



Hochschule für
Technik und Wirtschaft
des Saarlandes

University of Applied Sciences



Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Studienbereich Maschinenbau
Studiengang Engineering and Management

Master-Thesis

Thema

Akustische Resonanzanalyse zur zerstörungsfreien Charakterisierung von Gefüge- und Spannungszuständen

Autor

Matthias David Heinrich

Matrikelnummer

3536610

Prof. Dr.-Ing. Walter Calles

Betreuer / Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Bernd Valeske

Betreuer / Gutachter

Geheimhaltungserklärung

Die hier vorliegende Master-Thesis enthält vertrauliche Informationen des Fraunhofer Instituts für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP). Eine Weitergabe oder Veröffentlichung der Inhalte dieser Arbeit (auch auszugsweise oder in digitaler Form) ist grundsätzlich untersagt. Ausnahmen davon bedürfen der ausdrücklichen und schriftlichen Genehmigung des Fraunhofer Instituts für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP).

Vorwort

Die vorliegende Master-Thesis beschäftigt sich mit dem Thema *Akustische Resonanzanalyse zur zerstörungsfreien Charakterisierung von Gefüge- und Spannungszuständen*. Sie entstand im Zeitraum von Mai 2011 bis September 2011 am Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) in Saarbrücken, wo ich bereits seit November 2009 als studentische Hilfskraft angestellt war, und bildet den Abschluss des Master-Studiengangs *Engineering and Management*.

Das gewählte Thema stellt einen Bestandteil eines Kooperationsprojekts zwischen dem Fraunhofer IZFP und der Robert Bosch GmbH – einem der bedeutendsten deutschen Automobilzulieferer – dar. Dadurch wurde sichergestellt, dass diese Master-Thesis einen unmittelbaren Nutzen für Grundlagenforschung und Industrie aufweist. Damit die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse im Gesamtprojekt optimal weiterverwendet werden können, lag bei der Erstellung ein besonderer Fokus auf der Nachvollziehbarkeit und Vollständigkeit der Ergebnisdarstellung sowie einer umfangreichen Dokumentation der durchgeführten Parametervariationen und den experimentellen Randbedingungen einzelner Versuchsreihen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fraunhofer IZFP, der Fachabteilung der Robert Bosch GmbH am Standort Homburg sowie der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (HTWdS) bedanken, welche mir während der Dauer der Master-Thesis in unterschiedlicher Weise unterstützend zur Seite standen. Ein besonderer Dank geht hierbei an:

- Herrn Prof. Dr.-Ing. Walter Calles für die Betreuung und Bewertung der Master-Thesis seitens der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (HTWdS),
- Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Valeske für die Möglichkeit, diese Arbeit am IZFP in Saarbrücken durchführen zu können sowie für die Zweitkorrektur der Arbeit,
- Herrn Dr.-Ing. Sven Kurzenhäuser, der die betriebliche Betreuung der Arbeit übernahm und mir stets beratend zur Verfügung stand,
- Herrn Dipl.-Ing. Friedhelm Walte und Herrn Dr.-Ing. Thomas Waschkies, welche mit ihrem Fachwissen stets neue Denkanstöße beisteuerten,
- Herrn Dipl.-Ing. Matthias Goebel für die Einweisung in die Bedienung des Prüfsystems zur akustischen Resonanzanalyse und die praktischen Tipps zur Durchführung dieser,
- Herrn Peter Raber von der Firma Bosch für die stets zügige Beschaffung benötigter Informationen und die kollegiale Zusammenarbeit.

Inhaltsverzeichnis

Geheimhaltungserklärung	II
Vorwort	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis und Glossar	VII
Verwendete Formelzeichen	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Einführung in das Thema und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	3
2 Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1 Schwingungen und Wellen	5
2.2 Schall und Körperschall	11
2.2.1 Luftschall	11
2.2.2 Körperschall.....	13
2.2.3 Schwingungsmoden von Hohlzylindern	15
2.3 Datenerfassung und diskrete Fourier-Transformation	18
2.4 Akustische Resonanzanalyse	21
2.4.1 Prüfverfahren	21
2.4.2 Auswertung bei der AkRA	22
2.4.3 Mess- und Auswertemöglichkeit dämpfungsproportionaler Parameter	25
2.5 Laservibrometrie	25
2.6 Eigenspannungen und Autofrettage	26
2.6.1 Eigenspannungen	26
2.6.2 Autofrettage.....	26
2.7 Stand der Technik zum Nachweis von Eigenspannungen	29
2.8 Statistische Grundlagen.....	32
2.8.1 Begriffe und Zusammenhänge	32
2.8.2 Zwei-Stichproben-t-Test für ungepaarte Stichproben	33
3 Akustische Resonanzanalyse vereinfachter Testkörper	35
3.1 Einfluss auf Ergebnisse einer akustischen Resonanzanalyse	35
3.2 Variation des Mikrofonabstandes	37
3.2.1 Versuchsplanung	37
3.2.2 Theoretische Betrachtung.....	39
3.2.3 Versuchsergebnisse.....	42
3.3 Variation der Anregungsposition und -orientierung.....	48
3.3.1 Versuchsplanung	48

3.3.2	Versuchsergebnisse.....	49
3.4	Variation des Lagerabstandes	51
3.4.1	Versuchsplanung	51
3.4.2	Versuchsergebnisse.....	51
3.5	Variation der Anregungsart	52
3.5.1	Versuchsplanung	52
3.5.2	Versuchsergebnisse.....	52
3.6	Diskussion und Fazit	53
4	Versuchsmaterial und Versuchsplan für reale Testkörper	56
4.1	Reale Testkörper: Common-Rails	56
4.1.1	Geschmiedete Common-Rails (HFR)	56
4.1.2	Lasergeschweißte Common-Rails (LWR).....	57
4.1.3	Eigenspannungszustände nach der Autofrettage.....	57
4.1.4	Gefüge und Härteverlauf geschmiedeter Common-Rails (HFR)	60
4.1.5	Reinigungszustand und Bauteilanzahl	63
4.1.6	Nomenklatur der Bauteile.....	64
4.2	Verwendete Prüfmethode, -systeme und Software	64
4.2.1	Motivation zum Einsatz der verwendeten Prüfmethode	64
4.2.2	Akustische Resonanzanalyse	65
4.2.3	Laservibrometrie	67
4.2.4	Auswertungen bei der akustischen Resonanzanalyse	67
4.3	Versuchsaufbauten bei der akustischen Resonanzanalyse.....	70
4.3.1	Versuchsaufbauten für geschmiedete Common-Rails (HFR).....	70
4.3.2	Versuchsaufbau für lasergeschweißte Common-Rails (LWR).....	72
4.4	Parameter bei der Datenerfassung und -auswertung.....	73
4.5	Bewertung und Auswertung von Merkmalen	74
4.5.1	Beschreibung und Bestimmung geeigneter Merkmale	75
4.5.2	Quervergleich von Merkmalswerten unterschiedlicher Wertebereiche.....	76
4.5.3	Analyse der Streuung von Merkmalswerten verschiedener Common-Rails	77
4.6	Versuchsplan und Auswertungen.....	78
4.6.1	Experimentelle Versuchsreihen	79
4.6.2	Auswertungen der Rohdaten	81
5	Ergebnisse der Untersuchungen an realen Testkörpern.....	87
5.1	Ergebnisse für geschmiedete Common-Rails (HFR)	87
5.1.1	Zeitsignale und Spektren aus der akustischen Resonanzanalyse von Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände.....	87
5.1.2	Experimentelle Suche von Merkmalen zum Autofrettagenachweis	88

5.1.3	Mittelung von Merkmalswerten und Untersuchung der Streuung von Merkmalswerten bei mehrmaliger Resonanzanalyse desselben Bauteils...	92
5.1.4	Kombination von Merkmalen	98
5.1.5	Einfluss des Korrosionsschutzes.....	99
5.1.6	Variation der Auswerteparameter	102
5.1.7	Vergleich der Merkmalsart Halbwertsbreite mit weiteren Merkmalsarten....	103
5.1.8	Eigenmoden der Common-Rails.....	106
5.1.9	Einfluss von Variationen im Versuchsaufbau.....	108
5.2	Ergebnisse für lasergeschweißte Common-Rails (LWR).....	113
5.2.1	Zeitsignale und Spektren aus der akustischen Resonanzanalyse von Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände.....	113
5.2.2	Experimentelle Suche von Merkmalen zum Autofrettagenachweis	114
5.2.3	Mittelung von Merkmalswerten	116
5.2.4	Kombination von Merkmalen	119
5.2.5	Einfluss des Korrosionsschutzes.....	121
5.2.6	Variation der Auswerteparameter	122
5.2.7	Vergleich der Merkmalsart Halbwertsbreite mit weiteren Merkmalsarten....	124
5.2.8	Eigenmoden der Common-Rails.....	124
6	Diskussion und Fazit	126
6.1	Diskussion	126
6.2	Fazit.....	130
7	Zusammenfassung und Ausblick	131
7.1	Zusammenfassung.....	131
7.2	Ausblick.....	132
	Literaturverzeichnis.....	134
	Abbildungsverzeichnis	138
	Tabellenverzeichnis	148
Anhang 1	Unternehmensvorstellung.....	150
Anhang 2	Werkstoffkennwerte	152
Anhang 3	Datenblatt des Mikrofons MI 17	154
Anhang 4	Parameter bei der Datenerfassung und -auswertung	155
Anhang 5	Alternative Versuchsaufbauten	156
Anhang 6	Übersicht über die verwendeten Common-Rails	158
	Eidesstattliche Erklärung	160

Abkürzungsverzeichnis und Glossar

AF0	Autofrettage wurde nicht durchgeführt
AF1	Autofrettage wurde durchgeführt
AkRA	Akustische Resonanzanalyse
AQS	Automotive Quality Saar
DFT	Diskrete Fourier-Transformation
FEM	Finite-Elemente-Methode
FFT	Fast Fourier Transform, schnelle Fourier-Transformation
FWHM	Full Width at Half Maximum, Halbwertsbreite
HFR	Hot Forged Rails, geschmiedete Common-Rails
HTWdS	Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes
IZFP	Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren
LWH	Left Half Width, linke halbe Breite
LWR	Laser Welded Rails, lasergeschweißte Common-Rails
M1, M2, M3, M4, M5	Datensätze, welche die Rohdaten der jeweils ersten, zweiten sowie dritten (geschmiedete Common-Rails) bzw. ersten, zweiten, dritten, vierten sowie fünften (lasergeschweißte Common-Rails) akustischen Resonanzanalyse jedes verfügbaren Common-Rails enthalten
MATLAB	Software zur Lösung mathematischer Probleme
OriginPro	Analysesoftware
RHW	Right Half Width, rechte halbe Breite
RTE	RTE Akustik + Prüftechnik GmbH
SigTestBox	Prüfhardware des Herstellers RTE
SonicTC	Prüfsoftware der SigTestBox
Zero-Padding	Anhängen von Nullen an ein diskretes Signal

Verwendete Formelzeichen

a	Radius eines Stabes, Radius einer Kreismembran
A_n	Fläche unter dem n-ten Resonanzpeak
c	Schallgeschwindigkeit
$c_{Gas}, c_{Luft, 20^\circ C}$	Schallgeschwindigkeit in einem Gas bzw. in trockener Luft bei 20°C
c_{LS}	Ausbreitungsgeschwindigkeit quasi-longitudinaler Wellen in Stäben
c_P	Phasengeschwindigkeit (Ausbreitungsgeschwindigkeit) einer Welle
d	Durchmesser eines Stabes, Durchmesser einer Kreismembran
df	Anzahl der Freiheitsgrade bei einem Zwei-Stichproben-t-Test
e	Eulersche Zahl: $e \approx 2,71828$
E	Elastizitätsmodul
f	Frequenz
f_a	Abtastfrequenz
f_{max}	Maximale Frequenz in einem Spektrum
f_n	n-te Resonanzfrequenz bzw. Frequenz der n-ten stehenden Welle
f_{n1}, f_{n2}	Frequenzwert bei halber Leistung unterhalb bzw. oberhalb des n-ten Resonanzpeaks
$f_{n,S}$	Lage des Schwerpunkts der Fläche unter dem n-ten Resonanzpeak
H_0, H_1	Nullhypothese bzw. Alternativhypothese bei einem statistischen Test
I_{Schall}	Schallintensität
j	imaginäre Zahl: $j = \sqrt{-1}$
k	Kreiswellenzahl
K	Kompressionsmodul
K_R	Korrekturfaktor für die Ausbreitungsgeschwindigkeit quasi-longitudinaler Wellen in Stäben
l, l_S	Länge bzw. Länge eines Stabes

L_p	Schalldruckpegel
$L_{\hat{U}}$	Pegel der Mikrofonspannungsamplitude
m	Index für Schwingungsmode eines Hohlzylinders in Axialrichtung bzw. Masse
n	Natürliche Zahl bzw. Index für Schwingungsmode eines Stabes bzw. Index für Schwingungsmode eines Hohlzylinders in Umfangsrichtung
n_a	Anzahl diskret abgetasteter Werte eines zeitabhängigen Signals
n_f	Anzahl diskreter Frequenzwerte in einem Spektrum
n_x, n_y	Stichprobenumfang der Stichprobe x_1, \dots, x_{n1} bzw. y_1, \dots, y_{n2}
N	Nahfeldlänge
N_n	Nahfeldlänge in Abhängigkeit der Frequenz der n-ten Eigenschwingung eines Stabes
p	Empirisches Signifikanzniveau (auch p-Wert) bzw. orts- und zeitabhängiger Schalldruck
$p(t)$	Zeitabhängiger Schalldruck an einem festen Ort
\hat{p}	Ortsabhängige Schalldruckamplitude
p_0	Luftdruck (statischer Wert, Ruhewert)
p_{aut}	Autofrettagedruck
p_E	Dauerfest ertragbarer Innendruck
$p_{E,aut}$	Nach der Autofrettage dauerfest ertragbarer Innendruck
p_{gesamt}	Orts- und zeitabhängiger Gesamtluftdruck
p_i	Innendruck in einem Rohr
\hat{p}_{nomr}	Normierte, analytisch berechnete Schalldruckamplitude
$p_{Referenz}$	Referenzwert des Schalldrucks, Hörschwelle des Menschen
\hat{p}_{sim}	Normierte, mittels FEM simulierte Schalldruckamplitude
P	Wahrscheinlichkeit
Q_n	Güte des n-ten Resonanzpeaks

r	Position in einem Rohrquerschnitt
r_a, r_i	Außenradius bzw. Innenradius eines Rohres
R_i, R_{Luft}	Spezifische Gaskonstante bzw. spezifische Gaskonstante von Luft
s^2	Gepolte Varianz der Varianzen s_x^2 und s_y^2
s_x^2, s_y^2	Empirische Varianz der Stichprobenwerte x_1, \dots, x_{n1} bzw. y_1, \dots, y_{n2}
S	Fresnel-Parameter bzw. Schwerpunkt
t	Zeit
t_a	Messdauer
\hat{t}	Testgröße eines Zwei-Stichproben-t-Tests
$t_{kritisch}, t_{df, 1-\alpha/2}$	Kritischer Wert für die Testgröße eines Zwei-Stichproben-t-Test
T	Periodendauer bzw. Temperatur
U	Mikrofonspannung
\hat{U}	Amplitude der Mikrofonspannung
\hat{v}	Amplitude der Schnelle einer schwingenden Kreismembran
\bar{v}	Orts- und zeitabhängige Schallschnelle
\bar{v}_0	Teilchengeschwindigkeit (statischer Wert, Ruhewert)
$v_{11}, v_{13}, v_{23}, v_{31}, v_{33}$	Ausbreitungsgeschwindigkeiten einer Welle in Abhängigkeit deren Ausbreitungs- und Schwingungsrichtung
\bar{v}_{gesamt}	Orts- und zeitabhängige Gesamtteilchengeschwindigkeit
$Var(X_{Bauteil})$	<i>Varianz zwischen Bauteilen</i> , siehe Kapitel 4.5.2, S. 76
$Var(X_{AkRA})$	<i>Gesamtvarianz</i> , siehe Kapitel 4.5.2, S. 76
$Var(X_{Impuls})$	<i>Varianz durch Anregung</i> , siehe Kapitel 4.5.2, S. 76
$Var(X_{Position})$	<i>Varianz durch Positionierung</i> , siehe Kapitel 4.5.2, S. 76
x	Koordinatenachse
\bar{x}	Arithmetisches Mittel der Stichprobenwerte x_1, \dots, x_{n1}
x_1, \dots, x_{n1}	Stichprobe aus Realisierungen der Zufallsgrößen X

X	Zufallsgröße
X_{AkRA}	Zufallsgröße eines mathematischen Modells, siehe Kapitel 4.5.2, S. 76
$X_{Bauteil}$	Zufallsgröße eines mathematischen Modells, siehe Kapitel 4.5.2, S. 76
X_{Impuls}	Zufallsgröße eines mathematischen Modells, siehe Kapitel 4.5.2, S. 76
$X_{Position}$	Zufallsgröße eines mathematischen Modells, siehe Kapitel 4.5.2, S. 76
y	Koordinatenachse
\bar{y}	Arithmetisches Mittel der Stichprobenwerte y_1, \dots, y_{n2}
\hat{y}	Auslenkungsamplitude
y_1, \dots, y_{n2}	Stichprobe aus Realisierungen der Zufallsgrößen Y
$y(t)$	Auslenkung zum Zeitpunkt t
Y	Zufallsgröße
z	Abstand zu einer Kreismembran entlang deren Mittelsenkrechten bzw. Koordinatenachse
z_0	Abstand von Nullstellen der Schalldruckamplitude zu einer Kreismembran entlang deren Mittelsenkrechten
Z_0	Schallkennimpedanz (auch Wellenwiderstand)
α	Signifikanzniveau, Irrtumswahrscheinlichkeit, Wahrscheinlichkeit für einen Fehler 1. Art bei einem statistischen Test
β	Wahrscheinlichkeit für einen Fehler 2. Art bei einem statistischen Test
δ	Abklingkonstante (auch Abklingkoeffizient)
δ_n	Abklingkonstante der n-ten Resonanzfrequenz
Δf	Auflösung in einem Spektrum
Δf_n	Halbwertsbreite des n-ten Resonanzpeaks
$\Delta f_{n,l} \Delta f_{n,r}$	Linker bzw. rechter Teil der Halbwertsbreite des n-ten Resonanzpeaks
Δf_{ZP}	Auflösung in einem Spektrum (nach Zero-Padding)
Δt	Zeitänderung
Δx	Wegänderung

$\Delta\omega_n$	Halbwertsbreite (ausgedrückt über die Kreisfrequenz)
ε	Störgröße bzw. mechanische Dehnung
φ_0	Phasenwinkel
λ	Wellenlänge
λ_n	Wellenlänge bei der n-ten Resonanzfrequenz bzw. stehenden Welle
μ	Querkontraktionszahl (auch Poissonzahl)
μ_X, μ_Y	Erwartungswert der Zufallsgröße X bzw. der Zufallsgröße Y
π	Kreiszahl: $\pi \approx 3,14159$
ρ	Dichte eines Materials bzw. orts- und zeitabhängige Schalldichte
ρ_0	Luftdichte (statischer Wert, Ruhewert)
ρ_{gesamt}	Orts- und zeitabhängige Gesamtluftdichte
η_n	Verlustfaktor der n-ten Resonanzschwingung
K, K_{Luft}	Adiabatexponent bzw. Adiabatexponent von Luft
σ	Mechanische Spannung
σ_m	Mittelspannung bei Schwingbeanspruchung
σ_r, σ_t	Radial- bzw. Tangentialspannung in einem dickwandigen Rohr
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Betriebsspannung in Richtung der Hauptachse x, y bzw. z
$\sigma_{x,ges}, \sigma_{y,ges}, \sigma_{z,ges}$	Resultierende Spannung in Richtung der Hauptachse x, y bzw. z
$\sigma_{x,rem}, \sigma_{y,rem}, \sigma_{z,rem}$	Eigenspannung in Richtung der Hauptachse x, y bzw. z
ϕ	Geschwindigkeitspotential (auch Schnellepotential)
ω	Kreisfrequenz
ω_0, ω_d	Eigenkreisfrequenz des ungedämpften bzw. gedämpften Oszillators
ω_E, ω_R	Erregerkreisfrequenz bzw. Resonanzeigenkreisfrequenz
ω_{n1}, ω_{n2}	Kreisfrequenzwert bei halber Leistung unterhalb bzw. oberhalb des n-ten Resonanzpeaks

1 Einleitung

1.1 Einführung in das Thema und Problemstellung

Die Automobilindustrie ist der bedeutendste Wirtschaftssektor in Deutschland [Gehr2007, S. 1]. So werden durch die Automobilhersteller selbst sowie durch zahlreiche Zulieferer kontinuierlich neue technische Entwicklungen und Innovationen generiert, um sich gegen die immer stärker werdende Konkurrenz im In- und Ausland erfolgreich zu behaupten. In der Automobiltechnik wird z. B. seit einigen Jahren vermehrt ein Augenmerk auf den effizienten Umgang mit Ressourcen gelegt. So sollen neu entwickelte Fahrzeugbauteile im Idealfall neue, höher integrierte Funktionalitäten besitzen und gleichzeitig so wenige Ressourcen wie möglich bei der Fertigung verbrauchen. Ein weiterer Technologietreiber ist der Leichtbau. Zwar wurden PKW gleicher Fahrzeugklasse in den letzten Jahren zunehmend schwerer, jedoch liegt dies in erster Linie an verbesserter passiver Sicherheit (verbesserte Crashstrukturen) sowie dem Komfortbedürfnis der Kunden (Unterhaltungselektronik, Elektromotoren) [Energierreport2005, S. 179]. Durch diese Mehrbelastung stehen Automobilhersteller und Zulieferer unter dem Druck, an anderer Stelle Gewicht und Ressourcen einzusparen, um konkurrenzfähig zu bleiben.

Die Dieselmotortechnik ist einer der Bereiche, welcher in den letzten beiden Jahrzehnten, vor allem auch im Hinblick einer immer effizienteren Kraftstoffnutzung bei gleichzeitig reduzierter Schadstoffemission, enorm weiterentwickelt und ausgebaut wurde. Der Anteil dieselmotorbetriebener Fahrzeuge in Westeuropa – bezogen auf die Neuzulassungen – vergrößerte sich ausgehend von ca. 15 % Anfang der 1990er Jahre über 38 % im Jahre 2002 [Energierreport2005, S. 268] auf mittlerweile über 50 % [BoschGB2010], was nicht zuletzt auf die kontinuierliche Weiterentwicklung des mehr als 100 Jahre alten Konzepts von Rudolf Diesel zurückzuführen ist.

Die Mehrzahl der modernen PKW-Dieselmotoren nutzt die sogenannte *Common-Rail-Technik*, deren Vorteile in der Gestaltung von Einspritzdrücken und Einspritzzeitpunkten liegen. Bei dieser Technik wird der Diesel-Kraftstoff vor dem Einspritzvorgang innerhalb eines Common-Rails auf ein hohes Druckniveau von bis zu 2.100 bar gebracht [Bosch2011], wobei das Common-Rail die Aufgabe der Druckspeicherung übernimmt [Reif2010, S. 10]. Die Druckbelastung pulsiert im Common-Rail während eines Einspritzzyklus und führt zu einer hohen mechanischen Beanspruchung des Bauteils. Da sich im Betrieb vor allem an der Bauteilinnenseite extreme Zugspannungsspitzen ausbilden, können innenseitig ausgehende Anrisse zu einem Versagen des Common-Rails durch Gewaltbruch oder Ermüdung führen. Ausgangspunkt solcher Anrisse sind „Bearbeitungsspuren und geometrische Diskontinuitäten,

wie Übergänge im Druckkanalquerschnitt oder Quer- und Seitenbohrungen“ im Bauteilinneren [Seeger1993, S. 1].

Diese inhärenten Schwachstellen der Common-Rails können durch zusätzliche Bearbeitungsschritte zur Verbesserung der Oberflächenqualität im Bauteilinneren beseitigt werden [Seeger1993, S. 1]. Alternativ können konstruktive Abhilfemaßnahmen – z. B. eine lokal erhöhte Wandstärke – ergriffen werden, wobei beide Lösungsansätze auf Grund der damit verbundenen Kostensteigerung bzw. Gewichtszunahme nicht erwünscht sind. Eine einfache Erhöhung der Wandstärke der Common-Rails ist daher nur begrenzt zielführend und auch nur bis zu einem bestimmten Innendruck sinnvoll. Der maximal ertragbare Innendruck in rohrförmigen Bauteilen ist für einen gegebenen Werkstoff begrenzt [Assmann2006, S. 389 f.]. Unabhängig vom Innen- und Außendurchmesser nähert sich dieser Druck bei zunehmender Wandstärke asymptotisch einem Grenzwert, der *cet. par.* nur von den Festigkeitskennwerten des verwendeten Werkstoffs abhängt. Auch der Einsatz eines leistungsfähigeren Werkstoffs, mit dem die Belastungsgrenze des Common-Rails nach oben verschoben werden kann, scheidet aus Kostengründen aus.

Demzufolge müssen die Common-Rails offensichtlich gegensätzliche Anforderungen erfüllen, da sie sowohl günstig zu fertigen und möglichst leicht sein sollen, als auch der pulsierenden Druckbelastung im Betrieb dauerhaft standhalten müssen. Bei diesem Zielkonflikt hilft die Technik der *Autofrettage* weiter, bei der während einer einmaligen hohen Innendruckbelastung mechanische Spannungen an der Bauteilinnenseite anliegen, welche die Streckgrenze des Materials überschreiten und zu lokalen plastischen Verformungen führen. Während der anschließenden Entlastung stellen sich auf Grund von Wechselwirkungen zwischen elastisch-plastisch und rein elastisch verformten Bereichen Eigenspannungsverhältnisse im Common-Rail ein, die der späteren Druckbelastung im Betrieb entgegenwirken [Seeger1993, S. 1 ff.]. Dadurch werden die Absolutwerte der Spannungsspitzen an der inneren Oberfläche eines Common-Rails im Betrieb deutlich reduziert und so gleichzeitig Rissbildung und -wachstum entgegengewirkt. Daher bietet die Autofrettage gegenüber den zuvor genannten Lösungsmöglichkeiten deutliche Vorteile.

Aufgrund der hohen, exakt einzustellenden Autofrettagedrücke (ca. 8.000 bar) ist eine kontinuierliche, prozesssichere Messung und Regelung des Prozessdrucks während dieses Arbeitsschritts nur mit teurer Hochdruckmesstechnik möglich, wobei die Sensoren einer Alterung unterliegen. Daraus und auf Grund der nicht vollkommen kontrollierbaren Einflüsse auf das Autofrettageergebnis ergibt sich die Anforderung, den Eigenspannungszustand der Common-Rails unmittelbar nach dem Autofrettageprozess mittels zerstörungsfreier Prüftechnik direkt am Bauteil nachzuweisen. Dies eröffnet die Möglichkeit, die Prozessparameter

gegebenenfalls nachzujustieren. Besonders geeignet für eine integrale, produktionsbegleitende und zeitsparende zerstörungsfreie Prüfung ist die akustische Resonanzanalyse, mit Hilfe derer die Firma Bosch bereits in Voruntersuchungen den Autofrettagezustand für einen von zwei relevanten Common-Rail-Typen qualitativ nachweisen konnte [BoschIntern2011]. Unterstützend für die akustische Resonanzanalyse ist die kontinuierliche Weiterentwicklung von Computersystemen, deren erhöhte Rechenleistungen rechenintensivere Auswertungen als noch vor wenigen Jahren erlauben.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die vorliegende Master-Thesis behandelt ein erstes Arbeitspaket eines Kooperationsprojekts zwischen der Robert Bosch GmbH und dem Fraunhofer IZFP. Das Hauptziel des gesamten, auf drei Jahre angelegten Projekts, besteht in der Entwicklung eines Prüfsystems zur prozesssicheren, quantitativen Unterscheidung verschiedener, durch Autofrettage induzierter Eigenspannungszustände von Common-Rails zweier Bauarten. Das Ziel dieser Master-Thesis besteht – neben der Aufarbeitung relevanter Grundlagen – darin, geänderte Eigenspannungsverhältnisse autofrettierter Common-Rails mittels der akustischen Resonanzanalyse qualitativ zu detektieren. Weiterhin gilt es, durch Untersuchungen Einflussparameter und Störgrößen bei der akustischen Resonanzanalyse aufzudecken und zu dokumentieren, um aufbauend darauf Vorschläge zur weiteren Optimierung der Prüftechnik auszuarbeiten.

Zunächst erfolgt eine Aufarbeitung des Stands der Technik sowie der benötigten und der für das Verständnis des weiteren Vorgehens wichtigen Grundlagen (Kapitel 2). Nach einer Einweisung und Einarbeitung in das Prüfsystem zur akustischen Resonanzanalyse werden zunächst grundlegende Versuche an einem stabförmigen Testkörper durchgeführt, um so den Einfluss verschiedener Parameter – den Versuchsaufbau betreffend – zu verstehen (Kapitel 3). Diese Vorversuche werden durch FEM-Simulationen zur Schallabstrahlung sowie analytische Berechnungen ergänzt. Auch für die beiden relevanten Common-Rail-Typen sind Vorversuche geplant, um erste Erfahrungen mit den später zu bewertenden Messeffekten zu sammeln und die Sinnhaftigkeit gewählter Softwareeinstellungen zur Auswertung aufgezeichneter Daten zu überprüfen.

Anschließend werden für die Common-Rails systematische Versuchsreihen geplant, durchgeführt und ausgewertet (Kapitel 4 und 5). Die einzelnen Untersuchungen verfolgen unterschiedliche Ziele. Anhand von Ergebnissen der akustischen Resonanzanalyse werden empirisch Merkmale erarbeitet, mit denen der Autofrettageprozess der verfügbaren Common-Rails zuverlässig nachgewiesen werden kann (Kapitel 5.1.1, 5.1.2, 5.2.1 und 5.2.2). Wiederholt durchgeführte akustische Resonanzanalysen dienen dazu, Schwankungen im Prüfpro-

zess statistisch zu bewerten und so die Sinnhaftigkeit von Mittelungen aus mehreren wiederholten Messungen desselben Common-Rails zu untersuchen (Kapitel 5.1.3 und 5.2.3). Ergänzend dazu wird überprüft, ob eine rechnerische Verknüpfung von Werten mehrerer Merkmale der akustischen Resonanzanalyse zielführend ist (Kapitel 5.1.4 und 5.2.4). Exemplarisch wird weiterhin der Einfluss von zusätzlich auf die Common-Rails appliziertem Korrosionsschutz analysiert, um die Auswirkung einer in der Praxis häufig auftretenden Störgröße auf die Unterscheidbarkeit von Bauteilen verschiedener Autofrettagezustände zu beschreiben (Kapitel 5.1.5 und 5.2.5). Durch Variation der zur Auswertung genutzten Softwareeinstellungen und Merkmale wird deren Einfluss auf die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse untersucht (Kapitel 5.1.6, 5.1.7, 5.2.6 und 5.2.7). Abschließend dienen Variationen im Versuchsaufbau dazu, deren Einfluss auf die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse von Common-Rails zu untersuchen (Kapitel 5.1.9).

Nach Durchführung und Auswertung aller Resonanzmessungen erfolgen laservibrometrische Messungen (Kapitel 5.1.8 und 5.2.8) zur Bestimmung des Schwingungsverhaltens der Common-Rails, um dadurch weitere Erkenntnisse der zugrunde liegenden Effekte und somit für die Entwicklung einer zuverlässigen Prüfung zum Autofrettagenachweis zu sammeln. Abschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen diskutiert (Kapitel 6), zusammengefasst und darauf aufbauend Empfehlungen für die weitere Vorgehensweise im Rahmen des Kooperationsprojekts gegeben (Kapitel 7).

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Schwingungen und Wellen

Der Begriff *Schwingung* bezeichnet einen „Vorgang, bei dem ein einzelner Massepunkt oder auch ein ausgedehnter Körper räumlich begrenzte Bewegungen um eine mittlere Lage durchführt“ [Lindner2006, S. 181].

Schwingungen sind in der Regel periodische Vorgänge, wobei harmonische Schwingungen (auch Sinusschwingungen) durch Amplitude \hat{y} , also die maximale Auslenkung des Schwingers aus seiner Ruhelage, Frequenz f (oder Kreisfrequenz ω) bzw. Periodendauer T sowie Phasenwinkel φ_0 gekennzeichnet sind. Die zeitabhängige Auslenkung $y(t)$ weist für harmonische Schwingungen eine sinusförmige Abhängigkeit auf. Die Beschreibung harmonischer Schwingungen (mit einem Freiheitsgrad) erfolgt über folgende Gleichung [Lindner2006, S. 183], wobei die Beschreibung analog über eine Cosinus-Funktion mit geändertem Phasenwinkel anstelle einer Sinus-Funktion erfolgen kann:

$$y(t) = \hat{y} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{t}{T} + \varphi_0\right) = \hat{y} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_0) = \hat{y} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) \quad (2-1)$$

In der Realität treten zwar in der Regel keine reinen Sinusschwingungen auf, aber reale Schwingungen lassen sich als Summe vieler harmonischer Schwingungen mit Hilfe der harmonischen Synthese (Fourier-Synthese) beschreiben. Je nach Verhältnis der Frequenzen zusammengesetzter Sinusschwingungen entsteht als Resultat zweier harmonischer Schwingungen wiederum eine harmonische Schwingung, eine Schwebung oder eine periodische Schwingung [Lindner2006, S. 187 ff.] (Abb. 2-1). Die Umkehrung, die Fourier-Analyse einer zusammengesetzten Schwingung, bei der die Gesamtschwingung in harmonische Teilschwingungen zerlegt wird, ist in Kapitel 2.3 beschrieben.

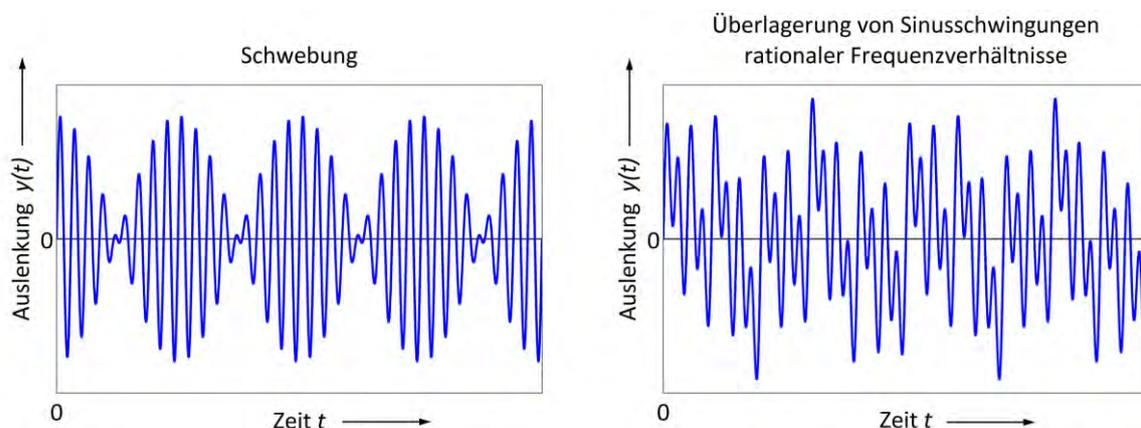


Abb. 2-1: Darstellung einer Schwebung und einer Überlagerung von vier verschiedenen Sinusschwingungen rationaler Frequenzverhältnisse (in Anlehnung an [Lindner2006, S. 188 f.]

In der Praxis lässt sich sowohl theoretisch als auch experimentell zeigen, dass einfache schwingungsfähige Systeme nach einmaliger Anregung mit einer charakteristischen Kreisfrequenz, der von Systemkonstanten abhängigen Eigenkreisfrequenz ω_0 , schwingen [Lindner2006, S. 195 ff.]. Eine entsprechende Schwingungsgleichung als Lösung der Differentialgleichung eines einfachen schwingungsfähigen Systems ist z. B. Zusammenhang (2-1), wobei jedoch die allgemeine Kreisfrequenz ω durch die Eigenkreisfrequenz ω_0 des harmonischen Oszillators ersetzt wird.

Wichtig für das Verständnis dieser Arbeit ist vor allem die gedämpfte Schwingung (Abb. 2-2), bei welcher die (geschwindigkeitsproportionale) Dämpfung durch eine Exponentialfunktion unter Berücksichtigung der Abklingkonstanten δ beschrieben ist [Lindner2006, S. 201]:

$$y(t) = \hat{y} \cdot e^{-\delta \cdot t} \cdot \sin(\omega_d \cdot t + \varphi_0) \quad (2-2)$$

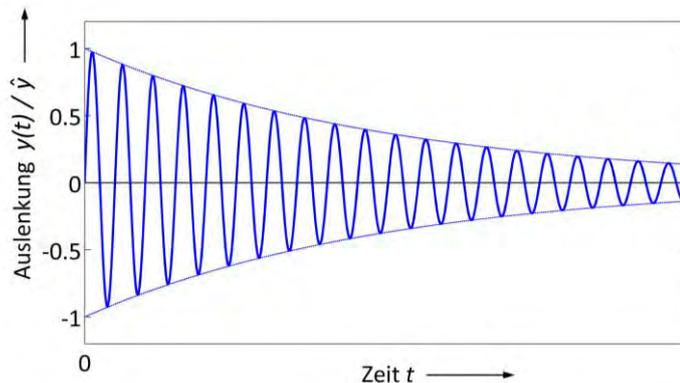


Abb. 2-2: Darstellung der normierten zeitabhängigen Auslenkung $y(t)/\hat{y}$ in Abhängigkeit der Zeit t für eine gedämpfte Schwingung (in Anlehnung an [Lindner2006, S. 201])

Die e-Funktion stellt dabei eine Hüllkurve für die abklingende Amplitude dar. ω_d ist die Eigenkreisfrequenz des gedämpften harmonischen Oszillators [Lindner2006, S. 202]:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (2-3)$$

Die Eigenkreisfrequenz ω_d des gedämpften Oszillators ist geringer als die des frei schwingenden Oszillators, wodurch sich auch die Resonanzfrequenz der gedämpften Schwingung verringert. Je größer die Abklingkonstante δ einer gedämpften Schwingung, desto rascher klingt die Amplitude dieser ab. Dabei zu beachten, dass für eine Abklingkonstante δ größer oder gleich der Eigenfrequenz ω_0 ein Kriechfall bzw. ein aperiodischer Grenzfall vorliegt [Gerthsen2010, S. 154]. Diese beiden Sonderfälle spielen im Rahmen dieser Arbeit keine Rolle, so dass auf eine nähere Betrachtung verzichtet wird.

Die bisher geschilderten Sachverhalte gelten für Fälle, in denen das schwingungsfähige System kurzzeitig durch eine äußere Kraft angeregt wird und daraufhin mit der Eigenfrequenz

des Systems schwingt. Erfolgt eine Anregung durch eine länger andauernde, periodische Kraft, so liegt eine erzwungene Schwingung vor [Lindner2006, S. 203]. Auch wenn dieser Fall für die vorliegende Arbeit keine praktische Bedeutung besitzt, können die soeben beschriebenen Sachverhalte in Bezug auf gedämpfte Schwingungen anhand erzwungener Schwingungen verdeutlicht werden. Wird die Amplitude eines periodisch angeregten Systems in Abhängigkeit der Kreisfrequenz der anregenden Kraft für verschiedene Dämpfungen aufgetragen, ist sowohl die Änderung der Amplitude sowie die Verschiebung der Eigenkreisfrequenz des Systems in Abhängigkeit der Dämpfung zu erkennen (Abb. 2-3).

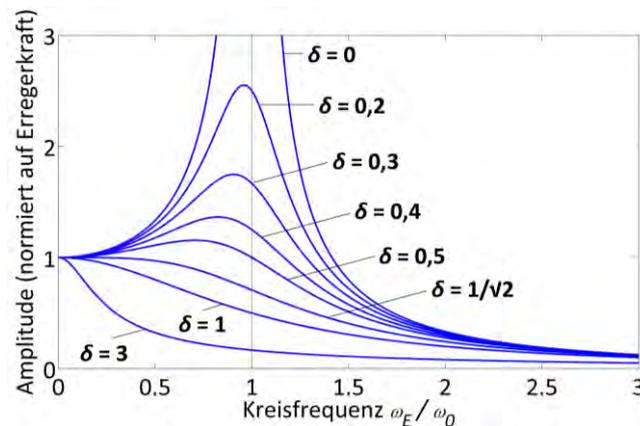


Abb. 2-3: Darstellung der Auslenkungsamplitude einer erzwungenen Schwingung in Abhängigkeit der Erregerkreisfrequenz für verschiedene Dämpfungen (in Anlehnung an [Hering2007, S. 446 f.])

Erfolgt eine periodische Anregung mit $\omega_R = \omega_E = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}$, was bei sehr geringer Dämpfung näherungsweise mit der Eigenkreisfrequenz ω_0 des ungedämpften Systems übereinstimmt, liegt der Resonanzfall (Auslenkungsgresonanz) vor. Die Amplitude des Schwingers kann im Resonanzfall sehr große Werte annehmen [Lindner2006, S. 206].

Schwingungsfähige Systeme aus mehreren Oszillatoren, zwischen denen eine gegenseitige Wechselwirkung besteht, führen gekoppelte Schwingungen aus. Die Anzahl der Oszillatoren kann letztendlich sehr groß sein, wie bei Schwingungen von Körpern, bei denen einzelne Oszillatoren atomarer Größe interagieren. Bei solchen gekoppelten Systemen sind zahlreiche (abhängig von der Anzahl der Freiheitsgrade und damit von der Anzahl der Oszillatoren des Systems) Eigenfrequenzen zu beobachten. Die niedrigste davon stellt die Grundschiwingung dar und alle weiteren entsprechen den zugehörigen Oberschwingungen [Lindner2006, S. 213].

Die Ausbreitung räumlich gekoppelter Schwingungen in einem Medium wird als *Welle* bezeichnet [Dobriniski2010, S. 414] oder allgemeiner formuliert nach [Lindner2006, S. 218]: „Eine Welle ist die einsinnige örtliche Verlagerung eines bestimmten Zustands in einem Kontinuum. Genaugenommen wird auch von einer fortschreitenden oder Wanderwelle gespro-

chen, da Eigenschwingungen häufig auch als stehende Wellen bezeichnet werden“. In Abb. 2-4 ist die Ausbreitung einer fortschreitenden Welle dargestellt.

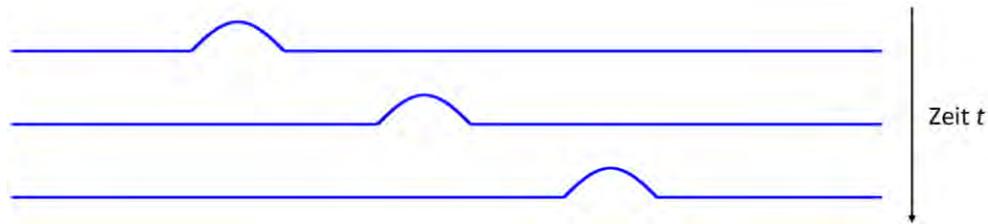


Abb. 2-4: Darstellung der Ausbreitung einer Störung (Welle) (in Anlehnung an [Lindner2006, S. 218])

Wellen transportieren Energie in Ausbreitungsrichtung ohne Materientransport, wobei in Abhängigkeit der Schwingungsrichtung der gekoppelten Oszillatoren grundsätzlich Longitudinal- und Transversalwellen unterschieden werden [Lindner2006, S. 218] (Abb. 2-5). Der Zusammenhang von Schwingungsrichtung in Bezug auf die Ausbreitungsrichtung wird bei transversalen Wellen als Polarisation bezeichnet.

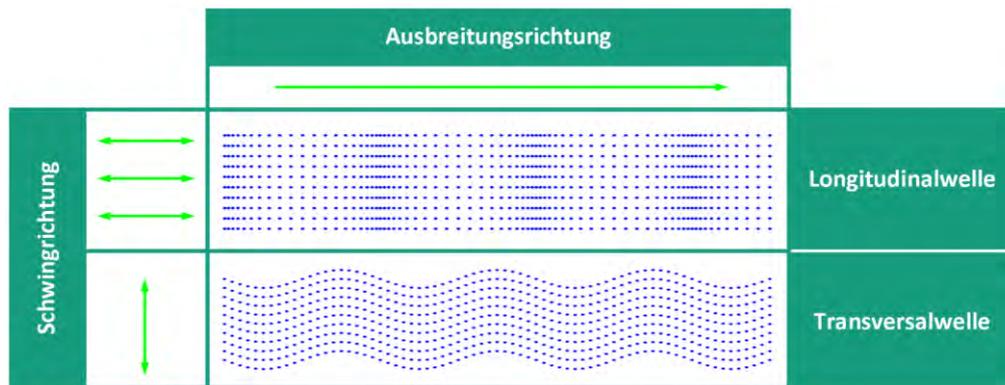


Abb. 2-5: Darstellung einer Longitudinal- und einer Transversalwelle (in Anlehnung an [Krautkrämer1986, S. 5])

Breiten sich Wellen im dreidimensionalen Kontinuum aus, stellen Raumpunkte mit gleichen Schwingungszuständen Flächen dar, welche als Wellenflächen oder Wellenfronten bezeichnet werden. So lassen sich die Raumwellen in Abhängigkeit der Form der Wellenfronten in ebene Wellen, Zylinderwellen oder Kugelwellen unterteilen. Analog zu den Schwingungen gibt es auch bei den Wellen den Begriff der harmonischen, sinusförmigen Welle. Ursächlich ist hierbei eine lokale Störung mit sinusförmiger Zeitabhängigkeit [Lindner2006, S. 218 ff.].

Als Phasengeschwindigkeit c_p einer harmonischen Welle ist die Geschwindigkeit definiert, mit welcher sich ein beobachteter Schwingungszustand im Raum ausbreitet, also die zurückgelegte Entfernung Δx bezogen auf die verstrichene Zeit Δt (in Anlehnung an [Lindner2006, S. 221]):

$$c_p = \frac{\Delta x}{\Delta t} \tag{2-4}$$

Die Wellenlänge λ (Abb. 2-6) einer harmonischen Welle ist definiert als der minimale Abstand zweier Raumpunkte mit identischem Schwingungszustand [Lindner2006, S. 222]:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot c_p}{\omega} \quad (2-5)$$

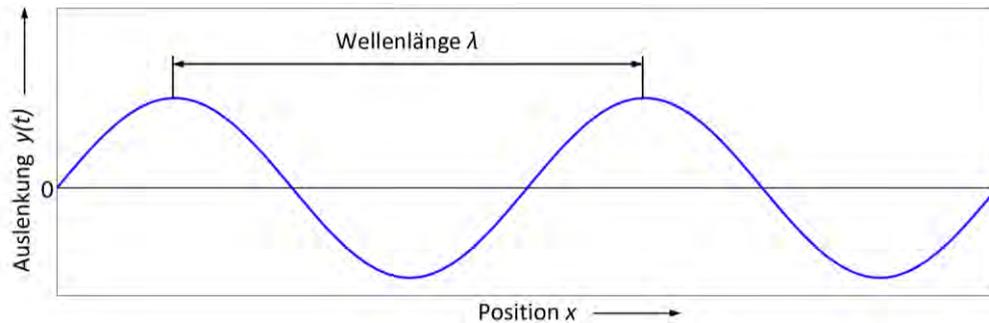


Abb. 2-6: Darstellung der Wellenlänge λ einer Welle (in Anlehnung an [Lindner2006, S. 220])

Für den allgemeinen Zusammenhang zwischen Frequenz f , Wellenlänge λ und Phasengeschwindigkeit c_p gilt [Lindner2006, S. 222]:

$$\lambda \cdot f = c_p \quad (2-6)$$

Auf Grund einer impulsförmigen Anregung bildet sich ein räumlich begrenzter Wellenzug aus, der sich durch das Medium fortbewegt und als Wellenpaket oder Wellengruppe bezeichnet wird. Da diese Wellengruppe aus verschiedenen Teilwellen (Wellen verschiedener Frequenzen) bestehen kann ist nicht gewährleistet, dass alle Teilwellen dieselbe Phasengeschwindigkeit aufweisen. Die Folge davon ist, dass die fortschreitende Wellengruppe ihre räumliche Ausdehnung verändert. Diese Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit von der Frequenz wird als Dispersion bezeichnet [Lindner2006, S. 226] (Abb. 2-7).

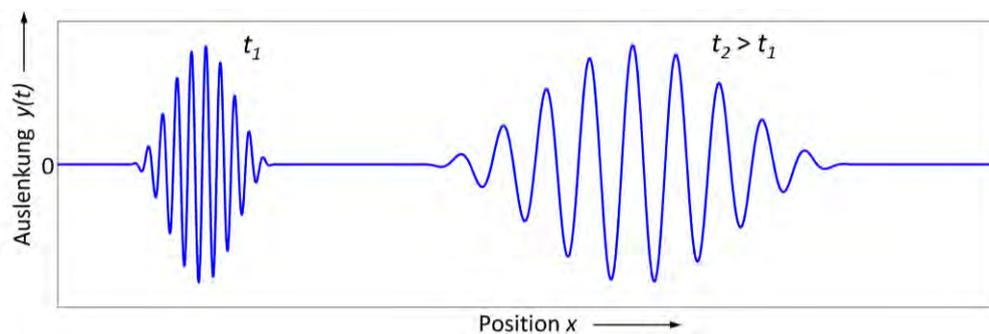


Abb. 2-7: Darstellung des Verhaltens einer Wellengruppe bei Dispersion (in Anlehnung an [Lindner2006, S. 226])

Fortlaufende Wellen können interferieren, d. h. sie können sich gegenseitig beeinflussen. Diese Tatsache ist maßgebend für die Entstehung von stehenden Wellen. Diese können sich bei der Überlagerung gegenläufiger Wellen gleicher Frequenz und gleicher Amplitude bilden.

Gegenläufige Wellen treten auf, wenn ein Körper von zwei Seiten angeregt oder eine fortschreitende, aus einer Richtung kommende Welle am Ende eines Körpers reflektiert wird und mit der ursprünglichen Welle interferiert. Bei stehenden Wellen bilden sich Orte der Verstärkung (bzw. Auslöschung) jeweils im Abstand der halben Wellenlänge. Die konkrete Erscheinungsform stehender Wellen hängt von unterschiedlichen Randbedingungen ab, von denen zwei in Abb. 2-8 dargestellt sind. Charakteristische Eigenschwingungsformen von Körpern können sowohl als stehende Wellen durch Überlagerung von entgegenlaufenden Wellen, sowie auch als Eigenschwingungen eines Systems aus gekoppelten Oszillatoren aufgefasst werden [Lindner2006, S. 230 f.].

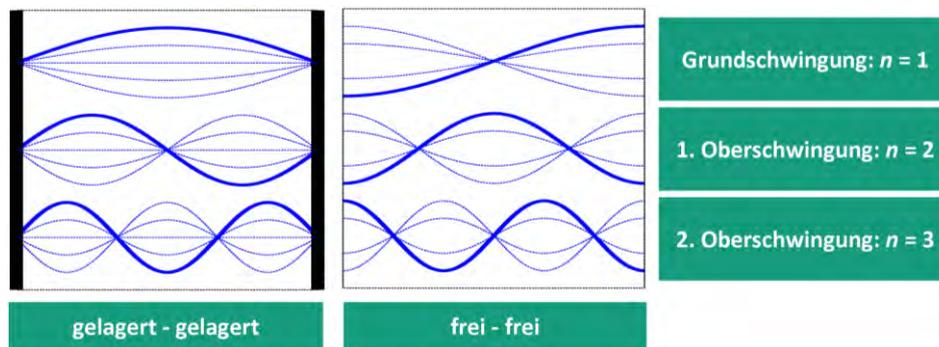


Abb. 2-8: Darstellung stehender Seilwellen bei gelagerten und bei freien Enden (in Anlehnung an [Gerthsen2010, S. 184])

Stehende Wellen entstehen in einem schwingungsfähigen System, falls die Wellenlänge λ einem ganzzahligen Vielfachen der halben Länge l des betrachteten Körpers entspricht [Lindner2006, S. 231]. Die Frequenz f_n , bei welcher eine stehende Welle entsteht, kann nach [Lindner2006, S. 231] wie folgt in Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit c_p und der Wellenlänge λ_n bzw. der Länge l des Körpers bestimmt werden, wobei $n = 1$ die Grundschiwingung und $n \geq 2$ die Oberschwingungen bezeichnet [Lindner2006, S. 231]:

$$f_n = \frac{c_p}{\lambda_n} = \frac{c_p}{2 \cdot l} \cdot n \quad (2-7)$$

Die charakteristischen Wellenformen stehender Wellen bzw. die charakteristischen Erscheinungsformen von Eigenschwingungen werden in der Literatur auch oft als *Schwingungsmoden* oder einfach *Moden* bezeichnet.

Eine wichtige Größe, die sogenannte Kreiswellenzahl k , sei an dieser Stelle abschließend erwähnt, da diese in zahlreicher Literatur und auch in den in dieser Arbeit verwendeten Formeln genutzt wird [Lerch2009, S. 23]:

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2-8)$$

2.2 Schall und Körperschall

Schall bezeichnet mechanische Schwingungen und Wellen in elastisch deformierbaren Medien. Je nach Ausbreitungsmedium wird Luftschall, Flüssigkeitsschall und Körperschall unterschieden, wobei sich in gasförmigen und idealen flüssigen Medien nur longitudinale und in Festkörpern zusätzlich transversale Schallwellen ausbreiten können. Je nach Frequenz des Schalls wird Infraschall (0 bis 20 Hz), Hörschall (20 Hz bis 20 kHz), Ultraschall (20 kHz bis 1 GHz) sowie Hyperschall (oberhalb 1 GHz) unterschieden [Lerch2009, S. 1]. Der Fokus der in dieser Arbeit betrachteten Frequenzbereiche erstreckt sich über den hörbaren Bereich sowie den unteren Ultraschallbereich bis 50 kHz. Der gesamte Prozess bei der Entstehung von Körperschall sowie der Übergang von Körperschall in Luftschall sind in Abb. 2-9 dargestellt.

Die in den folgenden Unterkapiteln 2.2.1 bis 2.2.3 aufgeführte Theorie soll dem Verständnis dieser Arbeit genügen, wobei anzumerken ist, dass in einer theoretischen Betrachtung in Kapitel 3 auf weiterführende Zusammenhänge eingegangen wird. Für weitere allgemeine Zusammenhänge der technischen Akustik, deren Messtechniken sowie zu Körperschall sei auf die gut verständlichen Werke [Cremer2010], [Möser2009], [Möser2010], [Sessler2010] sowie die weiterhin zitierte Literatur verwiesen.



Abb. 2-9: Darstellung der Entstehung von Luftschall (in Anlehnung an [Gerusel1998, S. 19])

2.2.1 Luftschall

Luftschall stellt fortschreitende und miteinander interferierende Wellen dar. Im Schallfeld existieren daher kontinuierlich wechselnde Wellenberge und Wellentäler, also Bereiche der Verdichtung und der Ausdehnung der Luft. Die durch Schall verursachte (orts- und zeitabhängige) Abweichung p vom Umgebungsdruck p_0 wird als *Schalldruck* bezeichnet. Mikrofone erfassen in der Regel den zeitabhängigen Schalldruck p an einem festen Ort. Weitere (eben-

falls orts- und zeitabhängige) Grundgrößen, welche nur der Vollständigkeit wegen erwähnt werden, sind die Schallschnelle \vec{v} und die Schalldichte ρ , welche die Abweichungen von den entsprechenden statischen (ohne Schall vorhandenen) Werten \vec{v}_0 und ρ_0 beschreiben, die in der Umgebung vorherrschen [Lerch2009, S. 7 f.]. Mit Hilfe dieser Größen lässt sich ein Schallfeld vollständig beschreiben:

$$\rho_{gesamt} = \rho_0 + \rho \quad (2-9)$$

$$\vec{v}_{gesamt} = \vec{v}_0 + \vec{v} \quad (2-10)$$

$$p_{gesamt} = p_0 + p \quad (2-11)$$

Die Schallintensität, welche ein Maß für die bei einem Empfänger ankommende Schallleistung darstellt, beschreibt die pro Zeit durch eine Fläche hindurch tretende Schallenergie [Weinzierl2008, S. 26]. Für die Schallintensität I_{Schall} gelten folgende Zusammenhänge [Weinzierl2008, S. 27]:

$$I_{Schall} = p \cdot \vec{v} \quad (2-12)$$

$$I_{Schall} = \frac{p^2}{Z_0} \quad (2-13)$$

Die Größe Z_0 stellt die Schallkennimpedanz (auch Wellenwiderstand) dar. Auf diese Größe wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, da die Zusammenhänge für diese Arbeit nicht relevant sind. Wichtig für diese Thesis ist die Tatsache, dass nach Zusammenhang (2-13) die Schallintensität I_{Schall} proportional zum Quadrat des Schalldrucks p ist.

Da sich der für den Menschen wahrnehmbare Schalldruckbereich in Pascal über mehr als sechs Zehnerpotenzen erstreckt ist es vorteilhaft, den Schalldruck mittels eines Pegelmaßes, dem sogenannten Schalldruckpegel L_p , anzugeben [Lerch2009, S. 8 f.]:

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_{Referenz}} \right) = 20 \lg \left(\frac{p}{p_{Referenz}} \right) \quad (2-14)$$

Dabei ist p der Schalldruck in Pascal und $p_{Referenz} = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa ein Referenzwert, der der Hörschwelle des Menschen bei einer Frequenz von 1 kHz entspricht [Lerch2009, S. 10].

Die Schallgeschwindigkeit in einem Gas entspricht der Phasengeschwindigkeit – also der Ausbreitungsgeschwindigkeit fortschreitender Schallwellen – im entsprechenden Medium. Die Schallgeschwindigkeit c_{Gas} in einem Gas errechnet sich wie folgt [Lindner2006, S. 239]:

$$c_{Gas} = \sqrt{\frac{K}{\rho_0}} \quad (2-15)$$

Für ideale Gase lässt sich der Kompressionsmodul K auf elementare Größen zurückführen. So ergibt sich die Schallgeschwindigkeit c_{Gas} in einem Gas in Abhängigkeit des Adiabatenexponents κ , der spezifischen Gaskonstanten R_i sowie der Umgebungstemperatur T [Lindner2006, S. 239]:

$$c_{Gas} = \sqrt{\kappa \cdot R_i \cdot T} \quad (2-16)$$

Für trockene Luft sind die stoffspezifischen Konstanten κ und R_i nach [Dubbel2005, S. Q92] $\kappa_{Luft} = 1,4$ und $R_{Luft} = 287,05 \text{ J / (kg} \cdot \text{K)}$, womit sich die Schallgeschwindigkeit $c_{Luft,20^\circ\text{C}}$ in trockener Luft bei 20°C ergibt:

$$c_{Luft,20^\circ\text{C}} = \sqrt{\kappa_{Luft} \cdot R_{Luft} \cdot T} = \sqrt{1,4 \cdot 287,05 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 293,15 \text{ K}} \approx 343,23 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (2-17)$$

Die Schallgeschwindigkeit, insbesondere in Luft, ist weiterhin sehr gut tabelliert, wodurch diese für verschiedenste Bedingungen einfach abgelesen werden kann.

2.2.2 Körperschall

Körperschall bezeichnet das physikalische Gebiet, welches sich mit „der Erzeugung, Übertragung und Abstrahlung von – meist sehr kleinen – zeitlich wechselnden Bewegungen und Kräften in festen Körpern“ befasst [Cremer2010, S. 1].

In Festkörpern können neben Longitudinalwellen (wie in Gasen oder Flüssigkeiten) auch Transversalwellen fortschreiten (vgl. Abb. 2-5). Bei der Beschreibung von Wellen in einem Festkörper muss unterschieden werden, ob der betrachtete Körper ein realer Körper mit realer begrenzter Geometrie oder ein theoretischer Körper mit beispielsweise unbegrenzten oder unendlich kleinen Dimensionen ist.

Bei Festkörpern sind neben den Materialparametern auch die Körperabmaße im Vergleich zur Wellenlänge und damit verbundene Querkontraktion zur Beschreibung der Schallgeschwindigkeit entscheidend, da Festkörper nicht nur einer Volumenänderung sondern auch einer Formänderung einen elastischen Widerstand entgegensetzen. Generell unterscheidet sich die Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Wellentyps. Sehr gut hergeleitet sind diese Zusammenhänge für longitudinale Schwingungen in allseitig ausgedehnten bzw. realen, begrenzten Körpern in [Cremer2010, S. 29 ff.]. So gilt für die Schallgeschwindigkeit c_{LS} in Stäben, welche nur von den Materialkonstanten Elastizitätsmodul E und Dichte ρ abhängt [Cremer2010, S. 37]:

$$c = c_{LS} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2-18)$$

Für reale, allseitig begrenzte Körper wie Stäbe, bei denen eine Dimension viel größer als die anderen beiden ist, ergeben sich vor allem bestimmte Arten von Körperschall, welche nach [Cremer2010] – wie im Folgenden aufgeführt – unterschieden werden. Auf Grund von Reflexion und Überlagerung fortlaufender Wellen können die bereits erwähnten stehenden Wellen bzw. Stabeigenschwingungen entstehen. Für Stäbe werden die Eigenmoden (jeweils für jede Wellenart) in dieser Arbeit mit $n = 1, 2, \dots$ durchnummeriert, wobei die erste Eigenschwingung jeweils der Grundschwingung entspricht und die weiteren den dazugehörigen Oberschwingungen. Diese Notation ist abweichend zur Beschreibung der Eigenschwingungen von Hohlzylindern oder Platten, da bei deren Beschreibung zwei Indizes verwendet werden (siehe Kapitel 2.2.3).

In Stäben treten anstelle von reinen Longitudinalwellen die sogenannten *quasi-longitudinalen Wellen* auf, welche in Achsrichtung eines Stabes fortschreitenden Longitudinalwellen mit gekoppelten, radialen Querbewegungen auf Grund von Querkontraktion im Material entsprechen (Abb. 2-10). Da sich die Steife des Materials auf Grund der Querkontraktion reduziert, ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer quasi-longitudinalen Welle geringer als die der reinen Longitudinalwelle. Weiterhin kann durch (quasi-) longitudinale Eigenschwingungen eines Stabes Schall an die Luft durch die (geringen) radialen Bewegungskomponenten abgestrahlt werden [Cremer2010, S. 34 ff.].

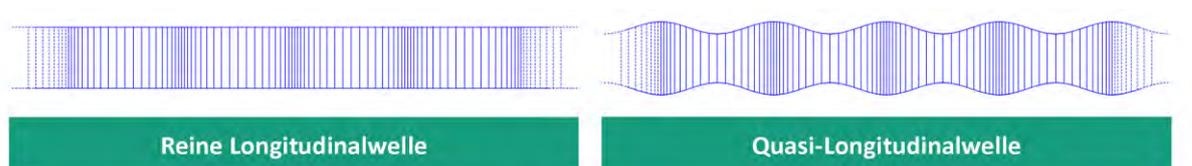


Abb. 2-10: Darstellung einer reinen Longitudinalwelle und einer quasi-longitudinalen Welle (in Anlehnung an [Cremer2010, S. 36])

Auf Grund zeitlich anregender Torsionsmomente können in einem Stab *Torsionswellen* fortschreiten. Dabei handelt es sich um Transversalwellen. Bei rotationssymmetrischen Stäben treten bei einer Torsion lediglich tangentielle Bewegungen des Körpers zu sich selbst auf, so dass keine Abstrahlung von Körperschall an die umgebende Luft zu erwarten ist. Bei nicht vollständig rotationssymmetrischen Körpern hingegen ist durch Torsionswellen eine Schallabstrahlung zu erwarten, da bei der Torsion dieser Objekte zur Oberfläche senkrechte Bewegungskomponenten auftreten [Cremer2010, S. 43 ff.].

Eine weitere wichtige Wellenart stellen die *Biegewellen* dar, welche zwar im Erscheinungsbild einen transversalen Charakter aufweisen, jedoch zur Beschreibung gegenüber den zuvor beschriebenen Wellenarten zusätzliche Feldgrößen erfordern. Biegewellen sind auf Grund großer Bewegungskomponenten senkrecht zum umgebenden Medium wesentlich an der

Abstrahlung von Körperschall beteiligt. Die Schallgeschwindigkeit von BiegeWellen ist von der Kreisfrequenz und damit von der Frequenz der Biegeschwingung abhängig [Cremer2010, S. 47 ff.].

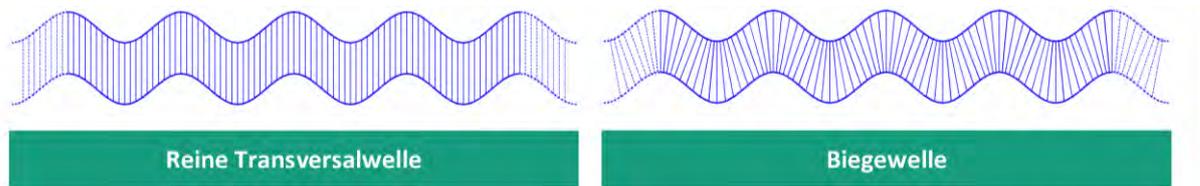


Abb. 2-11: Darstellung einer reinen Transversalwelle und einer BiegeWelle (in Anlehnung an [Möser2009, S. 129 ff.]

In Randbereichen von Festkörpern können sich *Oberflächenwellen (Rayleighwellen)* ausbreiten, welche sich auf die freie Körperoberfläche sowie nah angrenzende Bereiche beziehen. Die Schwingungsamplitude einer solchen Welle, die sowohl longitudinale als auch transversale Schwingungsanteile aufweist, nimmt mit zunehmendem Abstand von der entsprechenden Oberfläche exponentiell ab [Lerch2009, S. 115].

Zuletzt seien noch die *Plattenschwingungen* erwähnt. Dabei handelt es sich um Eigenschwingungen bzw. stehende BiegeWellen in plattenförmigen Bauteilen. In der Platte entlanglaufende Wellen werden an den Begrenzungen reflektiert, sodass sich durch die Überlagerung der reflektierten mit den ursprünglichen Wellen stehende Wellen ausbilden (Abb. 2-12). Da Hohlzylinder – abgerollt betrachtet – auch als Platte aufgefasst werden können und die Eigenmoden von Platten an bestimmte Eigenmoden von Hohlzylindern erinnern, seien die Plattenschwingungen an dieser Stelle aufgeführt [Möser2009, S. 147 ff.].

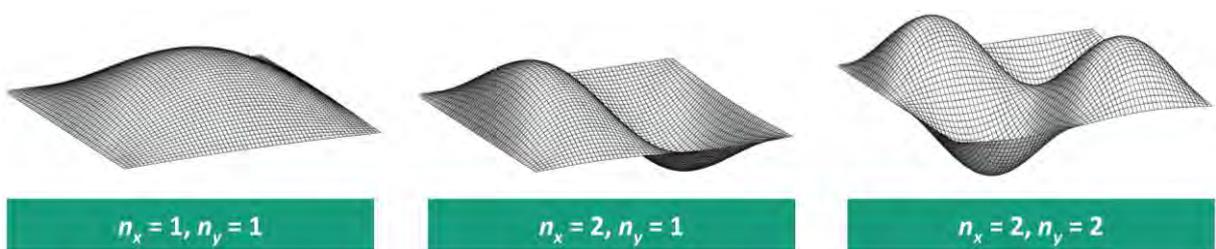


Abb. 2-12: Darstellung drei verschiedener Plattenmoden einer allseitig eingespannten Platte (in Anlehnung an [Möser2009, S. 148 f.]

2.2.3 Schwingungsmoden von Hohlzylindern

In Hohlzylindern können prinzipiell alle in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Wellenarten auftreten, wobei die Ausbreitung von bestimmtem Körperschall für niederfrequente Wellen dispersiven Charakter aufweist. Das heißt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmter Wellen von deren Frequenz abhängt. Für weitere Ausführungen dazu sei auf [Herbst2004] verwiesen. Die verschiedenen Wellenarten können auf Grund von Interferenzen zu Eigen-

schwingungen von Hohlzylindern führen. Die möglichen Eigenmoden von Hohlzylindern werden im Folgenden aufgezeigt, wobei die Notation zur Beschreibung der Moden nach [Markus1988] folgt. Dieser beschreibt die Schwingungsformen von Hohlzylindern mit Hilfe der Variablen n und m , welche die Modennummer in Umfangs- bzw. Axialrichtung angeben. Dabei entspricht n der halben Knotenzahl (gleich Anzahl der Wellen) in Umfangsrichtung und m der Anzahl der Halbwellen in axialer Richtung (Abb. 2-13).

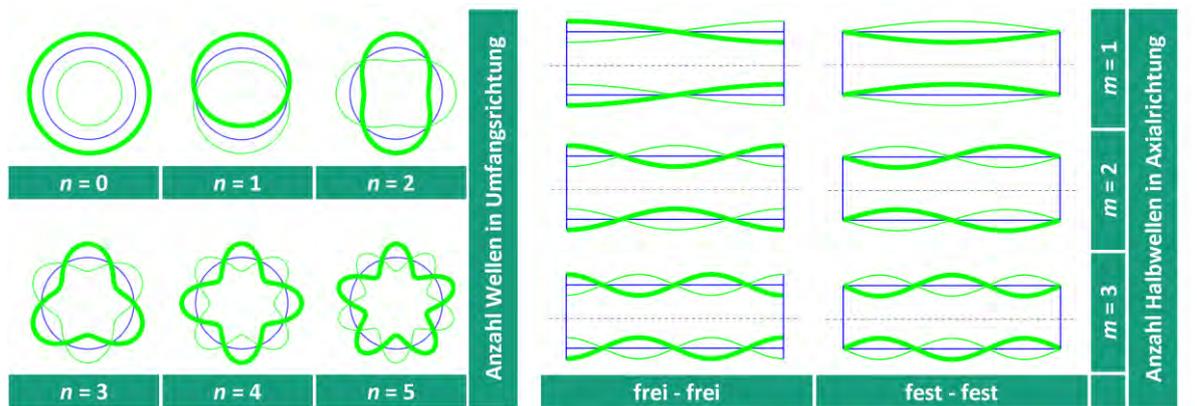


Abb. 2-13: Darstellung der Wellenanzahl in Umfangsrichtung und der Halbwellenanzahl in Axialrichtung und jeweilige optische Erscheinungsformen für einen Hohlzylinder (in Anlehnung an [Markus1988, S. 16])

Demnach bezeichnen Moden mit $n = 0$ vollständig achsensymmetrische Torsionsschwingungen, Longitudinalschwingungen und Radialschwingungen (oder nach [Gerusel1998] Kreisatmungsschwingungen). Biegeschwingungen, bei welchen der Querschnitt unverformt bleibt aber aus der Ruhelage ausgelenkt wird, werden mit $n = 1$ bezeichnet. Eigenschwingungen mit $n \geq 2$ stellen nicht symmetrische Umfangsschwingungen (nach [Markus1988], auch nicht-achsensymmetrische Atmungsschwingungen nach [Gerusel1998]) dar (Abb. 2-15). Mathematische Beschreibungen dazu sind in [Markus1988] aufgeführt und sind für diese Arbeit nicht relevant. In Abb. 2-14 sind anschaulich charakteristische Modenformen eines rohrförmigen Bauteils mit $n = 2$ und $m = 1, \dots, 4$ dargestellt.

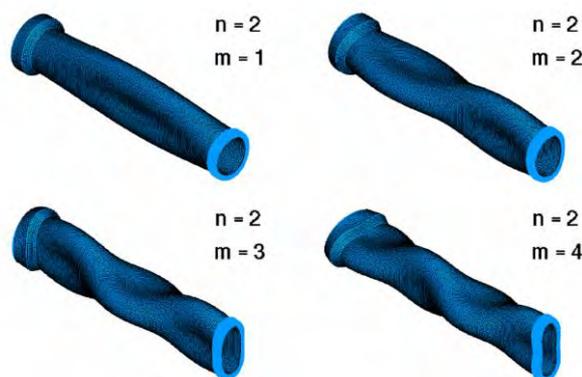


Abb. 2-14: Darstellung ausgewählter Eigenmoden eines rohrförmigen Bauteils (FEM-Simulation) (Quelle: [Herbst2004, S. 24])

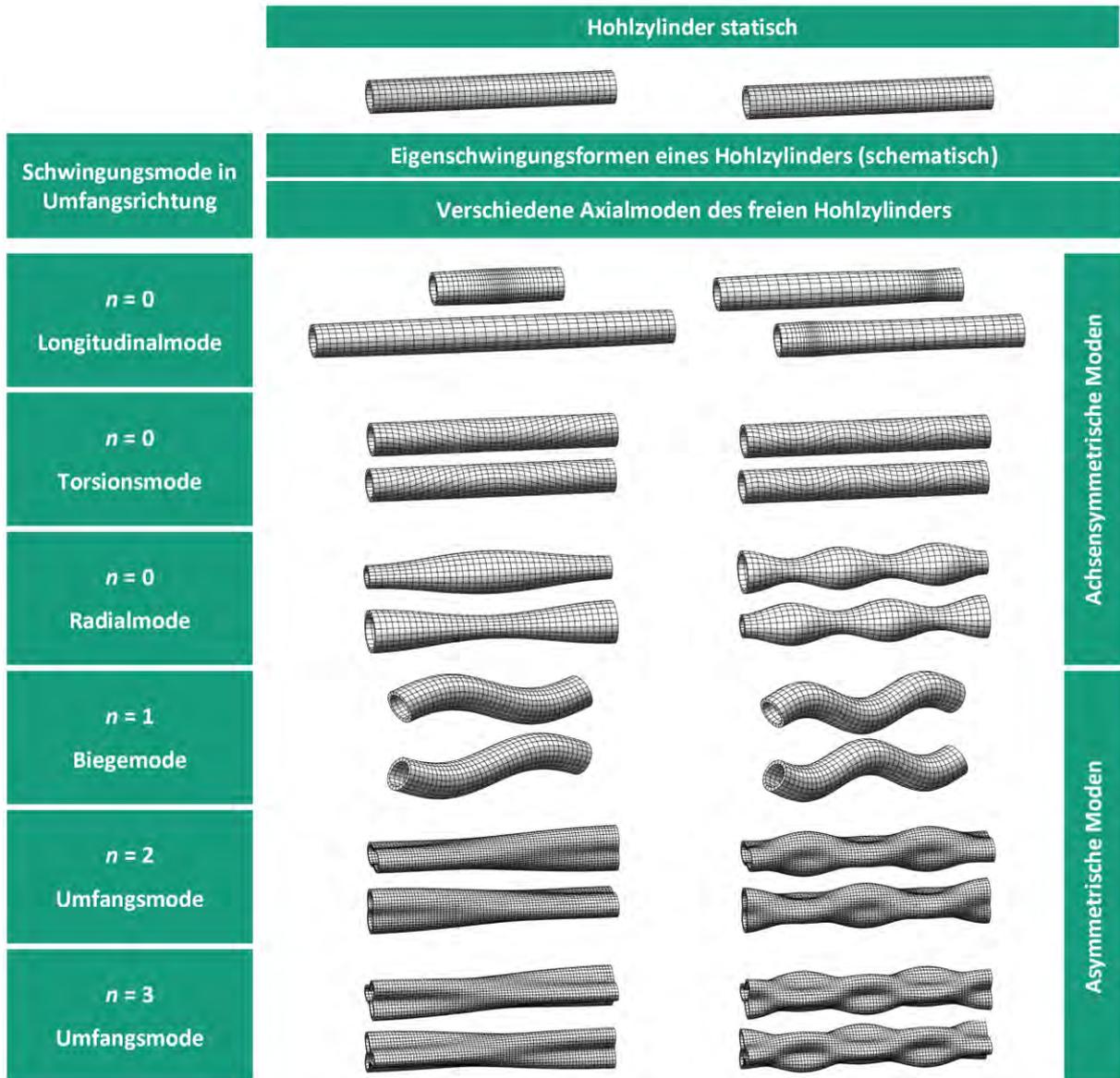


Abb. 2-15: Darstellung ausgewählter Eigenschwingungsformen eines Hohlzylinders (in Anlehnung an [Markus1988, S. 18])

2.3 Datenerfassung und diskrete Fourier-Transformation

Schallwellen verursachen in Luft periodisch schwankende Schalldrücke (siehe Kapitel 2.2), welche mit einem Mikrofon detektiert werden können. Dazu wird in der Regel eine im Mikrofon befindliche Membran angeregt und die Schwingung dieser vom Messsystem als elektrische Spannung registriert [Möser2010, S. 19 ff.]. Die am Mikrofon abfallende elektrische Spannung und der ursächliche Schalldruck sind näherungsweise proportional zueinander.

Im Messsystem erfolgt die Digitalisierung des registrierten (zeitkontinuierlichen) Spannungsverlaufs mit einer vorgegebenen Abtastfrequenz, sodass das Ursprungssignal anschließend als zeitdiskret abgestufter Signalverlauf vorliegt (Abb. 2-16). Dieser Schritt ist erforderlich, um das Signal digital weiterverarbeiten zu können [Möser2010, S. 544 f.]. Die Abtastfrequenz muss mindestens die doppelte Frequenz des größten zu detektierenden Frequenzanteils aufweisen, um das Abtasttheorem einzuhalten. Dieses besagt, dass ein Signal mit einer maximalen Frequenzkomponente f_{max} mit einer Abtastfrequenz von mindestens $f_a = 2 \cdot f_{max}$ gleichmäßig abgetastet werden muss, sodass der Signalverlauf des Ursprungssignals hinreichend genau erfasst wird ([Möser2010, S. 545 f.] und [Werner2010, S. 77]). Das diskrete, zeitabhängige Signal wird im weiteren Verlauf der Arbeit auch als *Zeitsignal* bezeichnet.

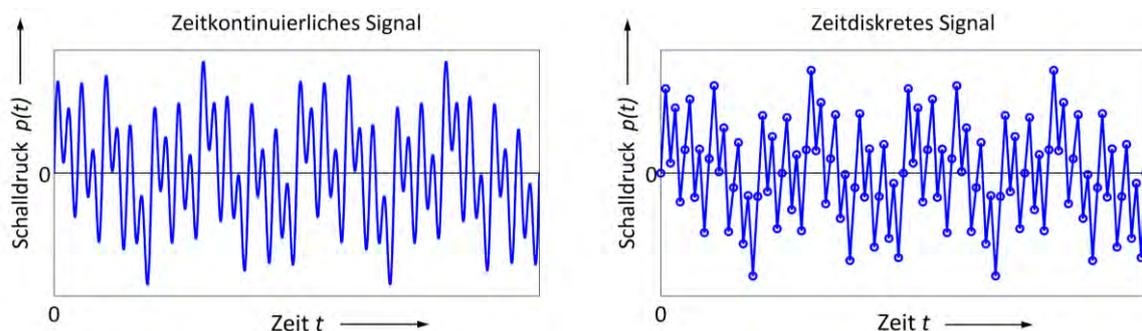


Abb. 2-16: Darstellung eines zeitkontinuierlichen Signals und eines durch Abtasten diskretisierten Signals

Liegen die Parameter Frequenz, Amplitude und Phasenwinkel mehrerer harmonischer Schwingungen vor, kann leicht durch Überlagerung dieser die resultierende Schwingung beschrieben werden. In der Praxis stellt sich jedoch sehr oft die Aufgabe, eine zusammengesetzte Schwingung in ihre harmonischen Bestandteile zu zerlegen. Speziell im Bereich der Signalverarbeitung liegt die zu analysierende Schwingung in der Regel nicht zeitkontinuierlich beschrieben vor. Die zeitabhängige Auslenkung der Schwingung kann aber durch Abtasten zu diskreten Zeitpunkten erfasst werden. Die abgetastete Schwingung wird mit der *diskreten Fourier-Transformation (DFT)* in harmonische Anteile sowie einen Gleichanteil zerlegt. Als Ergebnis einer DFT ergibt sich ein Vektor komplexer Zahlen, deren (absolute) Realteile Amplituden einzelner Komponenten der Gesamtschwingung darstellen. Diese Amplituden

ergeben ein Amplitudenspektrum, falls die Amplituden über zugehörige, diskret abgestufte Frequenzen aufgetragen werden. An dieser Stelle sei erwähnt, dass auch die Phasenbeziehungen der einzelnen Schwingungskomponenten aus den komplexen Anteilen der Ergebnisse der DFT bestimmt werden können. Darauf wird im Verlauf dieser Arbeit jedoch nicht zurückgegriffen, weswegen an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen wird.

Abb. 2-17 zeigt ein diskretes Linienspektrum als Ergebnis einer diskreten Fourier-Transformation des Zeitsignals aus Abb. 2-16. In der Regel (in den meisten Programmen) erfolgt die Darstellung eines solchen frequenzdiskreten Spektrums als kontinuierliches Spektrum. Dazu werden die Amplitudenwerte der Schwingungskomponenten linear verbunden. Die dadurch erkennbaren Spitzen im Spektrum werden im weiteren Verlauf der Arbeit *Peaks* oder auch *Resonanzpeaks* genannt.

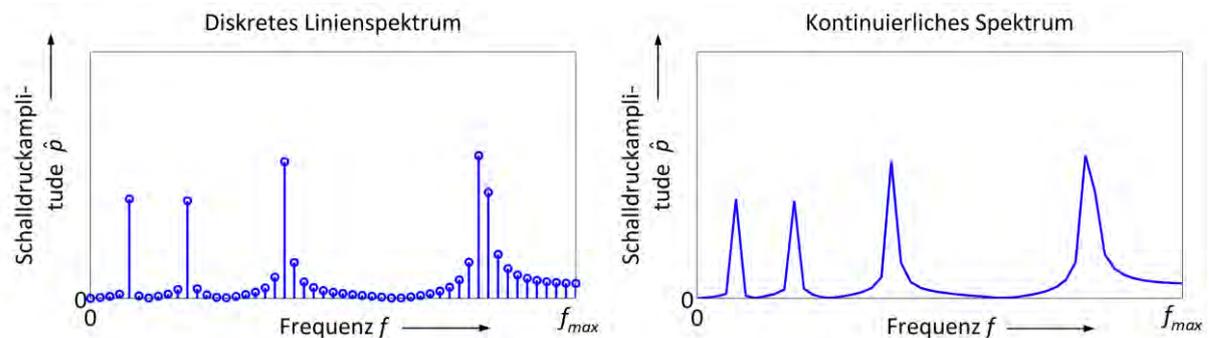


Abb. 2-17: Darstellung eines diskreten Linienspektrums und eines kontinuierlichen Spektrums

Dem Abtasttheorem zu Folge ist die maximale Frequenz f_{max} im Spektrum mit der halben Abtastfrequenz f_a identisch:

$$f_{max} = \frac{f_a}{2} \tag{2-19}$$

Die Länge n_a des zeitdiskreten Signals, das heißt die Anzahl der diskret abgetasteten Schwingungsauslenkungen, ergibt sich als Zusammenhang zwischen Messdauer t_a und Abtastrate f_a :

$$n_a = t_a \cdot f_a \tag{2-20}$$

Das diskretisierte Zeitsignal wird mit der diskreten Fourier-Transformation in harmonische Anteile sowie einen Gleichanteil zerlegt. Dabei hängt die Frequenzauflösung Δf , also der Abstand zwischen zwei benachbarten diskreten Frequenzwerten im Spektrum, von der Anzahl n_a der diskreten Abtastwerte und der Abtastfrequenz f_a ab und ergibt sich rechnerisch wie folgt [Werner2010, S. 95]:

$$\Delta f = \frac{f_a}{n_a} \tag{2-21}$$

Die Anzahl n_f der diskreten Frequenzwerte im Spektrum ergibt sich unmittelbar aus der Tatsache, dass das Spektrum von 0 Hz bis f_{max} in Schritten von Δf dargestellt wird bzw. wie folgt:

$$n_f = \frac{n_a}{2} + 1 \quad (2-22)$$

Einen bezüglich des Rechenalgorithmus optimierten Spezialfall der diskreten Fourier-Transformation stellt die FFT (Fast-Fourier-Transformation) dar, wobei die Länge des Eingangssignals eine Zweierpotenz sein muss [Werner2010, S. 96]. Dabei ist zu beachten, dass von einigen Programmen aus rechenalgorithmischen Gründen das Signal mit Nullen aufgefüllt wird (Zero-Padding), bis die Signallänge die nächste Zweierpotenz erreicht, sodass eine klassische FFT (und keine rechenintensivere DFT) durchgeführt werden kann.

Durch manuelles Zero-Padding, also durch manuelles Anhängen von n Nullen an das diskretisierte Zeitsignal, kann die Frequenzauflösung Δf reduziert werden, wobei die angehängten Nullen von dem DTF-Algorithmus als zusätzliche Messwerte interpretiert werden. Die durch Zero-Padding verfeinerte Frequenzauflösung Δf_{zp} ist:

$$\Delta f_{zp} = \frac{f_a}{n_a + n} \quad (2-23)$$

Da der aufgezeichnete Zeitausschnitt vom Rechenalgorithmus einer DFT so interpretiert wird, als wäre er unendlich oft periodisch wiederholt, wird durch Zero-Padding das resultierende Spektrum verändert, da nicht nur das eigentliche Signal sondern auch die angehängten Nullen periodisch wiederholt werden. Anzumerken ist jedoch, dass dem Signal durch Zero-Padding keine zusätzlichen Informationen an sich zugefügt werden sondern lediglich die Frequenzauflösung durch Interpolation verbessert wird ([Werner2010, S. 96] und [Thürmel1996, S. 56]). Dadurch kann z. B. die Lage von Peaks im Spektrum genauer bestimmt werden. Darauf und auf die Möglichkeit das diskrete Zeitsignal mittels sogenannter Fensterfunktionen zu gewichten oder vor einer DFT zu filtern, um bestimmte Frequenzanteile zu entfernen, wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, um den Umfang dieser Arbeit nicht zu sprengen.

Moderne Analysesoftware stellen Module und Funktionen zur Signalverarbeitung (Zero-Padding, Fensterung, Filterung) und Durchführung einer FFT (bzw. einer DFT) bereit, wodurch auf den mathematischen Hintergrund der FFT (bzw. der DFT) für diese Arbeit nicht tiefer eingegangen werden muss. Da in dieser Arbeit zahlreiche Zeitsignale mittels FFT (bzw. DFT) in ihre Frequenzanteile zerlegt werden, wird ein verstärktes Augenmerk auf die sinnvolle Anwendung, vor allem hinsichtlich der Einstellung relevanter Parameter in der Datenerfassung und Auswertung gelegt (siehe Kapitel 4.4).

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass eine im Spektrum dargestellte Schalldruckamplitude (bzw. die Amplitude des dazu proportionalen Spannungssignals) in dieser Arbeit einer für die Messdauer gemittelten Amplitude entspricht, da ausschließlich abklingende Zeitsignale mit kontinuierlich abnehmender Amplitude betrachtet werden.

Zusammengefasst lässt sich der Verarbeitungsprozess von der Schallaufzeichnung bis zur Darstellung eines Spektrums wie in Abb. 2-18 gezeigt darstellen.



Abb. 2-18: Darstellung der messtechnischen Erfassung von Luftschall und der Weiterverarbeitung des aufgezeichneten Signals

2.4 Akustische Resonanzanalyse

2.4.1 Prüfverfahren

Die *akustische Resonanzanalyse (AkRA)* „dient zur Erkennung von Inhomogenitäten und Fehlstellen (Risse, Gefügefehler, Einschlüsse, Abbrüche und Verbindungsgüte) in Prüfgegenständen“ [Hertlin2003, S. 3]. Sie wertet als volumenorientierte Prüfmethode u. a. charakteristische Resonanzfrequenzen, mit denen ein Bauteil nach einer Anregung (zum Beispiel einer Impulsanregung durch Hammerschlag) schwingt, reproduzierbar aus. Abhängig von der Geometrie und dem Werkstoff des zu untersuchenden Bauteils entstehen im angeregten Bauteil Wellen, die auf Grund von Interferenzen zu typischen Eigenschwingungsformen führen. Dabei sind in der Regel verschiedene Schwingungsformen mit unterschiedlichen Frequenzen überlagert. Solche mechanischen Vibrationen (Körperschall) werden vom angeregten Bauteil an die umgebende Luft übertragen und sind so für das menschliche Gehör als Schall wahrnehmbar, sofern sie im hörbaren Bereich (ca. 20 Hz bis ca. 20 kHz) liegen. Der

Schalldruck in der Luft wird im Rahmen der akustischen Resonanzanalyse mit Hilfe eines Mikrofons aufgezeichnet und schließlich mit einer Analysesoftware, z. B. hinsichtlich des Abklingverhaltens oder der Zusammensetzung aus verschiedenen Frequenzanteilen, ausgewertet. Die AkRA ist ein integrales Verfahren, das heißt Bauteile werden in ihrer Gesamtheit und nicht nur lokal bewertet [Hertlin2003]. In Abb. 2-19 ist das Prinzip der akustischen Resonanzanalyse schematisch dargestellt.

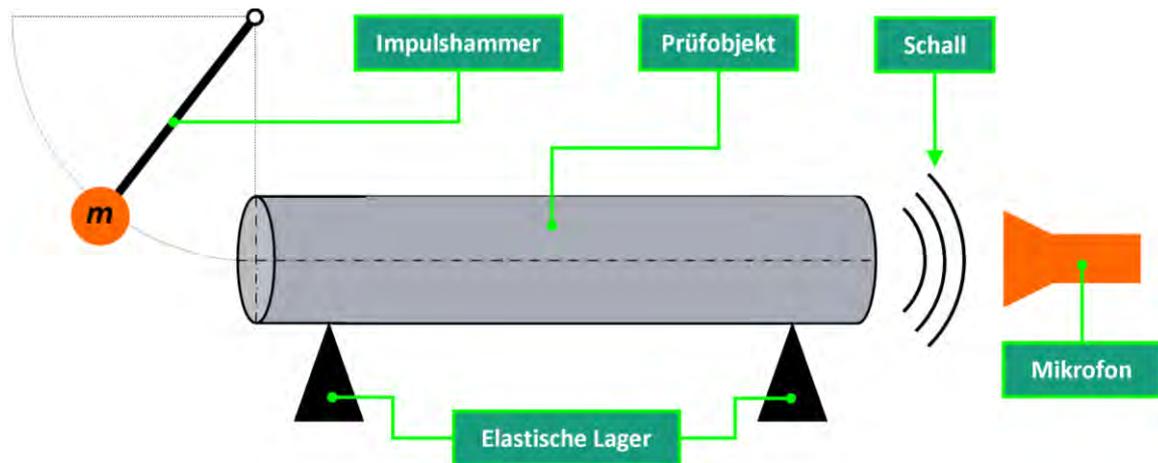


Abb. 2-19: Darstellung des Prinzips der akustischen Resonanzanalyse

2.4.2 Auswertung bei der AkRA

Aus einer akustischen Resonanzanalyse resultiert ein Resonanzspektrum, in welchem z. B. die Amplituden aller Schwingungskomponenten über der Frequenz aufgetragen sind. Durch geschickte Analyse der Spektren, der darin enthaltenen Peaks sowie der Zeitsignale können zahlreiche Informationen extrahiert werden. Zum Beispiel kann das Abklingverhalten des Zeitsignals mittels einer Regressionsrechnung mit exponentieller Ansatzfunktion bestimmt werden. Für die Darstellung des aufgezeichneten Signals im Frequenzraum sind zahlreiche Auswertungen umsetzbar. So können für jeden Peak in einem Spektrum Merkmale verschiedener Art bestimmt werden.

An dieser Stelle sind die für diese Arbeit relevanten Merkmalsarten beschrieben. Zwei wichtige Merkmalsarten, die Halbwertsbreite sowie die Güte von Peaks, seien dabei hervorgehoben. Die Halbwertsbreite beschreibt die Breite eines Resonanzpeaks bei halber Höhe, wobei die Halbwertsbreite in der Regel bei dem halben Wert einer Leistungsgröße, d. h. für diese Arbeit bei halber Schallintensität, bestimmt wird. Oftmals wird in Resonanzspektren die Schalldruckamplitude über der Frequenz aufgetragen. Da die Schallintensität proportional zum Quadrat des Schalldrucks ist (siehe Zusammenhang (2-13)), befindet sich die zur Breite bei halber Schalleistung (bzw. halbem Quadrat der Schalldruckamplitude) eines Peaks ent-

sprechende Breite bei $1/\sqrt{2}$ der maximalen Schalldruckamplitude [Cremer2010, S. 3 ff.]. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 2-20 verdeutlicht.

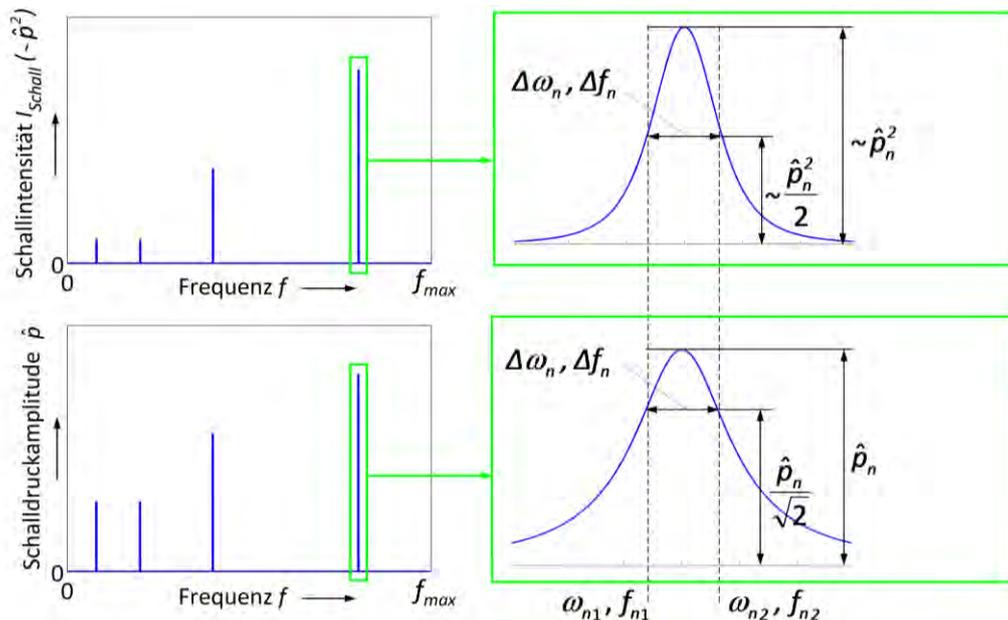


Abb. 2-20: Darstellung der Halbwertsbreite eines Resonanzpeaks in einem Leistungsspektrum und in einem Amplitudenspektrum

Zwischen der Halbwertsbreite (im Schallintensitätsspektrum bzw. im Spektrum der quadrierten Schalldruckamplitude) und einer (kleinen) frequenzabhängigen Abklingkonstante δ_n besteht folgender Zusammenhang für die über die Kreisfrequenz dargestellte Halbwertsbreite $\Delta\omega_n$ (in Anlehnung an [Cremer2010, S. 6]):

$$\Delta\omega_n = 2 \cdot \delta_n \text{ mit } \Delta\omega_n = \omega_{n2} - \omega_{n1} \quad (2-24)$$

Somit ergibt sich die Halbwertsbreite Δf_n (in Anlehnung an [Cremer2010, S. 6]) wie folgt:

$$\Delta f_n = \frac{\delta_n}{\pi} \text{ mit } \Delta\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot \Delta f_n \quad (2-25)$$

Die einheitslose Güte Q_n (auch Kreisgüte oder Gütefaktor), welche vor allem im Bereich der Elektrotechnik Anwendung findet, ist definiert als Resonanzfrequenz f_n normiert auf die zugehörige Halbwertsbreite Δf_n (in Anlehnung an [Weißgerber2005, S. 102]):

$$Q_n = \frac{f_n}{\Delta f_n} \quad (2-26)$$

Eine weitere Größe ist der Verlustfaktor η_n , der dem Kehrwert der Güte Q_n entspricht (in Anlehnung an [Cremer2010, S. 161]):

$$\eta_n = \frac{\Delta f_n}{f_n} = \frac{1}{Q_n} \quad (2-27)$$

Für Schwingungsvorgänge gibt der Verlustfaktor an, „wie groß die innerhalb einer Schwingungsperiode in Wärme umgewandelte (verloren gegangene) Energie im Verhältnis zur wiedergewinnbaren mechanischen Energie ist“ [Cremer2010, S. 148].

Bei der Analyse von Resonanzpeaks kann die Halbwertsbreite des Peaks (anstatt bei $1/\sqrt{2}$ der maximalen Schalldruckamplitude) bei halber Schalldruckamplitude als alternative Merkmalsart bestimmt werden. Für diesen Fall ist jedoch der gerade beschriebene Zusammenhang zwischen Halbwertsbreite und Abklingkonstante nicht mehr gültig. In Abb. 2-21 und Tab. 2-1 sind exemplarisch Merkmale dargestellt, welche für Peaks in einem Amplitudenspektrum ermittelt werden können.

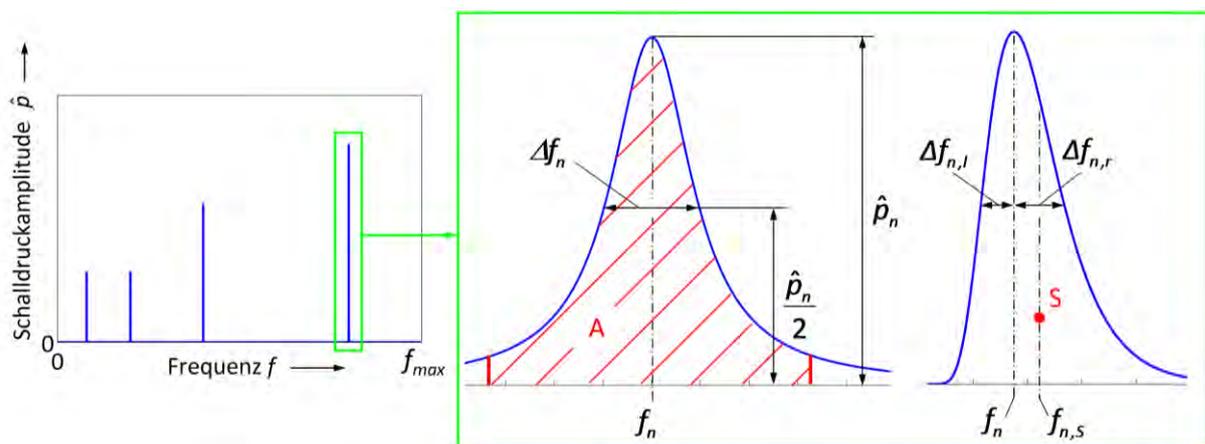


Abb. 2-21: Darstellung möglicher Merkmalsarten eines Peaks in einem Amplitudenspektrum

Tab. 2-1: Auflistung möglicher Merkmalsarten eines Peaks aus einem Amplitudenspektrum

Merkmalsart	Beschreibung
Resonanzfrequenz f_n	Resonanzfrequenz f_n , Lage f_n der Schalldruckamplitude \hat{p} eines Peaks
Schalldruckamplitude \hat{p}	Schalldruckamplitude \hat{p} eines Peaks. Maximale Höhe eines Peaks
Halbwertsbreite Δf_n	Breite Δf_n eines Peaks bei halber Schalldruckamplitude
Güte Q_n	Resonanzfrequenz f_n geteilt durch Halbwertsbreite Δf_n
Fläche A_n	Fläche zwischen Peak und einer unteren Begrenzung (z. B. Nulllinie), nach links und rechts durch festgelegte Schranken begrenzt
Flächenanteil	Anteil einer Fläche A_n unter einem Peak bezogen auf die Fläche unter dem gesamten Kurvenverlauf
Linke halbe Breite $\Delta f_{n,l}$	Breite $\Delta f_{n,l}$ eines Peaks von der linken Begrenzung bis zur Resonanzfrequenz f_n bei halber Schalldruckamplitude
Rechte halbe Breite $\Delta f_{n,r}$	Breite $\Delta f_{n,r}$ eines Peaks von der rechten Begrenzung bis zur Resonanzfrequenz f_n bei halber Schalldruckamplitude
Lage $f_{n,s}$ des Schwerpunkts	Lage $f_{n,s}$ des Flächenschwerpunkts S unter einem Peak

2.4.3 Mess- und Auswertemöglichkeit dämpfungsproportionaler Parameter

Da in dieser Arbeit die Breite von Peaks bei halber Amplitude bestimmt wird, sind exakte Beziehungen wie in Kapitel 2.4.2 zwischen den einzelnen Merkmalen eines Peaks beschrieben nicht mehr gegeben. Jedoch sind z. B. die Merkmale Halbwertsbreite Δf_n (bei halber Amplitude), Güte Q_n und frequenzabhängige Abklingkonstante δ_n proportional bzw. umgekehrt proportional zueinander:

$$\Delta f_n \sim \delta_n \sim \frac{1}{Q_n} \quad (2-28)$$

Die Bestimmung von Werten dieser Merkmale ist auf verschiedene Arten realisierbar. Die in dieser Arbeit genutzten Verfahren zur Bestimmung dieser Merkmale sind im Folgenden genannt. Mittels Regression mit exponentieller Ansatzfunktion und vorangegangener schmalbandiger Bandpassfilterung des Zeitsignals kann der frequenzabhängige Abklingkoeffizient δ_n bestimmt werden. Die Halbwertsbreite Δf_n eines Peaks kann unmittelbar aus dem Spektrum abgelesen werden (Peak-Amplitude Verfahren, [Möser2010, S. 523 f.]). Alternativ dazu kann die modale Dämpfung auch mit Hilfe des Circle-Fit Verfahrens bestimmt werden. Dazu werden die (komplexen) diskret abgestuften Elemente eines Peaks aus einer DFT in der komplexen Zahlenebene abgebildet und deren dortige Positionen ausgewertet [Möser2010, S. 524 ff.]. Die Güte Q_n ergibt sich formal aus dem Quotienten aus Resonanzfrequenz f_n und Halbwertsbreite Δf_n . Im Rahmen dieser Arbeit wird die Güte allerdings mit Hilfe der Software SonicTC bestimmt, welche das Circle-Fit Verfahren nutzt (siehe Kapitel 4.2.4.2). Die genaue Vorgehensweise dieser Software zur Bestimmung der Güte Q_n ist jedoch nicht bekannt.

2.5 Laservibrometrie

Laservibrometer (auch Laser-Doppler-Vibrometer, LDV) ermöglichen das berührungslose und damit rückwirkungsfreie Messen und Visualisieren von Schwingungsvorgängen. Sie eignen sich insbesondere zur Erfassung und Auswertung von Schwingungen, bei denen konventionelle Verfahren an ihre Grenzen stoßen, da entweder sehr hohe Frequenzen oder sehr kleine Amplituden vorliegen. LDV nutzen die durch den Doppler-Effekt hervorgerufene Frequenzverschiebung eines kohärenten, auf einen schwingenden Körper auftreffenden und von dort reflektierten Laserstrahls, um auf die Schwinggeschwindigkeit der Messoberfläche an der Messstelle in Richtung des Laserstrahls zu schließen. Die Bestimmung der Frequenzverschiebung erfolgt über einen interferometrischen Vergleich des Messstrahls mit einem Referenzstrahl. Systeme, bei denen die Laserstrahlen eines Laservibrometers mit Hilfe beweglicher Spiegel nacheinander mehrere anhand eines Videobildes festgelegte Messpunkte auf einer

Oberfläche abtasten, werden auch als Scanning-Vibrometer bezeichnet. Durch die Verwendung dreier gekoppelter und unter verschiedenen Winkeln angeordneter Laservibrometer lassen sich Schwingungskomponenten dreidimensional erfassen und getrennt sowie überlagert darstellen ([Polytec11] und [Möser2010, S. 436 f.]).

2.6 Eigenspannungen und Autofrettage

2.6.1 Eigenspannungen

„In einem abgeschlossenen System werden unter dem Begriff *Eigenspannungen* statisch wirksame mehrachsige Spannungen bezeichnet, die ohne äußere Kräfte und Momente existieren und sich im mechanischen Gleichgewicht befinden. Schrumpfspannungen oder Wärmespannungen, die durch ein Temperaturgefälle erzeugt werden, fallen somit nicht unter diese Definition“ [Kloos1979].

Eigenspannungen werden in der Literatur in Eigenspannungen I., II. und III. Art unterteilt, wobei diese Abgrenzung beschreibt, ob die Eigenspannungen makroskopische, mikroskopische oder submikroskopische Ausdehnungen annehmen. Lokale plastische Verformungen in einem Bauteil stellen – neben thermischem Verzug – eine der Ursachen von Eigenspannungen dar. Eigenspannungen überlagern sich mit Betriebsspannungen und beeinflussen so das Festigkeitsverhalten von Bauteilen [Kloos1979] (Abb. 2-22).

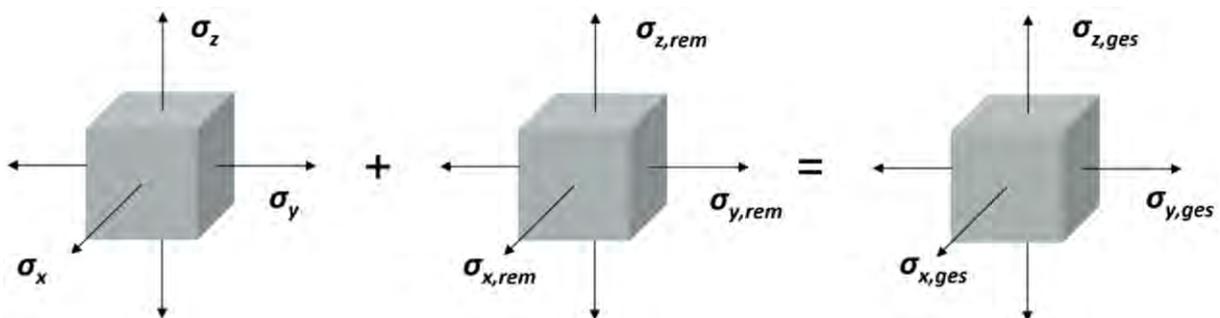


Abb. 2-22: Darstellung der Überlagerung von Eigenspannungen und Betriebsspannungen (in Anlehnung an: [Roos2008, S. 91])

Beispielsweise reduzieren remanente Druckspannungen in einem Bauteil unter Belastung induzierte Zugspannungen. Dies ist für die Festigkeit des Bauteils von Vorteil, da durch die Überlagerung niedrige Zug- oder Druckspannungen resultieren. Dieses Prinzip macht sich die Autofrettage zu Nutze.

2.6.2 Autofrettage

Der Begriff *Autofrettage* stammt aus dem Französischen und bedeutet so viel wie *selbst be-ringt*. Die Benennung des Verfahrens resultiert vermutlich daraus, dass bereits im Jahre 1913

in Frankreich Kanonenrohre zur Festigkeitssteigerung autofrettiert wurden. Damals wurden durch aufgeschrumpfte Ringe Druckeigenspannungen in den Kanonenrohren induziert [Leutwein2008, S. 13]. Die Autofrettage ist ein Verfahren zur Festigkeitssteigerung rohrförmiger Bauteile, welche im Betrieb vor allem hohen pulsierenden Innendrücken ausgesetzt sind. Auf Grund der schwankenden Druckverhältnisse können sich durch Bearbeitungsspuren und Diskontinuitäten an der Bauteilinnenseite Risse ausbilden. Durch Autofrettage eingebrachte Druckeigenspannungen im Innenbereich des Rohres wirken dem entgegen. Alternativ können aufwendige Dauerfestigkeitsversuche zur Detektion der Schwachstellen mit anschließender konstruktiver Beseitigung dieser oder teure zusätzliche Bearbeitungsschritte zur Verbesserung der Oberflächenqualität durchgeführt werden [Seeger1993, S. 1 f.]. Jedoch bietet die Autofrettage zusätzlich den Vorteil, dass die durch Innendruck im Rohr hervorgerufenen Betriebsspannungen reduziert werden, sodass das Bauteil nominell einen höheren Innendruck erträgt. Bei dickwandigen Rohren sind die auf Grund einer inneren Druckbelastung in der Wand auftretenden Spannungen nicht mehr wie bei dünnwandigen Hohlzylindern homogen, sondern weisen ein Gefälle von innen nach außen auf [Seeger1993, S. 1 f.]. Die maximalen Spannungskomponenten treten an der Bauteilinnenseite auf. Radiale und tangentielle Spannungskomponenten σ_r und σ_t eines statisch durch den Innendruck p_i belasteten Rohres können in Abhängigkeit des Außenradius r_a , des Innenradius r_i sowie der betrachteten Position r ($r_i \leq r \leq r_a$) berechnet werden [Seeger1993, S. 6].

$$\sigma_r = -p_i \cdot \frac{(r_a / r)^2 - 1}{(r_a / r_i)^2 - 1} \quad (2-29)$$

$$\sigma_t = p_i \cdot \frac{(r_a / r)^2 + 1}{(r_a / r_i)^2 - 1} \quad (2-30)$$

Der Vollständigkeit wegen sei erwähnt, dass in Abhängigkeit der Randbedingungen auch axiale Spannungsanteile auftreten können [Seeger1993, S. 6 f.].

Bei der Autofrettage wird ein rohrförmiges Bauteil einem einmaligen hohen Innendruck ausgesetzt, der Spannungen verursacht, die weit über der Streckgrenze des Materials liegen. Vor allem die so erzielten hohen tangentialen Zugspannungen bewirken, dass der Innenring des Bauteils elastisch-plastisch verformt wird. Die Streckgrenze im Außenbereich des Bauteils wird nicht erreicht, wodurch dort nur elastische Verformungen auftreten. Nach Entlastung ist der elastisch gedehnte Außenbereich bestrebt zurückzufedern und wirkt auf den plastisch umgeformten Innenring ein. Durch diese Wechselwirkung bilden sich tangentielle Druckspannungen im Innenring sowie Zugspannungen im Außenbereich des Rohres. So wird der Wert, der im Betrieb bei einer pulsierenden Innendruckbelastung auftretenden, für die

Lebensdauer des Bauteils maßgeblichen, Mittelspannung σ_m zu niedrigen Zugspannungswerten oder in den Druckspannungsbereich verschoben (Abb. 2-23, rechts). In einem vergleichbaren, nicht autofrettierten Bauteil herrscht dagegen eine hohe Zugschwellbelastung vor (Abb. 2-23, rechts). So können autofrettierte Bauteile höhere Betriebsbelastungen dauerhaft ertragen [Seeger1993, S. 1 ff.] (Abb. 2-23, links).

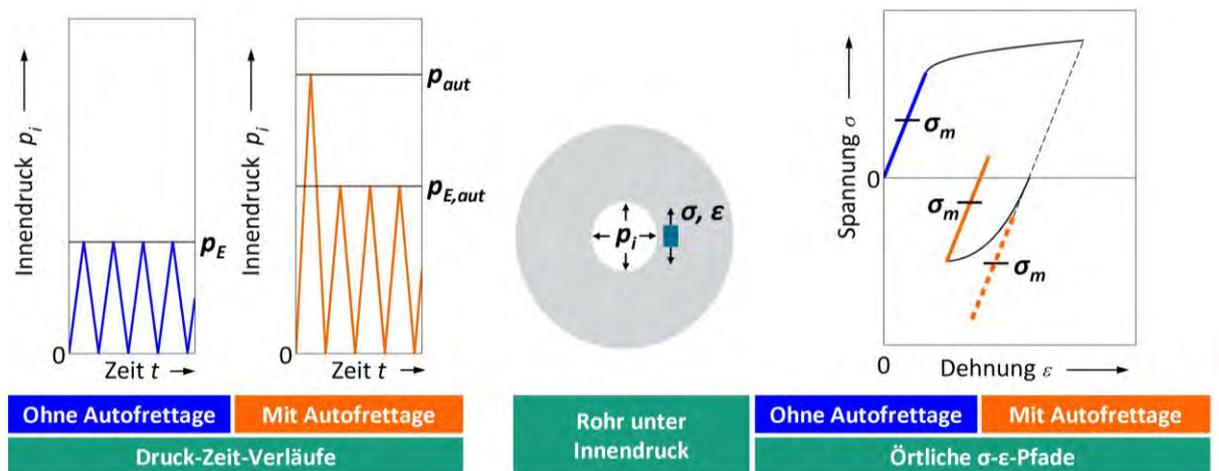


Abb. 2-23: Darstellung des Wirkungsprinzips der Autofrettage (in Anlehnung an: [Seeger1993, S. 2])

Für ein nicht autofrettiertes Rohr ergibt sich unter Belastung der in Abb. 2-24 (a) dargestellte qualitative Spannungsverlauf tangentialer Spannungen, welcher nach Zusammenhang (2-30) einfach bestimmt werden kann. Im autofrettierten, unbelasteten Rohr (Abb. 2-24 (b)) hingegen herrschen Eigenspannungen vor. Die Überlagerung dieser Eigenspannungen mit Lastspannungen ergibt einen Spannungsverlauf (Abb. 2-24 (c)), welcher deutlich geringere Spannungsspitzen im Zugbereich aufweist. Die genauen Eigenspannungsverhältnisse autofrettierte Geometrien können für einfache Bauteile unter Verwendung analytischer Methoden näherungsweise berechnet oder – vor allem für komplexe Bauteile – mit Hilfe von FEM simuliert werden.

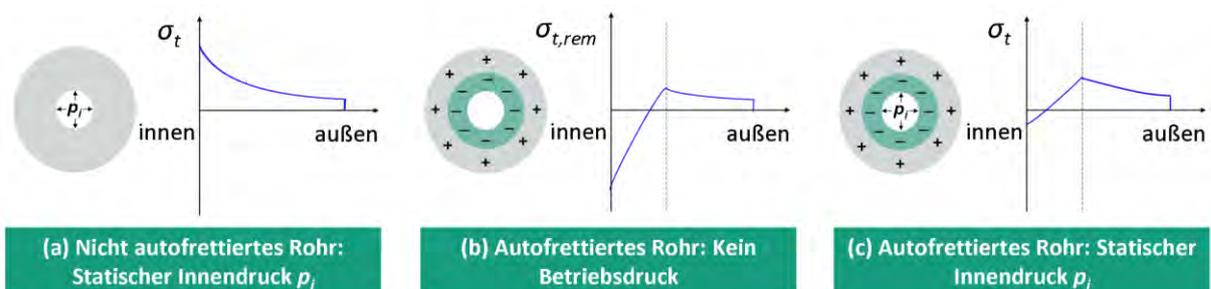


Abb. 2-24: Schematische Darstellung tangentialer Spannungen in einem durch Innendruck belasteten, nicht autofrettierten Rohr (a), in einem unbelasteten, autofrettierten Rohr (b) sowie in einem durch Innendruck belasteten, autofrettierten Rohr (c) (in Anlehnung an [Seeger1993, S. 7 f.]

2.7 Stand der Technik zum Nachweis von Eigenspannungen

Wegen des potentiell starken Einflusses von Eigenspannungen auf die mechanische Festigkeit, die Betriebsfestigkeit und auf weitere mechanisch-technologische Kennwerte von Bauteilen ist es seit geraumer Zeit ein Anliegen, die in einem Bauteil vorliegenden Eigenspannungen messtechnisch zu erfassen und zu quantifizieren. Wie bei den meisten anderen in der Technik genutzten Prüfmethoden, werden auch für den Eigenspannungsnachweis zerstörende sowie zerstörungsfreie Verfahren unterschieden.

Die älteste Methode zum Nachweis von Eigenspannungen besteht darin, ein Werkstück zu zerteilen, die auftretende Formänderung zu messen und darüber auf den Eigenspannungszustand vor der Zerstörung rückzuschließen [Sommerfeld1992, S. 322]. [Rohrbach1989] unterteilt Messverfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen in mechanisch-elektrische sowie zerstörungsfreie Methoden. Die mechanischen Verfahren beruhen dabei auf dem Zerlegen durch schichtweises Zerspanen, Einschneiden oder ähnliches, um so mit Hilfe der beobachteten Rückfederungen und Verformungen auf den Eigenspannungszustand zu schließen. Dabei erfolgt die Messung der geometrischen Veränderungen beispielsweise mit Dehnungsmessstreifen oder mit Hilfe optischer Messtechnik. Speziell für rotationssymmetrische Bauteile wie Rohre, Ringe, Wellen oder Stäbe können das Ausbohr- oder Abdrehverfahren eingesetzt werden. Diese beruhen auf dem Prinzip der Formänderung durch Materialabtrag, wobei jedoch anzumerken ist, dass die zu betrachtenden Bauteile in der Realität meist nicht die geforderte einfache Form aufweisen [Rohrbach1989, S. 70 ff.].

Das am meisten verbreitete mechanische Verfahren ist das 1932 entwickelte Bohrlochverfahren. Dessen Prinzip beruht auf „einer Teilentlastung der Oberfläche durch das Bohren eines Loches und damit auf Teilauslösung der dort vorhandenen Eigenspannungen“ [Rohrbach1989, S. 73]. Die auftretenden Dehnungen der Oberfläche werden in verschiedenen Richtungen – meist mit Dehnungsmessstreifen – bestimmt und ausgewertet. Da der Eigenspannungsverlauf in der Regel über die Werkstückdicke nicht konstant ist, kann mit diesem Verfahren nur ein „zweiachsiger Spannungszustand parallel zur Oberfläche als Mittelwert über die Bohrtiefe gemessen werden“ [Rohrbach1989, S. 74]. Als weitere zerstörende und mechanische Methode ist das Ringkernverfahren zu nennen, bei welchem ein Kronenfräser eine Ringnut in eine Bauteiloberfläche einarbeitet, wodurch der stehen bleibende Kern weitestgehend aus dem Kräftezusammenhang gelöst wird. Die Rückfederung des Kerns wird zur Bestimmung von Eigenspannungen genutzt [Rohrbach1989, S. 73 ff.].

Alternativ zu den mechanischen Verfahren, bei welchen die zu prüfenden Bauteile zumindest teilweise zerstört oder beschädigt werden, existieren einige zerstörungsfreie Methoden

zum Messen von Eigenspannungen. Eine Möglichkeit ist das Röntgenverfahren, welches submikroskopische Änderungen von Atomabständen und damit die mit Eigenspannungen korrelierten Gitterverzerrungen analysiert. Bei diesem Verfahren werden nur äußerst oberflächennahe Bereiche erfasst (Eindringtiefe ca. 20 μm), wobei durch schichtweises Abtragen der Oberfläche auch die Bestimmung tiefer liegender Eigenspannungen möglich ist [Rohrbach1989, S. 76]. Physikalisch nutzt dieses Verfahren die Beugung von Röntgenstrahlen am Kristallgitter. Aus den auftretenden Interferenzen kann auf die Netzebenenabstände des durch die Eigenspannungen verzerrten Gitters geschlossen werden [Häfele2003, S. 267].

Weiterhin können Eigenspannungen in ferromagnetischen Werkstoffen mittels magnetischer Kenngrößen zerstörungsfrei abgeschätzt werden. Mit dem 3MA-Verfahren (**M**ikromagnetische **M**ultiparameter **M**ikrostruktur- und **S**pannungs-**A**nalyse) des IZFP ist u. a. auch die zerstörungsfreie Ermittlung von Eigenspannungen möglich. Das Prinzip dieses Verfahrens beruht im Wesentlichen auf dem zyklischen Ummagnetisieren eines Werkstoffs mit Hilfe eines starken Wechsellagemagnetfelds. Dadurch kommt es zur Umorientierung von Bereichen gleichgerichteter Magnetisierung, den sogenannten Weiß'schen Bezirken. Diese Umorientierung wird von der Gitterstruktur des Gefüges beeinflusst und kann messtechnisch erfasst werden. Das 3MA-Verfahren nutzt momentan bis zu 41 mikromagnetische Kenngrößen aus vier verschiedenen Prüfmethode, um daraus mit Hilfe eines im Rahmen einer Kalibrierung empirisch bestimmten Zusammenhangs auf Werkstoffeigenschaften rückzuschließen. Für jeden Anwendungsfall ist eine erneute Kalibrierung des Systems erforderlich, da die betrachteten magnetischen Größen nicht nur von Eigenspannungen sondern auch von weiteren Parametern wie Gefüge und Textur abhängen. Mit diesem Verfahren können lokal oberflächennahe Eigenspannungen bestimmt werden ([Szielasko2009] und [3MA2007]).

Zuletzt sei auf den Eigenspannungsnachweis mittels Ultraschall eingegangen, wobei an dieser Stelle keine vollständige Darstellung der historischen Entwicklung präsentiert werden soll. Diese findet sich in [Schneider1999]. Zum Spannungsnachweis mit Hilfe der Ultraschalltechnik wird am IZFP in Saarbrücken seit 1979 geforscht. Die Eigenspannungsmessung mittels Ultraschall macht sich den akusto-elastischen Effekt zunutze, welcher die Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen in Abhängigkeit des Dehnungszustands beschreibt (Abb. 2-25). Da die Schallgeschwindigkeit außer von der Dehnung und dem damit verbundenen Spannungszustand noch von weiteren Parametern wie Textur und Bauteiltemperatur abhängt, ist die Problemstellung der Eigenspannungsmessung mit Ultraschall äußerst komplex. Im Bereich der Ultraschallprüftechnik sowie speziell der Spannungsmessung mit Ultraschall wurden in den vergangenen Jahrzehnten große Fortschritte erreicht [Schneider1999, S. 1 ff.]. Wegen der Analogie der zugrunde liegenden Physik zwischen der akustischen Reso-

nanzanalyse sowie dem Ultraschallverfahren, welche beide auf der Ausbreitung fortschreitender Wellen beruhen, ist zu erwarten, dass auch die akustische Resonanzanalyse zur Detektion von Eigenspannungen nutzbar ist. Daher sei im Folgenden kurz auf den für den Eigenspannungsnachweis mittels Ultraschall wichtigen akusto-elastischen Effekt eingegangen. Die detektierbaren, durch den akusto-elastischen Effekt verursachten Änderungen der Schallgeschwindigkeit liegen im Promillebereich und müssen daher sehr genau detektiert werden. Die Stärke des akusto-elastischen Effekts ist sowohl von der Art der Ultraschallwelle (Longitudinal- oder Transversalwelle) sowie deren Ausbreitungs- und Schwingungsrichtung in Bezug auf eine z. B. eindimensionale Hauptspannung abhängig. Selbstverständlich ist auch die Größenordnung der Spannung relevant (Abb. 2-25).

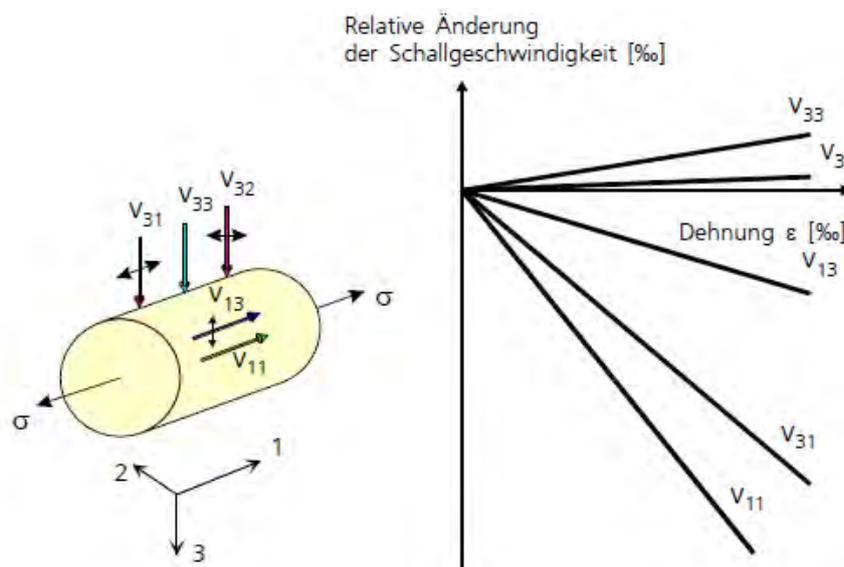


Abb. 2-25: Schematische Darstellung des akusto-elastischen Effekts: Relative Änderung der Schallgeschwindigkeit mit der elastischen Zugdehnung eines metallischen Probekörpers [Schneider1999, S. 25]

Weiterhin finden sich in der Literatur Arbeiten, welche einen Zusammenhang zwischen dem Eigenspannungszustand eines Körpers und seiner Dämpfungsfähigkeit beschreiben. So stellen z. B. Singh et al. in Messungen an kugelgestrahltem Proben aus austenitischem, nichtrostendem Stahl fest, dass das Dämpfungsverhalten der Proben von den durch das Kugelstrahlen verursachten plastischen Umformungen und den dadurch induzierten Druckeigenspannungen abhängt [Singh2011].

Zuletzt sei erwähnt, dass der Kooperationspartner, die Robert Bosch GmbH, bereits im Jahre 2007 ein Patent unter dem Namen *Vorrichtung und Verfahren zum Nachweis von Eigenspannungen eines Bauteils* angemeldet hat. In der zugehörigen Patentschrift wird erklärt, dass die wesentliche Idee des Patents auf der Analyse des Abklingverhaltens von Eigenschwingungen impulsangeregter Bauteile beruht [PatentschriftBosch].

2.8 Statistische Grundlagen

2.8.1 Begriffe und Zusammenhänge

Statistischer Test / Hypothesentest: „Ein statistischer Test dient der Überprüfung von Hypothesen durch die Beobachtung von Stichproben“ [Rueger2002, S. 5]. Es existieren unterschiedliche Tests, mit denen verschiedenste Arten von Hypothesen überprüft werden können, wobei die Tests an unterschiedliche Voraussetzungen gekoppelt sind. In der Regel wird geprüft, ob eine aufgestellte Nullhypothese H_0 beibehalten oder zugunsten einer Alternativhypothese H_1 verworfen werden sollte.

Fehler 1. Art: „Ein Fehler 1. Art liegt vor, wenn eine an sich richtige Nullhypothese H_0 abgelehnt wird. Die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler 1. Art wird mit α bezeichnet“ [Papula2001, S. 544]. Ein Fehler 1. Art bezeichnet also das falsche Abweisen der Nullhypothese.

Fehler 2. Art: „Ein Fehler 2. Art wird begangen, wenn eine an sich falsche Nullhypothese H_0 beibehalten, d. h. nicht abgelehnt wird. Die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler 2. Art wird mit β bezeichnet“ [Papula2001, S. 544]. Ein Fehler 2. Art bezeichnet also das falsche Beibehalten der Nullhypothese.

Signifikanzniveau: Das Signifikanzniveau α ist die maximal zulässige Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Fehler 1. Art bei einem statistischen Test begangen wird (in Anlehnung an [Papula2001, S. 540]).

Empirisches Signifikanzniveau / p-Wert: Das empirische Signifikanzniveau p stellt das Signifikanzniveau bei einem statistischen Test dar, „bei dem die Nullhypothese gerade noch abgelehnt wird“ [JAN05, S. 144 f.]. Ist dieses empirische Signifikanzniveau (auch p-Wert) größer als das gewählte Signifikanzniveau α wird die Nullhypothese beibehalten, bei kleinerem p-Wert im Vergleich zum gewählten Signifikanzniveau wird die Nullhypothese verworfen.

Wahl des Signifikanzniveaus α : Je nachdem welche Fehlerart schwerer wiegt, soll ein entsprechender Wert für das Signifikanzniveau α gewählt werden [Papula2001, S. 548]:

- Ist ein irrtümliches Ablehnen einer richtigen Nullhypothese mit schwerwiegenden Folgen verbunden, so sollte ein niedriger Wert für α gewählt werden.
- Ist ein irrtümliches Annehmen einer falschen Nullhypothese mit schwerwiegenden Folgen verbunden, so sollte ein höherer Wert für α gewählt werden.

Ein statistischer Test liefert die beste Aussagekraft, wenn die Nullhypothese abgelehnt und damit die Alternativhypothese angenommen werden kann. Denn dann wurde entweder die richtige Entscheidung getroffen oder es liegt ein Fehler 1. Art vor, dessen maximale Wahrscheinlichkeit α bekannt ist, da diese zuvor als Signifikanzniveau festgelegt wurde. Ist ein

Testresultat allerdings nicht signifikant, also darf die Nullhypothese nicht abgelehnt werden, kann daraus nicht direkt geschlossen werden, dass die Nullhypothese gilt, da in der Regel keine Informationen über die Wahrscheinlichkeit β für einen Fehler 2. Art vorliegen. Um die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler 2. Art zu minimieren, wird ein großer Wert für das Signifikanzniveau α gewählt. Bei zusätzlich großem Stichprobenumfang, kann so der Fehler 2. Art minimiert werden [JANN2005, S. 144 f.]. Der Zusammenhang zwischen den beiden möglichen Fehlerarten bei einem statistischen Test ist in Tab. 2-2 verdeutlicht.

Tab. 2-2: Übersicht über mögliche Fehlerarten und Fehlerwahrscheinlichkeiten P bei Testentscheidungen [Schlittgen2003, S. 331]

		Unbekannte Realität	
		$H = H_0$	$H = H_1$
Entscheidung für	$H = H_0$	Richtige Entscheidung $P = 1 - \alpha$	Fehler 2. Art $P = \beta$
	$H = H_1$	Fehler 1. Art $P = \alpha$	Richtige Entscheidung $P = 1 - \beta$

2.8.2 Zwei-Stichproben-t-Test für ungepaarte Stichproben

Der folgende Zwei-Stichproben-t-Test ist in Anlehnung an [Schlittgen2003, S. 345 ff.] entnommen. Zwei-Stichproben-t-Test dienen dazu, Mittelwertsunterschiede zwischen zwei Verteilungen zu untersuchen. Voraussetzung für einen Zwei-Stichproben-t-Test ist eine Normalverteilung der Stichprobenwerte x_1, \dots, x_{n1} sowie y_1, \dots, y_{n2} . Grundsätzlich ist aber festzuhalten, dass parametrische t-Tests in der Regel robust gegen die Verletzung der Normalverteilungsvoraussetzung sind (siehe z. B. [Büning1991] oder [Sachs2006]). Die Zufallsgrößen X und Y müssen unabhängig und die Varianzen beider Zufallsgrößen gleich groß sein. Der im Folgenden aufgeführte Test gilt für Stichproben mit geringen Umfängen (kleiner gleich jeweils 20 Stichprobenwerte). Mit diesem Test wird geprüft, ob die unbekanntes Mittelwerte μ_x und μ_y der Zufallsgrößen X und Y als identisch oder unterschiedlich anzunehmen sind:

$$H_0 : \mu_x = \mu_y \text{ gegen } H_1 : \mu_x \neq \mu_y \tag{2-31}$$

Dazu dient folgende Testgröße \hat{t} , welche sich aus den Stichprobenmittelwerten \bar{x} und \bar{y} , den aus den Stichproben bestimmten Varianzen s_x^2 und s_y^2 sowie den Stichprobenumfängen n_x und n_y errechnet:

$$\hat{t} = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{s_x^2}{n_x} + \frac{s_y^2}{n_y}}} \text{ mit } s^2 = \frac{(n_x - 1) \cdot s_x^2 + (n_y - 1) \cdot s_y^2}{n_x + n_y - 2} \tag{2-32}$$

Die nach Zusammenhang (2-32) errechnete Testgröße \hat{t} wird mit einem kritischen Wert $t_{kritisch}$ verglichen. Der kritische Wert $t_{kritisch}$ entspricht dem folgenden Quantil der studentischen t-Verteilung:

$$t_{kritisch} = t_{df, 1-\alpha/2} \quad (2-33)$$

Zur Bestimmung dieses Wertes wird die Anzahl df der Freiheitsgrade benötigt, die sich aus den Stichprobenumfängen n_x und n_y ergibt:

$$df = n_x + n_y - 2 \quad (2-34)$$

Abschließend wird die nach Zusammenhang (2-32) errechnete Testgröße mit dem kritischen Wert nach Zusammenhang (2-33) verglichen. Für den Fall, dass der Betrag der Testgröße \hat{t} kleiner oder gleich dem kritischen Wert $t_{kritisch}$ ist, kann die Nullhypothese H_0 auf Basis der vorhandenen Stichprobenwerte und des gewählten Signifikanzniveaus α nicht abgelehnt werden. Ist der Betrag der Testgröße \hat{t} jedoch größer als der kritische Wert $t_{kritisch}$, so wird die Nullhypothese H_0 zugunsten der Alternativhypothese H_1 verworfen.

$$|\hat{t}| \leq t_{df, 1-\alpha/2} \rightarrow \text{Beibehalten der Nullhypothese } H_0 \quad (2-35)$$

$$|\hat{t}| > t_{df, 1-\alpha/2} \rightarrow \text{Ablehnen der Nullhypothese } H_0$$

3 Akustische Resonanzanalyse vereinfachter Testkörper

Die ersten Untersuchungen dieser Arbeit befassen sich mit akustischer Resonanzanalyse an einem stabförmigen Aluminiumkörper. Das Ziel ist es, die Auswirkungen ausgewählter und verschieden eingestellter Parameter im Versuchsaufbau auf die Ausbildung von Körperschall und den bei der AkRA verarbeiteten Luftschall empirisch sowie theoretisch zu untersuchen, um Rückschlüsse für die Untersuchungen an Common-Rails zu ziehen (Kapitel 4 und 5).

3.1 Einfluss auf Ergebnisse einer akustischen Resonanzanalyse

In Abb. 3-1 sind Parameter aufgezeigt, welche potentiell einen Einfluss auf ein Ergebnis einer akustischen Resonanzanalyse haben. Die Einflussgrößen sind in sechs Kategorien unterteilt. Die Kategorie *Prüfsystem* ist für diese Master-Thesis fest vorgegeben und die verwendeten Komponenten sind in Kapitel 4.2.2 beschrieben. Auch alle Parameter, welche der Kategorie *Bauteil* zugeordnet sind, sind für das gesamte Kooperationsprojekt, abgesehen von zufälligen Abweichungen zwischen verschiedenen Bauteilen, unveränderlich.

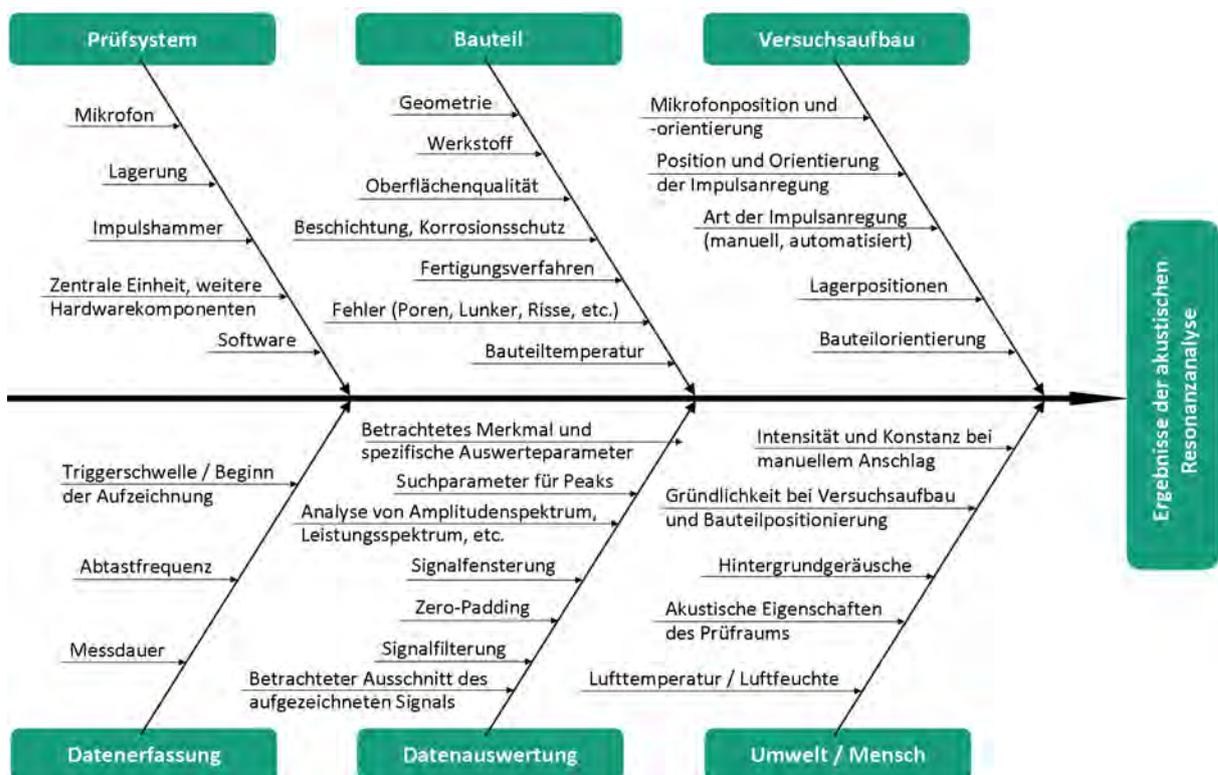


Abb. 3-1: Darstellung potentieller Einflüsse auf das Ergebnis einer akustischen Resonanzanalyse

Die in Abb. 3-1 aufgelisteten Parameter können für diese Arbeit weiterhin nach der Auswirkung, die eine Variation eines Parameters auf das Ergebnis einer Resonanzanalyse hat, unterteilt werden. Gewisse Parameter können einen Einfluss auf die Detektierbarkeit von Re-

sonanzpeaks eines Bauteils haben, z. B. falls die Amplituden bestimmter Peaks auf Grund des Versuchsaufbaus so gering sind, dass diese Peaks im Spektrum nicht erkannt werden und so für diese keine Auswertungen durchführbar sind. Weiterhin führt die Variation von bestimmten Parametern möglicherweise dazu, dass die Wertebereiche der zum Autofrettagenachweis geeigneten Merkmale verschoben werden oder dass sogar die Eignung eines Merkmals zum Autofrettagenachweis vom Versuchsaufbau abhängt.

Ergänzend zu den in Abb. 3-1 aufgelisteten Einflussgrößen sind Störeinflüsse zu erwähnen, welche durch zufällige oder systematische Abweichung der eingestellten Parameter von den gewünschten Parametern hervorgerufen werden. Dazu gehören beispielsweise tolerierte Abweichungen in der Werkstoffzusammensetzung oder auch Geometrieabweichungen eines Bauteils innerhalb der Fertigungstoleranzen. Auch makroskopische Fehler im Bauteil, Abweichungen bei der Positionierung der Prüfsystemkomponenten oder schwankende Umgebungsbedingungen sind (zufällige oder auch systematische) Störgrößen. Systematische Störgrößen sind v. a. auch zeitabhängige, kontinuierliche Veränderungen des Prüfsystems (Alterung, Verschleiß) oder Bauteilveränderungen auf Grund abdriftender Fertigungsprozesse.

Bei der Analyse der Auswirkungen einzelner Parameter auf die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse ist grundsätzlich immer zu berücksichtigen, dass zwei oder mehrere Parameter abhängig voneinander sein können. Dadurch kann eine gleichzeitige Variation mehrerer Parameter zu einem anderen Ergebnis führen, als auf Grund der Summe der einzelnen Einflüsse der Parameter zu erwarten wäre.

Unter Berücksichtigung der Anzahl der frei einstellbaren Parameter ergeben sich, selbst unter Wahl sinnvoller Abstufungen (z. B. jeweils drei oder fünf Stufen je Parameter), leicht mehrere tausend verschiedene Parameterkombinationen, die Einflüsse auf die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse nehmen können. Dadurch wird ersichtlich, dass ein vollständiger Versuchsplan – welcher alle möglichen Parameterkombinationen berücksichtigt – zum Finden eines zum Autofrettagenachweis optimalen Versuchsaufbaus, selbst unter Ausschluss von Störgrößen, nicht durchführbar ist.

In den folgenden Unterkapiteln (Kapitel 3.2 bis 3.5) werden ausgewählte Parameter – den Versuchsaufbau betreffend – variiert. Dabei werden exemplarisch die Auswirkungen verschiedener Versuchsaufbauten auf die Detektionsmöglichkeit von Resonanzpeaks eines stabförmigen, geometrisch einfachen Testkörpers aus einer Aluminiumlegierung untersucht. Die Ergebnisse dieser Voruntersuchungen werden in Kapitel 3.6 diskutiert. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden für die Untersuchungen mit den relevanten Common-Rails (siehe Kapitel 4 und 5) berücksichtigt.

3.2 Variation des Mikrofonabstandes

Mittels eines Mikrofons kann der durch Schallwellen verursachte Schalldruck detektiert, aufgezeichnet und ausgewertet werden. Je nach Abstand des Mikrofons zur Schallquelle und unter Berücksichtigung der Dimension der Schallquelle sowie der Wellenlänge des von der Quelle ausgesandten Schalls, befindet sich der Schallaufnehmer im sogenannten *Nahfeld*- oder *Fernfeldbereich*. Das Nahfeld (auch Fresnel-Zone) ist durch den unregelmäßigen Wechsel zwischen Orten konstruktiver und destruktiver Interferenz gekennzeichnet, wodurch sich Minima und Maxima der Schalldruckamplitude an bestimmten Orten ergeben. Das Fernfeld (auch Fraunhofer-Zone) hingegen stellt ein relativ homogenes Schallfeld dar, in welchem die Schalldruckamplitude kontinuierlich und rasch mit wachsender Entfernung zur Schallquelle abnimmt [Kino1987, S. 154 ff.].

3.2.1 Versuchsplanung

Exemplarisch wurde im Folgenden der Einfluss des Versuchsparameters *Mikrofonabstand* zum Testkörper bei axialer Impulsanregung näher betrachtet. Dazu erfolgten zunächst theoretische Ausarbeitungen zur Berechnung der Schalldruckamplitude in Abhängigkeit des verwendeten Testkörpers, dessen Resonanzfrequenzen sowie der Mikrofonposition. Die theoretischen Berechnungen wurden im Anschluss daran experimentell sowie mit Hilfe von FEM-Simulationen überprüft. Die Untersuchungen erfolgten anhand eines zylindrischen Stabes (relevante Kennwerte siehe Tab. 3-1), der aus einer Aluminiumlegierung gefertigt ist und gilt für longitudinale Eigenschwingungen und dem daraus resultierenden, von der Stabstirnseite abgestrahlten, Schall.

Tab. 3-1: Abmessungen und Werkstoffeigenschaften des verwendeten zylindrischen Testkörpers (Quelle: [Dräger2008])

Parameter	Wert
Durchmesser d	$d = 29 \text{ mm}$
Radius a	$a = 14,5 \text{ mm}$
Länge l_s	$l_s = 300 \text{ mm}$
Elastizitätsmodul E	$E = 7,27954 \cdot 10^4 \text{ N / mm}^2$
Querkontraktionszahl μ	$\mu = 0,33881$
Dichte ρ	$\rho = 2,81586 \cdot 10^{-6} \text{ kg / mm}^3$

Die experimentelle Überprüfung der Ergebnisse der theoretischen Berechnungen erfolgte mit dem in Abb. 3-2 dargestellten Versuchsaufbau, wobei das Mikrofon auf einer mit einer Stellschraube positionierbaren Lineareinheit befestigt war. Die Mikrofonachse war deckungsgleich mit der Stabachse, sodass mit Hilfe dieses Aufbaus der Schalldruck entlang der

Stabachse in Abhängigkeit des Mikrofonabstandes gemessen werden konnte. Zunächst wurde die Mikrofonspitze auf die Stabstirnseite gefahren und anschließend in kleinen Schritten entlang der Testkörperachse entfernt. Dabei wurden mittels akustischer Resonanzanalyse Resonanzspektren in fein abgestuften Abständen zwischen dem Mikrofon und der Stirnseite des Testkörpers ermittelt. Da im Nahfeld Interferenzerscheinungen zu erwarten waren, wurde der Mikrofonabstand nicht gleichmäßig variiert, sondern wurde in Stabnähe feiner abgestuft. Die verwendeten Schrittweiten sind in Tab. 3-2 angegeben.

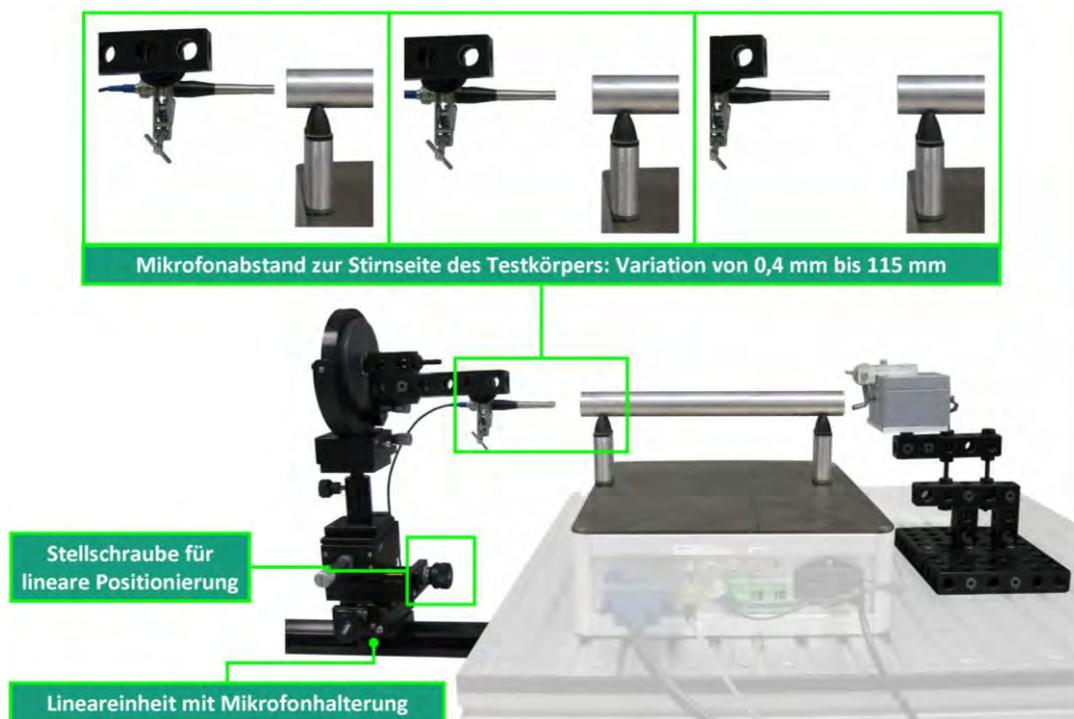


Abb. 3-2: Bearbeitete Fotoaufnahme des Versuchsaufbaus zur experimentellen Überprüfung der Auswirkungen des Mikrofonabstands auf Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse

Tab. 3-2: Schrittweiten der Entfernungen zwischen Mikrofon und Stirnseite des Testkörpers

Mikrofonabstand in mm		Schrittweite in mm
von	bis	
0,4	10,0	0,2
10,0	20,0	0,5
20,0	40,0	1,0
40,0	80,0	2,0
80,0	115,0	5,0

Da die Impulsanregung des Testkörpers – trotz elektrischem Impulshammer – nicht als konstant angesehen werden kann, wurde der Testkörper jeweils 10-mal angeregt und der abgestrahlte Schall messtechnisch erfasst. So konnten mittels DFT ebenfalls 10 Resonanzspektren für jeden Mikrofonabstand ermittelt werden, aus welchen schließlich das arithmetische Mit-

tel gebildet wurde. Sowohl die Aufzeichnung der Zeitsignale als auch die DFT sowie die Mittelung der Spektren erfolgte mit der Software *SonicTC* des Prüfsystems zur akustischen Resonanzanalyse (siehe Kapitel 4.2.2 und 4.2.4.2).

Die zugehörigen FEM-Simulationen wurden mit der Software *COMSOL Multiphysics* durchgeführt. Die dabei verwendeten Materialkonstanten sind identisch mit denen der analytischen Berechnungen. Auf die Darstellung weiterer Details zur Simulation (z. B. die Vernetzung und weitere Randbedingungen) wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

3.2.2 Theoretische Betrachtung

Die Übergangsentfernung zwischen Nah- und Fernfeld kann analytisch berechnet werden. Eine Stirnseite des Bauteils wurde in der folgenden Herleitung als perfekter, ebener Kolbenschwinger betrachtet (Abb. 3-3). Durch Schwingen des Stabes mit einer seiner Resonanzfrequenzen wird durch die Bewegung der Stirnseite in z-Richtung die umgebende Luft zum Mitschwingen angeregt.

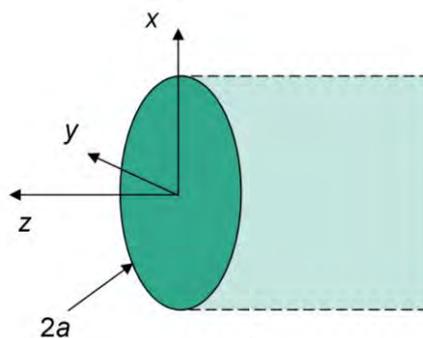


Abb. 3-3: Darstellung der Stirnseite eines Stabes als konphas schwingende Kreismembran

Zur vollständigen Beschreibung von Schallfeldern genügt das Geschwindigkeitspotential oder auch Schnellepotential ϕ [Lerch2009, S. 18]. Daraus können unmittelbar relevante Größen wie Schalldruck oder Schallschnelle abgeleitet werden. So gilt für den hier relevanten Schalldruck p folgender Zusammenhang unter Berücksichtigung des Schnellepotentials ϕ und der Dichte ρ_0 des betrachteten Mediums (in Anlehnung an [Lerch2009, S. 18 ff.]):

$$p = \rho_0 \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = j\omega\rho_0\phi \tag{3-1}$$

Nach [Kino1987, S. 164] gilt für das Geschwindigkeitspotential ϕ im Abstand z auf der Mittelsenkrechten einer ebenen, in z -Richtung konphas schwingenden Kreismembran mit dem Radius a sowie der Schnelleamplituden \hat{v} in Abhängigkeit der Kreiswellenzahl k :

$$\phi = \frac{\hat{v}}{jk} \left[e^{-jk\sqrt{a^2+z^2}} - e^{-jkz} \right] \tag{3-2}$$

Im Zusammenhang mit Gleichung (3-1) folgt für den (komplexen) Schalldruck p :

$$p = \rho_0 \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} = j\omega\rho_0\phi = \omega\rho_0 \frac{\hat{v}}{k} \left[e^{-jk\sqrt{a^2+z^2}} - e^{-jkz} \right] \quad (3-3)$$

Möser leitet eine zum selben Ergebnis führende analytische Formel – in abgewandelter Schreibweise – zur Berechnung des Schalldrucks entlang der Mittelsenkrechten einer schwingenden Kreismembran her. Der komplexe Schalldruck p für den Abstand z entlang der Mittelsenkrechten der Kreismembran ergibt sich demnach aus der Dichte ρ_0 des umgebenden Mediums, der entsprechenden Schallgeschwindigkeit c , dem Radius a der Membran sowie der Wellenlänge λ der ausgesandten Schallwellen [Möser2009, S. 115 f.]:

$$p = \rho_0 \cdot c \cdot \hat{v} \cdot e^{-j2\pi/\lambda} \left(1 - e^{-j2\pi(\sqrt{a^2-z^2}-z)/\lambda} \right) \quad (3-4)$$

An dieser Stelle ist anzumerken, dass der Schalldruck p für jeden Ort z zeitlich abhängig ist, was in obigen Zusammenhängen (3-3) und (3-4) nicht berücksichtigt wurde. Vielmehr entsprechen die Beträge der komplexen Schalldrücke p nach beiden Formeln der Schalldruckamplitude \hat{p} . Um Verwechslungen zu vermeiden sollte Zusammenhang (3-4) wie folgt dargestellt werden:

$$\hat{p} = |p| = \left| \rho_0 \cdot c \cdot \hat{v} \cdot e^{-j2\pi/\lambda} \left(1 - e^{-j2\pi(\sqrt{a^2-z^2}-z)/\lambda} \right) \right| \quad (3-5)$$

Nach Gleichung (3-6) kann die Amplitude \hat{p} des Schalldrucks entlang der z -Achse offensichtlich Nullstellen an den Orten z_0 aufweisen [Möser2010, S. 117]:

$$\frac{z_0}{\lambda} = \frac{(a/\lambda)^2 - n^2}{2 \cdot n} \rightarrow z_0 = \frac{(a/\lambda)^2 - n^2}{2 \cdot n} \cdot \lambda \quad (3-6)$$

Mit diesem Zusammenhang können die Nullstellen der Schalldruckamplitude im Nahfeldbereich durch Einsetzen von $n = 1, 2, \dots$ – solange das Verhältnis z_0/λ (bzw. solange z_0) nicht negativ ist – berechnet werden. Kino leitet aus Zusammenhang (3-2) die Fernfeldnäherung (Fresnel-Näherung) her und definiert einen normalisierten Parameter, den Fresnel-Parameter S , zur Beschreibung von Nahfeld- und Fernfeld [Kino1987, S. 165]:

$$S = \frac{z \cdot \lambda}{a^2} \quad (3-7)$$

Der Bereich, für den $S \gg 1$ (oder $z \gg a^2/\lambda$) gilt, stellt dabei den Fernfeldbereich dar, $S < 1$ beschreibt das Nahfeld. Dieselbe Bedingung für den Fernfeldabstand auf der Mittelsenkrechten ist in [Lerch2009, S. 160] und [Möser2010, S. 117] angegeben. Für den Wert $S = 1$ (Fres-

nel-Limit) liegt das letzte Maximum der Schalldruckamplitude entlang der z-Achse vor, wodurch der Übergangsbereich zwischen Nahfeld und Fernfeld gekennzeichnet ist [Kino1987, S. 165 f.]. Der Abstand dieses letzten Minimums der Schalldruckamplitude wird auch als Nahfeldlänge N bezeichnet. Aus Gleichung (3-7) lässt sich durch Umformen der Abstand $z = N$ berechnen, für den gerade der Grenzfall $S = 1$ gilt [Kino1987, S. 165]:

$$z = \frac{S \cdot a^2}{\lambda} = \frac{a^2}{\lambda} = N \quad (3-8)$$

Die Fresnel-Näherung nach Zusammenhang (3-8) gilt nur, falls der Radius a der betrachteten Kolbenmembran groß gegenüber der Wellenlänge λ des ausgesandten Schalls ist [Kino1987, S. 165], was in der weiteren Betrachtung nicht immer gegeben ist:

$$k \cdot a = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \gg 1 \quad (3-9)$$

Allgemein errechnet sich der Ort z des letzten Maximums der Schalldruckamplituden entlang der Mittelsenkrechten und damit die Nahfeldlänge N wie folgt (in Anlehnung an [Krautkrämer1986, S. 62]):

$$z = \frac{d^2 - \lambda^2}{4\lambda} = \frac{4a^2 - \lambda^2}{4\lambda} = \frac{a^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4} = N \quad (3-10)$$

Für die Berechnung von ortsabhängiger Schalldruckamplitude und Nahfeldlänge wird die Wellenlänge des abgestrahlten Schalls benötigt. Dazu dienen die longitudinalen Eigenresonanzen des betrachteten Testkörpers, da durch diese das Schwingungsverhalten der Kreismembran gegeben ist. Die Schallgeschwindigkeit c_{LS} quasi-longitudinaler Wellen in begrenzten Stäben errechnet sich nach [Cremer2010, S. 37] wie folgt:

$$c = c_{LS} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3-11)$$

Allgemein gilt für den Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit c_{LS} , Frequenz f_n und Wellenlänge λ_n nach Gleichung (2-6), wobei die Indizes n darauf hinweisen, dass mehrere Lösungen existieren, da ein Stab mehrere Eigenfrequenzen aufweist:

$$c_{LS} = \lambda_n \cdot f_n \quad (3-12)$$

Resonanz ergibt sich, sobald die halbe Wellenlänge λ_n ein ganzzahliges Vielfaches der Stablänge l_s erreicht, also für [Cremer2010, S. 37]:

$$\lambda_n = \frac{2 \cdot l_s}{n} \quad (3-13)$$

Nach den Zusammenhängen (3-12) und (3-13) gilt für die Eigenfrequenzen f_n des Stabes:

$$f_n = \frac{c_{LS}}{\lambda_n} = \frac{n}{2 \cdot l_s} \cdot c_{LS} = \frac{n}{2 \cdot l_s} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3-14)$$

Wegen der Realgeometrie des Testkörpers muss obige Formel um einen Korrekturfaktor erweitert werden. Dazu existieren in der Literatur verschiedene Möglichkeiten, welche am IZFP in einer vorangegangenen Diplomarbeit bereits aufgearbeitet wurden (siehe [Dräger2008]). Einer der dort betrachteten Faktoren ist der Korrekturfaktor K_R nach Rayleigh, durch welchen die Schallgeschwindigkeit c_{LS} und damit die Eigenfrequenzen f_n von Stäben unter Berücksichtigung des Stabradius a , der Stablänge l_s , dem Index n der Eigenschwingung sowie der materialabhängigen Poissonzahl μ korrigiert werden:

$$f_n = \frac{n}{2 \cdot l_s} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot K_R = \frac{n}{2 \cdot l_s} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\mu^2 a^2 n^2 \pi^2}{2 \cdot l_s^2}}} \quad (3-15)$$

Durch das Schwingen des Stabes nach Impulsanregung wird die umgebende Luft zum Mitschwingen mit gleichen Frequenzen angeregt. Wegen der abweichenden Schallgeschwindigkeit im betrachteten Körper zur Schallgeschwindigkeit in der umgebenden Luft weist der abgestrahlte Luftschall andere Wellenlängen als der Körperschall im Stab auf [Lindner2006, S. 239]. Über den Zusammenhang (3-12) wird die Wellenlänge der entsprechenden an die Luft übertragenen Schallwellen bestimmt, wobei als Schallgeschwindigkeit $c_{Luft,20^\circ C}$ und als Frequenzen f_n die Resonanzfrequenzen longitudinaler Eigenschwingungen des Stabes berücksichtigt werden:

$$\lambda_n = \frac{c_{Luft,20^\circ C}}{f_n} \quad (3-16)$$

3.2.3 Versuchsergebnisse

Für den betrachteten Testkörper ergaben sich unter Berücksichtigung von Zusammenhang (3-15) rechnerisch die in Tab. 3-3 angegebenen Resonanzfrequenzen f_n , welche mit den entsprechenden messtechnisch bestimmten und auch den simulierten Resonanzfrequenzen verglichen wurden. Dabei dienten die analytisch und über die FEM-Simulation hergeleiteten Frequenzen als Anhaltspunkte, um die tatsächlichen Resonanzfrequenzen in den Spektren aus den akustischen Resonanzanalysen des Testkörpers zu ermitteln (Abb. 3-4). Mit Hilfe der Eigenfrequenzen f_n des Testkörpers wurden über den Zusammenhang (3-16) die Wellenlängen λ_n der an die Luft abgestrahlten Schallwellen berechnet (Tab. 3-4).

Tab. 3-3: Resonanzfrequenzen f_n der ersten 10 longitudinalen Eigenschwingungen des Stabes

Resonanzfrequenzen f_n longitudinaler Eigenschwingungen des Testkörpers (in Hz)					
n	Analytisch berechnet	n	Simuliert (COMSOL)	n	Experimentell
1	8468,53	1	8468,50	1	8612,82
2	16903,58	2	16902,87	2	17187,88
3	25272,34	3	25266,88	3	25694,28
4	33543,27	4	33520,13	4	34091,19
5	41686,69	5	41615,62	5	42331,70
6	49675,27	6	49497,37	6	50359,73
7	57484,42	7	57098,52	7	58107,38
8	65092,57	8	64342,04	8	65495,30
9	72481,36	9	71139,93	9	72437,29
10	79635,68	10	77414,42	10	78845,22

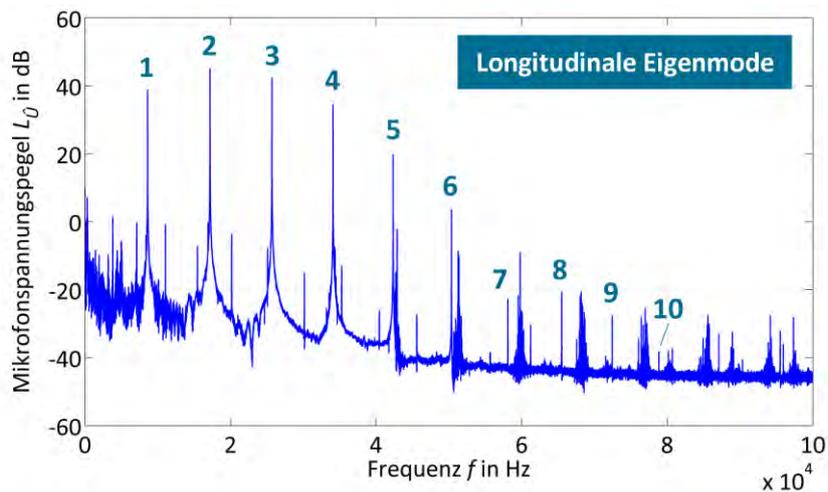


Abb. 3-4: Darstellung eines Resonanzspektrums aus einer akustischen Resonanzanalyse des Testkörpers mit der Lage der Peaks der ersten 10 longitudinalen Eigenschwingungen

Tab. 3-4: Berechnete Wellenlängen λ_n der durch die ersten 10 longitudinalen Eigenschwingungen des Testkörpers an die Luft übertragenen Schallwellen

Berechnete Wellenlängen λ_n des in Luft abgestrahlten Schalls (in mm)					
n	Analytisch berechnet	n	Simuliert (COMSOL)	n	Experimentell
1	40,53	1	40,53	1	39,85
2	20,31	2	20,31	2	19,97
3	13,58	3	13,58	3	13,36
4	10,23	4	10,24	4	10,07
5	8,23	5	8,25	5	8,11
6	6,91	6	6,93	6	6,82
7	5,97	7	6,01	7	5,91
8	5,27	8	5,33	8	5,24
9	4,74	9	4,82	9	4,74
10	4,31	10	4,43	10	4,35

Die errechneten Wellenlängen aus Tab. 3-4 sind nicht für alle Resonanzfrequenzen f_n kleiner als der Radius a ($a = 14,5 \text{ mm}$) der Stabstirnseite (vergleiche Zusammenhang (3-9)). Daher wurde die Nahfeldlänge N_n in Abhängigkeit der Wellenlängen λ_n mit Hilfe von Gleichung (3-10) berechnet (Tab. 3-5).

Tab. 3-5: Berechnete Nahfeldlängen N_n des durch die ersten 10 longitudinalen Eigenschwingungen des Testkörpers verursachten Schallfelds

Berechnete Nahfeldlängen N_n in Abhängigkeit der Wellenlänge λ_n des abgestrahlten Schalls (in mm)					
n	Analytisch berechnet	n	Simuliert (COMSOL)	n	Experimentell
1	-4,95	1	-4,95	1	-4,69
2	5,28	2	5,28	2	5,54
3	12,09	3	12,08	3	12,40
4	17,99	4	17,97	4	18,37
5	23,48	5	23,43	5	23,90
6	28,70	6	28,59	6	29,14
7	33,72	7	33,47	7	34,12
8	38,56	8	38,08	8	38,81
9	43,22	9	42,37	9	43,19
10	47,70	10	46,31	10	47,21

Anhand von Tab. 3-5 ist ersichtlich, dass unabhängig von der zur Ermittlung der Resonanzfrequenzen des Testkörpers verwendeten Methode (analytische Berechnung, FEM-Simulation, akustische Resonanzanalyse) im Wesentlichen vergleichbare Werte für die Nahfeldlängen N_n errechnet wurden. Exemplarisch wurden die Verläufe der Schalldruckamplituden entlang der Mittelsenkrechten für vier ausgewählte Eigenschwingungen des Testkörpers berechnet, simuliert sowie messtechnisch überprüft. Die Ergebnisse davon sind in Abb. 3-5 bis Abb. 3-8 gezeigt. Da zur Berechnung der Schalldruckamplitude \hat{p} in Abhängigkeit des Mikrofonabstandes mit Hilfe von Gleichung (3-5) die Schnelleamplitude \hat{v} der schwingenden Stabstirnseite sowie die exakte Dichte ρ_0 der umgebenden Luft benötigt werden, diese aber nicht bekannt waren, wurde die Schalldruckamplitude \hat{p} auf die Werte der entsprechenden Größen normiert:

$$\hat{p}_{norm} = \left| \frac{p}{\rho_0 \cdot \hat{v}} \right| = \left| c \cdot e^{-j2\pi / \lambda} \left(1 - e^{-j2\pi (\sqrt{a^2 - z^2} - z) / \lambda} \right) \right| \quad (3-17)$$

Demgegenüber wurde für den gemessenen Schalldruck die zum Schalldruck proportionale Mikrofonspannung dargestellt. Da die absoluten Werte der mittels FEM-Simulation errechneten Schalldruckverläufe von der Stärke der Anregungen abhängen, wurden auch diese Werte normiert dargestellt. So konnten die analytisch berechneten, gemessenen und simulierten Schalldruckverläufe qualitativ miteinander verglichen werden. Die senkrechte Linie in

den Diagrammen stellt für alle Kurvenverläufe die berechnete Nahfeldlänge N_n aus der rein analytischen Lösung dar. Diese liegt für das durch die erste longitudinale Eigenschwingung des Testkörpers ausgesandte Schallfeld rechnerisch hinter der als Kolbenschwinger betrachteten Stirnfläche und ist daher in Abb. 3-5 nicht dargestellt.

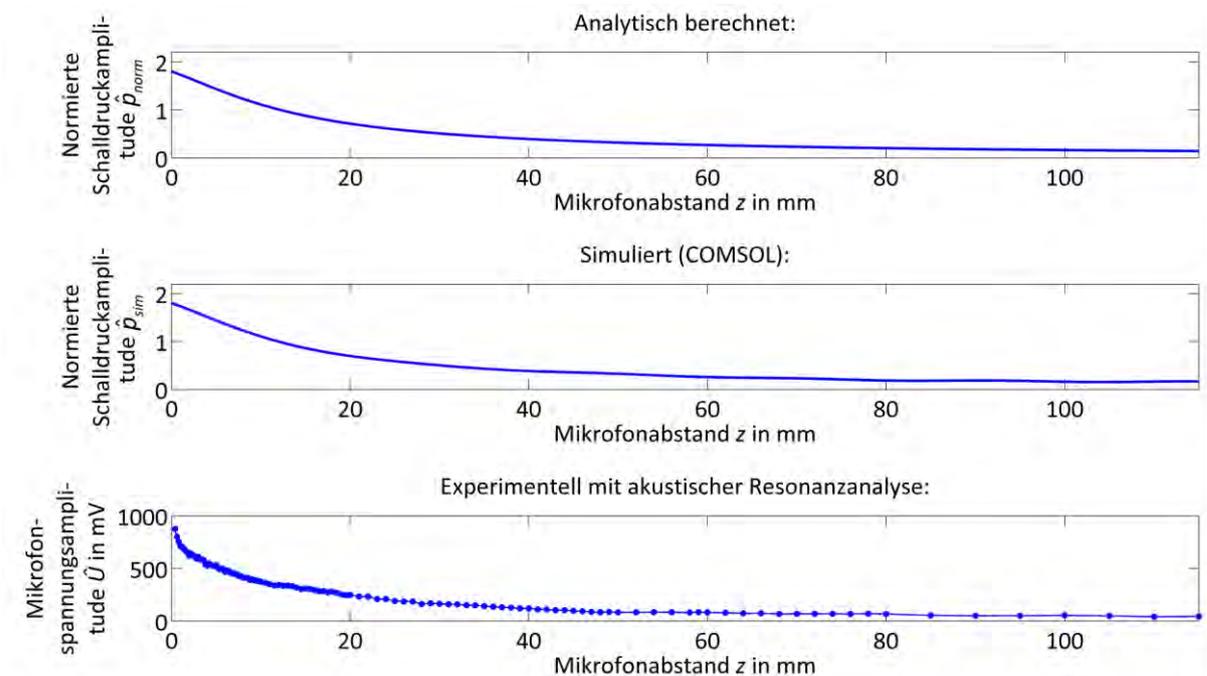


Abb. 3-5: Darstellung der Schalldruckamplitude entlang der Mittelsenkrechten der Stirnfläche für die erste longitudinale Eigenschwingung ($n = 1$) des Testkörpers

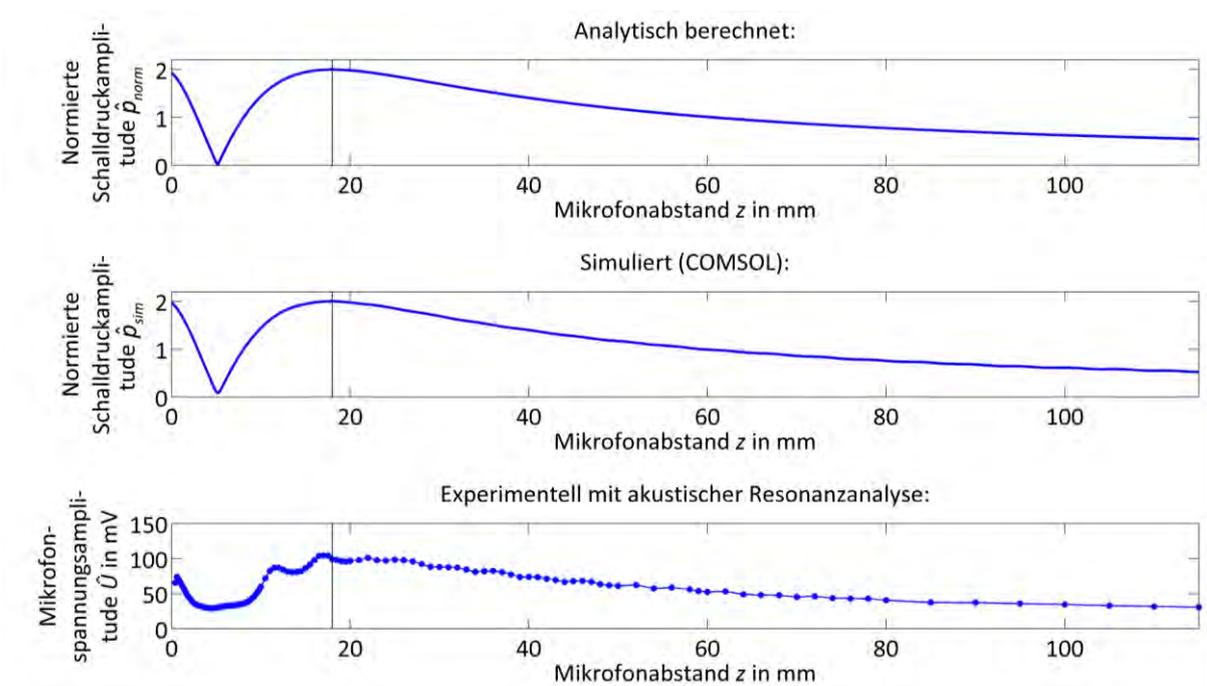


Abb. 3-6: Darstellung der Schalldruckamplitude entlang der Mittelsenkrechten der Stirnfläche für die vierte longitudinale Eigenschwingung ($n = 4$) des Testkörpers

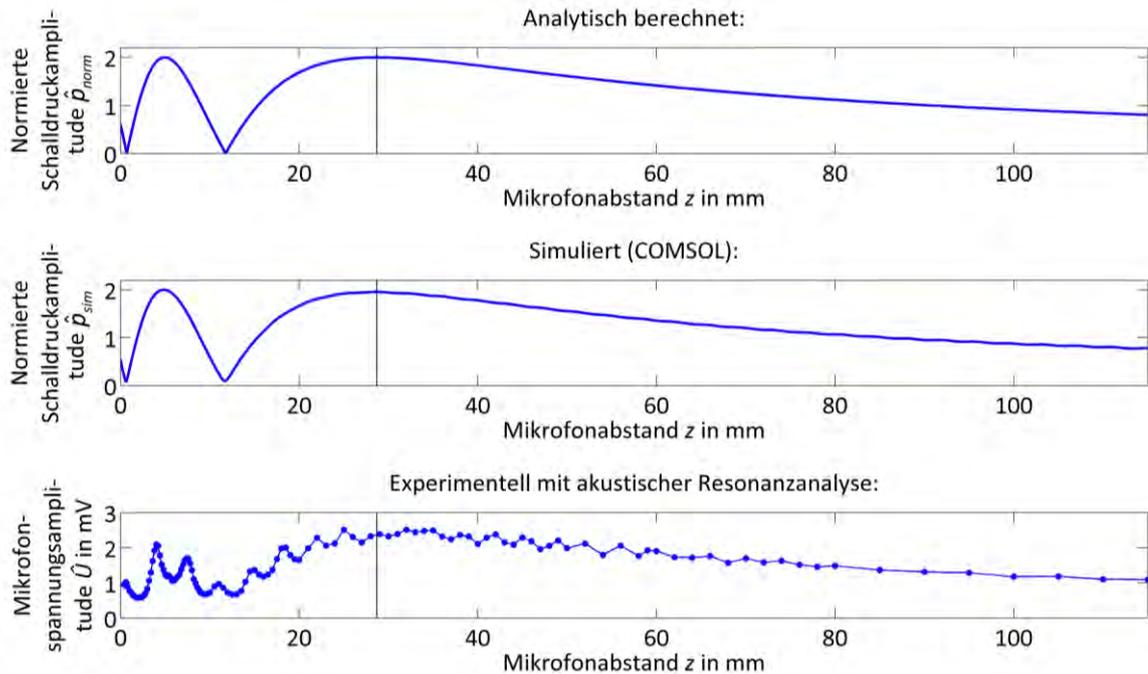


Abb. 3-7: Darstellung der Schalldruckamplitude entlang der Mittelsenkrechten der Stirnfläche für die sechste longitudinale Eigenschwingung ($n = 6$) des Testkörpers

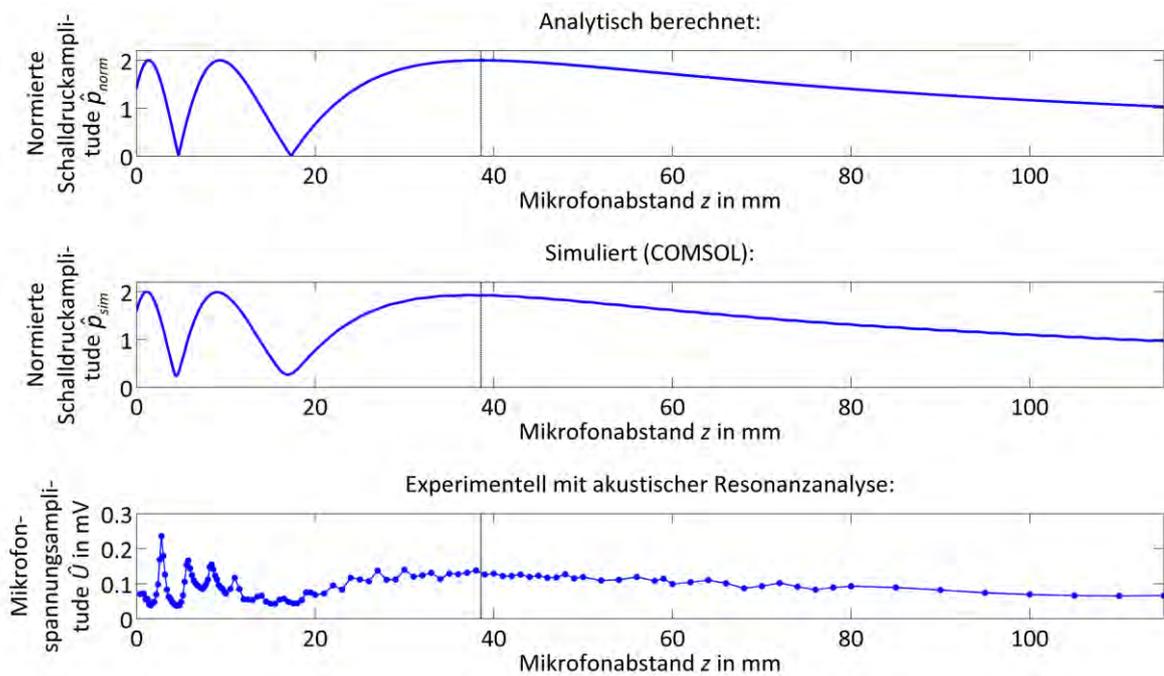


Abb. 3-8: Darstellung der Schalldruckamplitude entlang der Mittelsenkrechten der Stirnfläche für die achte longitudinale Eigenschwingung ($n = 8$) des Testkörpers

Zur grafischen Verdeutlichung der Eigenschwingungsformen und der ortsabhängigen Schalldruckamplituden der zugehörigen abgestrahlten Schallfelder sind im Folgenden für die bereits in Abb. 3-5 bis Abb. 3-8 betrachteten Eigenschwingungen anschauliche Ergebnisse aus den FEM-Simulationen aufgeführt (Abb. 3-9 bis Abb. 3-12).

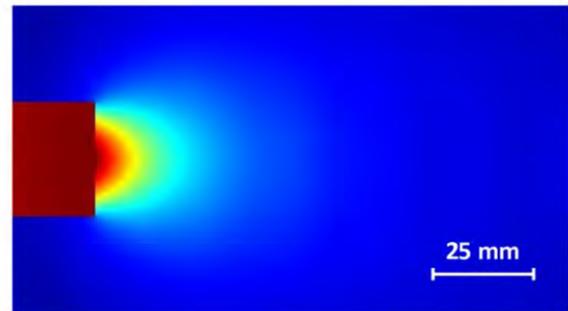
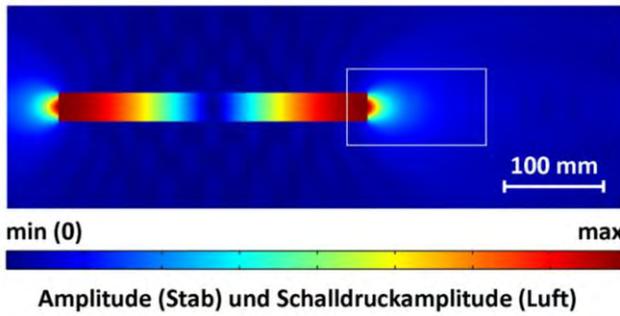


Abb. 3-9: Darstellung der Amplitude der ersten longitudinalen Eigenschwingung ($n = 1$) des Testkörpers und der ortsabhängigen Schalldruckamplitude des in Luft abgestrahlten Schallfelds

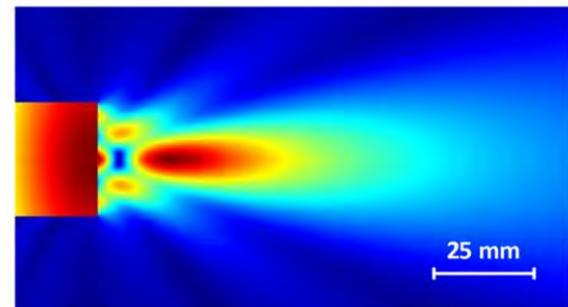
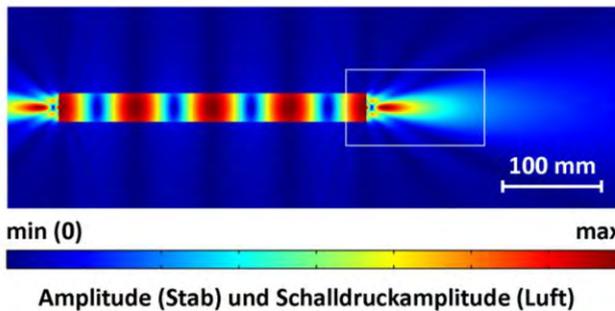


Abb. 3-10: Darstellung der Amplitude der vierten longitudinalen Eigenschwingung ($n = 4$) des Testkörpers und der ortsabhängigen Schalldruckamplitude des in Luft abgestrahlten Schallfelds

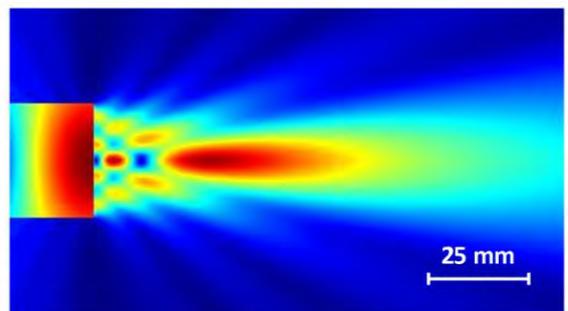
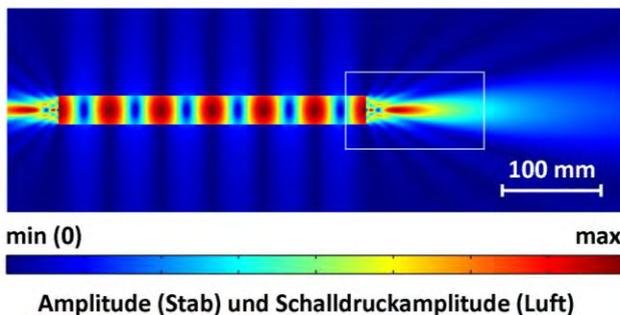


Abb. 3-11: Darstellung der Amplitude der sechsten longitudinalen Eigenschwingung ($n = 6$) des Testkörpers und der ortsabhängigen Schalldruckamplitude des in Luft abgestrahlten Schallfelds

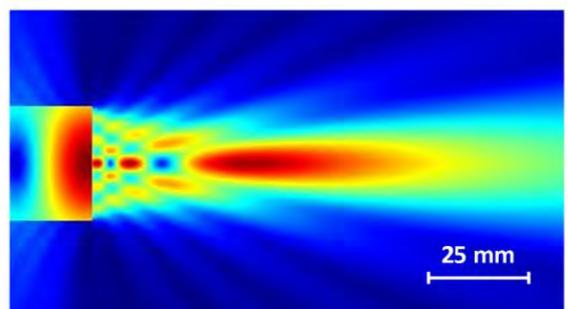
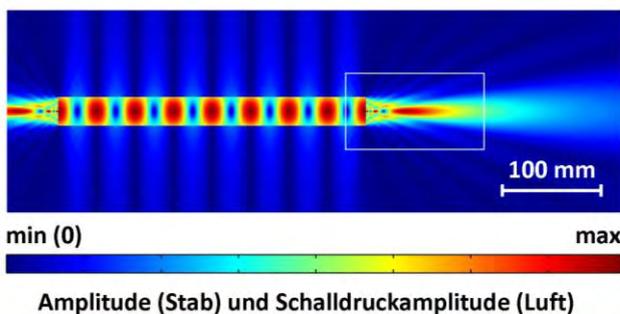


Abb. 3-12: Darstellung der Amplitude der achten longitudinalen Eigenschwingung ($n = 8$) des Testkörpers und der ortsabhängigen Schalldruckamplitude des in Luft abgestrahlten Schallfelds

3.3 Variation der Anregungsposition und -orientierung

3.3.1 Versuchsplanung

Die Position und die Orientierung der Impulsanregung stellen einen entscheidenden Faktor im Versuchsaufbau bei der akustischen Resonanzanalyse dar. So sind für stab- oder rohrförmige Körper grundsätzlich Anregungen in axialer oder radialer Richtung zu unterscheiden. Je nach Anregung bildet sich im Prüfobjekt bevorzugt Körperschall mit longitudinalem Charakter (quasi-longitudinale Wellen) bzw. transversalem Charakter (z. B. Biegewellen) aus. Dabei ist zu beachten, dass eine ausschließliche Anregung einer einzigen Wellenart in der Praxis nicht möglich ist. In einem Körper entstehen in Folge einer Impulsanregung grundsätzlich verschiedene Wellenarten und damit verschiedene Eigenschwingungsformen gleichzeitig.

Gegenstand der folgenden Untersuchung war ein stabförmiger Testkörper, welcher mit dem Testkörper aus vorangegangenem Kapitel 3.2 vergleichbar ist. Für drei verschiedene Versuchsaufbauten, bei denen jeweils nur die Anregungsposition sowie -orientierung variieren (Abb. 3-13), wurden jeweils 10 akustische Resonanzanalysen durchgeführt, wobei sowohl die vom Mikrofon aufgezeichneten Zeitsignale als auch die daraus abgeleiteten Spektren grafisch verglichen wurden. Da nicht davon auszugehen war, dass jede Impulsanregung mit exakt gleicher Intensität erfolgt, wurden zur Reduktion zufälliger Effekte jeweils gemittelte Spektren (aus je 10 Einzelspektren zugehöriger Zeitsignale) betrachtet. Alle weiteren Versuchsparameter wie z. B. die Mikrofonposition oder die Auflagerpositionen blieben während der Versuche unverändert.

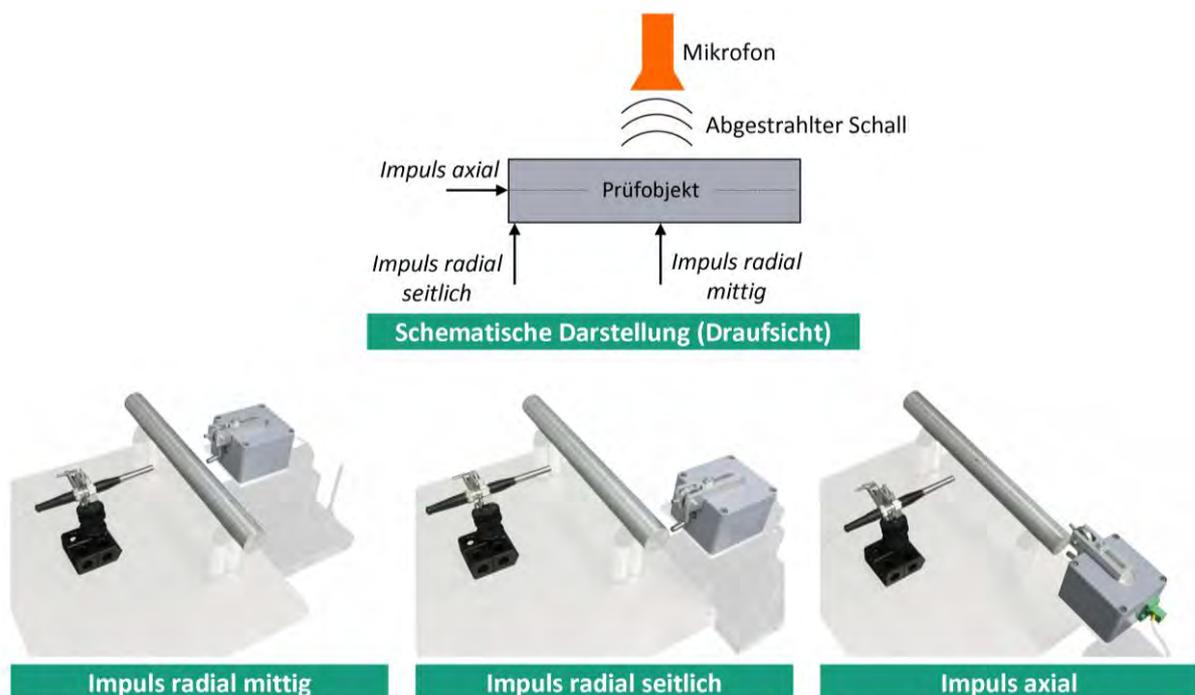


Abb. 3-13: Darstellung von Versuchsaufbauten mit verschiedenen Anregungspositionen und -orientierungen

3.3.2 Versuchsergebnisse

In den folgenden Abbildungen sind die zu Schalldruck und Schalldruckamplitude proportionalen Spannungsgrößen dargestellt. Beim Vergleich der Zeitsignale ist ersichtlich, dass sich Zeitsignale nach verschieden positionierter und orientierter Impulsanregung vor allem bezüglich ihren (abklingenden) Amplituden sowie ihren Formen unterscheiden (Abb. 3-14, links). Vor allem das Zeitsignal nach einer radialen Impulsanregung in der Mitte des Testkörpers (*Impuls radial mittig*) weist die größte Amplitude auf, während nach einer axialen Anregung (*Impuls axial*) die geringste Amplitude zu beobachten ist.

Differenzierter erscheinen die Unterschiede der aus den Zeitsignalen abgeleiteten Resonanzspektren (Abb. 3-14, rechts). Bei genauem Vergleich der Spektren ist ersichtlich, dass je nach Versuchsaufbau unterschiedliche Eigenschwingungsformen verschieden stark angeregt wurden. So sind beispielsweise nach axialer Impulsanregung (*Impuls axial*) deutliche Peaks erkennbar (grün-blau markiert in Abb. 3-14, rechts), welche in den anderen Spektren wesentlich geringer herausstreten. Hierbei handelt es sich um longitudinale Eigenschwingungen. Die Positionen dieser Peaks stimmen mit den entsprechenden berechneten Resonanzfrequenzen der longitudinalen Eigenschwingungen aus vorangegangenen Kapitel 3.2 überein. Dagegen entsprechen orange markierte Resonanzpeaks Biegeschwingungen. Dies wurde durch Untersuchungen der Eigenschwingungsformen mittels Laservibrometrie bestätigt (Abb. 3-15).

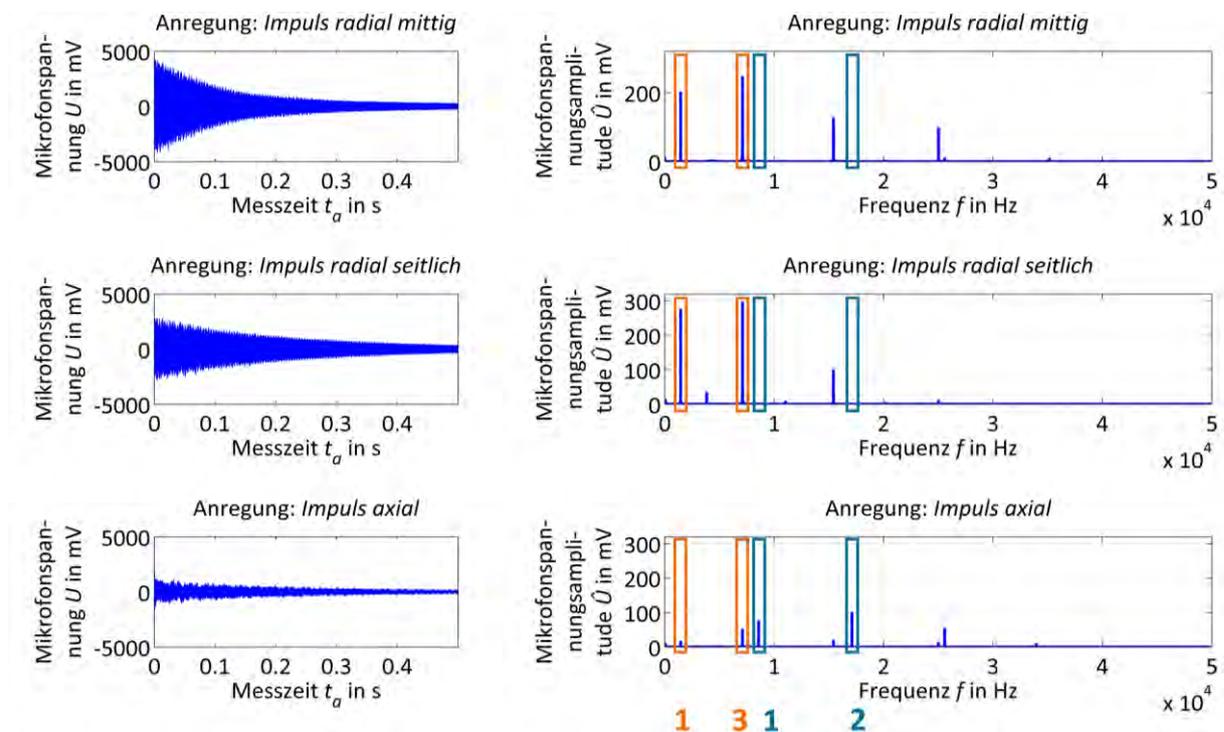


Abb. 3-14: Darstellung aufgezeichneter Zeitsignale nach Impulsanregung des Testkörpers an drei verschiedenen Positionen und daraus resultierende Resonanzspektren, orange: Peaks von Biegeeigenschwingungen, grün-blau: Peaks von longitudinalen Eigenschwingungen

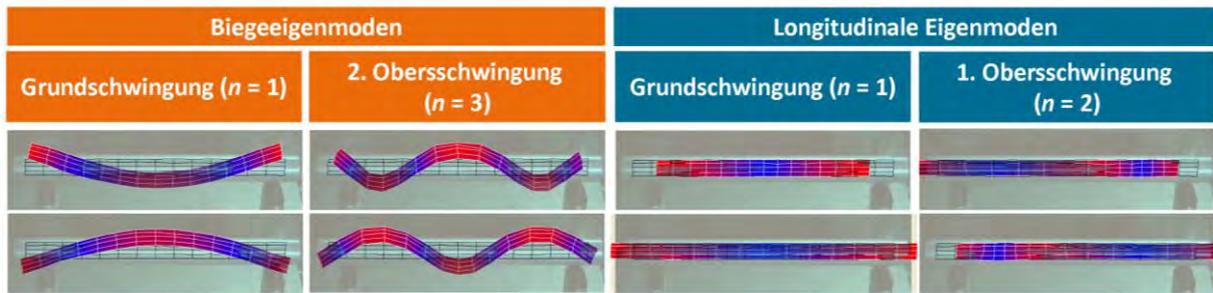


Abb. 3-15: Darstellung von vier Eigenschwingungsformen des Testkörpers mittels Laservibrometrie

Auch beim Vergleich der Spektren nach beiden radialen Anregungen (*Impuls radial mittig* und *Impuls radial seitlich*) sind Unterschiede erkennbar. So weist das Spektrum des Versuchs mit radialer, mittiger Impulsanregung (*Impuls radial mittig*) gegenüber dem Versuch mit radialer Anregung am Rand des Stabes (*Impuls radial seitlich*) einen zusätzlichen Peak bei ungefähr 25.000 Hz auf. Dabei muss beachtet werden, dass dieser Peak nicht mit dem Peak im Spektrum nach axialer Anregung (*Impuls axial*) des Testkörpers übereinstimmt, welche bei ähnlicher Frequenz zu finden ist. Dies ist in Abb. 3-16 verdeutlicht, was eine Vergrößerung des Frequenzbereichs von 24,5 kHz bis 26 kHz aus Abb. 3-14 darstellt. Eine laservibrometrische Untersuchung zeigte, dass diese Peaks zu einer Biege- (orange markiert in Abb. 3-16) bzw. longitudinalen Eigenschwingung (blau-grün markiert in Abb. 3-16) gehören.

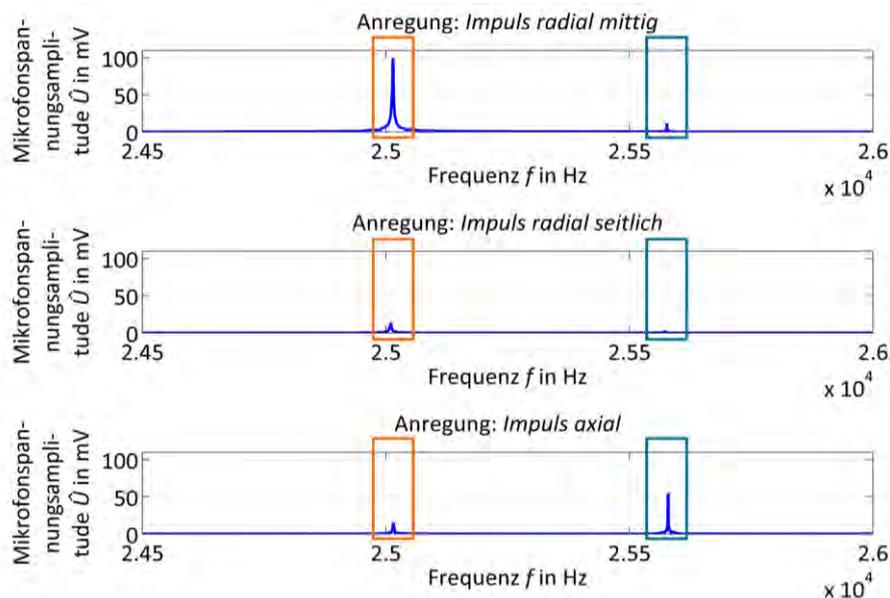


Abb. 3-16: Darstellung von Resonanzspektren basierend auf drei verschiedenen Impulsanregungen des Testkörpers, orange: Peaks von Biegeeigenschwingungen, grün-blau: Peaks von longitudinalen Eigenschwingungen

In den logarithmischen Darstellungen lassen sich ähnliche Effekte – wie oben beschrieben – auch für Peaks mit geringeren Amplituden erkennen (Abb. 3-17).

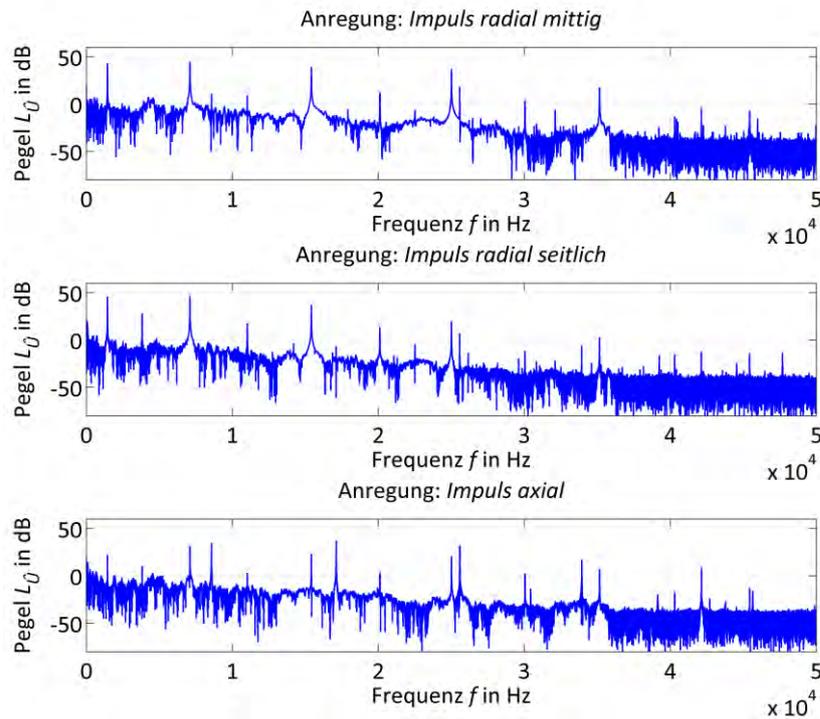


Abb. 3-17: Darstellung von Resonanzspektren basierend auf drei verschiedenen Impulsanregungen des Testkörpers

3.4 Variation des Lagerabstandes

3.4.1 Versuchsplanung

Gegenstand der folgenden Untersuchung war ein stabförmiger Testkörper, welcher mit dem Testkörper aus vorangegangenen Kapitel 3.2 vergleichbar ist. Bei ansonsten konstanten und unveränderten Versuchsparametern wurde der Testkörper jeweils 10-mal radial in der Mitte mit einem elektrischen Impulshammer angeregt. Anschließend wurde der Abstand der elastischen Auflager so erhöht, dass der Stab an seinen Enden auflag. Daraufhin wurden die Messungen erneut durchgeführt. Um zufällige Einflüsse auf Grund einer nicht exakt konstanten Impulsanregung zu vermeiden, wurden für jeden Lagerabstand 10 Spektren, basierend auf jeweils 10 Anschlägen mit identischem Lagerabstand, gemittelt.

3.4.2 Versuchsergebnisse

In der folgenden Abbildung sind die zu Schalldruck und Schalldruckamplitude proportionalen Spannungsgrößen dargestellt. Auch bei ansonsten gleichen Randbedingungen sind Unterschiede in den Spektren der akustischen Resonanzanalyse sichtbar, sofern der Lagerabstand geändert wurde. So wurden verschiedene Resonanzfrequenzen in unterschiedlichem Verhältnis in Abhängigkeit dieses Versuchsparameters angeregt (Abb. 3-18), worauf die unterschiedlichen Amplituden der Peaks bei ca. 1.500 Hz und bei ca. 25.000 Hz hindeuten.

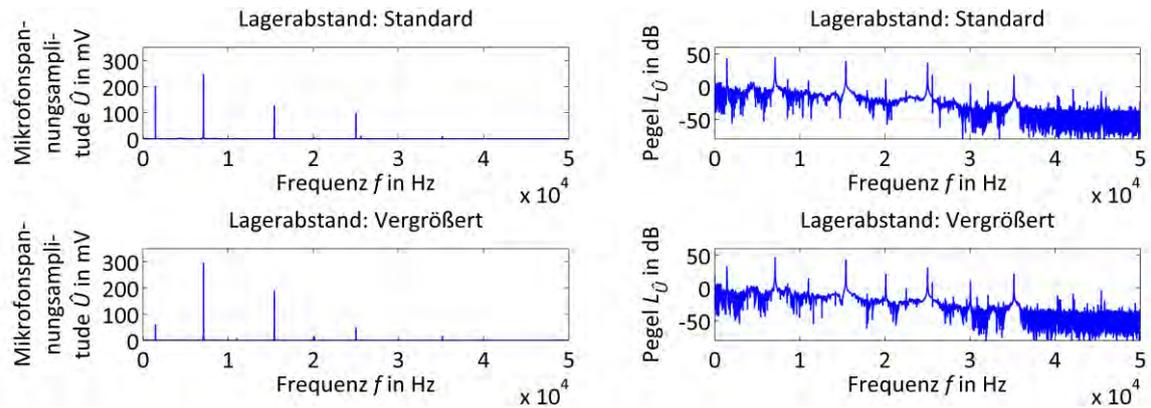


Abb. 3-18: Darstellung von Resonanzspektren des Testkörpers in Abhängigkeit des Lagerabstandes

3.5 Variation der Anregungsart

3.5.1 Versuchsplanung

Gegenstand der folgenden Untersuchung war ein stabförmiger Testkörper, welcher mit dem Testkörper aus vorangegangenen Kapitel 3.2 vergleichbar ist. Bei ansonsten gleichen Versuchsparametern wurde der Testkörper jeweils 10-mal radial in der Mitte mit einem elektrischen Impulshammer sowie manuell mit einem Handhammer angeregt. Um zufällige Einflüsse auf Grund einer nicht exakt konstanten Impulsanregung zu vermeiden, wurden für jede Anregungsart 10 Spektren, basierend auf jeweils 10 entsprechenden Anschlägen, gemittelt.

3.5.2 Versuchsergebnisse

In der folgenden Abbildung sind die zu Schalldruck und Schalldruckamplitude proportionalen Spannungsgrößen dargestellt. Durch eine Impulsanregung mit einem Handhammer anstelle des ansonsten verwendeten elektronischen Impulshammers wurden in den durchgeführten Versuchen zusätzlich andere Resonanzfrequenzen verstärkt angeregt. In Abb. 3-19 ist erkennbar, dass je nach Anregungsart vergleichbare Peaks unterschiedliche Amplituden aufweisen. Vor allem nach manueller Anregung sind mehr Peaks im Spektrum zu erkennen.

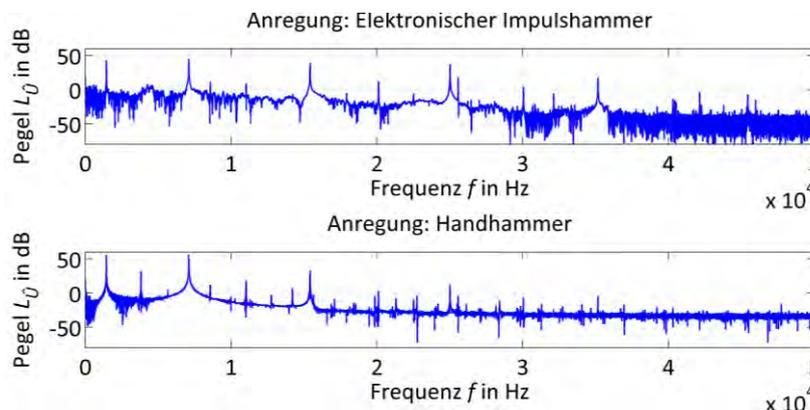


Abb. 3-19: Darstellung von Resonanzspektren des Testkörpers in Abhängigkeit der Anregungsmethode

3.6 Diskussion und Fazit

Zu Beginn dieses Hauptkapitels wurden potentiell wichtige Versuchsparameter genannt und beschrieben (siehe Kapitel 3.1). Darauf aufbauend wurden die Einflüsse verschieden eingestellter Versuchsparameter auf die Zeitsignale und den daraus abgeleiteten Resonanzspektren der akustischen Resonanzanalyse experimentell sowie unter Verwendung analytischer Berechnungen sowie FEM-Simulationen untersucht. Als Versuchsgegenstand diente ein zylindrischer Testkörper aus einer Aluminiumlegierung.

In Kapitel 3.2 wurde der Einfluss des Mikrofonabstandes auf die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Schalldruckamplituden der im Zeitsignal enthaltenen Schwingungskomponenten vom gewählten Mikrofonabstand abhängen. Für die meisten durch longitudinale Eigenschwingungen des Testkörpers abgestrahlten Schallwellen sind im Nahfeld entlang der Stabachse Minima und Maxima der ortsabhängigen Schalldruckamplitude vorhanden. Lediglich für Eigenschwingungen, deren abgestrahlter Schall eine große Wellenlänge in Luft im Vergleich zum Durchmesser der Stabstirnseite aufweist, treten im Nahfeldbereich keine Interferenzen auf (siehe Abb. 3-5).

Die messtechnisch bestimmten Verläufe der Schalldruckamplituden stimmen im Wesentlichen mit den Ergebnissen der analytischen Berechnungen sowie der Simulationen überein (siehe Abb. 3-5 bis Abb. 3-8). Die erkennbaren Unterschiede sind auf viele Ursachen zurückzuführen. So kann trotz 10-facher Mittelung der Messergebnisse nicht davon ausgegangen werden, dass die mittlere Intensität der Impulsanregungen für jeden gewählten Mikrofonabstand identisch war. Weiterhin wurde die Stabstirnseite als perfekter Kolbenschwinger betrachtet, was in der Realität nicht der Fall ist. Auch beim Einstellen des Abstandes zwischen Mikrofon und Testkörper können Messunsicherheiten vorgelegen haben. Im Versuchsaufbau wurde genaugenommen nur der Abstand des Mikrofongehäuses zum Bauteil bestimmt. Über die Lage der messenden Mikrofonmembran im Inneren des Gehäuses liegen keinerlei Informationen vor. Weiterhin ist zu erwähnen, dass der Testkörper nach Impulsanregung auch Schall von seiner Mantelfläche abstrahlt. Dieser sowie der von der Stirnfläche emittierte Schall werden in einem Prüfraum von den Wänden und Prüfaufbauten reflektiert, sodass vollständige Minima der Schalldruckamplituden in der Realität nicht zu erwarten sind. Dieser reflektierte Schall kann zu zusätzlichen Interferenzen im Schallfeld führen. Vermutlich lassen sich so die lokalen Minima und Maxima im Fernfeldbereich erklären (siehe z. B. Abb. 3-7, unten). Diese Vermutung konnte mit Hilfe der FEM-Simulationen bestärkt werden, indem der Einfluss des Abstands seitlicher Begrenzungsflächen auf den Verlauf der Schalldruckamplituden im Fernfeld untersucht wurde.

Mit dieser Untersuchung konnte gezeigt werden, dass eine vollständig analytische Berechnung der Nahfeldlänge für einfache stabförmige Körper sehr gute Ergebnisse liefert, sofern die geometrischen Abmessungen und Werkstoffkennwerte hinreichend genau bekannt sind. Für komplexere Geometrien ist eine analytische Berechnung der Resonanzfrequenzen sowie der Schallfelder und der ortsabhängigen Schalldruckamplituden nicht mehr möglich. Daher muss in solchen Fällen in vollem Umfang auf numerische Berechnungen mittels FEM oder auf experimentelle Untersuchungen zurückgegriffen werden.

Auf Basis der Erkenntnisse bleibt festzuhalten, dass das Mikrofon bei der akustischen Resonanzanalyse hinter dem letzten Maximum der Schalldruckamplitude der zu analysierenden Schwingungskomponente, d. h. außerhalb des Nahfelds, positioniert werden soll. Auch wenn in der Praxis auf Grund der oben genannten Sachverhalte keine vollständigen Minima der Schalldruckamplituden auftreten, stellen die Interferenzen im Nahfeldbereich ein Problem dahingehend dar, dass bereits eine geringe Abweichung der Bauteilposition zu deutlichen Amplitudenschwankungen von Resonanzpeaks führen kann. Wird ein Peak mittels Softwarelösungen automatisiert lokalisiert und ausgewertet, so kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein benachbarter Peak, der ebenfalls im Suchbereich liegt, eine größere Schalldruckamplitude aufweist und deswegen fälschlicherweise ausgewertet wird (vgl. Abb. 3-16). Trotzdem soll der Mikrofonabstand nicht unnötig groß gewählt werden, da die (für die Messdauer mittleren) Schalldruckamplituden mit zunehmendem Mikrofonabstand abnehmen.

Weiterhin ist festzuhalten, dass die Position und Orientierung der Impulsanregung ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis einer akustischen Resonanzanalyse nehmen können (siehe Kapitel 3.3). Experimentell wurde gezeigt, dass sich in Abhängigkeit der Anregung zum Teil unterschiedliche Peaks im Spektrum ergaben. Dies ist damit zu erklären, dass durch eine axiale Impulsanregung vorwiegend longitudinale Eigenschwingungen in Achsrichtung des Stabes angeregt werden, wohingegen Biegeschwingungen bevorzugt durch radiale Impulse entstehen. Auch die abklingende Amplitude des Zeitsignals hängt von der Anregungsposition ab. Die ebenfalls radiale Mikrofonorientierung führte in den Versuchen dazu, dass in radialer Richtung abgestrahlter Schall bevorzugt detektiert wurde. Bei radialer Impulsanregung am Bauteilrand fand das Einbringen der Energie in der Nähe einer Lagerung statt, sodass ein Teil der Energie möglicherweise frühzeitig durch die Lagerung absorbiert wurde und die Amplitude des entsprechenden Zeitsignals deswegen geringer als nach radialer Anregung in der Testkörpermitte war (siehe Abb. 3-14, links).

Auch die Abstände und die Positionen der Lagerungen nehmen Einfluss auf die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse (siehe Kapitel 3.4). So soll sich die Lagerung an Bauteilposi-

tionen befinden, an welchen Knotenpunkte und keinesfalls Schwingungsmaxima der zu analysierenden Eigenschwingung vorliegen. Bei der Betrachtung mehrerer Eigenschwingungen wird es in der Regel allerdings keine Lagerposition geben, welche für alle Schwingungen gleichermaßen geeignet ist. Zielführend ist es, einen geeigneten Kompromiss zu finden.

Einen weiteren entscheidenden Versuchsparameter stellt die Art des Anschlags dar (siehe Kapitel 3.5). Ob die Unterschiede, welche beim Versuch mit manueller Impulsanregung im Vergleich zu automatischer Anregung aufgezeigt wurden (siehe Abb. 3-19), aus dem manuellen Anschlag und den abweichenden Kontaktbedingungen zwischen Hammer und Prüfobjekt resultieren oder ob auch die Materialpaarung von Impulshammer und Testkörper einen Einfluss hatte, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. In jedem Fall ist ein automatischer und damit definierter Anschlag bei der akustischen Resonanzanalyse zu bevorzugen.

Mit diesen Ausführungen konnte gezeigt werden, dass der Versuchsaufbau einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse einer akustischen Resonanzanalyse haben kann. Für die Untersuchungen an den Common-Rails werden besonders auf einen definierten Prüfaufbau sowie eine reproduzierbare Bauteilpositionierung Wert gelegt, um ungünstige Effekte auf Grund des Versuchsaufbaus sowie der Bauteilpositionierung zu vermeiden.

Alle vorangegangenen Aussagen dienen lediglich einem knappen Überblick und erheben keinesfalls den Anspruch auf Vollständigkeit. Unter Berücksichtigung aller zu Beginn dieses Kapitels genannten Versuchsparameter und möglichen Abstufungen wird deutlich, dass das Zusammenspiel sämtlicher Faktoren sehr komplex ist und ein vollständiger Versuchsplan wegen der Vielzahl der erforderlichen Versuche bei weitem nicht komplett experimentell abgedeckt werden kann (siehe Kapitel 3.1). Allerdings kann aufbauend auf diesen Erkenntnissen eine geeignete Versuchsplanung im Rahmen des Kooperationsprojekts erfolgen.

4 Versuchsmaterial und Versuchsplan für reale Testkörper

4.1 Reale Testkörper: Common-Rails

In dieser Arbeit wurden akustische Resonanzanalysen, mit dem Ziel, den Autofrettageprozess bzw. die dadurch verursachten Eigenspannungen zweier Common-Rail-Typen nachzuweisen, durchgeführt. Die beiden Bauformen der Common-Rails sind in den folgenden Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 beschrieben und deren wichtigste Werkstoffkennwerte in Anhang 2 genannt. Die durch Autofrettage verursachten Eigenspannungen sind in Kapitel 4.1.3 dargestellt. Weiterhin sind in Kapitel 4.1.4 kurze Informationen zum Gefüge eines der Common-Rail-Typen in Abhängigkeit des Autofrettageprozesses aufgeführt. Kapitel 4.1.5 beinhaltet Anmerkungen zur Anzahl der verfügbaren Bauteile sowie dem wichtigen Reinigungs- und Konservierungszustand der Common-Rails. Die beiden möglichen Autofrettagezustände der Common-Rails werden im Folgenden mit *AF0* (nicht autofrettiertes Bauteil) und *AF1* (autofrettiertes Bauteil) bezeichnet. Bezeichnungen zur eindeutigen Zuordnung der Common-Rails sind in Kapitel 4.1.6 angegeben.

4.1.1 Geschmiedete Common-Rails (HFR)

Die geschmiedeten Common-Rails (**H**ot **F**orged **R**ails, HFR) aus dem Werkstoff *38MnVS6* stellen den ersten der beiden relevanten Bauteiltypen dar (Abb. 4-1). Nachdem ein Rohling mittels Schmiedeverfahren wie gefordert umgeformt wurde, erfolgen mechanische Bearbeitungsschritte, in welchen unter anderem eine axial orientierte Innenbohrung sowie radiale Bohrungen mit den in der Abbildung dargestellten Anschlussgewinden gefertigt werden. Im Anschluss an diesen Arbeitsschritt wird der Eigenspannungszustand des Common-Rails mit Hilfe der Autofrettage (Autofrettagedruck ca. 8.000 bar = 800 MPa) gezielt hinsichtlich der späteren Betriebsbelastung eingestellt. Von Bosch bereitgestellte Simulationsergebnisse der Eigenspannungen nach der Autofrettage eines geschmiedeten Common-Rails sind in Kapitel 4.1.3 aufgeführt. Kennwerte des entsprechenden Werkstoffs befinden sich in Anhang 2.1, da sie nicht unmittelbar relevant für die durchgeführten Versuche und die zugehörigen Auswertungen sind.



Abb. 4-1: Fotografische Aufnahme eines geschmiedeten Common-Rails (HFR)

4.1.2 Lasergeschweißte Common-Rails (LWR)

Die lasergeschweißten Common-Rails (Laser **W**elded **R**ails, LWR) aus dem Werkstoff *20MnCr55* stellen den zweiten der relevanten Bauteiltypen dar (Abb. 4-2). Für diesen Typ erfolgt zunächst die vollständige mechanische Bearbeitung eines Rohlings, wobei zwar radiale Bohrungen gefertigt, die radialen Anschlussgewinde aber erst später mittels Laserschweißen angebracht werden. Im Anschluss an diesen Arbeitsschritt wird der Eigenspannungszustand des Common-Rails mit Hilfe der Autofrettage (Autofrettagedruck ca. 8.000 bar = 800 MPa) gezielt verändert. Erst danach werden weitere Komponenten an das bereits autofrettierte Common-Rail angeschweißt. Auch für diesen Bauteiltyp sind in Kapitel 4.1.3 von Bosch bereitgestellte Simulationsergebnisse der Eigenspannungen aufgeführt. Kennwerte des verwendeten Werkstoffs befinden sich in Anhang 2.2.



Abb. 4-2: Fotografische Aufnahme eines lasergeschweißten Common-Rails (LWR)

4.1.3 Eigenspannungszustände nach der Autofrettage

Die folgenden Ergebnisse von FEM-Simulationen stellen den Eigenspannungszustand autofrettierter Common-Rails beider Bauformen in jeweils zwei zu den Bauteilachsen senkrechten Schnittebenen dar. Für beide Bauteiltypen wurde jeweils eine Schnittebene durch eine der radialen Anschlussbohrungen gelegt (*Schnitt 1*). Die jeweils zweite Ebene schneidet keine radialen Bohrungen (*Schnitt 2*). Die Simulationsergebnisse zeigen sowohl die Eigenspannungen in jeder Schnittebene farblich codiert sowie den Eigenspannungsverlauf entlang eines Pfades in Diagrammdarstellung. Nachdem zunächst die Positionen der Schnittebenen aufgezeigt werden (jeweils an beiden Seiten der hervorgehobenen Bereiche in Abb. 4-3), erfolgt die Darstellung der radialen (Abb. 4-4, Abb. 4-5), tangentialen (Abb. 4-6, Abb. 4-7) und axialen (Abb. 4-8, Abb. 4-9) Eigenspannungskomponente sowie der resultierenden Von-Mises-Vergleichsspannung (Abb. 4-10 und Abb. 4-11).



Abb. 4-3: Darstellung der Schnittebenen für die Simulation der Eigenspannungen autofrettierter Common-Rails (links: HFR, rechts: LWR (Quelle: [BoschIntern2011]))

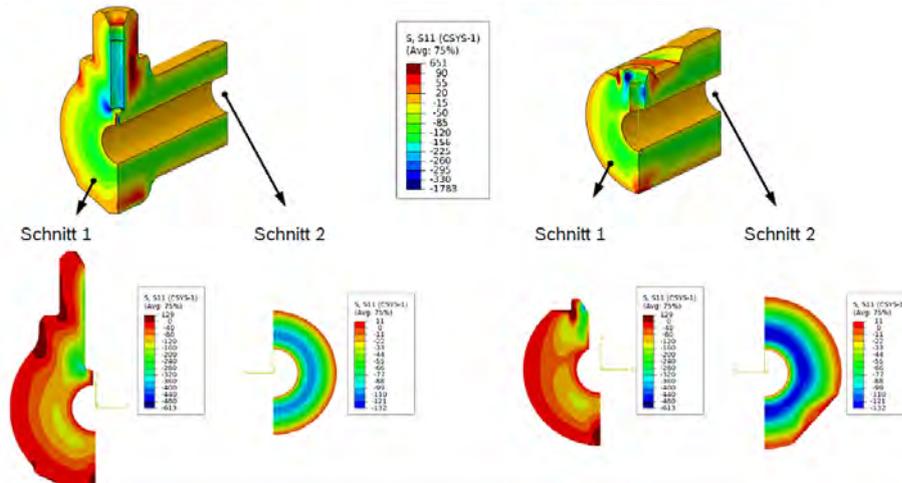


Abb. 4-4: Darstellung der radialen Komponente der durch Autofrettage verursachten Eigenspannungen in beiden Schnittebenen der Common-Rails (links: HFR, rechts: LWR) (Quelle: [BoschIntern2011])

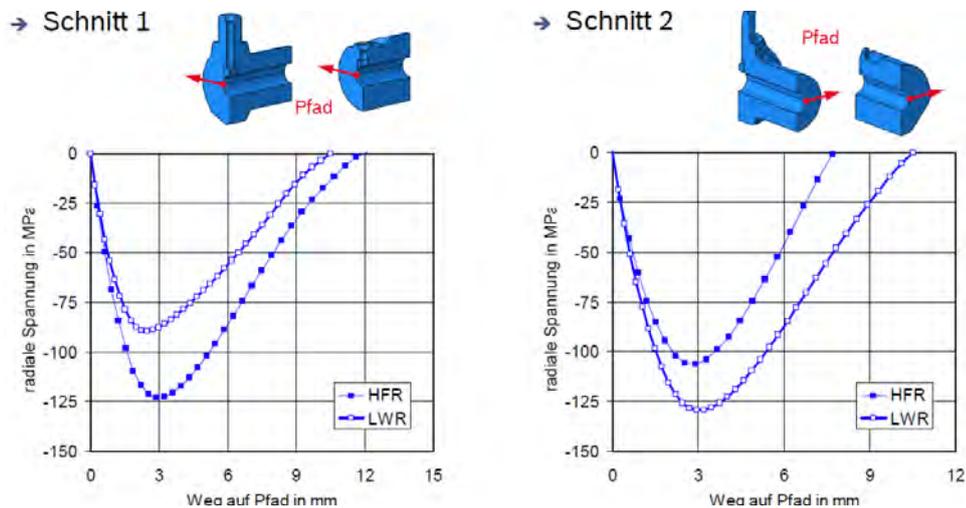


Abb. 4-5: Darstellung der radialen Komponente der durch Autofrettage verursachten Eigenspannungen entlang jeweils eines Pfades der Common-Rails (links: Schnitt 1, rechts: Schnitt 2) (Quelle: [BoschIntern2011])

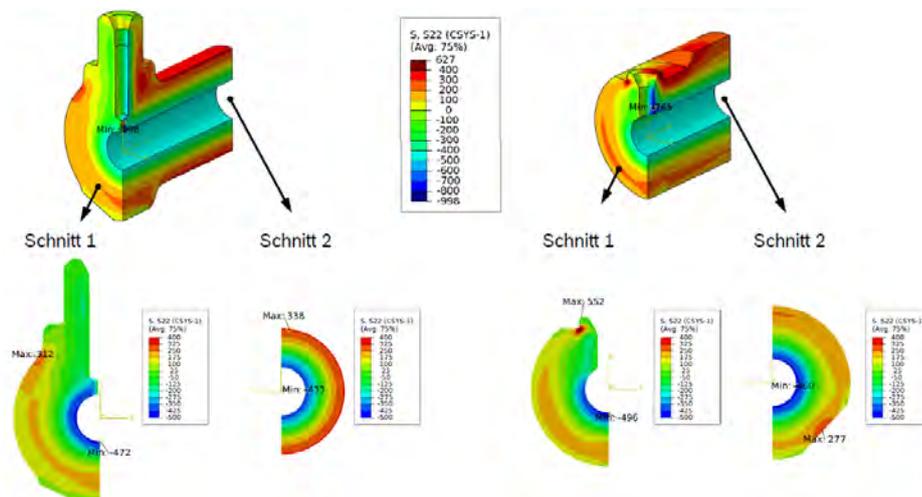


Abb. 4-6: Darstellung der tangentialen Komponente der durch Autofrettage verursachten Eigenspannungen in beiden Schnittebenen der Common-Rails (links: HFR, rechts: LWR) (Quelle: [BoschIntern2011])

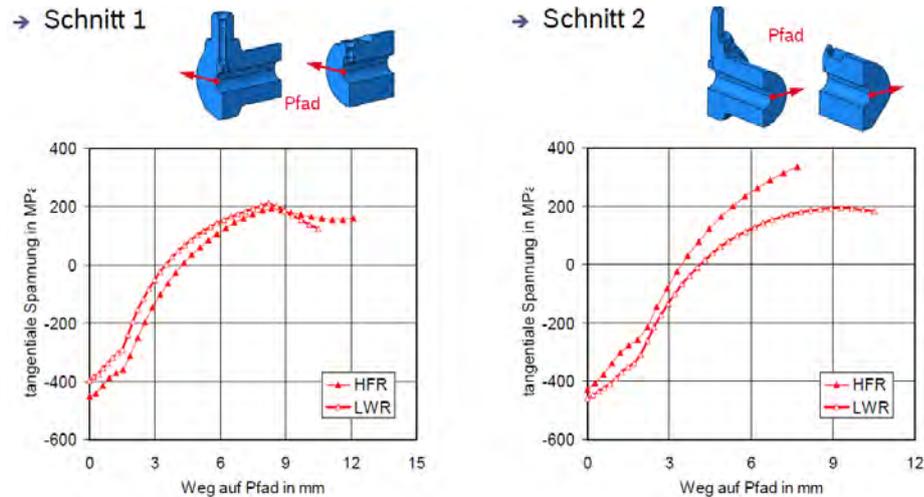


Abb. 4-7: Darstellung der tangentialen Komponente der durch Autofrettage verursachten Eigenspannungen entlang jeweils eines Pfades der Common-Rails (links: Schnitt 1, rechts: Schnitt 2) (Quelle: [BoschIntern2011])

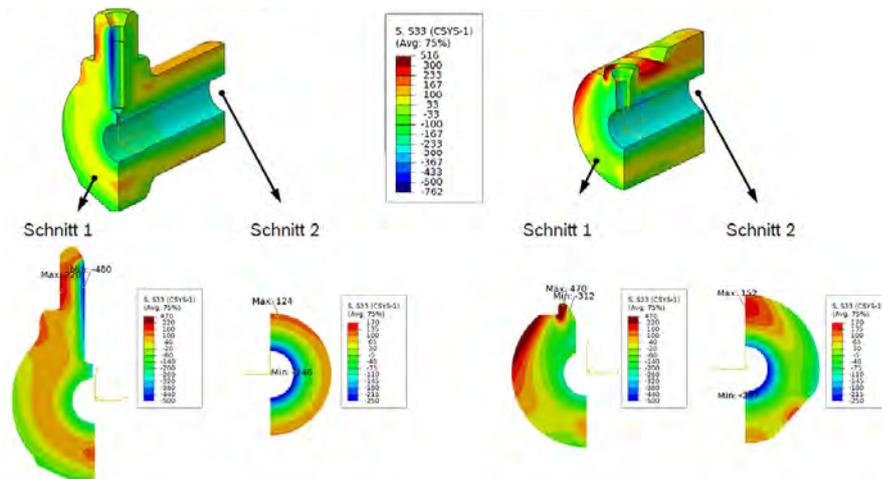


Abb. 4-8: Darstellung der axialen Komponente der durch Autofrettage verursachten Eigenspannungen in beiden Schnittebenen der Common-Rails (links: HFR, rechts: LWR) (Quelle: [BoschIntern2011])

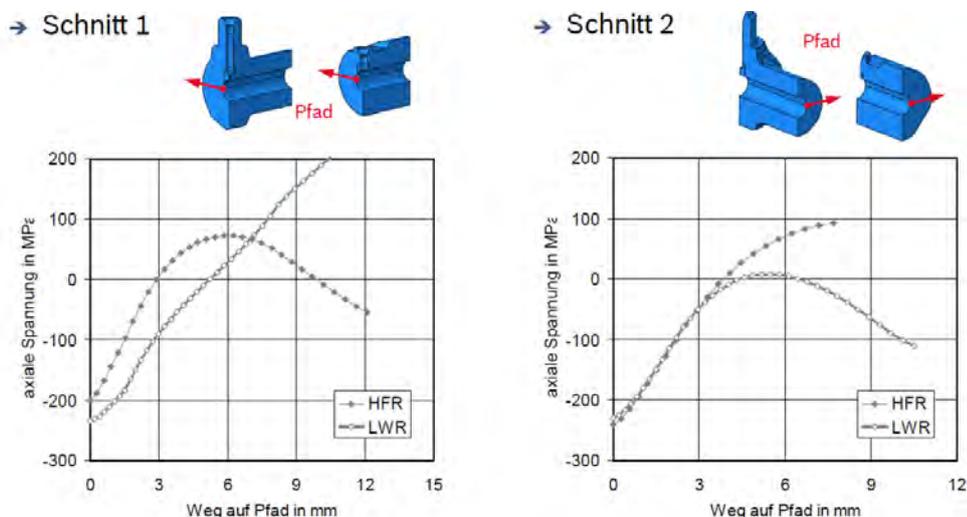


Abb. 4-9: Darstellung der axialen Komponente der durch Autofrettage verursachten Eigenspannungen entlang jeweils eines Pfades der Common-Rails (links: Schnitt 1, rechts: Schnitt 2) (Quelle: [BoschIntern2011])

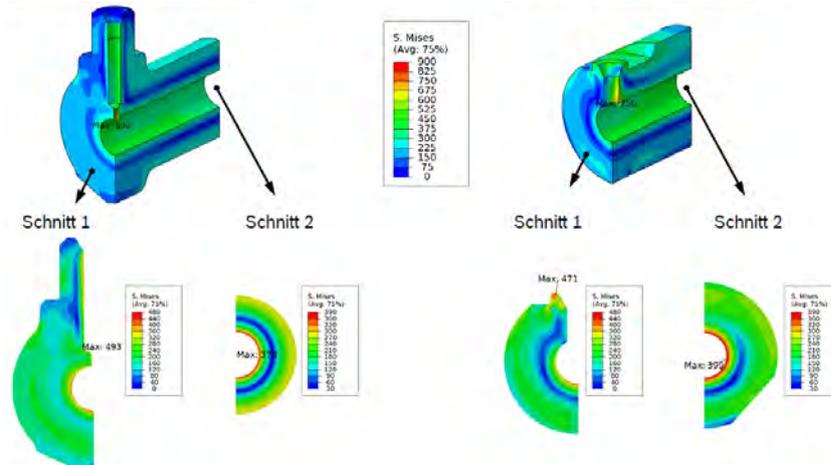


Abb. 4-10: Darstellung der Von-Mises-Vergleichsspannung in beiden Schnittebenen der Common-Rails nach dem Autofrettageprozess (links: HFR, rechts: LWR) (Quelle: [BoschIntern2011])

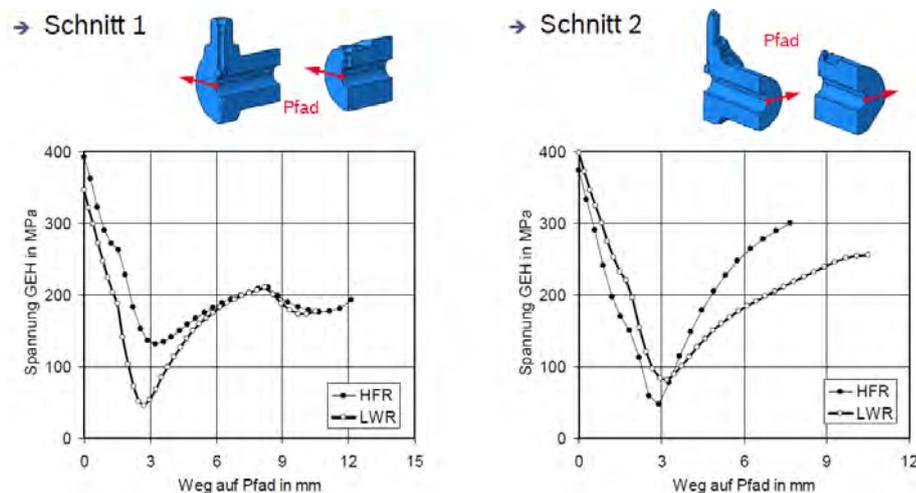


Abb. 4-11: Darstellung der Von-Mises-Vergleichsspannung entlang jeweils eines Pfades der Common-Rails nach dem Autofrettageprozess (links: Schnitt 1, rechts: Schnitt 2) (Quelle: [BoschIntern2011])

4.1.4 Gefüge und Härteverlauf geschmiedeter Common-Rails (HFR)

An dieser Stelle wird auf die metallografischen Gefügestrukturen von jeweils zwei Querschnitten zweier geschmiedeter Common-Rails mit unterschiedlichen Autofrettagezuständen und die Härteverläufe in radialer Richtung in jeweils einem Querschnitt derselben Bauteile eingegangen. Die entsprechenden Schnittebenen sind mit denen aus der FEM-Simulation identisch (siehe Kapitel 4.1.3). Die Common-Rails wurden zertrennt und die benötigten Probenstücke in einer warmaushärtenden Einbettmasse eingeschlossen. Anschließend wurden die zu untersuchenden Oberflächen in mehreren Schritten geschliffen und poliert. Daraufhin erfolgte das Anätzen der Oberflächen mit fünfprozentiger Salpetersäure. Von den bearbeiteten Oberflächen wurden mikroskopische und makroskopische Gefügaufnahmen angefertigt. Nach einem erneuten Polieren der Oberflächen wurden die Härteverläufe in radialer Richtung bestimmt (Vickers-Härte in HV 1, nur in Schnittebene 2).

Für beide ausgewertete Schnittebenen sind in der mikroskopischen Gefügestruktur keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Common-Rails unterschiedlicher Autofrettagezustände erkennbar (exemplarisch für Schnittebene 2: Abb. 4-12 und Abb. 4-13).

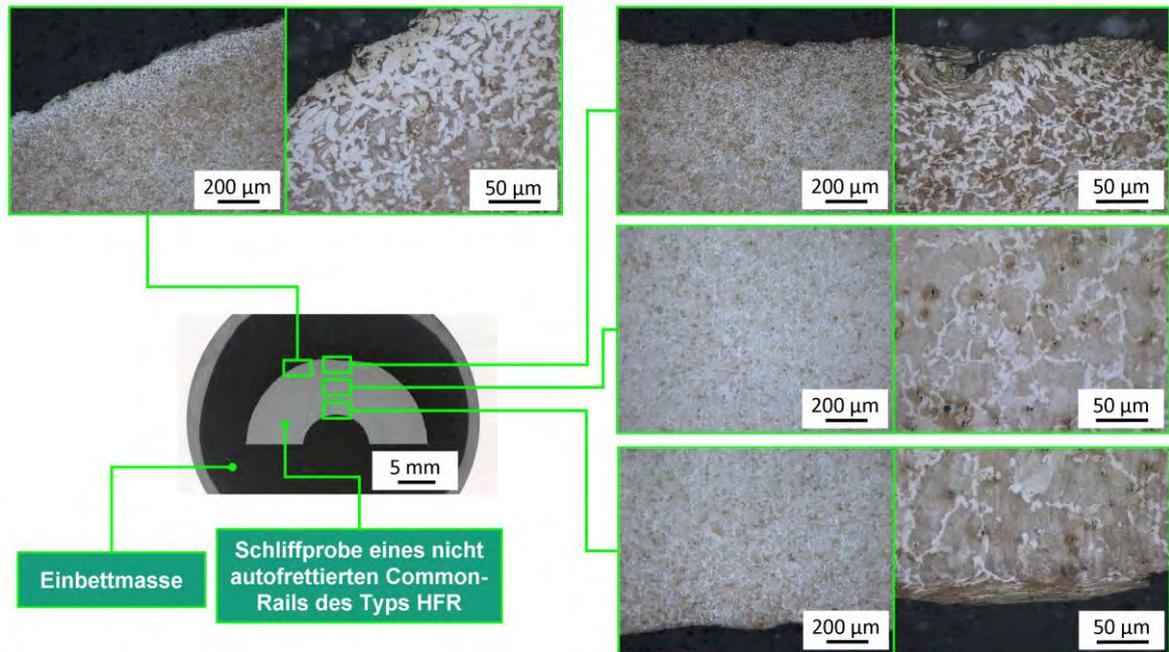


Abb. 4-12: Mikroskopische Gefügaufnahmen von Schnittebene 2 eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR mit verschiedenen Vergrößerungen

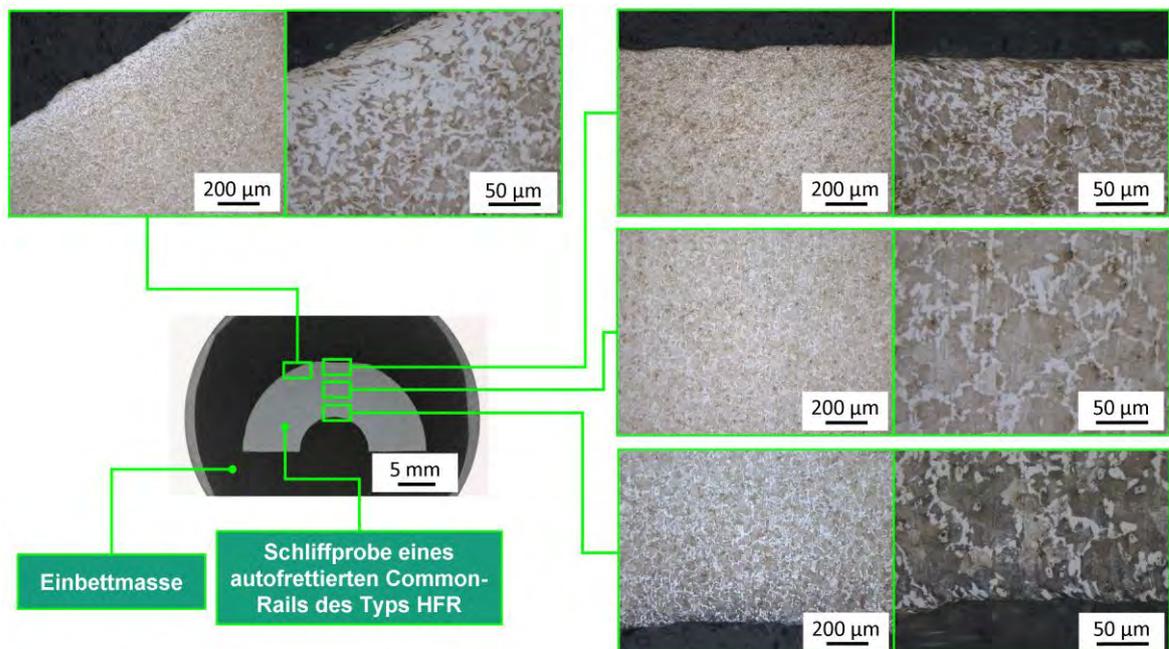


Abb. 4-13: Mikroskopische Gefügaufnahmen von Schnittebene 2 eines autofrettierten Common-Rails des Typs HFR mit verschiedenen Vergrößerungen

In den mikroskopischen Gefügaufnahmen von Schnittebene 2 (Abb. 4-12 und Abb. 4-13) ist die Gefügestruktur, bestehend aus Ferrit und lamellarem Perlit deutlich erkennbar. Auffällig

ist, dass die Korngrößen des Gefüges im Randbereich unabhängig vom Autofrettagezustand des Bauteils abnehmen. Zusätzlich ist eine Randentkohlung des Gefüges zu erkennen. Jedoch besteht kein wesentlicher Unterschied zwischen den Gefügaufnahmen des autofrettierten und des nicht autofrettierten Common-Rails. Die erkennbaren Differenzen in Farbe bzw. Kontrast sind durch leicht unterschiedliches Anätzen der Oberflächen zu erklären. Makroaufnahmen der Schliiffproben offenbaren eine aus dem Schmiedeprozess resultierende Struktur, welche jedoch durch den Autofrettageprozess keine erkennbaren Unterschiede erfährt (Abb. 4-14).

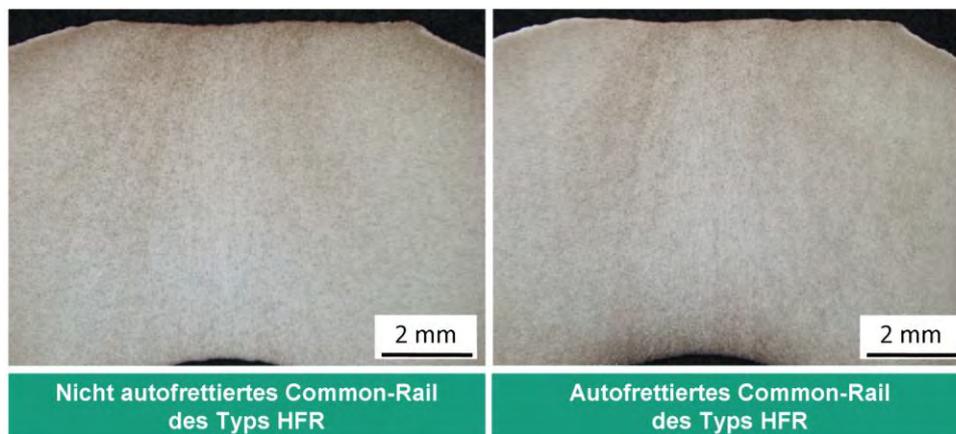


Abb. 4-14: Makroskopische Gefügaufnahmen von Schnittebene 2 eines autofrettierten und eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR

Die Härteverläufe in radialer Richtung weisen in ihrem Mittelwert keinen signifikanten Unterschied zwischen dem autofrettierten und dem nicht autofrettierten Common-Rail auf (Abb. 4-15). Weiterhin sind keine Differenzen zwischen Innen- und Außenbereich des autofrettierten Common-Rails erkennbar, obwohl davon auszugehen ist, dass im Innenbereich dieses Bauteils gegenüber dem Außenbereich deutlich abweichende Eigenspannungszustände auf Grund des Autofrettageprozesses vorherrschen (siehe Kapitel 4.1.3).

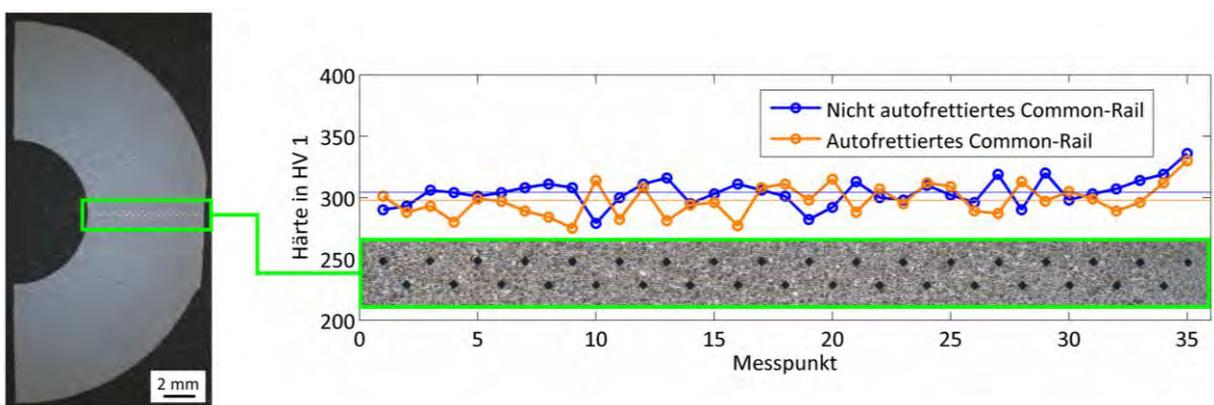


Abb. 4-15: Grafische Darstellung des radialen Härteverlaufs in Schnittebene 2 für ein autofrettiertes und ein nicht autofrettiertes Common-Rail des Typs HFR

Abschließend bleibt klarzustellen, dass die nachzuweisenden Eigenspannungen durch das Heraustrennen der Proben aus den Common-Rails durchaus abgebaut werden konnten. Weil beim Einbetten einer Probe das im Innenring eingeschlossene warmaushärtende Einbettmittel während des Aushärtens zusammenschrumpft und dadurch für die Bewertung von Schlibbildern ungünstige Spalte zwischen Einbettmittel und Probe entstehen können, wurden die aus den Common-Rails herausgetrennten Zylinderstücke in axialer Richtung geteilt. Auch dies kann zum Abbau von (vor allem tangentialen) Eigenspannungen geführt haben. Auf eine weitere Begutachtung von Schlibbildern ungeteilter Zylinderstücke wurde verzichtet, da die Werkstoffwissenschaftler der Firma Bosch in eigenen Untersuchungen ebenfalls keine wesentlichen Gefügeunterschiede zwischen autofrettierten und nicht autofrettierten Common-Rails erkennen konnten [BoschIntern2011].

4.1.5 Reinigungszustand und Bauteilanzahl

Insgesamt stehen 50 Common-Rails jeder Bauform zur Verfügung, wobei jeweils 10 nach und 40 vor der Autofrettage aus der Fertigung entnommen wurden. Bei den autofrettierten Bauteilen des Typs HFR wurde im Rahmen von Vorversuchen festgestellt, dass zusätzlich kleine Ventile (oder Drosseln) im Inneren der Common-Rails eingeschrumpft sind (Abb. 4-16). Als Ersatz erfolgte die nachträgliche Autofrettage von 10 nicht autofrettierten Common-Rails.

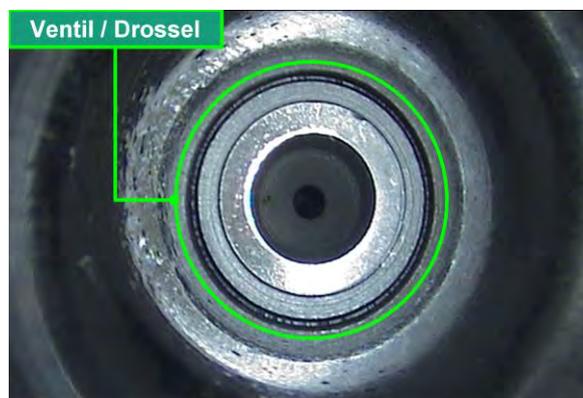


Abb. 4-16: Fotografische Aufnahme eines Ventils im Inneren der autofrettierten Common-Rails des Typs HFR

Die Robert Bosch GmbH hat bei ihren eigenen Untersuchungen im Rahmen der gegebenen Problemstellung festgestellt, dass der Reinigungs- und Konservierungszustand der Common-Rails offensichtlich einen Einfluss auf die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse hat [BoschIntern2011]. In Absprache mit dem Kooperationspartner wurde daher eine vorangegangene Bauteilreinigung mit anschließender Konservierung als sinnvoll erachtet, um so Einflüsse auf Grund inhomogener Bauteilzustände durch den applizierten Korrosionsschutz auszuschließen. Da die verwendeten Bauteile nicht aus dem Bosch-Werk in Homburg geliefert wurden und keine sicheren Informationen über den Bauteilzustand vorlagen, konnte nur so

ein möglicherweise starker Störeinfluss ausgeschlossen werden. Bauteilreinigung und -konservierung erfolgten nach Bosch-Standard in deren Werk in Homburg.

Die Bauteilreinigung und -konservierung wurde für jeweils 10 Common-Rails jedes Autofrettagezustands beider Bauformen durchgeführt. So standen für die Untersuchungen mit laser-geschweißten Common-Rails 10 autofrettierte Bauteile und 10 nicht autofrettierte Bauteile zur Verfügung. Vor den Untersuchungen mit den geschmiedeten Common-Rails wurde jeweils ein Bauteil jedes Autofrettagezustands im Rahmen von nicht dokumentierten Vorversuchen nach Bauteilreinigung mit zusätzlichem Korrosionsschutz behandelt, sodass sich die Anzahl der für die Versuche verwendeten Common-Rails des Typs HFR auf jeweils 9 reduzierte. Alle in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse beruhen auf Messungen, die nach definierter Bauteilreinigung und -konservierung durchgeführt wurden. Stellenweise wird Bezug zu den Ergebnissen aus ersten Vorversuchen genommen. Vor diesen Vorversuchen wurden die Common-Rails weder definiert gereinigt noch konserviert. Explizit sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Common-Rails beider Autofrettagezustände unterschiedliche Bauteile sind und es sich nicht um dieselben, nachträglich autofrettierten Bauteile handelt.

4.1.6 Nomenklatur der Bauteile

Sämtliche Bauteile sind zur internen Dokumentation mit eindeutigen Bezeichnungen versehen worden. Die Bezeichnung eines jeden Common-Rails ergibt sich aus dem Autofrettagezustand (*AF0* oder *AF1*) und einer für jedes Bauteil einer Bauform und eines Autofrettagezustands fortlaufenden Nummer. So bezeichnet beispielsweise die Abkürzung *AF0.4* das vierte, vor der Autofrettage aus der Produktion entnommene Common-Rail einer Bauform. Da die Untersuchungen für beide Bauformen getrennt durchgeführt wurden und eine Verwechslung daher ausgeschlossen ist, wurden in den Bezeichnungen der Bauteile keine Informationen zum Common-Rail-Typ berücksichtigt. In Anhang 6 ist zur Dokumentation eine Übersicht über die Benennung und Verwendung aller im Rahmen des Kooperationsprojekts vom Kooperationspartner erhaltenen Common-Rails der Typen HFR und LWR aufgeführt.

4.2 Verwendete Prüfmethode, -systeme und Software

4.2.1 Motivation zum Einsatz der verwendeten Prüfmethode

Unter Berücksichtigung des in dieser Arbeit beschriebenen Stands der Technik (Kapitel 2.7) sowie der zusätzlich in diesem Rahmen angestellten Überlegungen ist es realistisch, dass sich die in einem Bauteil nach Impulsanregung ausbreitenden Wellen und damit ausbildenden Eigenresonanzen auf Grund eines vorhandenen Eigenspannungszustands unterschiedlich verhalten. Im Gegensatz zum Eigenspannungsnachweis mit Ultraschall stellt die akustische Re-

sonanzanalyse ein integrales Verfahren dar, um die Gesamtheit eines Bauteils bewerten zu können. Nachteilig an der umfassenden Bauteilbetrachtung ist, dass sich auch zusätzliche Abweichungen zwischen den zu prüfenden Common-Rails auf die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse auswirken können. Deswegen ist bei der Bearbeitung der Problemstellung eine besondere Sorgfalt erforderlich. Als Vorteil der akustischen Resonanzanalyse sind der im Vergleich zur Ultraschalllösung kostengünstige Prüfaufbau sowie die kurze Messzeit zu nennen. Aus diesen Gründen, und da Bosch der qualitative Nachweis der Autofrettage bereits gelungen ist [BoschIntern2011], wurde das dort verwendete Konzept aufgegriffen und als Prüfverfahren die *akustische Resonanzanalyse* (siehe Kapitel 2.4) eingesetzt.

Die akustische Resonanzanalyse wertet u. a. spektrale Merkmale von Zeitsignalen aus, welche die Impulsantwort angeregter Bauteile darstellen. So beschreiben die aus der Resonanzanalyse abgeleiteten spektralen Merkmale z. B. die Lage, Amplitude, Halbwertsbreite usw. bestimmter Resonanzpeaks (siehe Kapitel 2.4.2). Da zu jedem Resonanzpeak eine charakteristische Eigenschwingungsform des Bauteils gehört (siehe Kapitel 2.2.3), ist somit auch ein bestimmtes – über die akustische Resonanzanalyse ermitteltes – Merkmal direkt mit der entsprechenden Schwingungsmode verknüpft. Unter Berücksichtigung des akustoelastischen Effekts und der unterschiedlich ausgeprägten Änderung der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Ausbreitungsrichtung und der Schwingungsrichtung einer Welle, der Wellenart sowie der Wirkrichtung von Eigenspannungen ist es naheliegend, dass die Möglichkeit des Eigenspannungsnachweises der vorliegenden Common-Rails über bestimmte, aus der akustischen Resonanzanalyse abgeleitete Merkmale, von der zu einer Eigenmode zugehörigen Wellenart abhängt. Um diesen Sachverhalt zu untersuchen, war es erforderlich, die zu einer Resonanzfrequenz gehörende Eigenschwingungsform zu bestimmen. Eine analytische Berechnung der exakten Resonanzfrequenzen verschiedenster Moden scheidet wegen der Komplexität der Bauteilgeometrien aus. Zwar wäre eine numerische Problemlösung mittels FEM theoretisch möglich gewesen, jedoch waren dazu die Randbedingungen wie die Anregungsstärke, Einfluss der elastischen Bauteillagerung und sonstige (für eine hinreichend genaue Simulation) erforderlichen Parameter unbekannt, sodass eine Simulation lediglich als Näherung verwendet werden könnte. Eine effiziente Alternative zu analytischen und numerischen Lösungen bietet die *Laservibrometrie*, mit der Eigenschwingungsmoden eindeutig bestimmten Resonanzfrequenzen zugeordnet werden können (siehe Kapitel 2.5).

4.2.2 Akustische Resonanzanalyse

Die *SigTestBox* der Firma *RTE Akustik + Prüftechnik GmbH* ist ein System zur akustischen Resonanzanalyse und steht am IZFP zur Verfügung. Es besteht aus elastischen, magnetisch ar-

retierbaren Auflagern, einem Mikrofon, einem Impulshammer zur Anregung sowie der zur Signalverarbeitung und Spannungsversorgung benötigten Prüfhardware inklusive Verkabelung (Abb. 4-17). Das Mikrofon mit der Bezeichnung *MI 17* des Herstellers *AVM* ist durch eine Genauigkeit von $\pm 0,5$ dB für Schall im Frequenzbereich von 20 Hz bis 4 kHz bzw. ± 1 dB für Schall im Frequenzbereich von 4 kHz bis 20 kHz gekennzeichnet (siehe Anhang 3). Zur Möglichkeit der Erfassung höherfrequenter Anteile liegen keine Informationen vor, jedoch ist laut Auskunft des Herstellers mit einem deutlichen Absinken der Amplituden zu rechnen.

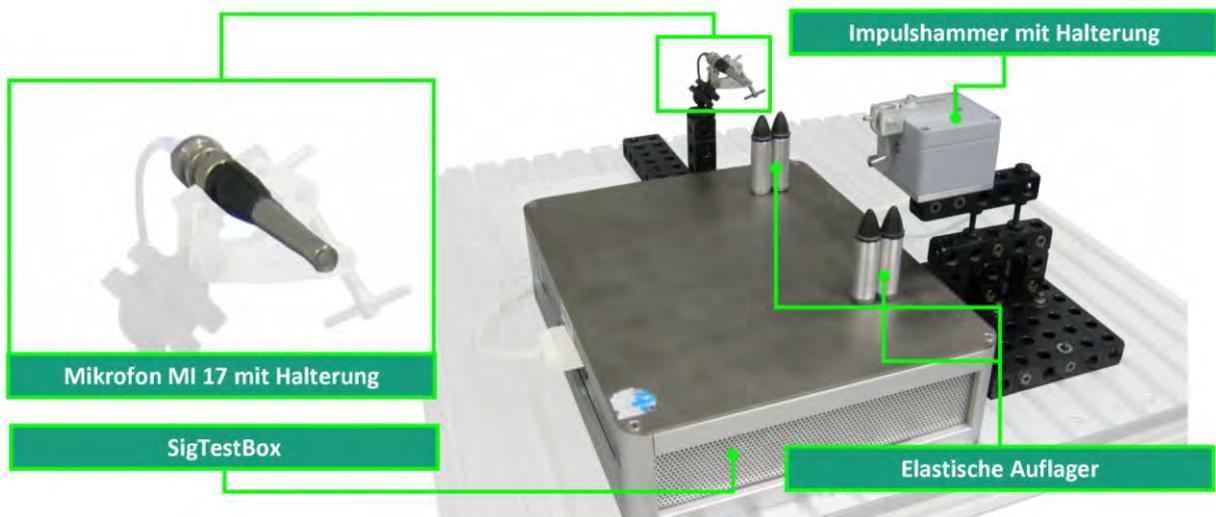


Abb. 4-17: Bearbeitete fotografische Aufnahme der RTE SigTestBox mit Zubehör

Auf einem zugehörigen Prüflaptop ist die Software *SonicTC 4.7.0* installiert, mit welcher sowohl der Prüfprozess gesteuert, als auch die aufgezeichneten Daten ausgewertet werden können (siehe Kapitel 4.2.4.2). Der Impulsanschlag kann sowohl über die Software als auch über ein zugehöriges Bedienpult gesteuert werden (Abb. 4-18).



Abb. 4-18: Bearbeitete fotografische Aufnahme des Prüflaptops sowie des Bedienpults zur Impulsauslösung

4.2.3 Laservibrometrie

Das IZFP verfügt über ein Scanning-Vibrometer der Firma *Polytec*, welches ein Hybridsystem aus dem *PSV-400-3D-M* für dreidimensionale und dem *PSV-400-M2-20* für eindimensionale Messvorgänge darstellt (Abb. 4-19). Das portable System besteht aus drei Messköpfen sowie zugehörigen Stativen bzw. einer Halterung, drei Vibrometer-Controllern zur Decodierung des Messsignals, einer Anschlussbox, welche die zentrale Schnittstelle darstellt, sowie einem PC zur Steuerung und zur Datenverwaltung und -auswertung. Mit dem Laservibrometer können Schwingungen bis zu Frequenzen von 1 MHz und Schwinggeschwindigkeiten von $0,01 \mu\text{m} / \text{s}$ bis $10 \text{ m} / \text{s}$ dreidimensional gemessen werden.



Abb. 4-19: Bearbeitete fotografische Aufnahme des Laservibrometers des IZPF (in Anlehnung an [Polytechnern2011])

4.2.4 Auswertungen bei der akustischen Resonanzanalyse

Die Auswertung von Rohdaten der akustischen Resonanzanalyse erfolgte in dieser Arbeit mit verschiedenen Softwarelösungen. So kamen neben der Prüfsoftware *SonicTC* vor allem auch die Programme *OriginPro* und *MATLAB* zum Einsatz.

4.2.4.1 Merkmalsarten und Merkmale bei der akustischen Resonanzanalyse

Um sprachliche Umständlichkeiten und ständige Wiederholungen zu vermeiden, wurde in dieser Arbeit zwischen *Merkmalsarten* (oder auch Arten oder Typen von Merkmalen) sowie *Merkmalen* unterschieden. Dabei beschreibt der Begriff *Merkmal* eine eindeutig einem bestimmten Resonanzpeak zugeordnete Kenngröße, wobei sich ein Merkmal immer einer Merkmalsart (z. B. Halbwertsbreite von Resonanzpeaks) zuordnen lässt. Die in dieser Arbeit verwendeten Merkmalsarten sind in den Kapitel 2.4.2 und 2.4.3 beschrieben. Zur einfacheren Angabe von Merkmalen wird im Folgenden eine Kurzform verwendet. Die Merkmalswer-

te sind mit bestimmten Resonanzpeaks in den Resonanzspektren der akustischen Resonanzanalyse der Common-Rails verknüpft. Demnach kann jedem Merkmal die Resonanzfrequenz zugeordnet werden, bei welcher der entsprechende Peak im Spektrum zu finden ist. Somit ergibt sich die Bezeichnung eines Merkmals aus der Merkmalsart (siehe Kapitel 2.4.2 und 2.4.3) sowie einer Nummer, die der ungefähren Frequenz entspricht, bei welcher die ausgewerteten Peaks in den Resonanzspektren zu finden sind. So bezeichnet beispielsweise die Abkürzung *FWHM 17900* die Halbwertsbreite von Resonanzpeaks, welche in den Resonanzspektren bei ungefähr 17.900 Hz liegen.

4.2.4.2 Software SonicTC

SonicTC ist die Betriebssoftware des am IZFP zur Verfügung stehenden Prüfsystems zur akustischen Resonanzanalyse. Es stammt, wie die Prüfhardware, vom Hersteller *RTE Akustik + Prüftechnik GmbH*. Mit Hilfe dieser Software erfolgte die gesamte Datenerfassung aller akustischen Resonanzanalysen in dieser Arbeit. Auf die Auswertemöglichkeiten von *SonicTC* wurde aber nur bedingt zurückgegriffen, da *SonicTC* für einen Serieneinsatz und nicht für umfangreiche, von zahlreichen und ständig wechselnden Auswerteparametern gekennzeichnete Untersuchungen ausgelegt ist. Mittels dieser Software wurden für zwei der in Kapitel 2.4.2 bzw. 2.4.3 genannten Merkmalsarten Werte aus aufgezeichneten Rohdaten bestimmt (Tab. 4-1). Erklärungen zu diesen Merkmalsarten und zu deren Bestimmung sind in den Grundlagen (Kapitel 2.4.2 und 2.4.3) aufgeführt.

Tab. 4-1: Übersicht über die zur Auswertung verwendeten Merkmalsarten der Software *SonicTC*

Merkmalsart	Kurzbeschreibung
<i>Güte</i>	Güte einer Resonanzfrequenz bzw. eines Peaks, formell: Resonanzfrequenz geteilt durch Halbwertsbreite, Berechnung mittels des Circle-Fit-Verfahrens
<i>Frequenzabhängige Abklingkonstante</i>	Abklingverhalten der bandgefilterten Gesamtschwingung nach Impulsanregung, Berechnung mittels exponentieller Regression

Die Motivation zur Auswahl der Merkmalsart *frequenzabhängige Abklingkonstante* liegt darin begründet, dass dem Kooperationspartner der qualitative Nachweis der Autofrettage geschmiedeter Common-Rails über die frequenzselektive Dämpfung zweier Resonanzen gelungen ist [BoschIntern2011]. Die Verwendung der Merkmalsart *Güte* ist durch den Zusammenhang zur frequenzselektiven Abklingkonstante und zur ebenfalls in dieser Arbeit verwendeten Halbwertsbreite begründet (siehe Kapitel 2.4.2 und 2.4.3). Die Güte ist formal definiert als Resonanzfrequenz geteilt durch Halbwertsbreite. *SonicTC* nutzt zur Bestimmung der Güte das sogenannte Circle-Fit-Verfahren. Darauf wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen. Das Verfahren ist beispielsweise in [Möser2010] beschrieben (vgl. Kapitel 2.4.3).

4.2.4.3 Software OriginPro

Die proprietäre Datenanalyse-Software *OriginPro* des Entwicklers *OriginLab* bietet zahlreiche Auswertemöglichkeiten. In dieser Arbeit erfolgte die Auswertung von Resonanzspektren bzw. der darin enthaltenen Resonanzpeaks mit dem Tool *Impulsanalysator* (Impuls Analyser). Damit können Peaks – von OriginPro allgemein als Impulse bezeichnet – automatisch gefunden und anschließend numerisch integriert oder gefittet werden. In dieser Arbeit wurden die Auswertungen auf das Finden und Integrieren der Peaks beschränkt, wobei von OriginPro bis zu 13 verschiedene Merkmale je Peak bestimmt werden. Auf einige der Merkmalsarten wurde jedoch verzichtet, da durch sie keine relevanten Informationen gewonnen werden. So geben sowohl die Merkmalsarten *Anfang X* und *Ende X* die Integrationsgrenzen um einen gefundenen Peak an. Diese stellen, da in OriginPro konstante Integrationsbreiten gewählt wurden, die Resonanzfrequenzen abzüglich bzw. zuzüglich der halben Integrationsbreite dar. Auch die Merkmalsarten *Zeilenindex*, *Index* sowie *Kurvenbereich* wurden nicht ausgewertet, da sie entweder völlig irrelevant für die Auswertungen sind oder aus anderen Merkmalsarten bestimmt werden können. In dieser Arbeit wurden Werte von insgesamt acht der in Kapitel 2.4.2 beschriebenen Merkmalsarten mittels OriginPro ermittelt (Tab. 4-2).

Tab. 4-2: Übersicht über die zur Auswertung verwendeten Merkmalsarten der Software OriginPro

Merkmalsart	Kurzbeschreibung
<i>Center (Impulszentrum)</i>	Lage eines Peaks, Resonanzfrequenz
<i>FWHM (Halbwertsbreite)</i>	Halbwertsbreite eines Peaks
<i>Left Half Width (linke halbe Breite)</i>	Linker Anteil der Halbwertsbreite eines Peaks
<i>Right Half Width (rechte halbe Breite)</i>	Rechter Anteil der Halbwertsbreite eines Peaks
<i>Area (Impulsbereich)</i>	Fläche unter einem Peak innerhalb von Integrationsgrenzen
<i>Height (Impulshöhe)</i>	Amplitude eines Peaks
<i>AreaIntP(%) (Prozentbereich)</i>	Anteil der Fläche unter einem Peak innerhalb von Integrationsgrenzen bezogen auf die Gesamtfläche unter dem Spektrum
<i>Centroid (Impulscentroid)</i>	Lage des Schwerpunkts der Fläche unter einem Peak

Grundsätzlich wurden diese Merkmalsarten, sofern innerhalb der Auswertungen nicht explizit angegeben, auf Peaks eines Amplitudenspektrums angewandt (vgl. Kapitel 2.4.2).

4.2.4.4 Software MATLAB

Wird für mehrere vergleichbare Bauteile jeweils eine akustische Resonanzanalyse durchgeführt und werden dabei in jedem Resonanzspektrum die Peaks mit einer Mindestamplitude sowie einem Mindestabstand zu den benachbarten Peaks mit OriginPro gesucht und ausgewertet, ist zu beobachten, dass nicht in jedem Spektrum exakt vergleichbare Peaks gefunden

werden. Bei der Zuordnung entsprechender Peaks aus Resonanzspektren verschiedener Bauteile kommt erschwerend hinzu, dass entsprechende Resonanzfrequenzen in der Regel von Bauteil zu Bauteil variieren. Eine manuelle Sortierung der Daten der akustischen Resonanzanalyse war in dieser Arbeit auf Grund der enormen Datenmengen nicht zu bewältigen. Daher wurde in dieser Thesis mit Hilfe der programmiersprachen-basierten Software *MATLAB* der Firma *The MathWorks, Inc.* ein Tool zur systematischen Zuordnung entsprechender Peaks (bzw. deren Merkmalswerte) aus Resonanzspektren verschiedener Common-Rails entwickelt und genutzt.

4.3 Versuchsaufbauten bei der akustischen Resonanzanalyse

Vorversuche an einem stabförmigen Testkörper (siehe Kapitel 3) sowie nicht dokumentierte Untersuchungen mit geschmiedeten Common-Rails haben gezeigt, dass der Versuchsaufbau bei der akustischen Resonanzanalyse einen Einfluss auf die Anregung von Resonanzfrequenzen und die damit verbundene Detektions- und Auswertemöglichkeit von Peaks hat. Zielführend ist ein Aufbau, bei welchem die Anzahl der angeregten Eigenfrequenzen möglichst hoch ist. Denn eine hohe Anzahl ausgewerteter Peaks erhöht die Wahrscheinlichkeit Merkmale zu finden, welche zum Nachweis der Autofrettage geeignet sind. Da Bosch bereits der qualitative Nachweis der Autofrettage für geschmiedete Common-Rails gelungen ist [BoschIntern2011] und deren verwendeter Versuchsaufbau für lasergeschweißte Common-Rails ähnlich dem für geschmiedete Common-Rails war, wurden Nachbildungen der Versuchsaufbauten der Firma Bosch für die Untersuchungen in dieser Arbeit verwendet. Ergänzend wurden in dieser Arbeit für geschmiedete Common-Rails alternative Aufbauten genutzt.

4.3.1 Versuchsaufbauten für geschmiedete Common-Rails (HFR)

In Abb. 4-20 sind der standardmäßig verwendete Versuchsaufbau für die geschmiedeten Common-Rails sowie die wichtigsten Abmessungen des Aufbaus dargestellt. Die Impulsanregung erfolgte radial am Ende der Common-Rails. Die Mikrofonachse war identisch mit der Bauteilachse und der Mikrofonabstand betrug 10 mm zur Bauteilkante. Die Common-Rails wurden für die Untersuchungen auf vier elastischen Gummilagern positioniert, wobei die radialen Anschlussbohrungen senkrecht nach oben angeordnet waren. Die elastischen Lager waren paarweise im Abstand von 205 mm angeordnet, wobei die vorderen beiden Lager 105 mm von der vorderen Gerätekkante entfernt waren. Die Positionierung der Common-Rails erfolgte mit Hilfe eines Anschlags, sodass die zum Mikrofon abgewandte Bauteilstirnfläche mit der vorderen Gerätekkante fluchtete (Abb. 4-21). Als optisches Hilfsmittel zur winkelgenauen Orientierung der Common-Rails diente eine 300 mm lange Aluminiumstange mit

dem Durchmesser 6 mm. Diese Stange wurde durch eine Bohrung einer der beiden Befestigungslaschen der Common-Rails geschoben und die Bauteile wurde so gedreht, dass die Stange parallel zur hinteren Kante der SigTestBox war (Abb. 4-21).

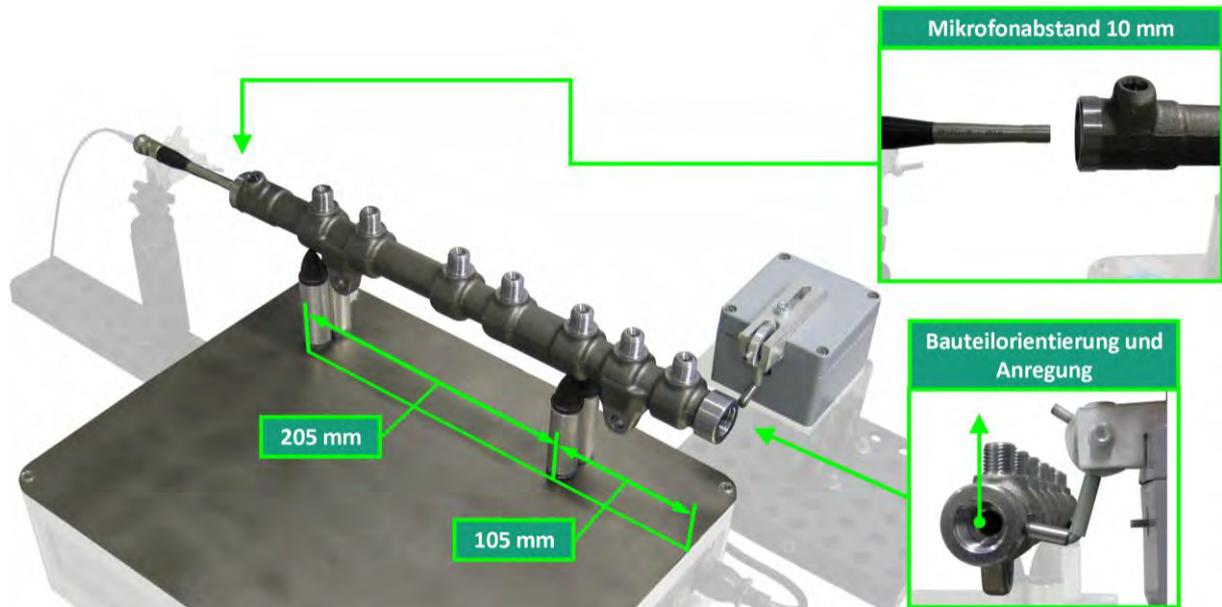


Abb. 4-20: Bearbeitete fotografische Aufnahme des Standardversuchsaufbaus für geschmiedete Common-Rails (HFR) bei der akustischen Resonanzanalyse

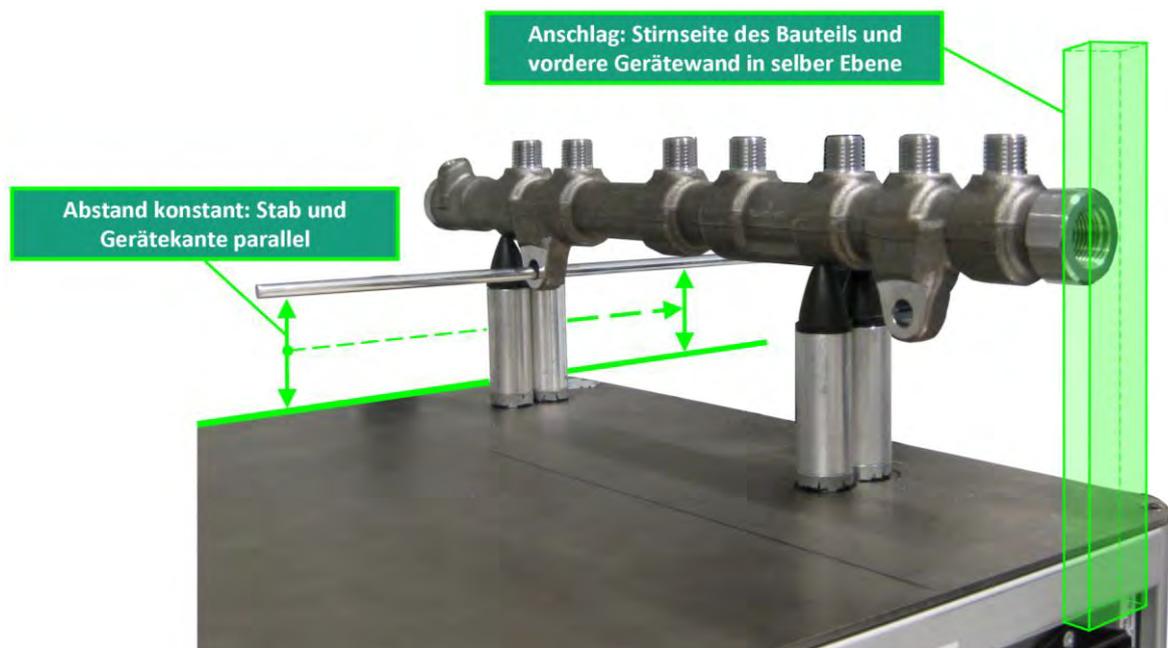


Abb. 4-21: Bearbeitete fotografische Aufnahme zur Verdeutlichung der Positionierung geschmiedeter Common-Rails (HFR) bei der akustischen Resonanzanalyse

Zusätzlich zu diesem Versuchsaufbau wurden akustische Resonanzanalysen mit vier weiteren Prüfaufbauten durchgeführt. Diese entsprechen im Wesentlichen dem Standard-Versuchsaufbau, wobei jeweils ein Parameter variiert wurde:

- Alternativaufbau 1: Variation des Mikrofonabstandes mit den zusätzlichen Abstufungen 9 mm, 19 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm und 80 mm
- Alternativaufbau 2: Veränderung des Lagerabstandes von 215 mm auf 285 mm
- Alternativaufbau 3: Impulsanregung der Common-Rails in axialer Richtung
- Alternativaufbau 4: Rotation der Bauteilorientierung um 90°

Fotos der alternativen Versuchsaufbauten 2 bis 4 sind in Anhang 5 aufgeführt.

4.3.2 Versuchsaufbau für lasergeschweißte Common-Rails (LWR)

Abb. 4-22 zeigt den standardmäßig verwendeten Versuchsaufbau für die lasergeschweißten Common-Rails sowie die wichtigsten Bemaßungen des Aufbaus.

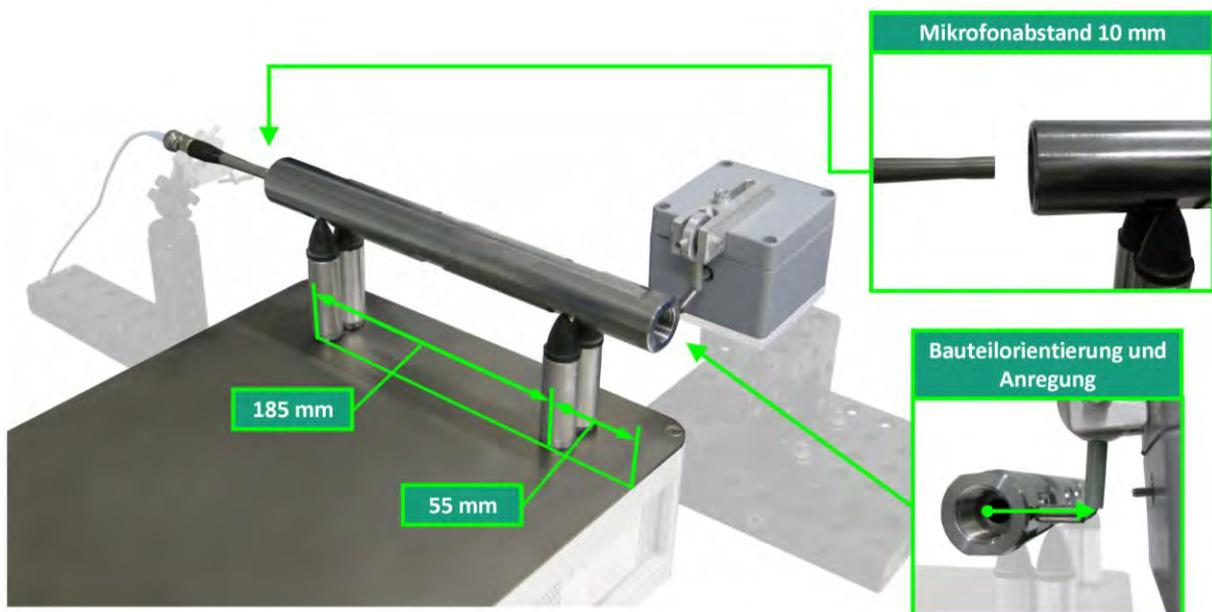


Abb. 4-22: Bearbeitete fotografische Aufnahme des Standardversuchsaufbaus für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) bei der akustischen Resonanzanalyse

Die Impulsanregung erfolgte wiederum radial am Ende der Common-Rails und das Mikrofon war axial zum Bauteil ausgerichtet. Der Abstand des Mikrofons zur Bauteilkante betrug 10 mm. Bei den lasergeschweißten Common-Rails wurden die radialen Anschlussbohrungen waagrecht in Richtung des Impulshammers ausgerichtet. Die elastischen Lager waren paarweise im Abstand von 185 mm angeordnet, wobei die vorderen beiden Lager 55 mm von der vorderen Gerätekannte entfernt waren. Die Positionierung der Bauteile erfolgte wiederum mit Hilfe eines Anschlags (vergleiche Bauteilpositionierung für geschmiedete Common-Rails, Abb. 4-21), wobei auf Grund der Bauteilgeometrie kein optisches Hilfsmittel zur Einhaltung einer einheitlichen Rotation verwendet wurde.

4.4 Parameter bei der Datenerfassung und -auswertung

An dieser Stelle seien die wichtigsten gewählten Parameter bei der Datenerfassung und -auswertung genannt und begründet. Eine vollständige Auflistung der für die akustischen Resonanzanalysen in dieser Arbeit genutzten Einstellungen befindet sich in Anhang 4. Bei der Datenerfassung haben vor allem die Parameter *Abtastrate* und *Messdauer* einen entscheidenden Einfluss auf das aus einem Zeitsignal abgeleitete Resonanzspektrum. Die Messdauer wurde für die Versuche auf $t_a = 1200$ ms festgesetzt. Durch Betrachten eines aufgezeichneten Zeitsignals ist erkennbar, dass sich die Amplitude des registrierten Schalldrucks für Zeiten größer als ca. 2000 ms nur noch wenig vom Grundrauschen des Systems abhebt. Bereits oberhalb von 1200 ms ist das Signal bereits soweit abgeklungen, dass eine weitere Datenaufnahme nicht sinnvoll erschien (vgl. z. B. Abb. 5-1).

Die Abtastung des vom Mikrofon registrierten Schalldrucks erfolgte mit einer Frequenz von $f_a = 100.000$ Hz. Unter Berücksichtigung von Zusammenhang (2-19), welcher sich aus dem in Kapitel 2.3 erwähnten Abtasttheorem ergibt, folgt für die maximale in einem Spektrum auswertbare Frequenz:

$$f_{\max} = \frac{f_a}{2} = \frac{100.000 \text{ Hz}}{2} = 50.000 \text{ Hz} = 50 \text{ kHz} \quad (4-1)$$

Vorversuche haben gezeigt, dass die Amplituden von Peaks in den Resonanzspektren bereits oberhalb von etwa 30 kHz deutlich geringer sind als die maximalen Amplituden niedrigfrequenterer Peaks (vgl. z. B. Abb. 5-2). Außerdem ist diese Begrenzung sinnvoll unter der Berücksichtigung des Messbereichs des verwendeten Mikrofons (siehe Kapitel 4.2.2), wobei nicht auszuschließen ist, dass der Messbereich des Mikrofons für die Tatsache verantwortlich ist, dass hochfrequente Resonanzen die beobachtete geringe Amplitude aufweisen.

Grundsätzlich empfiehlt es sich, ein zeitabhängiges Signal mit erhöhter Abtastfrequenz aufzuzeichnen und vor Durchführung einer DFT mit einem Tiefpassfilter zu manipulieren, sodass im Signal keine höheren Frequenzen als die darstellbare Maximalfrequenz des Spektrums enthalten sind, um damit das Abtasttheorem einzuhalten. Eine Signalfilterung war für die Untersuchungen in dieser Arbeit jedoch nicht notwendig, da die Peaks hochfrequenter Resonanzen äußerst geringe Amplituden aufweisen (vgl. z. B. Abb. 5-2).

Mit den gewählten Einstellungen für die Messdauer t_a und die Abtastfrequenz f_a ergibt sich nach Zusammenhang (2-21) durch die DFT eines Zeitsignals rechnerisch folgende Auflösung im Resonanzspektrum, sofern von der dazu verwendeten Software kein automatisches Zero-Padding erfolgt (siehe Kapitel 2.3):

$$\Delta f = \frac{f_a}{n_a} = \frac{f_a}{t_a \cdot f} = \frac{100.000 \text{ Hz}}{1,2 \text{ s} \cdot 100.000 \text{ Hz}} \approx 0,833 \text{ Hz} \quad (4-2)$$

Ein diskretes Resonanzspektrum ist dadurch gekennzeichnet, dass nur Frequenzen, welche ein ganzzahliges Vielfaches der Auflösung Δf darstellen, im Spektrum enthalten sind. Liegt eine wahre Resonanzfrequenz allerdings zwischen zwei darstellbaren Frequenzwerten, so verteilt sich die Amplitude der Resonanzfrequenz auf beide möglichen Frequenzen. Dies hat zur Folge, dass ein Peak im Spektrum deutlich breiter dargestellt wird, als er eigentlich wäre, wenn der entsprechende Frequenzwert exakt im Spektrum darstellbar wäre. Durch diese Erklärung wird deutlich, dass für einen solchen Peak ermittelte Werte eines Merkmals (wie z. B. die Halbwertsbreite) auch davon abhängen, ob die wahre Resonanzfrequenz im Spektrum darstellbar ist. Weil aber der wahre Wert einer bestimmten (zur selben Schwingungs-mode gehörenden) Resonanzfrequenz von Bauteil zu Bauteil auf Grund geometrischer Toleranzen und Inhomogenitäten des Werkstoffs schwankt, hängt es vom genauen Wert einer Resonanzfrequenz ab, ob ein entsprechender Frequenzwert näherungsweise im Spektrum enthalten ist oder nicht. Wird ein Merkmal (z. B. die Halbwertsbreite des Peaks) betrachtet, können dessen Werte von Bauteil zu Bauteil nur deshalb schwanken, weil die wahren Resonanzfrequenzen der Bauteile nicht immer in gleichem Maße genauso im Spektrum vorhanden sind. Dies würde eine zusätzliche Schwankung der Merkmalswerte verschiedener Bauteile auf Grund dieses durch die DFT verursachten Artefakts bedeuten. Dieser Sachverhalt konnte in empirischen Vorversuchen bestätigt werden. Um dem entgegen zu wirken, kann die Signallänge des Zeitsignals durch das Anhängen von Nullen (Zero-Padding) erhöht werden, was wiederum nach Zusammenhang (2-23) die Frequenzauflösung im Spektrum verfeinert. In dieser Arbeit wurde die Signallänge aller aufgezeichneten Zeitsignale standardmäßig auf das Achtfache der ursprünglichen Länge erhöht, womit sich die Frequenzauflösung Δf_{zp} in den Resonanzspektren wie folgt ergibt:

$$\Delta f_{zp} = \frac{f_a}{n_a + n_0} = \frac{f_a}{n_a + 7 \cdot n_a} = \frac{f_a}{8 \cdot n_a} = \frac{100.000 \text{ Hz}}{8 \cdot 1,2 \text{ s} \cdot 100.000 \text{ Hz}} \approx 0,104 \text{ Hz} \quad (4-3)$$

So wurde sichergestellt, dass jede Resonanzfrequenz näherungsweise im Resonanzspektrum darstellbar ist, wodurch die soeben diskutierten Artefakte durch die DTF deutlich reduziert werden können.

4.5 Bewertung und Auswertung von Merkmalen

Im Folgenden werden die wichtigsten Auswertemethoden beschrieben, die im Rahmen der in Kapitel 5 aufgeführten Auswertungen benötigt wurden.

4.5.1 Beschreibung und Bestimmung geeigneter Merkmale

Ein Merkmal (z. B. die Halbwertsbreite von Resonanzpeaks) ist potentiell dann zum Nachweis der Autofrettage geeignet, wenn im Mittel ein Unterschied zwischen den zu nicht autofrettierten Bauteilen gehörenden Werten und den zu autofrettierten Bauteilen gehörenden Werten besteht. Common-Rails zweier Autofrettagezustände können also unterschieden werden, sofern die Differenz zwischen den Merkmalsmittelwerten von Bauteilen getrennt nach Autofrettagezuständen signifikant (und nicht zufällig) von Null verschieden ist.

Der absolute Abstand zwischen den Mittelwerten eines Merkmals von Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände ist allerdings kein ausreichendes Qualitätskriterium. Ein Merkmalswert eines einzelnen, zufällig ausgewählten Bauteils ist nur dann zur prozesssicheren Beschreibung des Autofrettagezustands geeignet, wenn die Streuung der Merkmalswerte verschiedener Bauteile des gleichen Autofrettagezustands gering gegenüber der mittleren Differenz der Merkmalswerte jeweils verschiedener Bauteile zweier Autofrettagezustände ist. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 4-23 verdeutlicht. So lassen sich im linken Teil der Abbildung die Werte beider Kurven eindeutig trennen, während im rechten Teil Überschneidungen zwischen den Werten beider Kurven zu erkennen sind. Die Differenz der Mittelwerte ist jeweils identisch. Im rechten Teil der Darstellung ist die Streuung innerhalb einer Gruppe jedoch deutlich höher, was zu Überschneidungen führt.

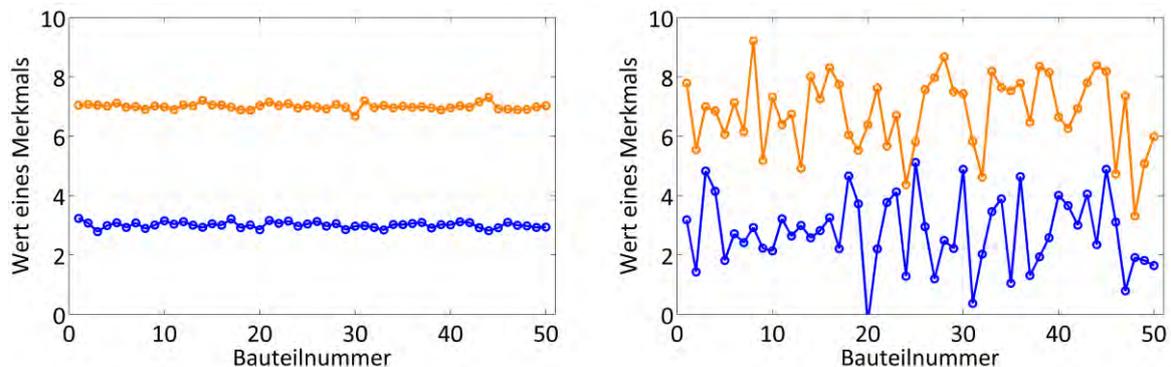


Abb. 4-23: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Streuung innerhalb einer Gruppe und Differenz der Mittelwerte zweier Gruppen

Um zu prüfen, ob eine beobachtete mittlere Differenz der Merkmalswerte von Common-Rails unterschiedlicher Autofrettagezustände mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit signifikant, also nicht zufällig von Null verschieden ist, eignen sich diverse statistische Tests, welche an unterschiedliche Voraussetzungen geknüpft sind (siehe Kapitel 2.8). Welcher Test genutzt werden soll hängt u. a von der Verteilungsform der Merkmalswerte verschiedener Bauteile des gleichen Autofrettagezustands ab. Außerdem ist es entscheidend, ob die Varianz mehrerer Merkmalswerte von Bauteilen des gleichen Autofrettagezustands vom Auto-

frettagezustand selbst abhängt. In dieser Arbeit wurde ein Zwei-Stichproben-t-Test (siehe Kapitel 2.8.2) zur Überprüfung, ob ein Unterschied zwischen den arithmetischen Mitteln der Merkmalswerte von Bauteilen verschiedener Autofrettagezustände vorliegt, verwendet.

Zur Durchführung eines Zwei-Stichproben-t-Tests ist neben den Kenngrößen Mittelwert und Varianz (bzw. Standardabweichung) noch eine weitere Variable anzugeben, die sogenannte Irrtumswahrscheinlichkeit α (auch Signifikanzniveau). Die Interpretation des Signifikanzniveaus sowie Hinweise zur Wahl eines sinnvollen Wertes sind in Kapitel 2.8.1 beschrieben. Da bei der gegebenen Problemstellung eine fälschlicherweise angenommene Nullhypothese schwerer wiegt, als das fälschliche Ablehnen der Nullhypothese, wurde ein großer Wert für das Signifikanzniveau α gewählt. Für die vorliegende Fragestellung war es wichtig, dass kein Merkmal nur auf Grund zufällig ungünstiger Versuchsergebnisse vorschnell aussortiert wurde. In der Literatur finden sich für α meist Werte zwischen 0,01 und 0,1. Unter Berücksichtigung der vorangegangenen Begründung wurde für die Auswertungen in dieser Arbeit $\alpha = 0,1$ gewählt. Alternativ zur Berechnung einer Testgröße und dem Vergleich dieser mit einem kritischen Wert (wie in Kapitel 2.8.2 beschrieben) wurde aus der Testgröße des Zwei-Stichproben-t-Test sowie der Anzahl der Freiheitsgrade das empirische Signifikanzniveau (p-Wert) bestimmt, welches angibt, bei welchem Signifikanzniveau α die Nullhypothese gerade noch abgelehnt wird. War das empirische Signifikanzniveau bei einem Test kleiner oder gleich dem vorgegebenen Wert $\alpha = 0,1$, war die Nullhypothese abzulehnen.

Trotz signifikantem Mittelwertsunterschied der Merkmalswerte von Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände können Überschneidungen auftreten. In dieser Arbeit erfolgte daher zusätzlich die Überprüfung, ob Überschneidungen der Merkmalswerte von Bauteilen zweier Autofrettagezustände auftreten, mit Hilfe eines grafischen Vergleichs bzw. der einfachen Überprüfung, ob der größte Wert der im Mittel tiefer liegenden Werte kleiner als der kleinste Wert der höher liegenden Werte ist.

4.5.2 Quervergleich von Merkmalswerten unterschiedlicher Wertebereiche

Ein Quervergleich von Werten verschiedener Merkmale kann mit statistischen Methoden durchgeführt werden, wobei in dieser Arbeit für die Werte jeweils zweier Merkmale Bewertungen wie in Kapitel 4.5.1 beschrieben, durchgeführt wurden. Die p-Werte beider Auswertungen konnten miteinander verglichen werden. Sind die aus beiden Zwei-Stichproben-t-Tests bestimmten p-Werte deutlich verschieden, so ist das Merkmal zum Nachweis der Autofrettage geeigneter, mit Hilfe dessen Werte der niedrigere p-Wert ermittelt wurde.

Für den Quervergleich von Werten verschiedener Merkmale bot sich weiterhin ein grafischer Vergleich an. Dabei mussten die Wertebereiche der jeweiligen Merkmalswerte berücksich-

tigt werden. Daher wurden die zu vergleichenden Merkmalswerte vor einem Quervergleich normiert. Hierbei wurde jeder Merkmalswert (unabhängig davon, ob dieser zu einem autofrettierten oder nicht autofrettierten Common-Rails zuzuordnen war) durch das arithmetische Mittel der Werte des entsprechenden Merkmals von nicht autofrettierten Bauteilen dividiert. Durch eine solche Normierung beträgt der mittlere Merkmalswert nicht autofrettiertes Common-Rails 1.

Zusätzlich wurden die Merkmalswerte – falls erforderlich – so transformiert, dass die normierten Merkmalswerte von AF1-Bauteilen im Schnitt oberhalb der Merkmalswerte der AF0-Bauteile liegen. Auch dies hatte praktische Gründe, da einige Merkmale umgekehrt proportional zu anderen sind (z. B. die Güte ist proportional zum Kehrwert der Halbwertsbreite). So konnten auch Merkmale unterschiedlicher Wertebereiche unmittelbar miteinander verglichen werden.

4.5.3 Analyse der Streuung von Merkmalswerten verschiedener Common-Rails

Wird dieselbe Messung mehrmals wiederholt, so zeigt sich bei den meisten physikalischen Messvorgängen, dass für jede erneute Durchführung in der Regel ein anderer Wert bestimmt wird. Bereits bei Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass die Werte eines Merkmals von Bauteil zu Bauteil des gleichen Autofrettagezustands schwanken. Diese Gesamtvarianz wird im Folgenden mit Hilfe eines mathematischen Modells ausgedrückt, wobei die einzelnen Komponenten unter Verwendung des angenommenen mathematischen Modells in dieser Arbeit durch geschickte Versuchsdurchführung abgeschätzt wurden. Ziel war die Bestimmung der Streuungskomponente, welche maßgeblich für die Streuung von Merkmalswerten verschiedener Bauteile ist, um so nach Möglichkeit durch Mittelungen den Haupteinfluss der Streuung zu minimieren. Das im Folgenden vorgeschlagene Modell ist – wie jedes mathematische Modell – vereinfacht, soll aber den grundlegenden Anforderungen genügen. Es wurde davon ausgegangen, dass sich ein Merkmalswert eines Bauteils aus der Summe unabhängiger, zufallsbehafteter Komponenten ergibt. Das hat zur Folge, dass die Varianzen der einzelnen Komponenten einfach addiert werden können, ohne dass gegenseitige Wechselwirkungen berücksichtigt werden müssen [Papula2001, S. 425]. Für eine Zufallsgröße zur Beschreibung von Merkmalswerten verschiedener Bauteile desselben Autofrettagezustands wurde folgendes Modell aufgestellt:

$$X_{AkRA} = X_{Bauteil} + X_{Position} + X_{Impuls} + \varepsilon \quad (4-4)$$

Ein zufälliger, mit der akustischen Resonanzanalyse ermittelter Merkmalswert X_{AkRA} setzt sich nach dem Modell aus drei unabhängigen Zufallsgrößen und einer Störgrößen ε zusammen.

Die Zufallsgröße $X_{Bauteil}$ beschreibt einen von Bauteil zu Bauteil schwankenden Wert, welcher unter Ausschluss zufälliger Einflüsse nur vom geprüften Bauteil und weiteren Randbedingungen der akustischen Resonanzanalyse – wie z. B. dem Versuchsaufbau – abhängt. Die Zufallsgrößen $X_{Position}$ und X_{Impuls} bezeichnen Abweichungen von diesem Merkmalswert auf Grund von Schwankungen bei der Bauteilpositionierung bzw. der Impulsanregung. Die Störgröße ε wurde im Folgenden vernachlässigt, da sie nicht messtechnisch erfassbar ist. Für die Varianz von Merkmalswerten verschiedener Common-Rails vergleichbaren Autofrettagezustands aus der akustischen Resonanzanalyse gilt, da die Zufallsgrößen aus Zusammenhang (4-4) als unabhängig voneinander angenommen wurden:

$$Var(X_{AKRA}) = Var(X_{Bauteil}) + Var(X_{Position}) + Var(X_{Impuls}) + Var(\varepsilon) \quad (4-5)$$

Die Varianz der Merkmalswerte von Common-Rails des gleichen Autofrettagezustands $Var(X_{AKRA})$ setzt sich aus drei Teilvarianzen zusammen und wird im Folgenden als *Gesamtvarianz* bezeichnet. Die Varianz $Var(X_{Bauteil})$ der Merkmalswerte verschiedener Common-Rails des gleichen Autofrettagezustands unter Ausschluss zufälliger Effekte wird *Varianz zwischen Bauteilen* genannt. Analog werden die durch Impulsanregung und Bauteilpositionierung verursachten Varianzkomponenten $Var(X_{Impuls})$ und $Var(X_{Position})$ als *Varianz durch Anregung* und *Varianz durch Positionierung* bezeichnet.

4.6 Versuchsplan und Auswertungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zahlreiche Resonanzmessungen an geschmiedeten und laser-geschweißten Common-Rails durchgeführt und ausgewertet. Ziel der Untersuchungen war es, signifikante Unterschiede zwischen nicht autofrettierten und autofrettierten Common-Rails zu finden und zu quantifizieren. Weiterhin wurde der Einfluss zahlreicher Parameter auf die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse untersucht. Die folgenden Ausführungen beschreiben die durchgeführten Untersuchungen. Zunächst werden die durchgeführten Versuchsreihen zur Aufzeichnung von Rohdaten erläutert (Kapitel 4.6.1). Die Datenaufzeichnung erfolgte in dieser Arbeit immer mit der Software SonicTC (siehe Kapitel 4.2.4.2) und den in Kapitel 4.4 aufgeführten Einstellungen zur Datenerfassung. Danach wird detailliert auf die durchgeführten Auswertungen eingegangen (Kapitel 4.6.2), deren Ergebnisse in Kapitel 5 getrennt für jeden der Common-Rail-Typen dargestellt sind. Sofern nicht anders angegeben, wurde die DFT der Zeitsignale mit der Software OriginPro durchgeführt und die Resonanzpeaks der resultierenden Spektren mit derselben Software hinsichtlich der in Kapitel 4.2.4.3 angegebenen Merkmalsarten ausgewertet. Dabei wurden standardmäßig die in Kapitel 4.4 beschriebenen Auswerteeinstellungen verwendet. Interpre-

tationen, Vergleiche und weiterführende Auswertungen der von OriginPro ausgegebenen Ergebnisse erfolgten im Wesentlichen nach den in Kapitel 4.5 beschriebenen Inhalten. In den Diagrammen im Ergebnisteil sind (sofern eine Auswertung keine andere Darstellung verlangte) normierte und daher dimensionslose Werte dargestellt (vgl. Kapitel 4.5.2).

4.6.1 Experimentelle Versuchsreihen

4.6.1.1 Versuchsreihe 1: Versuche mit den Standardversuchsaufbauten

Mit jeweils 9 (geschmiedete Common-Rails) bzw. 10 (lasergeschweißte Common-Rails) autofrettierten sowie nicht autofrettierten Common-Rails wurden Resonanzmessungen mit den in den Kapiteln 4.3.1 und 4.3.2 dargestellten Standardversuchsaufbauten durchgeführt. Die verwendeten Common-Rails tragen die Bezeichnungen *AF0.2* bis *AF0.10* und *AF1.2* bis *AF1.10* (geschmiedete Common-Rails) sowie *AF0.1* bis *AF0.10* und *AF1.1* bis *AF1.10* (lasergeschweißte Common-Rails) (Nomenklatur nach Kapitel 4.1.6). Die Messungen der geschmiedeten Common-Rails wurden jeweils dreimal pro Bauteil durchgeführt, sodass drei auswertbare Datensätze zur Verfügung standen. Da der Autofrettagenachweis für lasergeschweißte Common-Rails mit akustischer Resonanzanalyse bisher nicht möglich war [BoschIntern2011], wurden die entsprechenden Bauteile jeweils fünfmal gemessen, sodass insgesamt ebenso viele Datensätze zur Verfügung standen. Vor einer erneuten Impulsanregung wurde jedes Common-Rail neu positioniert. Jeder der erwähnten Datensätze beinhaltet ein Zeitsignal jedes verwendeten Common-Rails einer Bauform. Die jeweils erste Resonanzmessung eines Common-Rails wurde dem ersten Datensatz (*M1*) zugeordnet, das zweite Zeitsignal dem zweiten Datensatz (*M2*) und schließlich erfolgte die Zuordnung der dritten Messdurchführung zum dritten Datensatz (*M3*). Die Aufteilung erfolgte analog für die vierte und fünfte Messung der lasergeschweißten Common-Rails. Die Einteilung der Rohdaten in die Datensätze wurde getrennt für beide Common-Rail-Typen durchgeführt, sodass für jede Bauform jeweils die Datensätze *M1* bis *M3* und für lasergeschweißte Common-Rails zusätzlich die Datensätze *M4* und *M5* ausgewertet wurden.

4.6.1.2 Versuchsreihe 2: Versuche mit alternativen Versuchsaufbauten (nur für geschmiedete Common-Rails)

Für die geschmiedeten Common-Rails wurden Messungen mit den in Kapitel 4.3.1 genannten alternativen Versuchsaufbauten durchgeführt. Für die Versuchsaufbauten, bei welchen die Bauteilorientierung, die Position der Impulsanregung oder der Lagerabstand gegenüber dem Standardversuchsaufbau verändert wurden, erfolgte die Messung des abgestrahlten Schalls nach jeweils einmaliger Impulsanregung der Bauteile der Nummern 3 bis 7 beider Au-

tofrettagezustände. Mit einem auf 50 mm vergrößerten Mikrofonabstand wurde darüber hinaus jedes der geschmiedeten Common-Rails einmal geprüft.

Weiterhin wurden Messungen mit variierendem Mikrofonabstand an einem nicht autofrettierten Common-Rail (AF0.2) durchgeführt. Dabei wurden für den Mikrofonabstand folgende Werte gewählt, die in der angegebenen Reihenfolge realisiert wurden: 80 mm, 50 mm, 40 mm, 30 mm, 20 mm, 19 mm, 9 mm sowie 10 mm (Standardversuchsaufbau, siehe Kapitel 4.3.1). Für jede Variation wurde das Common-Rail 20-mal mit dem Impulshammer angeregt und der abgestrahlte Schall aufgezeichnet. Weder zwischen den einzelnen Versuchswiederholungen zu einem Mikrofonabstand noch nach einer Änderung des Abstandes wurde das Bauteil neu positioniert.

4.6.1.3 Versuchsreihe 3: Versuche zum Einfluss des Korrosionsschutzes und zur Analyse relevanter Streuungskomponenten

Direkt an die in Kapitel 4.6.1.2 beschriebenen Versuche schlossen sich weitere Versuche mit einem geschmiedeten Common-Rail an. Es wurden Messungen mit dem Standardversuchsaufbau nach Kapitel 4.3.1 an einem nicht autofrettierten Common-Rail (AF0.2) durchgeführt. Das Common-Rail wurde 20-mal geprüft, wobei nach jedem Anschlag eine Neupositionierung des Bauteils erfolgte. Auf dasselbe Common-Rail wurde daraufhin ein zusätzlicher Korrosionsschutz (handelsübliches WD40) appliziert und anschließend mit Hilfe von Papiertüchern abgerieben, sodass ein dünner Film des Korrosionsschutzes auf der Bauteiloberfläche verblieb. Daraufhin wurde das Bauteil erneut 20-mal mit jeweils vorangegangener Neupositionierung geprüft. Darüber hinaus wurden die Rohdaten aus der 20-maligen Prüfung ohne Neupositionierung des Common-Rails AF0.2 mit dem Standardversuchsaufbau auch dieser Versuchsreihe zugeordnet (siehe Versuchsreihe 2, Kapitel 4.6.1.2).

Ein lasergeschweißtes Common-Rail (AF0.1) wurde jeweils 20-mal vor und nach Aufbringen eines zusätzlichen Korrosionsschutzes geprüft, wobei das Bauteil nach jeder Impulsanregung neu positioniert wurde. Dazu wurde ebenfalls der entsprechende Standardversuchsaufbau verwendet (siehe Kapitel 4.3.2).

4.6.1.4 Versuchsreihe 4: Laservibrometrie

Mittels des in Kapitel 4.2.3 vorgestellten Laservibrometers wurden für jeweils ein nicht autofrettiertes Common-Rail beider Bauformen Messungen durchgeführt. Für beide Bauteile wurden dabei verschiedene Messaufbauten realisiert. Die Positionierung von Messpunkten für die Laservibrometrie erfolgte auf der Bauteilaußenseite sowie auf einer der ringförmigen Stirnflächen der Common-Rails.

4.6.2 Auswertungen der Rohdaten

4.6.2.1 Zeitsignale und Spektren aus der akustischen Resonanzanalyse von Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände

Die Ergebnisse der im Folgenden beschriebenen Auswertungen finden sich in den Kapiteln 5.1.1 und 5.2.1. Zunächst wurden Zeitsignale und daraus resultierende Resonanzspektren der akustischen Resonanzanalyse eines autofrettierten und eines nicht autofrettierten Common-Rails grafisch dargestellt und verglichen. Betrachtet wurde die jeweils erste Resonanzmessung der Bauteile *AF0.2* und *AF1.2* (geschmiedete Common-Rails) sowie *AF0.1* und *AF1.1* (lasergeschweißte Common-Rails) der in Kapitel 4.6.1.1 beschriebenen Versuchsreihe 1. Die DFT der Zeitsignale erfolgte mittels SonicTC.

Mit diesen Auswertungen wurde untersucht, ob bereits über einen einfachen grafischen Vergleich von Zeitsignalen oder Resonanzspektren mit der akustischen Resonanzanalyse Unterschiede zwischen den verfügbaren autofrettierten und nicht autofrettierten Common-Rails erkennbar sind. Das Ziel dieser Auswertungen bestand weiterhin darin, exemplarisch die grundsätzlichen Erscheinungsformen der Zeitsignale und Spektren aufzuzeigen.

4.6.2.2 Experimentelle Suche von Merkmalen zum Autofrettagenachweis

Die Ergebnisse der im Folgenden beschriebenen Auswertungen sind in den Kapiteln 5.1.2 sowie 5.2.2 aufgeführt. Die in Versuchsreihe 1 (siehe Kapitel 4.6.1.1) aufgezeichneten Zeitsignale wurden mit OriginPro ausgewertet (Datensätze *M1* bis *M3* für geschmiedete Common-Rails bzw. Datensätze *M1* bis *M5* für lasergeschweißte Common-Rails). Zunächst wurde für jeden Common-Rail-Typ in Abhängigkeit des Datensatzes *M1* bis *M3* analysiert, wie viele Merkmale zum Nachweis der Autofrettage geeignet sind. Zum einen wurde dabei geprüft, ob es Merkmale gibt, deren Wertebereiche sich nicht für die verfügbaren autofrettierten bzw. nicht autofrettierten Common-Rails überschneiden. Andererseits diente ein Zwei-Stichproben-t-Test der Überprüfung, ob sich die Merkmalswerte der verfügbaren autofrettierten bzw. nicht autofrettierten Common-Rails im Mittel unterscheiden (siehe Kapitel 2.8.2 und 4.5.1). Die zum Autofrettagenachweis geeignetsten Merkmale sind in den Ergebniskapiteln aufgeführt. Die Reihenfolge dieser Merkmale resultiert dabei nach ansteigendem empirischem Signifikanzniveau des Zwei-Stichproben-t-Tests (siehe Kapitel 4.5.1). Abschließend sind die ermittelten (normierten) Werte ausgewählter Merkmale grafisch dargestellt. Hintergrund dieser Betrachtungen war die Aussicht, zum Autofrettagenachweis besonders geeignete Merkmale und Merkmalsarten aufzuspüren.

4.6.2.3 **Mittelung von Merkmalswerten und Untersuchung der Streuung von Merkmalswerten bei mehrmaliger Resonanzanalyse desselben Bauteils**

Die Ergebnisse der im Folgenden beschriebenen Auswertungen sind in den Kapiteln 5.1.3 und 5.2.3 dargestellt. Wie in Kapitel 4.5.3 beschrieben wurde, setzt sich die Streuung von Merkmalswerten mehrerer Common-Rails des gleichen Autofrettagezustands aus verschiedenen Komponenten zusammen. Diese galt es zu analysieren, um so Rückschlüsse auf die Sinnhaftigkeit von wiederholten akustischen Resonanzanalysen desselben Common-Rails mit anschließender Mittelung entsprechender Merkmalswerte zu ziehen. Dazu wurde für geschmiedete Common-Rails die in Kapitel 4.6.1.3 beschriebene Versuchsreihe 3 mit OriginPro ausgewertet. Unter Berücksichtigung des in Kapitel 4.5.3 aufgestellten mathematischen Modells wurde für ausgewählte Merkmale die Gesamtvarianz von Werten mehrerer Bauteile des gleichen Autofrettagezustands in einzelne Komponenten zerlegt. Für die Bestimmung der Gesamtvarianz wurde auf die Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.2 beschriebenen Auswertungen von Versuchsreihe 1 zurückgegriffen. Die durch eine nicht exakt konstante Impulsanregung verursachte Varianzkomponente sowie die Summe aus *Varianz durch Positionierung* und *Varianz durch Anregung* (siehe Kapitel 4.5.3) wurden anhand der aufgezeichneten Daten aus Versuchsreihe 3 (Kapitel 4.6.1.3) ermittelt. Mit Hilfe der Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.2 beschriebenen Auswertungen der Datensätze *M1* bis *M3* aus Versuchsreihe 1 wurden Merkmalswerte aus wiederholten akustischen Resonanzanalysen gemittelt und grafisch veranschaulicht, sodass bewertet werden konnte, ob eine Mittelung die Gesamtstreuung der Werte von Common-Rails des gleichen Autofrettagezustands signifikant reduzierte.

Für lasergeschweißte Common-Rails wurde empirisch der Einfluss einer Mittelung auf die Werte ausgewählter Merkmale untersucht. Dazu wurde auf die Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.2 beschriebenen Auswertungen der Datensätze *M1* bis *M5* aus Versuchsreihe 1 zurückgegriffen. Die Ergebnisse wurden grafisch veranschaulicht und bewertet.

4.6.2.4 **Kombination von Merkmalen**

Die Ergebnisse der im Folgenden beschriebenen Auswertungen finden sich in den Kapiteln 5.1.4 und 5.2.4. Für geschmiedete Common-Rails wurden ausgewählte Merkmalswerte aus den Ergebnissen der in Kapitel 4.6.2.2 beschriebenen Auswertungen des Datensatzes *M1* aus Versuchsreihe 1 mit Hilfe einfacher mathematischer Operatoren verrechnet. Für lasergeschweißte Common-Rails erfolgten analoge Untersuchungen mit gemittelten Merkmalswerten aus den Ergebnissen der in Kapitel 4.6.2.2 beschriebenen Auswertungen der Datensätze *M1* bis *M5* aus Versuchsreihe 1. Außerdem wurden für diesen Bauteiltyp die Werte ausgewählter Merkmale mit Hilfe einer Regressionsrechnung miteinander kombiniert. Die Resulta-

te wurden für ausgewählte Merkmalskombinationen grafisch veranschaulicht und optisch sowie mit Hilfe des empirischen Signifikanzniveaus des Zwei-Stichproben-t-Tests bewertet (vgl. Kapitel 4.5.2). Diese Auswertung diente der Überprüfung, ob eine rechnerische Kombination verschiedener Merkmalswerte aus einer akustischen Resonanzanalyse eines Common-Rails für den Autofrettagenachweis zielführend ist.

4.6.2.5 Einfluss des Korrosionsschutzes

Die Ergebnisse der im Folgenden beschriebenen Auswertungen sind in den Kapiteln 5.1.5 und 5.2.5 dargestellt. Untersuchungen der Firma Bosch haben gezeigt, dass der auf die Common-Rails aufgebrauchte Korrosionsschutz die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse beeinflussen kann [BoschIntern2011]. Zur Bewertung dieses Effekts dienten die Rohdaten der in Kapitel 4.6.1.3 beschriebenen Versuchsreihe 3, die mit OriginPro ausgewertet wurden. Explizit wurden die Werte ausgewählter Merkmale aus jeweils 20-malig durchgeführter akustischer Resonanzanalyse mit bzw. ohne zusätzlichen Bauteilkorrosionsschutz grafisch verglichen. Um den Einfluss des zusätzlichen Korrosionsschutzes relativ zum Effekt, der sich bei der akustischen Resonanzanalyse von autofrettierten im Vergleich zu nicht autofrettierten Bauteilen zeigt, bewerten zu können, wurden sämtliche Werte relativ zueinander abgebildet. Die Merkmalswerte aus der 20-maligen akustischen Resonanzanalyse vor Aufbringen des zusätzlichen Korrosionsschutzes wurden dazu auf den Wert 1 normiert. Die Merkmalswerte, welche sich aus der akustischen Resonanzanalyse nach Aufbringen des zusätzlichen Korrosionsschutzes ergaben, wurden relativ dazu dargestellt. Der mittlere Merkmalswert autofrettierter Common-Rails wurde relativ zum mittleren Merkmalswert nicht autofrettierter Common-Rails bestimmt, wobei dazu auf die gemittelten Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.2 beschriebenen Auswertungen von Versuchsreihe 1 zurückgegriffen wurde.

4.6.2.6 Variation der Auswerteparameter

Die Ergebnisse der im Folgenden beschriebenen Auswertungen sind in den Kapiteln 5.1.6 und 5.2.6 dargestellt. Die zur Auswertung aufgezeichnete Zeitsignale genutzten Einstellungen wurden zuvor festgesetzt (siehe Kapitel 4.4 und Anhang 4). Es wurde untersucht, ob die Variation der Auswerteparameter einen Einfluss auf den Autofrettagenachweis mit akustischer Resonanzanalyse hat. Dazu erfolgte die Neuauswertung der Rohdaten des Datensatzes *M1* aus Versuchsreihe 1 (siehe Kapitel 4.6.1.1) mit OriginPro, wobei verschieden variierte Auswerteeinstellungen zum Einsatz kamen. Es wurden folgende alternative Auswertungen durchgeführt: Die Zeitsignale wurden zunächst ohne Verwendung von manuellem Zero-Padding fouriertransformiert und die Peaks der resultierenden Resonanzspektren analysiert. Alternativ wurden die mit der DFT gebildeten Spektren quadriert. Die Peaks im so gebildeten

Leistungsspektrum wurden mit OriginPro analysiert (Unterschied zwischen Amplituden- und Leistungsspektrum: siehe Kapitel 2.4.2). Zuletzt erfolgte eine Variation des ausgewerteten Anteils der Zeitsignale. Grundsätzlich wurde in dieser Arbeit immer die gesamte Messdauer von 1200 ms fouriertransformiert und schließlich weiterverarbeitet (siehe Kapitel 4.4). Für diese Auswertungen wurden folgende Zeitausschnitte betrachtet, wobei hier zusätzliches Zero-Padding so durchgeführt wurde, dass immer dieselbe Signallänge und dieselbe damit gekoppelte Auflösung im Resonanzspektrum vorlag (siehe Kapitel 2.3 und 4.4):

- 60 ms bis 300 ms
- 120 ms bis 600 ms
- 300 ms bis 600 ms
- 300 ms bis 900 ms

Die Bewertung der Resultate dieser Auswertungen erfolgte analog zur in Kapitel 4.6.2.2 beschriebenen Analyse der mit Standardeinstellungen ermittelten Merkmalswerte. So konnten die Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.2 beschriebenen Auswertungen mit den Ergebnissen dieser Auswertungen verglichen werden. Zusätzlich wurden ausgewählte Merkmalswerte grafisch mit den entsprechenden Merkmalswerten aus den in Kapitel 4.6.2.2 beschriebenen Auswertungen (mit Standardauswerteeinstellungen) verglichen.

4.6.2.7 Vergleich der Merkmalsart Halbwertsbreite mit weiteren Merkmalsarten

Die Ergebnisse der im Folgenden beschriebenen Auswertungen finden sich in den Kapiteln 5.1.7 und 5.2.7. Die Firma Bosch konnte die Autofrettage von geschmiedeten Common-Rails mittels der frequenzselektiven Dämpfung von bestimmten Resonanzen nachweisen [BoschIntern2011]. Daher wurde untersucht, ob zwei weitere, bisher nicht verwendete Merkmalsarten zum Nachweis der Autofrettage geeignet sind. Auch für diese Auswertungen erfolgte eine erneute Analyse des Datensatzes *M1* aus Versuchsreihe 1 (siehe Kapitel 4.6.1.1). Die Verarbeitung der Zeitsignale wurde mit SonicTC hinsichtlich der in Kapitel 4.2.4.2 genannten Merkmalsarten durchgeführt. Auch für die alternativen Merkmale wurden Variationen des ausgewerteten Ausschnittes der Zeitsignale durchgeführt, um nach Möglichkeit die mit SonicTC bestimmten Merkmale für den Autofrettagenachweis zu optimieren (vgl. Variation der Auswerteparameter, Kapitel 4.6.2.6). Die Ergebnisse von SonicTC wurden analog zu den in Kapitel 4.6.2.2 beschriebenen Auswertungen des Datensatzes *M1* aus Versuchsreihe 1 bewertet. Weiterhin wurden ausgewählte alternative Merkmalswerte mit den Ergebnissen der in Kapitel 4.6.2.2 beschriebenen Vorgehensweise grafisch verglichen.

4.6.2.8 Eigenmoden der Common-Rails

Die Ergebnisse der im Folgenden beschriebenen Auswertungen sind in den Kapiteln 5.1.8 und 5.2.8 aufgeführt. Da die aus der akustischen Resonanzanalyse bestimmbaren Merkmale immer gewissen Peaks bei bestimmten Resonanzfrequenzen und diese wiederum bestimmten Eigenschwingungsformen zugeordnet werden können, soll der Versuchsaufbau bei der akustischen Resonanzanalyse so gestaltet werden, dass eben solche Resonanzfrequenzen gezielt angeregt werden, deren Peaks eine optimale Unterscheidung verschiedener Autofrettagezustände erlauben. Die Fragestellung besteht im Wesentlichen darin, ob die zur Unterscheidung der Autofrettagezustände geeigneten Merkmale immer zu Resonanzpeaks bestimmter Modenformen gehören, oder ob zwischen geeigneten Merkmalen und den entsprechenden Eigenschwingungsformen der Common-Rails kein Zusammenhang besteht. In den Ergebniskapiteln sind grafische Resultate von Messungen mit einem Laservibrometer (Kapitel 4.6.1.4) aufgeführt. Ausgewählten Peaks wurden die entsprechenden Eigenschwingungsformen zugeordnet.

4.6.2.9 Einfluss von Variationen im Versuchsaufbau (nur Common-Rail-Typ HFR)

Die Ergebnisse der im Folgenden beschriebenen Auswertungen sind in Kapitel 5.1.9 dargestellt. In undokumentierten Vorversuchen wurde festgestellt, dass der Mikrofonabstand neben den bereits diskutierten Nahfeldeinflüssen (siehe Kapitel 3.2) möglicherweise einen entscheidenden Einfluss auf die Nachweisbarkeit der Autofrettage nimmt. Konkret wurde beobachtet, dass der Mikrofonabstand einen Einfluss auf die Streuung von Werten hat, welche sich aus der mehrmaligen Messung eines Bauteils ohne Neupositionierung ergeben (*Varianz durch Anregung* im mathematischen Modell aus Kapitel 4.5.3). Die in Versuchsreihe 2 (Kapitel 4.6.1.2) aufgezeichneten Zeitsignale des Bauteils *AF0.2* – den Mikrofonabstand betreffend – wurden dazu mit OriginPro ausgewertet und die ermittelten Werte ausgewählter Merkmale in Abhängigkeit des Mikrofonabstands dargestellt. Zusätzlich wurden die Ergebnisse von Resonanzmessungen mit dem Mikrofonabstand 50 mm mit den Ergebnissen der in Kapitel 4.6.2.2 beschriebenen Auswertungen des Datensatzes *M1* aus Versuchsreihe 1 (Standardversuchsaufbau mit dem Mikrofonabstand 10 mm) verglichen.

Weiterhin konnte bereits in Kapitel 3 gezeigt werden, dass neben dem Mikrofonabstand auch weitere Parameter des Versuchsaufbaus einen Einfluss auf die akustische Resonanzanalyse – vor allem im Hinblick auf die Detektierbarkeit von Resonanzpeaks – haben. Die Rohdaten der in Kapitel 4.6.1.2 beschriebenen Versuchsreihe 2, die mit den alternativen Versuchsaufbauten 2 bis 4 (siehe Kapitel 4.3.1) aufgezeichnet wurden, wurden mit OriginPro ausgewertet. Mit Hilfe dieser Ergebnisse wurde überprüft, ob durch die Verwendung alter-

nativer Versuchsanordnungen zusätzliche zum Autofrettagenachweis geeignete Merkmale gefunden werden können. Außerdem wurde grafisch ausgewertet, ob der Versuchsaufbau bei der akustischen Resonanzanalyse einen Einfluss auf die Nachweisbarkeit der Autofrettagelage hat. Dazu wurden die Ergebnisse dieser Auswertungen mit den Ergebnissen der in Kapitel 4.6.2.2 beschriebenen Auswertungen des Datensatzes *M1* aus Versuchsreihe 1 (Standardversuchsaufbau) verglichen.

5 Ergebnisse der Untersuchungen an realen Testkörpern

In den folgenden Diagrammen sind die zu Schalldruck und Schalldruckamplitude proportionalen Spannungsgrößen dargestellt. Die absoluten Werte der akustischen Größen sind vorerst nicht relevant. Zusätzlich dazu sind die in den Diagrammen veranschaulichten Werte in der Regel normiert dargestellt (siehe Kapitel 4.5.2).

Während der Durchführung der Versuchsreihen (siehe Kapitel 4.6.1) mit den Common-Rails beider Bauformen wurden die Umgebungsbedingungen Temperatur sowie Luftfeuchte in ca. 30-minütigen Abständen messtechnisch erfasst und protokolliert. Die Größenordnungen dieser potentiellen Störeinflüsse blieben während der Versuchsreihen weitestgehend konstant. Die Schwankungen lagen bei weniger als zwei Grad Celsius bzw. weniger als fünf Prozent Luftfeuchte.

In den folgenden Auswertungen wurden lediglich solche Peaks in Spektren der akustischen Resonanzanalyse ausgewertet, die bei jeder – zu einer Auswertung genutzten – akustischen Resonanzanalyse detektiert werden konnten. Dies hat zur Folge, dass nicht in jeder der aufgeführten Auswertungen dieselben Merkmale betrachtet wurden.

5.1 Ergebnisse für geschmiedete Common-Rails (HFR)

5.1.1 Zeitsignale und Spektren aus der akustischen Resonanzanalyse von Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände

Im Folgenden werden die Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.1 beschriebenen Auswertungen für geschmiedete Common-Rails aufgeführt. Abb. 5-1 bzw. Abb. 5-2 zeigen zeitabhängige, vom Mikrofon aufgezeichnete Schalldruckverläufe, welche sich nach einer jeweils einmaligen Impulsanregung der geschmiedeten Common-Rails mit den Bezeichnungen *AF0.2* und *AF1.2* ausbildeten, bzw. daraus resultierende Spektren in linearer und logarithmischer Darstellung.

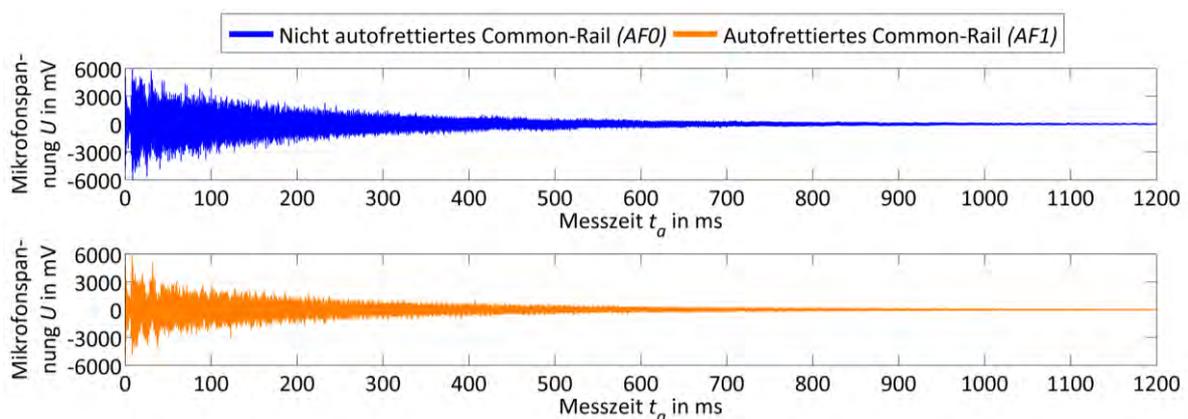


Abb. 5-1: Darstellung typischer zeitabhängiger Schalldruckverläufe nach Impulsanregung geschmiedeter Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* bzw. *AF1*

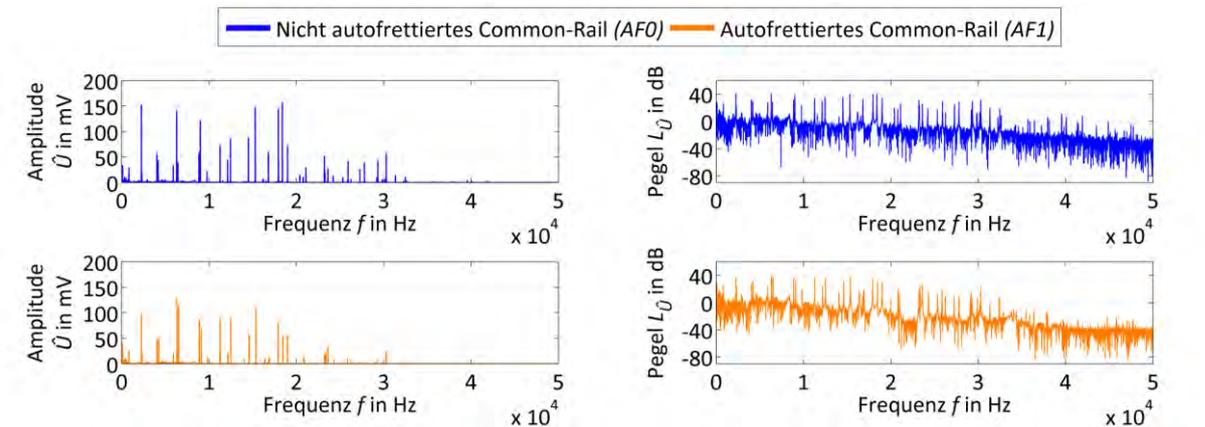


Abb. 5-2: Darstellung typischer Resonanzspektren aus der akustischen Resonanzanalyse geschmiedeter Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* bzw. *AF1* (lineare und logarithmische Darstellung)

Zwischen den aufgezeichneten Zeitsignalen sowie den Amplituden verschiedener Peaks in den Spektren sind Unterschiede erkennbar. Beim Vergleich von Zeitsignalen und Spektren aus der akustischen Resonanzanalyse verschiedener geschmiedeter Common-Rails desselben Autofrettagezustands zeigen sich vergleichbare Differenzen. Die Amplituden der Peaks in den Spektren nehmen oberhalb von 20 kHz deutlich ab. In der linearen Darstellung sind oberhalb von ca. 31 kHz keine nennenswerten Peaks mehr erkennbar.

5.1.2 Experimentelle Suche von Merkmalen zum Autofrettagenachweis

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse basieren auf den in Kapitel 4.6.2.2 beschriebenen Auswertungen für geschmiedete Common-Rails. Die Datensätze *M1* bis *M3* aus Versuchsreihe 1 (siehe Kapitel 4.6.1.1), die jeweils ein Zeitsignal der akustischen Resonanzanalyse jedes verwendeten Common-Rails des Typs HFR enthalten, wurden getrennt analysiert. Die Anzahl der zur Unterscheidung der verfügbaren Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände geeigneten Merkmale ist anhand von Tab. 5-1 in Abhängigkeit des Merkmalstyps, des zur Bewertung verwendeten Kriteriums und des ausgewerteten Datensatzes dargestellt. Zusätzlich ist der prozentuale Anteil der geeigneten Merkmale, bezogen auf die Gesamtanzahl aller ausgewerteten Merkmale, angegeben. Es ist erkennbar, dass potentiell alle verwendeten Merkmalsarten die Unterscheidung der verfügbaren Common-Rails unterschiedlicher Autofrettagezustände erlauben. Jedoch sind nur Merkmale der Arten *FWHM* (Halbwertsbreite), *Left Half Width* sowie *Right Half Width* (linke bzw. rechte halbe Breite) zur eindeutigen Unterscheidung der konkreten geschmiedeten Common-Rails der Autofrettagezustände *AF0* bzw. *AF1* ohne Überschneidungen der entsprechenden Werte geeignet. Die Halbwertsbreite von Peaks stellte sich bei den Untersuchungen als die geeignetste Merkmalsart heraus, da die größte Anzahl der zum Autofrettagenachweis geeigneten Merkmale (unabhängig vom Bewertungskriterium) dieser Merkmalsart zuzuordnen ist.

Tab. 5-1: Übersicht über die Anzahl der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren geschmiedeten Common-Rails (HFR) potentiell geeigneten Merkmale (getrennt nach Arten, Bewertungskriterien und Datensätzen)

Art des Merkmals	Bewertungskriterium					
	Autofrettagenachweis durch signifikanten Zwei-Stichproben-t-Test			Autofrettagenachweis ohne Überschneidung der Werte		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3
<i>Center (Impulszentrum)</i>	8	9	9	0	0	0
<i>FWHM (Halbwertsbreite)</i>	20	23	21	9	11	11
<i>Left Half Width (Linke halbe Breite)</i>	17	21	19	5	8	7
<i>Right Half Width (Rechte halbe Breite)</i>	18	20	19	6	5	6
<i>Area (Impulsbereich)</i>	9	11	10	0	0	0
<i>AreaIntP(%) (Prozentbereich)</i>	10	12	11	0	0	0
<i>Height (Impulshöhe)</i>	7	11	9	0	0	0
<i>Centroid (Impulszentrum)</i>	8	8	9	0	0	0
Summe geeigneter Merkmale	97	115	107	20	24	24
Anzahl ausgewerteter Peaks	27	28	27	27	28	27
Anzahl ausgewerteter Merkmale	216	224	216	216	224	216
Prozentualer Anteil geeigneter Merkmale	44,9 %	51,3 %	49,5 %	9,3 %	10,7 %	11,1 %

Die Auflistung in Tab. 5-2 enthält die zum Autofrettagenachweis der verfügbaren geschmiedeten Common-Rails geeignetsten Merkmale in Abhängigkeit des ausgewerteten Datensatzes *M1* bis *M3*. Je niedriger der dort aufgeführte p-Wert (empirisches Signifikanzniveau) ist, desto eindeutiger unterscheiden sich die mit akustischer Resonanzanalyse ermittelten Merkmalswerte von Common-Rails der Autofrettagezustände *AFO* und *AF1* im Mittel (auf Basis der Auswertungen mit einem Zwei-Stichproben-t-Test). Die geeignetsten Merkmale lassen sich ausschließlich den Arten *FWHM* (Halbwertsbreite) sowie *Left Half Width* bzw. *Right Half Width* (linke bzw. rechte halbe Breite) zuordnen. Auffällig ist, dass gewisse Peaks (z. B. der Peak bei ca. 27.800 Hz) mehrere geeignete – wenn auch eindeutig miteinander verknüpfte – Merkmale zur Unterscheidung der Common-Rails unterschiedlicher Autofrettagezustände aufweisen. Alle Merkmale, deren Werte von autofrettierten bzw. nicht autofrettierten Common-Rails sich nicht überschneiden, sind grün hinterlegt.

Tab. 5-3 listet die zum Autofrettagenachweis der verfügbaren geschmiedeten Common-Rails geeignetsten Halbwertsbreiten von Resonanzpeaks auf. Die Rangfolge ergibt sich wiederum aus dem aufsteigenden empirischen Signifikanzniveau des Zwei-Stichproben-t-Tests. Grün hinterlegte Merkmale geben an, dass anhand der Messwerte die Unterscheidung der ver-

fürbaren Common-Rails der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* ohne Überschneidungen gegeben ist. Es ist ersichtlich, dass im Wesentlichen dieselben Halbwertsbreiten – unabhängig vom ausgewerteten Datensatz – für den Autofrettagenachweis geeignet sind. Daher wurden im weiteren Verlauf der Arbeit die entsprechenden Halbwertsbreiten näher betrachtet und weitere Merkmale außen vor gelassen.

Tab. 5-2: Auflistung der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren geschmiedeten Common-Rails (HFR) geeigneten Merkmale in Abhängigkeit des ausgewerteten Datensatzes (*LHW* = *Left Half Width*, *RHW* = *Right Half Width*)

Potentiell zum Autofrettagenachweis geeignete Merkmale und mit den Merkmalswerten bestimmte empirische Signifikanzniveaus (p-Werte) aus einem Zwei-Stichproben-t-Test						
Rang	Merkmal (M1)	p-Wert (M1)	Merkmal (M2)	p-Wert (M2)	Merkmal (M3)	p-Wert (M3)
1	<i>FWHM 20800</i>	$1,43 \cdot 10^{-8}$	<i>FWHM 20800</i>	$2,36 \cdot 10^{-9}$	<i>FWHM 12500</i>	$1,75 \cdot 10^{-8}$
2	<i>FWHM 27800</i>	$2,30 \cdot 10^{-8}$	<i>FWHM 12500</i>	$2,14 \cdot 10^{-8}$	<i>LHW 12500</i>	$1,82 \cdot 10^{-8}$
3	<i>FWHM 12500</i>	$5,24 \cdot 10^{-8}$	<i>FWHM 27800</i>	$3,09 \cdot 10^{-8}$	<i>RHW 27800</i>	$2,33 \cdot 10^{-8}$
4	<i>FWHM 25900</i>	$1,12 \cdot 10^{-7}$	<i>LHW 20800</i>	$4,70 \cdot 10^{-8}$	<i>FWHM 26200</i>	$6,28 \cdot 10^{-8}$
5	<i>FWHM 26200</i>	$2,76 \cdot 10^{-7}$	<i>RHW 12500</i>	$8,95 \cdot 10^{-8}$	<i>FWHM 27800</i>	$1,15 \cdot 10^{-7}$
6	<i>RHW 20800</i>	$3,24 \cdot 10^{-7}$	<i>FWHM 25900</i>	$1,06 \cdot 10^{-7}$	<i>FWHM 25900</i>	$2,98 \cdot 10^{-7}$
7	<i>LHW 18400</i>	$3,26 \cdot 10^{-7}$	<i>FWHM 18400</i>	$2,70 \cdot 10^{-7}$	<i>FWHM 18400</i>	$3,36 \cdot 10^{-7}$
8	<i>LHW 27800</i>	$4,14 \cdot 10^{-7}$	<i>LHW 27800</i>	$4,05 \cdot 10^{-7}$	<i>FWHM 20800</i>	$4,13 \cdot 10^{-7}$
9	<i>RHW 27800</i>	$5,20 \cdot 10^{-7}$	<i>RHW 20800</i>	$5,54 \cdot 10^{-7}$	<i>FWHM 17900</i>	$1,85 \cdot 10^{-6}$
10	<i>FWHM 18400</i>	$5,36 \cdot 10^{-7}$	<i>FWHM 17900</i>	$1,49 \cdot 10^{-6}$	<i>LHW 26200</i>	$2,09 \cdot 10^{-6}$

Tab. 5-3: Auflistung der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren geschmiedeten Common-Rails (HFR) geeigneten Halbwertsbreiten in Abhängigkeit des ausgewerteten Datensatzes

Potentiell zum Autofrettagenachweis geeignete Halbwertsbreiten und mit den Merkmalswerten bestimmte empirische Signifikanzniveaus (p-Werte) aus einem Zwei-Stichproben-t-Test						
Rang	Merkmal (M1)	p-Wert (M1)	Merkmal (M2)	p-Wert (M2)	Merkmal (M3)	p-Wert (M3)
1	<i>FWHM 20800</i>	$1,43 \cdot 10^{-8}$	<i>FWHM 20800</i>	$2,36 \cdot 10^{-9}$	<i>FWHM 12500</i>	$1,75 \cdot 10^{-8}$
2	<i>FWHM 27800</i>	$2,30 \cdot 10^{-8}$	<i>FWHM 12500</i>	$2,14 \cdot 10^{-8}$	<i>FWHM 26200</i>	$6,28 \cdot 10^{-8}$
3	<i>FWHM 12500</i>	$5,24 \cdot 10^{-8}$	<i>FWHM 27800</i>	$3,09 \cdot 10^{-8}$	<i>FWHM 27800</i>	$1,15 \cdot 10^{-7}$
4	<i>FWHM 25900</i>	$1,12 \cdot 10^{-7}$	<i>FWHM 25900</i>	$1,06 \cdot 10^{-7}$	<i>FWHM 25900</i>	$2,98 \cdot 10^{-7}$
5	<i>FWHM 26200</i>	$2,76 \cdot 10^{-7}$	<i>FWHM 18400</i>	$2,70 \cdot 10^{-7}$	<i>FWHM 18400</i>	$3,36 \cdot 10^{-7}$
6	<i>FWHM 18400</i>	$5,36 \cdot 10^{-7}$	<i>FWHM 17900</i>	$1,49 \cdot 10^{-6}$	<i>FWHM 20800</i>	$4,13 \cdot 10^{-7}$
7	<i>FWHM 17900</i>	$1,29 \cdot 10^{-6}$	<i>FWHM 27200</i>	$2,54 \cdot 10^{-6}$	<i>FWHM 17900</i>	$1,85 \cdot 10^{-6}$
8	<i>FWHM 27200</i>	$4,05 \cdot 10^{-6}$	<i>FWHM 26200</i>	$4,43 \cdot 10^{-6}$	<i>FWHM 27200</i>	$4,75 \cdot 10^{-6}$
9	<i>FWHM 15300</i>	$2,11 \cdot 10^{-5}$	<i>FWHM 32400</i>	$6,83 \cdot 10^{-6}$	<i>FWHM 5900</i>	$6,55 \cdot 10^{-6}$
10	<i>FWHM 14500</i>	$3,21 \cdot 10^{-5}$	<i>FWHM 15300</i>	$1,34 \cdot 10^{-5}$	<i>FWHM 15300</i>	$2,26 \cdot 10^{-5}$

Im Folgenden sind exemplarisch die ermittelten Halbwertsbreiten ausgewählter Peaks grafisch dargestellt (Abb. 5-3). Die verwendeten Werte basieren auf der Auswertung des Datensatzes *M1* aus Versuchsreihe 1 (siehe Kapitel 4.6.1.1). Für keines der dargestellten Merkmale sind Überschneidungen zwischen den zu autofrettierten bzw. nicht autofrettierten Common-Rails gehörenden Werten zu beobachten. Auffällig ist, dass die Werte der autofrettierten Bauteile Nummer 8 und 9 (*AF1.8* und *AF1.9*) für jedes Merkmal höher als die entsprechenden Werte aller anderen autofrettierten Common-Rails liegen.

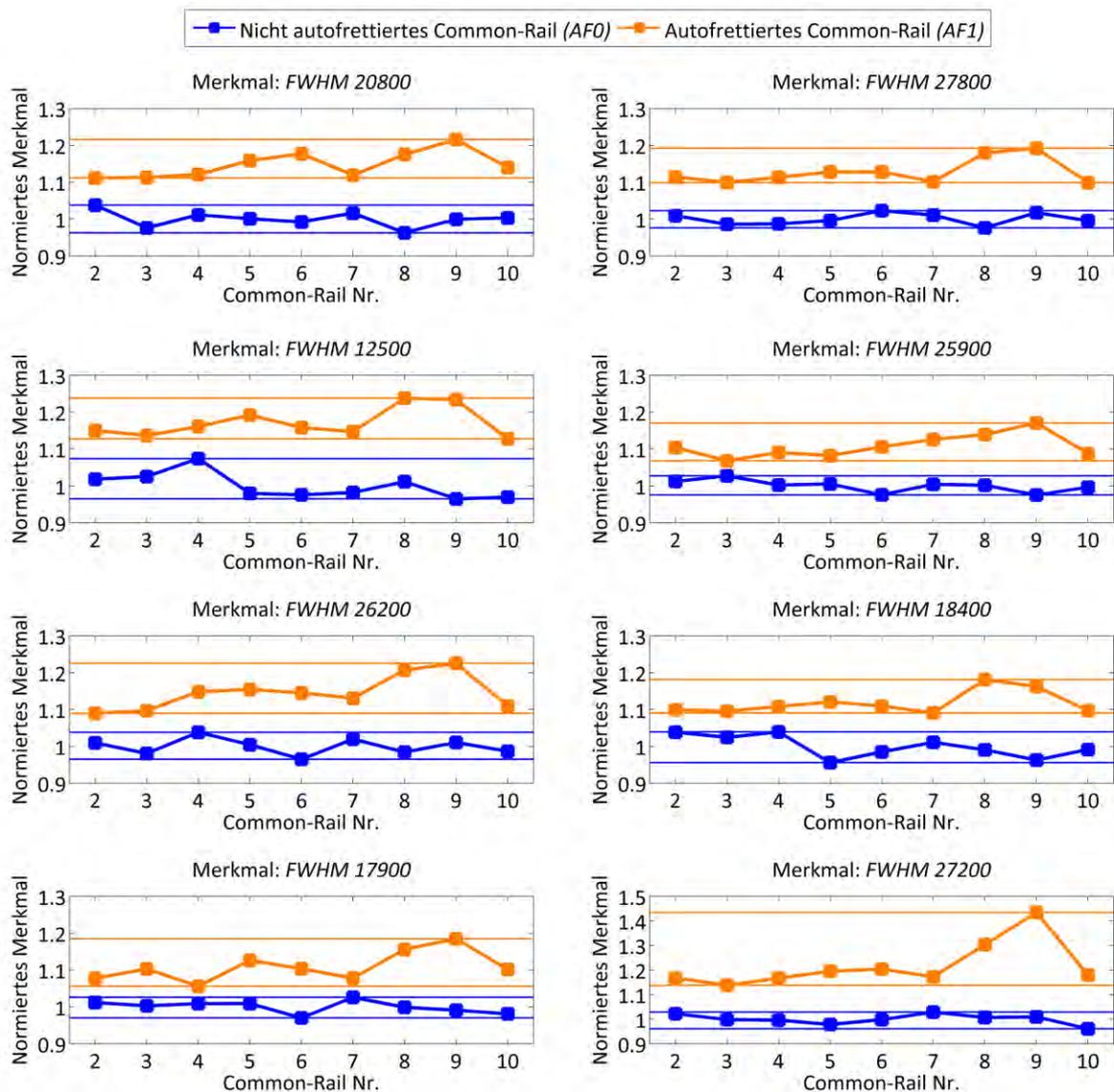


Abb. 5-3: Darstellung normierter Werte ausgewählter Merkmale für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

Hohe Merkmalswerte der Common-Rails mit den Bezeichnungen *AF1.8* und *AF1.9* sind für die meisten der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren Bauteile geeigneten Merkmale der Arten *FWHM* (Halbwertsbreite), *Left Half Width* sowie *Right Half Width* (linke bzw. rech-

te halbe Breite) zu erkennen. Ausnahmen stellen z. B. die Merkmale *FWHM 5900* und *Right Half Width 12500* dar, wobei für ersteres allerdings Überschneidungen der Werte zu beobachten sind (Abb. 5-4, Werte aus der Auswertung des Datensatzes *M1*).

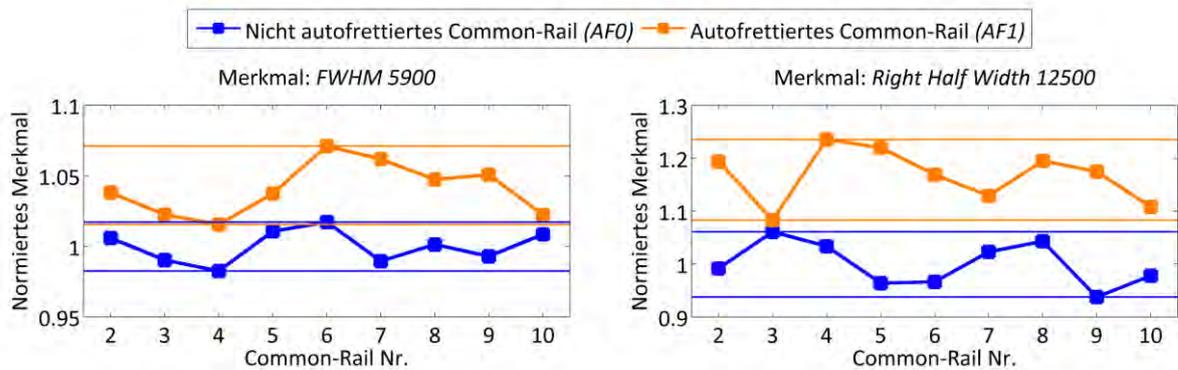


Abb. 5-4: Darstellung normierter Werte der Merkmale *FWHM 5900* und *Right Half Width 12500* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

Abschließend sind in Abb. 5-5 die ermittelten Werte der Merkmale *FWHM 20800* und *FWHM 27200* grafisch verglichen. Dabei ist ersichtlich, dass die Werte des Merkmals *FWHM 27200* relativ bewertet deutlicher auf die durchgeführte Autofrettage reagieren. Jedoch streuen die Werte dieses Merkmals für Bauteile des gleichen Autofrettagezustands stärker. Das Merkmal *FWHM 20800* ist laut empirischem Signifikanzniveau des Zwei-Stichproben-t-Tests das zum Autofrettagenachweis geeignetere Merkmal (siehe Tab. 5-3, 1. Spalte), da das Verhältnis zwischen Mittelwertsdifferenz und Streuung günstiger ist.

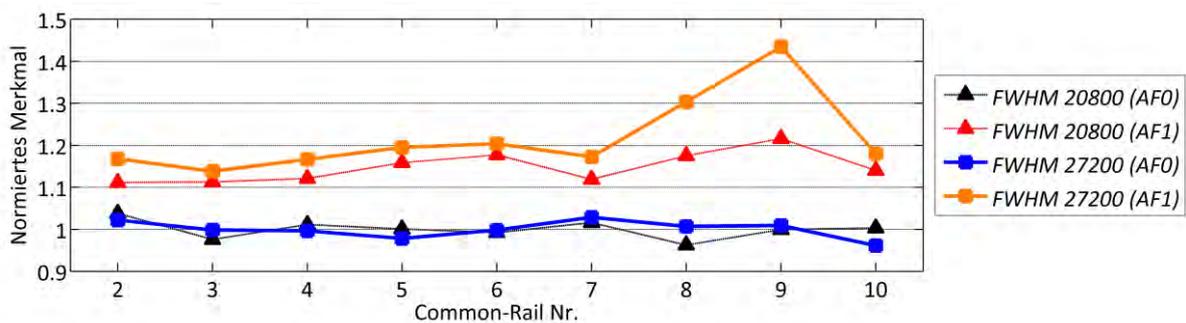


Abb. 5-5: Darstellung normierter Werte der Merkmale *FWHM 20800* und *FWHM 27200* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

5.1.3 Mittelung von Merkmalswerten und Untersuchung der Streuung von Merkmalswerten bei mehrmaliger Resonanzanalyse desselben Bauteils

In diesem Kapitel sind Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.3 beschriebenen Auswertungen für geschmiedete Common-Rails dargestellt. In Tab. 5-1 sind die Gesamtvarianzen sowie relevante Varianzkomponenten von Merkmalswerten der akustischen Resonanzanalyse verschiedener

nicht autofrettierter Common-Rails aufgeführt. Dabei wurden einige der Komponenten aus Ergebnissen der akustischen Resonanzanalyse bestimmt und daraus weitere mit Hilfe eines Modells (siehe Zusammenhang (4-5) in Kapitel 4.5.3) errechnet. Einige der Varianzen sind negativ.

Tab. 5-4: Auflistung der Gesamtvarianz sowie deren Varianzkomponenten für Werte der akustischen Resonanzanalyse mehrerer geschmiedeter Common-Rails (HFR) des gleichen Autofrettagezustands in Abhängigkeit des Merkmals (absolute Werte)

Merkmal	Gesamtvarianz und Teilvarianzen (alle Werte in der Einheit Hz ²)				
	Mit Werten der akustischen Resonanzanalyse berechnet (Anzahl Messwerte zur Berechnung)			Mit Hilfe des mathematischen Modells errechnet	
	Gesamtvarianz (9)	Varianz durch Positionierung und Anregung (20)	Varianz durch Anregung (20)	Varianz zwischen Bauteilen	Varianz durch Positionierung
<i>FWHM 12500</i>	$3,19 \cdot 10^{-3}$	$1,70 \cdot 10^{-5}$	$5,14 \cdot 10^{-6}$	$3,17 \cdot 10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{-5}$
<i>FWHM 14500</i>	$1,41 \cdot 10^{-3}$	$4,62 \cdot 10^{-4}$	$2,93 \cdot 10^{-4}$	$9,47 \cdot 10^{-4}$	$1,69 \cdot 10^{-4}$
<i>FWHM 17900</i>	$2,90 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$3,62 \cdot 10^{-4}$	$1,54 \cdot 10^{-3}$	$9,97 \cdot 10^{-4}$
<i>FWHM 18400</i>	$5,11 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-4}$	$3,60 \cdot 10^{-6}$	$5,01 \cdot 10^{-3}$	$9,78 \cdot 10^{-5}$
<i>FWHM 20800</i>	$4,21 \cdot 10^{-3}$	$1,24 \cdot 10^{-3}$	$7,92 \cdot 10^{-4}$	$2,97 \cdot 10^{-3}$	$4,49 \cdot 10^{-4}$
<i>FWHM 25900</i>	$4,16 \cdot 10^{-3}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$	$1,60 \cdot 10^{-3}$	$2,70 \cdot 10^{-3}$	$-1,46 \cdot 10^{-4}$
<i>FWHM 26200</i>	$1,00 \cdot 10^{-2}$	$1,30 \cdot 10^{-2}$	$4,14 \cdot 10^{-3}$	$-2,97 \cdot 10^{-3}$	$8,84 \cdot 10^{-3}$
<i>FWHM 27200</i>	$5,37 \cdot 10^{-3}$	$2,47 \cdot 10^{-4}$	$5,06 \cdot 10^{-4}$	$5,12 \cdot 10^{-3}$	$-2,59 \cdot 10^{-4}$

Die in Tab. 5-1 aufgeführten Varianzkomponenten sind im Folgenden für zwei ausgewählte Merkmale durch Messergebnisse grafisch veranschaulicht, wobei sämtliche Mittelwerte jeder Gruppe linear auf den Ursprung verschoben wurden. Die in Abb. 5-6 dargestellten Messwerte ergaben sich aus der jeweils einmaligen akustischen Resonanzanalyse jedes verfügbaren geschmiedeten Common-Rails (blaue Kurve) sowie aus der 20-maligen akustischen Resonanzanalyse eines Common-Rails mit (grüne Kurve) bzw. ohne (orangene Kurve) Neupositionierung zwischen den Versuchswiederholungen.

Die linke Hälfte von Abb. 5-6 zeigt, dass die Streuung der Werte des Merkmals *FWHM 12500* bei mehrmaliger akustischer Resonanzanalyse eines Bauteils gering gegenüber der Wertestreuung bei der akustischen Resonanzanalyse verschiedener Common-Rails war. Für das Merkmal *FWHM 26200* ist die bei Messwiederholungen an einem Common-Rail beobachtete Streuung der Werte groß im Verhältnis zur Streuung der Werte bei der akustischen Resonanzanalyse verschiedener Bauteile (Abb. 5-6, rechts).

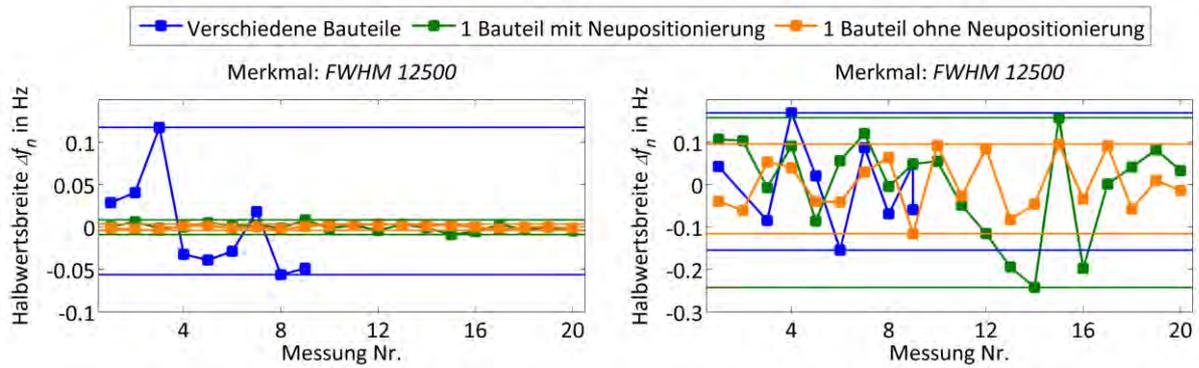


Abb. 5-6: Darstellung der Streuungskomponenten der Merkmale *FWHM 12500* und *FWHM 26200* bei der akustischen Resonanzanalyse verschiedener geschmiedeter Common-Rails (HFR) sowie bei mehrmaliger akustischer Resonanzanalyse desselben Bauteils mit und ohne vorangegangener Neupositionierung

Da die absoluten Varianzwerte aus Tab. 5-4 unkomfortabel zu vergleichen sind, sind sie in Tab. 5-5 als prozentuale Anteile der Gesamtvarianzen angegeben. Auch hier sind einige der ermittelten Varianzen negativ bzw. größer als 100 %. Es ist ersichtlich, dass die Komponente *Varianz zwischen Bauteilen* in Abhängigkeit des Merkmals einen großen Anteil an der Gesamtstreuung ausmachen kann (z. B. für die Merkmale *FWHM 12500* und *FWHM 18400*). Für andere Merkmale dagegen sind die durch Neupositionierung und Impulsanregung verursachten Varianzanteile nicht zu vernachlässigen (z. B. für die Merkmale *FWHM 17900* und *FWHM 26200*), aber können gegebenenfalls durch Mittelungen reduziert werden.

Tab. 5-5: Auflistung der Gesamtvarianz sowie deren Varianzkomponenten für Werte der akustischen Resonanzanalyse mehrerer geschmiedeter Common-Rails (HFR) des gleichen Autofrettagezustands in Abhängigkeit des Merkmals (prozentuale Anteile)

Merkmal	Gesamtvarianz und Teilvarianzen (prozentuale Anteile)				
	Aus Merkmalswerten der akustischen Resonanzanalyse berechnet (Anzahl Messwerte zur Berechnung)			Mit Hilfe des mathematischen Modells errechnet	
	Gesamtvarianz (9)	Varianz durch Positionierung und Anregung (20)	Varianz durch Anregung (20)	Varianz zwischen Bauteilen	Varianz durch Positionierung
<i>FWHM 12500</i>	100,0 %	0,5 %	0,2 %	99,5 %	0,4 %
<i>FWHM 14500</i>	100,0 %	32,8 %	20,8 %	67,2 %	12,0 %
<i>FWHM 17900</i>	100,0 %	46,9 %	12,5 %	53,1 %	34,4 %
<i>FWHM 18400</i>	100,0 %	2,0 %	0,1 %	98,0 %	1,9 %
<i>FWHM 20800</i>	100,0 %	29,5 %	18,8 %	70,5 %	10,7 %
<i>FWHM 25900</i>	100,0 %	35,0 %	38,5 %	65,0 %	-3,5 %
<i>FWHM 26200</i>	100,0 %	129,6 %	41,3 %	-29,6 %	88,3 %
<i>FWHM 27200</i>	100,0 %	4,6 %	9,4 %	95,4 %	-4,8 %

Wurden die Ergebnisse aus dreifach wiederholter akustischer Resonanzanalyse gemittelt, ist ersichtlich, dass in Abhängigkeit des Merkmals eine Mittelung einen geringen Einfluss auf die Merkmalswerte haben kann. Exemplarisch sind die Einzelwerte sowie die daraus gemittelten Werte der Merkmale *FWHM 12500* und *FWHM 18400* als Beispiele für Merkmale, bei welchen eine Mittelung keine signifikante Veränderung verursachte, in Abb. 5-7 bzw. Abb. 5-8 dargestellt. Im Gegensatz dazu stellen die in Abb. 5-9 und Abb. 5-10 gezeigten Verläufe gemittelte Werte der Merkmale *FWHM 17900* und *FWHM 26200* dar, für die eine Mittelung mehrerer Werte die Streuung zwischen verschiedenen Bauteilen reduzierte und damit die Unterscheidung der verfügbaren Bauteile verschiedener Autofrettagezustände verbesserte.

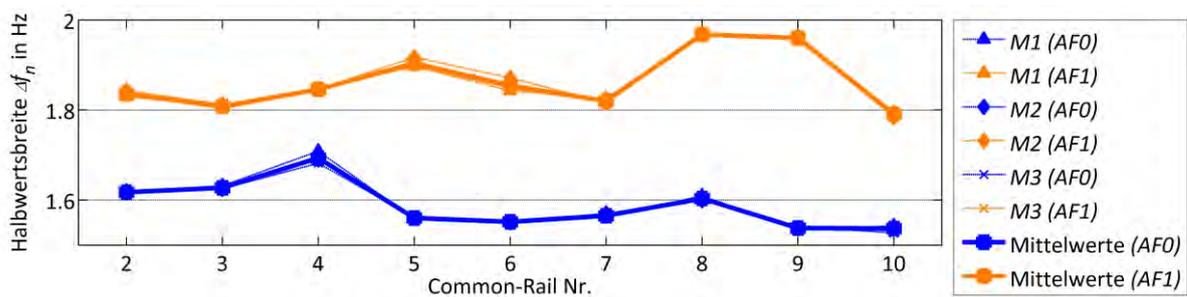


Abb. 5-7: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals *FWHM 12500* aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie entsprechender Mittelwerte für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

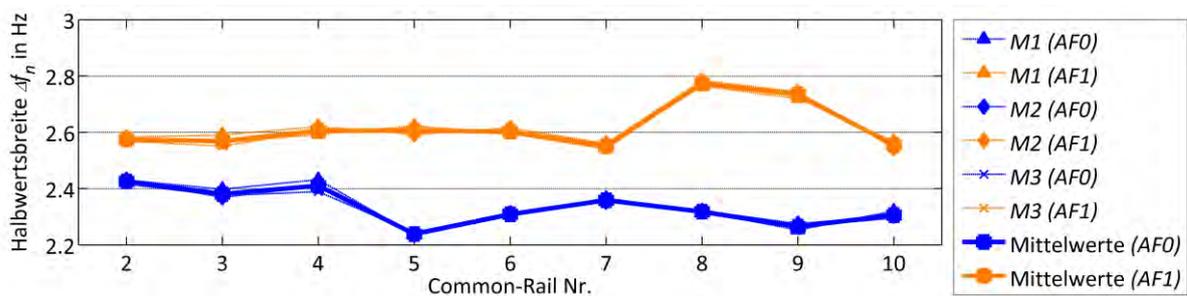


Abb. 5-8: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals *FWHM 18400* aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie entsprechender Mittelwerte für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

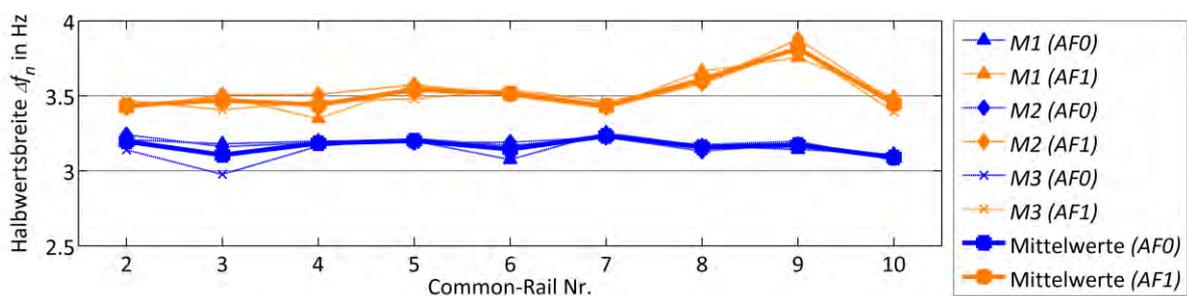


Abb. 5-9: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals *FWHM 17900* aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie entsprechender Mittelwerte für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

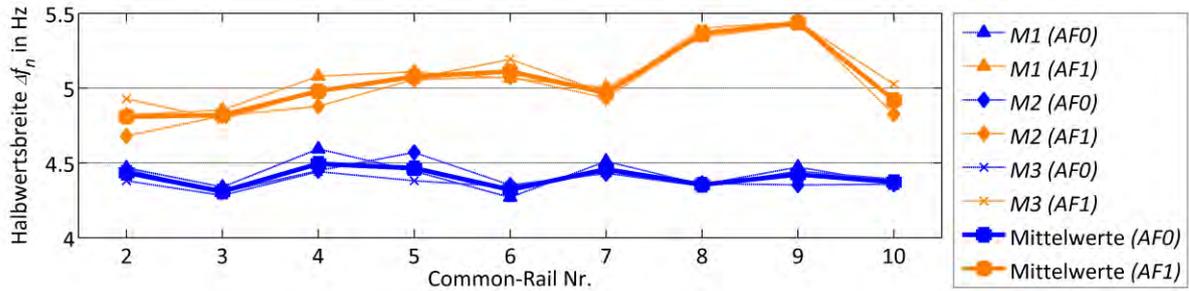


Abb. 5-10: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals *FWHM 26200* aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie entsprechender Mittelwerte für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

Weiterhin ist der Kurvenverlauf gemittelter Werte des Merkmals *FWHM 25900* dargestellt (Abb. 5-11). Für dieses Merkmal liegt optisch ein deutlicher Unterschied zwischen gemittelten Werten und den zugehörigen Einzelwerten vor. Werte eines weiteren Merkmals (*FWHM 5900*), dessen gemittelte Werte sich deutlich von den Einzelwerten unterscheiden, sind in Abb. 5-12 veranschaulicht. Mit Hilfe der gemittelten Werte ist der Autofrettagenachweis möglich. Bei einer einzelnen Auswertung der Datensätze *M1* bis *M3* ist das Merkmal *FWHM 5900* nicht zur prozesssicheren Unterscheidung der verfügbaren Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände geeignet, da z. B. für die Werte aus dem Datensatz *M2* Überschneidungen auftreten.

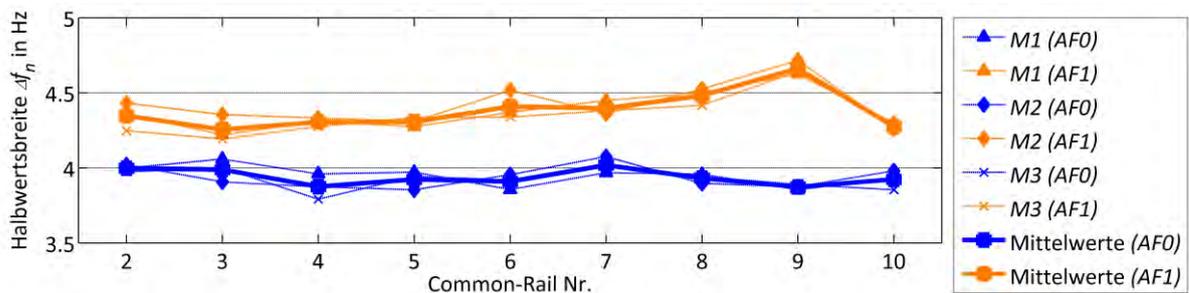


Abb. 5-11: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals *FWHM 25900* aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie entsprechender Mittelwerte für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

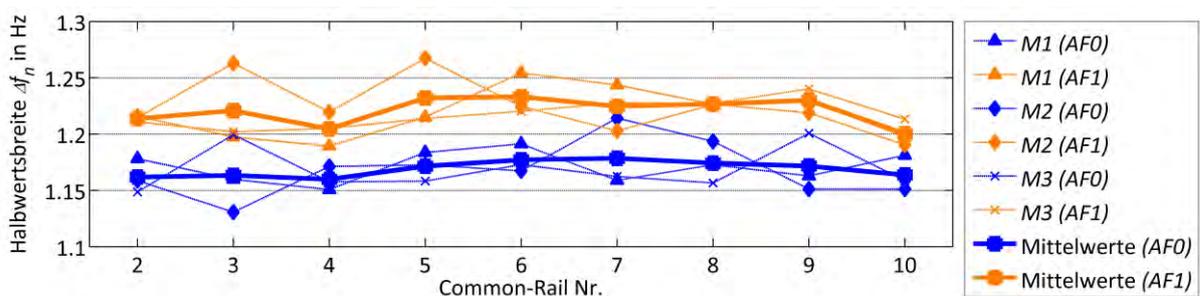


Abb. 5-12: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals *FWHM 5900* aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie entsprechender Mittelwerte für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

Eine erneute Suche von zum Autofrettagenachweis geeigneten Merkmalen ergab, dass die Halbwertsbreiten von 11 Peaks Unterscheidungen der verfügbaren Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände ohne Überschneidungen ermöglichen, sofern die Merkmalswerte zuvor mit Hilfe der Einzelwerte aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse gemittelt wurden. Tab. 5-6 listet die zum Autofrettagenachweis geschmiedeter Common-Rails geeignetsten Halbwertsbreiten (unter Verwendung gemittelter Werte) auf. Je niedriger der dort aufgeführte p-Wert (empirisches Signifikanzniveau) ist, desto eindeutiger unterscheiden sich die mit akustischer Resonanzanalyse ermittelten Merkmalswerte von Common-Rails der Autofrettagezustände *AFO* und *AF1* im Mittel (auf Basis der Auswertungen mit einem Zwei-Stichproben-t-Test). Alle Merkmale, deren Werte autofrettierter bzw. nicht autofrettierter Common-Rails sich nicht überschneiden, sind grün hinterlegt. Speziell für das Merkmal *FWHM 5900* ist ersichtlich, dass die Unterscheidbarkeit der verfügbaren autofrettierten bzw. nicht autofrettierten Common-Rails durch Mittelung der Einzelwerte deutlich verbessert wurde, sofern eine Bewertung mit Hilfe des empirischen Signifikanzniveaus aus einem Zwei-Stichproben-t-Test erfolgt.

Tab. 5-6: Auflistung der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren geschmiedeten Common-Rails (HFR) geeignetsten, aus dreifacher akustischer Resonanzanalyse gemittelten Halbwertsbreiten

Potentiell zum Autofrettagenachweis geeignete Halbwertsbreiten und mit den Merkmalswerten bestimmte empirische Signifikanzniveaus (p-Werte) aus einem Zwei-Stichproben-t-Test			
Rang	Merkmal	p-Wert (gemittelte Merkmalswerte)	p-Wert (Einzelwerte aus <i>M1</i> , <i>M2</i> , <i>M3</i>)
1	<i>FWHM 5900</i>	$5,81 \cdot 10^{-9}$	$6,55 \cdot 10^{-6}$ bis $1,66 \cdot 10^{-4}$
2	<i>FWHM 20800</i>	$9,51 \cdot 10^{-9}$	$2,36 \cdot 10^{-9}$ bis $4,17 \cdot 10^{-7}$
3	<i>FWHM 12500</i>	$2,58 \cdot 10^{-8}$	$1,75 \cdot 10^{-8}$ bis $5,24 \cdot 10^{-8}$
4	<i>FWHM 27800</i>	$2,70 \cdot 10^{-8}$	$2,30 \cdot 10^{-8}$ bis $1,15 \cdot 10^{-7}$
5	<i>FWHM 25900</i>	$4,20 \cdot 10^{-8}$	$1,06 \cdot 10^{-7}$ bis $2,98 \cdot 10^{-7}$

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass für die in den beiden vorangegangenen Tabellen Tab. 5-4 und Tab. 5-5 aufgeführten Varianzwerte und Varianzanteile unterschiedliche Absolutwerte ermittelt werden, wenn zur Ermittlung z. B. die Gesamtvarianzen mit den Messwerten der Datensätze *M2* oder *M3* anstatt mit den Messwerten des Datensatzes *M1* berechnet werden. Jedoch bleiben die aus einer solchen Auswertung bestimmten Verhältnisse der Varianzanteile vergleichbar. Die in diesem Kapitel gezeigten Auswertungen zur Zerlegung der Gesamtvarianz wurden bereits in Vorversuchen durchgeführt. Dabei wurden konträre Ergebnisse erzielt. Da in den Vorversuchen für jedes Bauteil lediglich eine einmalige akustische Resonanzanalyse durchgeführt wurde, war es nicht möglich, Merkmalswerte aus wiederholten Messungen empirisch zu mitteln.

5.1.4 Kombination von Merkmalen

In diesem Kapitel sind Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.4 beschriebenen Auswertungen für geschmiedete Common-Rails dargestellt. Es wurden experimentell Kombinationen ausgewählter Merkmale gebildet. In Abb. 5-13 ist die Summe der Werte der Merkmale *FWHM 25900* und *FWHM 27800* grafisch mit den Werten des Merkmals *FWHM 12500* verglichen. Die Kombination der beiden Merkmale ist zur Trennung der verfügbaren Bauteile verschiedener Autofrettagezustände geeignet. Insbesondere ist in der Abbildung zu erkennen, dass die Streuung der Werte des kombinierten Merkmals von Common-Rails des gleichen Autofrettagezustands gering gegenüber der entsprechenden Streuung der Werte des Merkmals *FWHM 12500* ist. Das empirische Signifikanzniveau der Werte des kombinierten Merkmals beträgt $7,82 \cdot 10^{-9}$ und ist damit geringer als das der Werte jedes aus dem Datensatz *M1* abgeleiteten Einzelmerkmals (vgl. Tab. 5-2).

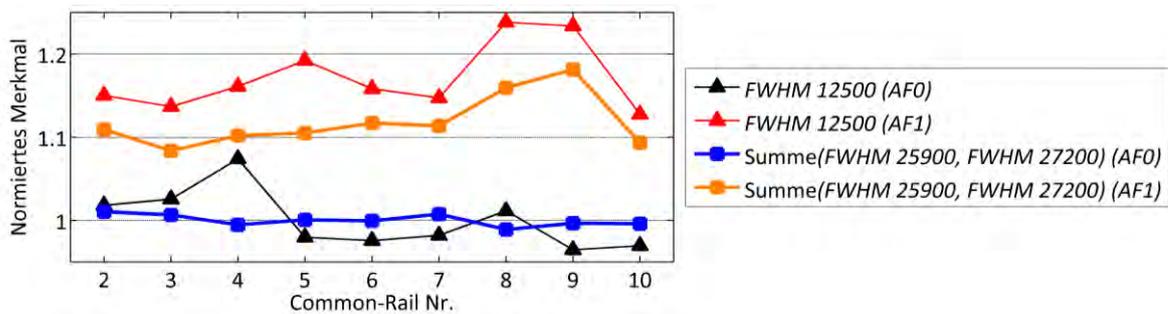


Abb. 5-13: Darstellung normierter Werte der Summe der Merkmale *FWHM 25900* und *FWHM 27800* sowie des Merkmals *FWHM 12500* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

In Abb. 5-14 sind die Werte desselben kombinierten Merkmals mit den Werten des Merkmals *FWHM 27200* verglichen. Der Abstand der Merkmalswerte autofrettierter bzw. nicht autofrettierter Bauteile ist für das Einzelmerkmal größer als für das kombinierte Merkmal. Dagegen streuen die kombinierten Merkmalswerte autofrettierter Bauteile weniger.

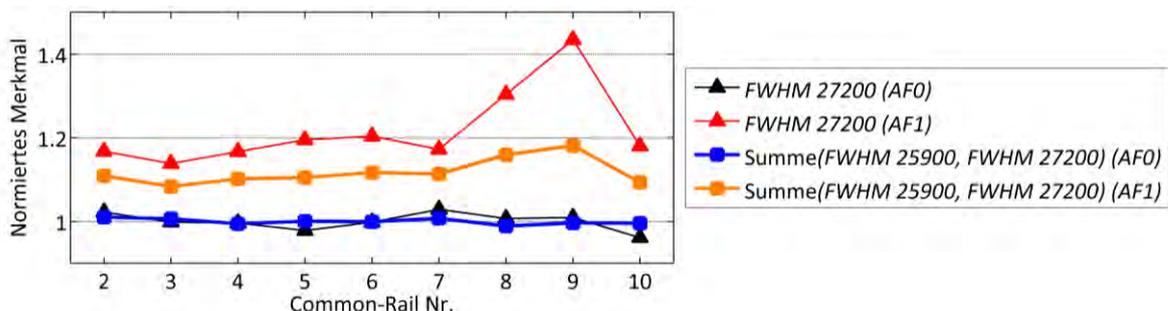


Abb. 5-14: Darstellung normierter Werte der Summe der Merkmale *FWHM 25900* und *FWHM 27800* sowie des Merkmals *FWHM 27200* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

5.1.5 Einfluss des Korrosionsschutzes

In diesem Kapitel sind Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.5 beschriebenen Vorgehensweise für geschmiedete Common-Rails vorgestellt. In den folgenden Diagrammen ist jeweils der Werteverlauf eines Merkmals aus mehrfach wiederholter akustischer Resonanzanalyse eines Common-Rails vor und nach Aufbringen des zusätzlichen Korrosionsschutzes dargestellt. Zusätzlich befindet sich in jedem Diagramm eine (orangene) Linie, die die mittlere Wertedifferenz zwischen den verfügbaren Common-Rails der Autofrettagezustände *AFO* und *AF1* angibt. Abb. 5-15 zeigt den Einfluss eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 12500*. Erkennbar ist der geringe Abstand der Merkmalswerte vor bzw. nach Aufbringen des Korrosionsschutzes im Vergleich zur mittleren Werteverchiebung durch Autofrettage. Im Vergleich dazu ist der Einfluss des Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 18400* deutlich ausgeprägter (Abb. 5-16). Der prozentual größte Einfluss durch das aufgetragene WD40 ist für die Werte des Merkmals *FWHM 27200* zu beobachten, dessen Werteverlauf in Abb. 5-17 dargestellt ist. Die maximalen Abweichungen durch zusätzlichen Korrosionsschutz betragen bis zu 20 % des vor Aufbringen des Korrosionsschutzes bestimmten mittleren Wertes und erreichen damit annähernd das mittlere Wertenniveau autofrettierter Bauteile. Der in Abb. 5-18 dargestellte Verlauf zeigt, dass die Werte des Merkmals *FWHM 27800* nach Aufbringen des Korrosionsschutzes sogar über dem mittleren Wert autofrettierter Bauteile liegen. Dabei ist die absolute Verschiebung der Werte nach Aufbringen des Korrosionsschutzes mit bis zu ca. 13 % zwar geringer als für die Werte des Merkmals *FWHM 27200*, jedoch ist dort der mittlere (normierte) Abstand zwischen Werten autofrettierter bzw. nicht autofrettierter Bauteile größer. In allen Diagrammen ist zu erkennen, dass der Einfluss des Korrosionsschutzes nicht konstant ist, sondern bei mehrmalig wiederholter akustischer Resonanzanalyse abnimmt, wobei die Werte der Merkmale *FWHM 12500* und *FWHM 18400* bereits nach ca. 20 Messwiederholungen annähernd das Niveau vor Aufbringen des Korrosionsschutzes erreichen.

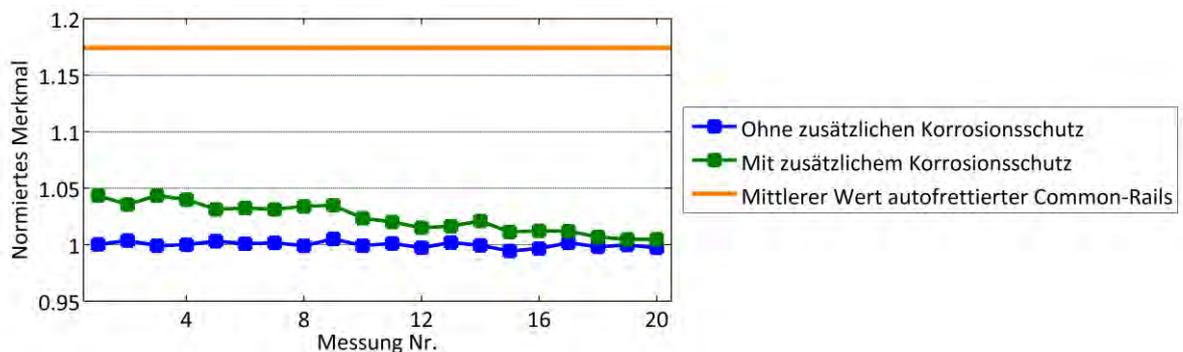


Abb. 5-15: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 12500* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR

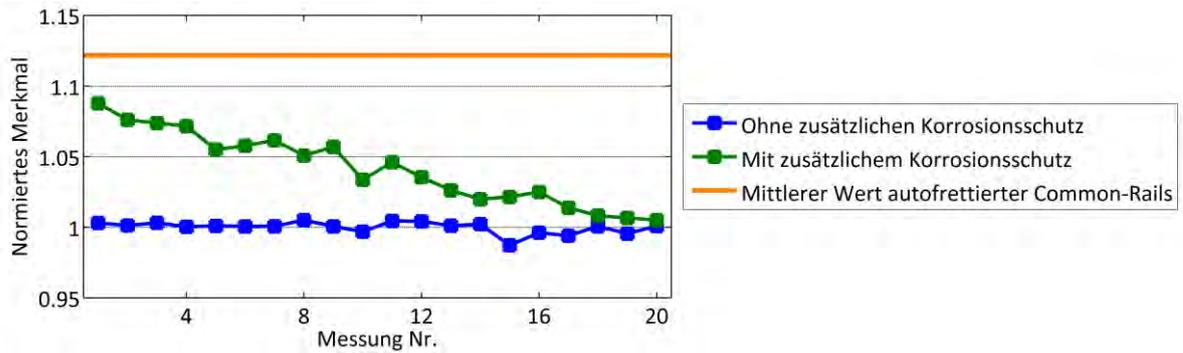


Abb. 5-16: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 18400* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR

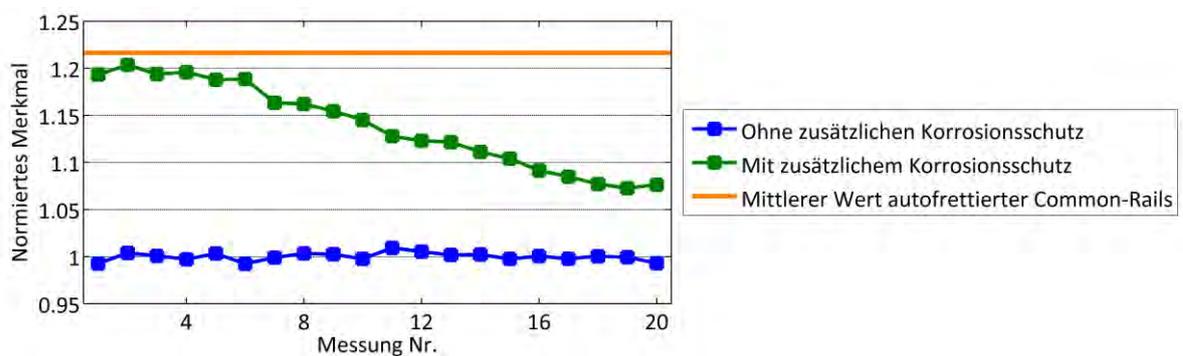


Abb. 5-17: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 27200* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR

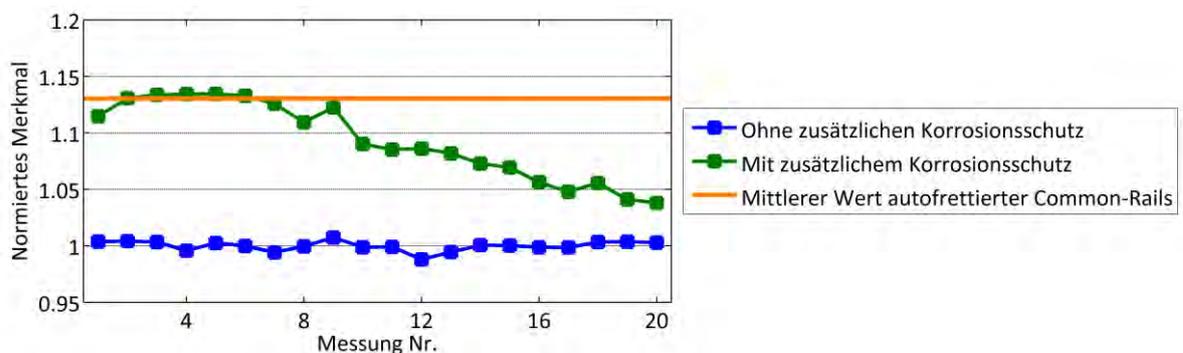


Abb. 5-18: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 27800* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR

Der Einfluss des Korrosionsschutzes wurde für insgesamt acht Halbwertsbreiten untersucht. Dabei wurde kein strenger Zusammenhang zwischen den Resonanzfrequenzen und dem Effekt durch zusätzlich aufgetragenen Korrosionsschutz erkannt. Dieser bei Betrachtung der vorangegangenen Abbildungen vermutete Zusammenhang kann mit Hilfe von Abb. 5-19 widerlegt werden. Dort ist der Einfluss des Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 25900* dargestellt. Der Einfluss auf die Werte dieses Merkmals ist wesentlich geringer als z. B. auf die Werte des Merkmals *FWHM 18400* (vgl. Abb. 5-16).

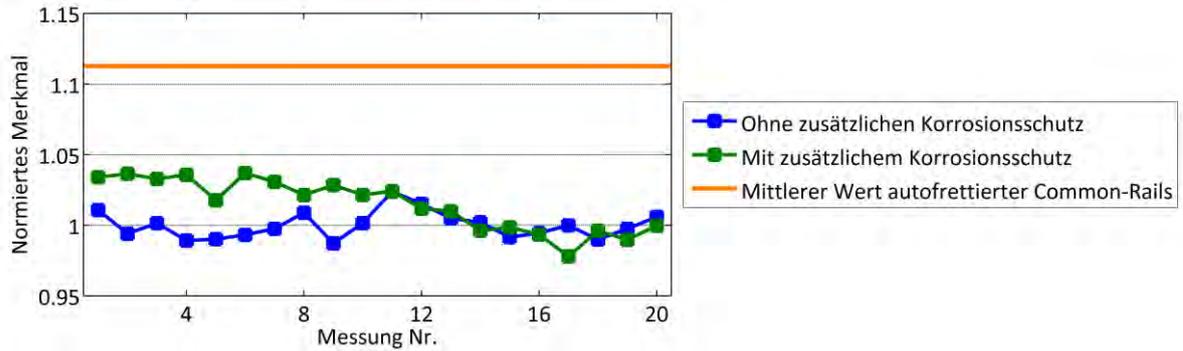


Abb. 5-19: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 25900* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass bereits in Vorversuchen der Einfluss eines Korrosionsschutzes auf die Werte verschiedener Merkmale untersucht wurde (Abb. 5-20 bis Abb. 5-21). Dabei wurde festgestellt, dass zusätzlich applizierter Korrosionsschutz eine relativ konstante Verschiebung der Merkmalswerte verursachte. Die Größenordnungen des Korrosionsschutzeinflusses aus den Vorversuchen und aus den zuvor aufgeführten Ergebnissen unterscheiden sich teilweise deutlich.

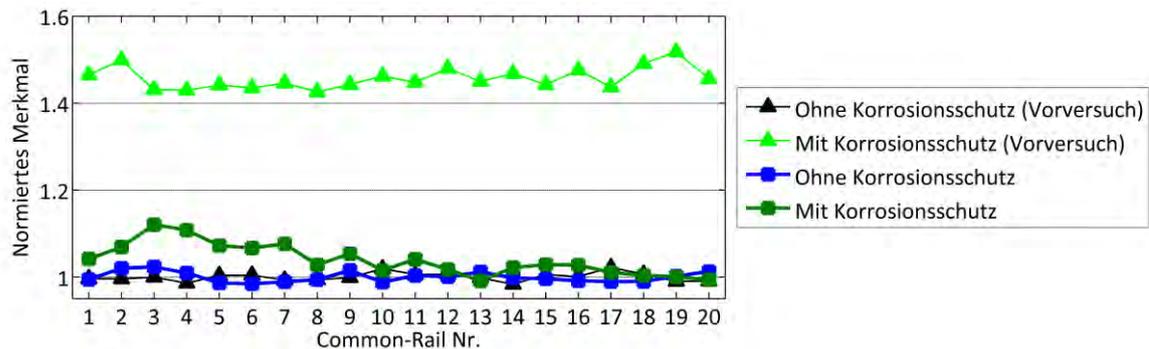


Abb. 5-20: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 17900* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR im Vergleich zu entsprechenden Ergebnissen aus Vorversuchen

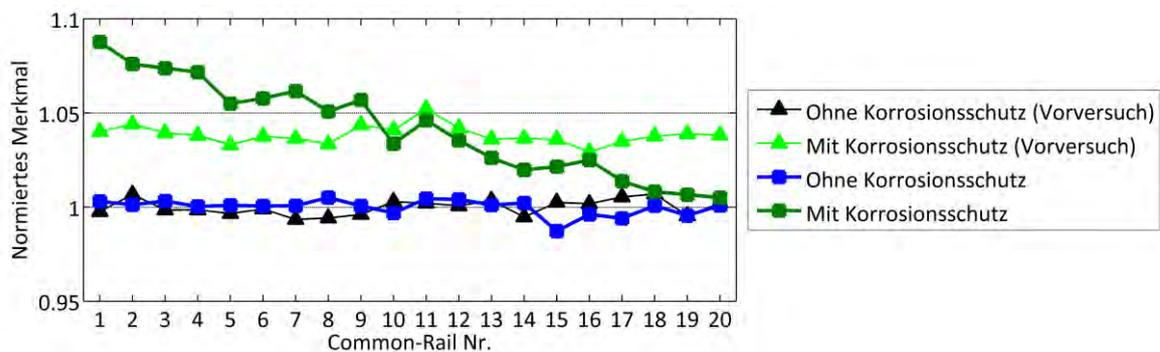


Abb. 5-21: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 18400* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR im Vergleich zu entsprechenden Ergebnissen aus Vorversuchen

5.1.6 Variation der Auswerteparameter

Im Folgenden werden die Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.6 beschriebenen Auswertungen für geschmiedete Common-Rails präsentiert. Die Rohdaten des Datensatzes *M1* aus Versuchsreihe 1 (siehe Kapitel 4.6.1.1) wurden erneut ausgewertet, wobei die zur Auswertung wichtigen Parameter variiert wurden. In Abb. 5-22 ist exemplarisch für das Merkmal *FWHM 12500* ersichtlich, dass sich die Merkmalswerte der verfügbaren autofrettierten bzw. nicht autofrettierten Common-Rails überschneiden, sofern das Zeitsignal zuvor nicht mittels Zero-Padding verlängert wurde. Ohne Verwendung von manuellem Zero-Padding können die zur Verfügung stehenden geschmiedeten Common-Rails beider Autofrettagenzustände mit Hilfe der meisten Merkmale wesentlich schlechter unterschieden werden. Im Rahmen dieser Auswertungen wurde lediglich ein Merkmal (*FWHM 25900*) beobachtet, mit Hilfe dessen die Autofrettagenzustände der zur Verfügung stehenden Bauteile nicht wesentlich schlechter unterschieden werden können, sofern kein manuelles Zero-Padding durchgeführt wurde (Abb. 5-23).

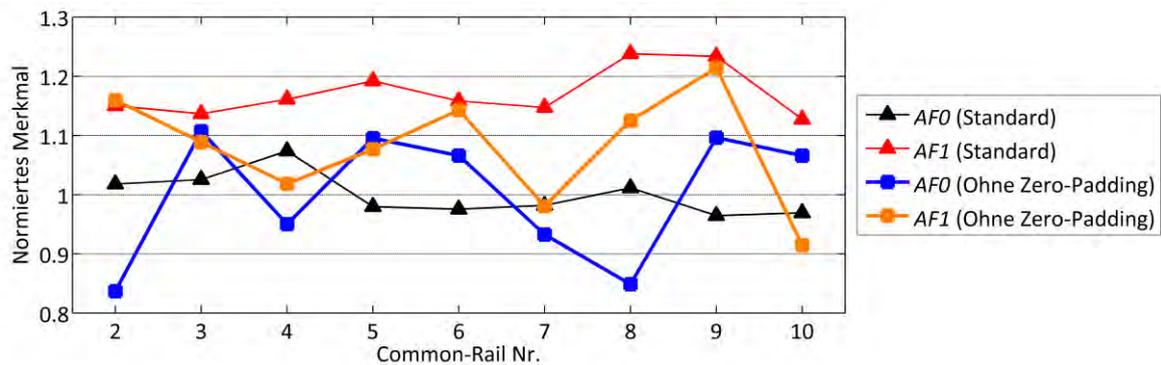


Abb. 5-22: Darstellung normierter Werte des Merkmals *FWHM 12500* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagenzustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Auswertungen mit und ohne Zero-Padding)

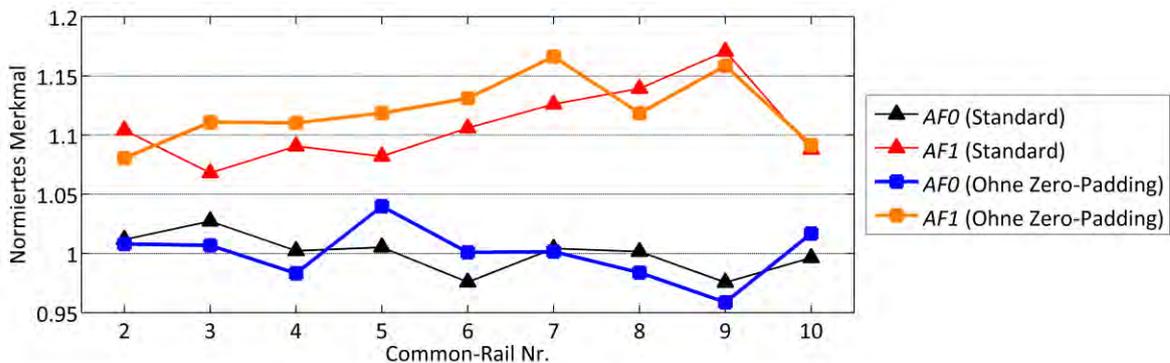


Abb. 5-23: Darstellung normierter Werte des Merkmals *FWHM 25900* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagenzustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Auswertungen mit und ohne Zero-Padding)

Wurde nur ein Ausschnitt der aufgezeichneten Zeitsignale ausgewertet, verschlechterte sich die Möglichkeit der Unterscheidung der verfügbaren Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände bzw. es konnte für keine Variation eine signifikante Verbesserung festgestellt werden. In Abb. 5-24 sind exemplarisch die Werte des Merkmals *FWHM 18400* dargestellt. Zur Ermittlung der Werte wurde nur der Ausschnitt von 120 ms bis 600 ms der aufgezeichneten Zeitsignale ausgewertet. Zum Vergleich sind die aus den gesamten Zeitsignalen abgeleiteten Werte desselben Merkmals abgebildet.

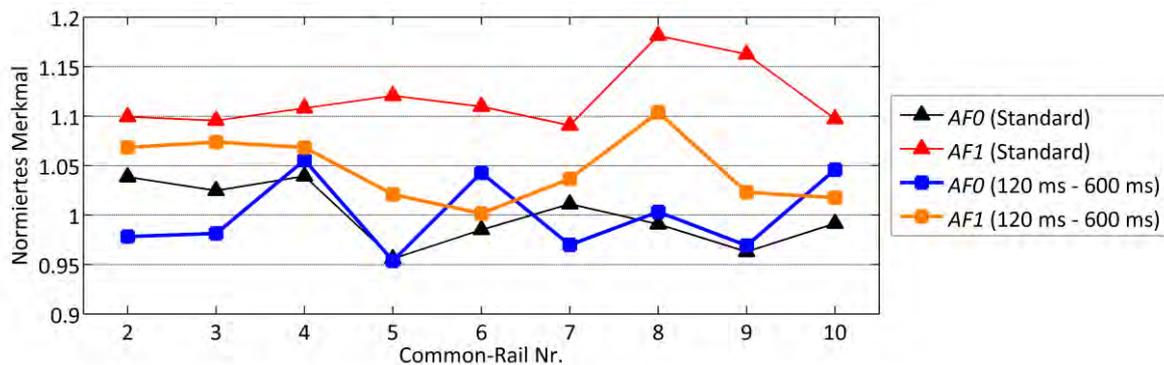


Abb. 5-24: Darstellung normierter Werte des Merkmals *FWHM 18400* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Auswertungen von verschiedenen Zeitsignalausschnitten)

Wurde zur Ermittlung der Merkmalswerte ein Leistungsspektrum herangezogen (siehe dazu Kapitel 2.4.2), konnte ebenfalls für kein Merkmal eine deutlich verbesserte Unterscheidung der verfügbaren Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände erreicht werden.

Zusätzlich zu den gezeigten grafischen Vergleichen wurden alle Ergebnisse der Auswertungen der Rohdaten mit alternativen Einstellungen analog zur in Kapitel 5.1.2 angewandten Bewertung statistisch analysiert, wobei die vollständigen Ergebnisse aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht aufgeführt sind. Für keine Ergebnisse auf Basis der variierten Auswerteeinstellungen wurde eine wesentlich gegenüber den Auswertungen mit Standardeinstellungen (siehe Kapitel 5.1.2) verbesserte Nachweismöglichkeit der Autofrettage für die verfügbaren Common-Rails beobachtet.

5.1.7 Vergleich der Merkmalsart Halbwertsbreite mit weiteren Merkmalsarten

In diesem Kapitel sind Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.7 beschriebenen Auswertungen für geschmiedete Common-Rails dargestellt. Die Rohdaten des Datensatzes *M1* aus Versuchsreihe 1 (siehe Kapitel 4.6.1.1) wurden mit SonicTC ausgewertet, wobei in den folgenden Betrachtungen die Halbwertsbreiten von sechs Resonanzpeaks mit den entsprechenden Merkmalen *frequenzabhängige Abklingkonstante* sowie *Güte* verglichen wurden. Mit Hilfe dieser zusätzlichen Merkmale konnte die Unterscheidung der verfügbaren Common-Rails

verschiedener Autofrettagezustände nicht verbessert werden. Für einige Peaks stimmen die relativen Verläufe der Werte der Merkmale *Halbwertsbreite* und *frequenzabhängige Abklingkonstante* im Wesentlichen überein, was Abb. 5-25 exemplarisch zeigt. Für die Resonanzfrequenzen bei ungefähr 27.200 Hz und 27.800 Hz ermöglicht die frequenzabhängige Abklingkonstante dagegen keine eindeutige Unterscheidung der Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände, sofern die gesamte Messdauer von 1.200 ms ausgewertet wurde (Abb. 5-26). Die Autofrettagetrennung mit Hilfe der frequenzabhängigen Abklingkonstanten der Resonanzfrequenz bei ca. 27.800 Hz konnte aber dadurch erreicht werden, dass anstelle der gesamten 1200 ms das Zeitsignal von 300 ms bis 900 ms ausgewertet wurde (Abb. 5-27). Zwischen den Merkmalsarten *Güte* und *Halbwertsbreite* besteht kein wesentlicher Unterschied im Informationsgehalt, obwohl die Software SonicTC die Güte mit einem alternativen Algorithmus bestimmt (siehe Kapitel 4.2.4.2). Mit Ausnahme einiger Ausreißer stimmen die Kurvenverläufe für alle betrachteten Resonanzfrequenzen näherungsweise überein, wie exemplarisch in Abb. 5-28 und Abb. 5-29 gezeigt ist.

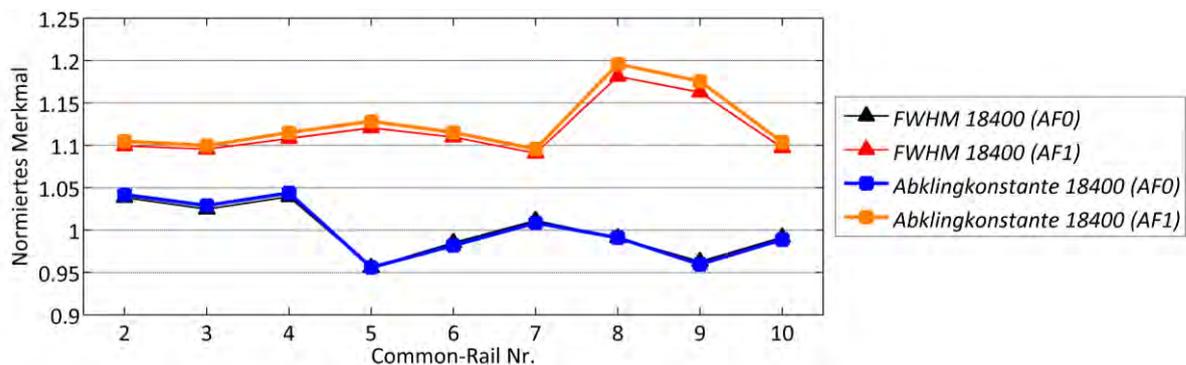


Abb. 5-25: Darstellung normierter Werte der Merkmale *FWHM 18400* und *frequenzabhängige Abklingkonstante 18400* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

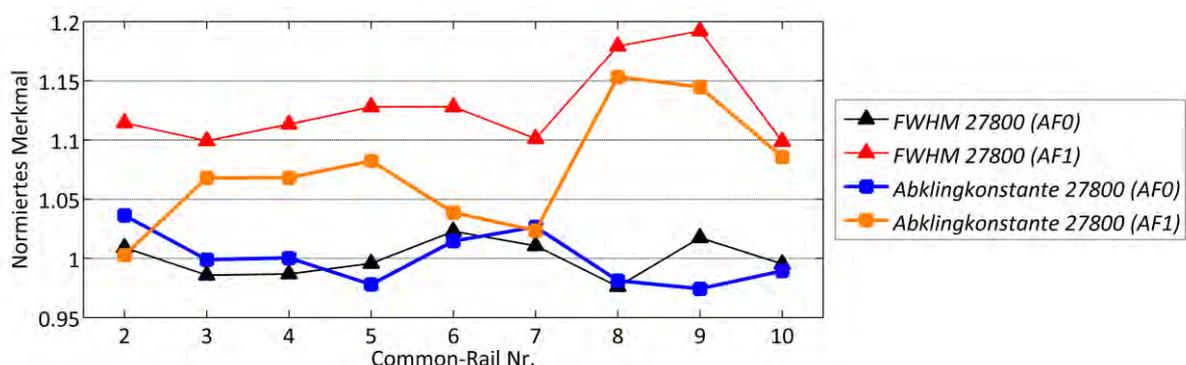


Abb. 5-26: Darstellung normierter Werte der Merkmale *FWHM 27800* und *frequenzabhängige Abklingkonstante 27800* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

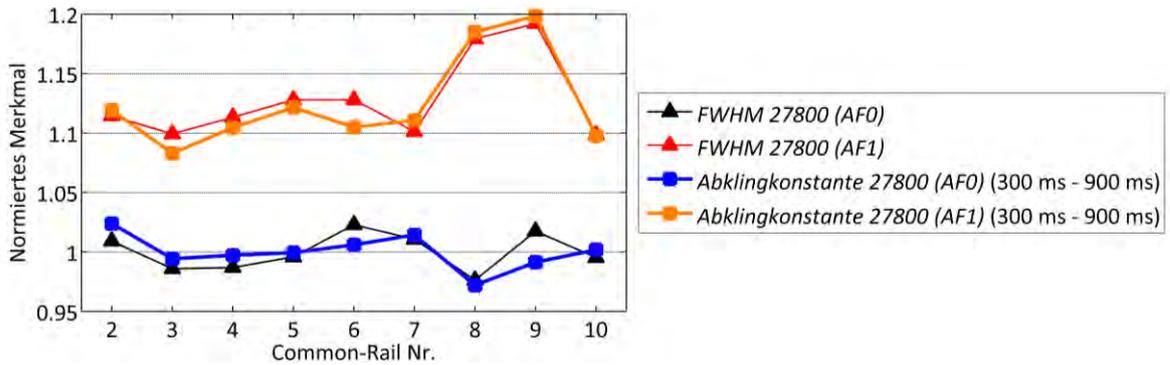


Abb. 5-27: Darstellung normierter Werte der Merkmale *FWHM 27800* und *frequenzabhängige Abklingkonstante 27800* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Bestimmung der frequenzabhängigen Abklingkonstanten im Zeitsignalausschnitt von 300 ms bis 900 ms)

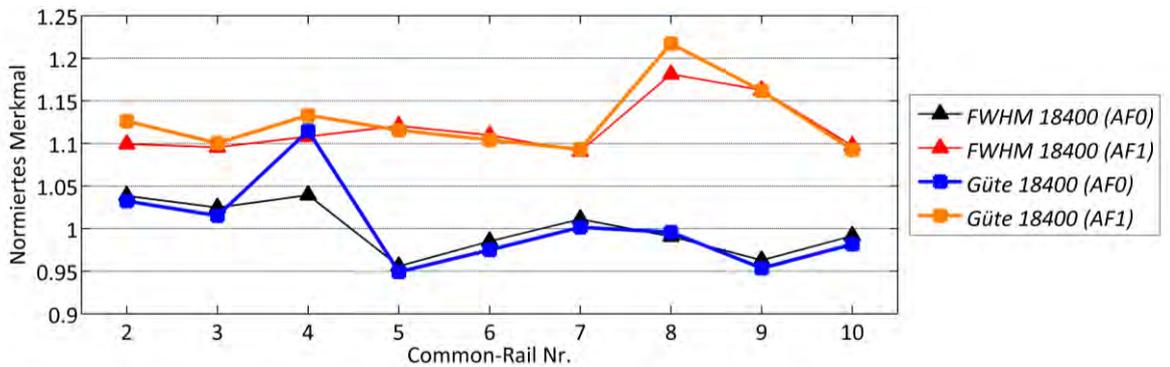


Abb. 5-28: Darstellung normierter Werte der Merkmale *FWHM 18400* und *Güte 18400* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

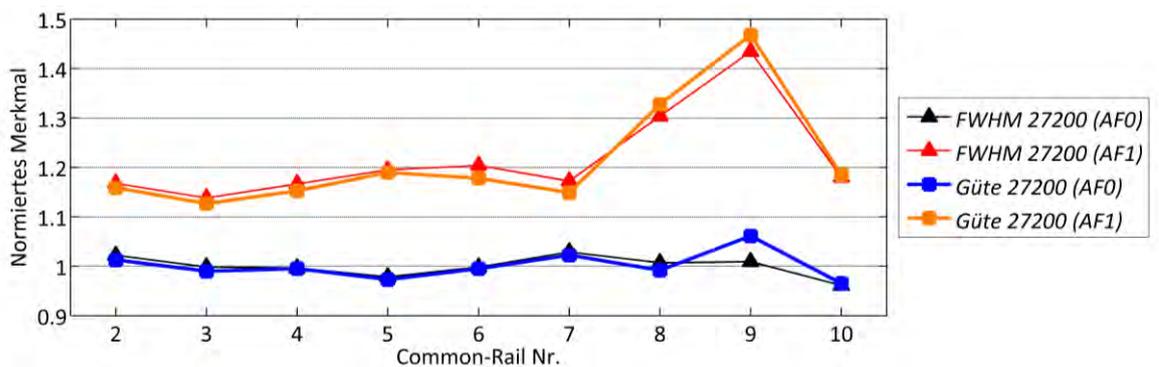


Abb. 5-29: Darstellung normierter Werte der Merkmale *FWHM 27200* und *Güte 27200* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

Zusätzlich zu den gezeigten grafischen Vergleichen wurden alle Ergebnisse dieser Auswertungen analog zur in Kapitel 5.1.2 angewandten Bewertung statistisch analysiert, wobei die vollständigen Ergebnisse aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht aufgeführt sind. Für keines der alternativen Merkmale wurde ein wesentlich verbesserter Autofrettagenachweis im Vergleich zum Autofrettagenachweis über die Halbwertsbreiten von Resonanzpeaks beobachtet.

5.1.8 Eigenmoden der Common-Rails

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Untersuchungen mittels Laservibrometrie an geschmiedeten Common-Rails dargestellt. Die Vorgehensweise dazu ist in Kapitel 4.6.2.8 beschrieben. Bei Betrachtung der Resultate der Laservibrometrie können die Resonanzfrequenzen des verwendeten Common-Rails bestimmten Eigenmodenformen zugeordnet werden. So kann den Resonanzfrequenzen bei ungefähr 12.500 Hz und 18.400 Hz jeweils eine longitudinale Eigenschwingungsform mit dominierender Schwingungskomponente in Richtung der Längsachse des Bauteils zugeordnet werden (Abb. 5-30 und Abb. 5-31). Dabei sind in der Seitenansicht auch gekoppelte Schwingungskomponenten senkrecht zur Bauteilachse zu erkennen. Die dominierende Komponente ist jedoch jeweils das Schwingen in axialer Richtung des Common-Rails.

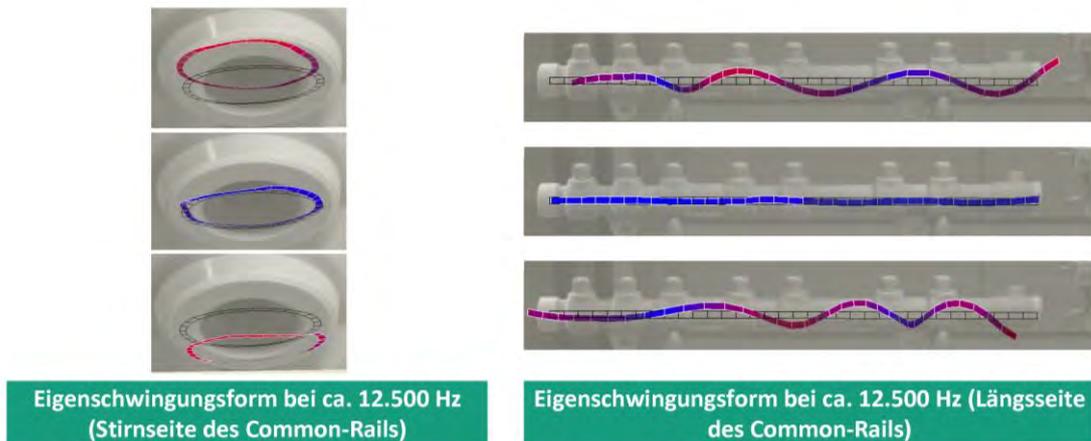


Abb. 5-30: Laservibrometrische Aufnahme der Eigenmode eines Common-Rails des Typs HFR bei ca. 12.500 Hz

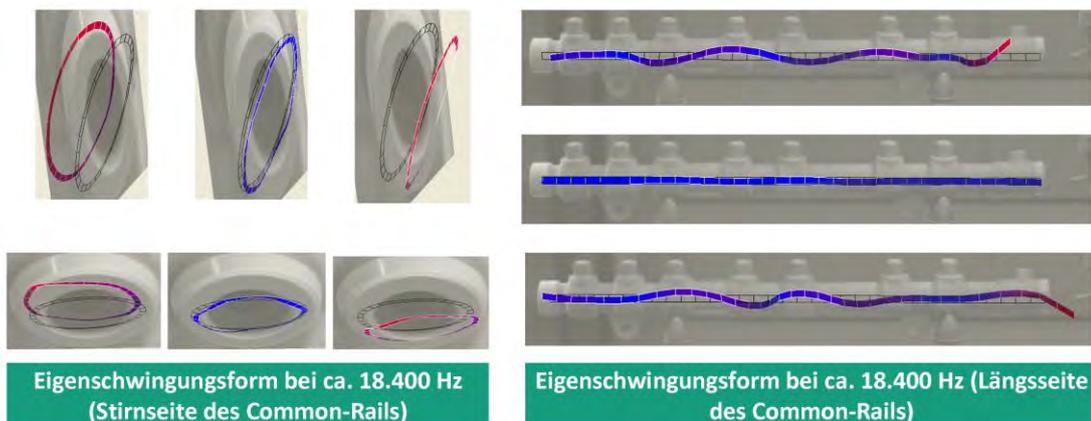


Abb. 5-31: Laservibrometrische Aufnahme der Eigenmode eines Common-Rails des Typs HFR bei ca. 18.400 Hz

Entsprechend lässt sich die Eigenschwingungsform des verwendeten Common-Rails bei ungefähr 17.900 Hz als Biegeeigenschwingung identifizieren, bei welcher sich der Querschnitt zwar verschiebt, seine grundsätzliche Form jedoch beibehält (Abb. 5-32).

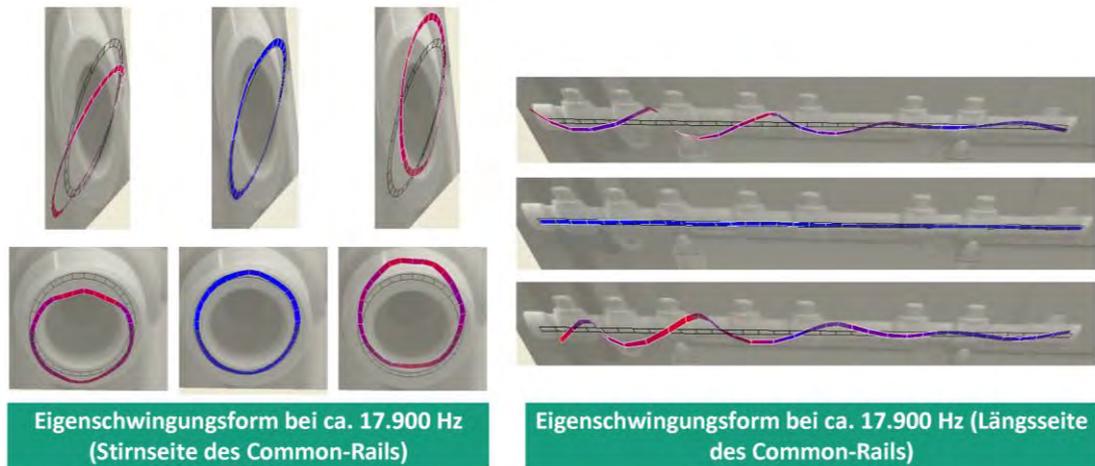


Abb. 5-32: Laservibrometrische Aufnahme der Eigenmode eines Common-Rails des Typs HFR bei ca. 17.900 Hz

In Abb. 5-33 sind zwei Eigenmoden weiterer Resonanzfrequenzen des verwendeten Common-Rails dargestellt. Bei beiden handelt es sich um Eigenschwingungen, deren dominierende Bewegungskomponenten senkrecht zur Bauteilachse gerichtet sind. Die Schwingungsform bei der Resonanzfrequenz von ca. 25.900 Hz lässt neben einer Biegeverformung auch eine Torsionskomponente erkennen. In Abb. 5-33 ist erkennbar, dass der Bauteilquerschnitt bei dieser Resonanzfrequenz eine Pendelbewegung durchführt, wobei der linke Rand an identischer Position verbleibt. Die periodische Biegeverformung des Bauteils bei ca. 27.200 Hz ist durch eine gekoppelte Querschnittsverformung gekennzeichnet.

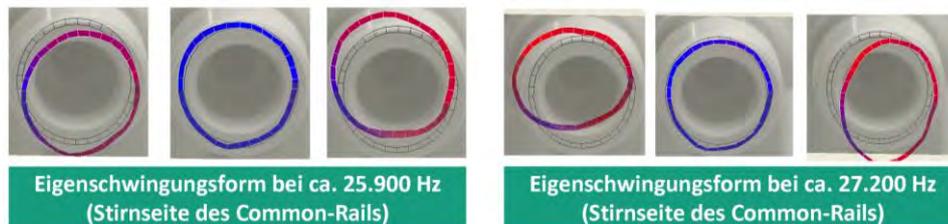


Abb. 5-33: Laservibrometrische Aufnahme der Eigenmoden eines Common-Rails des Typs HFR bei ca. 25.900 Hz und 27.200 Hz

Zur Identifikation der Schwingungsmoden kamen mehrere Versuchsaufbauten bei der Laser-vibrometrie zum Einsatz. In Abhängigkeit dieser erschienen die Eigenschwingungsformen teilweise in veränderter Form (Abb. 5-34). So schwingt die Stirnseite beispielsweise bei ca. 18.400 Hz hauptsächlich in axialer Bauteilrichtung, jedoch nicht in Phase, wie in Abb. 5-31 zu erkennen ist. Auch die Resonanzfrequenz bei 17.900 Hz weist in Abhängigkeit der Versuchsanordnung eine gegenüber Abb. 5-32 veränderte Modenform auf. In Abb. 5-34 ist erkennbar, dass die Eigenschwingungsform bei ca. 17.900 Hz durch eine Querschnittsverformung gekennzeichnet ist. Für die Modenform bei dieser Frequenz dominieren also unabhängig vom Versuchsaufbau Schwingungskomponenten in radialer Richtung des Bauteils.

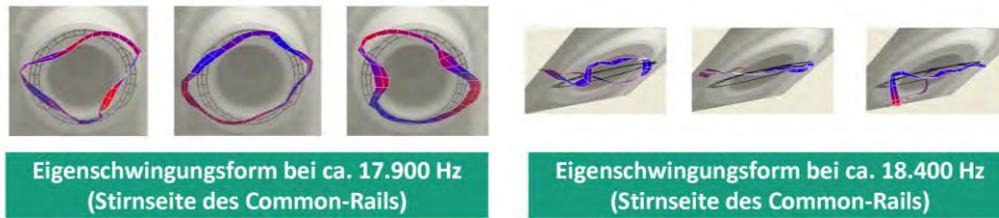


Abb. 5-34: Laservibrometrische Aufnahme der Eigenmoden eines Common-Rails des Typs HFR bei ca. 17.900 Hz und 18.400 Hz bei verändertem Versuchsaufbau

Insgesamt wurden mehrere Biegeeigenmoden bzw. Schwingungsformen, deren Hauptkomponenten radial zur Bauteilachse gerichtet sind (Resonanzfrequenzen bei jeweils ungefähr 15.300 Hz, 17.900 Hz, 19.000 Hz, 20.800 Hz und 26.200 Hz), sowie mehrere longitudinale Eigenmoden in Axialrichtung des Bauteils (Resonanzfrequenzen bei jeweils ungefähr 5.900 Hz, 12.500 Hz, 19.000 Hz, 18.400 Hz) identifiziert. Alle untersuchten Schwingungsformen treten nicht in der reinen Form auf, wie sie bei einem einfachen stab- oder rohrröhrförmigen Bauteil zu beobachten sind.

5.1.9 Einfluss von Variationen im Versuchsaufbau

Die Vorgehensweise zu den folgenden Ergebnissen ist in Kapitel 4.6.2.9 beschrieben. Die Streuung von Merkmalswerten aus mehrfach wiederholter akustischer Resonanzanalyse eines Common-Rails ohne Neupositionierung hängt vom Mikrofonabstand ab. Für das Merkmal *FWHM 12500* lässt sich erkennen, dass sich sowohl die Streuung der Messwerte reduziert als auch der mittlere Wert verschiebt, sofern der Mikrofonabstand verändert wurde (Abb. 5-35 und Abb. 5-36). Der Einfluss des Mikrofonabstands auf das Merkmal *FWHM 25900* dagegen ist – vor allem für Abstände zwischen 10 mm und 50 mm – deutlich geringer (Abb. 5-37 und Abb. 5-38). Weiterhin ist die Streuung von Werten des Merkmals *FWHM 14500* dargestellt, die für die Mikrofonabstände 9 mm, 10 mm, 19 mm und 20 mm keine wesentlichen Veränderungen zeigen. Bei größerem Mikrofonabstand jedoch streuen die Werte aus wiederholter Resonanzanalyse auch für dieses Merkmal stärker (Abb. 5-39).

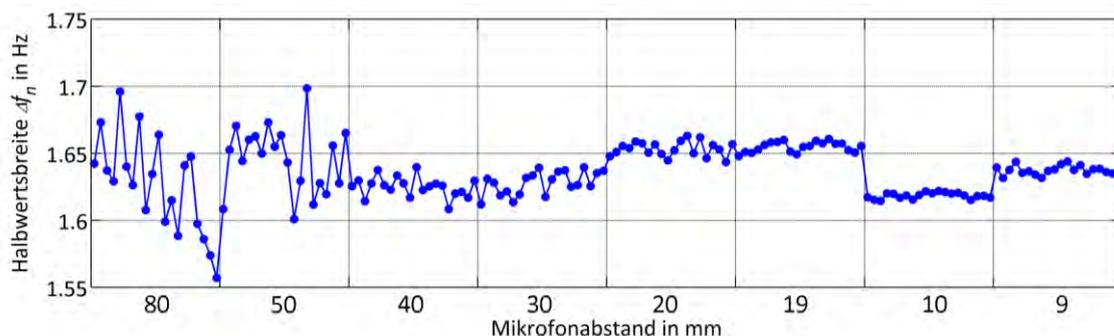


Abb. 5-35: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals *FWHM 12500* bei mehrfach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse eines geschmiedeten Common-Rails (HFR) in Abhängigkeit des Mikrofonabstands

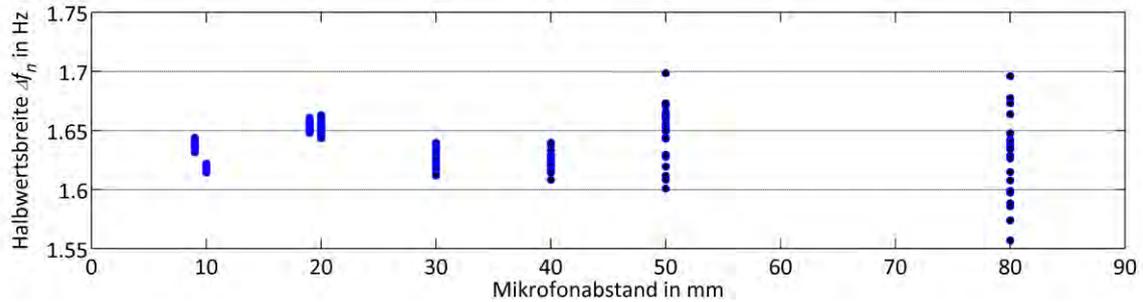


Abb. 5-36: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals *FWHM 12500* bei mehrfach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse eines geschmiedeten Common-Rails (HFR) in Abhängigkeit des Mikrofonabstands (Streubänder)

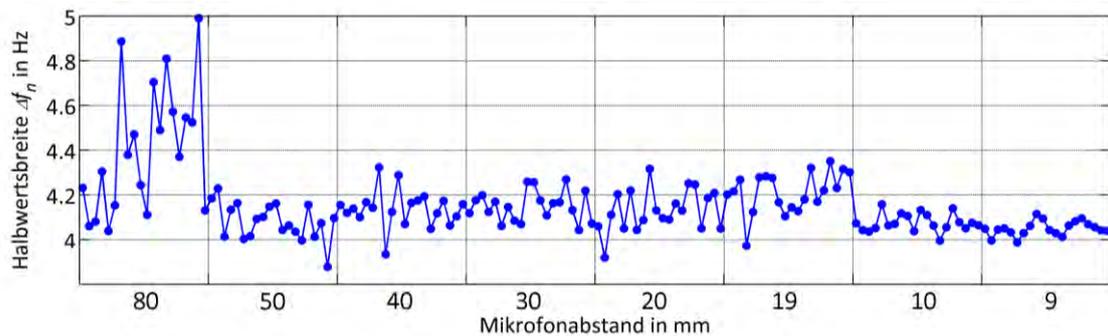


Abb. 5-37: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals *FWHM 25900* bei mehrfach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse eines geschmiedeten Common-Rails (HFR) in Abhängigkeit des Mikrofonabstands

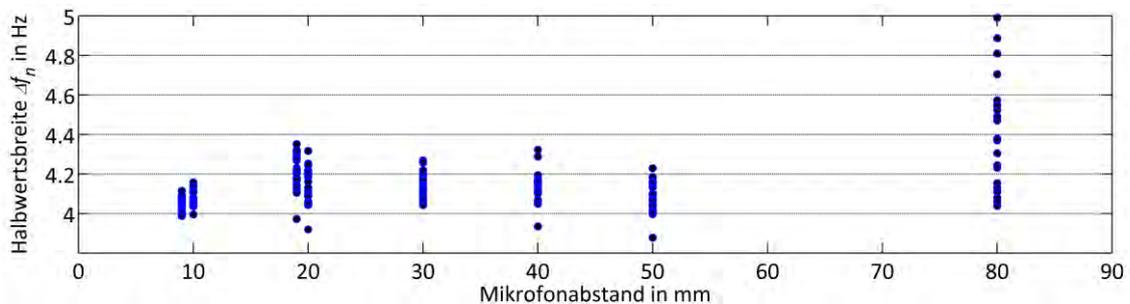


Abb. 5-38: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals *FWHM 25900* bei mehrfach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse eines geschmiedeten Common-Rails (HFR) in Abhängigkeit des Mikrofonabstands (Streubänder)

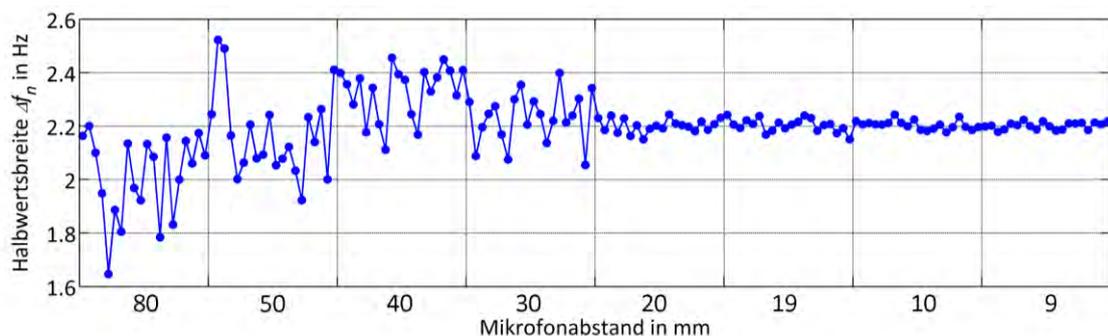


Abb. 5-39: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals *FWHM 14500* bei mehrfach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse eines geschmiedeten Common-Rails (HFR) in Abhängigkeit des Mikrofonabstands

Die Anzahl geeigneter Merkmale aus den Auswertungen des mit 50 mm Mikrofonabstand aufgezeichneten Datensatzes (siehe Versuchsreihe 2, Kapitel 4.6.1.2) wurde mit den Ergebnissen der analogen Auswertungen der Datensätze *M1* bis *M3* (Mikrofonabstand jeweils 10 mm, siehe Versuchsreihe 1, Kapitel 4.6.1.1) aus Kapitel 5.1.2 verglichen (Tab. 5-7). Es ist ersichtlich, dass die Anzahl der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren Common-Rails geeigneten Merkmale geringer im Vergleich zu den Ergebnissen aus Kapitel 5.1.2 ist. Sofern die Datenaufzeichnung mit einem Mikrofonabstand von 50 mm erfolgte, wurden weniger Merkmale gefunden, welche die verfügbaren Bauteile der beiden Autofrettagezustände ohne Überschneidungen unterscheiden.

Tab. 5-7: Übersicht über die Anzahl der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren geschmiedeten Common-Rails (HFR) potentiell geeigneten Merkmale für zwei Mikrofonabstände bei der akustischen Resonanzanalyse (getrennt nach Arten, Bewertungskriterien und Datensätzen)

Merkmalsart	Bewertungskriterium in Abhängigkeit des Mikrofonabstands			
	Autofrettagenachweis durch signifikanten Zwei-Stichproben-t-Test		Autofrettagenachweis ohne Überschneidung der Werte	
	50 mm	10 mm (<i>M1</i> , <i>M2</i> , <i>M3</i>)	50 mm	10 mm (<i>M1</i> , <i>M2</i> , <i>M3</i>)
<i>Center (Impulszentrum)</i>	7	8 bis 9	0	0
<i>FWHM (Halbwertsbreite)</i>	19	20 bis 23	7	9 bis 11
<i>Left Half Width (Linke halbe Breite)</i>	16	17 bis 21	4	5 bis 8
<i>Right Half Width (Rechte halbe Breite)</i>	17	18 bis 20	5	5 bis 6
<i>Area (Impulsbereich)</i>	6	9 bis 11	0	0
<i>AreaIntP(%) (Prozentbereich)</i>	7	10 bis 12	0	0
<i>Height (Impulshöhe)</i>	9	7 bis 11	0	0
<i>Centroid (Impulszentroid)</i>	7	8 bis 9	0	0
Summe geeigneter Merkmale	88	97 bis 115	16	20 bis 24
Anzahl ausgewerteter Peaks	26	27 bis 28	26	27 bis 28
Anzahl ausgewerteter Merkmale	208	216 bis 224	208	216 bis 224
Prozentualer Anteil geeigneter Merkmale	42,3 %	44,9 % bis 51,3 %	7,7 %	9,3 % bis 11,1 %

Exemplarisch sind im Folgenden Ergebnisse des ausgewerteten Datensatzes *M1* aus Kapitel 5.1.2 (Mikrofonabstand 10 mm) mit den Ergebnissen der Auswertung von Versuchsreihe 2 mit erhöhtem Mikrofonabstand grafisch verglichen. Dabei ist erkennbar, dass die Werte des Merkmals *FWHM 25900* eine deutlichere Unterscheidung der Bauteile verschiedener Autofrettagezustände ermöglichen, sofern ein 50 mm Mikrofonabstand verwendet wurde

(Abb. 5-40). Dies wird auch durch das empirische Signifikanzniveau bestätigt, dessen Wert bei der Auswertung der Versuche mit 50 mm Mikrofonabstand $1,22 \cdot 10^{-8}$ beträgt. Die entsprechenden Merkmalswerte aus der Auswertung des Datensatzes *M1* führten dagegen zu einem p-Wert von $1,12 \cdot 10^{-7}$. Auch bei der Verwendung der Werte des Merkmals *FWHM 12500* sind die Autofrettagezustände besser unterscheidbar, falls der größere Mikrofonabstand verwendet wurde (Abb. 5-41). Für weitere verglichene Merkmale sind die Ergebnisse aus den Auswertungen der Rohdaten beider Mikrofonabstände hinsichtlich des Autofrettagenachweises vergleichbar. Lediglich für das Merkmal *FWHM 14500* zeigte sich, dass eine eindeutige Unterscheidung der Autofrettagezustände anhand der Versuche mit 50 mm Mikrofonabstand im Gegensatz zur in Kapitel 5.1.2 dargestellten Auswertung nicht möglich ist (Abb. 5-42). Die Werte dieses Merkmals dienen bei Auswertung der Datensätze *M1* bis *M3* (10 mm Mikrofonabstand) immer der eindeutigen Unterscheidung der Autofrettagezustände der verfügbaren Common-Rails. Vor allem die Streuung der Werte des Merkmals *FWHM 14500* von Common-Rails gleicher Autofrettagezustände ist zu beachten, welche bei Verwendung des erhöhten Mikrofonabstands deutlich größer als mit 10 mm Mikrofonabstand ist (Abb. 5-42).

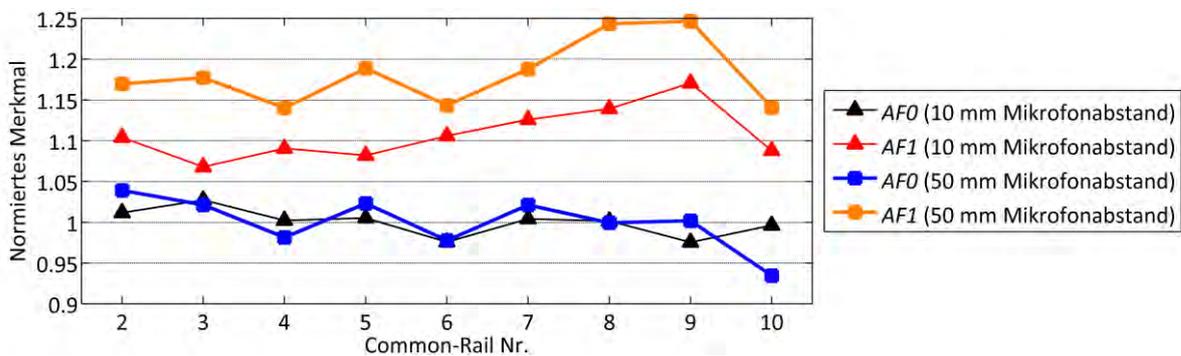


Abb. 5-40: Darstellung normierter Werte des Merkmals *FWHM 25900* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern und des zur Datenaufzeichnung verwendeten Mikrofonabstands

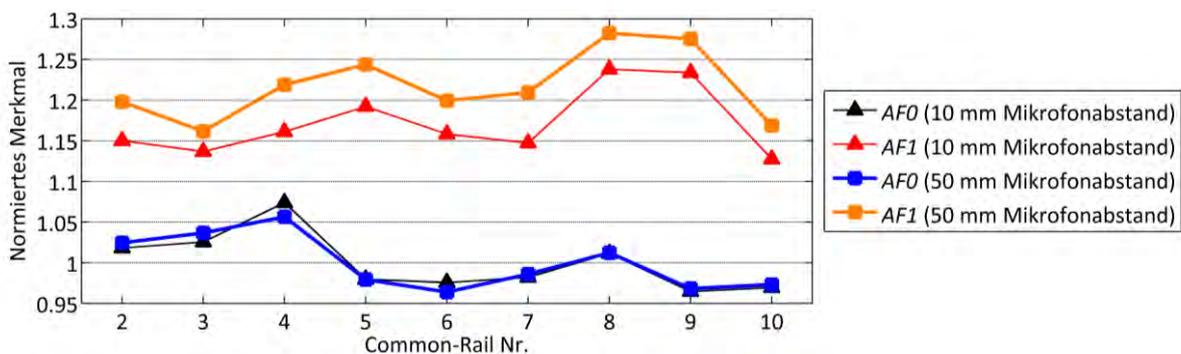


Abb. 5-41: Darstellung normierter Werte des Merkmals *FWHM 12500* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern und des zur Datenaufzeichnung verwendeten Mikrofonabstands

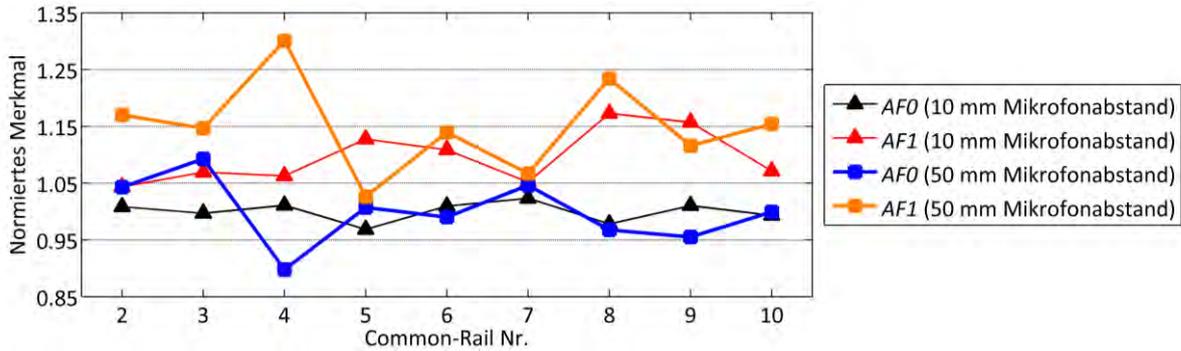


Abb. 5-42: Darstellung normierter Werte des Merkmals *FWHM 1450* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern und des zur Datenaufzeichnung verwendeten Mikrofonabstands

Im Folgenden wurde der Einfluss der Versuchsparameter *Bauteilorientierung*, *Lagerabstand* und *Position der Impulsanregung* untersucht. Für keine der betrachteten alternativen Versuchsaufbauten (siehe Kapitel 4.3.1) konnte ein Merkmal gefunden werden, dessen Werte einen wesentlich verbesserten Autofrettagenachweis für die verfügbaren Common-Rails ermöglichen. In der Regel sind die Ergebnisse unter Berücksichtigung zufälliger Messeffekte vergleichbar, wie exemplarisch für das Merkmal *FWHM 12500* gezeigt wird (Abb. 5-43). Zur Ermittlung der Werte wurde der Lagerabstand verändert. Die Nachweismöglichkeit der Autofrettage verbesserte sich mit Hilfe dieses Merkmals nicht durch die Verwendung eines Versuchsaufbaus mit erhöhtem Lagerabstand, jedoch sind die auf Basis verschiedener Lagerabstände absolut ermittelten Merkmalswerte deutlich zueinander verschoben (Abb. 5-44).

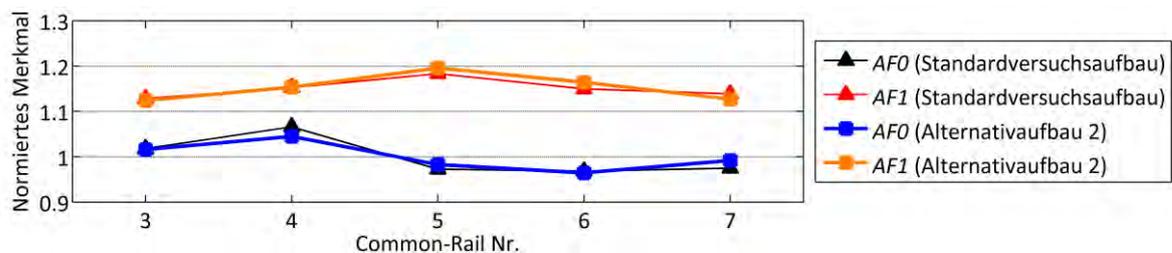


Abb. 5-43: Darstellung normierter Werte des Merkmals *FWHM 12500* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern und des zur Datenaufzeichnung verwendeten Lagerabstands

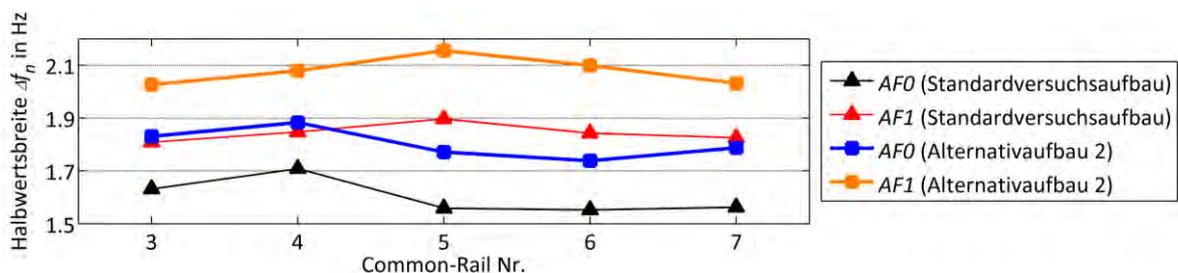


Abb. 5-44: Darstellung absoluter Werte des Merkmals *FWHM 12500* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern und des zur Datenaufzeichnung verwendeten Lagerabstands

5.2 Ergebnisse für lasergeschweißte Common-Rails (LWR)

5.2.1 Zeitsignale und Spektren aus der akustischen Resonanzanalyse von Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände

Im Folgenden werden die Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.1 beschriebenen Auswertungen für lasergeschweißte Common-Rails aufgezeigt. Zeitabhängige, vom Mikrofon aufgezeichnete Schalldruckverläufe, welche sich nach einer jeweils einmaligen Impulsanregung der lasergeschweißten Common-Rails mit den Bezeichnungen *AF0.1* und *AF1.1* ausbildeten, sind in Abb. 5-45 gezeigt. Abb. 5-46 veranschaulicht die aus den Zeitsignalen mittels DFT abgeleiteten Spektren.

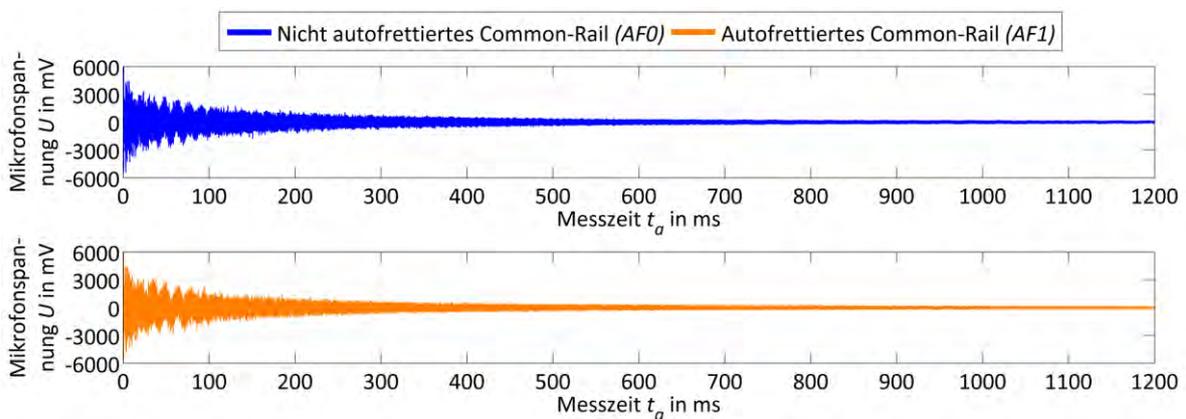


Abb. 5-45: Darstellung typischer zeitabhängiger Schalldruckverläufe nach Impulsanregung lasergeschweißter Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* bzw. *AF1*

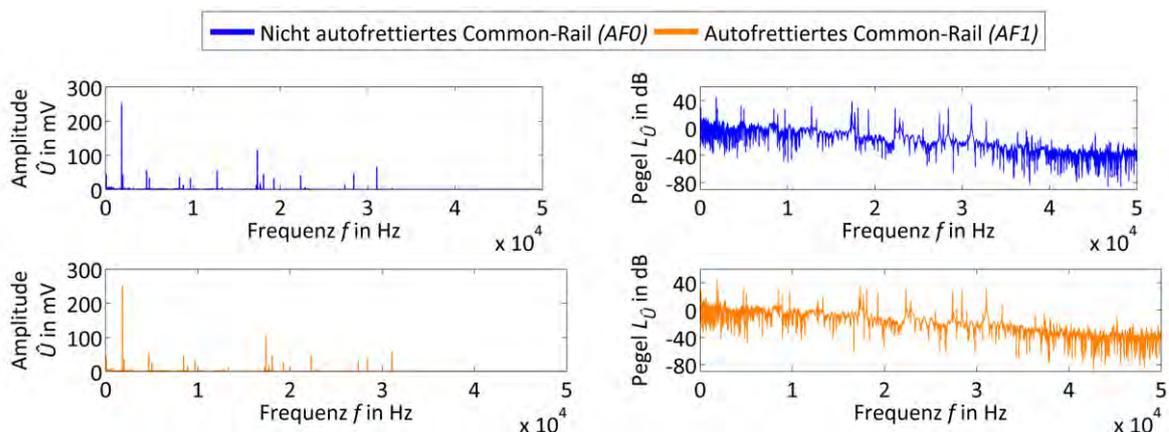


Abb. 5-46: Darstellung typischer Resonanzspektren aus der akustischen Resonanzanalyse lasergeschweißter Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* bzw. *AF1* (lineare und logarithmische Darstellung)

Über den Vergleich der Zeitsignale und der daraus abgeleiteten Spektren sind geringe Unterschiede zwischen lasergeschweißten Common-Rails der Autofrettagezustände *AF0* bzw. *AF1* erkennbar (z. B. Amplitude des Peaks bei ca. 13 kHz). In der linearen Darstellung sind oberhalb von ca. 31 kHz keine nennenswerten Peaks in den Spektren mehr erkennbar.

5.2.2 Experimentelle Suche von Merkmalen zum Autofrettagenachweis

Die Ergebnisse dieses Kapitels basieren auf den in Kapitel 4.6.2.2 beschriebenen Auswertungen für lasergeschweißte Common-Rails. Die Datensätze *M1* bis *M3* aus Versuchsreihe 1 (siehe Kapitel 4.6.1.1), die jeweils ein Zeitsignal der akustischen Resonanzanalyse jedes verwendeten Common-Rails enthalten, wurden getrennt analysiert. Die Anzahl der zur Unterscheidung der verfügbaren Bauteile verschiedener Autofrettagezustände geeigneten Merkmale ist anhand von Tab. 5-8 in Abhängigkeit des Merkmalstyps, des Bewertungskriteriums und des ausgewerteten Datensatzes dargestellt. Zusätzlich ist der prozentuale Anteil potentiell geeigneter Merkmale, bezogen auf die Gesamtanzahl aller ausgewerteten Merkmale, angegeben. Grundsätzlich lassen alle ausgewerteten Merkmalsarten statistisch signifikante Unterschiede zwischen den zu autofrettierten bzw. nicht autofrettierten Common-Rails gehörenden Merkmalswerten erkennen. Jedoch gibt es nur ein Merkmal (*FWHM 22300*), welches zur eindeutigen Unterscheidung der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* ohne Überschneidungen geeignet ist. Die eindeutige Unterscheidung der verfügbaren Bauteile erfolgt anhand der Auswertung der Datensätze *M2* und *M3*. Die Analyse der in Datensatz *M1* enthaltenen Rohdaten führt für jedes Merkmal zu Überschneidungen.

Tab. 5-8: Übersicht über die Anzahl der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren lasergeschweißten Common-Rails (LWR) potentiell geeigneten Merkmale (getrennt nach Arten, Bewertungskriterien und Datensätzen)

Art des Merkmals	Bewertungskriterium					
	Autofrettagenachweis durch signifikanten Zwei-Stichproben-t-Test			Autofrettagenachweis ohne Überschneidung der Werte		
	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>	<i>M1</i>	<i>M2</i>	<i>M3</i>
<i>Center (Impulszentrum)</i>	6	5	6	0	0	0
<i>FWHM (Halbwertsbreite)</i>	8	9	10	0	1	1
<i>Left Half Width (Linke halbe Breite)</i>	10	6	8	0	0	0
<i>Right Half Width (Rechte halbe Breite)</i>	6	5	4	0	0	0
<i>Area (Impulsbereich)</i>	8	9	5	0	0	0
<i>AreaIntP(%) (Prozentbereich)</i>	10	10	5	0	0	0
<i>Height (Impulshöhe)</i>	7	8	4	0	0	0
<i>Centroid (Impulszentrum)</i>	5	5	6	0	0	0
Summe geeigneter Merkmale	60	57	48	0	1	1
Anzahl ausgewerteter Peaks	33	29	32	33	29	32
Anzahl ausgewerteter Merkmale	264	232	256	264	232	256
Prozentualer Anteil geeigneter Merkmale	221,7 %	24,6 %	18,8 %	0 %	0,4 %	0,4 %

Tab. 5-9 listet die am ehesten zum Autofrettagenachweis der verfügbaren lasergeschweißten Common-Rails geeigneten Merkmale in Abhängigkeit des ausgewerteten Datensatzes *M1*, *M2* oder *M3* auf. Je niedriger dabei der aufgeführte p-Wert (empirisches Signifikanzniveau), desto eindeutiger unterscheiden sich die Merkmalswerte von Bauteilen der Autofrettagetzustände *AF0* und *AF1* im Mittel (auf Basis der Auswertung mit einem Zwei-Stichprobent-Test). Die geeignetsten Merkmale lassen sich den Merkmalsarten *FWHM* (Halbwertsbreite), *Left Half Width* sowie *Right Half Width* (linke bzw. rechte halbe Breite) zuordnen. Vor allem der Peak bei ungefähr 22.300 Hz sticht hervor, welcher anhand jedes Datensatzes das geeignetste Merkmal bereitstellt und dessen Halbwertsbreiten bei der Auswertung der Datensätze *M2* und *M3* keine Überschneidungen für die Werte der verfügbaren Common-Rails verschiedener Autofrettagetzustände zeigen. Dies ist in Tab. 5-9 durch die grüne Hinterlegung veranschaulicht.

Tab. 5-9: Auflistung der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren lasergeschweißten Common-Rails (LWR) geeignetsten Merkmale in Abhängigkeit des ausgewerteten Datensatzes

Potentiell zum Autofrettagenachweis geeignete Merkmale und mit den Merkmalswerten bestimmte empirische Signifikanzniveaus (p-Werte) aus einem Zwei-Stichproben-t-Test						
Rang	Merkmal (<i>M1</i>)	p-Wert (<i>M1</i>)	Merkmal (<i>M2</i>)	p-Wert (<i>M2</i>)	Merkmal (<i>M3</i>)	p-Wert (<i>M3</i>)
1	<i>Left Half Width</i> 22300	$3,42 \cdot 10^{-6}$	<i>FWHM</i> 22300	$4,85 \cdot 10^{-6}$	<i>FWHM</i> 22300	$4,76 \cdot 10^{-6}$
2	<i>FWHM</i> 28400	$1,60 \cdot 10^{-4}$	<i>Right Half Width</i> 22300	$3,13 \cdot 10^{-5}$	<i>Left Half Width</i> 22300	$2,20 \cdot 10^{-5}$
3	<i>FWHM</i> 27800	$2,08 \cdot 10^{-4}$	<i>FWHM</i> 19300	$1,51 \cdot 10^{-4}$	<i>FWHM</i> 28400	$4,70 \cdot 10^{-5}$
4	<i>FWHM</i> 22300	$4,33 \cdot 10^{-4}$	<i>Left Half Width</i> 22300	$1,68 \cdot 10^{-4}$	<i>FWHM</i> 32700	$2,32 \cdot 10^{-4}$
5	<i>Centroid</i> 4400	$7,15 \cdot 10^{-4}$	<i>FWHM</i> 28400	$3,06 \cdot 10^{-4}$	<i>FWHM</i> 19300	$5,39 \cdot 10^{-4}$
6	<i>Left Half Width</i> 22800	$7,52 \cdot 10^{-4}$	<i>FWHM</i> 27800	$7,43 \cdot 10^{-4}$	<i>FWHM</i> 27800	$6,00 \cdot 10^{-4}$
7	<i>Center</i> 4400	$7,53 \cdot 10^{-4}$	<i>AreaIntP(%)</i> 23200	$1,39 \cdot 10^{-3}$	<i>FWHM</i> 17200	$8,71 \cdot 10^{-4}$
8	<i>FWHM</i> 19300	$1,43 \cdot 10^{-3}$	<i>Left Half Width</i> 22800	$1,53 \cdot 10^{-3}$	<i>Centroid</i> 6300	$1,40 \cdot 10^{-3}$
9	<i>Centroid</i> 22800	$1,65 \cdot 10^{-3}$	<i>Centroid</i> 22800	$1,61 \cdot 10^{-3}$	<i>Center</i> 6300	$1,48 \cdot 10^{-3}$
10	<i>Center</i> 22800	$1,82 \cdot 10^{-3}$	<i>AreaIntP(%)</i> 1800	$1,81 \cdot 10^{-3}$	<i>Centroid</i> 22800	$1,48 \cdot 10^{-3}$

Im Folgenden sind exemplarisch die Verläufe ausgewählter Merkmalswerte (aus der Analyse des Datensatzes *M1*) von jeweils allen 10 autofrettierten und allen 10 nicht autofrettierten Common-Rails grafisch dargestellt (Abb. 5-47). Wie bereits erwähnt, erlaubt das Merkmal *FWHM* 22300 eine Unterscheidung der Autofrettagetzustände *AF0* und *AF1* ohne Über-

schnedungen bei den Auswertungen der Datensätze *M2* und *M3* (Abb. 5-48). Jedoch ist die Trennung nicht unbedingt reproduzierbar, da bei der Analyse von Datensatz *M1* Überschneidungen erkennbar sind (siehe rechts unten in Abb. 5-47).

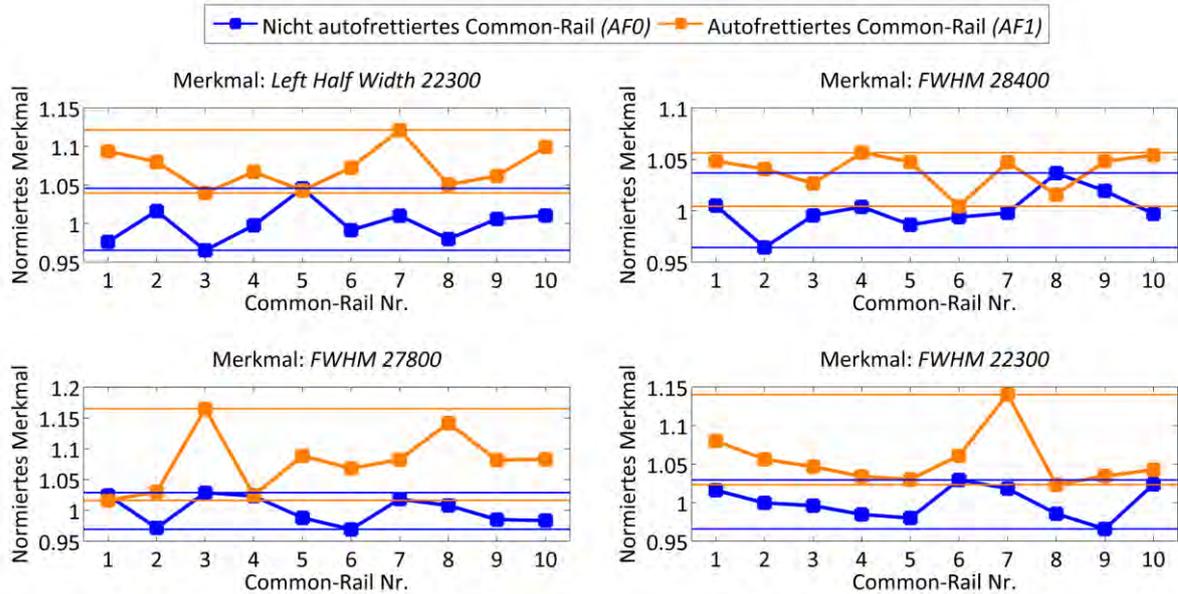


Abb. 5-47: Darstellung normierter Werte ausgewählter Merkmale für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

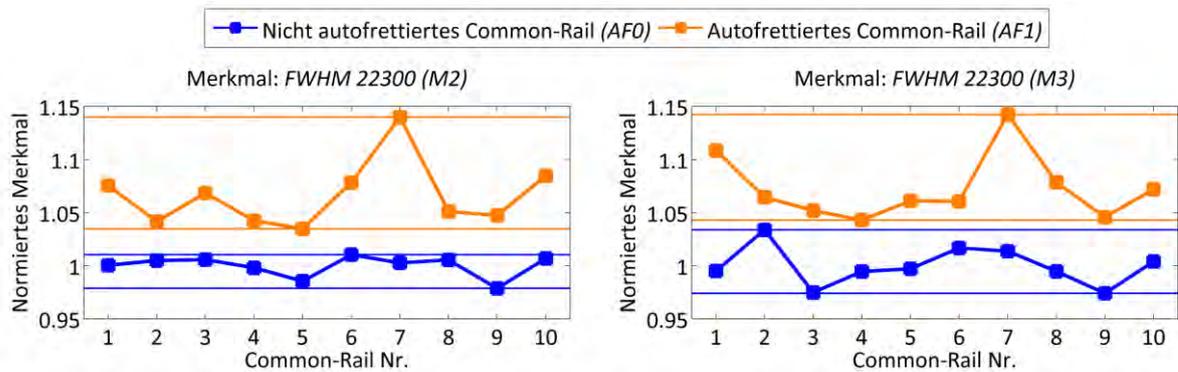


Abb. 5-48: Darstellung normierter Werte des Merkmals *FWHM 22300* für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Auswertung der Datensätze *M2* und *M3*)

5.2.3 Mittelung von Merkmalswerten

Im Folgenden werden die Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.3 beschriebenen Auswertungen für lasergeschweißte Common-Rails dargestellt. Es wurde empirisch untersucht, inwieweit eine Mittelung mehrerer Werte eines Merkmals aus wiederholter akustischer Resonanzanalyse sinnvoll ist. Die Bewertung erfolgte anhand grafischer Vergleiche. Obwohl jeder Mittelwert aus fünf Datensätzen (*M1* bis *M5*) gebildet wurde, sind aus Gründen der Übersichtlichkeit jeweils nur drei Einzelwerte in den Diagrammen dargestellt. Für einige der betrachteten

Merkmale führte die Mittelung der entsprechenden Merkmalswerte zu keinem Erfolg, da der Autofrettagenachweis über diese Merkmale für die verfügbaren Common-Rails auch nach einer Mittelung nicht möglich ist. Exemplarisch sind die Verläufe der Werte der Merkmale *FWHM 19300* und *FWHM 28400* aufgezeigt (Abb. 5-49 und Abb. 5-50). Speziell für das zuletzt genannte Merkmal ist nur ein äußerst marginaler Unterschied zwischen der Kurve der gemittelten Merkmalswerte sowie den entsprechenden Einzelwerten zu erkennen. Für die Werte des Merkmal *FWHM 19300* ist zwar ein Effekt durch Mittelungen zu beobachten, jedoch überschneiden sich die Merkmalswerte autofrettierter und nicht autofrettierter Bauteile weiterhin.

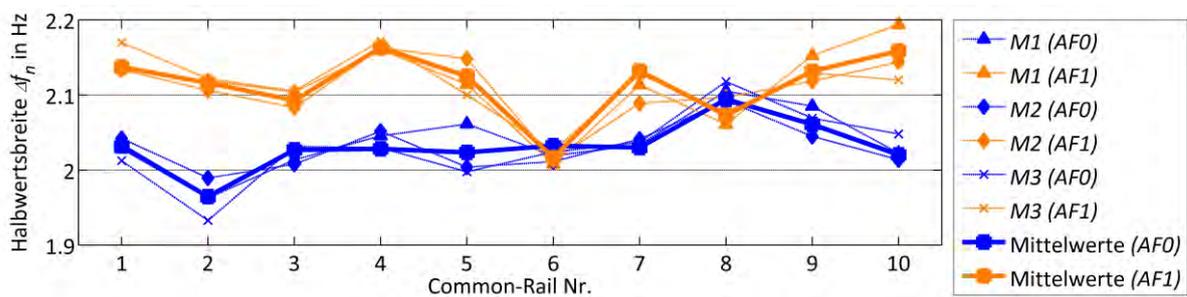


Abb. 5-49: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals *FWHM 19300* aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie Mittelwerte aus fünffach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse für laser-geschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

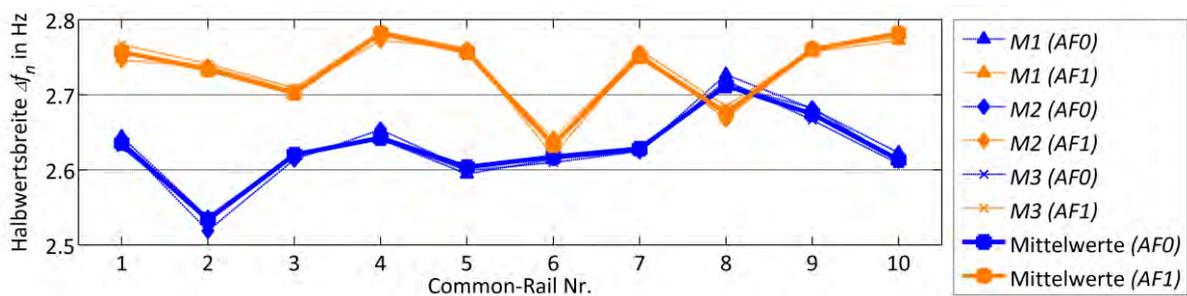


Abb. 5-50: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals *FWHM 28400* aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie Mittelwerte aus fünffach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse für laser-geschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

Im Gegensatz dazu verbesserten Mittelungen der Werte der Merkmale *FWHM 22300* und *FWHM 28400* den Autofrettagenachweis dahingehend, dass keinerlei Werteüberschneidungen der verfügbaren Bauteile verschiedener Autofrettagezustände auftreten (Abb. 5-51 und Abb. 5-52). Der Einfluss von Mittelungen auf die Werte des Merkmals *FWHM 22300* ist vergleichsweise gering. Zuvor konnte in Kapitel 5.2.2 gezeigt werden, dass der entsprechende Peak bei ca. 22.300 Hz in den Resonanzspektren der akustischen Resonanzanalyse das zum Autofrettagenachweis der verfügbaren Common-Rails geeignetste Merkmal bereitstellt, sofern keine Werte aus mehreren Messungen gemittelt wurden. Durch Mittelungen kann die

beispielsweise anhand von Datensatz *M1* beobachtete Werteüberschneidung für Bauteile verschiedener Autofrettagezustände vermieden werden (vgl. Tab. 5-8 und Abb. 5-47). Das Merkmal *FWHM 27800* zeigt einen starken Einfluss bezüglich der Mittelung von Werten (Abb. 5-52). Während zuvor große Streuungen der Werte der akustischen Resonanzanalyse von Common-Rails vergleichbarer Autofrettagezustände beobachtet wurden, ist der Kurvenverlauf der gemittelten Merkmalswerte deutlich erkennbar zur Unterscheidung der verfügbaren Common-Rails unterschiedlicher Autofrettagezustände ohne Überschneidungen geeignet.

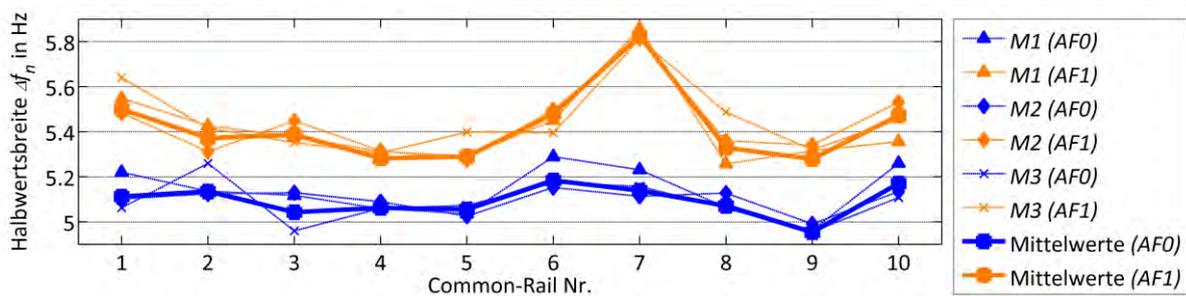


Abb. 5-51: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals *FWHM 22300* aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie Mittelwerte aus fünffach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse für laser-geschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

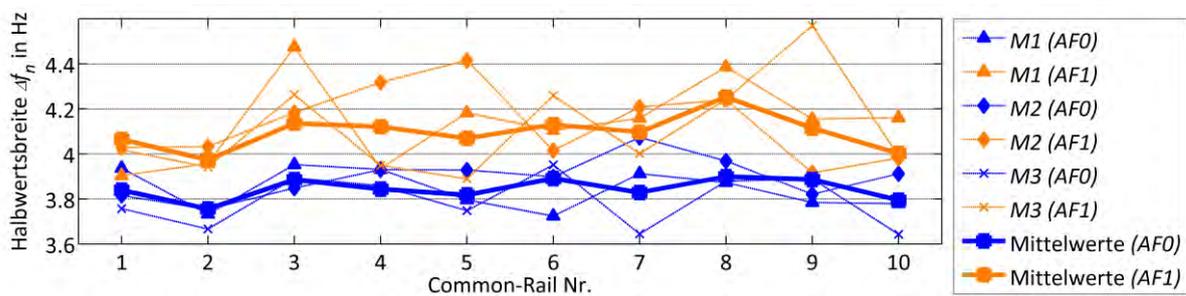


Abb. 5-52: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals *FWHM 27800* aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie Mittelwerte aus fünffach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse für laser-geschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

Eine erneute Suche von zum Autofrettagenachweis der verfügbaren Common-Rails geeigneten Merkmalen ergab, dass die Halbwertsbreiten von lediglich zwei Peaks Unterscheidungen von Bauteilen verschiedener Autofrettagezustände ohne Überschneidungen ermöglichen, sofern die Merkmalswerte aus Einzelwerten aus fünffach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse gemittelt wurden. Tab. 5-10 listet die zum Autofrettagenachweis der verfügbaren lasergeschweißten Common-Rails geeignetsten Halbwertsbreiten (unter Verwendung gemittelter Werte) auf. Je niedriger der dort aufgeführte p-Wert (empirisches Signifikanzniveau) ist, desto eindeutiger unterscheiden sich die mit akustischer Resonanzanalyse ermittelten Merkmalswerte von Common-Rails der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* im Mittel

(auf Basis der Auswertungen mit einem Zwei-Stichproben-t-Test). Alle Merkmale, deren Werte autofrettierter bzw. nicht autofrettierter Common-Rails sich nicht überschneiden, sind grün hinterlegt. Demzufolge trennen lediglich zwei Merkmale die Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* ohne Überschneidung der entsprechenden Wertebereiche. Speziell für das Merkmal *FWHM 27800* ist ersichtlich, dass sich die Unterscheidbarkeit der autofrettierten und der nicht autofrettierten Common-Rails durch Mittelung der Einzelwerte deutlich verbessert hat, sofern eine Bewertung mit Hilfe des empirischen Signifikanzniveaus aus einem Zwei-Stichproben-t-Test erfolgt.

Tab. 5-10: Auflistung der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren lasergeschweißten Common-Rails (LWR) geeignetsten, aus fünffacher akustischer Resonanzanalyse gemittelten Halbwertsbreiten

Potentiell zum Autofrettagenachweis geeignete Halbwertsbreiten und mit den Merkmalswerten bestimmte empirische Signifikanzniveaus (ρ -Werte) aus einem Zwei-Stichproben-t-Test			
Rang	Merkmal	ρ -Wert (gemittelte Merkmalswerte)	ρ -Wert (Einzelwerte aus <i>M1</i> bis <i>M5</i>)
1	<i>FWHM 27800</i>	$6,16 \cdot 10^{-8}$	$2,08 \cdot 10^{-4}$ bis $8,40 \cdot 10^{-3}$
2	<i>FWHM 22300</i>	$1,61 \cdot 10^{-5}$	$4,76 \cdot 10^{-6}$ bis $4,33 \cdot 10^{-4}$
3	<i>FWHM 28400</i>	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$4,70 \cdot 10^{-5}$ bis $3,06 \cdot 10^{-4}$
4	<i>FWHM 19300</i>	$1,37 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-5}$ bis $1,43 \cdot 10^{-3}$
5	<i>FWHM 9700</i>	$1,57 \cdot 10^{-4}$	$1,83 \cdot 10^{-3}$ bis $5,03 \cdot 10^{-2}$

5.2.4 Kombination von Merkmalen

In diesem Kapitel sind Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.4 beschriebenen Auswertungen für lasergeschweißte Common-Rails dargestellt. Bei den folgenden Kombinationen wurden bis zu fünf verschiedene Merkmale berücksichtigt, wobei die Verrechnung für die bereits normierten Werte erfolgte, sodass alle Merkmale mit gleicher Gewichtung in das kombinierte Merkmal eingingen. Mit Hilfe dieser Kombinationsversuche konnte gezeigt werden, dass eine Verrechnung mehrerer Merkmale sinnvoll ist. Exemplarisch wird nun ein kombiniertes Merkmal aufgezeigt, welches sich aus der Summe der gemittelten Werte der Merkmale *FWHM 22300*, *FWHM 27800* und *FWHM 28400* aus fünffach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse jedes verfügbaren Common-Rails ergibt (Abb. 5-53). Die verbesserte Unterscheidung der Autofrettagezustände kann auch mit dem empirischen Signifikanzniveau bestätigt werden, dessen Wert sich von $6,16 \cdot 10^{-8}$ des geeignetsten gemittelten Einzelmerkmals (*FWHM 27800*) aus vorangegangenem Kapitel 5.2.3 auf $2,05 \cdot 10^{-10}$ verringerte. Auch für die Werte eines Merkmals aus dem Produkt derselben gemittelten Merkmale resultiert ein niedrigeres empirisches Signifikanzniveau ($2,87 \cdot 10^{-10}$) als für das geeignetste gemittelte Einzelmerkmal (Abb. 5-54). Durch die Summe der Werte der Merkmale

FWHM 22300, *FWHM 27800* und *FWHM 28400* aus dem Datensatz *M1* kann darüber hinaus auch ohne vorangegangene Mittelung der Werte aus wiederholter akustischer Resonanzanalyse auf den Autofrettagezustand der verwendeten Common-Rails geschlossen werden (Abb. 5-55).

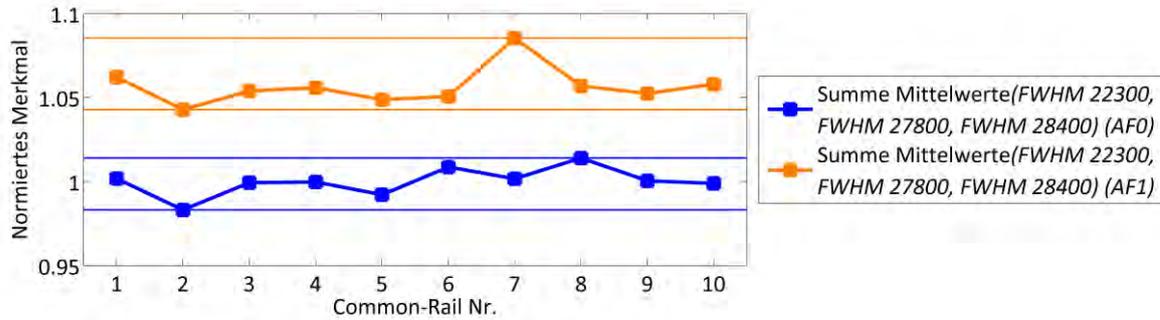


Abb. 5-53: Darstellung normierter Werte des kombinierten Merkmals aus der Summe der gemittelten Merkmale *FWHM 22300*, *FWHM 27800* und *FWHM 28400* für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

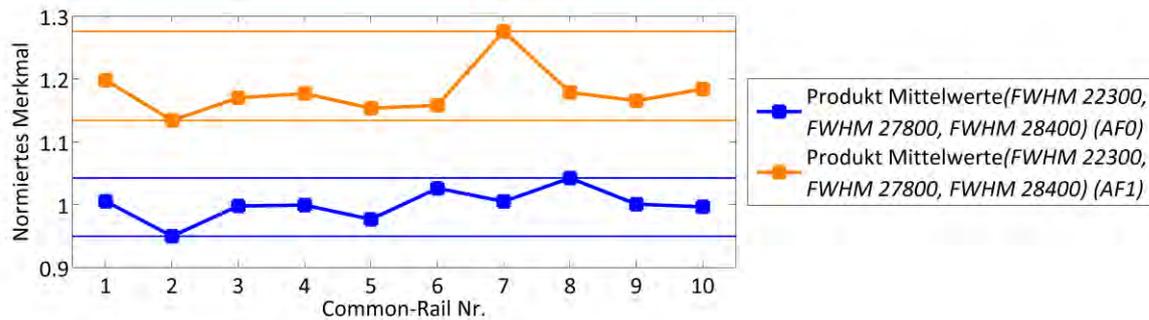


Abb. 5-54: Darstellung normierter Werte des kombinierten Merkmals aus dem Produkt der gemittelten Merkmale *FWHM 22300*, *FWHM 27800* und *FWHM 28400* für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern

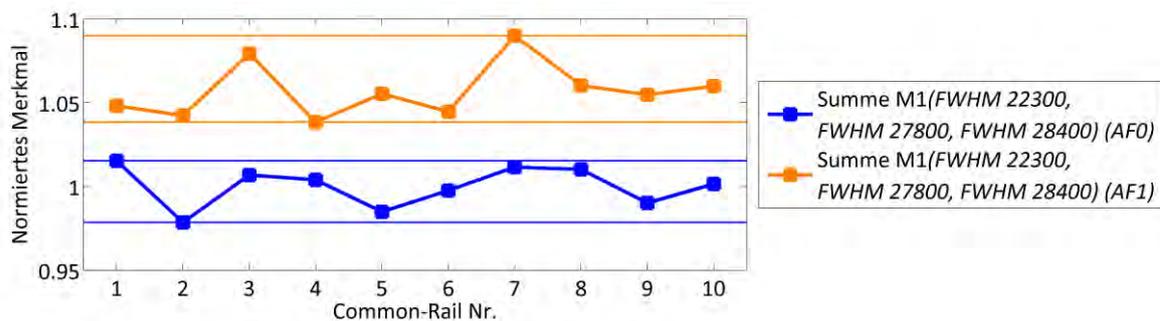


Abb. 5-55: Darstellung normierter Werte des kombinierten Merkmals aus der Summe der Merkmale *FWHM 22300*, *FWHM 27800* und *FWHM 28400* für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Kombination von Werten aus dem Datensatz *M1*)

Abschließend sei auf die Verwendung einer multiplen Regression mit linearer Ansatzfunktion eingegangen. Dabei wird unter Verwendung eines Modellansatzes ein Zusammenhang so

beschrieben, dass die Summe der (quadrierten) Abweichungen zwischen beobachteten und geschätzten Werten möglichst gering ist. Als beobachtete Werte dienten dazu entweder der Wert 1 (für autofrettierte Common-Rails) bzw. der Wert 0 (für nicht autofrettierte Common-Rails). Das Ergebnis einer multiplen Regression mit linearer Ansatzfunktion wurde mit Excel errechnet und lässt sich wie folgt beschreiben, sofern die absoluten (nicht normierten) Merkmalswerte zur Bildung verwendet wurden:

$$\text{Autofrettagezustand} = -17,87 - 0,12 \cdot FWHM_{19300} + 0,78 \cdot FWHM_{19300} + 1,94 \cdot FWHM_{19300} + 0,79 \cdot FWHM_{19300} + 1,02 \cdot FWHM_{19300}$$

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.2.3 gebildeten Mittelwerte der Merkmale ergibt sich bei Verwendung dieses mathematischen Modells der in Abb. 5-56 dargestellte Kurvenverlauf. Das empirische Signifikanzniveau liegt hier nur noch bei $6,33 \cdot 10^{-11}$.

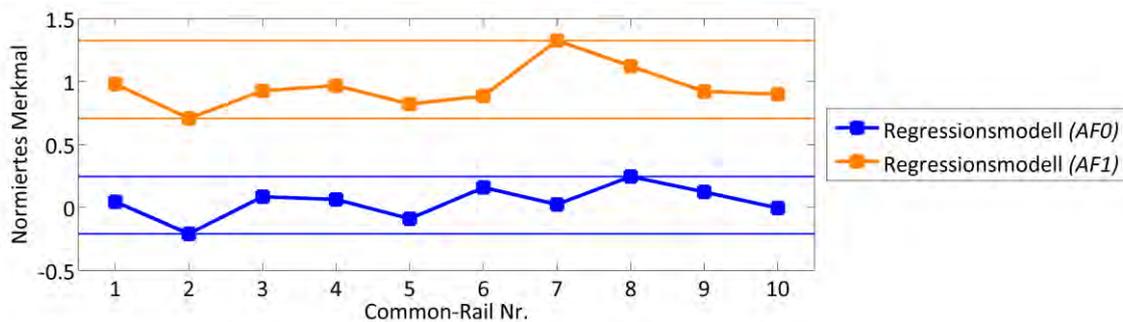


Abb. 5-56: Darstellung normierter Werte des mittels multipler Regression kombinierten Merkmals für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände AF0 und AF1 in Abhängigkeit der Bauteilnummern

5.2.5 Einfluss des Korrosionsschutzes

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.5 vorgestellten Vorgehensweise aufgezeigt. In den folgenden Diagrammen ist jeweils der Werteverlauf eines Merkmals aus 20-fach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse eines Common-Rails vor und nach Aufbringen eines zusätzlichen Korrosionsschutzes dargestellt. Zusätzlich befindet sich in jedem Diagramm eine (orangene) Linie, die die mittlere Wertedifferenz von Common-Rails der Autofrettagezustände AF0 bzw. AF1 angibt. Abb. 5-57 zeigt den Einfluss des zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 28400*. Der Wertebereich nach zusätzlich aufgetragenem WD40 ist mit dem Wertebereich autofrettierte Common-Rails vergleichbar. Für die (nicht dargestellten) Merkmale *FWHM 19300* und *FWHM 32700* sind ähnliche Effekte zu beobachten. Die Werte des Merkmals *FWHM 27800* lassen ebenfalls einen Einfluss durch zusätzlichen Korrosionsschutz erkennen (Abb. 5-58). Zusätzlicher Korrosionsschutz reduziert dagegen die Werte des Merkmals *FWHM 22300* (Abb. 5-59). Im Gegensatz zu den entsprechenden Ergebnissen geschmiedeter Common-Rails (siehe Kapitel 5.1.5) ist der Einfluss auf die Werte durch zusätzlich aufgetragenen Korrosionsschutz konstant.

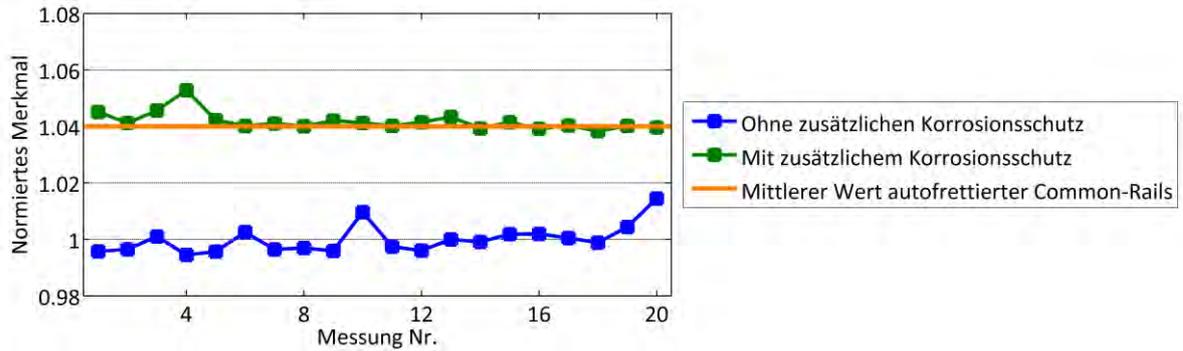


Abb. 5-57: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 28400* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs LWR

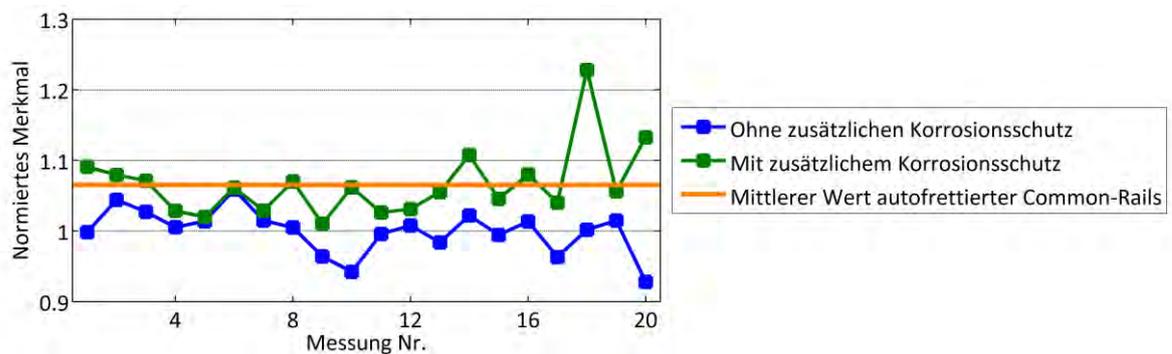


Abb. 5-58: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 27800* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs LWR

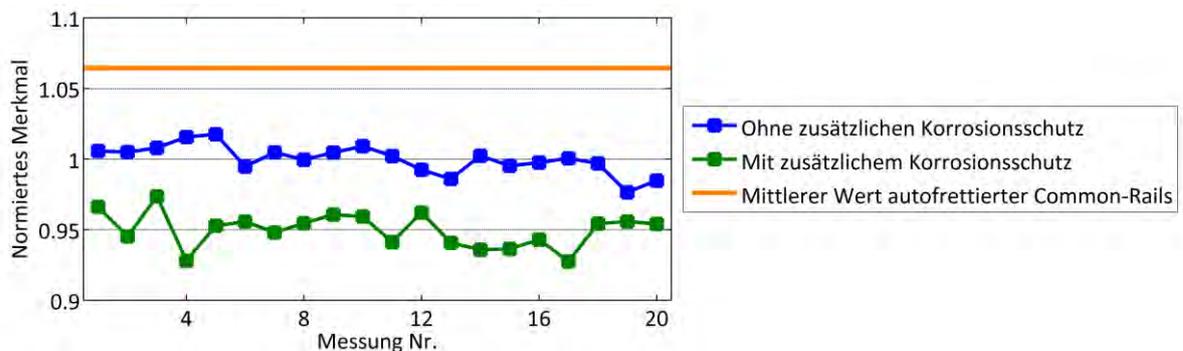


Abb. 5-59: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 22300* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs LWR

5.2.6 Variation der Auswerteparameter

Die Ergebnisse dieses Kapitels basieren auf den in Kapitel 4.6.2.6 beschriebenen Auswertungen für lasergeschweißte Common-Rails. Insgesamt wurden bei der Neuauswertung des Datensatzes *M1* aus Versuchsreihe 1 (siehe Kapitel 4.6.1.1) mit variierten Auswerteeinstellungen die Werte zahlreicher Merkmale bestimmt, wobei über 1.300 verschiedene Merkmalswerte je Common-Rail hinsichtlich der Eignung zum Autofrettagenachweis bewertet wurden. Insgesamt elf Merkmale auf Basis verschiedener Auswerteeinstellungen erlau-

ben die Trennung der Autofrettagezustände. Von diesen lassen sich acht den Merkmalsarten *FWHM* (Halbwertsbreite), *Left Half Width* sowie *Right Half Width* (linke bzw. rechte halbe Breite) zuordnen. Die restlichen drei Merkmale sind Amplituden von Resonanzpeaks (Merkmalsart *Height*). Im Quervergleich mit den Ergebnissen aus Kapitel 5.2.2 ist ersichtlich, dass bei der Auswertung des Datensatzes *M1* mit den standardmäßig verwendeten Softwareeinstellungen kein Nachweis der Autofrettage ohne Überschneidung möglich ist. Sofern z. B. nur der Zeitausschnitt von 120 ms bis 600 ms der aufgezeichneten Zeitsignale betrachtet wurde, ist eine Unterscheidung der Autofrettagezustände mit Hilfe des Merkmals *FWHM 27800* möglich (Abb. 5-60). Durch Bestimmung von Werten des Merkmals *Left Half Width 22300* aus einem Leistungsspektrum (anstelle des standardmäßig verwendeten Amplitudenspektrums) können die Common-Rails unterschiedlicher Autofrettagezustände ebenfalls ohne Überschneidung getrennt werden (Abb. 5-61). Wurde das Zeitsignal nur im Bereich von 300 ms bis 900 ms ausgewertet, kann ebenfalls eine Trennung der Autofrettagezustände mittels des Merkmals *Height 22800* erreicht werden (Abb. 5-62).

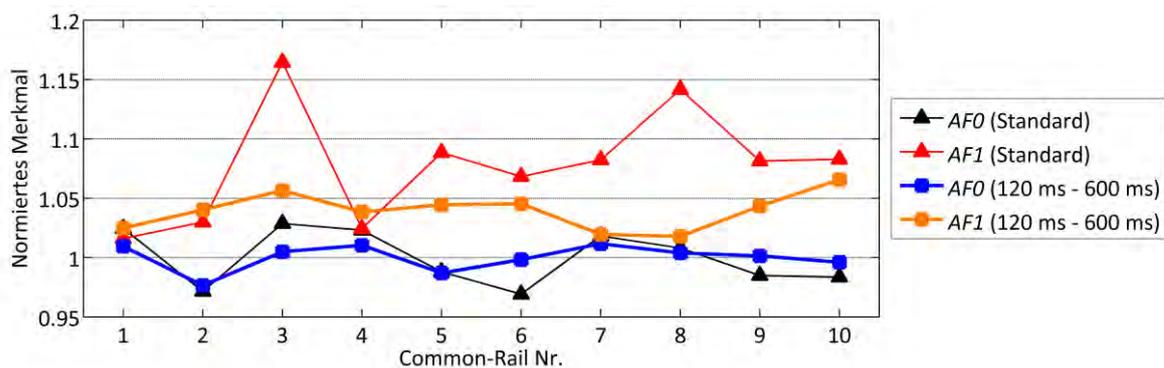


Abb. 5-60: Darstellung normierter Werte des Merkmals *FWHM 27800* für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Auswertungen von verschiedenen Zeitsignalausschnitten)

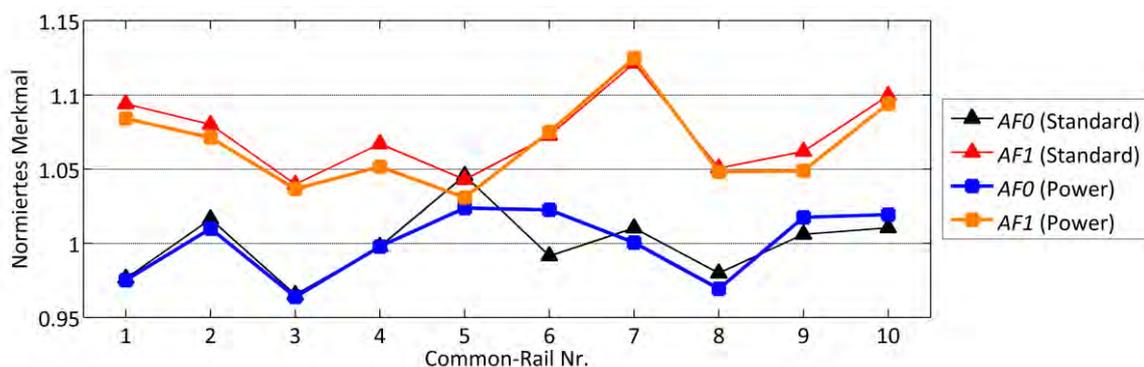


Abb. 5-61: Darstellung normierter Werte des Merkmals *Left Half Width 22300* für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Auswertungen von Amplituden- und Leistungsspektren)

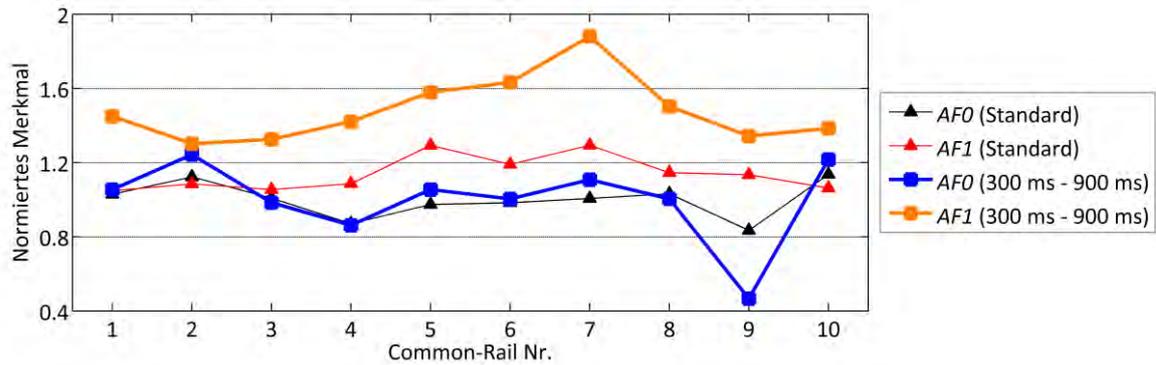


Abb. 5-62: Darstellung normierter Werte des Merkmals *Height 22800* für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Auswertungen von verschiedenen Zeitsignalausschnitten)

Es bleibt festzuhalten, dass nicht dieselbe variierte Einstellung bei den Auswertungen für die vollständige Trennung der Bauteile verantwortlich war. Für alle Merkmale, deren Werte die verfügbaren Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände ohne Überschneidungen unterscheiden, erfolgt die Trennung von Bauteilen verschiedener Autofrettagezustände äußerst knapp. Die mittleren Werteabstände beider Gruppen sind gering und die Streuungen innerhalb einer Gruppe im Vergleich dazu sehr groß.

5.2.7 Vergleich der Merkmalsart Halbwertsbreite mit weiteren Merkmalsarten

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der in Kapitel 4.6.2.7 beschriebenen Auswertungen für lasergeschweißte Common-Rails genannt. Beim Vergleich von Halbwertsbreiten mit den entsprechenden von SonicTC ausgegebenen Werten der Merkmalsarten *frequenzabhängige Abklingkonstante* und *Güte* (siehe Kapitel 4.2.4.2) konnte kein Merkmal gefunden werden, welches die verfügbaren Common-Rails der Autofrettagezustände *AF0* bzw. *AF1* unter Verwendung der Rohdaten aus dem Datensatz *M1* von Versuchsreihe 1 (siehe Kapitel 4.6.1.1) ohne Überschneidungen unterscheidet. Auf weitere Ausführung wird an dieser Stelle verzichtet.

5.2.8 Eigenmoden der Common-Rails

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Untersuchungen mittels Laservibrometrie für lasergeschweißte Common-Rails dargestellt. Zur Vorgehensweise dabei wird auf Kapitel 4.6.2.8 verwiesen. In Abb. 5-63 ist die Schwingungsform des Common-Rails bei 22.300 Hz dargestellt. Diese ist vor allem durch Bewegungskomponenten senkrecht zur Bauteilachse gekennzeichnet, was vor allem in der Darstellung der Schwingungsform von der Längsseite zu erkennen ist. Jedoch handelt es sich nicht um eine (reine) Biegeschwingung, da unsymmetrische Verformungen des Querschnitts erkennbar sind. Eine eindeutige Zuordnung

dieser Eigenmode ist anhand der zur Verfügung stehenden Messergebnisse nicht möglich. Die Erscheinungsform der Schwingung in Umfangsrichtung hängt vom verwendeten Versuchsaufbau bei der Laservibrometrie ab (Abb. 5-63, links, erste Spalte bzw. zweite Spalte).

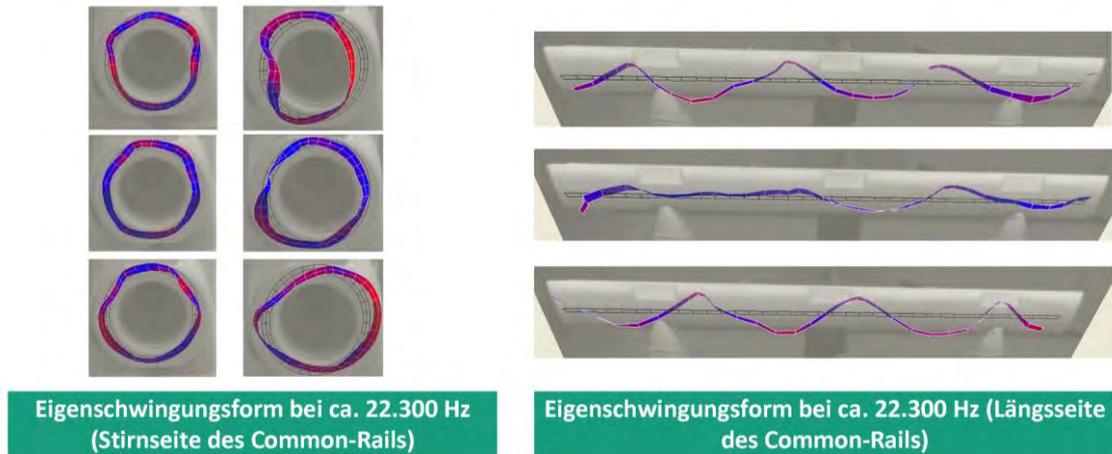


Abb. 5-63: Laservibrometrische Aufnahme der Eigenmode eines Common-Rails des Typs LWR bei ca. 22.300 Hz

Ein weiterer Peak findet sich im Resonanzspektrum bei ungefähr 28.400 Hz. Die zugehörige Animation der Eigenschwingung deutet auf eine longitudinale Mode hin, welche durch dominierende Schwingungskomponenten in Axialrichtung gekennzeichnet ist (Abb. 5-64). Die Stirnfläche des Common-Rails führt die Eigenschwingung allerdings nicht gleichphasig aus. Zusätzlich sind leichte Querschnittsverformungen zu erkennen.

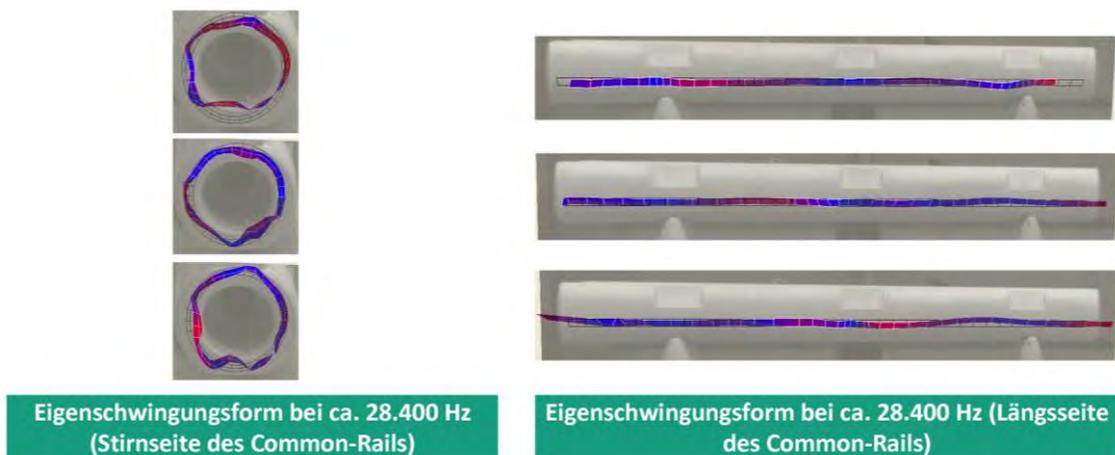


Abb. 5-64: Laservibrometrische Aufnahme der Eigenmode eines Common-Rails des Typs LWR bei ca. 28.400 Hz

Die Schwingungsformen bei ungefähr 19.300 Hz und 27.800 Hz konnten nicht identifiziert werden. Jedoch sind diese durch dominierende Bewegungskomponenten senkrecht zur Bauteilachse (Eigenschwingung bei ungefähr 27.800 Hz) beziehungsweise in Achsrichtung des Bauteils (Eigenschwingung bei ungefähr 19.300 Hz) gekennzeichnet.

6 Diskussion und Fazit

6.1 Diskussion

In den Kapiteln 5.1.1 und 5.2.1 wurde für beide Common-Rail-Typen untersucht, ob sich über eine rein visuelle Begutachtung und Interpretation der Zeitsignale oder der zugehörigen Resonanzspektren mittels der akustischen Resonanzanalyse Unterschiede zwischen autofrettierten und nicht autofrettierten Common-Rails erkennen lassen. Obwohl für geschmiedete Common-Rails sowohl im Vergleich der Zeitsignale als auch der daraus resultierenden Spektren eines autofrettierten bzw. eines nicht autofrettierten Bauteils Unterschiede festgestellt wurden (siehe Abb. 5-1 und Abb. 5-2), können diese nicht eindeutig mit der durchgeführten Autofrettage korreliert werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nominell gleiche Common-Rails desselben Autofrettagezustands bereits Unterschiede in Zeitsignalen und Spektren der akustischen Resonanzanalyse aufweisen, die den Veränderungen der akustischen Eigenschaften durch die Autofrettage überlagert sind. Ein einfacher grafischer Vergleich von Zeitsignalen und Spektren, um so auf den Autofrettagezustand eines Common-Rails rückzuschließen, ist daher nicht zielführend. Weiterhin wurde beobachtet, dass die Amplituden von Resonanzpeaks in den Spektren mit steigender Frequenz abnehmen (siehe z. B. Abb. 5-2). Dies ist durch den Messbereich des verwendeten Mikrofons begründet (siehe Kapitel 4.2.2). Für beide Common-Rail-Typen konnten jedoch mit der akustischen Resonanzanalyse Merkmale bestimmt werden, welche auf den Autofrettagezustand der vorliegenden Bauteile schließen lassen (siehe Kapitel 5.1.2 und 5.2.2). Es wurde gezeigt, dass Merkmale der Arten *FWHM* (Halbwertsbreite), *Left Half Width* sowie *Right Half Width* (linke bzw. rechte halbe Breite) zahlreicher Resonanzpeaks zur reproduzierbaren und eindeutigen Unterscheidung der untersuchten geschmiedeten Common-Rails der Autofrettagezustände *AFO* bzw. *AF1* geeignet sind (vgl. Tab. 5-1 bis Tab. 5-3 sowie Abb. 5-3). Daraus folgt, dass der Autofrettagenachweis für geschmiedete Common-Rails prozesssicher anhand eines einzigen Merkmals der akustischen Resonanzanalyse erreichbar ist. Für lasergeschweißte Common-Rails konnte im Gegensatz zu der geschmiedeten Variante kein Merkmal gefunden werden, welches alleine betrachtet eine prozesssichere Unterscheidung der verfügbaren Bauteile verschiedener Autofrettagezustände ohne Überschneidung der Streubänder ermöglicht, obwohl für mehrere Merkmale im Mittel signifikante Unterschiede zwischen Common-Rails beider Autofrettagezustände erkennbar sind (vgl. Tab. 5-8 und Tab. 5-9 sowie Abb. 5-47 und Abb. 5-48).

Als Ursachen für diese unterschiedliche Nachweisbarkeit der Autofrettage anhand eines einzelnen Merkmals kommen die im Vergleich zu den geschmiedeten Common-Rails einfachere

Geometrie der lasergeschweißten Common-Rails, die verwendeten Werkstoffe, fertigungsprozessbedingte Differenzen im Gefügebau bzw. in den Oberflächeneigenschaften sowie Unterschiede in den Eigenspannungszuständen nach der Autofrettage in Frage. Ein Vergleich der in den Common-Rails durch Autofrettage verursachten Eigenspannungen (siehe Kapitel 4.1.3) zeigt, dass sich deren Größenordnungen und Verläufe im Wesentlichen nicht unterscheiden. Unter der Annahme, dass die FEM-Simulationen zur Berechnung der Eigenspannungsprofile autofrettierter Common-Rails die realen Eigenspannungszustände hinreichend genau abbilden, können wesentliche Unterschiede der vorherrschenden Eigenspannungen zwischen den beiden Common-Rail-Typen ausgeschlossen werden. Da jedoch die genauen physikalischen Gegebenheiten, welche zum Autofrettagenachweis mittels akustischer Resonanzanalyse führen, bisher nicht bekannt sind, kann nicht ausgeschlossen werden, dass lokale Eigenspannungsspitzen für den prozesssicheren Nachweis der Autofrettage verantwortlich sind. Über die Fertigungsprozesse der beiden Common-Rail-Typen liegen nur unzureichende Informationen vor. Deutliche Unterschiede in der Textur der Common-Rails sind auf Grund der unterschiedlichen Fertigungsverfahren nicht auszuschließen. Andere Arbeiten stellen heraus, dass die Schallgeschwindigkeit durch die Textur in Werkstoffen deutlich stärker verändert wird als durch den akusto-elastischen Effekt in Bauteilen mit Eigenspannungen [Schneider1999]. So kann auch eine ungünstige Textur im Gefüge die durch Eigenspannungen veränderten akustischen Eigenschaften überlagern. Ein Einfluss der unterschiedlichen Geometrie ist ebenfalls naheliegend, da auf Grund der komplexeren Geometrie der geschmiedeten Common-Rails ebenso komplexere Eigenschwingungsformen auftreten. Zur endgültigen Klärung der Ursachen sind weiterführende Untersuchungen notwendig (siehe Kapitel 7.2).

Um eine prozesssichere Unterscheidung autofrettierter und nicht autofrettierter Common-Rails auch für die lasergeschweißte Bauform zu erreichen, wurden Untersuchungen zur Sinnhaftigkeit von Mittelungen der Ergebnisse aus mehreren akustischen Resonanzanalysen sowie zur rechnerischen Kombination mehrerer Merkmale durchgeführt (siehe Kapitel 5.2.3 und 5.2.4). Dabei zeigte sich, dass durch solche Vorgehensweisen die Nachweisbarkeit der Autofrettage für die untersuchten Bauteile deutlich verbessert wurde. Darauf aufbauend kann auch für lasergeschweißte Common-Rails prozesssicher auf deren Autofrettagezustand geschlossen werden. Analoge Untersuchungen führten auch für geschmiedete Common-Rails zu vergleichbaren Ergebnissen (siehe Kapitel 5.1.3 und 5.1.4). Für die Common-Rails beider Bauformen hängt die Sinnhaftigkeit von Mittelungen der Ergebnisse aus mehreren akustischen Resonanzanalysen eines Bauteils jedoch vom betrachteten Merkmal ab (vgl. Abb. 5-8 und Abb. 5-12). Werte aus wiederholten Messungen streuen in Abhängigkeit des

Merkmals unterschiedlich stark, woraus zu schließen ist, dass die unterschiedlichen Merkmale verschieden auf zufällige Störgrößen – wie eine nicht exakt konstante Impulsanregung oder eine Abweichung von der gewünschten Bauteilpositionierung – reagieren. Diese zufälligen Effekte können durch Mittelungen reduziert werden, was eine deutliche Verbesserung des Autofrettagenachweises zur Folge hat. Mit Hilfe eines mathematischen Modells (siehe Kapitel 4.5.3) sowie anhand von Versuchswiederholungen konnte exemplarisch für geschmiedete Common-Rails der Einfluss von Mittelungen abgeschätzt werden, indem die Varianz von Werten der akustischen Resonanzanalyse mehrerer Bauteile vergleichbaren Autofrettagezustands in einzelne Komponenten zerlegt wurde. Sofern bei einer solchen Analyse die durch ungenaue Bauteilpositionierung und nicht exakt konstante Impulsanregung verursachten Komponenten einen großen Teil der Gesamtvarianz darstellen, ist eine Mittelung zielführend. Dass bei diesen Auswertungen Varianzanteile bestimmt wurden, welche negativ bzw. größer als die aus den Messdaten bestimmte Gesamtvarianz sind (vgl. Tab. 5-4 und Tab. 5-5), ist durch Ausreißer der Messdaten sowie den geringen verfügbaren Stichprobenumfang zu erklären. Dies ändert jedoch nichts an der Kernaussage des Modells.

Speziell für lasergeschweißte Common-Rails konnte der Autofrettagenachweis der verfügbaren Bauteile sowohl durch einfache rechnerische Kombinationen verschiedener Merkmale als auch durch einen mittels multipler Regression gebildeten Zusammenhang verbessert werden (siehe Kapitel 5.2.4, z. B. Abb. 5-53 und Abb. 5-56). Dies ist damit zu erklären, dass zufällige Effekte unterschiedlich gerichtet auf verschiedene Merkmale Einfluss nehmen können. Das bedeutet, dass ein zufälliger Einfluss den Wert eines Merkmals erhöhen und den eines anderen Merkmals gleichzeitig reduzieren kann. Durch eine Kombination von Werten verschiedener Merkmale können solche zufälligen Effekte eliminiert oder gemindert werden. Da auch nominell gleiche Common-Rails auf Grund von Schwankungen im Fertigungsprozess über lokal unterschiedliche Eigenspannungszustände verfügen, ist unter der Modellannahme, dass je nach Eigenschwingungsform andere Bauteilbereiche maßgeblich den Wert eines Merkmals bestimmen, gegeben, dass bestimmte Merkmale auf nominell gleiche Bauteile unterschiedlich reagieren. Da das Ziel darin besteht, eine Aussage über den Autofrettagezustand eines gesamten Bauteils zu erreichen, ist eine Merkmalsverknüpfung zielführend.

Untersuchungen zum Einfluss eines zusätzlich auf die Common-Rails aufgetragenen Korrosionsschutzes zeigten, dass alle betrachteten Halbwertsbreiten von Resonanzpeaks unterschiedlich empfindlich auf applizierten Korrosionsschutz reagieren (siehe Kapitel 5.1.5 und 5.2.5). Für geschmiedete Common-Rails wurde festgestellt, dass der Korrosionsschutz die Werte der Halbwertsbreiten von Resonanzpeaks zunächst erhöhte und die Werte sich bei wiederholter Messung asymptotisch dem Wert vor Aufbringen des Korrosionsschutzes nä-

herten (siehe Abb. 5-15 bis Abb. 5-19). Zur Klärung, ob dieser Einfluss zeitlich bedingt war, da der zusätzliche Korrosionsschutz verdunstete bzw. mit der Umgebungsluft oder der Bauteiloberfläche reagierte, oder ob die wiederholte Impulsanregung verantwortlich war, da z. B. durch die Bauteilschwingungen geordnete Strukturen des Korrosionsschutzes zerstört wurden, sind weitere Literaturrecherchen und experimentelle Untersuchungen erforderlich (siehe Kapitel 7.2). Für lasergeschweißte Common-Rails wurde dagegen jeweils eine konstante Verschiebung des Wertebereichs eines Merkmals beobachtet. Im Gegensatz zu den geschmiedeten Common-Rails wurden die betrachteten Halbwertsbreiten durch den applizierten Korrosionsschutz nicht immer erhöht, sondern die Werte eines Merkmals wurden geringer (vgl. Abb. 5-57 und Abb. 5-59). Dies kann bei der Kombination von Merkmalen ausgenutzt werden. Sofern sich die Einflüsse auf die Einzelmerkmale gegenseitig aufheben, kann ein kombiniertes Merkmal konstruiert werden, das unempfindlich gegenüber zusätzlichem Korrosionsschutz reagiert.

Die Kapitel 5.1.6 und 5.2.6 präsentieren Ergebnisse zum Einfluss von verschiedenen Auswerteeinstellungen und führen zu dem Schluss, dass die für die Untersuchungen in dieser Arbeit verwendeten Auswerteeinstellungen zum Nachweis der Autofrettage geeignet sind. Der Vergleich ausgewählter Halbwertsbreiten mit weiteren dämpfungsproportionalen Merkmalen zeigte, dass diese zusätzlichen Merkmale zum Autofrettagenachweis nicht besser geeignet sind als die Halbwertsbreiten von Resonanzpeaks (siehe Kapitel 5.1.7 sowie 5.2.7). Die relativen Kurvenverläufe der Werte vergleichbarer Merkmale stimmten im Wesentlichen überein (siehe z. B. Abb. 5-25), was darauf zurückzuführen ist, dass alle diese Merkmale jeweils vom Dämpfungsverhalten der entsprechenden Eigenschwingungen abhängen (vgl. Kapitel 2.4.2 und 2.4.3).

Mit Hilfe variierten Versuchsaufbauten wurde deren Einfluss auf die Unterscheidbarkeit von geschmiedeten Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände mittels akustischer Resonanzanalyse untersucht (siehe Kapitel 5.1.9). Der Versuchsaufbau kann Einflüsse auf die Wertebereiche (siehe z. B. Abb. 5-44) sowie auf die Streuung von Werten aus wiederholten akustischen Resonanzanalysen haben (siehe z. B. Abb. 5-35 und Abb. 5-36). Daraus kann geschlossen werden, dass bei der akustischen Resonanzanalyse die strenge Einhaltung von Randbedingungen unerlässlich ist. Ob die Fähigkeit eines Merkmals auf den Autofrettagezustand zu schließen ebenfalls vom Versuchsaufbau abhängt, oder ob die z. B. in Abb. 5-40 gezeigte verbesserte Unterscheidung von Common-Rails verschiedener Autofrettagezustände von anderen Einflussgrößen abhängt, kann auf Basis der Versuchsergebnisse nicht beurteilt werden. Da die in Abb. 5-40 verglichenen Ergebnisse aus unterschiedlichen Versuchsreihen abgeleitet wurden, deren Durchführungen aus organisatorischen Gründen im Abstand von

fünf Tagen erfolgten, ist z. B. ein zeitlicher Einfluss auf Grund des nach der Autofrettage standardmäßig durchgeführten Reinigungsprozesses bzw. des anschließend applizierten Korrosionsschutzes auf die Nachweismöglichkeit der Autofrettage nicht ausgeschlossen. Jedoch ist grundsätzlich ein zusätzliches Potential zur Optimierung des Autofrettagenachweises durch die Variation des Versuchsaufbaus gegeben.

Die Untersuchungen der Eigenschwingungsformen der Common-Rails (Kapitel 5.1.8 und 5.2.8) zeigten, dass die zum Autofrettagenachweis genutzten Resonanzpeaks beider Common-Rail-Typen zu verschiedenen Eigenschwingungsformen gehören. Das hat zur Folge, dass ein Versuchsaufbau, welcher die gezielte Anregung bestimmter Schwingungsformen ermöglicht, nicht zielführend ist.

6.2 Fazit

Es bleibt festzuhalten, dass eine Vielzahl der in Abb. 3-1 aufgeführten Parameter einen Einfluss auf die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse hat. Neben dem Versuchsaufbau (siehe Kapitel 3 und 5.1.9) wurde die Vorgehensweise bei der Auswertung von Rohdaten der akustischen Resonanzanalyse als Einflussgröße identifiziert (Kapitel 5.1.6, 5.1.7, 5.2.6 und 5.2.7). Als Störgrößen wurden der auf die Common-Rails applizierte Korrosionsschutz, zufällige Abweichungen von der gewünschten Bauteilpositionierung sowie eine nicht konstante Impulsanregung erkannt (Kapitel 5.1.3, 5.1.5 und 5.2.5). Bei einigen Untersuchungen (siehe Kapitel 5.1.3 und 5.1.5) wurden abweichende Ergebnisse als bei Voruntersuchungen ermittelt. Während der Vorversuche herrschten durchaus andere Randbedingungen (Reinigungs-zustand der Common-Rails, Umgebungsbedingungen, Menge des aufgetragenen Korrosionsschutzes etc.). Aufgrund der vielfältigen Unterschiede zwischen den Untersuchungen können die abweichenden Ergebnisse keiner Ursache zugeordnet werden. Jedoch ist durch diesen Quervergleich ersichtlich, dass zahlreiche Einflussfaktoren die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse beeinflussen können. Dies ist jedoch keinesfalls negativ zu bewerten sondern zeigt vielmehr wie empfindlich die akustische Resonanzanalyse auf verschiedenste Parameter reagiert und verdeutlicht damit das Potential dieser Prüfmethode. Zur endgültigen Klärung der Auswirkungen und Zusammenhänge aller Parameter sind weitere Untersuchungen mit den Zielen, einen optimierten Versuchsaufbau für die akustische Resonanzanalyse zu entwickeln sowie die Einflüsse von Störgrößen zu minimieren, erforderlich.

Unter Einhaltung von Randbedingungen und durch gegebenenfalls geschickte Mittelung oder Kombination von Ergebnissen der akustischen Resonanzanalyse kann jedoch für die Common-Rails beider Bauformen auf den Autofrettagezustand eines Bauteils geschlossen werden (Kapitel 5.1.2, 5.1.3, 5.1.4, 5.2.2, 5.2.3 und 5.2.4).

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Untersuchungen zum Nachweis von Autofrettagezuständen und damit gekoppelten Eigenspannungszuständen mittels akustischer Resonanzanalyse und Laservibrometrie durchgeführt und durch FEM-Simulationen zur Schallabstrahlung ergänzt. Die Untersuchungen erfolgten an einem geometrisch einfachen Testkörper sowie an geschmiedeten und lasergeschweißten Common-Rails, wobei in den Common-Rails durch einen Autofrettageprozess gezielt Eigenspannungen eingebracht wurden.

An einem Testkörper mit vereinfachter Geometrie wurde der Einfluss der Anregungs- und Auflagerposition, des Mikrofonabstands sowie der Anregungsart auf die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse experimentell untersucht. FEM-Simulationen sowie analytische Berechnungen des abgestrahlten Schallfelds dienten der Bestätigung und dem Verständnis der experimentellen Ergebnisse. Für die geschmiedeten und die lasergeschweißten Common-Rails wurden aus Resonanzspektren der akustischen Resonanzanalyse geeignete Merkmale zum Nachweis der Autofrettage unter Variation der Auswerteparameter abgeleitet. Durch systematische Untersuchungen konnten Einflussfaktoren auf die Wertebereiche und die Streuungen von Werten dieser Merkmale ermittelt werden. Zusätzlich dienten Variationen im Versuchsaufbau bei der akustischen Resonanzanalyse geschmiedeter Common-Rails dazu, deren Einflüsse auf den Autofrettagenachweis zu erkennen. Mit Laservibrometrischen Untersuchungen wurden abschließend die zugehörigen, schallabstrahlenden Eigenschwingungsformen der Common-Rails identifiziert.

Es wurde gezeigt, dass der Nachweis der Autofrettage mittels akustischer Resonanzanalyse sowohl für geschmiedete als auch für lasergeschweißte Common-Rails möglich ist. Die Halbwertsbreiten zahlreicher Peaks in den Spektren der akustischen Resonanzanalyse von geschmiedeten Common-Rails korrelieren stark mit dem Autofrettagezustand, sodass anhand mehrerer einzelner Halbwertsbreiten auf den Autofrettagezustand geschlossen werden kann. Die durch Autofrettage in den Bauteilen verursachten Eigenspannungen führen zu größeren Halbwertsbreiten. Durch Mittelungen von Halbwertsbreiten derselben Peaks aus mehrfach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse kann die Aussage bezüglich des Autofrettagezustands eines Bauteils weiter verbessert werden.

Für lasergeschweißte Common-Rails lässt sich der Autofrettagezustand ebenfalls anhand eines einzelnen Merkmals durch geeignete Mittelung der Ergebnisse aus mehrfach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse bestimmen. In dieser Hinsicht signifikante Merkmale sind v. a. die Halbwertsbreiten zweier Resonanzpeaks.

Durch theoretische Überlegungen sowie Betrachtung der Beiträge einzelner Komponenten zur Gesamtstreuung konnte ein mathematisches Modell zur Voraussage, ob eine Mittelung für ein spezielles Merkmal zielführend zur Unterscheidbarkeit von Common-Rails unterschiedlicher Autofrettagezustände ist, aufgestellt und verifiziert werden. Eine rechnerische Kombination von Werten bestimmter Merkmale führte darüber hinaus für beide Common-Rail-Typen zu einer deutlich verbesserten Unterscheidbarkeit von Bauteilen verschiedener Autofrettagezustände.

Es zeigte sich, dass die Halbwertsbreite bzw. damit korrelierende Größen zum Nachweis der Autofrettage führen. Andere Merkmalsarten führten zu weniger signifikanten Ergebnissen.

Als ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse konnte der auf die Common-Rails applizierte Korrosionsschutz identifiziert werden, was eine Beschreibung des Autofrettagezustands unter ungünstigen Umständen erschwert. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass weitere Einflussgrößen, wie z. B. der gewählte Versuchsaufbau oder die zur Auswertung genutzten Softwareeinstellungen, zu kontrollieren sind.

Untersuchungen mittels 3D-Laservibrometrie in Kombination mit akustischer Resonanzanalyse erlauben eine eindeutige Zuordnung unterschiedlicher Schwingungsmoden zu Resonanzfrequenzen der Common-Rails. Dabei wurde herausgearbeitet, dass kein einfacher Zusammenhang zwischen einer spezifischen Eigenschwingungsform und ihrer Eignung zum Autofrettagenachweis existiert.

7.2 Ausblick

Um das Potential der akustischen Resonanzanalyse in Richtung einer Prüfprozesseignung weiter zu erhöhen, bieten sich aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit weitere Untersuchungen an. So erscheint eine umfassende Analyse der Varianzanteile, die zur Streuung von Merkmalswerten verschiedener Common-Rails des gleichen Autofrettagezustands führen, sinnvoll. Weiterhin soll der Einfluss von Korrosionsschutz auf die Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse statistisch untersucht werden. Zukünftige Untersuchungen dienen außerdem dazu, den Einfluss weiterer praxisrelevanter Störgrößen, wie z. B. der Umgebungstemperatur und der Luftfeuchte, zu quantifizieren.

Weiteres Potential wird in der Analyse hochfrequenter Schwingungskomponenten gesehen. Daher sollen ergänzende Versuche mit einem Mikrofon mit einer oberen Eckfrequenz von 100 kHz durchgeführt werden.

Mechanisch bearbeitete Rohlinge von geschmiedeten Common-Rails dienen der Untersuchung, ob die Nachweismöglichkeit der Autofrettage mit akustischer Resonanzanalyse von

der komplexen Geometrie der Bauteile abhängt. Dazu existieren zwei bearbeitete Varianten, bei welchen die Geometrie mit zerspanenden Methoden unterschiedlich stark vereinfacht wurde.

Das im Rahmen dieser Arbeit gewonnene Know-how zu FEM-Simulationen soll zukünftig als begleitendes Hilfsmittel stärker genutzt werden. Neben der Eigenschwingungssimulation mit und ohne Eigenspannungen wird es möglich sein auch die Schallabstrahlung zu modellieren.

Im weiteren Verlauf des Kooperationsprojekts werden weiterhin alternative Prüftechniken angewandt und daraus resultierende Ergebnisse mit den Ergebnissen der akustischen Resonanzanalyse abgeglichen. Dazu bietet sich vor allem die Bestimmung der Ultraschalllaufzeit in ausgewählten Proben an, um so auf vorhandene Eigenspannungen unter Ausnutzung des akusto-elastischen Effektes zu schließen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Autofrettage mit der Fraunhofer-3MA-Technik nachzuweisen, was eine geeignete Problemstellung für eine Bachelor- oder Master-Thesis darstellen könnte.

In Anlehnung an das 3MA-Verfahren des IZFP, welches aus zahlreichen gemessenen magnetischen Kenngrößen über einen – im Rahmen einer multiplen Regression empirisch gebildeten – rechnerischen Zusammenhang auf mechanisch-technologische Kennwerte rückschließt, ist auch für die akustische Resonanzanalyse eine vergleichbare Vorgehensweise realisierbar. So können mehrere Merkmale aus einer akustischen Resonanzanalyse durch eine geschickte Verrechnung miteinander kombiniert werden, sodass z. B. ein prozesssicherer Rückschluss auf Bauteilzustände möglich ist.

Die Master-Thesis konnte die Komplexität der gegebenen Aufgabenstellung des Kooperationsprojekts aufzeigen und Lösungswege ableiten, wie sich mit Hilfe weiterer experimenteller Untersuchungen sowie unterstützender FEM-Simulationen, die durch Autofrettage verursachten Eigenspannungen in Zukunft prozesssicher nachweisen lassen.

Literaturverzeichnis

- [3MA2007] Fraunhofer IZFP; 2007: *Prüfsystem 3MAII: Benutzerhandbuch – Stand: Juli 2007*. Fraunhofer IZFP, Saarbrücken
- [Assmann2006] Assmann, B., Selke, P.; 2006: *Technische Mechanik, Band 2: Festigkeitslehre*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München
- [Bosch2011] Website der Robert Bosch GmbH, Zugriffsdatum: 26.09.2011
- [BoschGB2010] Robert Bosch GmbH: *Geschäftsbericht 2010*, Download über Website der Robert Bosch GmbH, Zugriffsdatum: 26.09.2011
- [BoschIntern2011] Vertrauliche Informationen aus Kooperationsprojekt *Charakterisierung des Autofrettagetzustandes von Rails mit zerstörungsfreien akustischen Methoden* der Robert Bosch GmbH und dem Fraunhofer IZFP, 2011
- [Büning1991] Büning, H.; 1991: *Robuste und adaptive Tests*. De Gruyter Verlag, Berlin, New York
- [Cremer2010] Cremer, L., Heckl, M., bearbeitet von Möser, M., Kropp, W.; 2010: *Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [Dräger2008] Dräger, D.; 2008: *Einflüsse von Bauteiltoleranzen und Bauteilfehlern auf die akustische Resonanzanalyse*. Diplomarbeit HTWdS / Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Saarbrücken
- [Dobrinski2010] Dobrinski, P., Krakau, G., Vogel, A.; 2010: *Physik für Ingenieure*. Vieweg + Teubner, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- [Dubbel2005] Grote, K.-H. (Hrsg.), Feldhusen, J. (Hrsg.); 2005: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [Energierreport2005] EWI, Prognos AG; 2005: *Energierreport IV: Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030*. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, Berlin, Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München
- [Fraunhofer2011] Website der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., Zugriffsdatum: 02.06.2011
- [Gehr2007] Gehr, F. (Hrsg.), Hellingrath, B. (Hrsg.); 2007: *Logistik in der Automobilindustrie: Innovatives Supply Chain Management für wettbewerbsfähige Zulieferstrukturen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg

- [Gerthsen2010] Meschede, D. (Hrsg.); 2010: *Gerthsen Physik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [Gerusel1998] Gerusel, K.; 1998: *Atmungsschwingungen von Hohlzylindern und daraus resultierende Luftschallabstrahlung*. VDI-Verlag Düsseldorf
- [Häfele2003] Häfele, P., Issler, L., Ruoß, H.; 2003: *Festigkeitslehre – Grundlagen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [Herbst2004] Herbst, J.; 2004: *Zerstörungsfreie Prüfung von Abwasserkanälen mit Klopferschall*. Universitätsverlag Karlsruhe
- [Hering2007] Hering, E., Martin, R., Stohrer, M.; 2007: *Physik für Ingenieure*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [Hertlin2003] Hertlin, G.; 2003: *Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung – ZfP kompakt und verständlich, Band 5: Akustische Resonanzanalyse*. Castell Verlag GmbH Wuppertal
- [IZFP2011] Website des Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP), Zugriffsdatum: 02.06.2011
- [Jann2005] Jann, B.; 2005: *Einführung in die Statistik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH
- [Kino1987] Kino, G. S.; 1987: *Acoustic Waves: Devices, Imaging, and Analog Signal Processing*. Prentice-Hall
- [Kloos1979] Kloos, H.; 1979: *Eigenspannungen, Definition und Entstehungsursachen*. Zeitschriftenbeitrag in *Zeitschrift für Werkstofftechnik*, September 1979, Heft 9, S. 293 bis S. 302, Verlag Chemie GmbH, Weinheim
- [Kohn2005] Kohn, W.; 2005: *Statistik: Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [Krautkrämer1986] Krautkrämer, J., Krautkrämer, H.; 1986: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [Lerch2009] Lerch, R., Sessler, G., Wolf D.; 2009: *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [Leutwein2008] Leutwein, H. U.; 2008: *Einfluss von Autofrettage auf die Schwingfestigkeit innendruckbelasteter Bauteile aus Kugelgraphitguss*. Dissertation, TU Ilmenau Universitätsbibliothek
- [Lindner2006] Lindner, H., bearbeitet von Siebke, W., Simon, G., Wuttke, W.; 2006: *Physik für Ingenieure*. Carl Hanser Verlag München Wien

- [Markus1988] Markus, S.; 1988: *The mechanics of vibrations of cylindrical shells*. Elsevier Amsterdam Oxford New York Tokio
- [Möser2009] Möser, M.; 2009: *Technische Akustik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [Möser2010] Möser, M. (Hrsg.); 2010: *Messtechnik der Akustik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [Papula2001] Papula, L.; 2001: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Band 3: Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung*. Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
- [PatentschriftBosch] Robert Bosch GmbH; 2008: *Vorrichtung und Verfahren zum Nachweis von Eigenspannungen eines Bauteils*. Patentschrift, Dokumentenidentifikation: DE102007001139A1 10.07.2008, Download von www.patent-de.com am 23.09.2011
- [Polytec2011] Website der Polytec GmbH, Zugriffsdatum: 22.09.2011
- [PolytecIntern2011] Schulungsunterlagen der Polytec GmbH
- [Reif2010] Reif, K. (Hrsg.); 2010: *Moderne Diesel-Einspritzsysteme: Common Rail und Einzelzylindersysteme*. Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
- [Rohrbach1989] Rohrbach, C. (Hrsg.); 1989: *Handbuch für experimentelle Spannungsanalyse*. Springer Berlin
- [Roos2008] Roos, E., Maile, K.; 2008: *Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [Sachs2006] Sachs, L., Hedderich, J.; 2006: *Angewandte Statistik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [Szielasko2009] Szielasko, K.; 2009: *Entwicklung messtechnischer Module zur mehrparametrischen elektromagnetischen Werkstoffcharakterisierung und -prüfung*. Dissertation, Fraunhofer IZFP, Saarbrücken
- [Seeger1994] Seeger, T., Schön, M., Bergmann, J., Vormwald, M.; 1993: *Autofrettage I: Vorhaben Nr. 478; Dauerfestigkeitssteigerung durch Autofrettage; Abschlussbericht*. FVV Frankfurt
- [Schneider1999] Schneider, E.; 2000: *Untersuchung der materialspezifischen Einflüsse und verfahrenstechnische Entwicklungen der Ultraschallverfahren zur*

- Spannungsanalyse an Bauteilen*. Dissertation, Fraunhofer IZFP, Saarbrücken
- [Singh2011] Singh, L., Kahn, R. A., Aggarwal, M. L.; 2011: *Relationship between Damping Factor and Compressive Residual Stress for Shoot-Peened Austenitic Stainless Steel*. International Scholarly Research Network ISRN Mechanical Engineering, Volume 2011, Article ID 867484, Department of Mechanical Engineering, India
- [Sommerfeld1992] Sommerfeld, A.; 1992: *Mechanik der deformierbaren Medien*. Verlag Harri Deutsch, Thun
- [Thürmel1996] Thürmel, P.; 1996: *Frequenzmoduliertes Dauerstrich-Laser-Radar für die industrielle Messtechnik*. Herbert Utz Verlag München
- [Weinzierl2008] Weinzierl, S.; 2008: *Handbuch der Audiotechnik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [Weißgerber2005] Weißgerber, W.; 2005: *Elektrotechnik für Ingenieure 2*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- [Werner2010] Werner, M.; 2010: *Nachrichtentechnik: Eine Einführung für alle Studiengänge*. Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Darstellung einer Schwebung und einer Überlagerung von vier verschiedenen Sinusschwingungen rationaler Frequenzverhältnisse (in Anlehnung an [Lindner2006, S. 188 f.] 5

Abb. 2-2: Darstellung der normierten zeitabhängigen Auslenkung $y(t) / \hat{y}$ in Abhängigkeit der Zeit t für eine gedämpfte Schwingung (in Anlehnung an [Lindner2006, S. 201]) 6

Abb. 2-3: Darstellung der Auslenkungsamplitude einer erzwungenen Schwingung in Abhängigkeit der Erregerkreisfrequenz für verschiedene Dämpfungen (in Anlehnung an [Hering2007, S. 446 f.] 7

Abb. 2-4: Darstellung der Ausbreitung einer Störung (Welle) (in Anlehnung an [Lindner2006, S. 218]) 8

Abb. 2-5: Darstellung einer Longitudinal- und einer Transversalwelle (in Anlehnung an [Krautkrämer1986, S. 5]) 8

Abb. 2-6: Darstellung der Wellenlänge λ einer Welle (in Anlehnung an [Lindner2006, S. 220]) 9

Abb. 2-7: Darstellung des Verhaltens einer Wellengruppe bei Dispersion (in Anlehnung an [Lindner2006, S. 226]) 9

Abb. 2-8: Darstellung stehender Seilwellen bei gelagerten und bei freien Enden (in Anlehnung an [Gerthsen2010, S. 184])10

Abb. 2-9: Darstellung der Entstehung von Luftschall (in Anlehnung an [Gerusel1998, S. 19])11

Abb. 2-10: Darstellung einer reinen Longitudinalwelle und einer quasi-longitudinalen Welle (in Anlehnung an [Cremer2010, S. 36])14

Abb. 2-11: Darstellung einer reinen Transversalwelle und einer Biegewelle (in Anlehnung an [Möser2009, S. 129 ff.]15

Abb. 2-12: Darstellung drei verschiedener Plattenmoden einer allseitig eingespannten Platte (in Anlehnung an [Möser2009, S. 148 f.]15

Abb. 2-13: Darstellung der Wellenzahl in Umfangsrichtung und der Halbwellenzahl in Axialrichtung und jeweilige optische Erscheinungsformen für einen Hohlzylinder (in Anlehnung an [Markus1988, S. 16])....16

Abb. 2-14: Darstellung ausgewählter Eigenmoden eines rohrförmigen Bauteils (FEM-Simulation) (Quelle: [Herbst2004, S. 24])16

Abb. 2-15: Darstellung ausgewählter Eigenschwingungsformen eines Hohlzylinders (in Anlehnung an [Markus1988, S. 18])17

Abb. 2-16: Darstellung eines zeitkontinuierlichen Signals und eines durch Abtasten diskretisierten Signals...18

Abb. 2-17: Darstellung eines diskreten Linienspektrums und eines kontinuierlichen Spektrums19

Abb. 2-18: Darstellung der messtechnischen Erfassung von Luftschall und der Weiterverarbeitung des aufgezeichneten Signals	21
Abb. 2-19: Darstellung des Prinzips der akustischen Resonanzanalyse	22
Abb. 2-20: Darstellung der Halbwertsbreite eines Resonanzpeaks in einem Leistungsspektrum und in einem Amplitudenspektrum	23
Abb. 2-21: Darstellung möglicher Merkmalsarten eines Peaks in einem Amplitudenspektrum	24
Abb. 2-22: Darstellung der Überlagerung von Eigenspannungen und Betriebsspannungen (in Anlehnung an: [Roos2008, S. 91]).....	26
Abb. 2-23: Darstellung des Wirkungsprinzips der Autofrettage (in Anlehnung an: [Seeger1993, S. 2])	28
Abb. 2-24: Schematische Darstellung tangentialer Spannungen in einem durch Innendruck belasteten, nicht autofrettierten Rohr (a), in einem unbelasteten, autofrettierten Rohr (b) sowie in einem durch Innendruck belasteten, autofrettierten Rohr (c) (in Anlehnung an [Seeger1993, S. 7 f.].....	28
Abb. 2-25: Schematische Darstellung des akusto-elastischen Effekts: Relative Änderung der Schallgeschwindigkeit mit der elastischen Zugdehnung eines metallischen Probestabes [Schneider1999, S. 25]	31
Abb. 3-1: Darstellung potentieller Einflüsse auf das Ergebnis einer akustischen Resonanzanalyse	35
Abb. 3-2: Bearbeitete Fotoaufnahme des Versuchsaufbaus zur experimentellen Überprüfung der Auswirkungen des Mikrofonabstands auf Ergebnisse der akustischen Resonanzanalyse	38
Abb. 3-3: Darstellung der Stirnseite eines Stabes als konphas schwingende Kreismembran	39
Abb. 3-4: Darstellung eines Resonanzspektrums aus einer akustischen Resonanzanalyse des Testkörpers mit der Lage der Peaks der ersten 10 longitudinalen Eigenschwingungen	43
Abb. 3-5: Darstellung der Schalldruckamplitude entlang der Mittelsenkrechten der Stirnfläche für die erste longitudinale Eigenschwingung ($n = 1$) des Testkörpers.....	45
Abb. 3-6: Darstellung der Schalldruckamplitude entlang der Mittelsenkrechten der Stirnfläche für die vierte longitudinale Eigenschwingung ($n = 4$) des Testkörpers.....	45
Abb. 3-7: Darstellung der Schalldruckamplitude entlang der Mittelsenkrechten der Stirnfläche für die sechste longitudinale Eigenschwingung ($n = 6$) des Testkörpers.....	46
Abb. 3-8: Darstellung der Schalldruckamplitude entlang der Mittelsenkrechten der Stirnfläche für die achte longitudinale Eigenschwingung ($n = 8$) des Testkörpers.....	46
Abb. 3-9: Darstellung der Amplitude der ersten longitudinalen Eigenschwingung ($n = 1$) des Testkörpers und der ortsabhängigen Schalldruckamplitude des in Luft abgestrahlten Schallfelds	47
Abb. 3-10: Darstellung der Amplitude der vierten longitudinalen Eigenschwingung ($n = 4$) des Testkörpers und der ortsabhängigen Schalldruckamplitude des in Luft abgestrahlten Schallfelds	47

Abb. 3-11: Darstellung der Amplitude der sechsten longitudinalen Eigenschwingung ($n = 6$) des Testkörpers und der ortsabhängigen Schalldruckamplitude des in Luft abgestrahlten Schallfelds	47
Abb. 3-12: Darstellung der Amplitude der achten longitudinalen Eigenschwingung ($n = 8$) des Testkörpers und der ortsabhängigen Schalldruckamplitude des in Luft abgestrahlten Schallfelds	47
Abb. 3-13: Darstellung von Versuchsaufbauten mit verschiedenen Anregungspositionen und -orientierungen	48
Abb. 3-14: Darstellung aufgezeichneter Zeitsignale nach Impulsanregung des Testkörpers an drei verschiedenen Positionen und daraus resultierende Resonanzspektren, orange: Peaks von Biegeeigenschwingungen, grün-blau: Peaks von longitudinalen Eigenschwingungen	49
Abb. 3-15: Darstellung von vier Eigenschwingungsformen des Testkörpers mittels Laservibrometrie	50
Abb. 3-16: Darstellung von Resonanzspektren basierend auf drei verschiedenen Impulsanregungen des Testkörpers, orange: Peaks von Biegeeigenschwingungen, grün-blau: Peaks von longitudinalen Eigenschwingungen	50
Abb. 3-17: Darstellung von Resonanzspektren basierend auf drei verschiedenen Impulsanregungen des Testkörpers	51
Abb. 3-18: Darstellung von Resonanzspektren des Testkörpers in Abhängigkeit des Lagerabstandes	52
Abb. 3-19: Darstellung von Resonanzspektren des Testkörpers in Abhängigkeit der Anregungsmethode	52
Abb. 4-1: Fotografische Aufnahme eines geschmiedeten Common-Rails (HFR)	56
Abb. 4-2: Fotografische Aufnahme eines lasergeschweißten Common-Rails (LWR)	57
Abb. 4-3: Darstellung der Schnittebenen für die Simulation der Eigenspannungen autofrettierter Common-Rails (links: HFR, rechts: LWR (Quelle: [BoschIntern2011]))	57
Abb. 4-4: Darstellung der radialen Komponente der durch Autofrettage verursachten Eigenspannungen in beiden Schnittebenen der Common-Rails (links: HFR, rechts: LWR) (Quelle: [BoschIntern2011])	58
Abb. 4-5: Darstellung der radialen Komponente der durch Autofrettage verursachten Eigenspannungen entlang jeweils eines Pfades der Common-Rails (links: Schnitt 1, rechts: Schnitt 2) (Quelle: [BoschIntern2011])	58
Abb. 4-6: Darstellung der tangentialen Komponente der durch Autofrettage verursachten Eigenspannungen in beiden Schnittebenen der Common-Rails (links: HFR, rechts: LWR) (Quelle: [BoschIntern2011])	58
Abb. 4-7: Darstellung der tangentialen Komponente der durch Autofrettage verursachten Eigenspannungen entlang jeweils eines Pfades der Common-Rails (links: Schnitt 1, rechts: Schnitt 2) (Quelle: [BoschIntern2011])	59
Abb. 4-8: Darstellung der axialen Komponente der durch Autofrettage verursachten Eigenspannungen in beiden Schnittebenen der Common-Rails (links: HFR, rechts: LWR) (Quelle: [BoschIntern2011])	59

Abb. 4-9: Darstellung der axialen Komponente der durch Autofrettage verursachten Eigenspannungen entlang jeweils eines Pfades der Common-Rails (links: Schnitt 1, rechts: Schnitt 2) (Quelle: [BoschIntern2011]).....	59
Abb. 4-10: Darstellung der Von-Mises-Vergleichsspannung in beiden Schnittebenen der Common-Rails nach dem Autofrettageprozess (links: HFR, rechts: LWR) (Quelle: [BoschIntern2011])	60
Abb. 4-11: Darstellung der Von-Mises-Vergleichsspannung entlang jeweils eines Pfades der Common-Rails nach dem Autofrettageprozess (links: Schnitt 1, rechts: Schnitt 2) (Quelle: [BoschIntern2011]).....	60
Abb. 4-12: Mikroskopische Gefügaufnahmen von Schnittebene 2 eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR mit verschiedenen Vergrößerungen.....	61
Abb. 4-13: Mikroskopische Gefügaufnahmen von Schnittebene 2 eines autofrettierten Common-Rails des Typs HFR mit verschiedenen Vergrößerungen	61
Abb. 4-14: Makroskopische Gefügaufnahmen von Schnittebene 2 eines autofrettierten und eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR	62
Abb. 4-15: Grafische Darstellung des radialen Härteverlaufs in Schnittebene 2 für ein autofrettiertes und ein nicht autofrettiertes Common-Rail des Typs HFR	62
Abb. 4-16: Fotografische Aufnahme eines Ventils im Inneren der autofrettierten Common-Rails des Typs HFR	63
Abb. 4-17: Bearbeitete fotografische Aufnahme der RTE SigTestBox mit Zubehör	66
Abb. 4-18: Bearbeitete fotografische Aufnahme des Prüflaptops sowie des Bedienpults zur Impulsauslösung	66
Abb. 4-19: Bearbeitete fotografische Aufnahme des Laservibrometers des IZPF (in Anlehnung an [PolytecIntern2011])	67
Abb. 4-20: Bearbeitete fotografische Aufnahme des Standardversuchsaufbaus für geschmiedete Common-Rails (HFR) bei der akustischen Resonanzanalyse	71
Abb. 4-21: Bearbeitete fotografische Aufnahme zur Verdeutlichung der Positionierung geschmiedeter Common-Rails (HFR) bei der akustischen Resonanzanalyse.....	71
Abb. 4-22: Bearbeitete fotografische Aufnahme des Standardversuchsaufbaus für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) bei der akustischen Resonanzanalyse.....	72
Abb. 4-23: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Streuung innerhalb einer Gruppe und Differenz der Mittelwerte zweier Gruppen	75
Abb. 5-1: Darstellung typischer zeitabhängiger Schalldruckverläufe nach Impulsanregung geschmiedeter Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> bzw. <i>AF1</i>	87

Abb. 5-2: Darstellung typischer Resonanzspektren aus der akustischen Resonanzanalyse geschmiedeter Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> bzw. <i>AF1</i> (lineare und logarithmische Darstellung) ..88	
Abb. 5-3: Darstellung normierter Werte ausgewählter Merkmale für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern.....91	
Abb. 5-4: Darstellung normierter Werte der Merkmale <i>FWHM 5900</i> und <i>Right Half Width 12500</i> für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern92	
Abb. 5-5: Darstellung normierter Werte der Merkmale <i>FWHM 20800</i> und <i>FWHM 27200</i> für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern92	
Abb. 5-6: Darstellung der Streuungskomponenten der Merkmale <i>FWHM 12500</i> und <i>FWHM 26200</i> bei der akustischen Resonanzanalyse verschiedener geschmiedeter Common-Rails (HFR) sowie bei mehrmaliger akustischer Resonanzanalyse desselben Bauteils mit und ohne vorangegangener Neupositionierung.....94	
Abb. 5-7: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals <i>FWHM 12500</i> aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie entsprechender Mittelwerte für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern.....95	
Abb. 5-8: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals <i>FWHM 18400</i> aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie entsprechender Mittelwerte für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern.....95	
Abb. 5-9: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals <i>FWHM 17900</i> aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie entsprechender Mittelwerte für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern.....95	
Abb. 5-10: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals <i>FWHM 26200</i> aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie entsprechender Mittelwerte für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern.....96	
Abb. 5-11: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals <i>FWHM 25900</i> aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie entsprechender Mittelwerte für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern.....96	
Abb. 5-12: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals <i>FWHM 5900</i> aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie entsprechender Mittelwerte für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern.....96	
Abb. 5-13: Darstellung normierter Werte der Summe der Merkmale <i>FWHM 25900</i> und <i>FWHM 27800</i> sowie des Merkmals <i>FWHM 12500</i> für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern98	

Abb. 5-14: Darstellung normierter Werte der Summe der Merkmale *FWHM 25900* und *FWHM 27800* sowie des Merkmals *FWHM 27200* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern98

Abb. 5-15: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 12500* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR.....99

Abb. 5-16: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 18400* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR.....100

Abb. 5-17: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 27200* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR.....100

Abb. 5-18: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 27800* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR.....100

Abb. 5-19: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 25900* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR.....101

Abb. 5-20: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 17900* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR im Vergleich zu entsprechenden Ergebnissen aus Vorversuchen101

Abb. 5-21: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 18400* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs HFR im Vergleich zu entsprechenden Ergebnissen aus Vorversuchen101

Abb. 5-22: Darstellung normierter Werte des Merkmals *FWHM 12500* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Auswertungen mit und ohne Zero-Padding)102

Abb. 5-23: Darstellung normierter Werte des Merkmals *FWHM 25900* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Auswertungen mit und ohne Zero-Padding)102

Abb. 5-24: Darstellung normierter Werte des Merkmals *FWHM 18400* für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Auswertungen von verschiedenen Zeitsignalausschnitten)103

Abb. 5-25: Darstellung normierter Werte der Merkmale <i>FWHM 18400</i> und <i>frequenzabhängige Abklingkonstante 18400</i> für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AFO</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern.....	104
Abb. 5-26: Darstellung normierter Werte der Merkmale <i>FWHM 27800</i> und <i>frequenzabhängige Abklingkonstante 27800</i> für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AFO</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern.....	104
Abb. 5-27: Darstellung normierter Werte der Merkmale <i>FWHM 27800</i> und <i>frequenzabhängige Abklingkonstante 27800</i> für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AFO</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Bestimmung der frequenzabhängigen Abklingkonstanten im Zeitsignalausschnitt von 300 ms bis 900 ms)	105
Abb. 5-28: Darstellung normierter Werte der Merkmale <i>FWHM 18400</i> und <i>Güte 18400</i> für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AFO</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern	105
Abb. 5-29: Darstellung normierter Werte der Merkmale <i>FWHM 27200</i> und <i>Güte 27200</i> für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AFO</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern	105
Abb. 5-30: Laservibrometrische Aufnahme der Eigenmode eines Common-Rails des Typs HFR bei ca. 12.500 Hz.....	106
Abb. 5-31: Laservibrometrische Aufnahme der Eigenmode eines Common-Rails des Typs HFR bei ca. 18.400 Hz.....	106
Abb. 5-32: Laservibrometrische Aufnahme der Eigenmode eines Common-Rails des Typs HFR bei ca. 17.900 Hz.....	107
Abb. 5-33: Laservibrometrische Aufnahme der Eigenmoden eines Common-Rails des Typs HFR bei ca. 25.900 Hz und 27.200 Hz	107
Abb. 5-34: Laservibrometrische Aufnahme der Eigenmoden eines Common-Rails des Typs HFR bei ca. 17.900 Hz und 18.400 Hz bei verändertem Versuchsaufbau	108
Abb. 5-35: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals <i>FWHM 12500</i> bei mehrfach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse eines geschmiedeten Common-Rails (HFR) in Abhängigkeit des Mikrofonabstands	108
Abb. 5-36: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals <i>FWHM 12500</i> bei mehrfach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse eines geschmiedeten Common-Rails (HFR) in Abhängigkeit des Mikrofonabstands (Streubänder)	109
Abb. 5-37: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals <i>FWHM 25900</i> bei mehrfach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse eines geschmiedeten Common-Rails (HFR) in Abhängigkeit des Mikrofonabstands	109

Abb. 5-38: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals <i>FWHM 25900</i> bei mehrfach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse eines geschmiedeten Common-Rails (HFR) in Abhängigkeit des Mikrofonabstands (Streubänder)	109
Abb. 5-39: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals <i>FWHM 14500</i> bei mehrfach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse eines geschmiedeten Common-Rails (HFR) in Abhängigkeit des Mikrofonabstands	109
Abb. 5-40: Darstellung normierter Werte des Merkmals <i>FWHM 25900</i> für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern und des zur Datenaufzeichnung verwendeten Mikrofonabstands	111
Abb. 5-41: Darstellung normierter Werte des Merkmals <i>FWHM 12500</i> für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern und des zur Datenaufzeichnung verwendeten Mikrofonabstands	111
Abb. 5-42: Darstellung normierter Werte des Merkmals <i>FWHM 14500</i> für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern und des zur Datenaufzeichnung verwendeten Mikrofonabstands	112
Abb. 5-43: Darstellung normierter Werte des Merkmals <i>FWHM 12500</i> für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern und des zur Datenaufzeichnung verwendeten Lagerabstands	112
Abb. 5-44: Darstellung absoluter Werte des Merkmals <i>FWHM 12500</i> für geschmiedete Common-Rails (HFR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern und des zur Datenaufzeichnung verwendeten Lagerabstands	112
Abb. 5-45: Darstellung typischer zeitabhängiger Schalldruckverläufe nach Impulsanregung lasergeschweißter Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> bzw. <i>AF1</i>	113
Abb. 5-46: Darstellung typischer Resonanzspektren aus der akustischen Resonanzanalyse lasergeschweißter Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> bzw. <i>AF1</i> (lineare und logarithmische Darstellung)	113
Abb. 5-47: Darstellung normierter Werte ausgewählter Merkmale für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern	116
Abb. 5-48: Darstellung normierter Werte des Merkmals <i>FWHM 22300</i> für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Auswertung der Datensätze <i>M2</i> und <i>M3</i>)	116
Abb. 5-49: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals <i>FWHM 19300</i> aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie Mittelwerte aus fünffach durchgeführter akustischer	

Resonanzanalyse für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern.....	117
Abb. 5-50: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals <i>FWHM 28400</i> aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie Mittelwerte aus fünffach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern.....	117
Abb. 5-51: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals <i>FWHM 22300</i> aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie Mittelwerte aus fünffach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern.....	118
Abb. 5-52: Darstellung der Merkmalswerte des Merkmals <i>FWHM 27800</i> aus dreifach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse sowie Mittelwerte aus fünffach durchgeführter akustischer Resonanzanalyse für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern.....	118
Abb. 5-53: Darstellung normierter Werte des kombinierten Merkmals aus der Summe der gemittelten Merkmale <i>FWHM 22300</i> , <i>FWHM 27800</i> und <i>FWHM 28400</i> für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern.....	120
Abb. 5-54: Darstellung normierter Werte des kombinierten Merkmals aus dem Produkt der gemittelten Merkmale <i>FWHM 22300</i> , <i>FWHM 27800</i> und <i>FWHM 28400</i> für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern.....	120
Abb. 5-55: Darstellung normierter Werte des kombinierten Merkmals aus der Summe der Merkmale <i>FWHM 22300</i> , <i>FWHM 27800</i> und <i>FWHM 28400</i> für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Kombination von Werten aus dem Datensatz <i>M1</i>)	120
Abb. 5-56: Darstellung normierter Werte des mittels multipler Regression kombinierten Merkmals für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände <i>AF0</i> und <i>AF1</i> in Abhängigkeit der Bauteilnummern	121
Abb. 5-57: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals <i>FWHM 28400</i> bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs LWR.....	122
Abb. 5-58: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals <i>FWHM 27800</i> bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs LWR.....	122

Abb. 5-59: Darstellung des Einflusses eines zusätzlichen Korrosionsschutzes auf die Werte des Merkmals *FWHM 22300* bei der akustischen Resonanzanalyse eines nicht autofrettierten Common-Rails des Typs LWR.....122

Abb. 5-60: Darstellung normierter Werte des Merkmals *FWHM 27800* für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Auswertungen von verschiedenen Zeitsignalausschnitten)123

Abb. 5-61: Darstellung normierter Werte des Merkmals *Left Half Width 22300* für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Auswertungen von Amplituden- und Leistungsspektren)123

Abb. 5-62: Darstellung normierter Werte des Merkmals *Height 22800* für lasergeschweißte Common-Rails (LWR) der Autofrettagezustände *AF0* und *AF1* in Abhängigkeit der Bauteilnummern (Auswertungen von verschiedenen Zeitsignalausschnitten)124

Abb. 5-63: Laservibrometrische Aufnahme der Eigenmode eines Common-Rails des Typs LWR bei ca. 22.300 Hz.....125

Abb. 5-64: Laservibrometrische Aufnahme der Eigenmode eines Common-Rails des Typs LWR bei ca. 28.400 Hz.....125

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Auflistung möglicher Merkmalsarten eines Peaks aus einem Amplitudenspektrum	24
Tab. 2-2: Übersicht über mögliche Fehlerarten und Fehlerwahrscheinlichkeiten P bei Testentscheidungen [Schlittgen2003, S. 331]	33
Tab. 3-1: Abmessungen und Werkstoffeigenschaften des verwendeten zylindrischen Testkörpers (Quelle: [Dräger2008])	37
Tab. 3-2: Schrittweiten der Entfernungen zwischen Mikrofon und Stirnseite des Testkörpers	38
Tab. 3-3: Resonanzfrequenzen f_n der ersten 10 longitudinalen Eigenschwingungen des Stabes	43
Tab. 3-4: Berechnete Wellenlängen λ_n der durch die ersten 10 longitudinalen Eigenschwingungen des Testkörpers an die Luft übertragenen Schallwellen	43
Tab. 3-5: Berechnete Nahfeldlängen N_n des durch die ersten 10 longitudinalen Eigenschwingungen des Testkörpers verursachten Schallfelds	44
Tab. 4-1: Übersicht über die zur Auswertung verwendeten Merkmalsarten der Software SonicTC	68
Tab. 4-2: Übersicht über die zur Auswertung verwendeten Merkmalsarten der Software OriginPro	69
Tab. 5-1: Übersicht über die Anzahl der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren geschmiedeten Common-Rails (HFR) potentiell geeigneten Merkmale (getrennt nach Arten, Bewertungskriterien und Datensätzen)	89
Tab. 5-2: Auflistung der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren geschmiedeten Common-Rails (HFR) geeignetsten Merkmale in Abhängigkeit des ausgewerteten Datensatzes ($LHW = \text{Left Half Width}$, $RHW =$ Right Half Width)	90
Tab. 5-3: Auflistung der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren geschmiedeten Common-Rails (HFR) geeignetsten Halbwertsbreiten in Abhängigkeit des ausgewerteten Datensatzes	90
Tab. 5-4: Auflistung der Gesamtvarianz sowie deren Varianzkomponenten für Werte der akustischen Resonanzanalyse mehrerer geschmiedeter Common-Rails (HFR) des gleichen Autofrettagezustands in Abhängigkeit des Merkmals (absolute Werte)	93
Tab. 5-5: Auflistung der Gesamtvarianz sowie deren Varianzkomponenten für Werte der akustischen Resonanzanalyse mehrerer geschmiedeter Common-Rails (HFR) des gleichen Autofrettagezustands in Abhängigkeit des Merkmals (prozentuale Anteile)	94
Tab. 5-6: Auflistung der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren geschmiedeten Common-Rails (HFR) geeignetsten, aus dreifacher akustischer Resonanzanalyse gemittelten Halbwertsbreiten	97

Tab. 5-7: Übersicht über die Anzahl der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren geschmiedeten Common-Rails (HFR) potentiell geeigneten Merkmale für zwei Mikrofonabstände bei der akustischen Resonanzanalyse (getrennt nach Arten, Bewertungskriterien und Datensätzen)	110
Tab. 5-8: Übersicht über die Anzahl der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren lasergeschweißten Common-Rails (LWR) potentiell geeigneten Merkmale (getrennt nach Arten, Bewertungskriterien und Datensätzen)	114
Tab. 5-9: Auflistung der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren lasergeschweißten Common-Rails (LWR) geeignetsten Merkmale in Abhängigkeit des ausgewerteten Datensatzes	115
Tab. 5-10: Auflistung der zum Autofrettagenachweis der verfügbaren lasergeschweißten Common-Rails (LWR) geeignetsten, aus fünffacher akustischer Resonanzanalyse gemittelten Halbwertsbreiten	119

Anhang 1 Unternehmensvorstellung

Anhang 1.1 Fraunhofer-Gesellschaft

Die 1949 gegründete *Fraunhofer-Gesellschaft* ist die größte Organisation für anwendungsorientierte Forschung in Europa. Ziel der Gesellschaft ist die Umsetzung von Forschungsvorhaben zum unmittelbaren Nutzen für Unternehmen und zum Vorteil der [Fraunhofer2011].

In den mehr als 80 Forschungseinrichtungen (Abb. A-1) – davon 60 Fraunhofer-Institute an Standorten in ganz Deutschland – bearbeiten mehr als 18.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, ein Forschungsvolumen von ca. 1,65 Mrd. Euro jährlich. Namensgeber der Gesellschaft ist der Münchner Forscher, Erfinder und Unternehmer Joseph von Fraunhofer (1787-1826) [Fraunhofer2011].



Abb. A-1: Darstellung ausgewählter Standorte der Fraunhofer-Gesellschaft (Quelle: [Fraunhofer2011])

Anhang 1.2 Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP)

Das *Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP)* wurde bereits 1972 gegründet und umfasst heute die beiden Standorte Saarbrücken und Dresden (seit 1992). Die Aufgaben des IZFP beinhalten neben den physikalischen Methoden der zerstörungsfreien Prüfung und Charakterisierung von Werkstoffen z. B. die Kontrolle und Überwachung von Fertigungsprozessen und Anlagenkomponenten [IZFP2011]. Mit den Produkten und Methoden des IZFP ist eine fertigungsbegleitende 100 %-Prüfung möglich, ohne in den Produktionsprozess störend einzugreifen oder gefertigte Teile durch zerstörende Prüfverfahren zu beschä-

digen. So können durch Prozessbeherrschung die in der heutigen Zeit gestiegenen Qualitätsanforderungen eingehalten werden. Die methodischen Kompetenzen ermöglichen die Prüfung verschiedenster Bauteile aus unterschiedlichsten Werkstoffen (z. B. Metalle, Keramiken, Polymere, Verbundwerkstoffe, etc.) mit Hilfe von modernsten Verfahren wie z. B. Ultraschall, Schallemission, Wirbelstrom, magnetische Verfahren, Thermographie, optische Verfahren, Mikrowellen, Röntgenverfahren etc. auf Fehler oder Schwachstellen [IZFP2011].

Das Fraunhofer IZFP entwickelt nicht nur neue Verfahren inklusive Qualifizierung und Validierung dieser, sondern setzt diese auch technisch um, baut Prototypen, lizenziert Industriepartner zur Prüfung mit entwickelten Verfahren, führt auftragsbezogene Prüfungen durch oder bietet Schulungen an. Die Tätigkeitsbereiche des IZFP sind nahezu unbegrenzt, was an den zahlreichen Geschäftsfeldern wie z. B. Automobil, Bahn und Schiene, Industrieanlagen, Luft- und Raumfahrt erkennbar ist [IZFP2011].

Anhang 1.3 Prüf- und Applikationszentrum (PAZ)

Zum Ende des Jahres 2010 wurde das nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 akkreditierte Dienstleistungszentrum (DLZ) in *Prüf- und Applikationszentrum (PAZ)* umbenannt. Das PAZ bietet in erster Linie Prüfdienstleistungen (Fehlerprüfung oder Werkstoffcharakterisierung), entweder am Institut oder vor Ort beim Kunden, an. Die Mitarbeiter beraten die Kunden ausführlich, wobei oftmals maßgeschneiderte Lösungen für diesen entstehen. Weiterhin kann der Kunde Prüfsysteme mieten oder sich vom PAZ in einer ganzheitlichen Betrachtung der Aufgabenstellung eine Lösung für seine Anforderungen aus einer Hand anbieten lassen, die entweder Fraunhofer-intern oder in Kooperation mit einem Industriepartner realisiert wird [IZFP2011].

Anhang 1.4 AQS [Fraunhofer2011, IZFP2011]

Im 2007 gegründeten und am Fraunhofer IZFP in Saarbrücken angesiedelten Innovationscluster *Automotive Quality Saar (AQS)* bündeln Institutionen aus Forschung und Entwicklung sowie Industrie ihre Kompetenzen, um so Lösungen zu finden, mit denen die Qualitätsanforderungen bei der Herstellung und Verarbeitung automobiler Komponenten sicher gestellt werden können.

Anhang 2 Werkstoffkennwerte

Im Folgenden sind die Datenblätter der Werkstoffe beider Common-Rail-Typen aufgeführt.

Anhang 2.1 Werkstoff 38MnVS6 (Geschmiedete Common-Rails, HFR)

1.5231	Mn-Si-V-legierter AFP-Stahl		
	38MnSiVS5	C 0,34 – 0,41 Si 0,15 – 0,80 Mn 1,20 – 1,60 V 0,08 – 0,20	
Normenzuordnung	gemäß EN 10267 auch Stahl-Eisen-Liste	1.1303 1.5231	38MnVS6 38MnSiVS5
Hauptanwendung	Der ausscheidungshärtende Stahl 38MnSiVS5 wird hauptsächlich für geschmiedete Bauteile des Automobilbaus und des Fahrzeugbaus eingesetzt. Die Bauteilfestigkeit wird hierbei durch eine kontrollierte Abkühlung aus der Schmiedehitze erreicht. Beispiele für Bauteile sind Pleuelstangen, Pleuelstangen u.Ä.		
Technischer Lieferzustand	Unbehandelt Kaltscherfähig geglüht	Max. 255 HB	
Schweißen	38MnSiVS5 ist nur schwer schweißbar und sollte daher in Schweißkonstruktionen nicht eingesetzt werden.		
Warmumformung	38MnSiVS5 wird bei 1100 °C – 850 °C warm umgeformt und soll anschließend gesteuert abgekühlt werden.		
Physikalische Eigenschaften	Dichte (kg/dm ³)	7,67	
	Elastizitätsmodul (10 ⁹ MPa)	210	
	Elektr. Widerstand bei 20 °C (Ω mm ² /m)	0,19	
	Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C (W/m K)	42,6	
	Spez. Wärmekapazität bei 20 °C (J/kg K)	470	
	Wärmeausdehnung im weichgeglühten Zustand (10 ⁻⁶ K ⁻¹)		
	20 – 100 °C	11,1	
	20 – 200 °C	12,1	
	20 – 300 °C	12,9	
	20 – 400 °C	13,5	
Mechanische Eigenschaften	Im ausscheidungsgehärteten Zustand bei Raumtemperatur:		
	Streckgrenze (MPa)	520	
	Zugfestigkeit (MPa)	800 – 950	
	Bruchdehnung (L ₀ = 5 d ₀) [%]	12	
Bauteileigenschaften	Typische Werte für Bauteile bei gezielter Analyse und Wärmebehandlung:		
	Streckgrenze (MPa)	620	
	Zugfestigkeit (MPa)	985	
	Bruchdehnung (L ₀ = 5 d ₀) [%]	12	

Abb. A-2: Datenblatt des Werkstoffs 38MnVS6 (Quelle: Deutsche Edelstahlwerke GmbH)

Anhang 2.2 Werkstoff 20MnCrS5 (Lasergeschweißte Common-Rails, LWR)

1.7147/1.7149

Cr-Mn-legierter Einsatzstahl

20MnCr5/20MnCrS5 C 0,17 – 0,22 Si max. 0,40 Mn 1,10 – 1,40 Cr 1,00 – 1,20 S max. 0,035 / 0,020 – 0,040

Normenzuordnung			
EN 10084	1.7147/1.7149		20MnCr5 / 20MnCrS5
EN 10263-3	1.7147/1.7149		20MnCr5 / 20MnCrS5
AFNOR			20MC5
DIN 17210	1.7147/1.7149		20MnCr5 / 20MnCrS5
GOST			18CHGT
ISO 683-11			20MnCr5 / 20MnCrS5

Hauptanwendung Der Einsatzstahl 20MnCr5 ist ein häufig eingesetzter Stahl für Getriebeteile und sonstige Teile des Maschinenbaus, die im Anschluss an die Bearbeitung einsatzgehärtet werden. Der Einsatzstahl 20MnCrS5 ist von seinen Eigenschaften identisch, unterscheidet sich lediglich durch einen definierten S-Gehalt und wird hauptsächlich für spanende Verarbeitung verwendet.

Technischer Lieferzustand	Weichgeglüht	Max. 217 HB
	Isotherm auf Ferrit – Perlit behandelt	152 – 201 HB
	Geglüht auf Härtespanne	170 – 217 HB
	Kaltscherfähig gegläht	Max. 255 HB

Schweißen 20MnCr5/20MnCrS5 ist in der Regel schweißbar.

Warmumformung 20MnCr5/20MnCrS5 wird bei 1100 °C – 850 °C warm umgeformt.

Physikalische Eigenschaften	Dichte (kg/dm ³)	7,75
	Elastizitätsmodul (10 ⁹ MPa)	210
	Elektr. Widerstand bei 20 °C (Ω mm ² /m)	0,12
	Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C (W/m K)	42,0
	Spez. Wärmekapazität bei 20 °C (J/kg K)	433
	Wärmeausdehnung im weichgeglühten Zustand (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	
	20 – 100 °C	11,5
	20 – 200 °C	12,5
	20 – 300 °C	13,3
20 – 400 °C	13,9	

Mechanische Eigenschaften Im blindgehärteten Zustand bei Raumtemperatur:

	11	30	63
Durchmesser (mm)	11	30	63
Streckgrenze (MPa)	735	685	540
Zugfestigkeit (MPa)	1080 – 1380	980 – 1280	780 – 1080
Bruchdehnung (L ₀ = 5 d ₀) (%)	7	8	10
Brucheinschnürung (%)	30	35	35

Hinweis: Diese typischen Werte gelten für Längsproben, die aus dem blindgehärteten Probestab bei den Durchmessern 11 und 30 mm aus dem Kern, bei dem Durchmesser 63 mm in einem Abstand von 12,5 mm von der Oberfläche herausgearbeitet werden. Abweichende Anforderungen können auf Anfrage berücksichtigt werden.

Wärmebehandlung Ms: 410 °C Ac₁: 740 °C Ac₃: 840 °C

Weichglühen:
Weichglühen erfolgt bei Temperaturen von 650 °C – 700 °C.

Anlassen:
Das Anlassen erfolgt bei Temperaturen von 170 °C – 210 °C.

Einsetzen:
Das Einsetzen sollte bei Temperaturen von 900 °C – 950 °C durchgeführt werden.

Einfachhärten:
Einfachhärten erfolgt bei Temperaturen von 850 °C – 880 °C.

Abb. A-3: Datenblatt des Werkstoffs 20MnCrS5 (Quelle: Deutsche Edelstahlwerke GmbH)

Anhang 3 Datenblatt des Mikrofons MI 17

1/4" Microphone (free-field) **AVM** 

Type: **MI 17** S/N: 2140 Sens.: 50.6 mV/Pa (1 kHz)

Constant Current Supply: I = 2..8mA Bias Voltage: ≈12.5 V

Freq. Resp.: 20 Hz - 4 kHz (±0.5 dB), 4 - 20 kHz (±1 dB)

Eq. Noise: max. 30 dB lin (SPL), 26 dB(A) (SPL)

Temperature Range: -10 - +50 °C, max. SPL_{Peak} (5% Dist.) 130 dB

Date: 18-10-10 Lee Temp.: 23 °C. Rel. Hum.: 41 %

Bertram Schapal - Forststr.32 - D-64572 Büttelborn

Abb. A-4: Datenblatt des Mikrofons MI 17 des Herstellers AVM (Quelle: AVM Mess- und Prüfgeräte für Akustik und Vibration)

Anhang 4 Parameter bei der Datenerfassung und -auswertung

Tab. A-1 listet die wichtigsten Softwareeinstellungen auf, die bei der akustischen Resonanzanalyse in dieser Master-Thesis verwendet wurden.

Tab. A-1: Übersicht über die zur Datenerfassung und -auswertung verwendeten Softwareeinstellungen

Parameter	Software	Gewählter Wert
Messdauer	SonicTC	1200 ms
Abtastfrequenz	SonicTC	100.000 Hz
Fenster	SonicTC, OriginPro (FFT)	Rechteck
Abtastintervall	OriginPro (FFT)	$1 \cdot 10^{-5}$
Ziel	OriginPro (Impuls Analyzer)	Impulse integrieren
Modus Basislinie	OriginPro (Impuls Analyzer)	Konstant / Minimum
Behandlung der Basislinie – Basislinie automatisch subtrahieren	OriginPro (Impuls Analyzer)	✓
Impulse suchen – Einstellungen der Impulssuche – Methode	OriginPro (Impuls Analyzer)	Suchen im Fenster
Impulse suchen – Einstellungen der Impulssuche – Option Größe	OriginPro (Impuls Analyzer)	Prozent der Rohdaten
Impulse suchen – Einstellungen der Impulssuche – Höhe	OriginPro (Impuls Analyzer)	1 (HFR) bzw. 0,1 (LWR)
Impulse suchen – Einstellungen der Impulssuche – Breite	OriginPro (Impuls Analyzer)	0,2
Impulse suchen – Einstellungen der Impulssuche – Impulsfilterung	OriginPro (Impuls Analyzer)	keine
Impulse integrieren – Integrationsfensterbreite	OriginPro (Impuls Analyzer)	Breite für alle Impuls festlegen
Impulse integrieren – Halbe Breite links	OriginPro (Impuls Analyzer)	15
Impulse integrieren – Halbe Breite rechts	OriginPro (Impuls Analyzer)	15
Impulse integrieren – Größen	OriginPro (Impuls Analyzer)	alle ✓

Anhang 5 Alternative Versuchsaufbauten

Im Folgenden sind die alternativen Versuchsaufbauten zur akustischen Resonanzanalyse geschmiedeter Common-Rails dargestellt, die in dieser Arbeit genutzt wurden.

Anhang 5.1 Alternativaufbau 2

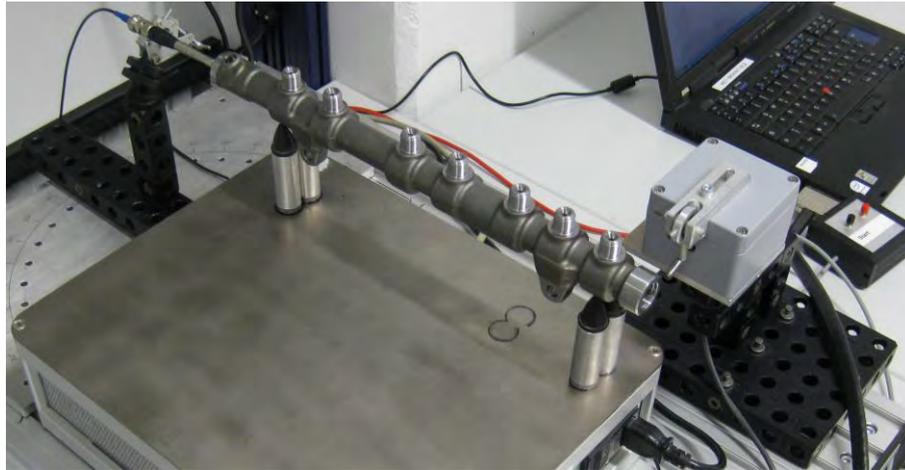


Abb. A-5: Fotografische Aufnahme von Alternativaufbau 2: Veränderter Lagerabstand (285 mm statt 215 mm)

Anhang 5.2 Alternativaufbau 3



Abb. A-6: Fotografische Aufnahme von Alternativaufbau 3: Axiale Bauteilanregung



Abb. A-7: Fotografische Aufnahme von Alternativaufbau 3: Axiale Bauteilanregung – Position und Orientierung der Impulsanregung

Anhang 5.3 Alternativaufbau 4

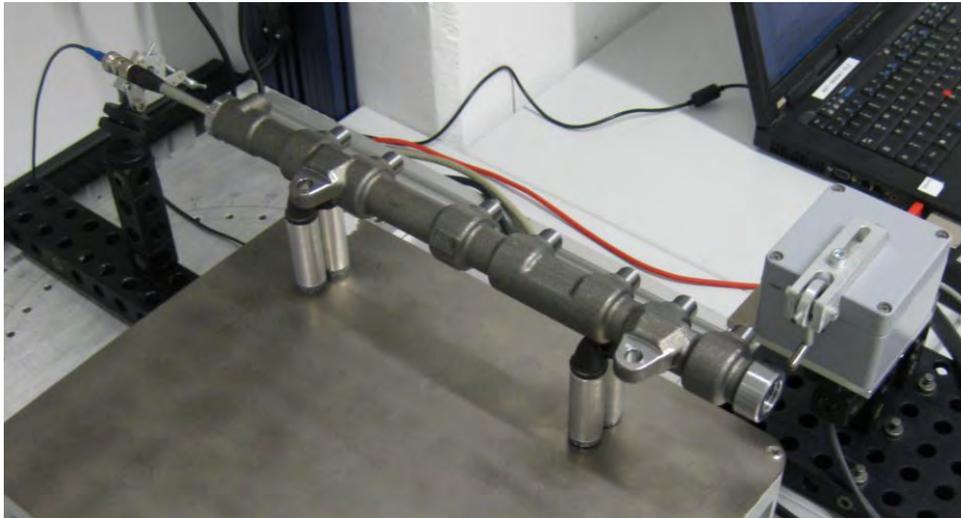


Abb. A-8: Fotografische Aufnahme von Alternativaufbau 3: Veränderte Bauteilorientierung

Anhang 6 Übersicht über die verwendeten Common-Rails

Anhang 6.1 Geschmiedete Common-Rails (HFR)

Tab. A-2 listet alle im Rahmen des Kooperationsprojekts zur Verfügung stehenden Common-Rails des Typs HFR auf.

Tab. A-2: Übersicht über die Verwendung der Common-Rails des Typs HFR

Neue Bezeichnung	Bezeichnung in Vorversuchen	Bemerkung
AF1.1*	AF1.1*	Eingepresstes Ventil im Inneren des Common-Rails, Common-Rail für metallografische Untersuchungen zerstört
AF1.2*	AF1.2*	Eingepresstes Ventil im Inneren des Common-Rails
AF1.3*	AF1.3*	Eingepresstes Ventil im Inneren des Common-Rails
AF1.4*	AF1.4*	Eingepresstes Ventil im Inneren des Common-Rails
AF1.5*	AF1.5*	Eingepresstes Ventil im Inneren des Common-Rails
AF1.6*	AF1.6*	Eingepresstes Ventil im Inneren des Common-Rails
AF1.7*	AF1.7*	Eingepresstes Ventil im Inneren des Common-Rails
AF1.8*	AF1.8*	Eingepresstes Ventil im Inneren des Common-Rails
AF1.9*	AF1.9*	Eingepresstes Ventil im Inneren des Common-Rails
AF1.10*	AF1.10*	Eingepresstes Ventil im Inneren des Common-Rails
AF1.1	AF0.1*	Nachträgliche Autofrettage
AF1.2	AF0.2*	Nachträgliche Autofrettage, Verwendung in Master-Thesis
AF1.3	AF0.3*	Nachträgliche Autofrettage, Verwendung in Master-Thesis
AF1.4	AF0.4*	Nachträgliche Autofrettage, Verwendung in Master-Thesis
AF1.5	AF0.5*	Nachträgliche Autofrettage, Verwendung in Master-Thesis
AF1.6	AF0.6*	Nachträgliche Autofrettage, Verwendung in Master-Thesis
AF1.7	AF0.7*	Nachträgliche Autofrettage, Verwendung in Master-Thesis
AF1.8	AF0.8*	Nachträgliche Autofrettage, Verwendung in Master-Thesis
AF1.9	AF0.9*	Nachträgliche Autofrettage, Verwendung in Master-Thesis
AF1.10	AF0.10*	Nachträgliche Autofrettage, Verwendung in Master-Thesis
AF0.1	AF0.15*	
AF0.2	AF0.16*	Verwendung in Master-Thesis
AF0.1	AF0.17*	Verwendung in Master-Thesis
AF0.4	AF0.18*	Verwendung in Master-Thesis
AF0.5	AF0.19*	Verwendung in Master-Thesis
AF0.6	AF0.20*	Verwendung in Master-Thesis
AF0.7	AF0.21*	Verwendung in Master-Thesis
AF0.8	AF0.22*	Verwendung in Master-Thesis
AF0.9	AF0.23*	Verwendung in Master-Thesis
AF0.10	AF0.24*	Verwendung in Master-Thesis
AF0.11	AF0.11*	Common-Rail für metallografische Untersuchungen zerstört
AF0.12	AF0.12*	
AF0.13	AF0.13*	
AF0.14	AF0.14*	
AF0.25	AF0.25*	
AF0.26	AF0.26*	
AF0.27	AF0.27*	
AF0.28	AF0.28*	
AF0.29	AF0.29*	
AF0.30	AF0.30*	
AF0.31	AF0.31*	
AF0.32	AF0.32*	
AF0.33	AF0.33*	
AF0.34	AF0.34*	
AF0.35	AF0.35*	
AF0.36	AF0.36*	
AF0.37	AF0.37*	
AF0.38	AF0.38*	
AF0.39	AF0.39*	
AF0.40	AF0.40*	

Anhang 6.2 Lasergeschweißte Common-Rails (LWR)

Die Bezeichnungen für Common-Rails des Typs LWR wurden zu Beginn der Master-Thesis einmalig festgelegt. Es existieren Bauteile mit den Nummern AF1.1 bis AF1.10 sowie AF0.1 bis AF0.40. Die Bauteile AF1.1 bis AF1.10 sowie AF0.1 bis AF0.10 wurden für die Untersuchungen mit akustischer Resonanzanalyse in dieser Master-Thesis verwendet.

Eidesstattliche Erklärung



Erklärung zur Abfassung schriftlicher und digitaler Ausarbeitungen und Präsentationen

Gemäß Fachbereichsratsbeschluss vom 26. Februar 2008 ist jeder schriftlichen oder digitalen Ausarbeitung folgende Erklärung beizufügen:

Eidesstattliche Erklärung*

Hiermit erkläre ich

Name, Vorname	
geboren am	
Matrikelnummer	

an Eides statt, daß die vorliegende Arbeit (Thesis, Projektarbeit, Ausarbeitung,) über / mit dem Titel

selbständig verfaßt worden ist, daß keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und daß die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien wie z.B. Internet – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind. Dies gilt in gleichem Maße für Bilder, Diagramme, Tabellen und sonstige Abbildungen, Programmbeschreibungen oder Quellcodes, etc.

Ort, Datum, eigenhändige Unterschrift

*Diese Erklärung ist jeder Arbeit als Anhang beizufügen. Arbeiten ohne diese Erklärung werden nicht angenommen. Auf die strafrechtlichen Konsequenzen einer falschen Eidesstattlichen Erklärung wird hiermit hingewiesen.

Plagiate werden im Fachbereich Maschinenbau – ohne Möglichkeit der Nachbesserung – grundsätzlich mit mangelhaft / nicht bestanden bewertet.

§ 49 (ASPO) Ungültigkeit von Prüfungen

(!) Hat die/der Studierende bei einer Prüfungsleistung getäuscht und wird diese Tatsache erst nach Aushändigung des Zeugnisses bekannt, so kann die Note der Prüfungsleistung entsprechend §31 Abs. 5 berichtigt werden. Gegebenenfalls kann die Fachprüfung für "nicht ausreichend" (0 Punkte, Note 5,0) und die Bachelor-Prüfung oder die Master-Prüfung für "nicht bestanden" erklärt werden. Entsprechendes gilt für die Bachelor- bzw. Master-Abschlussarbeit.

Das Gesetz über Urheberrecht und verwandte Schutzrechte, kurz Urheberrechtsgesetz (UrhG) vom 9. September 1965, zuletzt geändert am 20. Oktober 2007 regelt die Vorgehensweise im Umgang mit Werken Anderer.