lai, C.; Sun, X.: *Predicting Flaw-Induced Resonance Spectrum Shift with Theoretical Perturbation Analysis*. In: *Journal of Sound and Vibration* 332.22 (2013), S. 5953–5964. ISSN: 0022-460X.
- [Lec22] Lechner, P.; Reberger, E.; Gruber, M. u. a.: *Localization of Cavities in Cast Components via Impulse Excitation and a Finite Element Analysis*. In: *Production Engineering Research and Development* 16.6 (2022), S. 869–877. ISSN: 0944-6524.
- [Led01] Ledbetter, H.: *Young-Moduli Temperature Behavior of Forty Engineering Alloys*. In: Levy, M. u. a. (Hrsg.): *Handbook of Elastic Properties of Solids, Liquids, and Gases – Volume 2: Elastic Properties of Solids: Theory, Elements and Compounds, Novel Materials, Technological Materials, Alloys, and Building Materials*. Academic Press, San Diego, 2001, S. 337–342. ISBN: 978-0-12-445762-1.

- [Liu20] Liu, X.; Pei, D.; Lodewijks, G. u. a.: *Acoustic Signal Based Fault Detection on Belt Conveyor Idlers Using Machine Learning*. In: *Advanced Powder Technology* 31.7 (2020), S. 2689–2698. ISSN: 0921-8831.
- [Liv19a] Livings, R.; Bachman, W.; Biedermann, E.: *Characterizing Polymer O-Rings Nondestructively Using Resonant Ultrasound Spectroscopy*. In: 46th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE 2019), 14.–18.07.2019, Portland, USA. Proceedings. ISTUDP, Ames, 2019, Art. QNDE2019–6967.
- [Liv19b] Livings, R.; Mayes, A.; Biedermann, E. u. a.: *Detection of Microtexture Regions in Titanium Turbine Engine Disks Using Process Compensated Resonance Testing: A Modeling Study*. In: 45th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE 2018), 15.–19.07.2018, Burlington, USA. *AIP Conference Proceedings* 2102.1 (2019), Art. 020022. ISSN: 0094-243X.
- [Liv20a] Livings, R. A.; Biedermann, E. J.; Wang, C. u. a.: *Nondestructive Evaluation of Additive Manufactured Parts Using Process Compensated Resonance Testing*. In: Shamsaei, N. u. a. (Hrsg.): *Structural Integrity of Additive Manufactured Parts*. ASTM, West Conshohocken, 2020, S. 165–205. ISBN: 978-0-8031-7686-7.
- [Liv20b] Livings, R.; Smith, N.; Biedermann, E. u. a.: *Process Compensated Resonance Testing for Qualifying the Metallurgical Aspects and Manufacturing Defects of Turbine Blades*. In: Turbomachinery Technical Conference & Exposition (Turbo Expo 2020), 21.–25.09.2020, London, UK [virtuell]. Proceedings. ASME, New York, 2020, Art. GT2020–15268, V008T18A009. ISBN: 978-0-7918-8419-5.
- [MAT22] Dokumentation der Software MATLAB[®] (Version R2022b, MATLAB 9.13). The MathWorks, Inc., 2022. (abrufbar über die Software sowie online unter <https://www.mathworks.com/help/releases/R2022b/matlab/>).
- [May18] Mayes, A.; Jauriqui, L.; Biedermann, E. u. a.: *Part-to-Itself Model Inversion in Process Compensated Resonance Testing*. In: 44th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE 2017), 16.–21.07.2017, Provo, USA. *AIP Conference Proceedings* 1949.1 (2018), Art. 140002. ISSN: 0094-243X.
- [May19] Mayes, A.; Heffernan, J.; Jauriqui, L. u. a.: *Process Compensated Resonance Testing (PCRT) Inversion for Material Characterization and Digital Twin Calibration*. In: 45th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE 2018), 15.–19.07.2018, Burlington, USA. *AIP Conference Proceedings* 2102.1 (2019), Art. 020019. ISSN: 0094-243X.
- [McG21] McGuigan, S.; Arguelles, A. P.; Obaton, A.-F. u. a.: *Resonant Ultrasound Spectroscopy for Quality Control of Geometrically Complex Additively Manufactured Components*. In: *Additive Manufacturing* 39 (2021), Art. 101808. ISSN: 2214-8604.
- [McL87] McLellan, R. B.; Ishikawa, T.: *The Elastic Properties of Aluminum at High Temperatures*. In: *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 48.7 (1987), S. 603–606. ISSN: 0022-3697.

-
- [Mig01] Migliori, A.; Darling, T. W.; Baiardo, J. P. u. a.: *Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS)*. In: Every, A. G. u. a. (Hrsg.): *Handbook of Elastic Properties of Solids, Liquids, and Gases – Volume 1: Dynamic Methods for Measuring the Elastic Properties of Solids*. Academic Press, San Diego, 2001, S. 239–262. ISBN: 978-0-12-445761-4.
- [Mig97] Migliori, A.; Sarrao, J. L.: *Resonant Ultrasound Spectroscopy. Applications to Physics, Material Measurements, and Nondestructive Evaluation*. Wiley, New York, 1997. ISBN: 978-0-471-12360-6.
- [Mit11] Mittag, H.-J.: *Statistik. Eine interaktive Einführung*. Springer, Berlin, 2011. ISBN: 978-3-642-17846-7.
- [Mös09] Möser, M.: *Technische Akustik*. Springer, Berlin, 2009. ISBN: 978-3-540-89817-7.
- [Nah05] Nahvi, H.; Jabbari, M.: *Crack Detection in Beams Using Experimental Modal Data and Finite Element Model*. In: *International Journal of Mechanical Sciences* 47.10 (2005), S. 1477–1497. ISSN: 0020-7403.
- [Nas15] Nasdala, L.: *FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik. Hintergrundinformationen, Tipps und Tricks*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015. ISBN: 978-3-658-06630-7.
- [Nat08] Nater, R.; Reichmuth, A.; Schwartz, R. u. a.: *Wägelexikon. Leitfaden wägetechnischer Begriffe*. Springer, Berlin, 2008. ISBN: 978-3-540-75907-2.
- [Nir22] Nirwan, N. W.; Ramani, H. B.: *Condition Monitoring and Fault Detection in Roller Bearing Used in Rolling Mill by Acoustic Emission and Vibration Analysis*. In: 1st International Conference on Computations in Materials and Applied Engineering (CMAE 2021), 01.–02.05.2021, Dehradun, Indien. *Materials Today: Proceedings* 51.1 (2022), S. 344–354. ISSN: 2214-7853.
- [Oba21] Obaton, A.-F.; Wang, Y.; Butsch, B. u. a.: *A Non-Destructive Resonant Acoustic Testing and Defect Classification of Additively Manufactured Lattice Structures*. In: *Welding in the World* 65.3 (2021), S. 361–371. ISSN: 0043-2288.
- [Oba23] Obaton, A.-F.; Weaver, G.; Fayard, L. F. u. a.: *Classification of Metal PBF-LB Parts Manufactured with Different Process Parameters Using Resonant Ultrasound Spectroscopy*. In: *Welding in the World* 67.4 (2023), S. 1091–1103. ISSN: 0043-2288.
- [Pap11] Papula, L.: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler – Band 3: Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2011. ISBN: 978-3-8348-1227-8.
- [Pas12] Pastor, M.; Binda, M.; Harčarik, T.: *Modal Assurance Criterion*. In: *Procedia Engineering* 48 (2012), S. 543–548. ISSN: 1877-7058.
- [Pfl06] Pfeleiderer, K.: *Frequenzkonversion aufgrund nichtlinearer akustischer Phänomene: Grundlagen und Anwendung zur defektselektiven zerstörungsfreien Prüfung*. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2006.

- [Pol24] Webseite der Polytec GmbH, Waldbronn. <https://www.polytec.com/> (zuletzt abgerufen am 06.08.2024).
- [Pri16] Pribe, J. D.; West, B. M.; Gegel, M. L. u. a.: *Modal Response as a Validation Technique for Metal Parts Fabricated with Selective Laser Melting*. In: 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2016), 08.–10.08.2016, Austin, USA. Proceedings. UT Austin, Austin, 2016, S. 151–174.
- [Rab10] Rabe, U.; Geng, K.; Goebel, M. u. a.: *Schwingungen von Stäben als Modell für die Klangprüfung*. In: DGZfP-Jahrestagung 2010, 10.–12.05.2010, Erfurt. Berichtsband BB 122. DGZfP, Berlin, 2010, Art. P34. ISBN: 978-3-940283-26-9.
- [Rag21] Raghav, M. S.; Sharma, R. B.: *A Review on Fault Diagnosis and Condition Monitoring of Gearboxes by Using AE Technique*. In: *Archives of Computational Methods in Engineering* 28.4 (2021), S. 2845–2859. ISSN: 1134-3060.
- [Rös16] Rösler, J.; Harders, H.; Bäker, M.: *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016. ISBN: 978-3-658-13795-3.
- [Ros99] Rose, J. L.: *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge University Press, Cambridge, 1999. ISBN: 978-0-521-64043-5.
- [Sal18] Salameh, J. P.; Cauet, S.; Etien, E. u. a.: *Gearbox Condition Monitoring in Wind Turbines: A Review*. In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 111 (2018), S. 251–264. ISSN: 0888-3270.
- [San11] Sankaran, V. H.: *Low Cost Inline NDT System for Internal Defect Detection in Automotive Components Using Acoustic Resonance Testing*. In: National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation (NDE 2011), 08.–10.12.2011, Chennai, Indien. Proceedings. ISNT, Chennai, 2011, S. 237–239.
- [San12] Sankaran, V. H.: *Acoustic Resonance Testing Using Transform Decomposition and Support Vector Machines for Efficient and Accurate Detection of Defects in Forged Components*. In: 18th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2012), 16.–20.04.2012, Durban, Südafrika. Proceedings. SAINT, Johannesburg, 2012, S. 1–10. ISBN: 978-0-620-52872-6.
- [Sch02] Schmidt, L.; Steinbuch, R.: *Improved Interpretation of the Acoustic Response Spectrum to Identify Types of Component Deviations*. In: *Research in Nondestructive Evaluation* 14.2 (2002), S. 95–110. ISSN: 0934-9847.
- [Sch05] Schwarz, J.; Saxton, J.; Jauriqui, L.: *Process Compensated Resonant Testing in Manufacturing Process Control*. In: *Materials Evaluation* 63.7 (2005), S. 736–739. ISSN: 0025-5327.
- [Sch12] Schlittgen, R.: *Einführung in die Statistik. Analyse und Modellierung von Daten*. Oldenbourg, München, 2012. ISBN: 978-3-486-71591-0.
- [Sch96] Schwarz, J. J.; Rhodes, G. W.: *Resonance Inspection for Quality Control*. In: Thompson, D. O. u. a. (Hrsg.): *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation – Volume 15B*. Plenum Press, New York, 1996, S. 2265–2271. ISBN: 978-0-306-45310-6.

- [She20] Sheriff, K. A. I.; Hariharan, V.; Kumar, B. M.: *Review on Condition Monitoring of Rotating Machines*. In: *International Journal of Scientific & Technology Research* 9.2 (2020), S. 2343–2346. ISSN: 2277-8616.
- [Sid13] Sidambe, A. T.; Choong, W. L.; Hamilton, H. G. C. u. a.: *Correlation of Metal Injection Moulded Ti6Al4V Yield Strength with Resonance Frequency (PCRT) Measurements*. In: *Materials Science and Engineering: A* 568 (2013), S. 220–227. ISSN: 0921-5093.
- [Sok09] Sokolova, M.; Lapalme, G.: *A Systematic Analysis of Performance Measures for Classification Tasks*. In: *Information Processing & Management* 45.4 (2009), S. 427–437. ISSN: 0306-4573.
- [Ste05] Steinbuch, R.: *Scatter or Defect? Some Remarks on the Interpretation of Acoustic Spectral Shift*. In: *Research in Nondestructive Evaluation* 15.4 (2005), S. 173–189. ISSN: 0934-9847.
- [Ste10] Steinke, P.: *Finite-Elemente-Methode. Rechnergestützte Einführung*. Springer, Berlin, 2010. ISBN: 978-3-642-11205-8.
- [Sti01] Stiffler, R. C.: *Elastic Constants of Aluminum Alloys*. In: Levy, M. u. a. (Hrsg.): *Handbook of Elastic Properties of Solids, Liquids, and Gases – Volume 2: Elastic Properties of Solids: Theory, Elements and Compounds, Novel Materials, Technological Materials, Alloys, and Building Materials*. Academic Press, San Diego, 2001, S. 315–336. ISBN: 978-0-12-445762-1.
- [Stu05] Stultz, G. R.; Bono, R. W.; Schiefer, M. I.: *Fundamentals of Resonant Acoustic Method NDT*. In: International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials (PM²TEC 2005), 19.–23.06.2005, Montreal, Kanada. Proceedings. MPIF, Princeton, 2005, S. 1–11. ISBN: 978-0-9762057-2-2.
- [Sun20] Sun, L.; Feng, S.; Chen, C. u. a.: *Identification of Eggshell Crack for Hen Egg and Duck Egg Using Correlation Analysis Based on Acoustic Resonance Method*. In: *Journal of Food Process Engineering* 43.8 (2020), Art. e13430. ISSN: 0145-8876.
- [Urb17] Urban, J.; Capps, N.; West, B. u. a.: *Towards Defect Detection in Metal SLM Parts Using Modal Analysis „Fingerprinting“*. In: 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2017), 07.–09.08.2017, Austin, USA. Proceedings. UT Austin, Austin, 2017, S. 2503–2515.
- [Val03] Vallen, H.: *Die Schallemissionsprüfung*. Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung – ZfP kompakt und verständlich – Band 6. Castell, Wuppertal, 2003. ISBN: 978-3-934255-08-1.
- [VDAa] VDA 301. *Eigenfrequenzmessung und Modal-Analyse von Bremscheiben in der Entwicklung*. VDA-Empfehlung. VDA, Frankfurt, 2009.
- [VDAb] VDA 302. *Eigenfrequenzmessung von Bremscheiben in der Serienproduktion*. VDA-Empfehlung. VDA, Frankfurt, 2009.

-
- [Xu15] Xu, W.; Lai, C.; Sun, X.: *Identify Structural Flaw Location and Type with an Inverse Algorithm of Resonance Inspection*. In: *Journal of Vibration and Control* 21.13 (2015), S. 2685–2696. ISSN: 1077-5463.
- [Yag22] Yaghoubi, V.; Cheng, L.; Van Paeppegem, W. u. a.: *CNN-DST: Ensemble Deep Learning Based on Dempster-Shafer Theory for Vibration-Based Fault Recognition*. In: *Structural Health Monitoring* 21.5 (2022), S. 2063–2082. ISSN: 1475-9217.
- [Ye18] Ye, D.; Hong, G. S.; Zhang, Y. u. a.: *Defect Detection in Selective Laser Melting Technology by Acoustic Signals with Deep Belief Networks*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 96.5 (2018), S. 2791–2801. ISSN: 0268-3768.
- [Zad04] Zadler, B. J.; Le Rousseau, J. H. L.; Scales, J. A. u. a.: *Resonant Ultrasound Spectroscopy: Theory and Application*. In: *Geophysical Journal International* 156.1 (2004), S. 154–169. ISSN: 1365-246X.
- [Zel09] Zeller, P. (Hrsg.): *Handbuch Fahrzeugakustik. Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009. ISBN: 978-3-8348-0651-2.
- [Zha17] Zhang, K.; Yan, X.: *Multi-Cracks Identification Method for Cantilever Beam Structure with Variable Cross-Sections Based on Measured Natural Frequency Changes*. In: *Journal of Sound and Vibration* 387 (2017), S. 53–65. ISSN: 0022-460X.
- [Zha18] Zhang, W.; Lv, Z.; Xiong, S.: *Nondestructive Quality Evaluation of Agro-Products Using Acoustic Vibration Methods – A Review*. In: *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 58.14 (2018), S. 2386–2397. ISSN: 1040-8398.
- [Zhe17] Zheng, Y.; Heinrich, M.; Osman, A. u. a.: *Automated Detection of Geometric Defects on Connecting Rod via Acoustic Resonance Testing*. In: 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2017), 28.08.–02.09.2017, Kos, Griechenland. Proceedings. IEEE, Piscataway, 2017, S. 1868–1872. ISBN: 978-0-9928626-7-1.
- [Zho12] Zhou, H.; Li, W.; Lv, B. u. a.: *Free Vibrations of Cylindrical Shells with Elastic-Support Boundary Conditions*. In: *Applied Acoustics* 73.8 (2012), S. 751–756. ISSN: 0003-682X.

Anhang A

Kennwerte eines Aluminiumwerkstoffs

Im Kontext des in Kap. 4 erläuterten Anwendungsszenarios spielen Eigenschwingungen von Teilen aus einem **Aluminiumwerkstoff** eine zentrale Rolle. Daher wurden die für die Eigenmoden und Eigenfrequenzen elastischer Körper (seitens des Materials) maßgeblichen Dichte- und Elastizitätseigenschaften eines solchen Werkstoffs aufgearbeitet. Das Ziel bestand hierbei in der Festlegung von Kennwerten, wie sie für Aluminium bzw. eine Aluminiumlegierung typisch sind. Diese Kennwerte wurden schließlich standardmäßig im Rahmen theoretischer Betrachtungen und für die umfangreichen FEM-Berechnungen der Arbeit genutzt. Den folgenden Ausführungen liegen [Alu98; Sti01] als Quellen zugrunde. Alle angegebenen Werte beziehen sich auf eine Temperatur von 20 °C.

Die **Dichte** von reinem Aluminium beträgt etwa 2698,9 kg/m³, wobei je nach Legierung auch Werte zwischen 2600 kg/m³ und 2800 kg/m³ typisch sind. Aufgrund seiner kubisch-flächenzentrierten Struktur ist ein Aluminium-Einkristall anisotrop. Ein polykristalliner Aluminiumwerkstoff mit stochastischer Kornausrichtung weist hingegen eine **isotrope Elastizität** auf. Der Elastizitäts- und der Schubmodul liegen dann in Größenordnungen von 70 GPa (60 GPa bis 78 GPa) bzw. 26 GPa (22 GPa bis 28 GPa). Für die Poissonzahl ist ein Wert um 0,34 (0,32 bis 0,40) typisch. Tab. A.1 nennt die standardmäßig für einen isotropen Aluminiumwerkstoff angenommenen Materialkennwerte. Für die Dichte ρ , den Elastizitätsmodul E und die Poissonzahl ν wurden typische Werte den voranstehenden Ausführungen entsprechend festgelegt. Darauf basierend wurden die redundanten Werte des Schubmoduls G und der elastischen Konstanten C_{11} , C_{44} sowie C_{12} mithilfe der in Abschn. 2.2.1 angegebenen Umrechnungsvorschriften ermittelt.

Tab. A.1: Typische Materialkennwerte eines isotropen Aluminiumwerkstoffs

Materialieigenschaft	Symbol	Wert (bei 20 °C)
Dichte	ρ	$2,700 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Elastizitätsmodul	E	$7,000 \cdot 10^1 \text{ GPa}$
Schubmodul	G	$2,612 \cdot 10^1 \text{ GPa}$
Poissonzahl	ν	$3,400 \cdot 10^{-1}$
elastische Konstante	C_{11}	$1,077 \cdot 10^2 \text{ GPa}$
elastische Konstante	C_{44}	$2,612 \cdot 10^1 \text{ GPa}$
elastische Konstante	C_{12}	$5,550 \cdot 10^1 \text{ GPa}$

Anhang B

Visualisierungen der Pleuel-Eigenmoden

Dieser Anhang beinhaltet detaillierte **Visualisierungen der Eigenmoden** des in dieser Arbeit betrachteten Teiletyps eines Pleuels unter Berücksichtigung des Frequenzbereichs bis ca. 30 kHz. Wegen der guten Zugänglichkeit werden nachfolgend ausschließlich FEM-berechnete Schwingungsformen gezeigt. Diese beziehen sich auf ein IO-Teil mit Referenzkonfiguration, das stellvertretend für die Bandbreite der in Kap. 4 auf modellhafte Weise beschriebenen Zufallspleuel ausgewählt wurde.

Die Abbildungen B.1 bis B.18 visualisieren die am Beispiel der IO-Referenzkonfiguration **FEM-berechneten Eigenschwingungsformen** *Mode-1* bis *Mode-18*. Jede Visualisierung stellt die dynamische Eigenschwingungsverformung der Pleuel-Geometrie gegenüber der mit schwarzen Linien gekennzeichneten Ruhelage modenspezifisch dar und entspricht einer grafischen Interpretation der jeweiligen FEM-Lösung bzw. des mittels FEM in Form von Verschiebungswerten berechneten Eigenvektors. Die numerisch ermittelten Verschiebungen sind dabei zusätzlich farblich verdeutlicht, wobei Schwingungsknoten blau (keine bzw. verhältnismäßig geringe Verschiebung) und Schwingungsbäuche rot (vergleichsweise stark ausgeprägte Verschiebung) eingefärbt sind. Die Abbildungen umfassen jeweils die folgenden drei Perspektiven:

- **3D-Ansicht** → Blickrichtung entsprechend dem skizzierten Pleuel-KOS
- **Seitenansicht** → Blick senkrecht auf die x - z -Ebene des Pleuel-KOS
- **Draufsicht** → Blick senkrecht auf die x - y -Ebene des Pleuel-KOS

Jede Darstellung in Abb. B.1 bis Abb. B.18 entspricht anschaulich betrachtet einer (aus physikalischer Sicht stark überzeichneten) Momentaufnahme eines harmonischen Schwingungsvorgangs zum Zeitpunkt einer maximalen Auslenkung, wobei pro Perspektive zwei um jeweils eine halbe Schwingungsperiode phasenverschobene Zustände visualisiert sind. In jeder Abbildung ist spezifiziert, ob es sich bei der dargestellten Eigenschwingungsform aus phänomenologischer Sicht um eine Longitudinal-, eine Torsions- oder eine Biegemode handelt. Für Letztere ist außerdem angegeben, ob die dominierende Verformungsrichtung mit der y - oder der z -Richtung des Pleuel-KOS zusammenfällt.

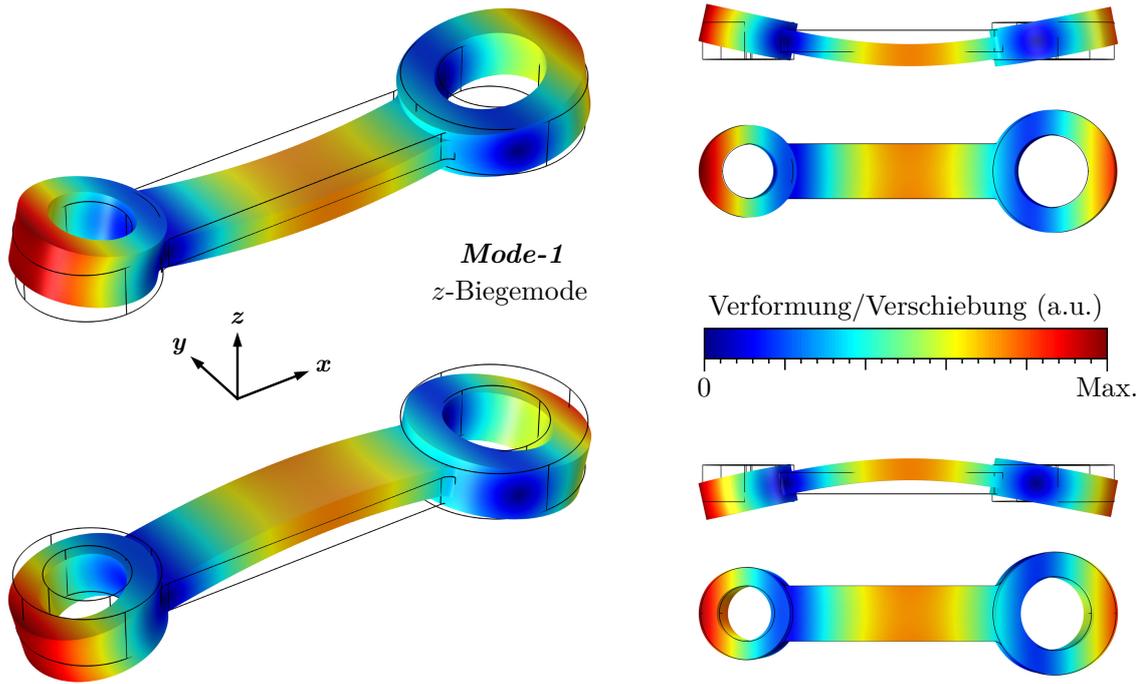


Abb. B.1: Eigenschwingungsform *Mode-1* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

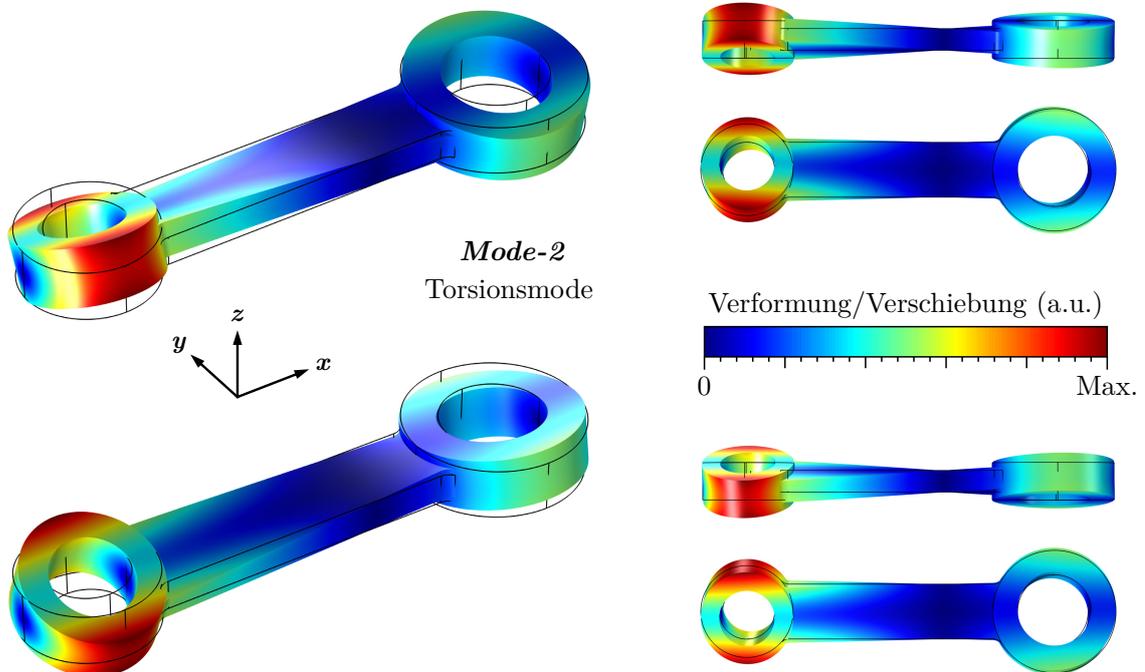


Abb. B.2: Eigenschwingungsform *Mode-2* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

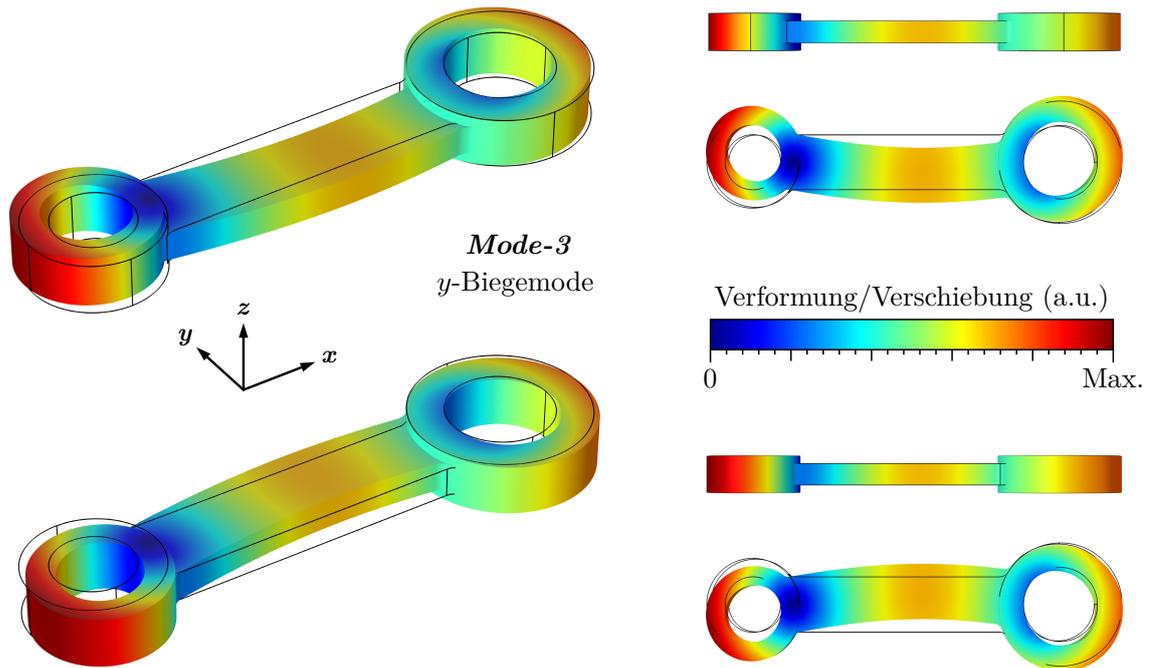


Abb. B.3: Eigenschwingungsform *Mode-3* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

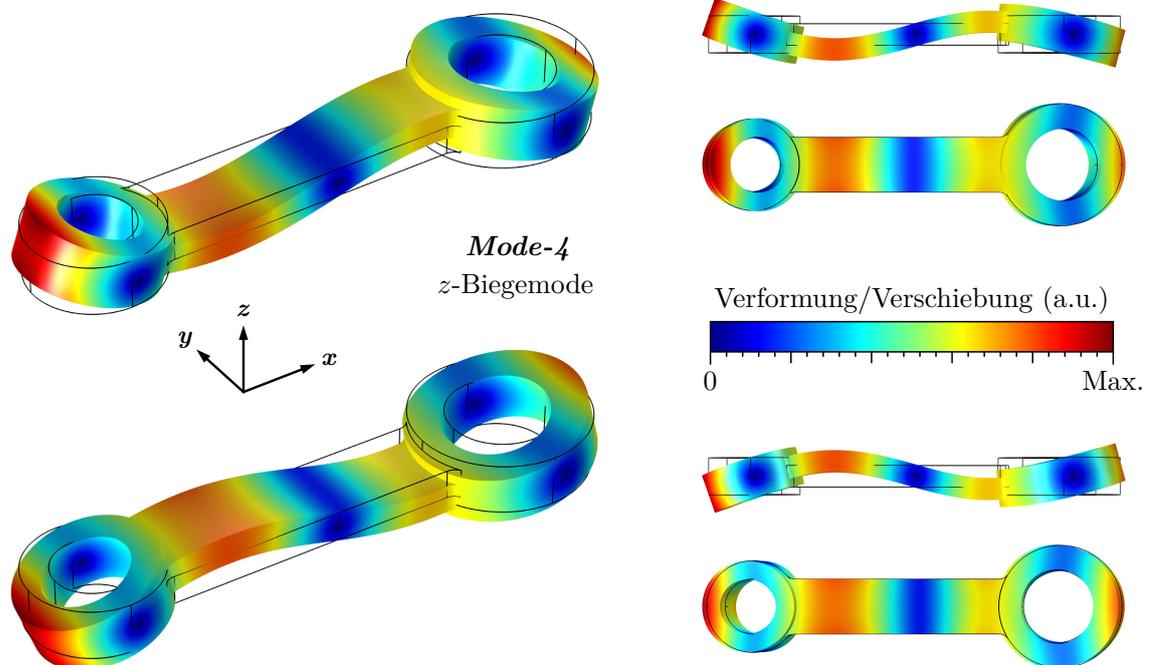


Abb. B.4: Eigenschwingungsform *Mode-4* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

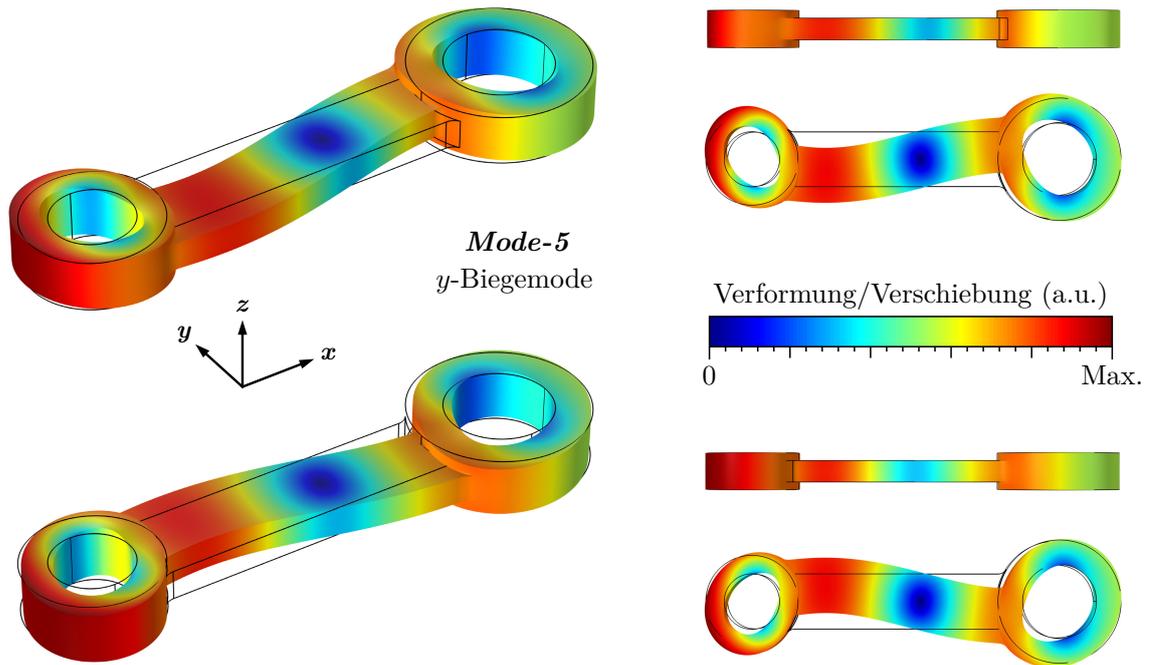


Abb. B.5: Eigenschwingungsform *Mode-5* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

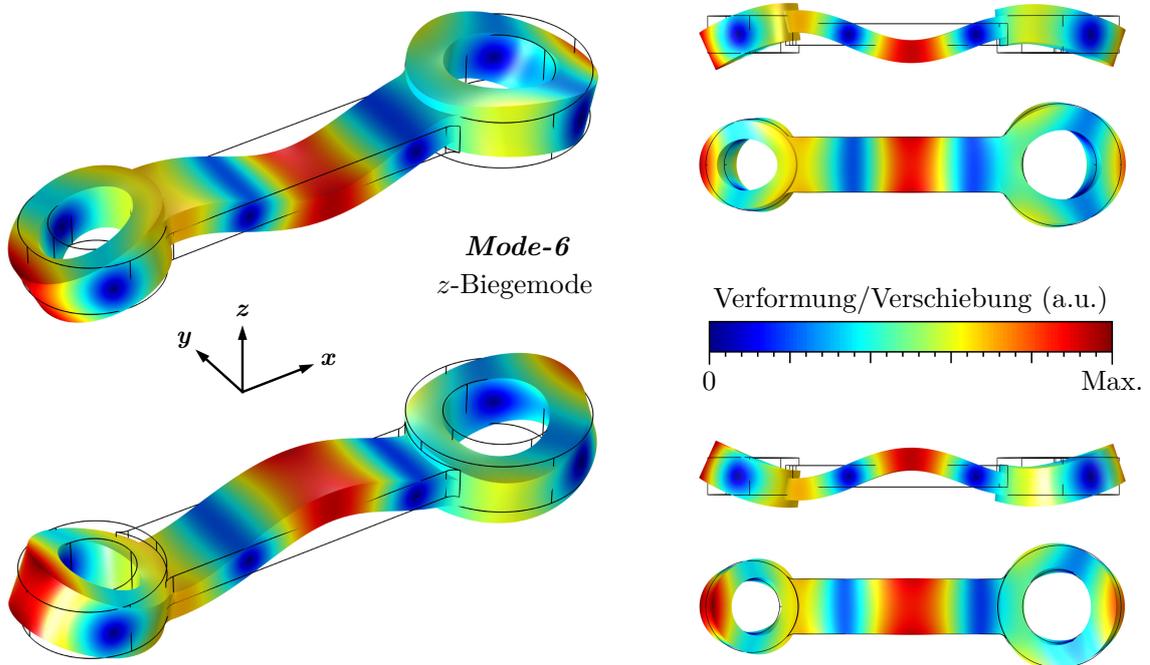


Abb. B.6: Eigenschwingungsform *Mode-6* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

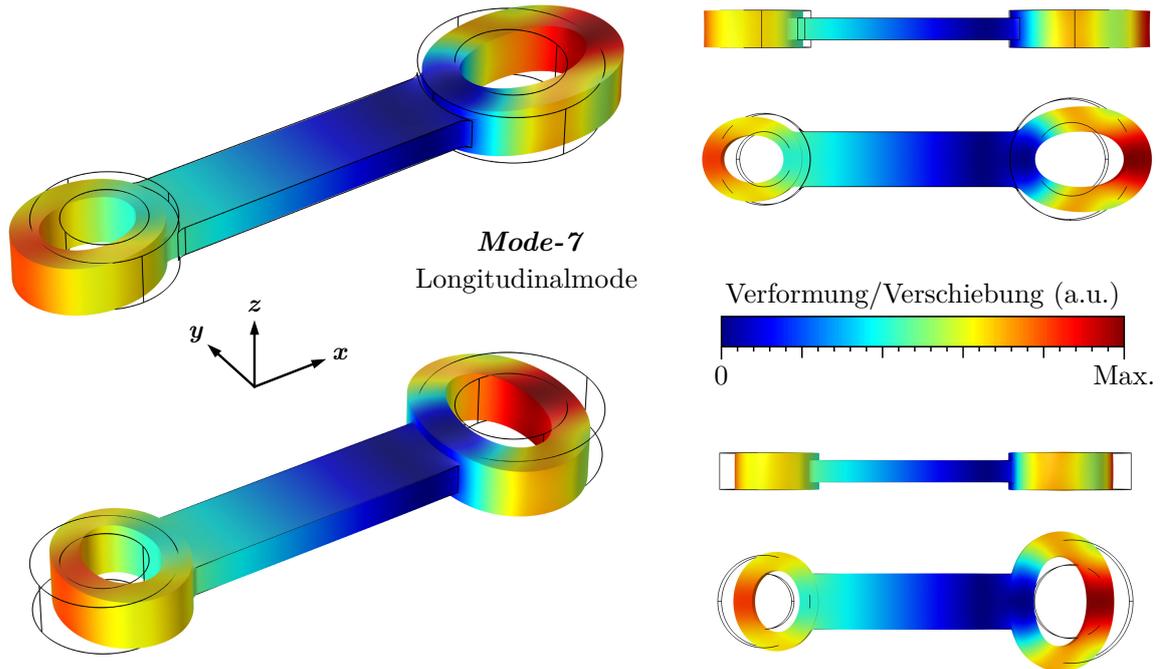


Abb. B.7: Eigenschwingungsform *Mode-7* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

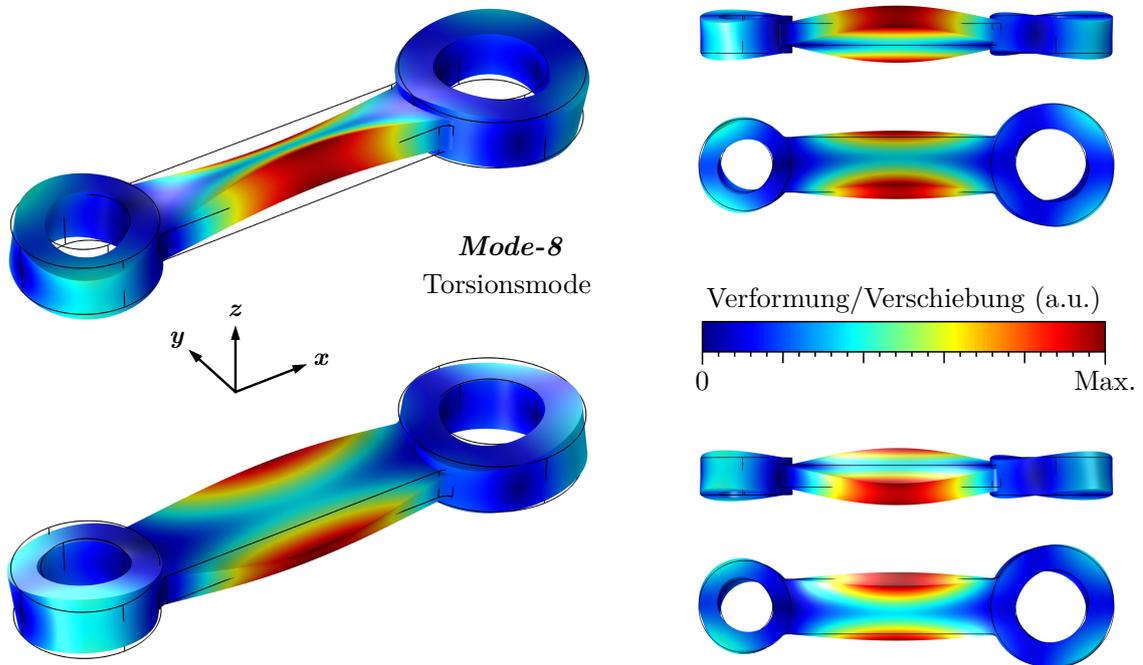


Abb. B.8: Eigenschwingungsform *Mode-8* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

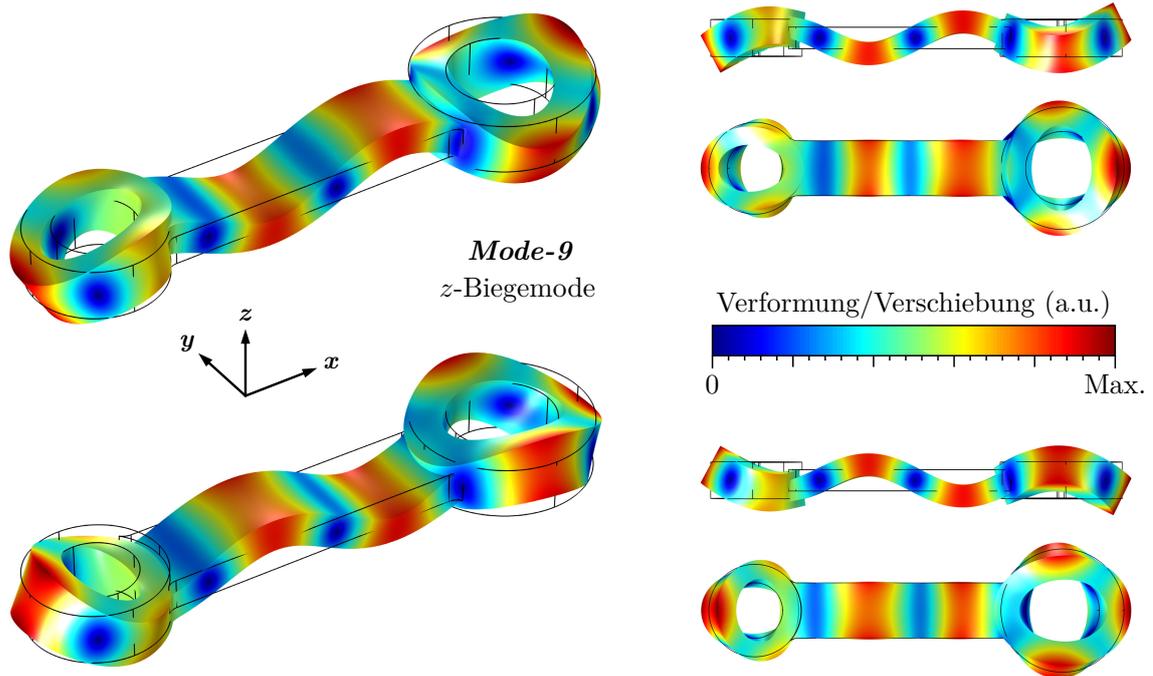


Abb. B.9: Eigenschwingungsform *Mode-9* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

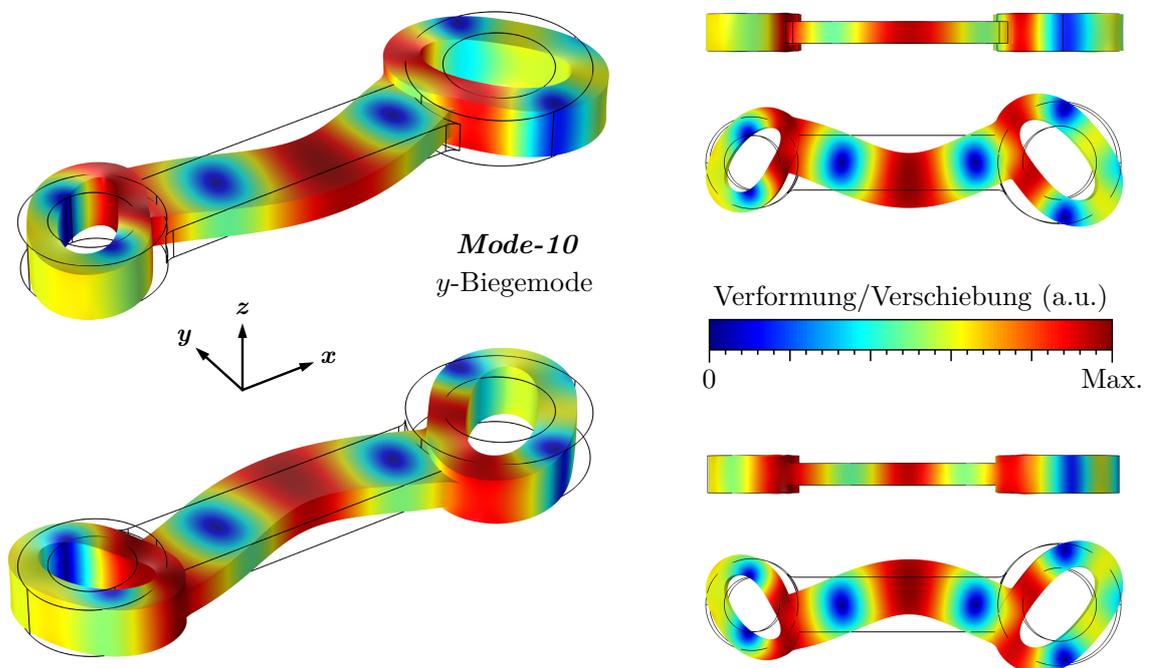


Abb. B.10: Eigenschwingungsform *Mode-10* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

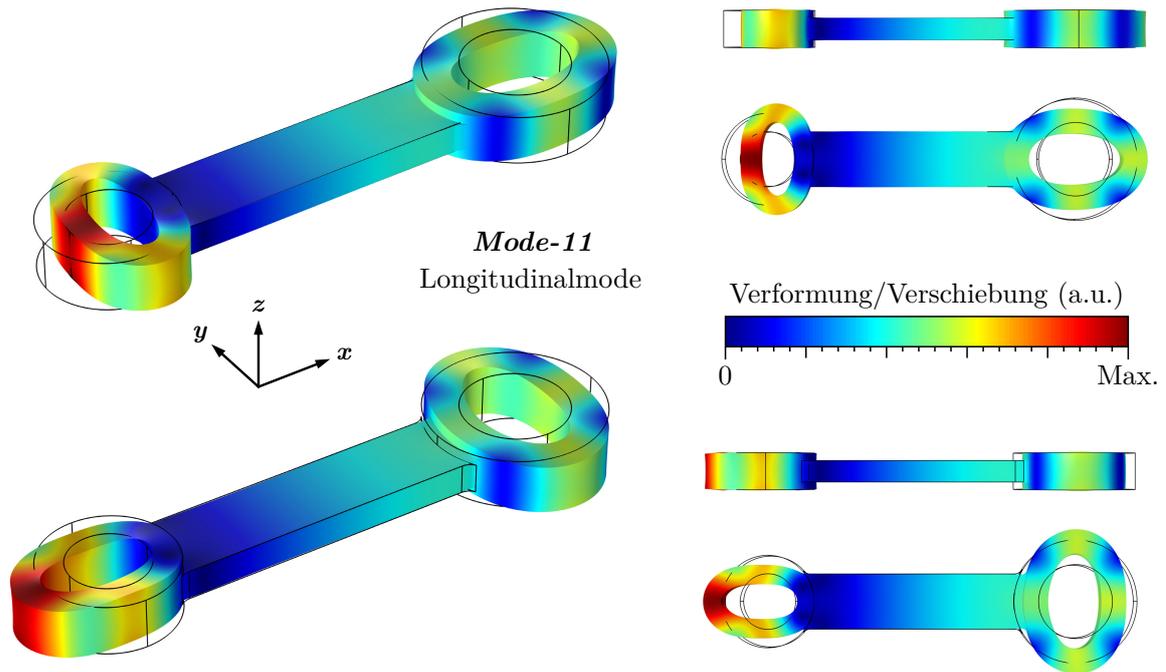


Abb. B.11: Eigenschwingungsform *Mode-11* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

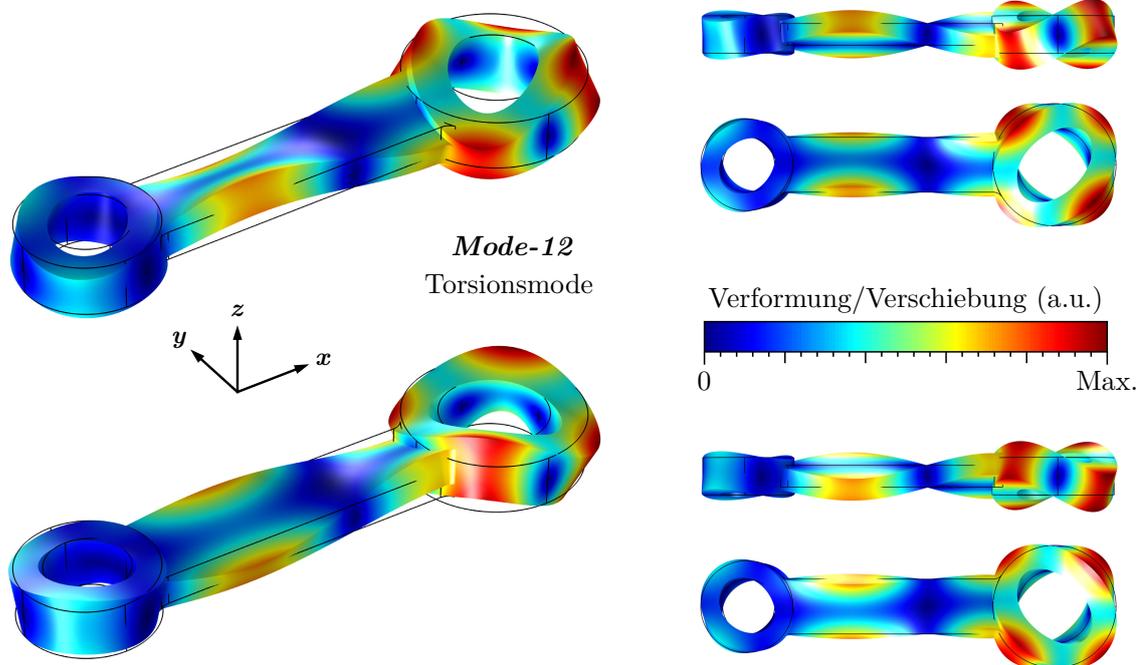


Abb. B.12: Eigenschwingungsform *Mode-12* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

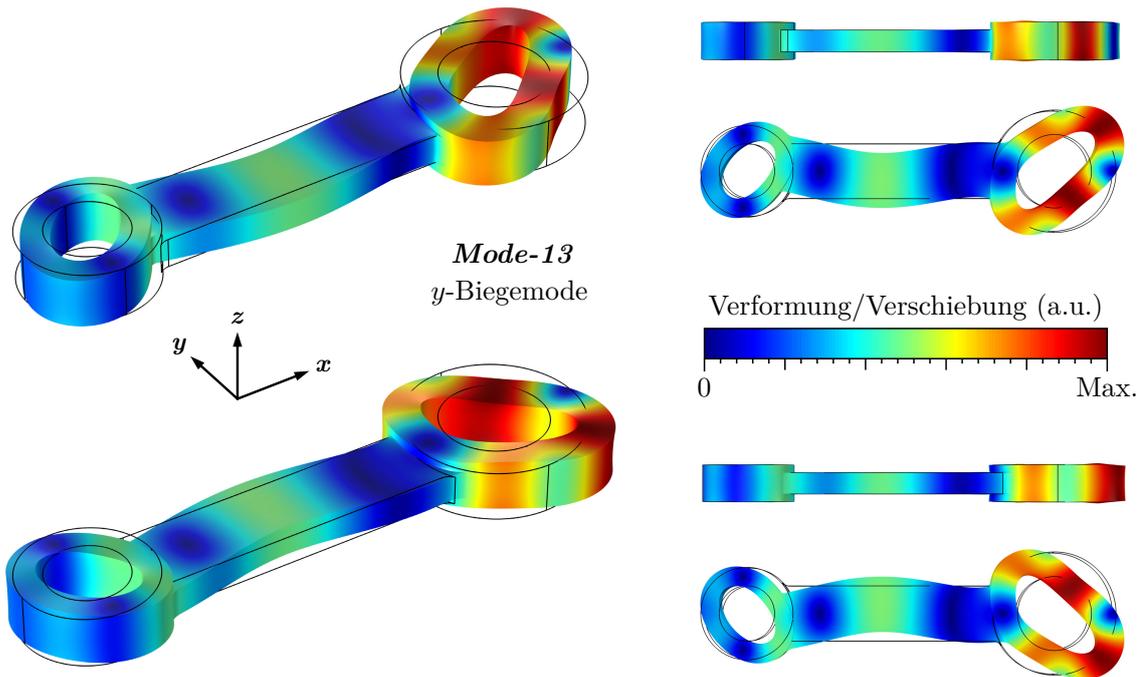


Abb. B.13: Eigenschwingungsform *Mode-13* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

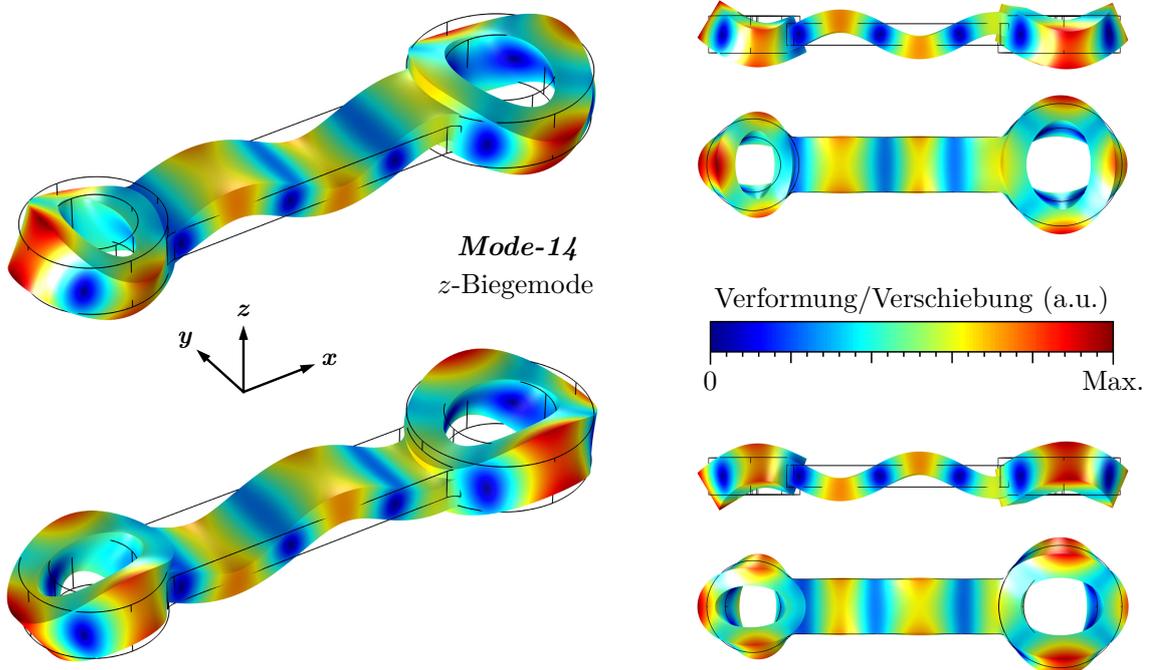


Abb. B.14: Eigenschwingungsform *Mode-14* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

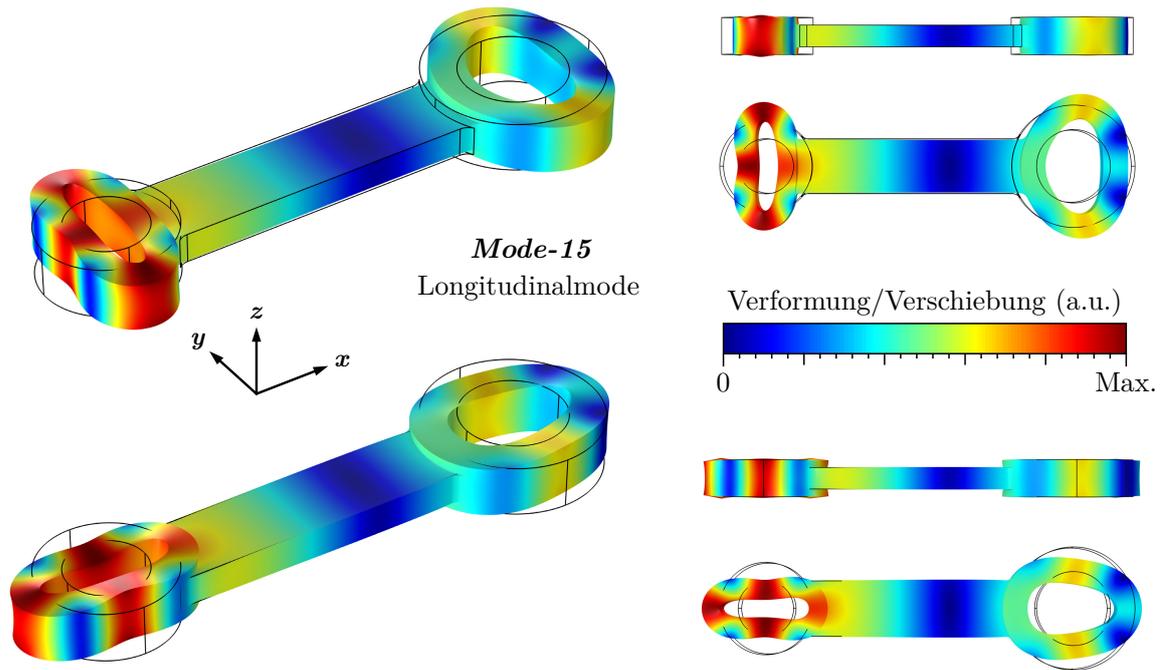


Abb. B.15: Eigenschwingungsform *Mode-15* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

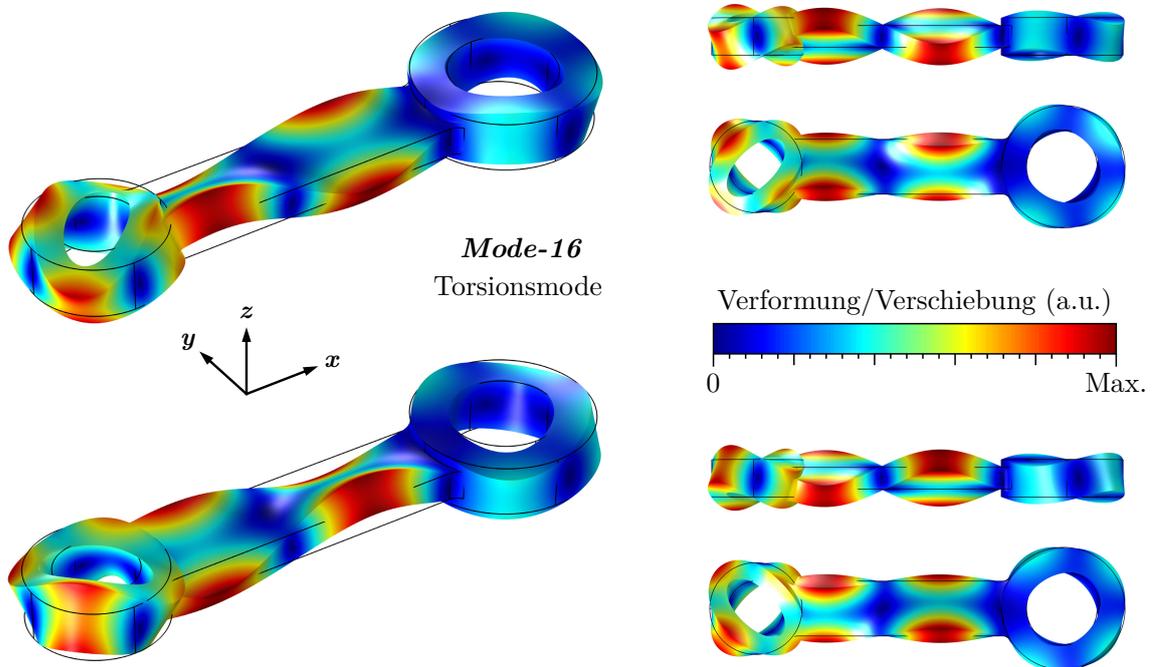


Abb. B.16: Eigenschwingungsform *Mode-16* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

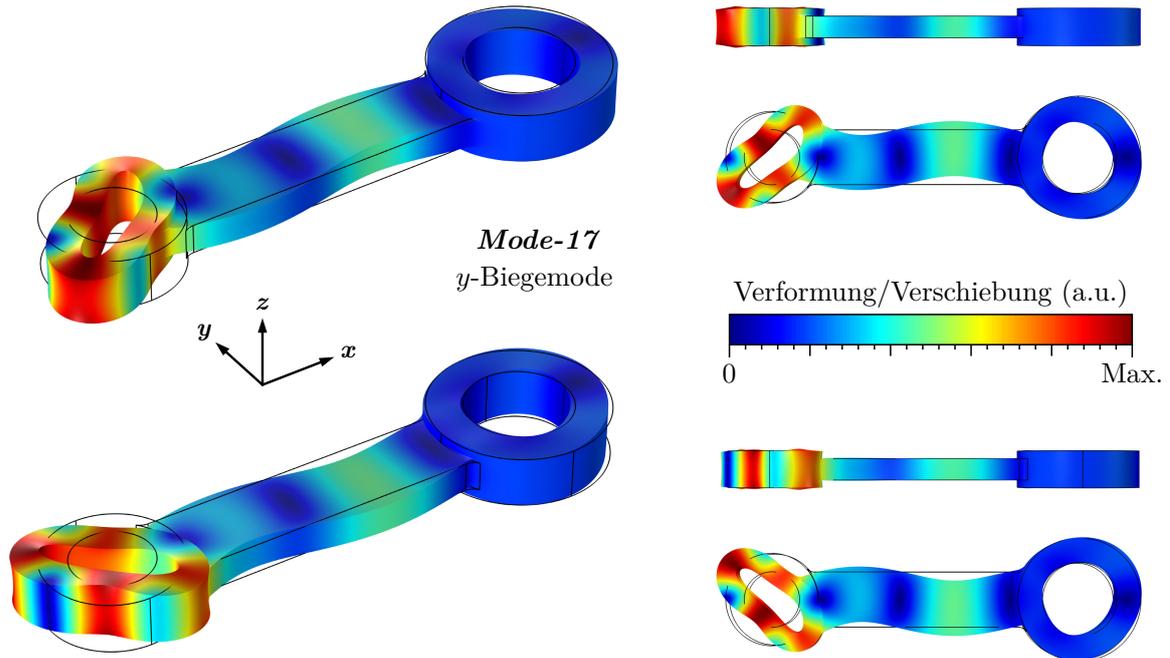


Abb. B.17: Eigenschwingungsform *Mode-17* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

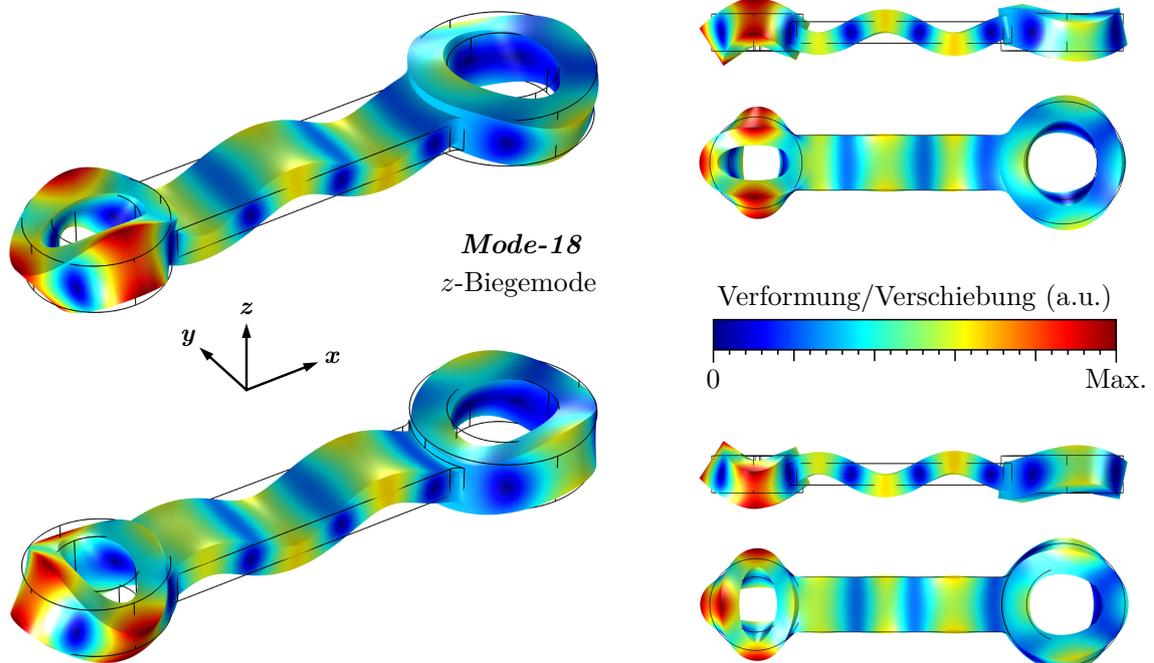


Abb. B.18: Eigenschwingungsform *Mode-18* eines Pleuels basierend auf einer FEM-Simulation eines defektfreien IO-Teils mit Referenzkonfiguration

Anhang C

Temperatureinflüsse & -kompensation

Dieser Anhang behandelt den Einfluss der Temperatur auf physikalische Größen mit dem Fokus auf die für diese Arbeit relevanten Bauteil- und Materialeigenschaften. Neben der einheitlichen Bezugstemperatur $\vartheta_0 = 20\text{ °C}$ wird im Folgenden davon ausgegangen, dass die Ist-Temperatur ϑ_1 eines betrachteten Körpers zwischen 10 °C und 30 °C liegt. Somit beträgt die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta = (\vartheta_1 - \vartheta_0)$ maximal $\pm 10\text{ K}$ und ist damit stets gering. Dies ist eine der Voraussetzungen für die Verwendung einer linearen Modellgleichung, mit der **Temperatureinflüsse** näherungsweise mithilfe konstanter Temperaturkoeffizienten quantifiziert bzw. rechnerische **Temperaturkompensationen** durchgeführt werden können. Alle folgenden theoretischen Ausführungen beziehen sich auf einen freien Festkörper aus einem homogenen, linear-elastischen Material mit isotropen Eigenschaften.

In Anh. C.1 werden theoretische Grundlagen zur Temperaturabhängigkeit einer physikalischen Größe bzw. zur Temperaturkompensation zusammengefasst. Anh. C.2 beinhaltet theoretische Herleitungen von einigen Temperaturkoeffizienten. In Anh. C.3 werden diese Koeffizienten dann für einen Aluminiumwerkstoff quantifiziert. Anh. C.4 befasst sich mit Eigenfrequenz-Temperaturkoeffizienten, wobei der Schwerpunkt auf der Quantifizierung solcher Koeffizienten für die Eigenfrequenzen der maschinell gefertigten realen Pleuel der Arbeit liegt. Anh. C.5 behandelt zuletzt die Unsicherheit, die aufgrund praktischer Limitierungen mit einer rechnerischen Temperaturkompensation einhergeht.

Im Rahmen der in Anh. C.2, Anh. C.4 und Anh. C.5 gezeigten Analysen wurden mehrere analytische Umformungen und Näherungen durchgeführt. Diese erfolgten teilweise unter Zuhilfenahme der Software **Mathematica**[®] (Wolfram Research, Version 12.0).

C.1 Theorie und Modellgleichungen

Die für diese Arbeit zentralen Grundlagen hinsichtlich **Temperatureinflüssen** werden nachfolgend am Beispiel einer stellvertretend betrachteten, von der Temperatur ϑ abhängigen physikalischen Größe $\xi(\vartheta)$ aufgezeigt. Die Temperaturabhängigkeit von $\xi(\vartheta)$ lässt sich mithilfe eines (i. Allg. selbst temperaturabhängigen) Temperaturkoeffizienten $k_\xi(\vartheta)$ beschreiben, der, wie in Gl. C.1 angegeben, als relative Änderung der analysierten Größe infolge einer infinitesimalen Temperaturänderung definiert ist [Her30].

$$k_\xi(\vartheta) = \frac{1}{\xi(\vartheta)} \frac{d\xi(\vartheta)}{d\vartheta} \quad (\text{C.1})$$

Durch Integration und Umformung von Gl. C.1 ergibt sich Gl. C.2 für den allgemeinen Fall eines temperaturabhängigen Temperaturkoeffizienten $k_\xi(\vartheta)$, wobei $\xi_0 = \xi(\vartheta_0)$ und $\xi_1 = \xi(\vartheta_1)$ die Ausprägungen von $\xi(\vartheta)$ bei den Temperaturen ϑ_0 und ϑ_1 sind.

$$\xi_1 = \xi_0 \cdot \exp\left(\int_{\vartheta_0}^{\vartheta_1} k_\xi(\vartheta) d\vartheta\right) \quad (\text{C.2})$$

Unter Annahme eines konstanten, temperaturunabhängigen Temperaturkoeffizienten k_ξ (was v. a. bei einer geringen Differenz $\Delta\vartheta$ zwischen Ist-Temperatur ϑ_1 und Bezugstemperatur ϑ_0 i. d. R. gerechtfertigt ist) vereinfacht sich Gl. C.2 zu Gl. C.3.

$$\xi_1 \approx \xi_0 \cdot \exp(k_\xi \cdot \Delta\vartheta) \quad (\text{C.3})$$

Von einem im Betrag kleinen Temperaturkoeffizienten k_ξ sowie einer geringen Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ ausgehend, genau genommen falls $|k_\xi \cdot \Delta\vartheta| \ll 1$, ist auch die Änderung der betrachteten Größe (d. h. die Abweichung des Werts ξ_1 vom Bezugswert ξ_0) verhältnismäßig gering. Dann kann Gl. C.3 linearisiert werden, woraus Gl. C.4 folgt.

$$\xi_1 \approx \xi_0 \cdot (1 + k_\xi \cdot \Delta\vartheta) \quad (\text{C.4})$$

Durch einfaches Umstellen von Gl. C.4 resultiert Gl. C.5. Diese **Modellgleichung** kann nun zur rechnerischen **Temperaturkompensation** genutzt werden. Konkret lässt sich mithilfe dieser Gleichung die bei der Bezugstemperatur ϑ_0 zu erwartende Ausprägung ξ_0 der temperaturabhängigen Größe $\xi(\vartheta)$ auf Basis eines bei der Temperatur ϑ_1 ermittelten Werts ξ_1 der betrachteten Größe, der begleitend festgestellten Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ und des Temperaturkoeffizienten k_ξ rechnerisch abschätzen.

$$\xi_0 \approx \frac{\xi_1}{1 + k_\xi \cdot \Delta\vartheta} \quad (\text{C.5})$$

C.2 Herleitung von Temperaturkoeffizienten

Im Hinblick auf Temperaturkompensationen im Rahmen der messtechnischen Analysen dieser Arbeit wurden die Temperaturabhängigkeiten einiger Bauteil- und Materialeigenschaften (Geometrie, Dichte, elastische Konstanten, Schallgeschwindigkeiten) theoretisch untersucht. Hierbei wurde beachtet, dass die verschiedenen Eigenschaften i. Allg. nicht unabhängig voneinander mit der Temperatur variieren. So geht beispielsweise mit einer Ausdehnung der Geometrie eine Abnahme der Dichte einher und auch thermisch hervorgerufene Änderungen der verschiedenen elastischen Konstanten sind gekoppelt. Zwecks konsistenter Darstellungen wurden solche **Abhängigkeiten** abgebildet, indem lediglich die Temperaturkoeffizienten der Geometrie, des Elastizitätsmoduls und des Schubmoduls (d. h. k_L , k_E und k_G) als bekannt angenommen wurden. Die Temperaturkoeffizienten der anderen Größen wurden auf Basis geltender Gesetzmäßigkeiten sowie der drei genannten Koeffizienten analytisch hergeleitet – mit dem Ziel einer jeweils zum linearen Temperaturmodell nach Gl. C.4 bzw. Gl. C.5 passenden Formulierung.

Üblicherweise dehnt sich die Geometrie eines Körpers bei einer Temperaturerhöhung aus, was sich i. d. R. ausreichend präzise linear beschreiben lässt [Bar98; Ger10; Her12]. Um die Temperaturabhängigkeit der **Geometrie** im Verlauf dieser Arbeit abzubilden, wurde das lineare Temperaturmodell in Verbindung mit einem Literaturwert für den Geometrie-Temperaturkoeffizienten k_L (Längenausdehnungskoeffizient) verwendet.

Mit einer temperaturbedingten Geometrieskalierung eines Körpers ändert sich auch seine **Dichte** ρ , die bei homogener Beschaffenheit dem Quotienten aus der Masse m_G und dem Volumen V des Körpers entspricht. Der Dichte-Temperaturkoeffizient k_ρ ist aufgrund der gekoppelten Änderungen unmittelbar vom Längenausdehnungskoeffizienten k_L abhängig, sodass k_ρ durch k_L formuliert werden kann. Gl. C.6 zeigt die Herleitung dazu, wobei m_G die Masse des Körpers ist; V_0 und V_1 sowie ρ_0 und ρ_1 sind dessen Volumina sowie Dichten bei der Bezugstemperatur ϑ_0 bzw. der Ist-Temperatur ϑ_1 (zudem gilt $\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_0$). Ausgangspunkt ist $\rho_1 = (m_G/V_1)$, was die Dichte bei der Temperatur ϑ_1 beschreibt. Das Volumen V_1 kann, analog zu Gl. C.3, mittels einer Exponentialfunktion auf Basis des als konstant angenommenen Längenausdehnungskoeffizienten k_L und des Volumens V_0 ausgedrückt werden. Die dritte Potenz berücksichtigt hierbei, dass eine temperaturbedingte Geometrieänderung in alle Raumrichtungen wirkt. Nach einigen Umformungen kann die Exponentialfunktion linearisiert werden. Durch Einsetzen von $\rho_0 = (m_G/V_0)$, der auf die Temperatur ϑ_0 bezogenen Dichte, ergibt sich schließlich ein Ausdruck gemäß Modellgleichung C.4, woraus der Dichte-Temperaturkoeffizient $k_\rho = -3k_L$ hervorgeht.

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \frac{m_G}{V_1} \approx \frac{m_G}{V_0 \cdot (\exp(k_L \cdot \Delta\vartheta))^3} = \frac{m_G}{V_0} \cdot \exp(-3 \cdot k_L \cdot \Delta\vartheta) \\ &\approx \frac{m_G}{V_0} \cdot \left(1 - 3 \cdot k_L \cdot \Delta\vartheta\right) = \rho_0 \cdot \underbrace{\left(1 + (-3 \cdot k_L) \cdot \Delta\vartheta\right)}_{k_\rho} \end{aligned} \quad (\text{C.6})$$

Mit steigender Temperatur reduziert sich die **elastische Steifigkeit** metallischer Werkstoffe meist, je nach Temperaturbereich praktisch linear [Led01; Rös16]. Der Elastizitäts- und der Schubmodul von polykristallinem Aluminium nehmen z. B. im Bereich von ca. 0 °C bis 400 °C linear ab [McL87], was dementsprechend mittels linearer Funktionen darstellbar ist [Sti01]. In dieser Arbeit wurde das lineare Temperaturmodell in Kombination mit Literaturwerten für die Temperaturkoeffizienten k_E und k_G genutzt, um die Temperaturabhängigkeiten von Elastizitätsmodul E und Schubmodul G zu behandeln.

Angesichts der wechselseitigen Abhängigkeiten sind Temperatureinflüsse auf die Poissonzahl ν bzw. auf die elastischen Konstanten C_{11} , C_{44} und C_{12} vom thermischen Verhalten des Elastizitäts- und des Schubmoduls abhängig. Die Temperaturkoeffizienten k_ν , $k_{C_{11}}$, $k_{C_{44}}$ und $k_{C_{12}}$ der entsprechenden Größen müssen daher mittels der Koeffizienten k_E und k_G des Elastizitäts- und des Schubmoduls beschrieben werden. Dies betrifft ebenfalls die Koeffizienten k_{ν_L} und k_{ν_T} der (aus der Materialdichte und der -elastizität resultierenden) Phasengeschwindigkeiten v_L und v_T der Longitudinal- bzw. der Transversalwelle, für die zudem der Längenausdehnungskoeffizient k_L eine Rolle spielt, der indirekt die thermische Abhängigkeit der Dichte beschreibt. Vor diesem Hintergrund wurden die Größen ν , C_{11} , C_{44} , C_{12} , v_L sowie v_T zunächst mithilfe der in Abschn. 2.2.1 aufgeführten Umrechnungsvorschriften in Abhängigkeit von Elastizitätsmodul E und Schubmodul G formuliert. Auf Basis dessen wurden die zugehörigen Temperaturkoeffizienten zuletzt unter Einbeziehung der Koeffizienten k_L , k_E und k_G hergeleitet.

Gl. C.7 zeigt die Herleitung für den Temperaturkoeffizienten k_ν der **Poissonzahl** ν (für die anderen angesprochenen Koeffizienten werden aus Gründen der Übersichtlichkeit im Anschluss lediglich die Endergebnisse genannt). Hierbei sind E_0 , G_0 und ν_0 sowie E_1 , G_1 und ν_1 der Elastizitätsmodul, der Schubmodul und die Poissonzahl bei der Bezugstemperatur ϑ_0 bzw. der Ist-Temperatur ϑ_1 . Zudem gilt wieder $\Delta\vartheta = (\vartheta_1 - \vartheta_0)$.

$$\begin{aligned}
\nu_1 &= \frac{E_1}{2G_1} - 1 \approx \frac{E_0 \cdot \exp(k_E \cdot \Delta\vartheta)}{2G_0 \cdot \exp(k_G \cdot \Delta\vartheta)} - 1 = \frac{E_0}{2G_0} \cdot \exp((k_E - k_G) \cdot \Delta\vartheta) - 1 \\
&\approx \frac{E_0}{2G_0} \cdot \left(1 + (k_E - k_G) \cdot \Delta\vartheta\right) - 1 = (\nu_0 + 1) \cdot \left(1 + (k_E - k_G) \cdot \Delta\vartheta\right) - 1 \quad (\text{C.7}) \\
&= \nu_0 + (\nu_0 + 1) \cdot (k_E - k_G) \cdot \Delta\vartheta = \nu_0 \cdot \left(1 + \underbrace{\frac{(\nu_0 + 1) \cdot (k_E - k_G)}{\nu_0}}_{k_\nu} \cdot \Delta\vartheta\right)
\end{aligned}$$

Ausgehend von $\nu_1 = (E_1/2G_1 - 1)$, also der Formulierung der Poissonzahl bei der Temperatur ϑ_1 , können E_1 und G_1 entsprechend Gl. C.3 auf Grundlage von E_0 und G_0 mithilfe von Exponentialfunktionen dargestellt werden, die sich auf die Temperaturkoeffizienten k_E und k_G des Elastizitäts- und des Schubmoduls stützen. Der resultierende, geeignet umgeformte Ausdruck kann linearisiert werden. Mittels der Beziehung $(E_0/2G_0) = (\nu_0 + 1)$, die sich durch Umstellen des für die Poissonzahl $\nu_0 = (E_0/2G_0 - 1)$ bei der Temperatur

ϑ_0 gültigen Zusammenhangs ergibt, lassen sich die in der Gleichung auftretenden Symbole E_0 und G_0 eliminieren bzw. durch ν_0 ersetzen. Nach wenigen abschließenden Umformungen folgt das Temperaturmodell in der linearen Form entsprechend Gl. C.4, woraus der Temperaturkoeffizient k_ν der Poissonzahl abgelesen werden kann.

Tab. C.1 listet alle betrachteten, untereinander konsistenten **Temperaturkoeffizienten** auf. Für die hergeleiteten Koeffizienten ist jeweils angegeben, wie diese aus dem Längenausdehnungskoeffizienten k_L und den Temperaturkoeffizienten k_E und k_G des Elastizitäts- und des Schubmoduls berechnet werden können (ggf. unter zusätzlicher Berücksichtigung der Poissonzahl ν_0 bei der Bezugstemperatur $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$).

Tab. C.1: Formeln zur Berechnung wechselseitig konsistenter Temperaturkoeffizienten eines isotropen Materials ($\nu_0 \rightarrow$ Poissonzahl bei der Bezugstemperatur $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$)

Eigenschaft	Temperaturkoeffizient (Formulierung mittels k_L , k_E & k_G)	
Geometrie/Längenmaß	k_L	\rightarrow <i>unabhängiger Koeffizient</i> (Literaturwert)
Dichte ρ	$k_\rho = -3 \cdot k_L$	
Elastizitätsmodul E	k_E	\rightarrow <i>unabhängiger Koeffizient</i> (Literaturwert)
Schubmodul G	k_G	\rightarrow <i>unabhängiger Koeffizient</i> (Literaturwert)
Poissonzahl ν	$k_\nu = \frac{\nu_0 + 1}{\nu_0} \cdot [k_E - k_G]$	
elast. Konstante C_{11}	$k_{C11} = \frac{1}{2\nu_0^2 - 3\nu_0 + 1} \cdot [(\nu_0 + 1) \cdot k_E + (2\nu_0^2 - 4\nu_0) \cdot k_G]$	
elast. Konstante C_{44}	$k_{C44} = k_G$	
elast. Konstante C_{12}	$k_{C12} = \frac{1}{-2\nu_0^2 + \nu_0} \cdot [(\nu_0 + 1) \cdot k_E - (2\nu_0^2 + 1) \cdot k_G]$	
Longitudinalwellengeschwindigkeit v_L	$k_{vL} = \frac{1}{2} \cdot (k_{C11} - k_\rho) = \frac{3}{2} \cdot k_L + \frac{1}{4\nu_0^2 - 6\nu_0 + 2} \cdot [\text{wie bei } k_{C11}]$	
Transversalwellengeschwindigkeit v_T	$k_{vT} = \frac{1}{2} \cdot (k_{C44} - k_\rho) = \frac{3}{2} \cdot k_L + \frac{1}{2} \cdot k_G$	

C.3 Temperaturkoeffizienten für Aluminium

Tab. C.2 gibt die in Anh. C.2 behandelten Temperaturkoeffizienten für Aluminium bzw. für einen **Aluminiumwerkstoff** an. Die Zahlenwerte der drei Koeffizienten k_L , k_E und k_G stammen aus [Sti01]. Auf deren Basis wurden die übrigen Werte mithilfe der hergeleiteten, in Tab. C.1 angegebenen Formeln berechnet (ggf. unter Einbeziehung eines Werts von 0,34 für die Poissonzahl, vgl. Tab. A.1 in Anh. A).

Tab. C.2: Theoretische Temperaturkoeffizienten eines isotropen Aluminiumwerkstoffs

Bauteil-/Materialeigenschaft	Temperaturkoeffizient	
	Symbol	Wert (in K^{-1})
Geometrie/Längenmaß	k_L	$+2,360 \cdot 10^{-5}$
Dichte ρ	k_ρ	$-7,080 \cdot 10^{-5}$
Elastizitätsmodul E	k_E	$-5,480 \cdot 10^{-4}$
Schubmodul G	k_G	$-5,620 \cdot 10^{-4}$
Poissonzahl ν	k_ν	$+5,518 \cdot 10^{-5}$
elastische Konstante C_{11}	k_{C11}	$-4,732 \cdot 10^{-4}$
elastische Konstante C_{44}	k_{C44}	$-5,620 \cdot 10^{-4}$
elastische Konstante C_{12}	k_{C12}	$-3,896 \cdot 10^{-4}$
Longitudinalwellengeschwindigkeit v_L	k_{vL}	$-2,012 \cdot 10^{-4}$
Transversalwellengeschwindigkeit v_T	k_{vT}	$-2,456 \cdot 10^{-4}$

Tab. C.2 zeigt, dass die Bauteil- bzw. Materialeigenschaften negativ oder positiv mit der Temperatur korreliert sind – je nach Vorzeichen des Temperaturkoeffizienten verändert sich der Wert der jeweiligen Bezugsgröße mit ansteigender Temperatur dementsprechend. Dabei sind die betragsmäßigen Werte der Koeffizienten sehr klein ($< 1 \cdot 10^{-3}$), sodass die hier quantifizierten Temperaturabhängigkeiten durchweg gering sind.

Für die realen Pleuel der Arbeit (siehe Abschn. 5.2) bzw. für den genutzten Aluminiumwerkstoff können die Temperaturkoeffizienten laut Tab. C.2 letztlich nur ungefähr gelten. Denn schließlich handelt es sich um Literaturwerte bzw. sie basieren auf solchen Werten, die sich je nach Quelle sowie genauem Material (reines Aluminium, bestimmte Legierung) unterscheiden. So variiert z. B. der legierungsabhängige Wert des Längenausdehnungskoeffizienten k_L laut [Alu98] im relevanten Temperaturbereich zwischen meist $2,3 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$ und $2,4 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$, vereinzelt auch etwas extremer. Zudem bezieht sich Tab. C.2 auf ein isotropes Verhalten, während für die gefertigten Pleuel gewisse Richtungsabhängigkeiten beobachtet wurden. Schlussendlich wurde geschätzt, dass die in Tab. C.2 quantifizierten Koeffizienten das tatsächliche thermische Verhalten der maschinell gefertigten Pleuel mit einer **Genauigkeit** von zumindest $\pm 10\%$ beschreiben.

C.4 Eigenfrequenz-Temperaturkoeffizienten

Da die Eigenfrequenzen eines Körpers durch seine temperaturabhängigen Geometrie- und Materialeigenschaften definiert werden, variieren i. Allg. auch sie mit der Temperatur. Im Gegensatz zu geometrisch einfachen Objekten wie Stäben, Balken oder Platten existieren für die im Rahmen der Arbeit adressierten Pleuel keine analytischen Formeln, mit denen sich die Eigenfrequenzen berechnen lassen und auf deren Grundlage, analog zu Anh. C.2, theoretische Eigenfrequenz-Temperaturkoeffizienten hergeleitet werden könnten. Jedoch lassen sich u. a. anhand von analytischen Formeln für einfache Stäbe, siehe z. B. [Her01], oder mittels FEM-Simulationen grundlegende Zusammenhänge zwischen einer (z. B. thermisch bedingten) **Skalierung** der geometrischen und der materiellen Eigenschaften eines Körpers und seinen davon abhängigen Eigenfrequenzen erkennen (vgl. auch Gl. 2.12 und Gl. 2.13 in Abschn. 2.2.2). Diese Zusammenhänge wurden zum Zwecke einer allgemeinen näherungsweise Beschreibung von Eigenfrequenz-Temperaturabhängigkeiten verwendet, wobei im Detail die nachstehenden Skalierungseffekte, jeweils in Bezug auf einen Körper mit gegebener Ausgangskonfiguration, berücksichtigt wurden:

- »**Geometrie-Skalierung**«⁶⁵ um den Faktor K
→ Skalierung aller Eigenfrequenzen um den Faktor $K' = 1/K = K^{(-1)}$
- »**Dichte-Skalierung**«⁶⁶ um den Faktor K
→ Skalierung aller Eigenfrequenzen um den Faktor $K' = \sqrt{1/K} = K^{(-1/2)}$
- »**Elastizitäts-Skalierung**«⁶⁷ um den Faktor K
→ Skalierung aller Eigenfrequenzen um den Faktor $K' = \sqrt{K} = K^{(1/2)}$

Analog zu Anh. C.2 ist es hinsichtlich der Pleuel der Arbeit wiederum zweckmäßig, den Temperaturkoeffizienten k_{f_m} für das Eigenfrequenzmerkmal f_m auf Basis des Längenausdehnungskoeffizienten k_L (der die Temperaturabhängigkeiten von Geometrie und Dichte abbildet) sowie der Temperaturkoeffizienten k_E und k_G des Elastizitäts- bzw. des Schubmoduls abzuschätzen. Gl. C.8 zeigt eine überschlägige **Herleitung** dazu, wobei $f_m(\vartheta_0)$ und $f_m(\vartheta_1)$ die Werte des Eigenfrequenzmerkmals f_m bei den Temperaturen ϑ_0 (Bezugstemperatur) und ϑ_1 (Ist-Temperatur) symbolisieren.

Am Anfang von Gl. C.8 steht die Aussage, dass sich $f_m(\vartheta_1)$ aus der Multiplikation von $f_m(\vartheta_0)$ mit einem von der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta = (\vartheta_1 - \vartheta_0)$ sowie der Modennummer abhängigen Faktor $K_{f_m}(\vartheta)$ ergibt. Dieser Faktor $K_{f_m}(\vartheta)$ kann unter Berücksichtigung der o. g. Skalierungseffekte in die drei Faktoren $K_L(\vartheta)$, $K_\rho(\vartheta)$ und $K_C(\vartheta)$ zerlegt werden, die hier die temperaturabhängigen Skalierungen der Geometrie, der Dichte sowie der elastischen Eigenschaften abbilden. Hierbei wurde als gröbere Näherung unterstellt, dass alle Einträge der Elastizitätsmatrix mit der Temperatur um den einheitlichen Faktor $K_C(\vartheta)$

⁶⁵⁾ allseitig einheitliche Skalierung der Geometrie bei konstanten Materialeigenschaften

⁶⁶⁾ Skalierung der Materialdichte bei konstanten Geometrie- und Elastizitätseigenschaften

⁶⁷⁾ einheitliche Skalierung aller Einträge der Elastizitätsmatrix bei konstanter Geometrie/Dichte

skalieren (dies folgt aus Tab. C.1 für den Spezialfall $k_E = k_G$). Die Faktoren $K_L(\vartheta)$, $K_\rho(\vartheta)$ und $K_C(\vartheta)$ lassen sich dann, analog zu Gl. C.3, mithilfe von Exponentialfunktionen unter Verwendung der beiden als konstant angenommenen Temperaturkoeffizienten k_L und k_C darstellen. Dabei ist k_L der Längenausdehnungskoeffizient, mit dem neben der thermisch bedingten Änderung der Geometrie unter Berücksichtigung eines geeigneten Exponenten auch der damit einhergehende Einfluss auf die Materialdichte beschrieben werden kann, während k_C die als einheitlich unterstellte Skalierung der Elastizitätsmatrix quantifiziert. Nach einigen Umformungen, einschließlich einer Linearisierung, resultiert schließlich ein lineares Temperaturmodell entsprechend Gl. C.4, woraus der Temperaturkoeffizient k_{fm} abgelesen werden kann. Dabei ist k_{fm} zunächst in Abhängigkeit vom Längenausdehnungskoeffizienten k_L sowie dem Koeffizienten k_C angegeben. Zum Ziele der Quantifizierbarkeit kann k_C durch den Mittelwert aus den zwei Koeffizienten k_E und k_G des Elastizitäts- und des Schubmoduls ersetzt werden. Dabei ist k_{fm} aufgrund der Annahme einer einheitlichen »Elastizitäts-Skalierung« unabhängig von der zugehörigen Schwingungsform, sodass sich alle Eigenfrequenzen, überschlägig abgeschätzt, thermisch identisch verhalten.

$$\begin{aligned}
 f_m(\vartheta_1) &= f_m(\vartheta_0) \cdot K_{fm}(\vartheta) \approx f_m(\vartheta_0) \cdot \frac{1}{K_L(\vartheta)} \cdot \sqrt{\frac{1}{K_\rho(\vartheta)}} \cdot \sqrt{K_C(\vartheta)} \\
 &\approx f_m(\vartheta_0) \cdot \frac{1}{\exp(k_L \cdot \Delta\vartheta)} \cdot \sqrt{\frac{1}{(\exp(k_L \cdot \Delta\vartheta))^{(-3)}}} \cdot \sqrt{\exp(k_C \cdot \Delta\vartheta)} \\
 &= f_m(\vartheta_0) \cdot (\exp(k_L \cdot \Delta\vartheta))^{(-1)} \cdot (\exp(k_L \cdot \Delta\vartheta))^{(3/2)} \cdot (\exp(k_C \cdot \Delta\vartheta))^{(1/2)} \quad (C.8) \\
 &= f_m(\vartheta_0) \cdot \exp\left(\frac{k_L + k_C}{2} \cdot \Delta\vartheta\right) \\
 &\approx f_m(\vartheta_0) \cdot \left(1 + \underbrace{\frac{k_L + k_C}{2}}_{k_{fm}} \cdot \Delta\vartheta\right) \approx f_m(\vartheta_0) \cdot \left(1 + \underbrace{\frac{2 \cdot k_L + k_E + k_G}{4}}_{k_{fm}} \cdot \Delta\vartheta\right)
 \end{aligned}$$

Mit den für einen Aluminiumwerkstoff typischen Werten der Koeffizienten k_L , k_E und k_G (siehe Tab. C.2) ergibt sich $k_{fm} = -2,657 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ für den Eigenfrequenz-Koeffizienten. Pro Temperaturänderung um +1 K ist somit ein Abfall der Eigenfrequenzen um je ca. ein viertel Promille zu erwarten. Dabei wird der Koeffizient k_{fm} , der im Wesentlichen aus der Addition von k_L , k_E und k_G resultiert, maßgeblich durch die thermischen Abhängigkeiten der elastischen Eigenschaften bestimmt, denn die jeweiligen Koeffizienten k_E und k_G sind absolut gesehen um ca. das Zwanzigfache größer als der Längenausdehnungskoeffizient k_L . Die Temperaturabhängigkeiten der Geometrie und der Dichte spielen also nur eine untergeordnete Rolle für die thermischen Abhängigkeiten der Eigenfrequenzen der aus einem Aluminiumwerkstoff gefertigten realen Pleuel.

Neben dieser theoretischen Abschätzung wurden die Temperaturkoeffizienten der Pleuel-Eigenfrequenzen **experimentell** erfasst, wozu Gl. C.9 (sinngemäß aus [Bar98] entnommen) genutzt wurde. Hierbei ist k_{fm} der Temperaturkoeffizient des Frequenzmerkmals f_m und $f_m(\vartheta_{\min})$, $f_m(\vartheta_{\max})$ sowie $f_m(\vartheta_0)$ sind dessen jeweilige Frequenzausprägungen bei den Temperaturen ϑ_{\min} , ϑ_{\max} und ϑ_0 . Während ϑ_0 die Bezugstemperatur ist, definieren ϑ_{\min} und ϑ_{\max} ein Intervall, auf das sich die Analysen beziehen.

$$k_{fm} \approx \frac{1}{\vartheta_{\max} - \vartheta_{\min}} \cdot \frac{f_m(\vartheta_{\max}) - f_m(\vartheta_{\min})}{f_m(\vartheta_0)} \quad (\text{C.9})$$

Die Eigenfrequenz-Temperaturkoeffizienten wurden am Beispiel des Referenzpleuels *R-6* ermittelt (vgl. Abschn. 5.2.1). Dessen temperaturabhängige Ausprägungen der Frequenzmerkmale f_1 bis f_{18} wurden per ART bestimmt, prinzipiell analog zu den in Abschn. 5.2.9 erläuterten ART-Messungen. Jedoch wurde das Pleuel inklusive der ART-Messtechnik in einem **Klimaschrank** des Typs *VC³ 4034* (Vötsch Industrietechnik, Balingen) platziert, welcher im Verlauf schrittweise auf die drei Temperaturen $\vartheta_{\min} = 10^\circ\text{C}$, $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$ und $\vartheta_{\max} = 30^\circ\text{C}$ eingestellt wurde.

Bei den zwei Temperaturen 10°C und 30°C wurden die Pleuel-Eigenfrequenzen jeweils 20-fach ermittelt, bei der Temperatur 20°C sogar 40-mal. Um dabei eine präzise Bauteiltemperierung sicherzustellen, wurde nach jeder Temperatureinstellung am Klimaschrank ca. 24 h bis zur nächsten Datenaufnahme abgewartet. Da die Schwingungsanregung des Pleuels händisch erfolgte, erforderte die Durchführung eine Zugänglichkeit zum Inneren des Klimaschranks, wozu eine zur Kabeldurchführung konzipierte, gewöhnlich mit einem Deckel verschlossene Öffnung genutzt wurde. Zum Abschluss jeder ca. 1 min dauernden ART-Messung bei den Temperaturen 10°C und 30°C wurde ein geringer Anstieg bzw. Abfall der Klimaschranktemperatur beobachtet, aber nur um wenige $\pm 0,1$ K. Dies ist auf die Umgebungsluft zurückzuführen, die während der Datenaufnahme durch die Öffnung in den Klimaschrank einströmte (außerdem wurde der Klimagenerator angesichts seiner Betriebsgeräusche kurzzeitig gestoppt). In Anbetracht der Kürze der Zeit und der geringen Temperaturgradienten sollten sich diese Temperatureinflüsse allenfalls unwesentlich in der Pleuel-Temperatur bzw. in den gemessenen Frequenzwerten wiederspiegeln haben. Um jedoch einen sich potenzierenden Einfluss in Verbindung mit der wiederholten ART-Durchführung auszuschließen, wurde zwischen aufeinanderfolgenden ART-Messungen bei gleicher Temperatur eine Wartezeit von mindestens 15 min bei geschlossenem und eingeschaltetem Klimaschrank eingehalten. Währenddessen pendelte sich die Ist-Temperatur des Klimaschranks stets wieder auf den Sollwert ein.

Die experimentellen Eigenfrequenzdaten wurden um vereinzelte Ausreißer bereinigt (vgl. Abschn. 5.2.2.2) und anschließend gemittelt – für jedes der Merkmale f_1 bis f_{18} und jede der drei eingestellten Temperaturen separat. Die gemittelten Frequenzen wurden danach zur Berechnung modenspezifischer Eigenfrequenz-Temperaturkoeffizienten nach Gl. C.9 verwendet. Abb. C.1 stellt die ermittelten **Temperaturkoeffizienten** in Abhängigkeit vom Frequenzmerkmal bzw. der Modennummer dar. Zu erkennen ist, dass der Temperatur-

koeffizient je nach Frequenzmerkmal zwischen $-2,517 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ und $-2,864 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ variiert. Auffällig ist, dass für die mit Torsionsmoden verknüpften Eigenfrequenzen stets etwas ausgeprägtere Temperaturabhängigkeiten erkannt wurden, wobei dieser Effekt für die Pleuel mithilfe von geeigneten FEM-Simulationen bestätigt werden konnte (genauso wie die Tatsache, dass die verschiedenen Eigenfrequenzen generell etwas unterschiedliche Temperaturabhängigkeiten aufweisen). Zwischen der o. g. theoretischen Abschätzung von $-2,657 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, die zum Vergleich ebenfalls im Diagramm skizziert ist, und den experimentell bestimmten Koeffizienten bestehen nur verhältnismäßig geringe Abweichungen von stets weniger als $\pm 10\%$.

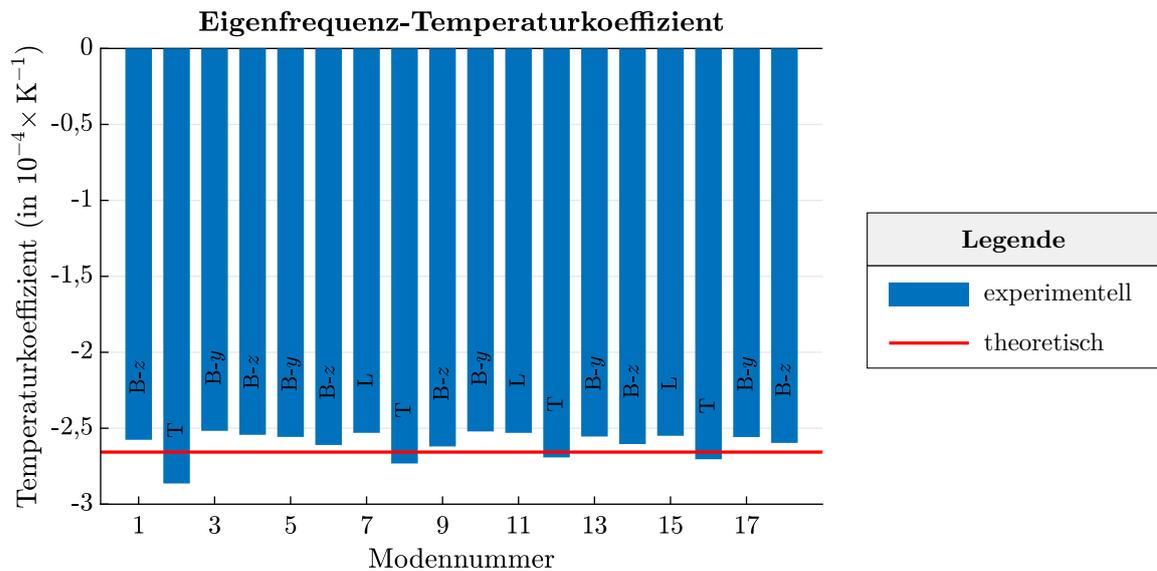


Abb. C.1: Experimentell ermittelte Temperaturkoeffizienten für die ART-gemessenen Eigenfrequenzen maschinell gefertigter realer Pleuel in Abhängigkeit von der Modennummer sowie theoretische Abschätzung (L, T, B-y & B-z → Modentypen nach Tab. 4.3)

Die **Unsicherheiten** der experimentell erfassten Eigenfrequenz-Temperaturkoeffizienten wurden mittels Größtfehlern eingegrenzt (vgl. Abschn. 5.2.2.3). Diesbezüglich wurden im Rahmen wiederholter Berechnungen der Temperaturkoeffizienten die Unsicherheiten der Eingangswerte (Eigenfrequenz- und Temperaturdaten) unter Beachtung aller möglichen Vorzeichenkombinationen einbezogen. Dabei wurden die Unsicherheiten der Frequenzen in Form von plausiblen Unter- und Obergrenzen abgebildet, die (modenspezifisch und für jede der drei betrachteten Temperaturen) auf Grundlage der aus den Daten abgeleiteten Standardfehlern der gemittelten Eigenfrequenzwerte geschätzt wurden. Außerdem wurde, u. a. unter Berücksichtigung der Genauigkeit des Klimaschranks, gefolgert, dass zwischen der niedrigsten und der höchsten vom Klimaschrank umgesetzten Temperatur statt eines nominellen Temperaturdeltas von 20 K möglicherweise auch ein Temperaturunterschied im Bereich von 19,8 K bis 20,2 K vorgelegen haben könnte. Letztlich wurden im Zuge der Neuberechnungen im Extremfall experimentelle Temperaturkoeffizienten ermittelt, die je nach Eigenfrequenzmerkmal um ca. $\pm 1,2\%$ bis $\pm 2,5\%$ von den ohne Berücksichtigung von Eingangsunsicherheiten bestimmten Werten abweichen.

C.5 Unsicherheit einer Temperaturkompensation

Aufgrund praktischer Limitierungen gehen mit Temperaturkompensationen auf Basis der Modellgleichung C.5 Fehler bzw. **Unsicherheiten** einher, die auf die i. Allg. nicht exakt bekannten und ggf. mit der Temperatur variierenden Temperaturkoeffizienten sowie auf Ungenauigkeiten bei jeder messtechnischen Temperaturbestimmung zurückzuführen sind. Um das diesbezügliche Ausmaß belastbar abschätzen zu können, wurde Gl. C.5 zunächst um die beiden Symbole δ_k und δ_ϑ erweitert, die die Unsicherheiten des im Rahmen einer rechnerischen Temperaturkompensation eingesetzten Temperaturkoeffizienten k_ξ und des ebenfalls herangezogenen, gemessenen Ist-Temperaturwerts ϑ_1 (bzw. dessen Differenz $\Delta\vartheta$ gegenüber der Bezugstemperatur ϑ_0) abbilden. Gl. C.10 gibt die erweiterte Gleichung an, wobei ξ_1 die bei der Temperatur ϑ_1 beobachtete Ausprägung einer temperaturabhängigen Größe $\xi(\vartheta)$ kennzeichnet und ξ_0 der gesuchte, bei der Bezugstemperatur ϑ_0 zu erwartende Wert ist. Genau genommen soll ξ_0 infolge der einbezogenen Unsicherheiten nun ein Intervall beschreiben, das den tatsächlichen, unbekanntem Wert der Größe bei der Bezugstemperatur umfasst. Für diese Arbeit war es zweckmäßig, δ_k als relative Unsicherheit und δ_ϑ als absolute Unsicherheit zu definieren, sodass die entsprechenden Symbole in Gl. C.10 in einem Fall (δ_k) multiplikativ und im anderen Fall (δ_ϑ) additiv auf ihre jeweilige Bezugsgröße (k_ξ bzw. $\Delta\vartheta$) appliziert wurden.

$$\xi_0 \approx \frac{\xi_1}{1 + k_\xi \cdot (1 + \delta_k) \cdot (\Delta\vartheta + \delta_\vartheta)} \quad (\text{C.10})$$

Um die Unsicherheit eines mit Gl. C.5 berechneten, temperaturkompensierten Werts ξ_0 in Form einer **relativen Unsicherheit** δ_ξ auszudrücken, wurde die ursprüngliche Formulierung von ξ_0 (rechte Seite von Gl. C.5) ins Verhältnis zur erweiterten Formulierung (rechte Seite von Gl. C.10) gesetzt. Auf Basis dessen resultierte nach einigen Umformungen schließlich ein Näherungsausdruck für die Unsicherheit δ_ξ , wobei die entsprechende Herleitung in Gl. C.11 angegeben ist. Die dabei vorgenommene Näherung beruht darauf, dass der Nenner des vorletzten Ausdrucks in Gl. C.11, unter der Annahme einer geringen temperaturbedingten Änderung der analysierten Größe (bzw. zahlenmäßig kleiner Werte den Temperaturkoeffizienten k_ξ und die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ betreffend), ungefähr 1 ist, also $(1 + k_\xi \cdot \Delta\vartheta) \approx 1$. Mit dem Ziel einer kompakten, übersichtlichen Darstellung der Unsicherheit δ_ξ wurde daher der Nenner vernachlässigt, sodass der Zähler des vorletzten Ausdrucks das gesuchte Endergebnis darstellt.

$$\begin{aligned} \delta_\xi &= \left(\frac{\xi_0 \text{ laut Gl. C.5}}{\xi_0 \text{ laut Gl. C.10}} \right) - 1 = \left(\frac{1 + k_\xi \cdot (1 + \delta_k) \cdot (\Delta\vartheta + \delta_\vartheta)}{1 + k_\xi \cdot \Delta\vartheta} \right) - 1 \\ &= \frac{k_\xi \cdot (\delta_\vartheta + \delta_k \cdot (\Delta\vartheta + \delta_\vartheta))}{1 + k_\xi \cdot \Delta\vartheta} \approx k_\xi \cdot (\delta_\vartheta + \delta_k \cdot (\Delta\vartheta + \delta_\vartheta)) \end{aligned} \quad (\text{C.11})$$

Wie Gl. C.11 zeigt, hängt die Unsicherheit δ_ξ eines temperaturkompensierten Werts ξ_0 nicht nur von der Unsicherheit δ_k des angenommenen Temperaturkoeffizienten und der Unsicherheit δ_ϑ der messtechnisch beobachteten Ist-Temperatur, sondern auch von der gegenwärtigen Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ ab.⁶⁸

⁶⁸⁾ Die betrachtete Unsicherheit δ_ξ berücksichtigt weder eine eventuelle Unsicherheit des rechnerisch zu korrigierenden Eingangswerts ξ_1 noch den Fakt, dass es sich bei zur Temperaturkompensation herangezogenen Modellgleichung C.5 um eine linearisierte Näherungsformulierung handelt (was aber für diese Arbeit aufgrund der Annahme stets geringer Temperatureinflüsse vernachlässigt werden konnte).

Anhang D

Kurzbezeichnungen (Proben & Klassifikatoren)

In den Tabellen D.1 und D.2 dieses Anhangs sind die zur Kennzeichnung der physischen Proben bzw. der konkreten Klassifikatoren der Arbeit definierten **Kurzbezeichnungen** (**Kürzel**) überblicksweise zusammengefasst.

Tab. D.1 listet die gefertigten **physischen Proben** (reale Pleuel sowie Materialproben) und die zu deren Kennzeichnung verwendeten Kürzel auf.

Tab. D.1: Kürzel zur Kennzeichnung der physischen Proben (reale Pleuel & Materialproben)

Kürzel	Beschreibung	siehe ...
<i>R-1, R-2, ..., R-6</i>	reale Referenzpleuel	Abschn. 5.2.1 (S. 87 ff.)
<i>V-1, V-2, ..., V-24</i>	reale Validierpleuel	Abschn. 5.2.1 (S. 87 ff.)
<i>Mat-a</i> <i>Mat-b</i> <i>Mat-c</i>	würfelförmige Materialproben (ca. 12 mm × 12 mm × 12 mm)	Abschn. 5.2.1 (S. 92)
<i>Mat-a/x, Mat-a/y, Mat-a/z</i> <i>Mat-b/x, Mat-b/y, Mat-b/z</i> <i>Mat-c/x, Mat-c/y, Mat-c/z</i>	quaderförmige Materialproben (ca. 30 mm × 30 mm × 15 mm)	Abschn. 5.2.1 (S. 92)

Die Kurzbezeichnungen der 15 im Rahmen dieser Arbeit zur ART-Qualitätsprüfung von Pleueln eingesetzten **ART-Klassifikatoren** ergeben sich gemäß dem folgenden Schema aus den Kürzeln der insgesamt fünf definierten Eingangsgrößen-Varianten (*F*, *F-g1*, *F-g2*, *F-G1*, *F-G2*) und den Kürzeln der drei erzeugten Trainingsdaten-Varianten (*T0*, *T1*, *T3*), auf denen alle Klassifikatoren basieren (siehe S. 152 in Abschn. 6.2):

- »Klassifikator« = »Eingangsgrößen-Variante« + / + »Trainingsdaten-Variante«

Tab. D.2 fasst die **Eingangsgrößen-** und **Trainingsdaten-Varianten**, die den berechneten Klassifikatoren zugrunde liegen, einschließlich der zur eindeutigen Kennzeichnung verwendeten Kurzbezeichnungen zusammen.

Tab. D.2: Kürzel zur Kennzeichnung der konkreten Klassifikatoren (bzw. Eingangsgrößen- & Trainingsdaten-Varianten) für die ART-Qualitätsprüfung von Pleueln

Kürzel	Beschreibung	siehe . . .
<i>F</i>	Eingangsgrößen-Variante mit 18 Eingangsgrößen → 18 Eigenfrequenzen	Abschn. 6.2 (S. 151 f.)
<i>F-g1</i>	Eingangsgrößen-Variante mit 22 Eingangsgrößen → 18 Eigenfrequenzen & 4 Geometrieparameter	Abschn. 6.2 (S. 151 f.)
<i>F-g2</i>	Eingangsgrößen-Variante mit 28 Eingangsgrößen → 18 Eigenfrequenzen, 4 Geometrieparameter & 6 WW-Terme ^(*)	Abschn. 6.2 (S. 151 f.)
<i>F-G1</i>	Eingangsgrößen-Variante mit 26 Eingangsgrößen → 18 Eigenfrequenzen & 8 Geometrieparameter	Abschn. 6.2 (S. 151 f.)
<i>F-G2</i>	Eingangsgrößen-Variante mit 54 Eingangsgrößen → 18 Eigenfrequenzen, 8 Geometrieparameter & 28 WW-Terme ^(*)	Abschn. 6.2 (S. 151 f.)
<i>T0</i>	Trainingsdaten-Variante (»unverrauschte Daten«) → Daten ohne zusätzlich implementiertes Rauschen	Abschn. 6.1 (S. 148 f.)
<i>T1</i>	Trainingsdaten-Variante (»realitätsgetreu verrauschte Daten«) → Daten mit realitätsgetreuem Rauschen (Rauschniveau: $\pm 0,1\%$)	Abschn. 6.1 (S. 148 f.)
<i>T3</i>	Trainingsdaten-Variante (»übermäßig verrauschte Daten«) → Daten mit übermäßigem Rauschen (Rauschniveau: $\pm 0,3\%$)	Abschn. 6.1 (S. 148 f.)

(*) WW-Terme → Wechselwirkungsterme (bzgl. der implementierten Geometrieparameter)