



Geräuschminderung und Leichtbau in Leistungsgetrieben durch den Einsatz von Werkstoffverbunden

Clustertreffen

Forschungsvorhaben IN 4560 des Programms „Förderung
von innovativen Netzwerken“ des Bundesministeriums für
Wirtschaft und Arbeit

Aachen, 07.11.2007

Dipl.-Ing. M. Hellmanns
Dipl.-Ing. J. Hesse

Zusammensetzung der Arbeitsgruppe des Vorhabens EP-Gearcomp

Forschungseinrichtungen:

- Institut für Füge- und Schweißtechnik, TU Braunschweig
- Werkzeugmaschinenlabor, RWTH Aachen

Industrielle Projektpartner

- Atlanta Antriebssysteme
- Henkel AG
- Immersive SIM
- Neugart
- Zahnradwerk Pritzwalk
- ZF Friedrichshafen

Gliederung

- **Einleitung und Motivation**

Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen (ifs)

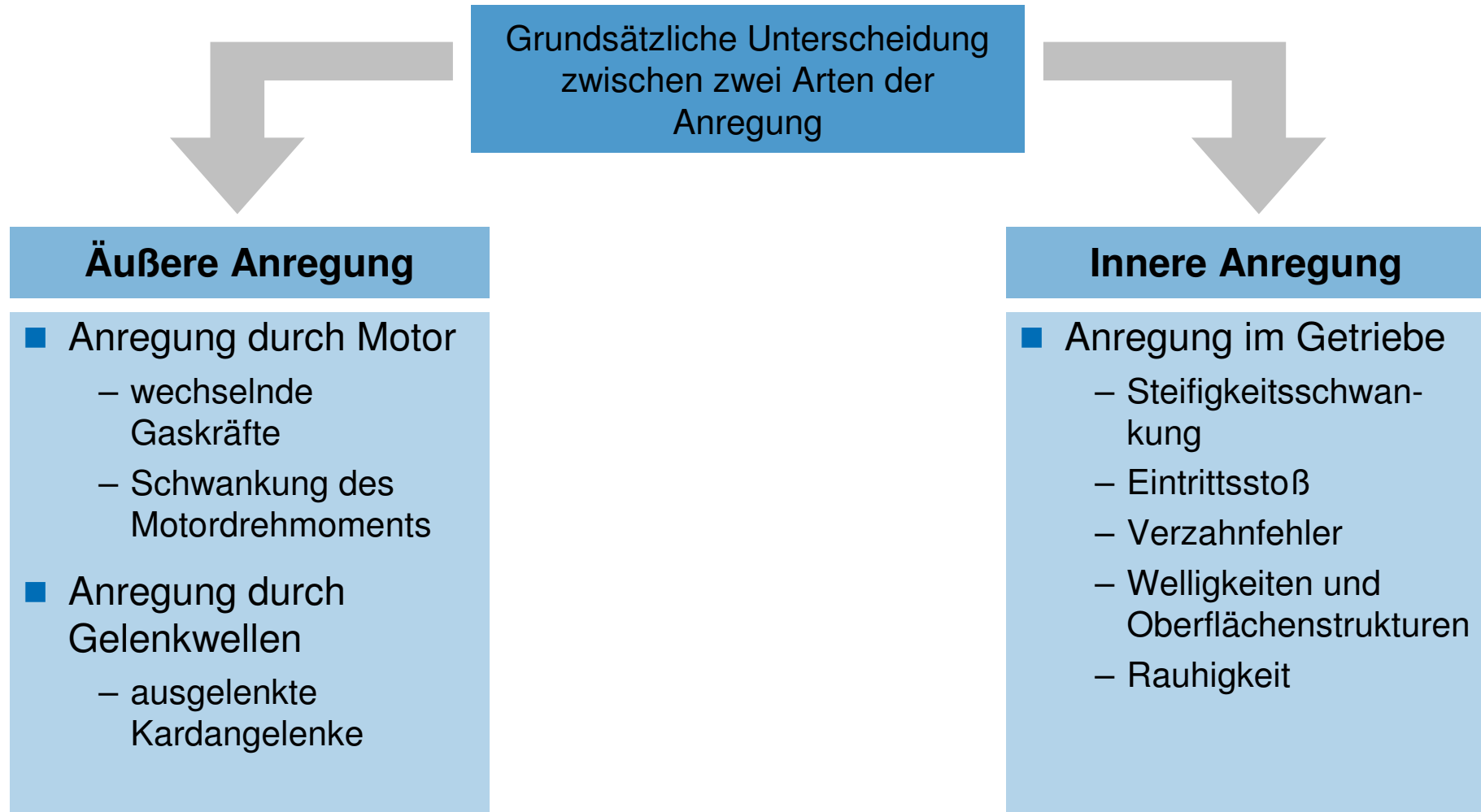
**Tragfähigkeitsuntersuchungen der
Werkstoffverbund-Zahnräder**

Geräuschuntersuchungen am Stirnradatz

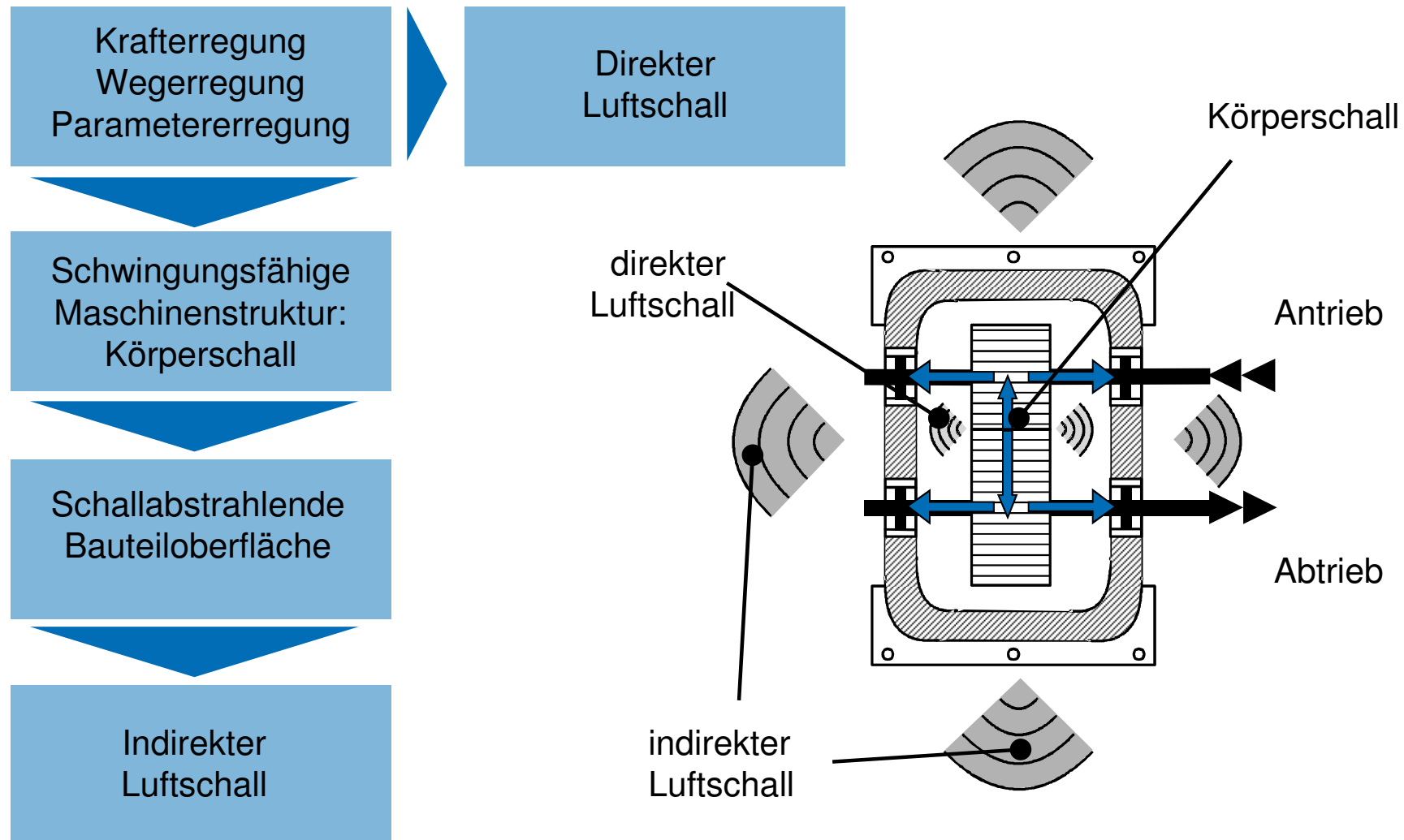
**Akustische Untersuchungen der Komponenten
Lagerstelle und Zahnrad im Getriebe**

Zusammenfassung

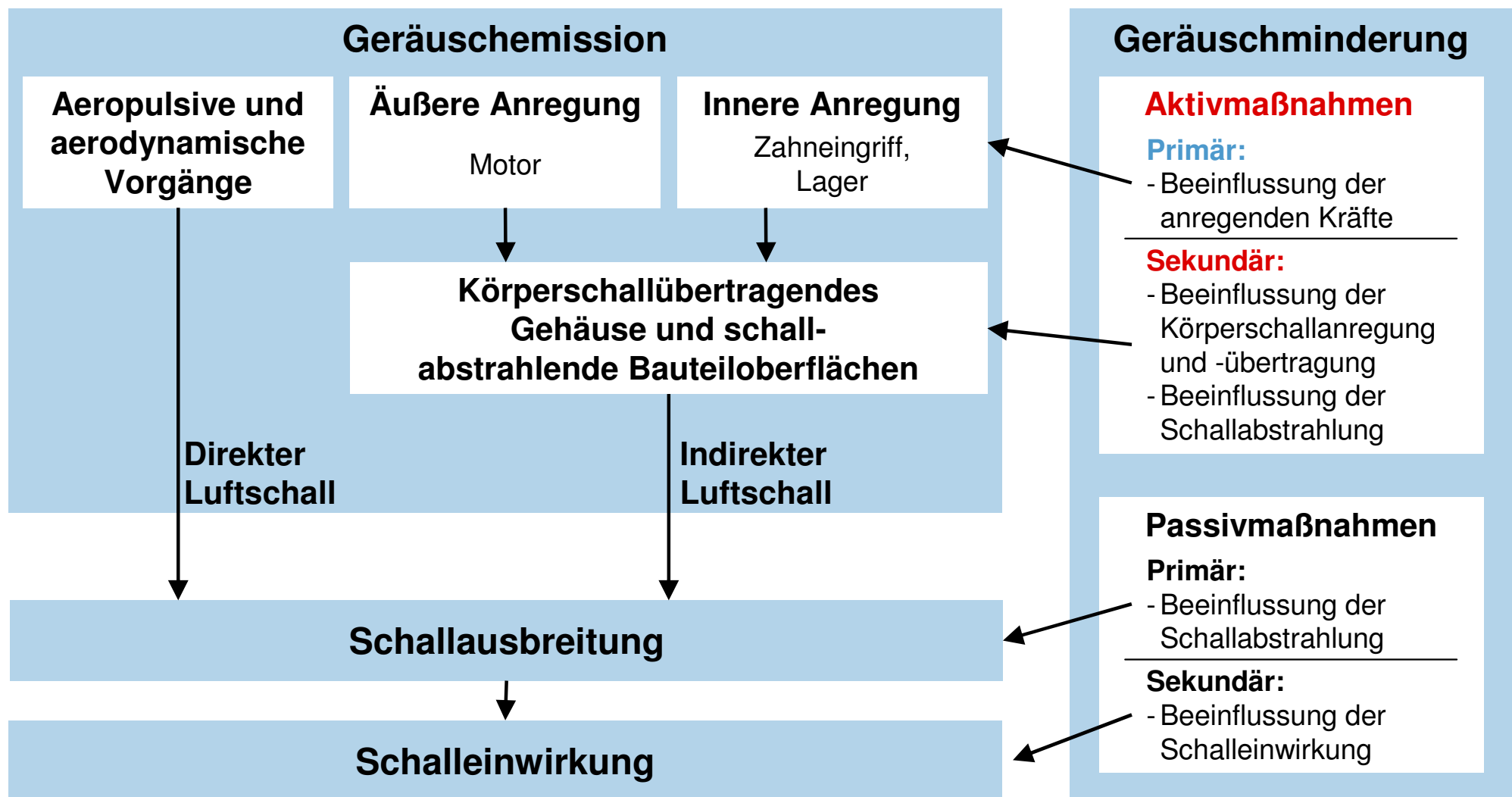
Grundlegende Anregungsmechanismen von Getrieben



Geräuscentstehungskette im Getriebe



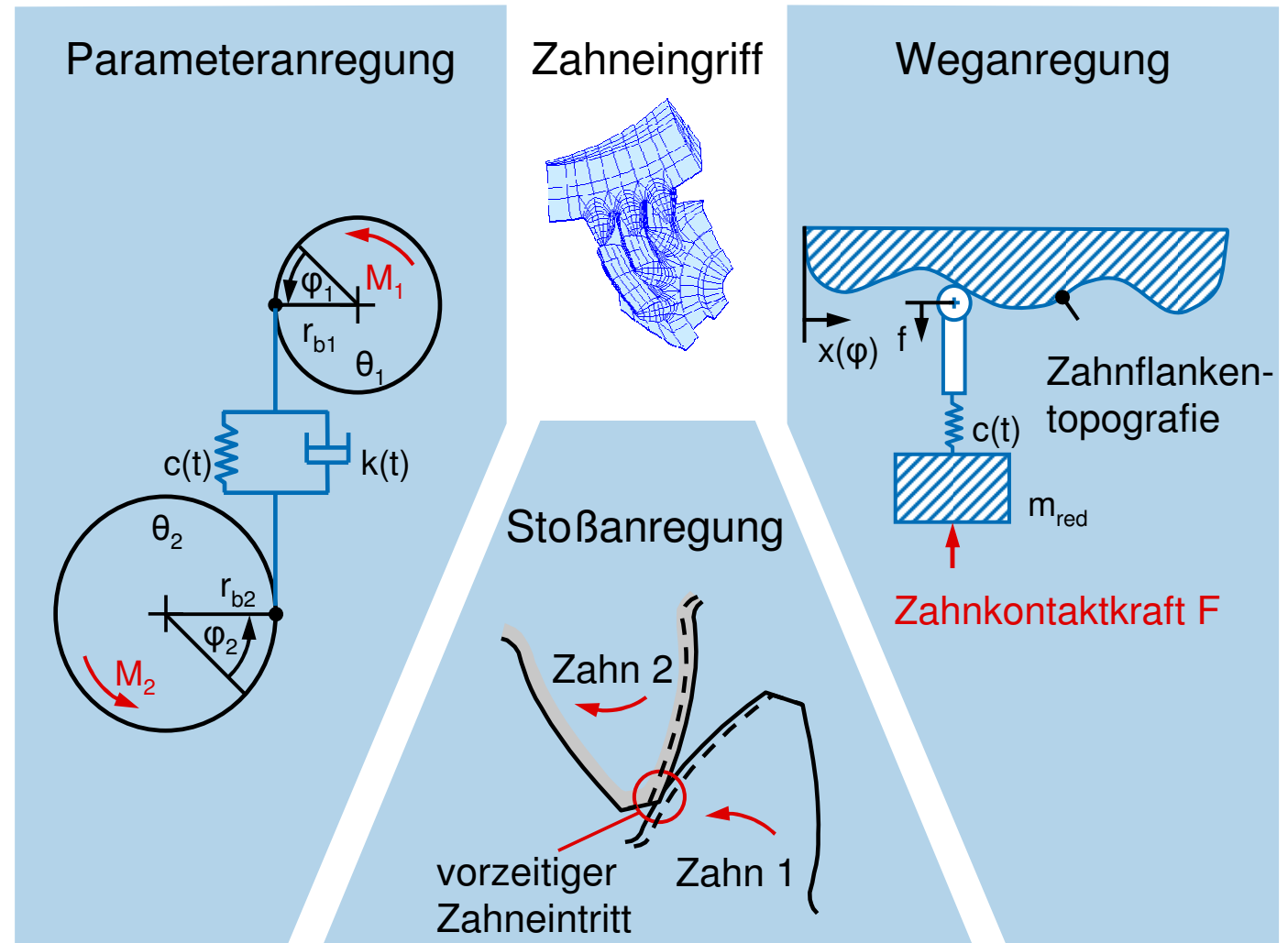
Wirkkette der Getriebegeräusche und Anwendungsbereiche der Geräuschminderungsmaßnahmen



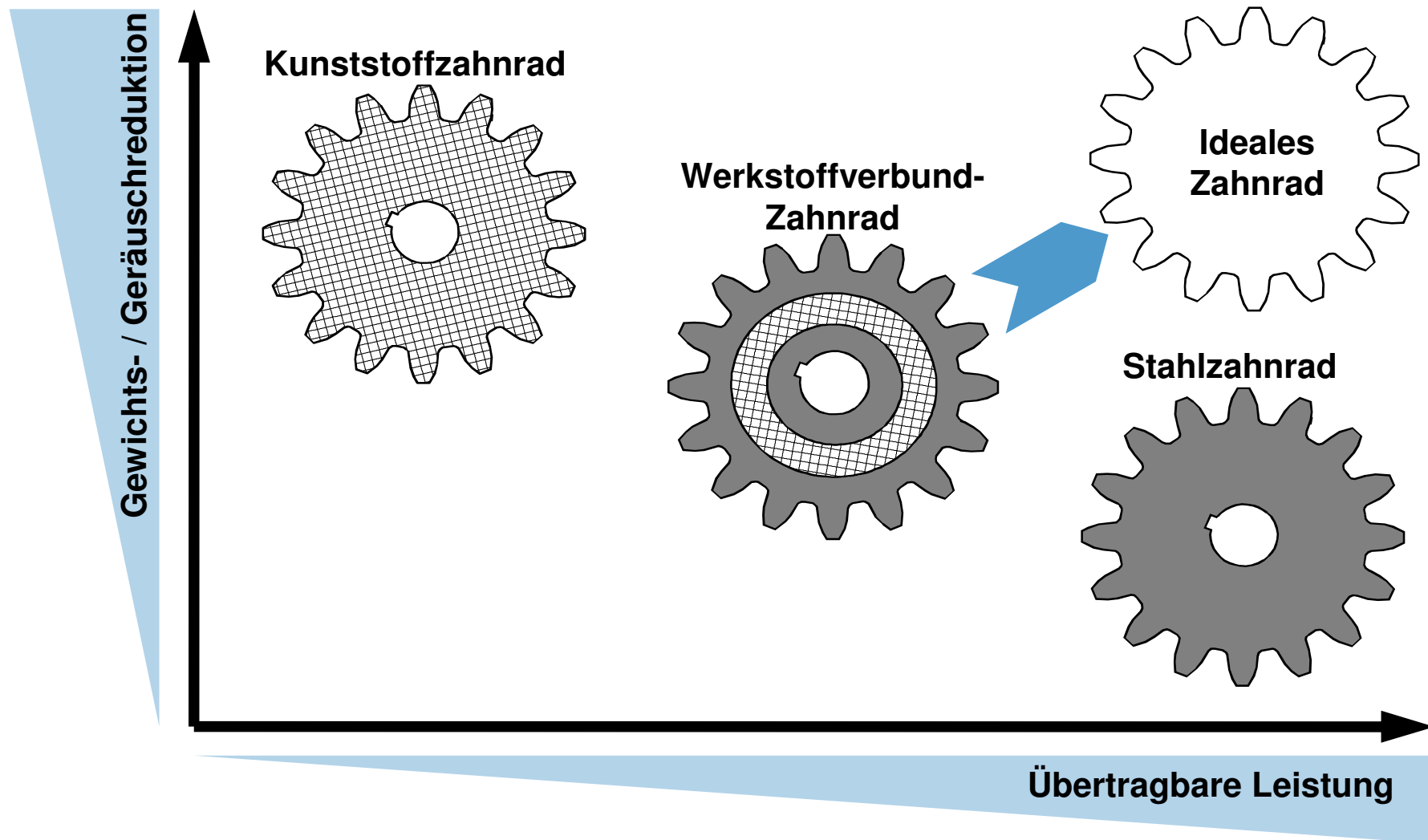
Primäre Geräuschminderung: Anregungsmechanismen im Zahneingriff

Einflussgrößen:

- Getriebegeometrie
- Werkstoff
- Verzahnungsfehler und -modifikationen
- Montagekupplung
- Montagefehler
- Antriebsdrehmoment
- Antriebsdrehzahl



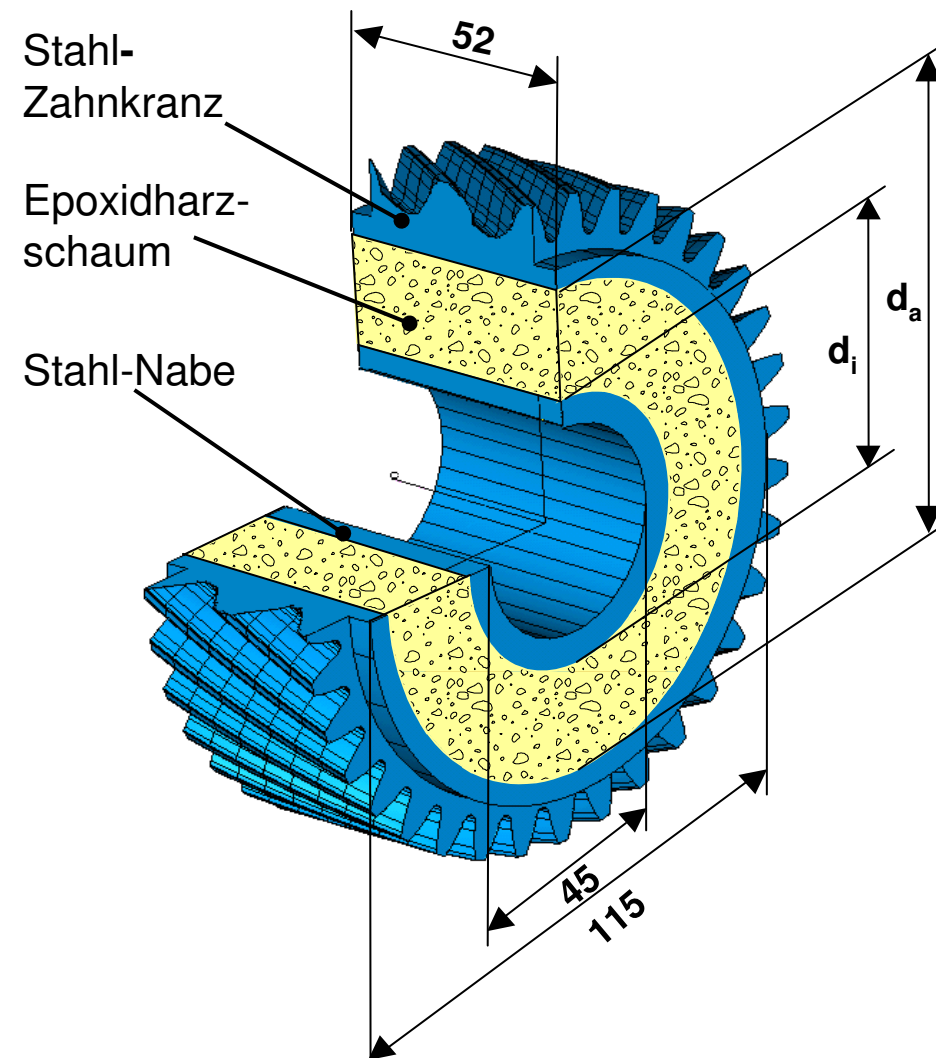
Problemstellung



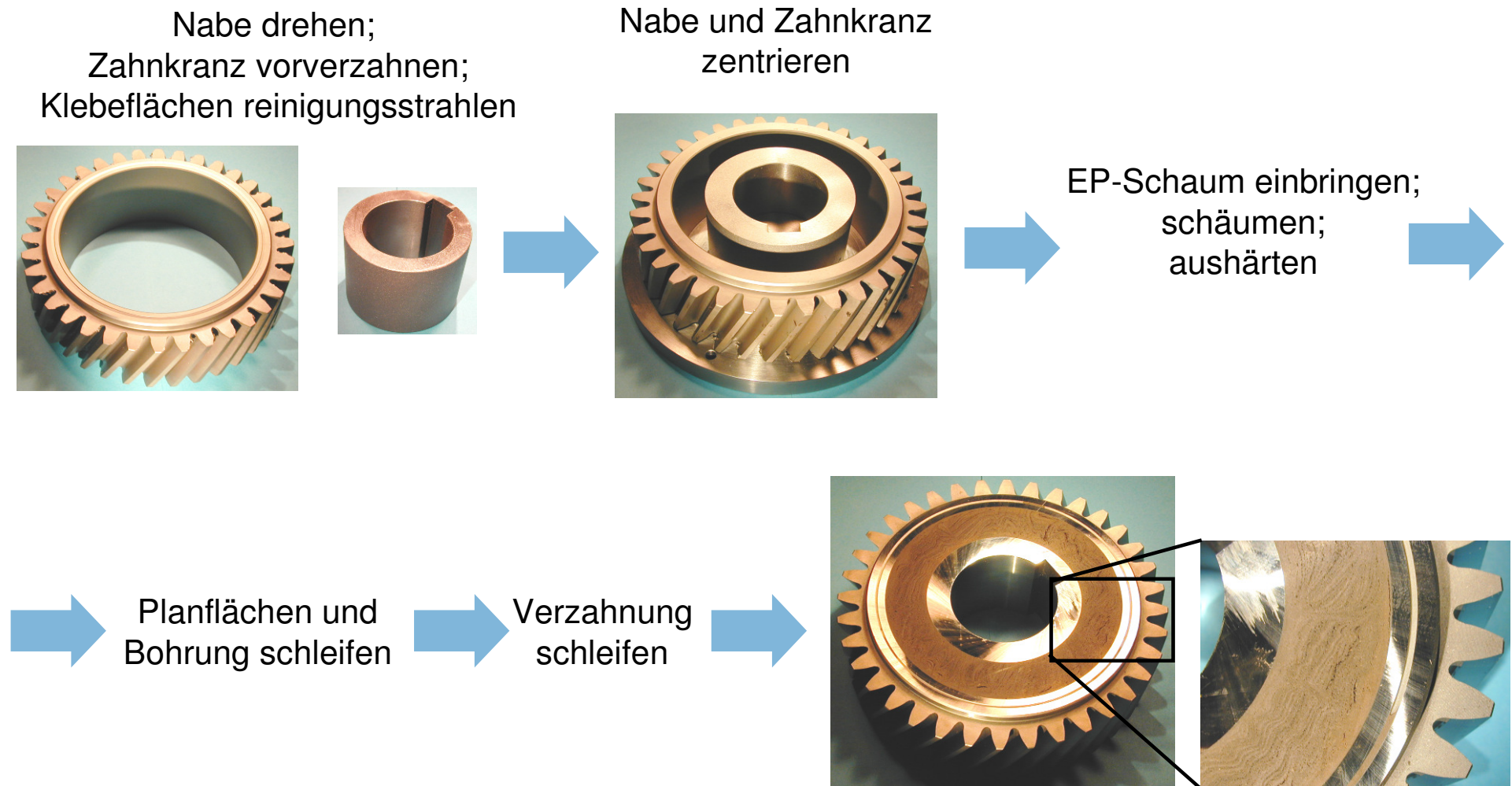
Ziele des Forschungsvorhabens

Ziele

- Verringerung der Schallemission durch den Einsatz von Epoxidharzschaumen
- Steigerung der Tragfähigkeit
- Einsatz bei getriebetypischen Temperaturen ermöglichen
- Untersuchung des Einflusses von Füllstoffen auf das Einsatzverhalten
- Reduzierung der Bauteilmasse
- Untersuchung weitere Komponenten des Getriebes hinsichtlich der Applikation als Verbundbauteil



Fertigungsfolge der Werkstoffverbundzahnräder

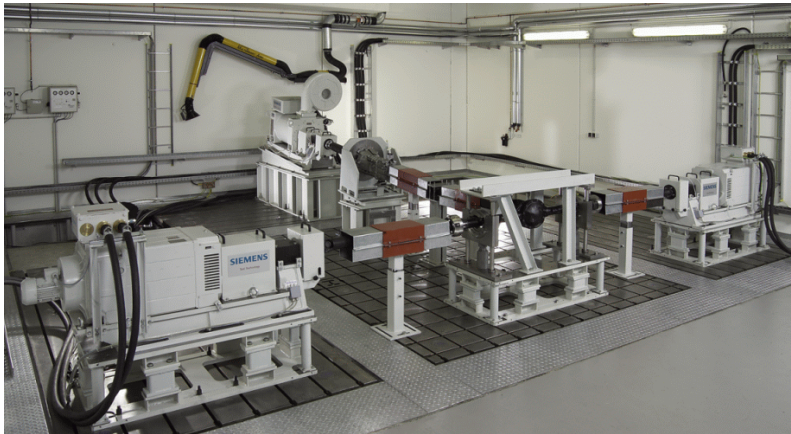
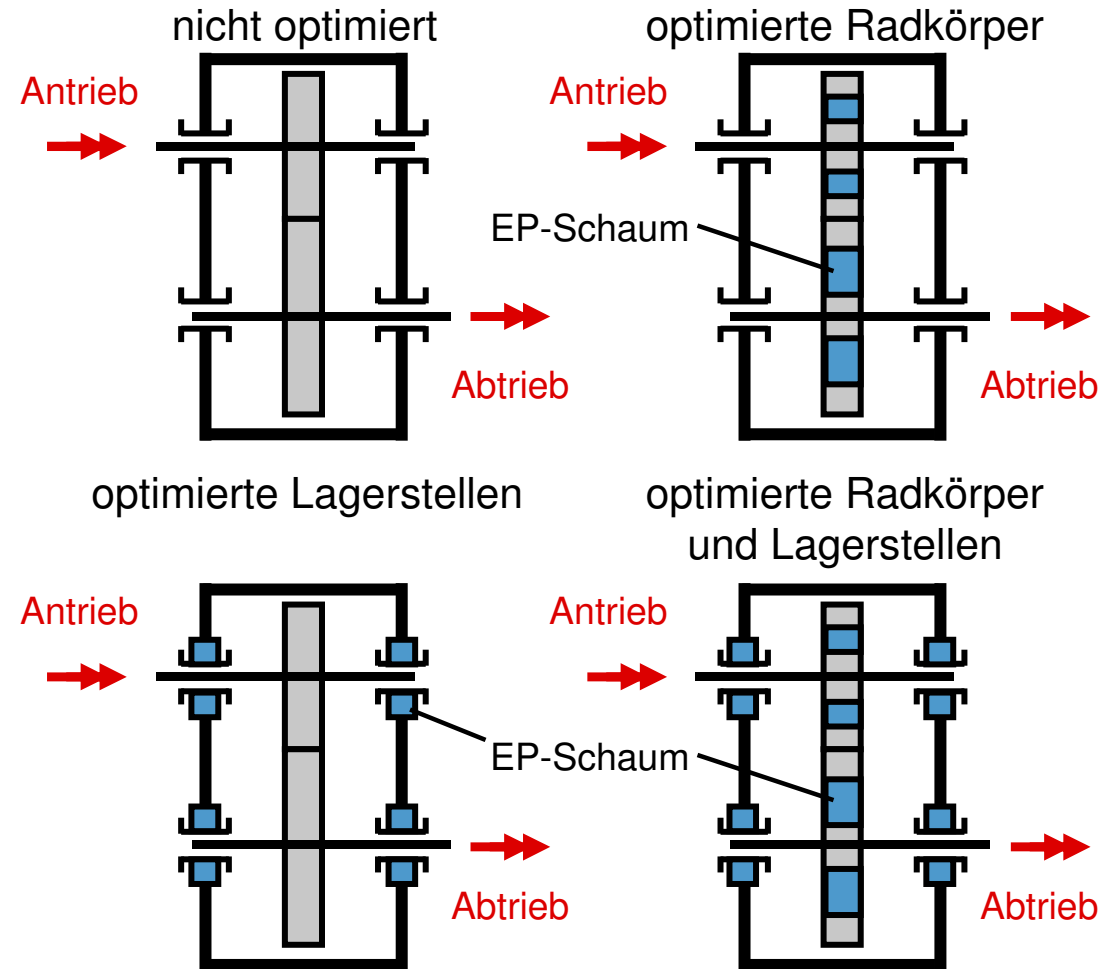


Getriebevarianten und Prüfstandsanordnung

Technische Daten

- Antrieb
Leistung: 220 kW
max. Drehzahl: 6600 min⁻¹
max. Drehmoment: 380 Nm
- Abtrieb
Leistung: 2x155 kW
max. Drehzahl: 2500 min⁻¹
max. Drehmoment: 2x1300 Nm

Varianten des optimierten Getriebes



- Verwendung eines ringförmigen, austauschbaren Sandwich-Bauteils mit EP-Schaum

- mehrere Werkstoffe und Geometrien können in nur einem Gehäuse getestet werden
- einfache Fertigung der Hülse mit EP-Schaum
- Wechselwirkungen zwischen Verzahnung und Lagerung können untersucht werden.



Gliederung



Einleitung und Motivation

Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen (ifs)

- **Tragfähigkeitsuntersuchungen der Werkstoffverbund-Zahnräder**
 - Statische Prüfung
 - Dynamische Prüfung

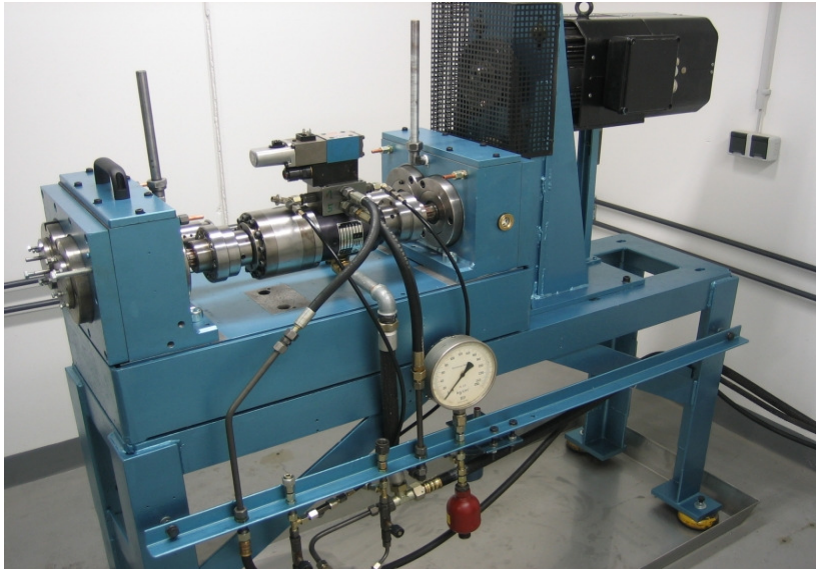
Geräuschuntersuchungen am Stirnradsatz

Akustische Untersuchungen der Komponenten Lagerstelle und Zahnrad im Getriebe

Zusammenfassung

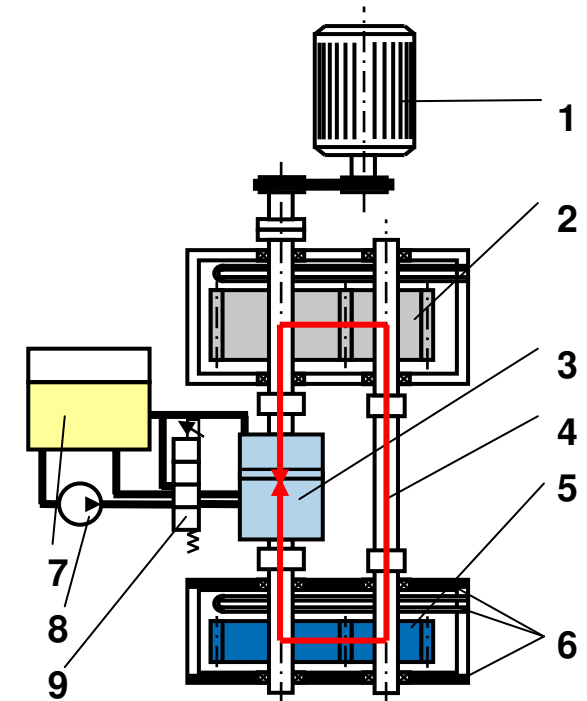
Zahnrad – Verspannungsprüfstand: Statische Abdruckversuche der Werkstoffverbund-Zahnräder

Prüfstand



Prinzipiskizze

- 1 Antriebsmotor
- 2 Übertragungsgetriebe
- 3 hydraulischer Verspannungsmotor
- 4 verdrehsteife Welle
- 5 **Prüfverzahnung**
- 6 Heizung/Kühlung
- 7 Hydraulikölreserve
- 8 Druckölpumpe
- 9 4/4-Wegeventil



Prüfstandsparameter

Antriebsdrehzahlen:	$n = 4500 \text{ min}^{-1}$ (stufenlos)
Verspannungsmoment:	$M = 1200 \text{ Nm}$
max. Schmierstofftemperatur:	$\vartheta = 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Schmierungsarten:	Einspritz-, Tauchschmierung
Achsabstand:	$a = 112,5 \text{ mm}$
Anzahl der Prüfstände:	1+(8)

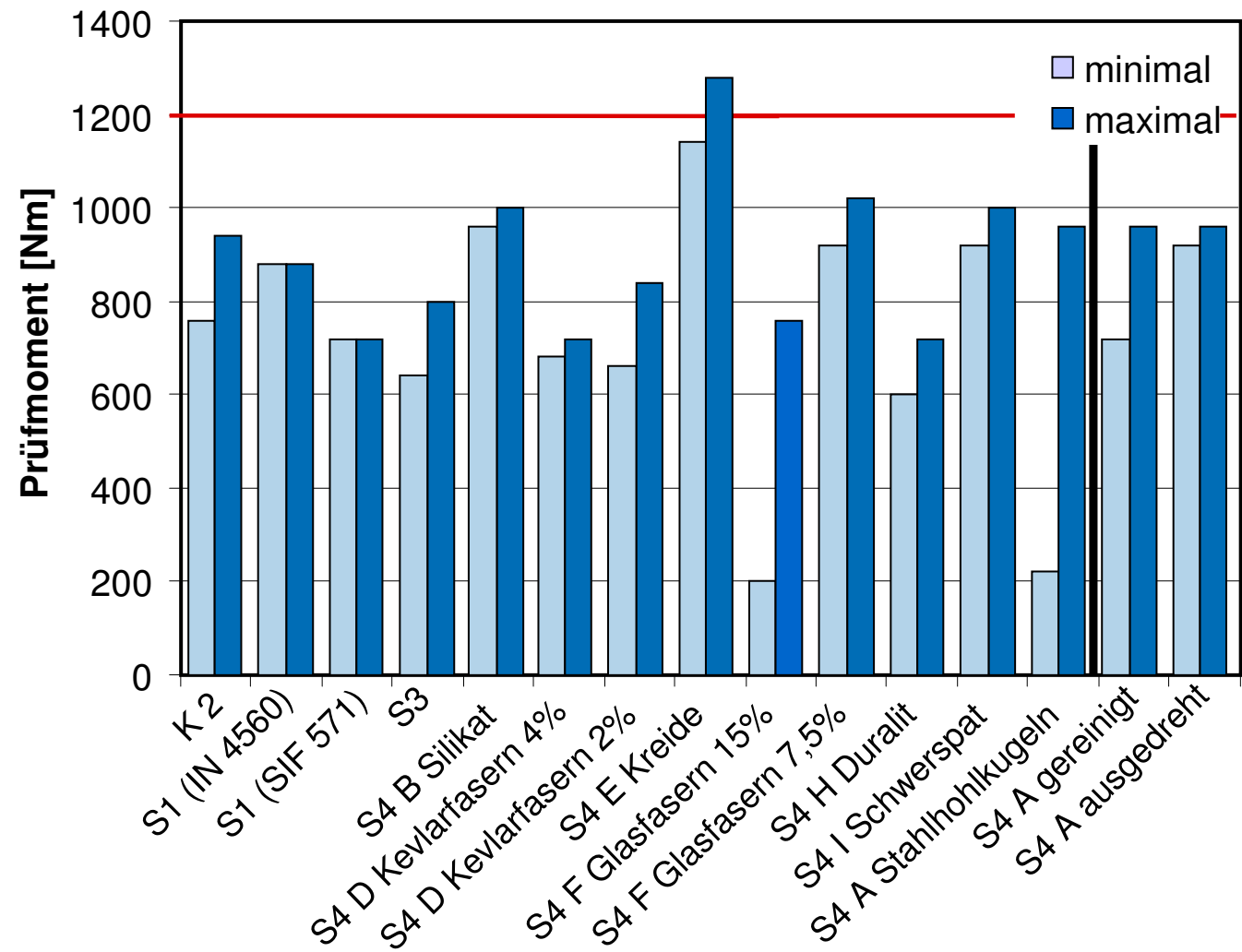
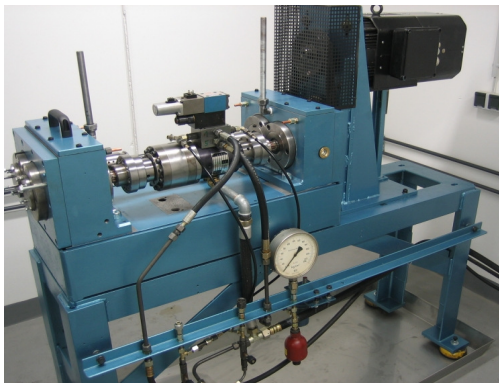
Ergebnisse der statischen Abdruckversuche

Verzahnungsdaten

$m_n = 3,5 \text{ mm}$
 $z = 36$
 $\alpha_n = 20^\circ$
 $\beta = -19,3^\circ$
 $d_a = 140 \text{ mm}$
 $d_i = 45 \text{ mm}$
 $b = 41,5 \text{ mm}$

Schaumgeometrie

$d_{\text{innen}} = 92 \text{ mm}$
 $d_{\text{außen}} = 100 \text{ mm}$



Ergebnisse der dynamischen Laufversuche zur Bestimmung der Tragfähigkeit

Verzahnungsdaten

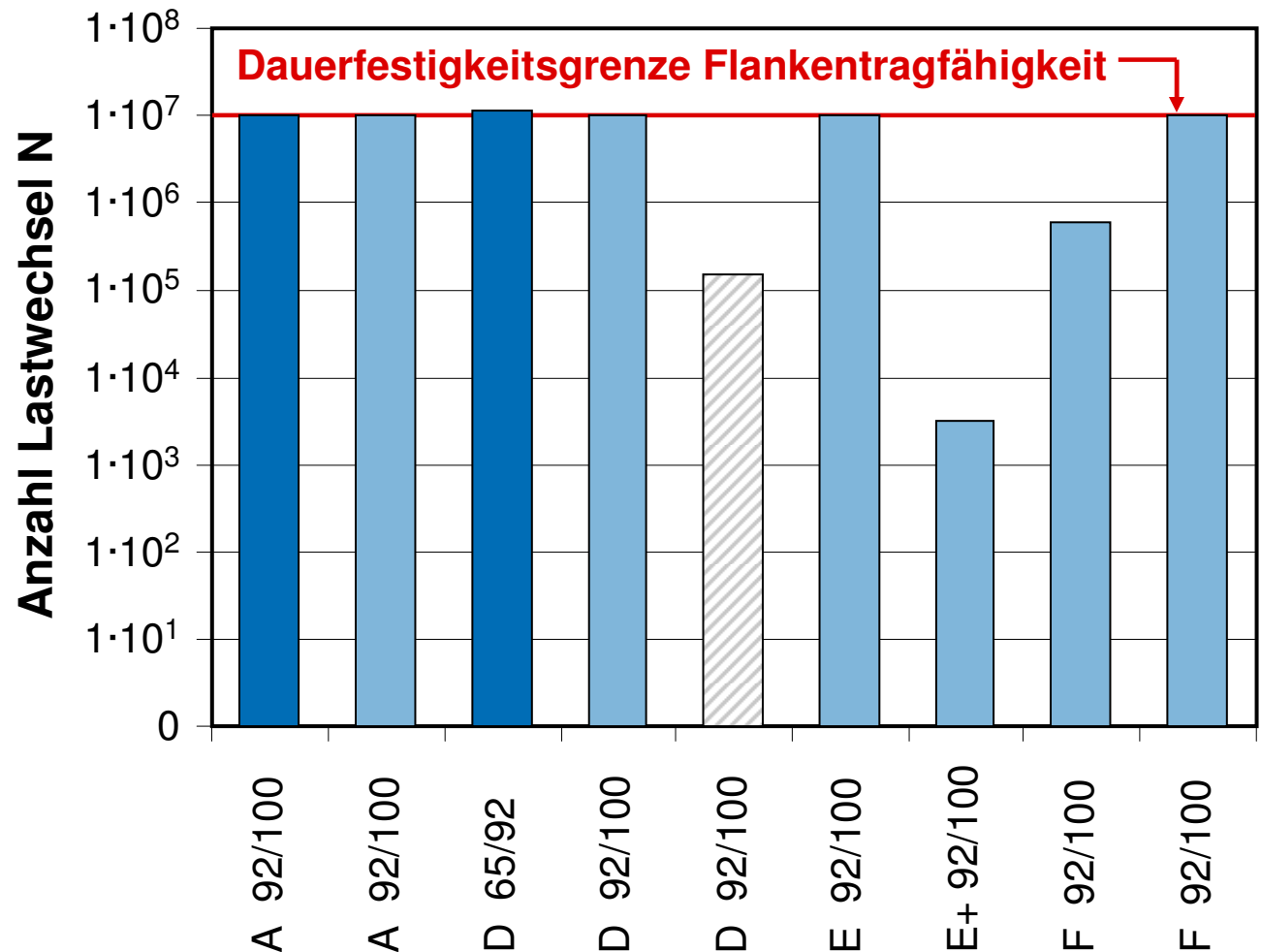
$m_n = 3,5 \text{ mm}$
 $z = 25/36$
 $\alpha_n = 20^\circ$
 $\beta = \pm 19,3^\circ$
 $d_a = 101/140 \text{ mm}$
 $d_i = 45 \text{ mm}$
 $b = 41,5 \text{ mm}$
 Schaum S4

Legende

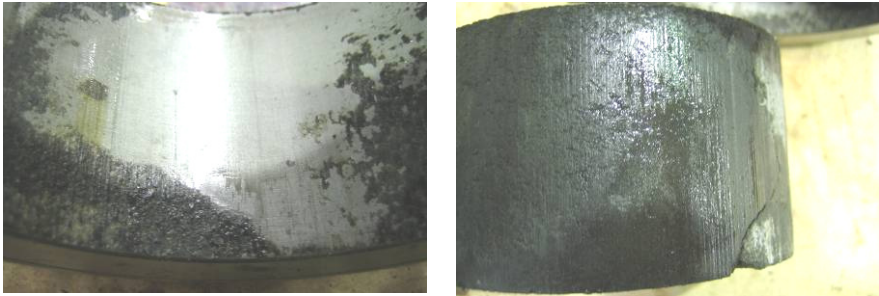
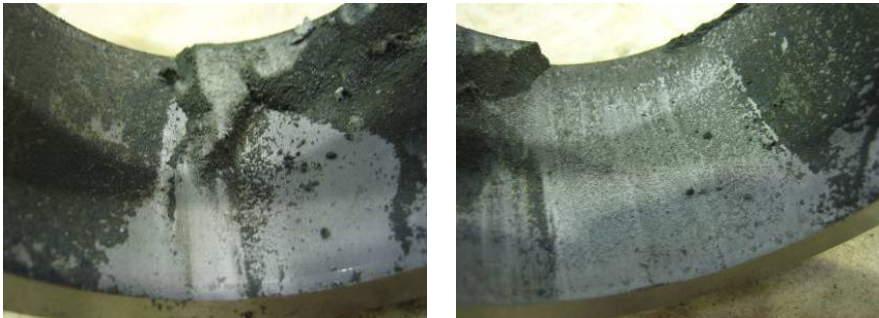
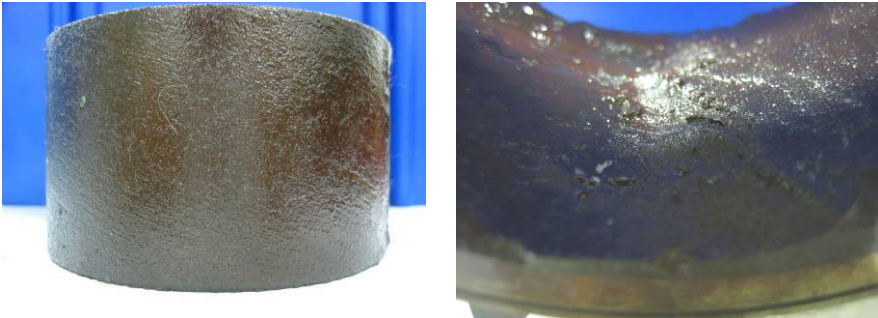
■ $M = 830 \text{ Nm}$
■ $M = 1000 \text{ Nm}$
■ $M = 1200 \text{ Nm}$

$n_1 = 1000 \text{ min}^{-1}$

Schmierstoff:
 Aral SAE W80
 $\vartheta_{Öl} = 55^\circ\text{C}$



Bruchbilder der im Laufversuch getesteten Zahnräder nach dem Schaden

Vor Prozessoptimierung	Silikat  ■ Statisches Prüfmoment 1000 Nm ■ Außenring durchgerutscht	Glasfasern  ■ Dynamisches Drehmoment 1000 Nm ■ Versagen am Innenring nach 880 min
	Kreide  ■ Statisches Prüfmoment 1140 Nm ■ Außenring durchgerutscht	Kreide  ■ Durchläufer bei $M = 1000 \text{ Nm}$

Gliederung



Einleitung und Motivation

Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen (ifs)

**Tragfähigkeitsuntersuchungen der Werkstoffverbund-
Zahnräder**

- Statische Prüfung
- Dynamische Prüfung

■ **Geräuschuntersuchungen am Stirnradsatz**

**Akustische Untersuchungen der Komponenten Lagerstelle
und Zahnrad im Getriebe**

Zusammenfassung

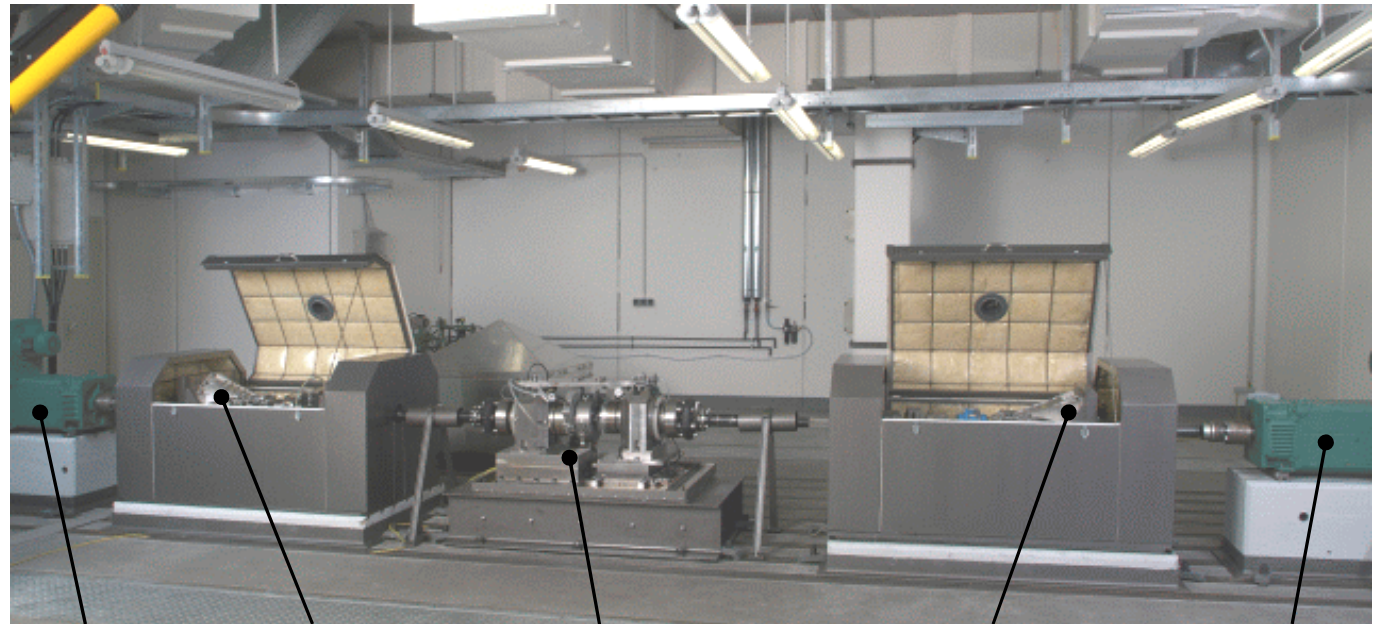
Stirnrad-Geräuschprüfstand

Technische Daten

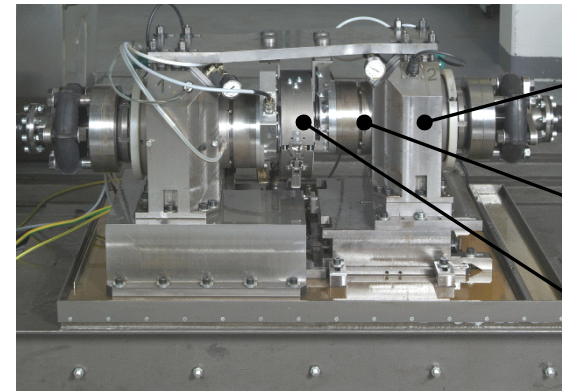
- Antriebs-Drehzahl
 $n_{an} = 0 \dots 3000 \text{ min}^{-1}$
- Antriebs-Drehmoment
 $M_{max} = 400 \text{ Nm}$
- Achsabstand
 $a = 70 \text{ bis } 140 \text{ mm}$

Messgrößen

- Drehfehler
- Drehbeschleunigung
- Körperschall
- Luftschall (vergleichend)
- Wirkungsgradmessung von Stirnradstufen



Generator Zwischengetriebe Messzelle Zwischengetriebe Motor



Lagerbock mit Winkelmesssystem
Körperschallaufnehmer
Prüfverzahnung

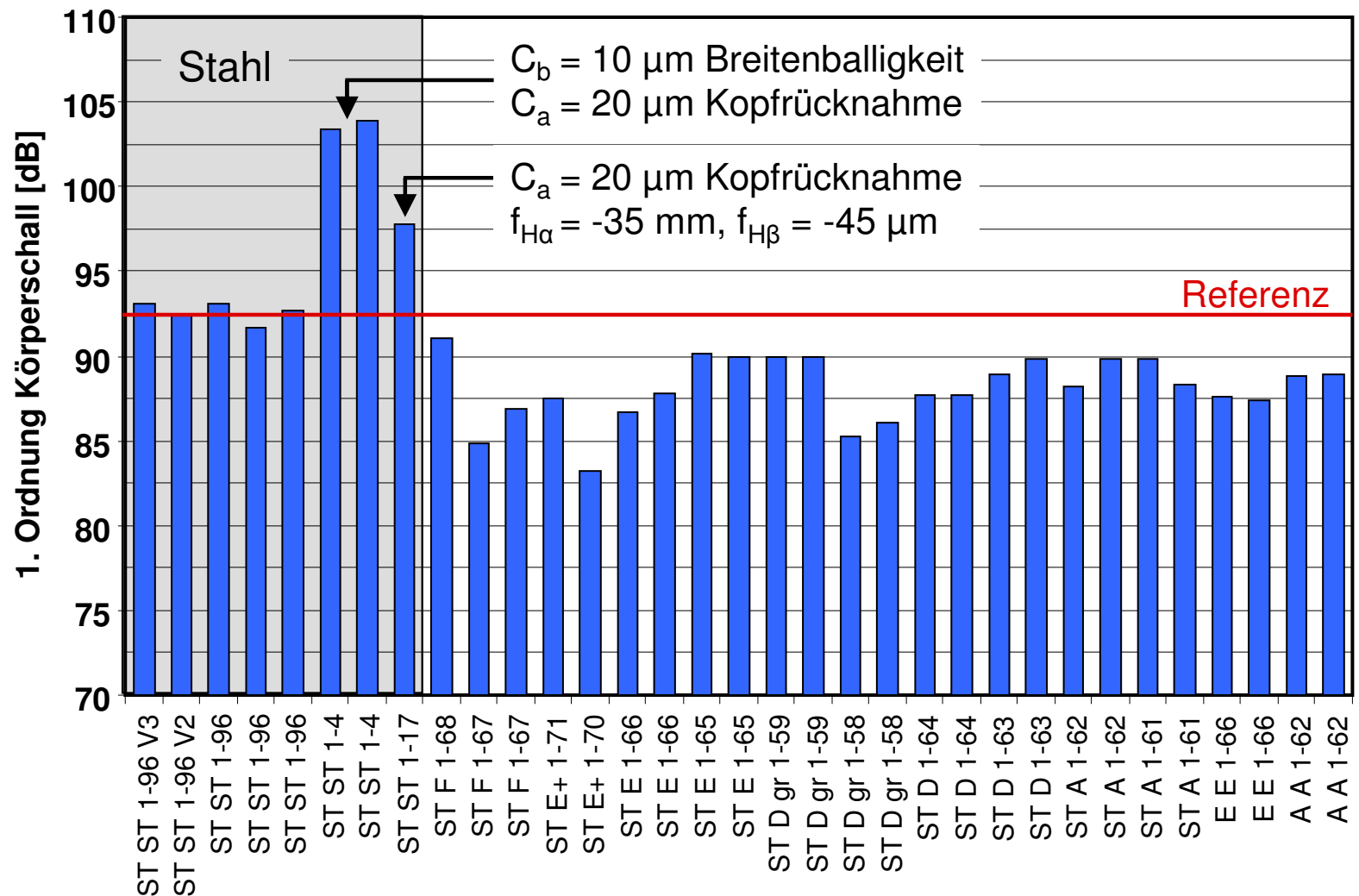
Ergebnisse Körperschall Rad (Kanal 1) bei einer Antriebsdrehzahl von 1000 min⁻¹ und einem Antriebsmoment von 180 Nm

Verzahnungsdaten

$m_n = 3,5 \text{ mm}$
 $z = 25/36$
 $\alpha_n = 20^\circ$
 $\beta = \pm 19,3^\circ$
 $d_a = 101/140 \text{ mm}$
 $d_i = 45 \text{ mm}$
 $b = 41,5 \text{ mm}$
 Qualität IT5
 Schaum S4

Versuchsdaten

$M_{An} = 180 \text{ Nm}$
 $n_{An} = 1000 \text{ min}^{-1}$
 radseitiger
 Körperschall
 (Kanal1)
 Schmierstoff:
 Aral SAE W80
 $\vartheta_{Öl} = 40^\circ\text{C}$



Vergleich der Spektren flankenmodifizierter Stahlverzahnungen bei einer Antriebsdrehzahl von 1000 min⁻¹

■ Verzahnungsdaten

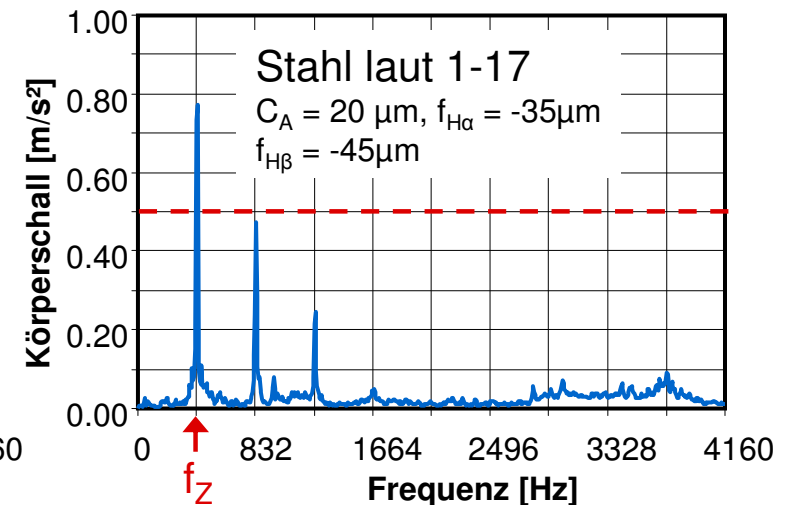
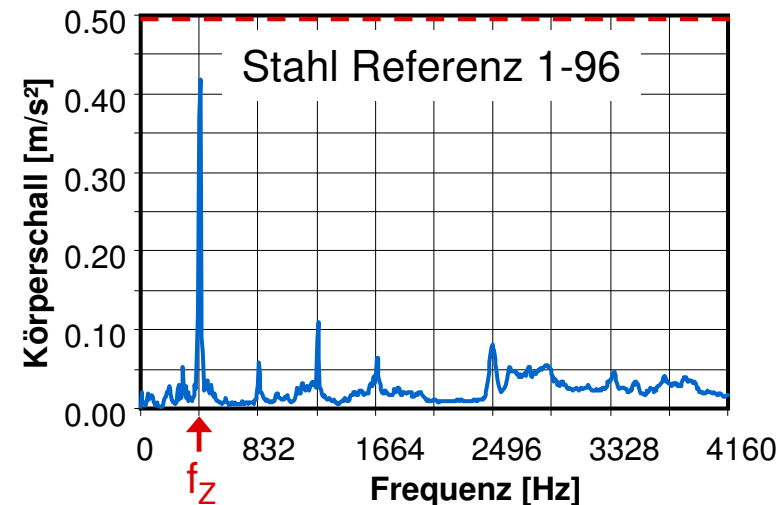
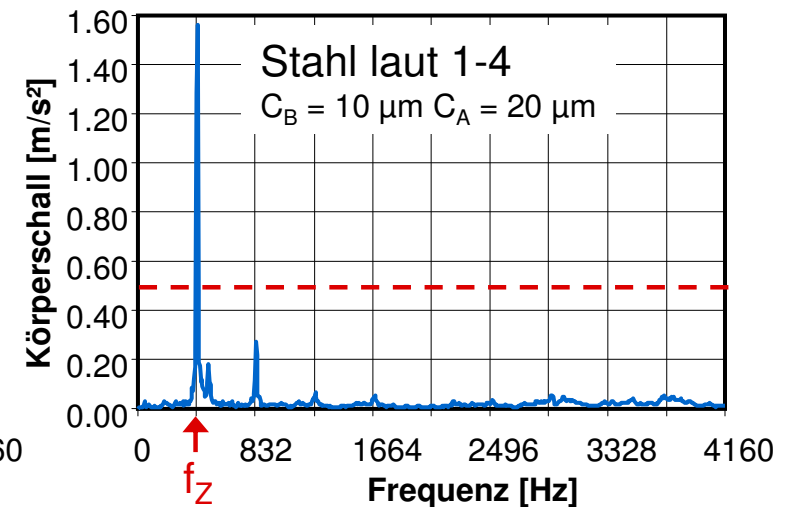
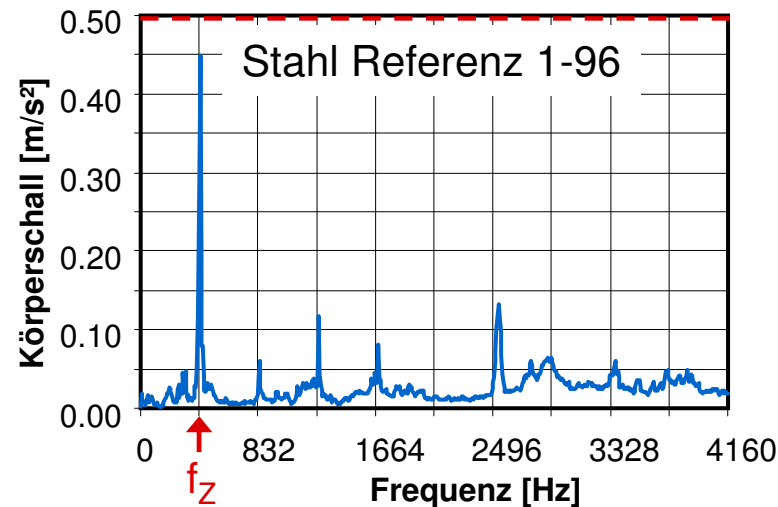
$m_n = 3,5 \text{ mm}$
 $z = 25/36$
 $\alpha_n = 20^\circ$
 $\beta = \pm 19,3^\circ$
 $d_a = 101/140 \text{ mm}$
 $d_i = 45 \text{ mm}$
 $b = 41,5 \text{ mm}$
 Qualität IT5
 Schaum S4

■ Schaumgeometrie

$d_{\text{innen}} = 92 \text{ mm}$
 $d_{\text{außen}} = 100 \text{ mm}$

■ Versuchsdaten

$M_{An} = 180 \text{ Nm}$
 $n_{An} = 1000 \text{ min}^{-1}$
 radseitiger
 Körperschall



Vergleich der Spektren des Materials D mit denen der Referenzstahlverzahnung bei einer Antriebsdrehzahl von 1000 min⁻¹

■ Verzahnungsdaten

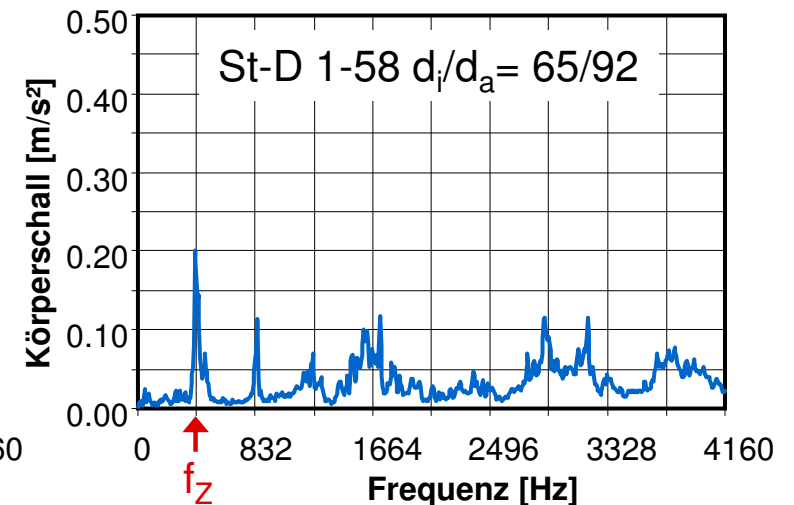
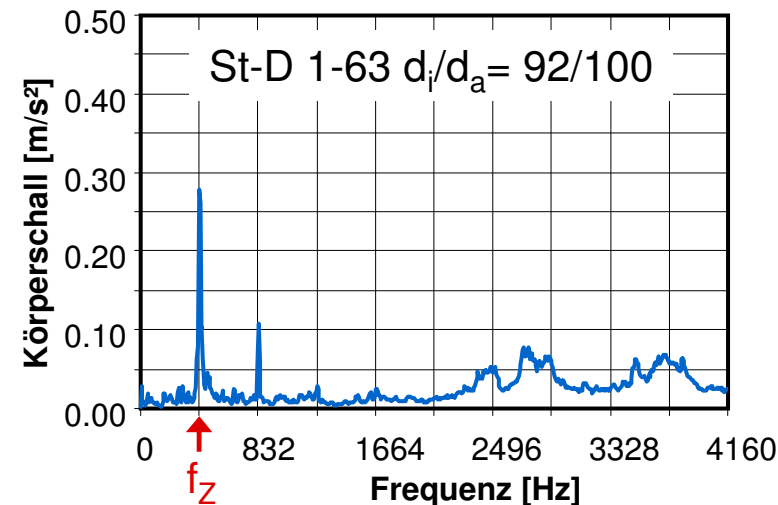
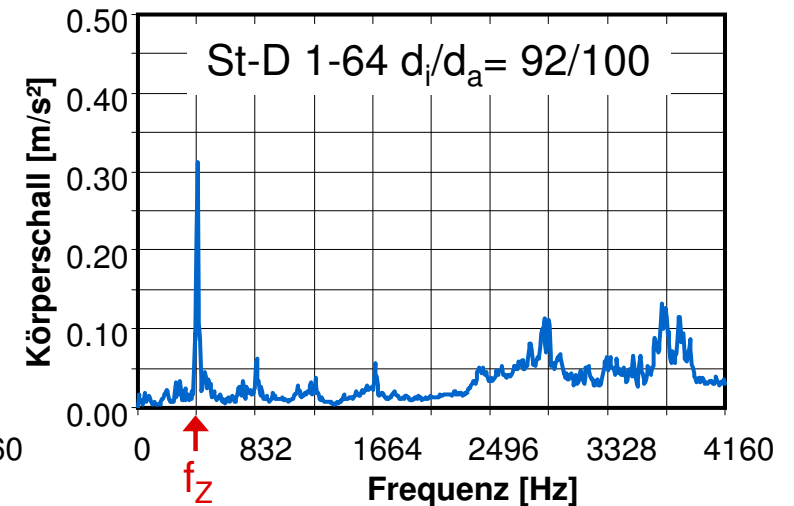
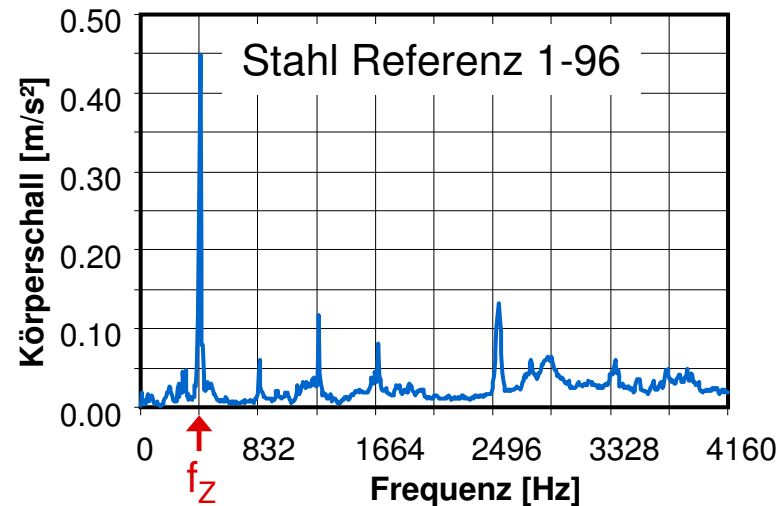
$m_n = 3,5 \text{ mm}$
 $z = 25/36$
 $\alpha_n = 20^\circ$
 $\beta = \pm 19,3^\circ$
 $d_a = 101/140 \text{ mm}$
 $d_i = 45 \text{ mm}$
 $b = 41,5 \text{ mm}$
 Qualität IT5
 Schaum S4

■ Schaumgeometrie

$d_{\text{innen}} = 92 / 65 \text{ mm}$
 $d_{\text{außen}} = 100 / 92 \text{ mm}$

■ Versuchsdaten

$M_{An} = 180 \text{ Nm}$
 $n_{An} = 1000 \text{ min}^{-1}$
 radseitiger
 Körperschall



Ergebnisse Luftschall (Kanal 5) bei einer Antriebsdrehzahl von 1000 min⁻¹ und einem Antriebsmoment von 180 Nm

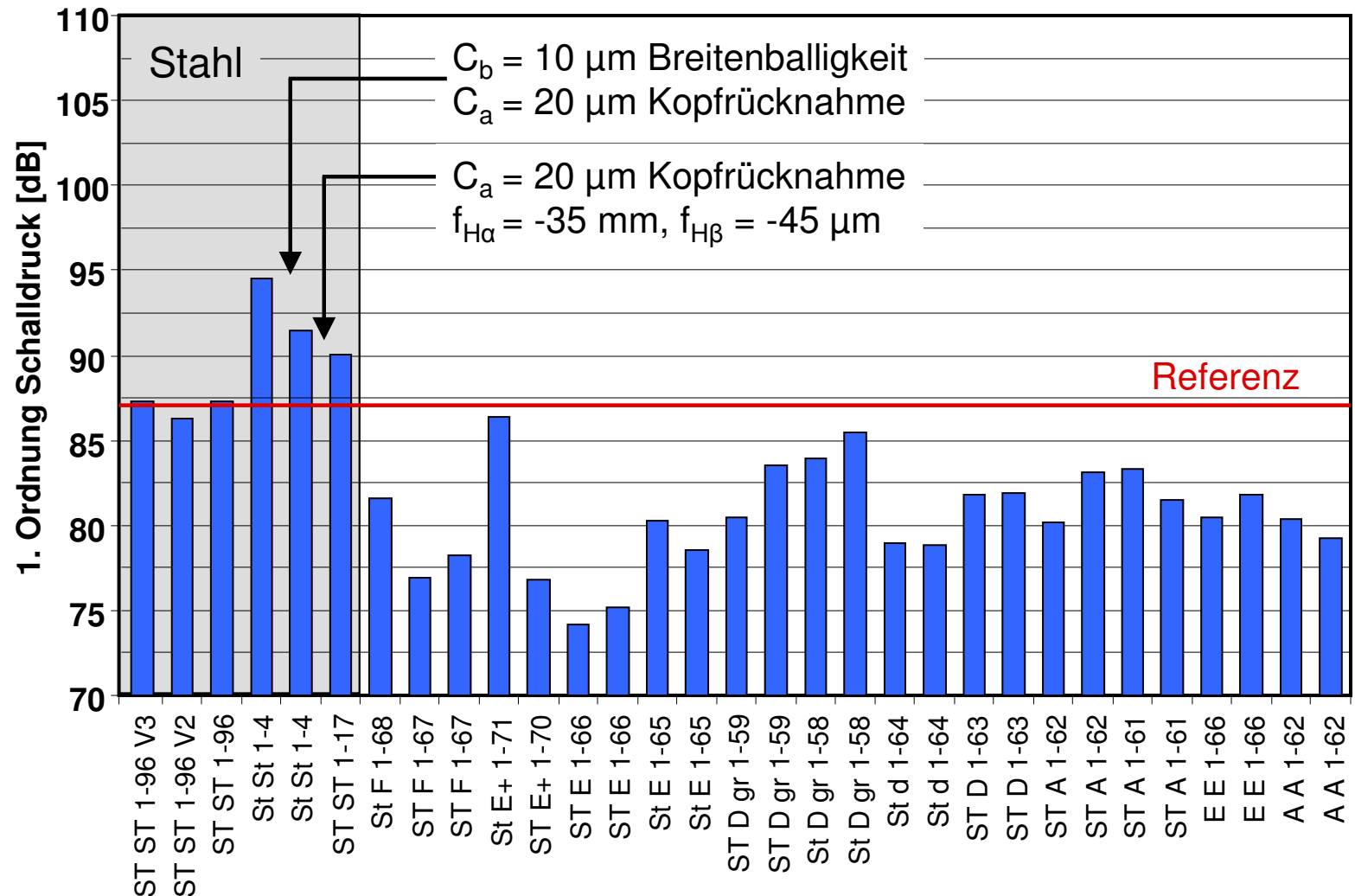
Verzahnungsdaten

$m_n = 3,5 \text{ mm}$
 $z = 25/36$
 $\alpha_n = 20^\circ$
 $\beta = \pm 19,3^\circ$
 $d_a = 101/140 \text{ mm}$
 $d_i = 45 \text{ mm}$
 $b = 41,5 \text{ mm}$
 Qualität IT5
 Schaum S4

Versuchsdaten

$M_{An} = 180 \text{ Nm}$
 $n_{An} = 1000 \text{ min}^{-1}$
 Luftschall
 (Kanal5)

Schmierstoff:
 Aral SAE W80
 $\vartheta_{Öl} = 40^\circ\text{C}$



Gliederung



Einleitung und Motivation

Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen (ifs)

**Tragfähigkeitsuntersuchungen der Werkstoffverbund-
Zahnräder**

Geräuschuntersuchungen am Stirnradsatz

■ **Akustische Untersuchungen der Komponenten Lagerstelle
und Zahnrad im Getriebe**

- Lagerstelle
- Verzahnung und Kombination Lager & Verzahnung

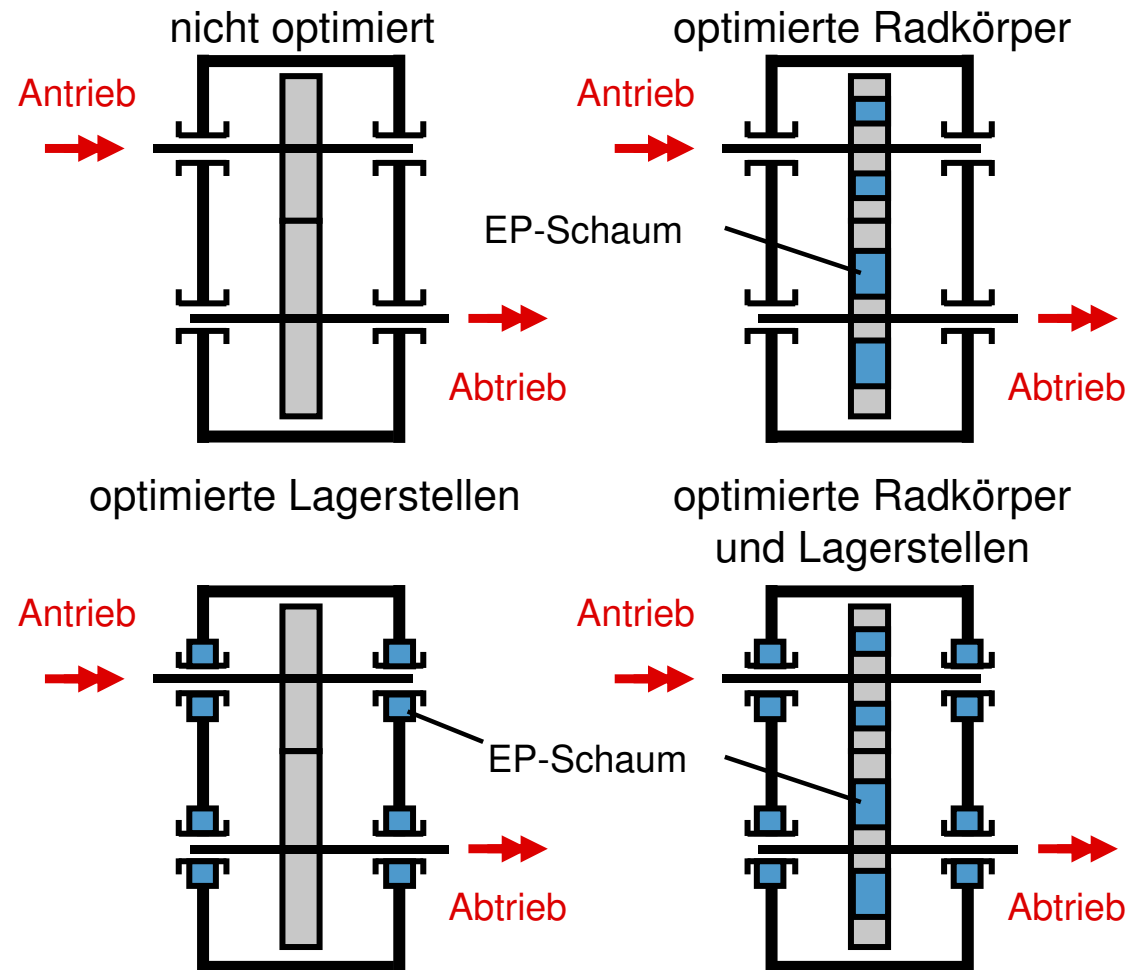
Zusammenfassung

Geplante Arbeiten: EP-Werkstoffe im Bereich der Wälzlagerung

Anforderungen:

- Nutzen der Zahnräder aus grundlegenden Untersuchungen an der Stirnradstufe
- einfaches standardisiertes Prüfgetriebe
- Testen von Schrägverzahnungen – angestellte Lagerung
- Untersuchungen von Wechselwirkungen zwischen modifizierten Radkörper und mod. Lagerstellen

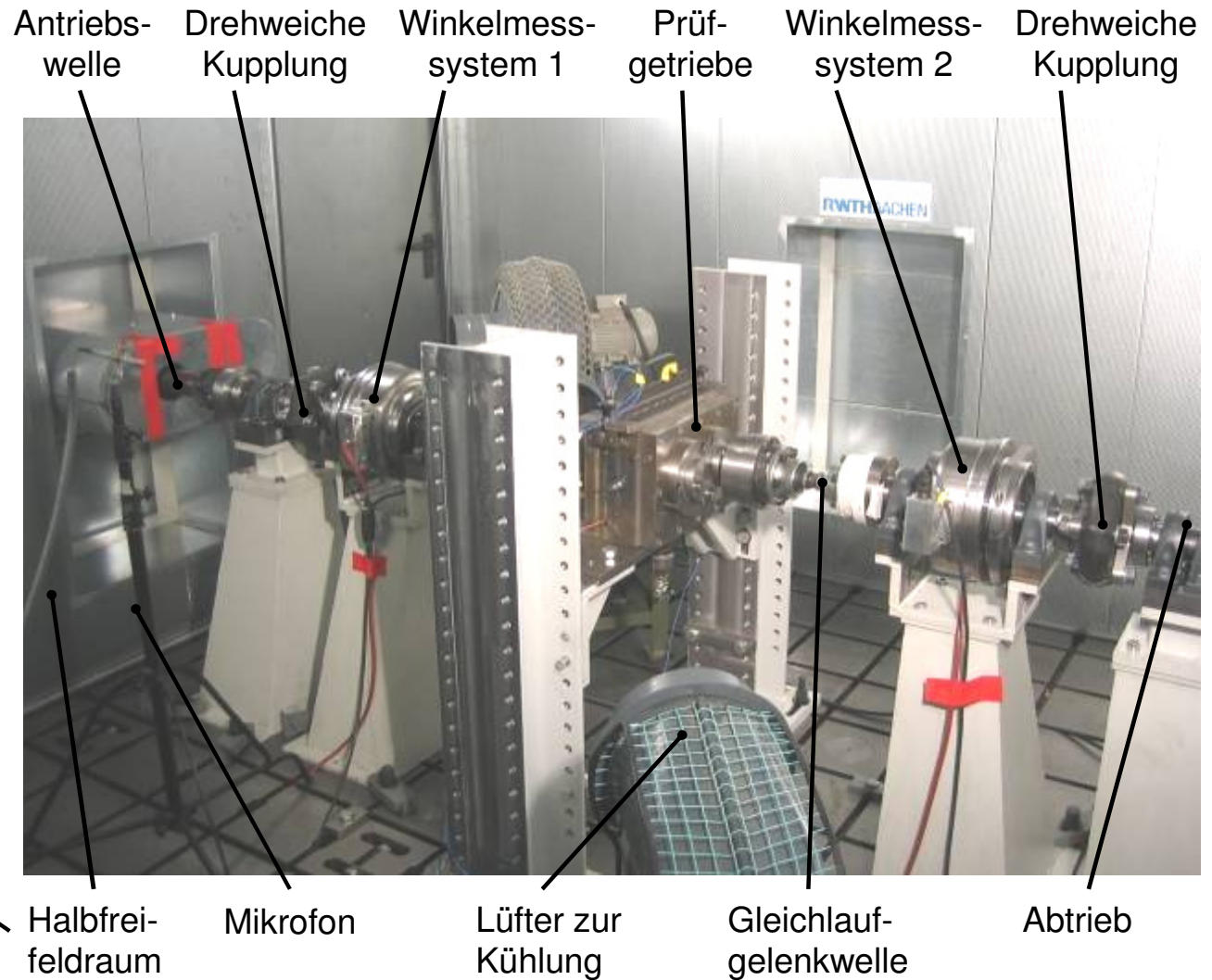
Varianten des optimierten Getriebes



Prüfaufbau auf dem Universal-Getriebeprüfstand

Prüfstandsdaten

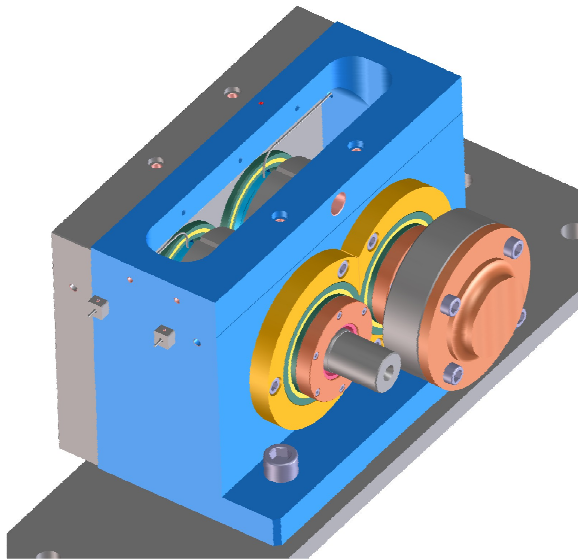
- Antrieb
Leistung: 220 kW
max. Drehzahl: 6600 min⁻¹
max. Drehmoment: 380 Nm
- Abtrieb
Leistung: 2x155 kW
max. Drehzahl: 2500 min⁻¹
max. Drehmoment: 2x1300 Nm



Versuchsmatrix für die Untersuchungen am einfachen WZL-Stirnradgetriebe

Reduzierung der Geräuschemission

- durch Werkstoffverbund-Verzahnung
- durch EP-Lagerbuchsen
- Untersuchungen von Wechselwirkungen



Nr.	Verzahnung		Lagerung
	Ritzel	Rad	
1	Stahl	Stahl	Stahl
2	Stahl	Stahl	S4 A Glashohlkugeln
3	Stahl	Stahl	S4 B Kevlarfasern
4	Stahl	Stahl	S4 D Glasfasern
5	S4 A	S4 A	Stahl
6	S4 D	S4 D	Stahl
7	S4 D	Stahl	Stahl
8	Stahl	S4 D	Stahl
9	S4 E	S4 E	Stahl
10	S4 A	S4 A	S4 B Silikat
11	S4 D	S4 D	S4 B Silikat

Gliederung



Einleitung und Motivation

Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen (ifs)

Tragfähigkeitsuntersuchungen der Werkstoffverbund-Zahnräder

Geräuschuntersuchungen am Stirnradatz

■ **Akustische Untersuchungen der Komponenten Lagerstelle und Zahnrad im Getriebe**

- **Lagerstelle**
- **Verzahnung und Kombination Lager & Verzahnung**

Zusammenfassung

Messgrößen für das Einbringen von EP-Schaum im Bereich der Wälzlagerung

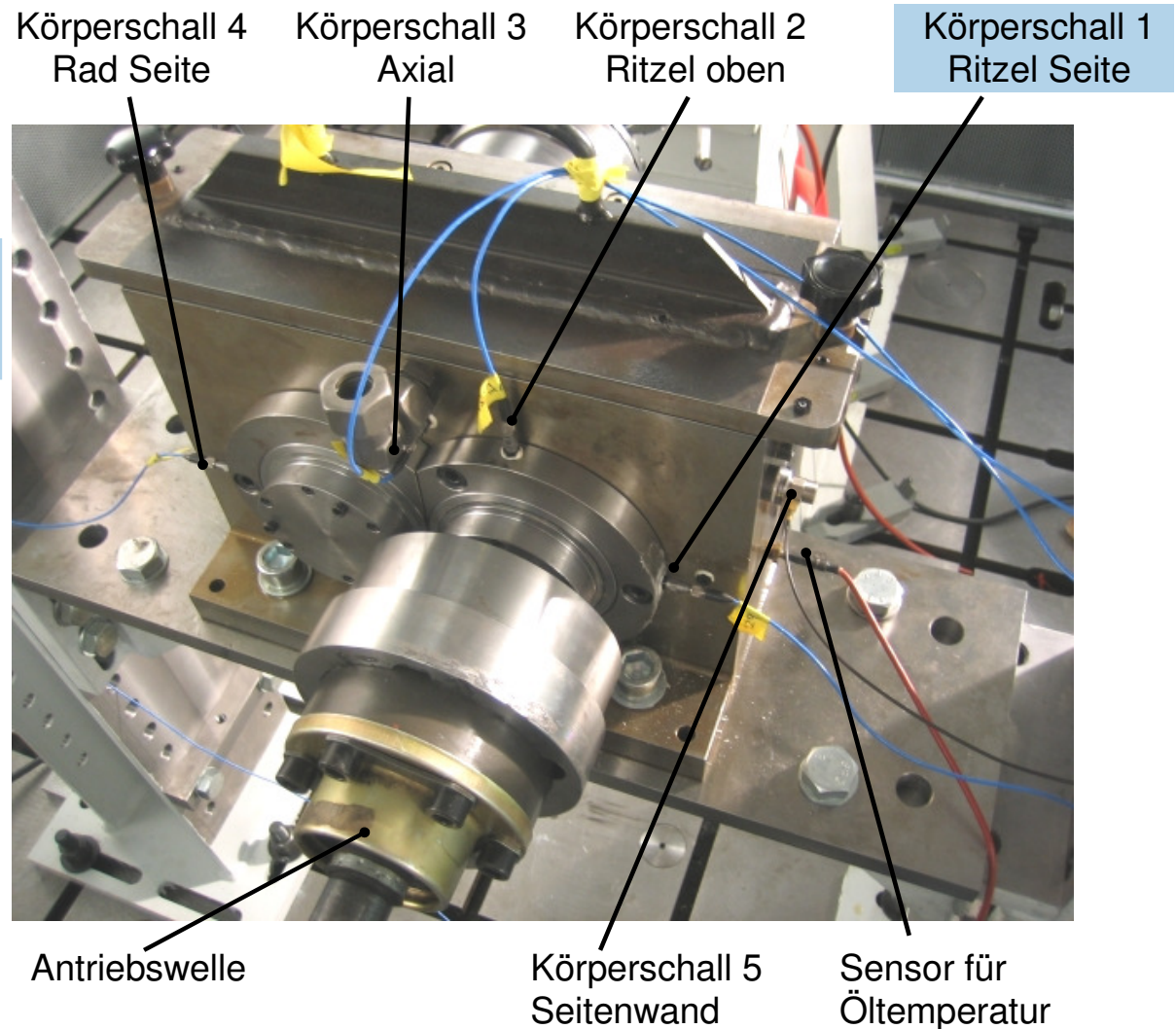
Messgrößen

- Drehfehlermessung durch Winkel-Encoder am Getriebeein- und -ausgang
- Vergleichende Luftschallmessung in einem Meter Abstand
- Körperschallmessungen am Getriebegehäuse

Lagerbuchse



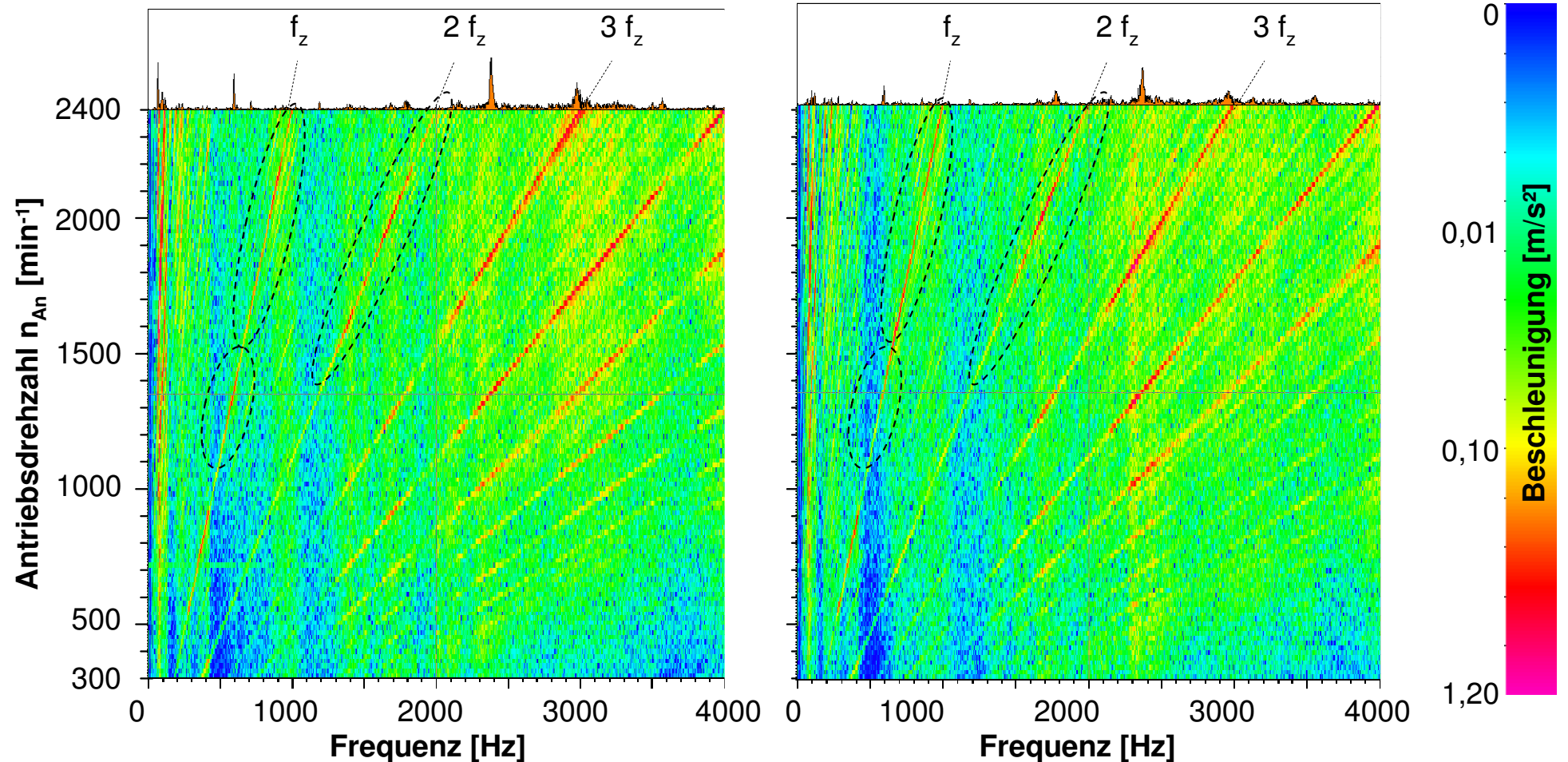
Außenring
EP-Schaum
Innenring mit
Stellschrauben
für Lagervor-
spannung



Drehzahlhochlauf: Körperschall 1 an der ritzelseitigen Lagerstelle bei einem Belastungsmoment von $M_{Ab} = 600 \text{ Nm}$

Voll-Stahl-Lagerbuchse

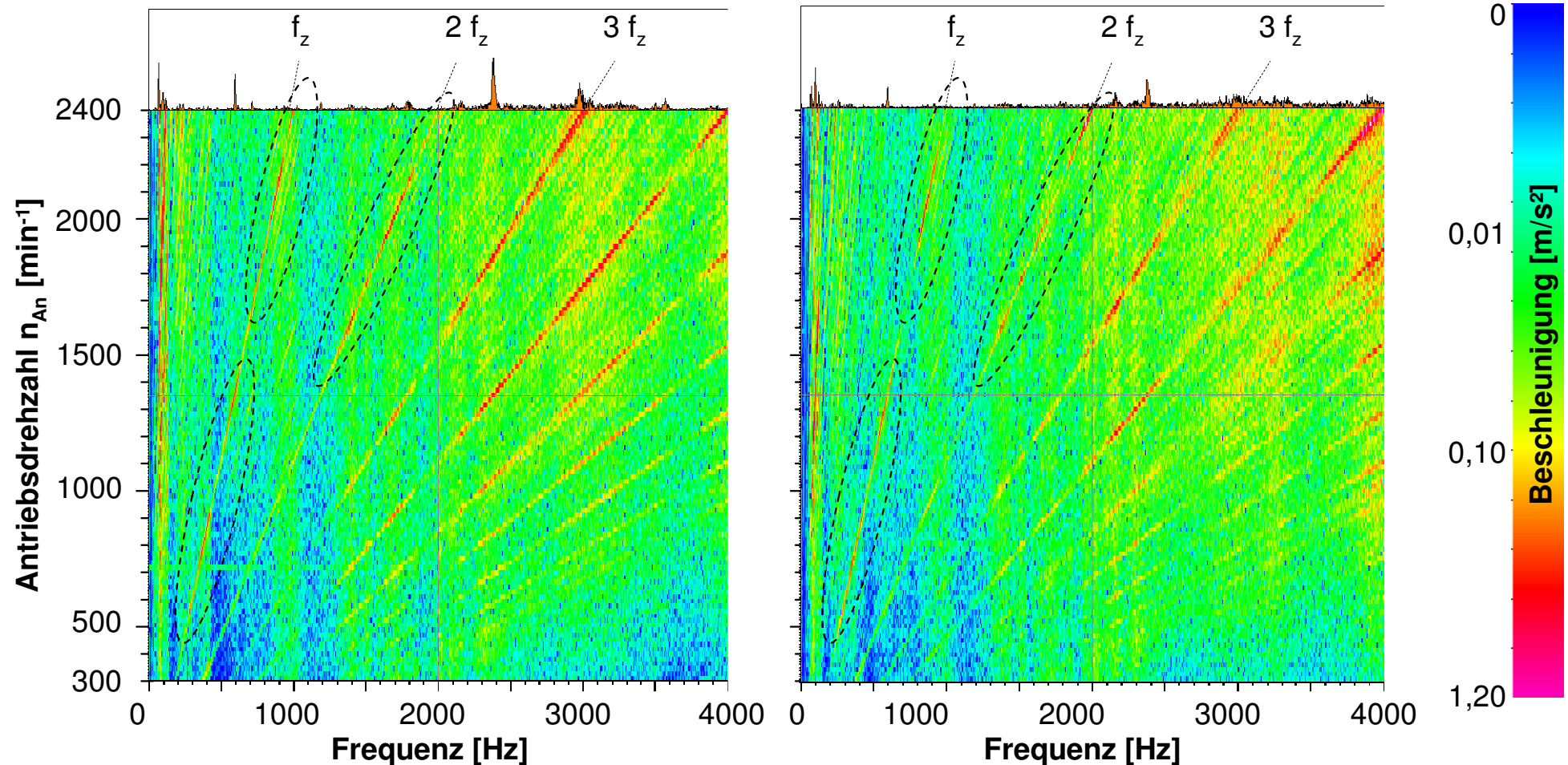
EP-Lagerbuchse S4 Füllstoff A



Drehzahlhochlauf: Körperschall 1 an der ritzelseitigen Lagerstelle bei einem Belastungsmoment von $M_{Ab} = 600 \text{ Nm}$

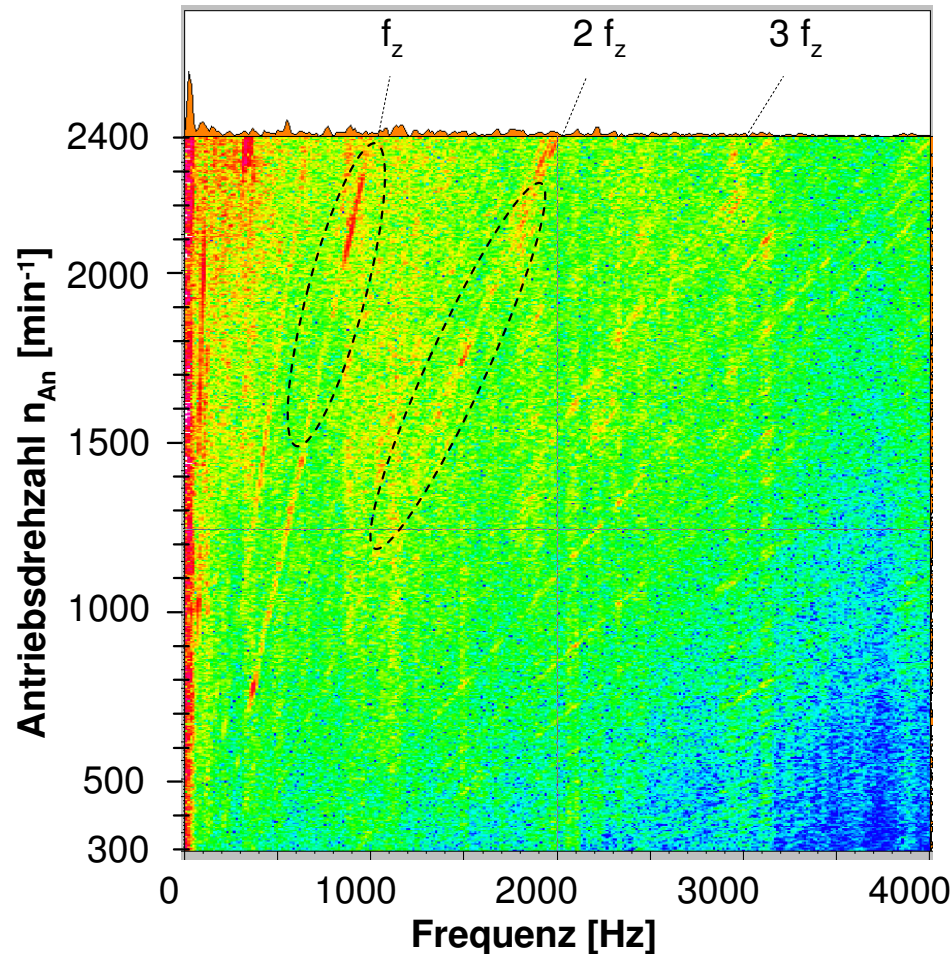
Voll-Stahl-Lagerbuchse

EP-Lagerbuchse S4 Füllstoff B

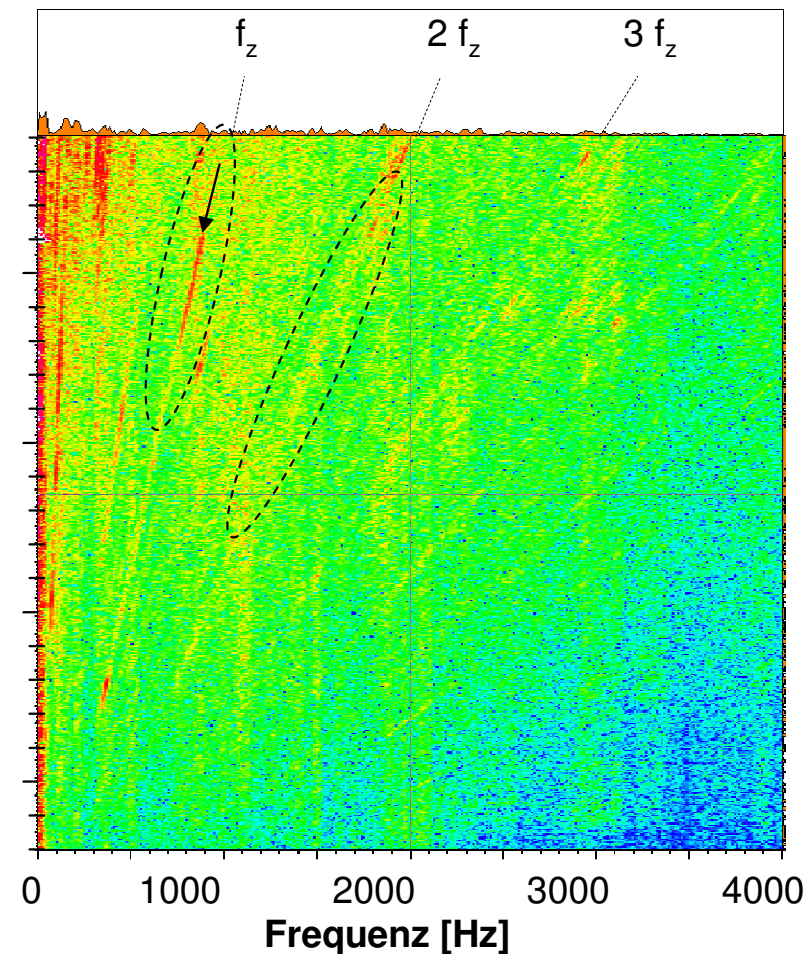


Drehzahlhochlauf: Luftschall bei einem Belastungsmoment von $M_{Ab} = 400 \text{ Nm}$

Voll-Stahl-Lagerbuchse



EP-Lagerbuchse S4 Füllstoff B



1. Ordnung Körperschall bzgl. Zahneingriff bei stationären Betriebspunkten in Abhängigkeit der Füllstoffe

■ Verzahnungsdaten

$m_n = 3,5 \text{ mm}$
 $z = 25/36$
 $\alpha_n = 20^\circ$
 $\beta = \pm 19,3^\circ$
 $d_a = 101/140 \text{ mm}$
 $d_i = 45 \text{ mm}$
 $b = 41,5 \text{ mm}$
 Schaum S4

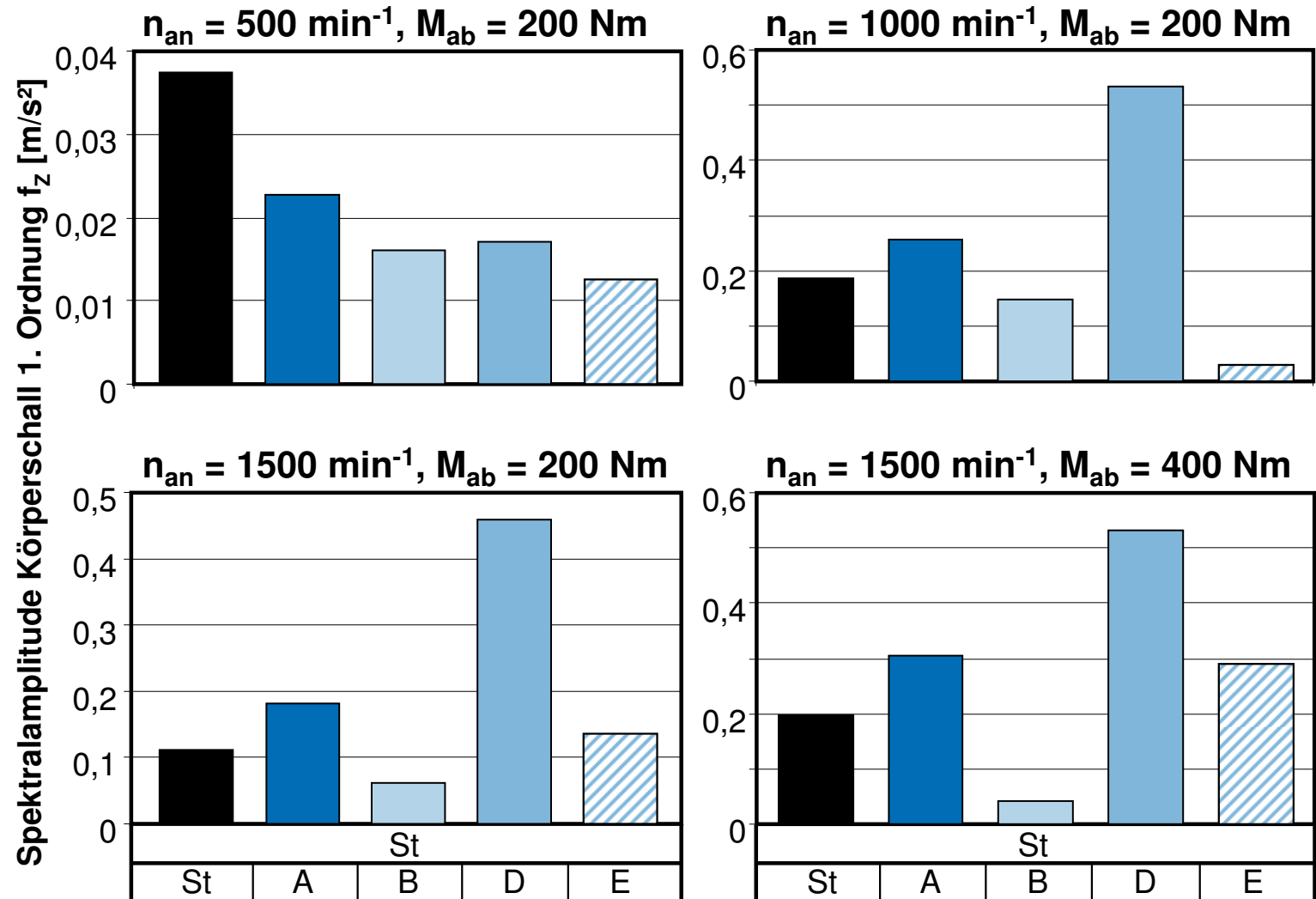
■ Schaumgeometrie

Ritzel $d/D = 65/71$
 Rad $d/D = 92/100$
 Hülse $d/D = 93/101$

■ Versuchsdaten

Körperschall Ritzel

Füllstoff Verzahnung
Füllstoff Lagerbuchse



1. Ordnung Luftschall bzgl. Zahneingriff bei stationären Betriebspunkten in Abhängigkeit der Füllstoffe

■ Verzahnungsdaten

$m_n = 3,5 \text{ mm}$
 $z = 25/36$
 $\alpha_n = 20^\circ$
 $\beta = \pm 19,3^\circ$
 $d_a = 101/140 \text{ mm}$
 $d_i = 45 \text{ mm}$
 $b = 41,5 \text{ mm}$
 Schaum S4

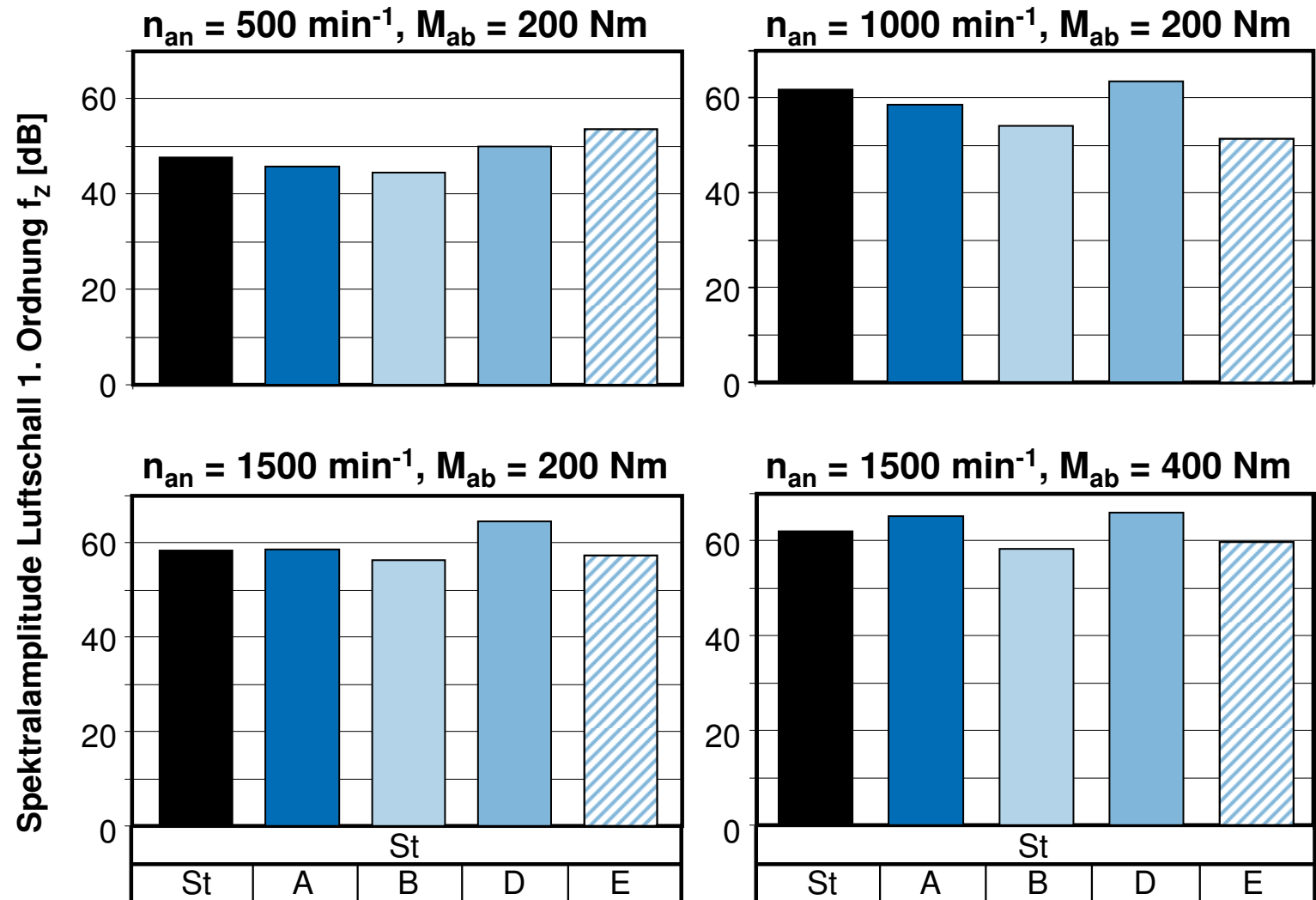
■ Schaumgeometrie

Ritzel $d/D = 65/71$
 Rad $d/D = 92/100$
 Hülse $d/D = 93/101$

■ Versuchsdaten

Luftschall

Füllstoff Verzahnung
Füllstoff Lagerbuchse



Gliederung



Einleitung und Motivation

Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen (ifs)

Tragfähigkeitsuntersuchungen der Werkstoffverbund-Zahnräder

Geräuschuntersuchungen am Stirnradsatz

■ **Akustische Untersuchungen der Komponenten Lagerstelle und Zahnrad im Getriebe**

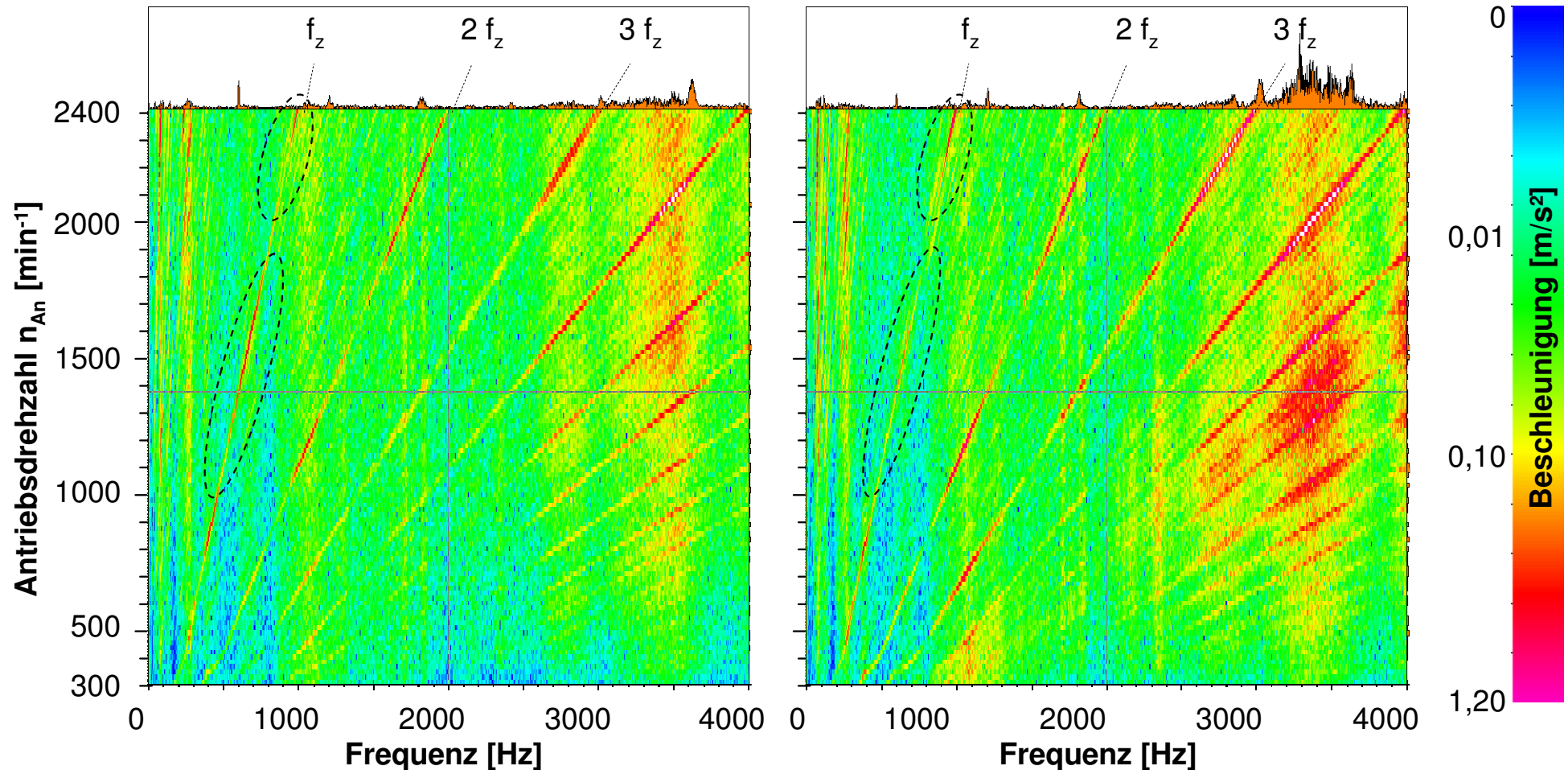
- Lagerstelle
- **Verzahnung und Kombination Lager & Verzahnung**

Zusammenfassung

Drehzahlhochlauf: Körperschall 1 an der ritzelseitigen Lagerstelle bei einem Belastungsmoment von $M_{Ab} = 550 \text{ Nm}$

Voll-Stahl-Zahnrad

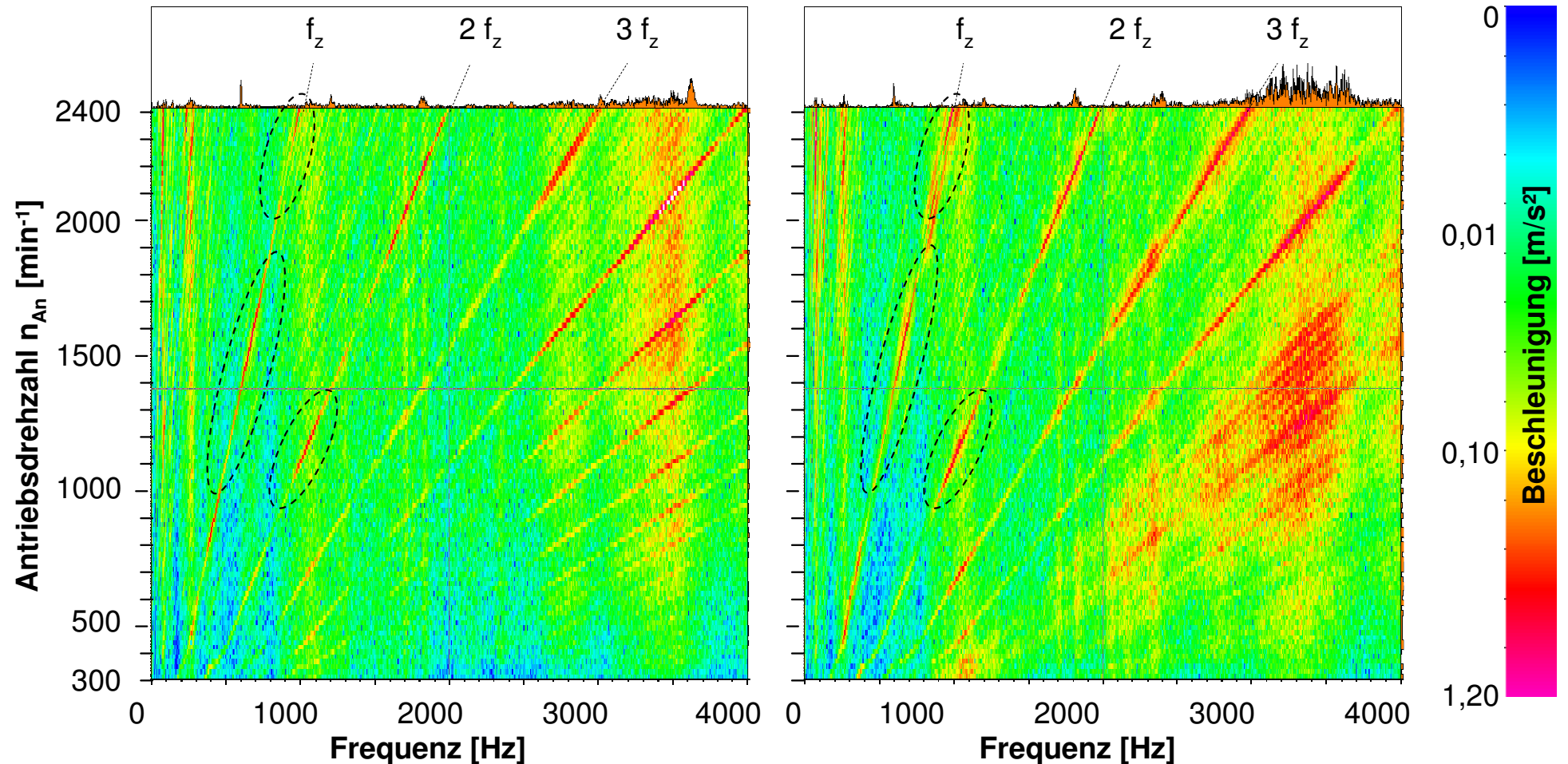
EP-Zahnradstufe S4 Füllstoff A



Drehzahlhochlauf: Körperschall 1 an der ritzelseitigen Lagerstelle bei einem Belastungsmoment von $M_{Ab} = 550 \text{ Nm}$

Voll-Stahl-Zahnrad

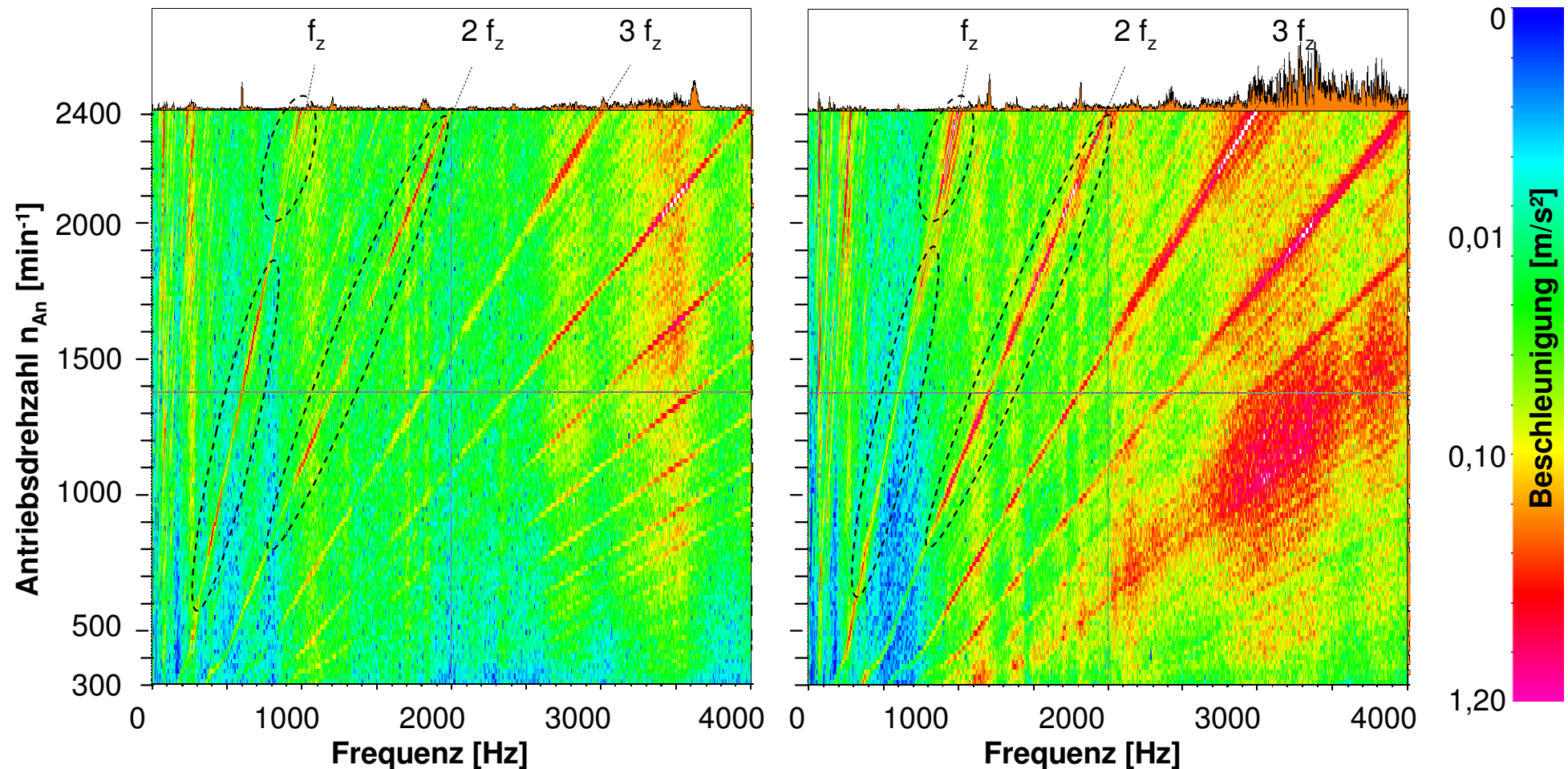
EP-Zahnradstufe S4 Füllstoff D



Drehzahlhochlauf: Körperschall 1 an der ritzelseitigen Lagerstelle bei einem Belastungsmoment von $M_{Ab} = 550 \text{ Nm}$

Voll-Stahl-Zahnrad

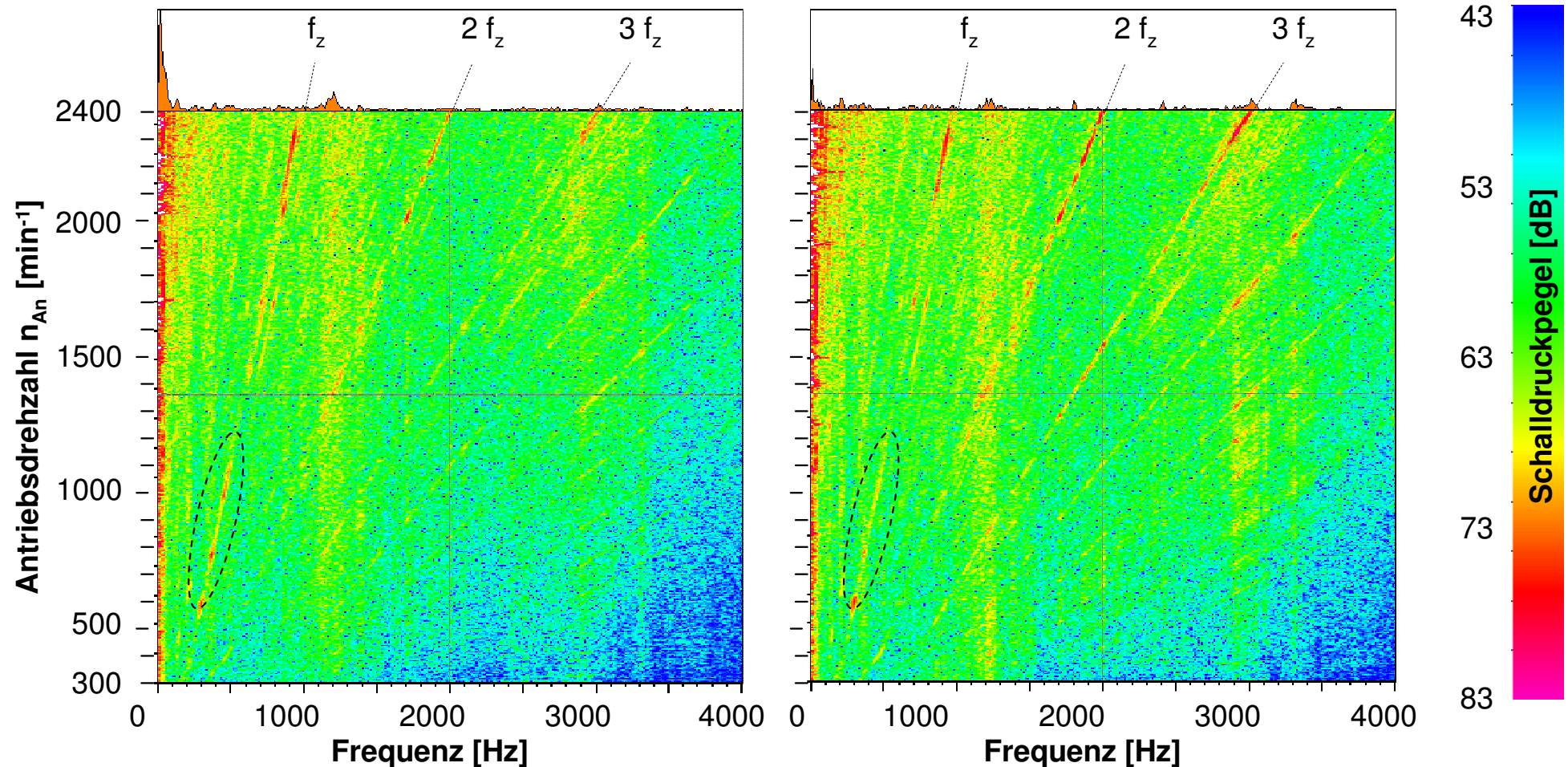
EP-Zahnradstufe S4 A & EP-Lagerbuchse S4 B



Drehzahlhochlauf: Luftschall bei einem Belastungsmoment von $M_{Ab} = 550 \text{ Nm}$

Voll-Stahl-Zahnrad

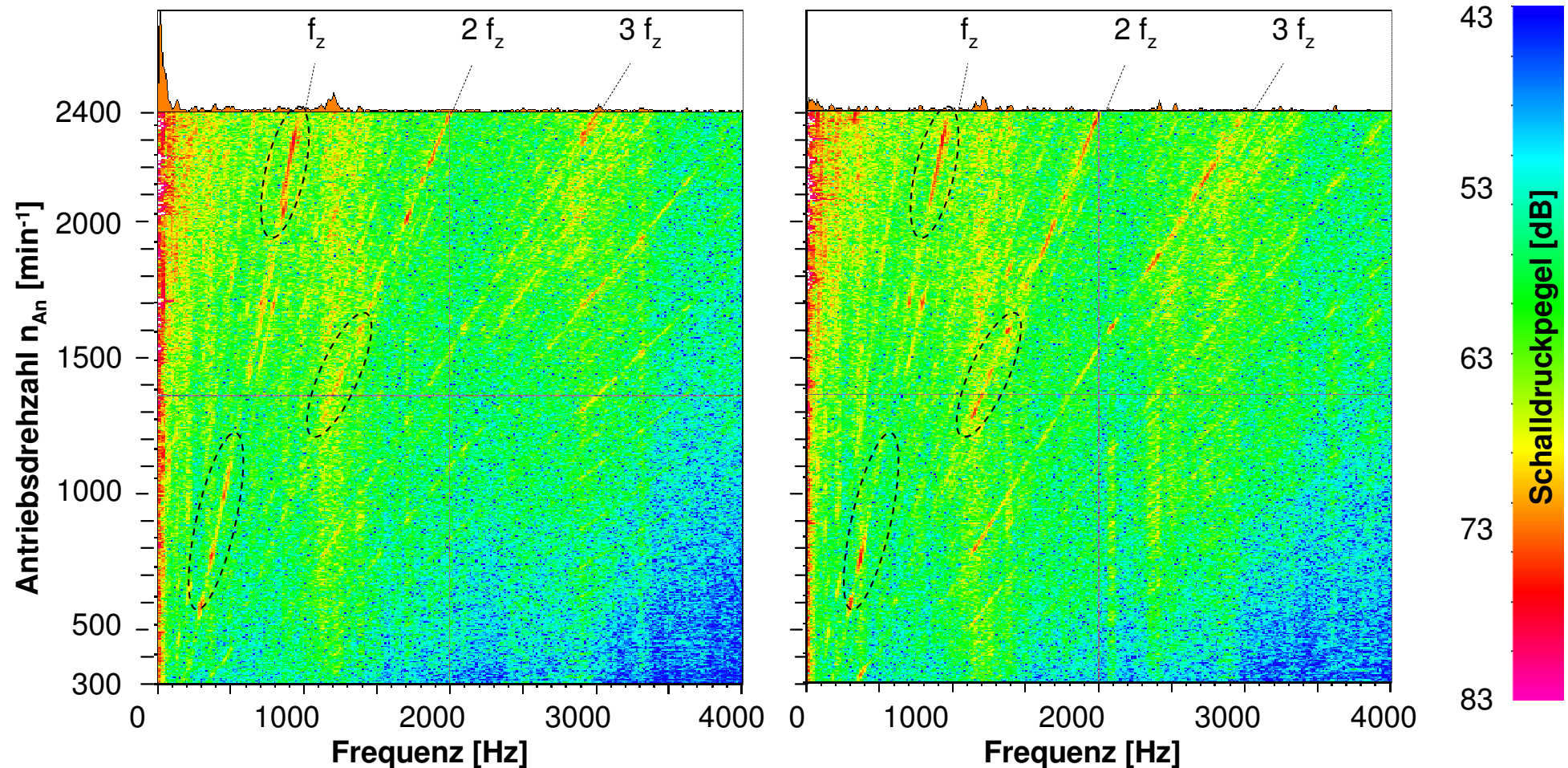
EP-Zahnradstufe S4 Füllstoff A



Drehzahlhochlauf: Luftschall bei einem Belastungsmoment von $M_{Ab} = 550 \text{ Nm}$

Voll-Stahl-Zahnrad

EP-Zahnradstufe S4 A & EP-Lagerbuchse S4 B



1. Ordnung Körperschall bzgl. Zahneingriff bei stationären Betriebspunkten in Abhängigkeit der Füllstoffe

■ Verzahnungsdaten

$m_n = 3,5 \text{ mm}$
 $z = 25/36$
 $\alpha_n = 20^\circ$
 $\beta = \pm 19,3^\circ$
 $d_a = 101/140 \text{ mm}$
 $d_i = 45 \text{ mm}$
 $b = 41,5 \text{ mm}$
 Schaum S4

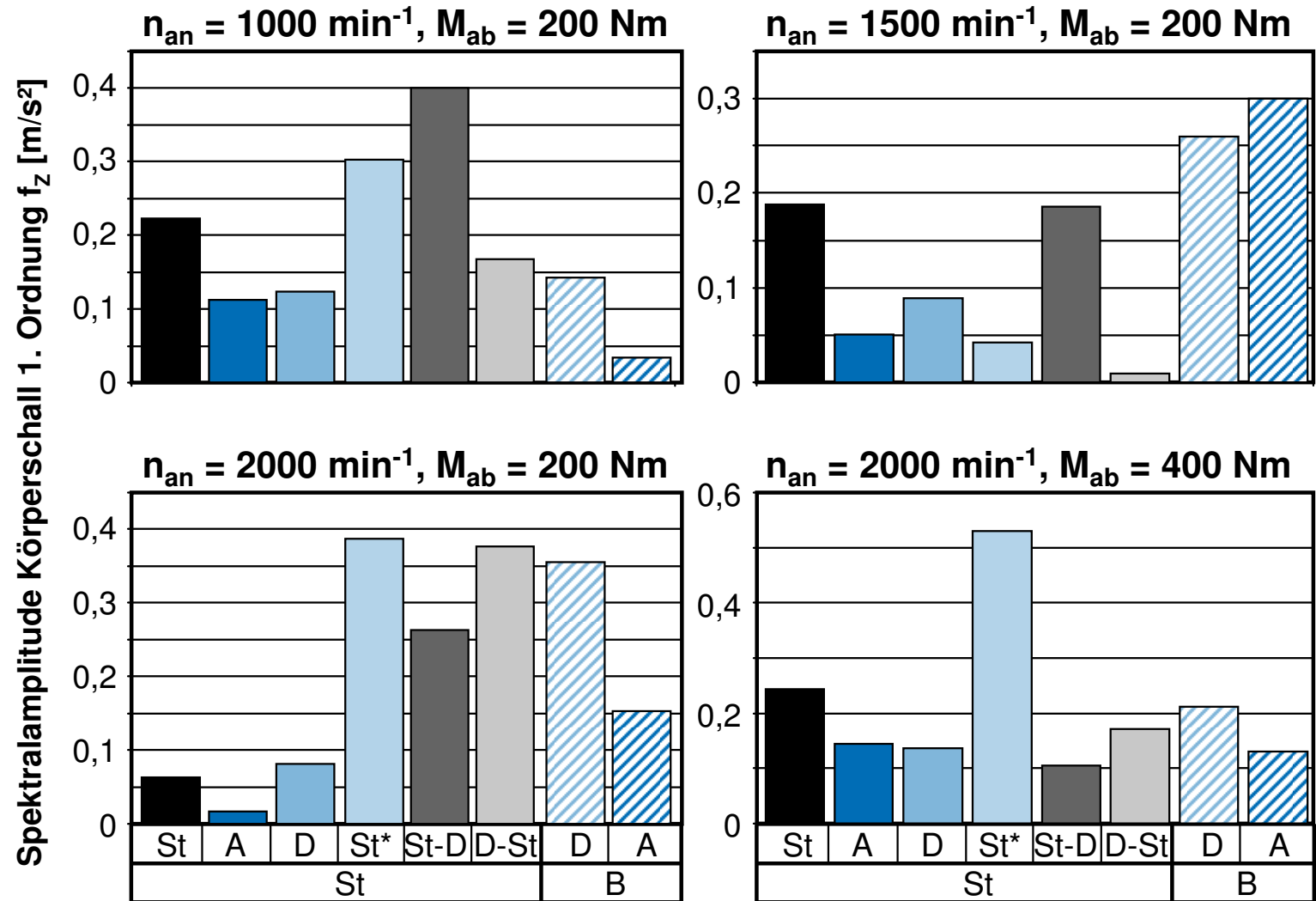
■ Schaumgeometrie

Ritzel $d/D = 65/71$
 Rad $d/D = 92/100$
 Hülse $d/D = 93/101$

■ Versuchsdaten

Körperschall Ritzel

Füllstoff Verzahnung
Füllstoff Lagerbuchse



1. Ordnung Schalldruck bzgl. Zahneingriff bei stationären Betriebspunkten in Abhängigkeit der Füllstoffe

■ Verzahnungsdaten

$m_n = 3,5 \text{ mm}$
 $z = 25/36$
 $\alpha_n = 20^\circ$
 $\beta = \pm 19,3^\circ$
 $d_a = 101/140 \text{ mm}$
 $d_i = 45 \text{ mm}$
 $b = 41,5 \text{ mm}$
 Schaum S4

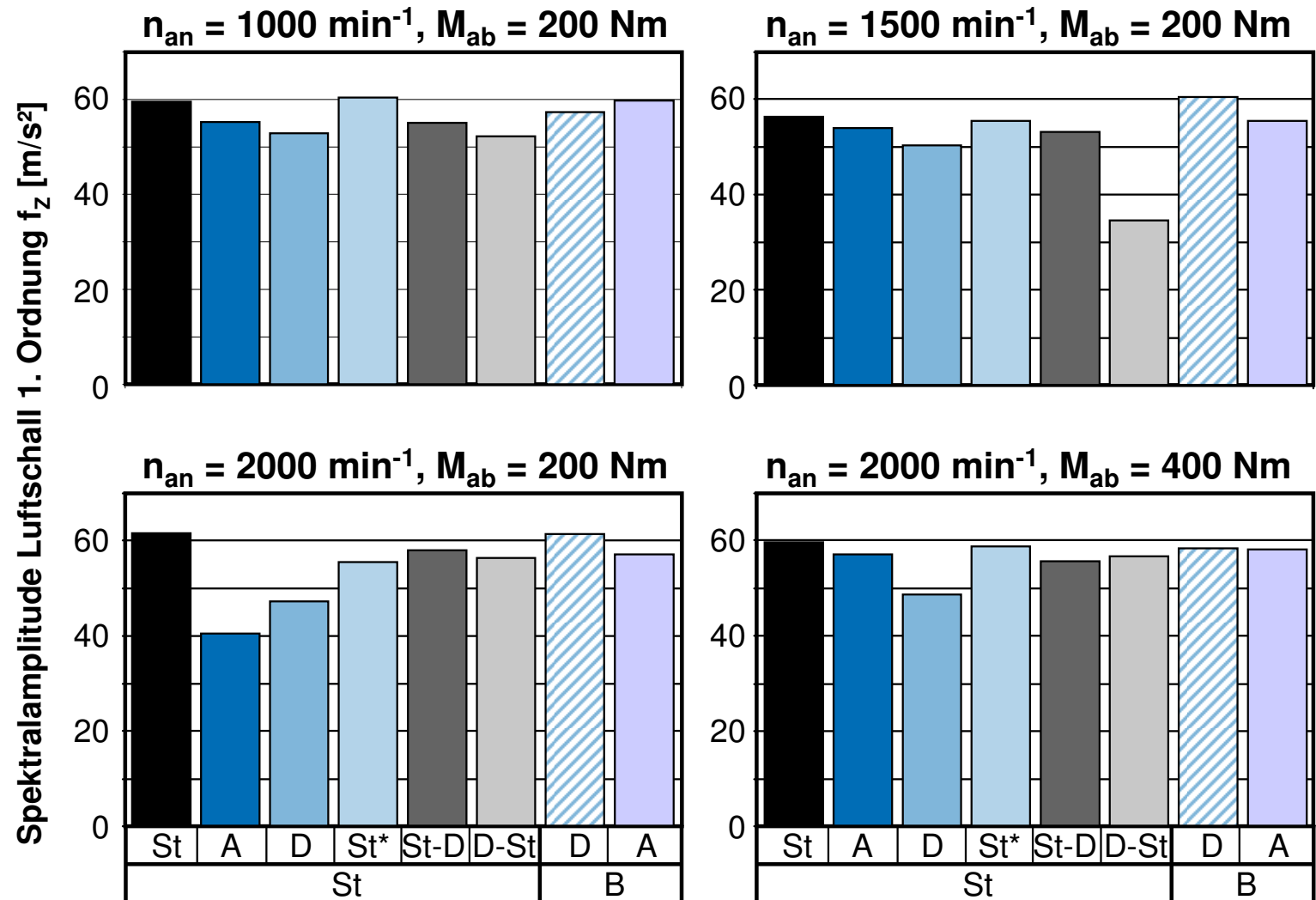
■ Schaumgeometrie

Ritzel $d/D = 65/71$
 Rad $d/D = 92/100$
 Hülse $d/D = 93/101$

■ Versuchsdaten

Luftschaall

Füllstoff Verzahnung
Füllstoff Lagerbuchse



Tragbilder im Getriebe in Abhängigkeit der Belastung

■ Verzahnungsdaten

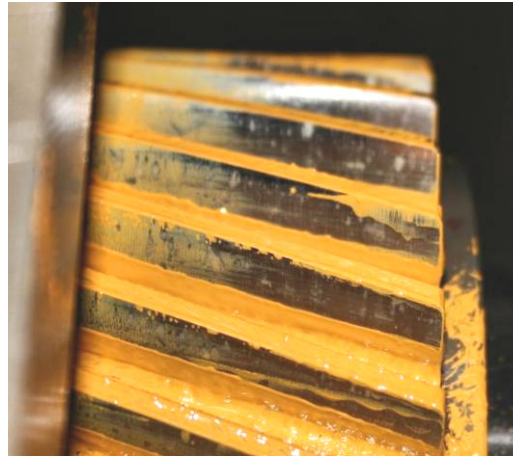
$m_n = 3,5 \text{ mm}$
 $z = 25/36$
 $\alpha_n = 20^\circ$
 $\beta = \pm 19,3^\circ$
 $d_a = 101/140 \text{ mm}$
 $d_i = 45 \text{ mm}$
 $b = 41,5 \text{ mm}$
Schaum S4

■ Schaumgeometrie

Ritzel $d/D = 65/71$
Rad $d/D = 92/100$
Füllstoff A

Hülse $d/D = 93/101$
Füllstoff B

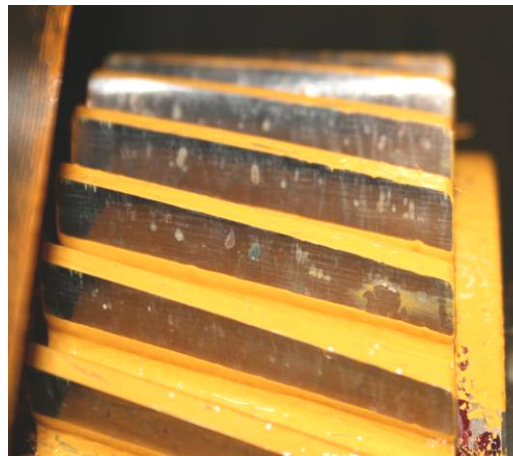
$M_{Ab} = 100 \text{ Nm}$



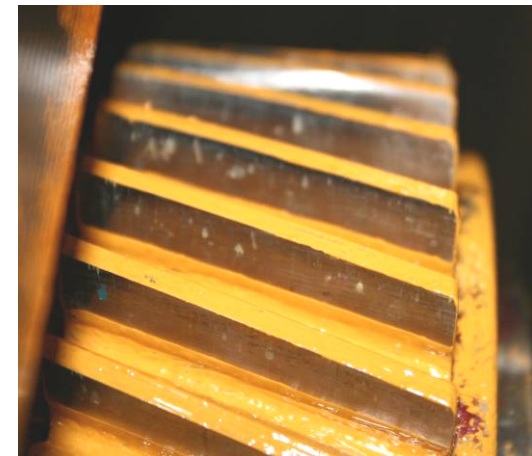
$M_{Ab} = 200 \text{ Nm}$



$M_{Ab} = 400 \text{ Nm}$



$M_{Ab} = 550 \text{ Nm}$



Verformung des Zahnkranzes bei Belastung durch punktuelle Zahnkraft im Wälzpunkt

■ Verzahnungsdaten

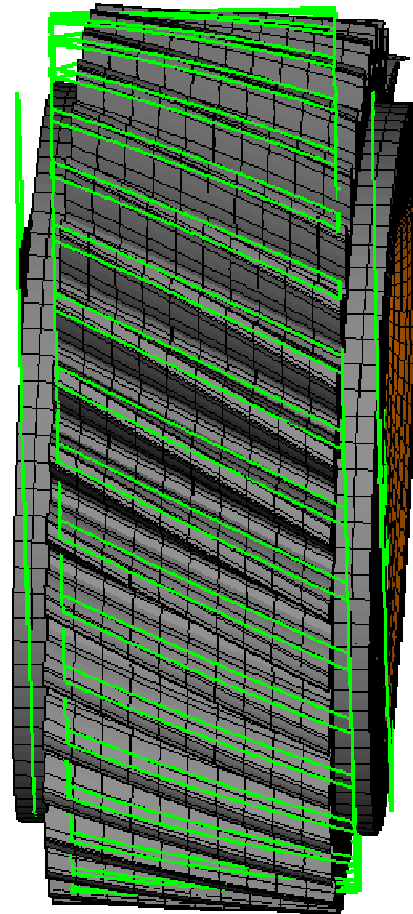
$m_n = 3,5 \text{ mm}$
 $z = 25/36$
 $\alpha_n = 20^\circ$
 $\beta = \pm 19,3^\circ$
 $d_a = 101/140 \text{ mm}$
 $d_i = 45 \text{ mm}$
 $b = 41,5 \text{ mm}$

■ Schaumgeometrie

Rad $d/D = 65/92$

■ Krafteinleitung

$d_w = 132,8 \text{ mm}$
 $M = 400 \text{ Nm}$
 $F_t = 6024 \text{ N}$
 $F_a = 2110 \text{ N}$
 $F_r = 2323 \text{ N}$



3
 Step: Antrieb
 Increment 1: Step Time = 1.000
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +2.000e+02

Verschiebung Kraftangriffspunkt [mm]:

	u1	u2	u3
Schaum S1	0.076	0.007	0.0404
Schaum S3	0.024	0.0033	0.0174

Quelle: immersive SIM

Gliederung



Einleitung und Motivation

Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen (ifs)

**Tragfähigkeitsuntersuchungen der
Werkstoffverbund-Zahnräder**

Geräuschuntersuchungen am Stirnradatz

**Akustische Untersuchungen der Komponenten
Lagerstelle und Zahnrad im Getriebe**

■ **Zusammenfassung**

Zusammenfassung



- Grundlagenuntersuchungen zeigen Potenziale der gewählten Epoxidharz-Schäume auf. Schaum S4 eignet sich für Untersuchungen im Getriebe.
- Tragfähigkeit ist abhängig von der Dicke des eingebrachten EP-Rings. Bei einer Wandstärke von 3mm beträgt das maximal übertragbare Moment 1000Nm, was 80% der Zahnflankentragfähigkeit der Stahl-Referenzverzahnung ($S=1$) beträgt.
- Geräuschuntersuchungen am Radsatz zeigen Potenziale der Verbundzahnräder auf. Senkung der Pegel um 5 dB möglich.
- Im Getriebe sind der Schaum S4 Füllstoff A für den Einsatz im Radkörper und der Füllstoff B für die Lagerstelle am besten geeignet.
- Durch die Applikation der Radkörper und der Verzahnung mit Schaum wurde das Geräuschniveau der getesteten Verbundverzahnungen erhöht.
- Mögliche Ursache: Schiefstellung der Verzahnung unter Last bedingt durch die geringe Steifigkeiten im Gesamtsystem Getriebe.