



Manuel Pürscher, BSc

*Modifizierte
Transfer-Pfad-Analyse (TPA)
für Körperschallquellen
bei Schienenfahrzeugen*

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

betreut von

Dipl.-Ing. Dr. Thomas Thurner
Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Christian Moser

Institut für Leichtbau, Graz

Graz, im November 2014

Danksagung

Seitens der Siemens AG Österreich, Graz bedanke ich mich bei Hrn. Dipl.-Ing. Dr. Gerald Schleinzner für die angenehme Zusammenarbeit.

Vom Institut für Leichtbau, Graz danke ich Hrn. Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Christian Moser für die Ermöglichung dieser Masterarbeit und zudem Hrn. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Thurner für die Betreuung.

Hoch rechne ich Hrn. Dipl.-Ing. Alexander Rabofsky seinen unermüdlichen Einsatz bei der externen Validierung meiner neu umgesetzten Berechnungen an. Der Kontakt zwischen uns wurde dankenswerterweise von Hrn. Hannes Rothdeutsch hergestellt.

Weiters will ich all jenen ein paar Zeilen widmen, die in meinem Leben für Abwechslung, Freude und Inspiration während vieler arbeitsintensiver Monate gesorgt haben. Durch diese Menschen, die mich teils durch das gesamte Studium begleitet haben, kann ich mit Stolz und Glückseligkeit auf die vergangenen Jahre zurückblicken. Besonders hervorheben will ich meine Eltern, deren Türen in der Heimat während der gesamten Zeit immer für mich offen standen.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das hochgeladene Textdokument in TUGRAZonline ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Affidavit

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present masters's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Kurzfassung

Zur vibroakustischen Bewertung von Schienenfahrzeugen sind betriebliche dynamische Schnittkräfte in mechanischen Koppelstellen zwischen Drehgestell und darüber befindlichem Wagenkasten von Interesse. Sie dienen diversen Berechnungen und fungieren als Maßstab für Körperschall, der einen wesentlichen Einfluss auf den Komfort und den sekundären Luftschall im Innenraum, sowie externe Emissionen von Lärm und Vibrationen hat. Dynamische Schnittkräfte im Betrieb wurden bislang mittels einer beim Industriepartner bestehenden experimentellen Methode indirekt festgestellt. Diese erwies sich für komplexe Fragestellungen als ungenau und initiierte diese Masterarbeit: „Modifizierte Transfer-Pfad-Analyse (TPA) für Körperschallquellen bei Schienenfahrzeugen“.

Das verfolgte Prinzip wird mit Fokus auf die Besonderheiten der Matrix-Inversions-Methoden aufgearbeitet. Die „bisherige“ TPA wird damit zur „empfohlenen“ TPA für Körperschallquellen bei Schienenfahrzeugen modifiziert und anhand verfügbarer Messdaten umgesetzt. Zu den grundlegenden Adaptierungen zählt: Indizierung weiterer mechanischer Koppelstellen zwischen Drehgestell und Wagenkasten, Berücksichtigung des strukturellen Übersprechens, Generierung und Nutzung von Phasenbeziehungen bei gemessenen Zeitdaten, optional besetzte Matrizen bzw. deren mathematische Überarbeitung, komplexwertig berechnete dynamische Schnittkräfte und Teilschalldrücke im Betrieb, vektorielle Summierung des Gesamtschalldrucks. Messtechnik und -methode werden untersucht, um Fehlereinflüsse und vereinfachte Annahmen zu bewerten und zuverlässige Frequenzbereiche abzugrenzen. Die im Rahmen dieser Masterarbeit in Matlab[®] programmierten Routinen ermöglichen einen einfacheren und vielfach schnelleren Datenanalyseteil. Durch die erwähnten Adaptierungen zur „empfohlenen“ TPA sind die dynamischen Schnittkräfte im Betrieb und alle weiteren Resultate genauer anhand dieser neuen Routinen berechenbar. Die entwickelte Methode ist damit zur Evaluierung mittels gemessenem Schalldruck geeignet, wobei ihre Vorgehensweise durch eine externe Validierung mit einer kommerziellen Software für TPA bestätigt wird.

Abstract

Operational dynamic cut-forces in mechanical interfaces between bogie and above located carriage-body are of interest for the vibro-acoustical assessment of rail-vehicles. They can be used for various calculations and generally serve as a criterion for structure-borne-sound which has an essential influence on comfort and aerial-sound within a train as well as on its external emissions of noise and vibrations. The operational dynamic cut forces have been ascertained so far by the industrial-partner via an existing experimental method. For complex issues this method has turned out to be unprecise and has been the decisive factor for starting this master's thesis: „Modified Transfer-Path-Analysis (TPA) For Structure-Borne-Sound In Rail-Vehicles“.

The basic principle is discussed with regard to specific features of matrix-inversion-methods. Based on that, all modifications from the „present“ TPA to the „recommended“ TPA for structure-borne-sound in rail-vehicles have been conducted and its numerical processing has been applied on available measurement-data. The fundamental adaptations are: Indication of additional mechanical interfaces between bogie and carriage-body, consideration of crosstalk in the structure, generation and use of phase-relations for measured time-data, optional occupied matrices and their mathematical overhaul respectively, complex-valued calculation of operational dynamic cut-forces as well as partial-sound-pressures and as a result the vectorial summation of total sound-pressures. Furthermore, the used measurement-technology and -methodology is examined to assess mistake-influences and possible simplifications as well as to separate a reliable frequency-span. The new programmed routines in this master's thesis allow an easier post-processing in Matlab[®] that works many times faster. Due to the mentioned improvements, operational dynamic cut-forces and all further results are computable more precisely. The methodology is therefore evaluable by measured sound-pressures whereby a commercial software for TPA has successfully confirmed the optimized analysis in an external validation.

Abkürzungsverzeichnis

a	Beschleunigung
Amp-Phase	Phase des Frequenzspektrums
Amp-RMS	Betrag (Root-Mean-Square) des Frequenzspektrums
a-a-TMF	Beschleunigung-Beschleunigung-Transmissibilitäts-Funktion
A-LDS	Auto-Leistungs-Dichte-Spektrum
a-p-TMF	Beschleunigung-Schalldruck-Transmissibilitäts-Funktion
BR	Baureihe
DD	Drehdämpfer
DG	Drehgestell
DZK	Drehzapfenkonsole
EW	Endwagen
F	Dynamische Schnittkraft
FFT	Fast-Fourier-Transformation
FRF	Frequency Response Function
FRF-Amp	Betrag der Frequency Response Function
FRF-Phase	Phase der Frequency Response Function
F-a-TF	Kraft-Beschleunigung-Transfer-Funktion
F-a-TP	Kraft-Beschleunigung-Transfer-Pfad
F-p-TF	Kraft-Schalldruck-Transfer-Funktion
F-p-TP	Kraft-Schalldruck-Transfer-Pfad
KS	Körperschall
K-LDS	Kreuz-Leistungs-Dichte-Spektrum
LDG	Laufdrehgestell
LS	Luftschall
LT	Längsträger
MW	Mittelwagen
OTPA	Operative-Transfer-Pfad-Analyse
p	Schalldruck
PF	Punkt-Funktion
Q̇-a-TF	Volumenbeschleunigung-Beschleunigung-Transfer-Funktion
SAGÖ	Siemens AG Österreich
Sfw	Schienenfahrweg
Sfz	Schienenfahrzeug
SVD	Singular-Value-Decomposition
SW	Stromrichterwagen
TDG	Triebdrehgestell
TF	Transfer-Funktion
TMF	Transmissibilitäts-Funktion
TMP	Transmissibilitäts-Pfad
TP	Transfer-Pfad
TPA	Transfer-Pfad-Analyse
TW	Trafowagen
WK	Wagenkasten
WS	Wankstütze
XT	Übersprechen

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Aufgabenstellung.....	1
1.2. Ziel	3
2. Allgemeines zur Transfer-Pfad-Analyse	4
2.1. Grundlagen und Prinzip	4
2.2. Stand der Technik zur Analyse von Körperschallquellen.....	5
2.3. Relevante Hintergründe.....	8
2.3.1. Transfer-Pfade und -Funktionen	8
2.3.2. Strukturelles Übersprechen.....	10
2.3.3. Inverse Probleme und Konditionierung	11
2.3.4. Komposition von Schallfeldgrößen.....	13
3. Körperschall-Luftschall-Transfer-Pfad-Analyse	14
3.1. Platzierung der Sensorik und Strukturanregung.....	14
3.1.1. Methoden zur künstlichen Anregung	16
3.2. Dynamische Schnittkräfte im Betrieb	18
3.2.1. Steifigkeits-Methode oder Matrix-Inversions-Methode.....	19
3.3. Teil- und Gesamtschalldrücke im Betrieb.....	22
3.4. Limitierungen und Lösungsvorschläge.....	23
3.4.1. Modell-, Daten- und/oder Numerikfehler	24
3.4.2. Empfehlungen für die messtechnischen Schritte.....	26
3.4.3. Verringerung der Konditionszahl.....	29
3.4.4. Operative-Körperschall-Luftschall-Transfer-Pfad-Analyse.....	34
4. Bestehendes Verfahren: Einsatz an einem Schienenfahrzeug	39
4.1. Versuchsträger	39
4.1.1. Eckdaten und Aufbau.....	39
4.1.2. Unterflur- und Dachkomponenten, Drehgestelle und Traktionsaggregate	40
4.1.3. Schalltechnische Eigenschaften und vibroakustische Einträge	42
4.2. Ablauf und Resultate	45
4.2.1. Schema der Messdatengenerierung und -verarbeitung.....	45
4.2.2. Energetische Summe der dynamischen Schnittkräfte	47
4.2.3. Dynamische Schnittkraft am Längsträger.....	47
4.2.4. Energetisch summierte Teilschalldrücke	49
4.2.5. Grundlegende Kritikpunkte.....	50
5. Entwicklung des modifizierten Verfahrens für Schienenfahrzeuge	51
5.1. Adaptierung der Messdatengenerierung.....	51
5.1.1. Messtechnik, -ablauf, -daten und -rauschen.....	51
5.1.2. System- und Modellbeschreibung	59
5.2. Adaptierung der Messdatenverarbeitung	66
5.2.1. Inversion: diagonal-besetzte Matrix.....	67
5.2.2. Umlegung: Frequenzraum	69
5.2.3. Berechnung: dynamische Schnittkräfte	72
5.2.4. Reduktion: 1/3-Terzmittenfrequenzen	75
5.2.5. Berechnung: Teilschalldrücke	75

5.2.6. Spiegelung: dynamische Schnittkräfte und Teilschalldrücke	77
5.2.7. Evaluierung: summierter Gesamtschalldruck	77
5.2.8. Vergleich: summierte dynamische Schnittkräfte	80
5.3. Programmierte Funktionen und Routinen	81
5.4. Anpassung der bestehenden Grenzkurve zur vibroakustischen Bewertung	85
6. Ergebnisse	87
6.1. Vergleich des bestehenden und neu entwickelten Verfahrens	87
6.2. Validierung der neuen Methodik	89
6.2.1. Einsatz eines kommerziellen Systems	89
6.2.2. Resultate im Vergleich	90
7. Zusammenfassung	93

1. Einleitung

Der europäische Schienenverkehr entwickelt sich mit der Bewältigung eines größeren Anteils der anwachsenden Personen- und Güterströme in eine positive und nachhaltige Richtung. Internationale Maßnahmen auf diversen Ebenen wie z.B. Standardisierung, Liberalisierung, Streckenausbau, Hochgeschwindigkeitsverkehr, etc. tragen dazu bei, dass die im Vergleich zu Straßen- und Flugverkehr umweltschonende und historisch wichtige Alternative wieder eine steigende Akzeptanz in der Bevölkerung und bei der Industrie erfährt. Die damit verbundenen Zunahmen bei Schienenverkehrslärm und -erschütterungen sind aber problematisch. Für betroffene Menschen kann das im schlimmsten Fall zu psychischen und/oder physischen Krankheiten führen. Wie das Problem unter Einhaltung sämtlicher Rahmenbedingungen effektiv bewältigt werden kann, ist ein Schwerpunkt in Forschung und Entwicklung beim Schienenverkehr. Die Hersteller der Schienenfahrzeuge (Sfz) können mit konstruktiven und anderen technischen Maßnahmen einen Teil dazu beitragen, um ursächlich entgegenzuwirken. Das hebt zudem den vibroakustischen Komfort für die Fahrgäste, der sehr zum Qualitätsempfinden beiträgt und ein wichtiges Kriterium in den Lastenheften ist. Einen Teil der Ursache-Wirkungs-Kette bilden dynamische Schnittkräfte in den mechanischen Schnittstellen der Teilsysteme. Sind diese bekannt bzw. strukturelle Kopplungen mit kritischem Einfluss identifiziert, können Handlungsfelder zur Abstimmung der Komponenten festgelegt werden, z.B. bei den Drehgestellen (DG). In der Praxis ist die Messung dieser Schnittgrößen kaum direkt möglich, weshalb eine experimentell basierte Transfer-Pfad-Analyse (TPA) eingesetzt werden kann. Sie quantifiziert in Form von Transfer-Pfaden (TP) für hier zwei verschiedene Schallarten die kausalen linearen Beziehungen zwischen Quellen bzw. Sendern und Senken bzw. Empfängern. Damit sind jene zwischen Körperschall (KS) und Luftschall (LS) gemeint. Messtechnische Ergebnisse und berechnete Resultate können für akustische und/oder vibroakustische Belange eingesetzt werden.

1.1. Motivation und Aufgabenstellung

Die Siemens AG Österreich (SAGÖ) bzw. eine ihrer Divisionen mit Sitz in Graz ist der Industriepartner bei dieser Masterarbeit. Es werden dort Drehgestelle entwickelt und teils produziert. Von der ansässigen Akustikgruppe wurde mehrmals eine hier als „bisherige“ Transfer-Pfad-Analyse bezeichnete Methode für eingangs genannte Untersuchungen verfolgt. Die Messdatenverarbeitung erfolgte dazu über einige bei der Akustikgruppe intern vorhandene Routinen, die in Matlab[®] (The MathWorks) umgesetzt sind. Die Ergebnisse sollen für den eingeleiteten Körperschall ausgehend von den Rad/Schiene-Kontakten und Antriebsaggregaten repräsentativ sein. Dessen Auswirkungen sind im Wagenkasten (WK) vor allem im niedrigen Frequenzbereich als Sekundärschall hörbar. Quellen für Luftschall, z.B. Aerodynamik- oder Hilfsaggregatgeräusche bleiben in der Analyse unberücksichtigt. Im Speziellen sind die dynamischen Schnittkräfte im Betrieb des Schienenfahrzeugs von Interesse. Es betrifft jene in den mechanischen Schnittstellen zwischen einem Drehgestell und dem darüber befindlichen Wagenkasten, die dort in allen Raumrichtungen wirken können. Sie dienen als vibroakustischer Maßstab und in Simulationen bzw. zur Auslegung

von Komponenten evtl. als Eingangsdaten. Ausgehend von ihrem in die passive Struktur eingebrachten Körperschall, wird vibroakustische Energie auf den zur Verfügung stehenden Transfer-Pfaden bis in den Innenraum übertragen, wo in Folge ein hörbarer Luftschall bzw. Schalldruck entsteht. Abb. 01-01 zeigt diese Zusammenhänge schematisch auf.

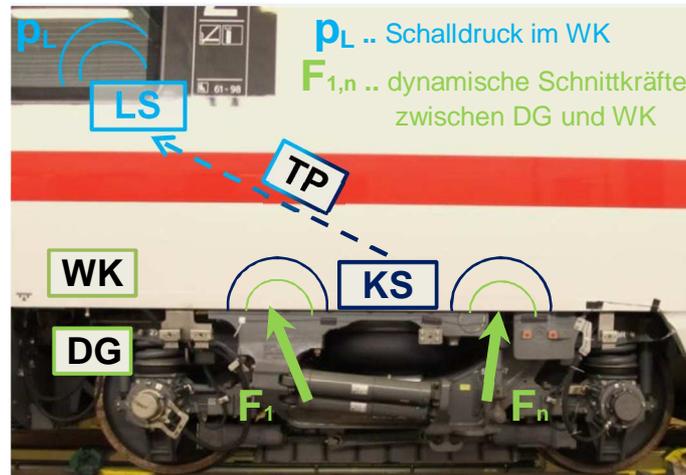


Abb. 01-01: Transfer-Pfad-Analyse für Körperschallquellen bei Schienenfahrzeugen

Die Methode erfordert zwei getrennte messtechnische Schritte und deren Kombination in der Messdatenverarbeitung. Bei künstlicher Anregung mit speziellen Werkzeugen an den berücksichtigten mechanischen Schnittstellen werden linear angenommene Beziehungen im Frequenzraum zwischen gemessenen Beschleunigungen bzw. Schalldrücken und den verursachenden gemessenen dynamischen Schnittkräften eruiert. Das bedarf den Stillstand des Schienenfahrzeugs. Sie werden danach mit den im zweiten messtechnischen Schritt erfassten Beschleunigungen bei realem Betrieb kombiniert, sodass im Inversen Problem dynamische Schnittkräfte und in weiterer Folge Teilschalldrücke berechnet werden können. Aus diesen werden jeweils getrennt die energetischen Summen gebildet. Der damit berechnete Gesamtschalldruck steht im Vergleich mit einem tatsächlich im Betrieb an einem übereinstimmenden Ort gemessenen Schalldruck, was zur Evaluierung der Methode dient. Nur rudimentär in dieser Vorgehensweise umgesetzt, wird für komplexe Fragestellungen die „bisherige“ Transfer-Pfad-Analyse von den Verantwortlichen mittlerweile als undetailliert und teils unplausibel eingestuft. Folgende Kritikpunkte waren dafür ausschlaggebend.

- Berücksichtigung zu weniger mechanischer Koppelstellen
- Ignoriertes strukturelles Übersprechen
- Vereinfachte mathematische Lösung
- Berechnungen durchwegs ohne Phasenbeziehungen
- Resultate in geringer Auflösung

Zudem ist die zugehörige Messdatenverarbeitung in Matlab[®] aufwändig und nur für einfache Modelle geeignet, was mit der etwaigen Behebung dieser Kritikpunkte zum zusätzlichen Problem wird und eine grundlegende Optimierung notwendig macht.

1.2. Ziel

Ziel der Masterarbeit ist es, die sogenannte „empfohlene“ Transfer-Pfad-Analyse zu entwickeln, damit die dynamischen Schnittkräfte, die in allen relevanten mechanischen Schnittstellen zwischen Drehgestell und Wagenkasten von Schienenfahrzeugen im Betrieb wirken, durch ein plausibleres Modell und damit höherer Genauigkeit im Frequenzraum indirekt festzustellen. Darauf aufbauende Ergebnisse werden damit ebenso exakter bestimmbar. Die „bisherige“ Transfer-Pfad-Analyse steht für den vorliegenden Stand der Technik beim Industriepartner. Ihre bereits bekannten bzw. noch festgestellten Probleme sollen in der „empfohlenen“ Transfer-Pfad-Analyse behoben sein. Es ist dazu wichtig, eine theoretische Basis anhand einer Literaturrecherche zu schaffen und aktuelle Empfehlungen und Alternativen in Erfahrung zu bringen. Auch zukünftig sollen vorhandene Sensorik, Messtechnik und Analysesoftware zum Einsatz kommen, sowie die Datenanalyse und Auswertung in Matlab® erfolgen. Dazu sind neue Funktionen und Routinen erforderlich, die den gestiegenen Anforderungen gerecht werden. Es wird nach wie vor kein kommerzielles System für Transfer-Pfad-Analyse eingesetzt, allerdings ist eine Validierung mit einem solchen wünschenswert. Messdaten, die im Jahr 2012 an einem Inter City Express - Velaro D - Baureihe (BR) 407 erfasst wurden, dienen zum quantitativen Vergleich zwischen den unterschiedlichen Ansätzen. Die Umsetzung der „empfohlenen“ Transfer-Pfad-Analyse anhand dieser in begrenztem Ausmaß vorhandenen Messdaten wird hier als „optimierte“ Transfer-Pfad-Analyse deklariert. Es ist weiters von Interesse, in welchen Frequenzbereich qualitativ höherwertige Resultate im Allgemeinen erzielt werden können.

Damit ergeben sich zusammenfassend die Schwerpunkte der Masterarbeit im Überblick:

- Literaturrecherche und Theorie
- Untersuchung der bestehenden Methode
- Vorschläge zur Optimierung der Modelle und messtechnischen Schritte
- Abschätzung der verwertbaren Frequenzbereiche
- Ausarbeitung einer angepassten Messdatenverarbeitung
- Anwendung auf Messdaten und Vergleich zu vorhandenen Ergebnissen
- Programmieren geeigneter Routinen für Matlab®
- Validierung durch kommerzielle Software wünschenswert

Eine zusätzliche Aufgabe betrifft eine interne Spezifikationen der Siemens AG Österreich, Graz. In dieser wird auf eine frequenzabhängige Grenzkurve für die energetische Summe der dynamischen Schnittkräfte verwiesen. Unter regulärem Betrieb des Schienenfahrzeugs sollte sie nicht überschritten werden, da das impliziert, dass ein Schalldruck im Wagenkasten nicht überschritten wird. Die Grenzkurve wurde vor einigen Jahren mit einer simplen Messkampagne festgelegt, die hier „vereinfachte“ Transfer-Pfad-Analyse genannt wird. Es stellt sich die Frage, ob die Grenzkurve auch für die neue Methode geeignet ist.

2. Allgemeines zur Transfer-Pfad-Analyse

2.1. Grundlagen und Prinzip

Laut [01] und [02] wurde die TPA Anfang der 1980er Jahre erstmals erwähnt und als testbasierte, systematisch anzuwendende Prozedur deklariert, die an Maschinen und/oder Strukturen angewendet werden kann, um ein physikalisch-mathematisches Modell ihrer akustischen und/oder vibroakustischen Vorgänge bzw. ein lineares Übertragungsverhalten zu formulieren, um Aussagen über kausale Beziehungen im untersuchten System zu treffen.

Bei deren schalltechnischer Optimierung ist häufig zu klären, ob die betriebenen Verursacher zu stark sind oder Einleitung, Übertragung und Abstrahlung ihrer akustischen und/oder vibroakustischen Energien zu einfach möglich ist. Warum das interessant ist, kann man sich in der beispielhaften Situation vorstellen, wenn ein Nachbar im Wohnhaus ein Loch in die Wand bohrt. Ein Teil der eingebrachten mechanischen Energie wird als KS im Gebäude übertragen und vor allem von den einen selbst umgebenden Wänden als störender Sekundärschall abgestrahlt. Ähnliche Vorgänge treten auch bei einem fahrenden Sfz auf, sodass der eingebrachte KS letztendlich im Innenraum hör- und fühlbar wird. Dazu kommt außerdem noch der hier nachrangige direkte LS. Auch außerhalb des Sfz sind Auswirkungen des KS wahrnehmbar, was für die Umsetzung der Methode allerdings nicht relevant ist. Im akustischen und/oder vibroakustischen System können mit aktiven Quellen bzw. Sendern, passiven Senken bzw. Empfängern und dazwischen den TP bzw. Übertragungs-Pfaden somit drei wesentliche Komponenten identifiziert werden, wie Abb. 02-01 abstrakt zeigt.

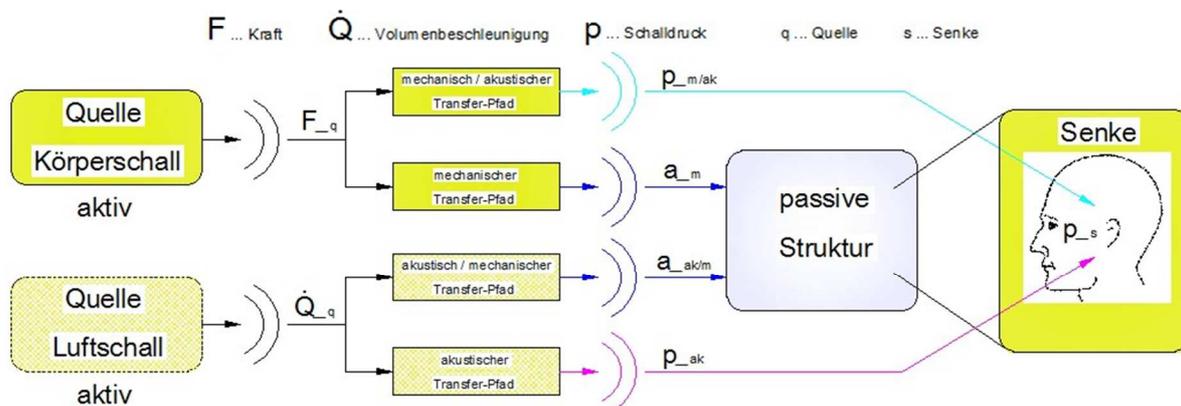


Abb. 02-01: Modellierte Quellen, TP und Senke eines abstrakten Systems

Eine Unterteilung der TP erfolgt hier je nach anregenden Quellen und genutzten Medien bei der Ausbreitung der Energie zur Senke. Es gibt damit rein mechanische KS-TP, rein akustische LS-TP, sowie mechanisch/akustische KS-LS-TP und akustisch/mechanische LS-KS-TP. In der Vorstellung geschieht die Anregung eingangsseitig durch Schnittgrößen, das sind dynamische Schnittkräfte bzw. Schall-Volumenbeschleunigungen. An Oberflächen von Festkörpern sind ausgangsseitig entweder Schwingbeschleunigungen bzw. -schnellen oder -

wege bzw. im festgelegten Luftraum ein Schalldruck von Interesse. Quellen für KS haben im niedrigen Frequenzbereich bis wenige kHz Relevanz, darüber zunehmend die Quellen für LS. Erstere sind hier relevant. Die mechanischen Schnittstellen, an denen die Anregung des Systems erfolgt, werden Freiheitsgrade (Degree of Freedom = DoF) bezeichnet. Da die TPA hier durch die betreffenden ein- und ausgangsseitigen Mechanismen benannt wird, also nach Ursache und Wirkung, ist mit den behandelten Varianten für Sfz in dieser Masterarbeit je eine KS-LS-TPA gemeint. Durch kommerzielle Systeme bzw. Forschung und Entwicklung gibt es auch andere mehr oder weniger übliche Namensgebungen, z.B. Experimentelle-, Klassische-, Konventionelle-, Kraftbasierte- oder Traditionelle-TPA, sowie Sender-Transfer-Empfänger-Analyse (Source-Transfer-Receiver-Analysis), Geräusch-Pfad-Analyse (Noise-Path-Analysis), Quell-Pfad-Zusammensetzung-Methode (Source-Path-Contribution-Method).

2.2. Stand der Technik zur Analyse von Körperschallquellen

Die KS-LS-TPA bildet als Zweischríttmethode die Zusammensetzungsgruppe mit kausaler Ursache-Wirkungs-Modellierung. Grundsätzlich sind dynamische Schnittkräfte im Betrieb des Versuchsträgers festzustellen, anhand derer in Verbindung mit eruierten TP bei künstlicher Anregung in dessen Ruhe, betriebliche Teilschalldrücke der Quellen für KS zu berechnen sind. Zur Evaluierung ist ein daraus zusammengesetzter Gesamtschalldruck dem am identen Ort gemessenen Schalldruck gegenüberzustellen. Die Operative-TPA (OTPA) arbeitet als Einzschrittmethode lediglich mit Messungen im Betrieb. Sie bildet damit die Zerlegungsgruppe mit Wirkungs-Wirkungs-Modellierung ohne kausale Beziehungen. Bei einer KS-LS-OTPA wird der lediglich im Betrieb gemessene Schalldruck anhand zugleich bei den DoF erfassten Beschleunigungen möglichst verursachergerecht verteilt. Abb. 02-02 zeigt beide Gruppen schematisch, wobei diese auch bei Quellen für LS nach ähnlichem Prinzip arbeiten.

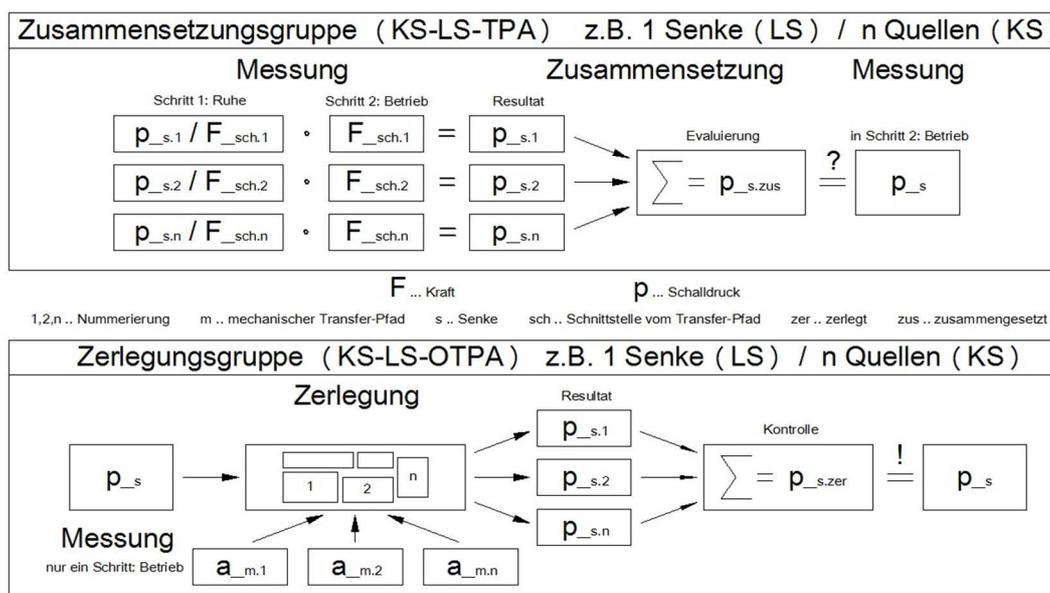


Abb. 02-02: Zusammensetzungs- und Zerlegungsgruppe

Abb. 02-03 zeigt ohne Chronologie eine Auswahl der während der letzten Jahre verfügbaren kommerziellen Systeme beider Gruppen mit teils unterschiedlichen Ansätzen und Methoden.

Produkt	Anbieter
CADA-X TPA; Test./Virtual.Lab TPA; OPAX; [02], [03], [04]	LMS International
Source Path Contribution; [05]	Brüel & Kjær (B&K)
DATS Source Path Analysis; [06]	Prosig
PROGNO[SE]; [07]	HEAD acoustics
PAK; [08]	Müller-BBM VibroAkustik Systeme
ATPA; [09]	Ingeniería para el Control del Ruido (ICR)
V-PATH; [10]	SCS Euroacoustic
OROS TPA; [11]	OROS
I-DEAS Noise Path Analysis; [12]	ehem. MTS Systems Corporation, heute Siemens PLM Software

Abb. 02-03: Auswahl kommerzieller Systeme für TPA und/oder OTPA

Kommerzielle Systeme decken teils beide Gruppen zugleich ab. Die Produkte reichen von Software bis hin zu kompletten Messsystemen inklusive Hardware. Daneben sind für bestimmte Problemstellungen auch maßgeschneiderte Verfahren im Einsatz, entwickelt z.B. auf universitärer Ebene oder in Betrieben intern. So auch die zu überarbeitende „bisherige“ TPA für Körperschallquellen bei Sfz. Die meisten kommerziellen Systeme arbeiten primär im Frequenzraum. Damit sollen bevorzugt stationäre und quasistationäre Vorgänge analysiert werden. Es sind auch separate Analysen bei kontinuierlich veränderten Betriebsmodi denkbar, z.B. in Abhängigkeit von der Drehzahl bei hochlaufenden Motoren. Neuere Produkte funktionieren zusätzlich im Zeitbereich, was z.B. für instationäre Prozesse und zur Auralisierung der berechneten Teil- und Gesamtschalldrücke interessant ist. Weiters wird teilweise die Möglichkeit geboten, die messtechnisch bestimmten TP zu bearbeiten, womit unmittelbar die zu erwartenden ausgangsseitigen Änderungen berechnet und angehört werden können. Es ist damit ein Sound Design durchführbar.

Vor einer KS-LS-TPA sind Ziele zu formulieren. Meist beziehen sie sich auf vibroakustische Probleme am Versuchsträger, z.B. in einem niedrigen Frequenzbereich. Sein System muss analysiert und verstanden werden, damit nach umgesetzter Messdatengenerierung und -verarbeitung die Resultate richtig interpretiert und Erkenntnisse abgeleitet werden können. Es erfordert zwei separate Messschritte. Der eine zur Feststellung der KS-LS-TP zwischen den Quellen und einer oder mehrerer Senken. Das erfolgt in Ruhe bei künstlicher Anregung. Der andere zur Bestimmung der einzelnen dynamischen Schnittkräfte in den ausgewählten mechanischen Schnittstellen bzw. DoF. Das erfolgt im Betrieb und nicht direkt durch Kraftaufnehmer, da das häufig impraktikabel oder unmöglich ist. Hier wird speziell der indirekte Weg mittels Matrix-Inversions-Methode behandelt.

Beginnend kann der Versuchsträger wie in [13] in aktive und passive Subsysteme abstrahiert werden. Abb. 02-04 zeigt das bzgl. der KS-LS-TPA nach Matrix-Inversions-Methode für ein beliebiges System vereinfacht auf.

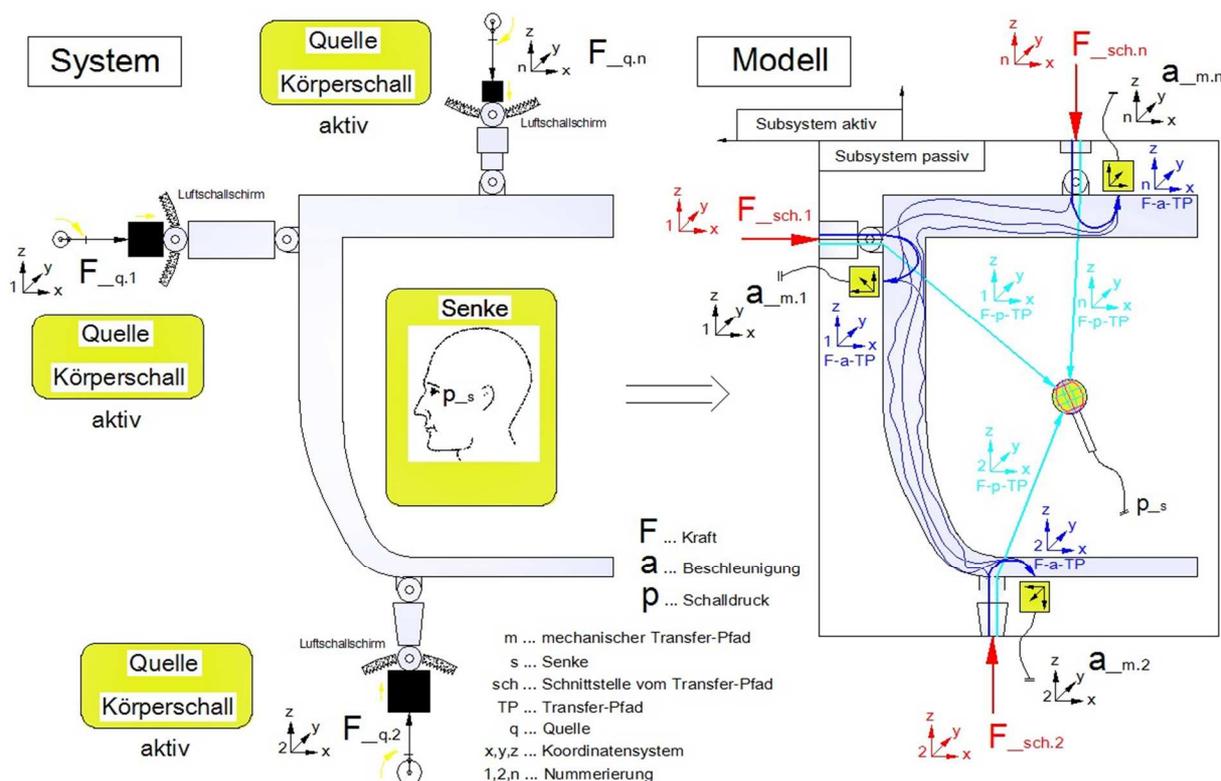


Abb. 02-04: Abstrahierte Subsysteme in einer KS-LS-TPA nach Matrix-Inversions-Methode

Der aktive Teil enthält alle Quellen, der passive Teil alle Senken und außerdem die für die kausalen Beziehungen wichtigen TP. Dynamische Schnittkräfte definieren die strukturellen Lasten zwischen den Subsystemen. Die gedachte Trennung erfolgt bei mechanischen Koppelungen. Das können z.B. Lagerelemente, Dämpfer, Koppelstützen, etc. sein. Diese haben allgemein je drei translatorische DoF, von denen aber nicht alle berücksichtigt sein müssen. Ein KS-LS-TP verbindet eine Achsenrichtung x, y oder z einer Quelle für KS bzw. eine ihrer mechanischen Schnittstellen zum passiven Subsystem, mit einer durch ein Mikrophon festgelegten Senke für LS. Es handelt sich um mechanisch/akustische Kraft-Schalldruck-TP (F-p-TP). Bei der Matrix-Inversions-Methode gibt es ausgehend von selbigen mechanischen Schnittstellen auch Senken für KS, an denen Beschleunigungssensoren appliziert sind, womit rein mechanische Kraft-Beschleunigungs-TP (F-a-TP) entstehen. Weitere Details zur KS-LS-TPA folgen in einem separaten Kapitel.

Historisch bedingt gibt es übrigens auch Alternativen für selbige Problemstellungen. Sie kommen teils noch mit geringem Aufwand bei der Messdatengenerierung und -verarbeitung aus. Es wurde früher dafür ein größerer Aufwand für das Fertigen und Analysieren von Prototypen und Vorserienkomponenten betrieben.

Wie in [01] und [14] beschrieben ist, war die An- und/oder Abkoppelung anregenden Quellen für KS zur Unterbrechung einzelner TP eine übliche Vorgehensweise in den 1980er Jahren. Alternativ wurden alle restlichen Quellen extern gelagert. Abb. 02-05 zeigt beide Varianten.

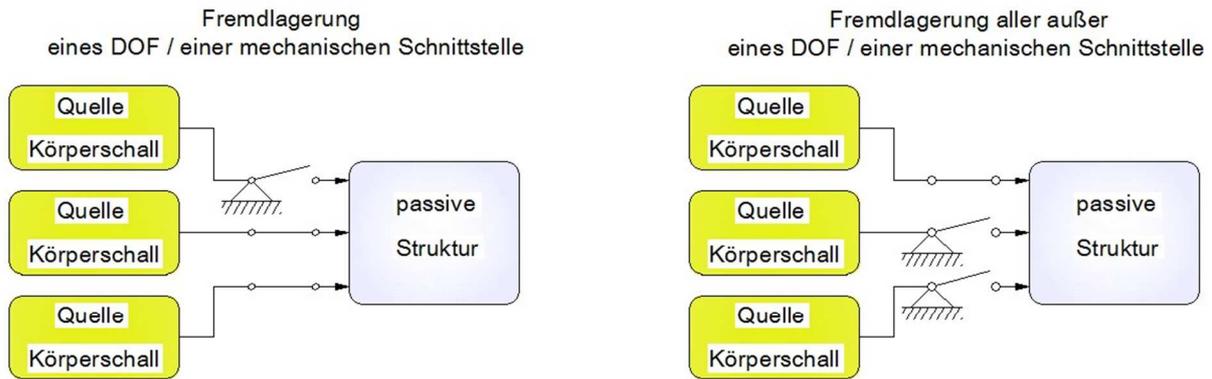


Abb. 02-05: Varianten der Fremdlagerung bei der Abkoppelungs-Methode

Nach [01] und [14] wird jeweils die Veränderung des Schalldrucks an der Senke für LS eruiert, woraus die Relevanz des DoF abgeleitet werden kann. Nachteilig sind die evtl. aufwändigen technischen Änderungen am Versuchsträger, wodurch sein vibroakustisches Verhalten und die Ergebnisse beeinflusst werden. Geeignet ist die Abkoppelungs-, Fremdlagerungs- bzw. Pfad-Entfernungs-Methode eher für Prüfstände. Alternativ können Veränderungen des Schalldrucks auch über die Variation der dynamischen Steifigkeiten der ausgeführten Lagerungen vom Versuchsträger eruiert werden. Vorteilhaft sind der ebenfalls überschaubare messtechnische Aufwand und die geringen technischen Eingriffe am Versuchsträger. Man ist daher nicht auf Prüfstandsumgebungen beschränkt.

2.3. Relevante Hintergründe

2.3.1. Transfer-Pfade und -Funktionen

Ein TP steht für den linearen Zusammenhang zwischen einer Systemantwort und der verursachenden Strukturanregung. Formell sind Transfer-Funktionen (TF) im Frequenzraum von Interesse und das zu erzielende Ergebnis im betreffenden messtechnischen Schritt bei künstlicher Anregung. Sie werden auch Übertragungs- oder Frequenzgangs-Funktionen (Frequency-Response-Function = FRF) bezeichnet. Wegen der Quellen für KS wird hier als Schnittgröße eine dynamische Schnittkraft in den jeweiligen DoF eingesetzt. Aufgrund der Systemantworten bei der relevanten Matrix-Inversions-Methode sind mechanische F-a-TF und mechanisch/akustische F-p-TF feststellbar. Wenn Systemantwort und Strukturanregung an identer Stelle auf der Struktur gemessen werden bzw. erfolgen, was praktisch nicht umsetzbar, aber in der Methode so vorgesehen ist, wird das in dieser Masterarbeit als Punkt-Funktion (PF) bezeichnet. Es ist dann immer eine F-a-PF gemeint. Diese kann alternativ auch Punkt-Akzeleranz bzw. -Inertanz genannt werden.

Die Berechnung bzw. Abschätzung der komplexwertigen FRF erfolgt nach etablierten Verfahren ausgehend von gemessenen Zeitdaten bei der künstlichen Anregung. Sie werden mit einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzraum umgelegt. Das kann unmittelbar durch eine Analysesoftware geschehen. Eine FRF hat bei jeder Frequenz eine

Amplitude (FRF-Amp) bzw. einen Betrag und eine Phase (FRF-Phase) bzw. einen Winkel. Das kann man so interpretieren, dass z.B. bei sinusförmiger Strukturanregung die Systemantwort auch derart mit selbiger Frequenz reagiert, allerdings die beiden Amplituden um den Faktor der FRF-Amp unterschiedlich hoch und um die FRF-Phase zueinander phasenverschoben sind. Eine reale Strukturanregung enthält zugleich viele sinusförmige Anteile unterschiedlicher Frequenzen.

$$H^{y/x}(j\omega) = \frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} \tag{2.a}$$

$H^{y/x}(j\omega)$ *FRF von Strukturanregung zu Systemantwort im komplexwertigen Frequenzraum*
 $x(j\omega)$ *Strukturanregung im komplexwertigen Frequenzraum*
 $y(j\omega)$ *Systemantwort im komplexwertigen Frequenzraum*

In weiterer Folge wird auf die explizite Angabe von $(j\omega)$ verzichtet. An einem Versuchsträger sind meist mehrere Strukturanregungen und Systemantworten relevant. Es kann damit eine Matrix der TF zwischen diesen aufgespannt werden. Der Vektor der Strukturanregungen und der Vektor der Systemantworten müssen nicht zwingend gleiche Dimensionen haben.

$$\begin{Bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}^{y/x} & \dots & H_{1n}^{y/x} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{m1}^{y/x} & \dots & H_{mn}^{y/x} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} \tag{2.b}$$

$$\mathbf{y}_m = \mathbf{H}_{mn}^{y/x} \cdot \mathbf{x}_n \tag{2.c}$$

$\mathbf{H}_{mn}^{y/x}$ *Matrix der FRF von (n) Strukturanregungen zu (m) Systemantworten*
 \mathbf{x}_n *Vektor der $(n \times 1)$ Strukturanregungen*
 \mathbf{y}_m *Vektor der $(m \times 1)$ Systemantworten*

Abb. 02-06 zeigt die hier relevanten TF samt Einheiten bzw. teils auch mit Kehrwerten.

Transfer-Funktion		Kehrwert der Transfer-Funktion	
Mobilität bzw. Admittanz	in (m/s)/N	Mitgang bzw. Impedanz	in N/(m/s)
Akzeleranz bzw. Inertanz	in (m/s ²)/N	Dynamische Masse	in N/(m/s ²) bzw. Kg
„Wagenkastenempfindlichkeit“	in Pa/N		

Abb. 02-06: Mögliche TF in einer KS-LS-TPA

Die später noch behandelte OTPA nutzt nur Messdaten im realen Betrieb. Ihre Wirkungs-Wirkungs-Modellierung beschreibt das Übertragungsverhalten zwischen Systemantworten durch Transmissibilitäts-Funktionen (TMF). Dafür ist die vibroakustische Reziprozität nicht mehr gültig. Für eine FRF dagegen immer. Das bedeutet, dass sie als Systemeigenschaft unabhängig von der Senderichtung ist. Das gilt auch bei unterschiedlichen Mechanismen der Anregung bzw. wenn verschiedene Medien auftreten.

2.3.2. Strukturelles Übersprechen

Zwischen den DoF kommt es durch eine allseitige Verteilung der vibroakustischen Energien zu dynamischen Interaktionen, was im vorliegenden Kontext als Übersprechen bzw. auch als XT zu bezeichnen ist. Eine Strukturanregung erzeugt an jeder Stelle des Versuchsträgers eine Systemantwort. Diese ist als Beschleunigung auf der passiven Struktur in allen Achsenrichtungen messbar. Es betrifft als Systemeigenschaft zugleich den Betrieb und die Ruhe des Versuchsträgers. Enthalten in einer Matrix der F-a-TF und frequenzabhängig ausgeprägt, sollte es in einer KS-LS-TPA berücksichtigt sein. Das Übersprechen und die dabei zutreffende vibromechanische Reziprozität sind in Abb. 02-07 skizziert, wobei die horizontale Achse die Abmessung einer unsymmetrischen Struktur mit zwei identen Strukturanregungen angibt und die vertikale Achse eine andere Abmessung mit Beschleunigungen als Systemantworten.

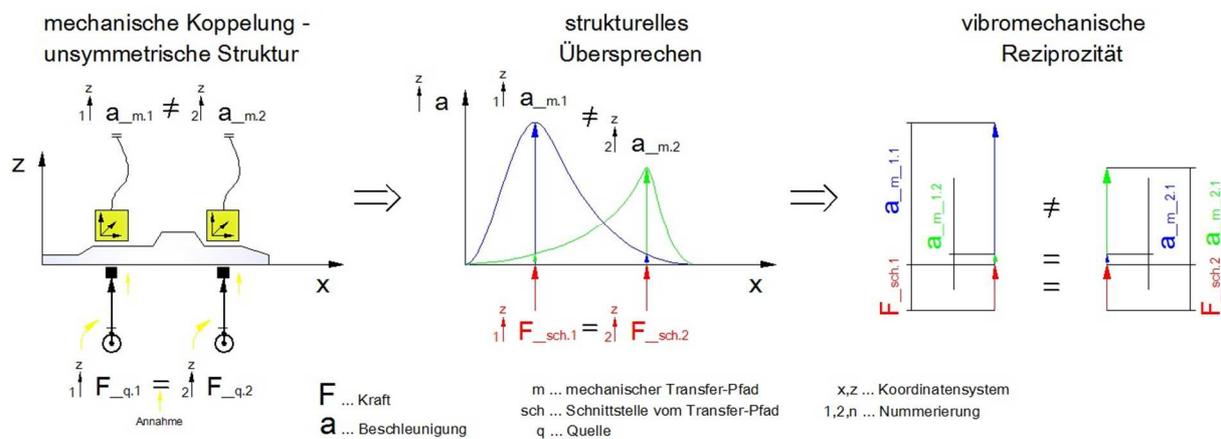


Abb. 02-07: Mechanische Koppelung zwischen zwei DoF mit Übersprechen und vibromechanischer Reziprozität

Im angegebenen Fall treten die höchsten Beschleunigungen je am Ort der Strukturanregung auf, d.h. wo die F-a-PF bei künstlicher Anregung bestimmt wird. Mit zunehmender Distanz, wenn also die F-a-TF zum anderen DoF eruiert wird, nehmen die Beschleunigungen ab. Im realen Betrieb, mit vielen weiteren Quellen für KS, stellt sich die Situation diffizil dar. Es kommt dann zur Überlagerung vieler Systemantworten. Ein entfernter DoF kann zusammen mit seiner F-a-TF einen größeren Einfluss haben, als ein lokaler DoF mit seiner F-a-PF. Das hängt von den Größenordnungen der dynamischen Schnittkräfte und allen FRF-Amp ab.

Zur Erklärung der Frequenzabhängigkeit vom XT kann man sich die zuvor skizzierten Beschleunigungen auch als Eigenmoden mit niedrigen Eigenfrequenzen vorstellen. Je niedriger diese sind, umso weitläufiger sind die elastischen Verformungen und deshalb intensiver das Übersprechen. Identische dynamische Schnittkräfte an gegenüberliegenden mechanischen Schnittstellen verursachen wegen der vibromechanischen Reziprozität identische Beschleunigungen am jeweils anderen DoF bzw. selbiges Übersprechen. Die lokal messbaren Beschleunigungen sind davon aber unabhängig.

2.3.3. Inverse Probleme und Konditionierung

In der Literatur für TPA tauchen häufig mathematische Begriffe auf. Folgende Erklärungen dazu beruhen auf [17], [18], [19], [20] und [21], wobei die Formulierungen hier sehr einfach gehalten sind. Durch allgemeine Gültigkeiten sind die Angaben nicht explizit referenziert.

Eine quadratische Matrix mit linear unabhängigen Spalten und Zeilen wird nichtsingulär bzw. regulär genannt. Sie kann mit einem Vektor ein lineares Gleichungssystem aufspannen. Die Lösung dieses Direkten Problems steht in einem Vektor gleicher Dimension. Aus den eingangsseitigen Ursachen werden über die linearen Zusammenhänge die ausgangsseitigen Wirkungen berechnet. Sind hingegen die Wirkungen bekannt und die Ursachen gesucht, handelt es sich um ein Inverses Problem. Dessen Lösung kann mithilfe der Direkten bzw. Gewöhnlichen Inverse dieser regulären, quadratischen Matrix gefunden werden

$$\mathbf{y}^a = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}^e \quad (2.d)$$

$$\mathbf{x}^e = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{y}^a \quad (2.e)$$

\mathbf{A}	quadratische Matrix linearer Zusammenhänge von (m) Ein- zu (m) Ausgängen
\mathbf{A}^{-1}	Direkte bzw. Gewöhnliche Inverse von \mathbf{A}
\mathbf{x}^e	Vektor der $(m \times 1)$ Eingänge (Ursachen)
\mathbf{y}^a	Vektor der $(m \times 1)$ Ausgänge (Wirkungen)

Das Inverse Problem kann nur plausibel gelöst werden, wenn alle linearen Beziehungen zwischen möglichen Ursachen und realen Wirkungen modelliert sind und lineares Verhalten aufweisen. Dann sollte der gesuchte Vektor der Eingänge gute Resultate enthalten. Daneben haben auch Fehler im bekannten Vektor der Ausgänge und solche in den Spalten und Zeilen der Matrix, sowie unerwünschte lineare Abhängigkeiten in ihr eine Relevanz. All das ist bei messtechnischer Bestimmung aber unvermeidbar. Im Inversen Problem bedeutet das, dass sich bereits kleine Fehler im bekannten Vektor der Ausgänge, unter Umständen stark vergrößert im gesuchten Vektor der Eingänge auswirken. Die Relativen Fehler werden im ungünstigsten Fall um den Faktor der Konditionszahl skalar verstärkt. Sie ist in der KS-LS-TPA für die Matrix der F-a-TF frequenzabhängig berechenbar und stets größer als 1. Zur einfachen Vorstellung eines linearen Gleichungssystems mit guter und schlechter Konditionierung, ist in Abb. 02-08 die Schnittpunktbestimmung von zueinander senkrechten bzw. fast parallelen Geraden skizziert.

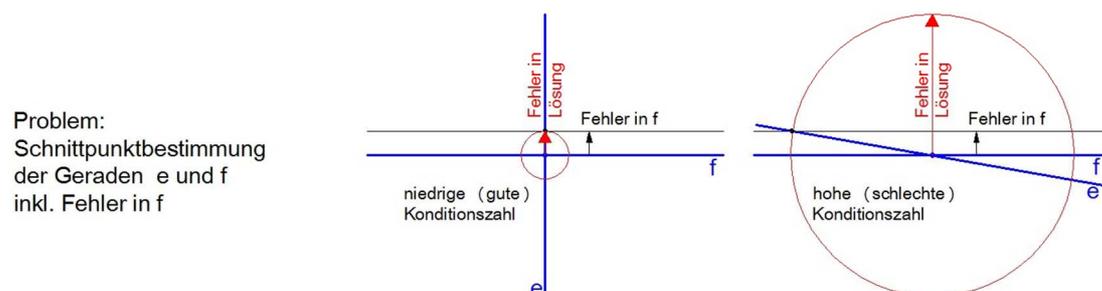


Abb. 02-08: Gut und schlecht konditioniertes Problem

Jeweils idente Fehler wirken sich sehr unterschiedlich in den Lösungen aus. Das ist auf die nicht vorhandenen bzw. ausgeprägten linearen Abhängigkeiten zwischen den skizzierten Geraden zurückzuführen. Es ist prinzipiell auch möglich, dass sich entgegengesetzte Fehler in den Ausgängen letztendlich im Inversen Problem eliminieren, weshalb die Konditionszahl immer den ungünstigsten Fall angibt. Für eine reguläre, quadratische Matrix kann sie z.B. ausgehend von ihrer Spektralnorm bzw. Natürlichen Matrixnorm berechnet werden.

$$\|A\|_2 = \sqrt{\mu_{max}} = \sigma_{max} \quad (2.f)$$

$\ A\ _2$	<i>Spektralnorm bzw. Natürliche Matrixnorm von A</i>
μ_{max}	<i>größter Eigenwert von $A^* \cdot A$</i>
σ_{max}	<i>größter Singulärwert von A</i>
A^*	<i>Adjungierte (komplexwertig) bzw. Transponierte (reellwertig) von A</i>

Eigenwerte und Singulärwerte geben charakteristische Eigenschaften einer Matrix an. Die Adjungierte einer komplexwertigen Matrix ergibt sich, wenn sie konjugiert und transponiert wird. Konjugieren bedeutet die Vorzeichen der Imaginärteile umzukehren. Transponieren ist die Spiegelung um die Hauptdiagonale. In Folge lässt sich für eine reguläre, quadratische Matrix mit dann auch vorliegendem vollem Rang, also linear unabhängigen Spalten und Zeilen, die Konditionszahl bestimmen.

$$\kappa = \|A\|_2 \cdot \|A^{-1}\|_2 = \frac{\sqrt{\mu_{max}}}{\sqrt{\mu_{min}}} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \quad (2.g)$$

κ	<i>Konditionszahl von A nach Spektralnorm</i>
μ_{min}	<i>kleinster Eigenwert von $A^* \cdot A$</i>
σ_{min}	<i>kleinster Singulärwert von A</i>

Die Konditionszahl ist zugleich ein Maß dafür, wie gut eine Matrix invertierbar ist und ob mathematische bzw. numerische Schwierigkeiten dabei zu erwarten sind. Wenn sie deutlich größer als 1 ist, z.B. um mehrere Zehnerpotenzen, dann nehmen nicht nur die Fehler im invertierten Pendant stark zu, sondern es ist im Fall einer regulären, quadratischen Matrix evtl. keine Direkte Inverse mehr bestimmbar. Das deutet auf ein schlecht gestelltes Problem hin, was durch eine ungeeignete Auswahl der Ein- und Ausgänge gegeben sein kann.

In überdeterminierten linearen Gleichungssystemen, d.h. wenn mehr Gleichungen als Unbekannte vorliegen, sodass eine rechteckige Matrix entsteht, ist bei Inversen Problemen die Pseudoinverse zu bestimmen. Als Verallgemeinerte Inverse stimmt sie bei regulären, quadratischen Matrizen mit der Gewöhnlichen Inverse überein. Teils funktioniert sie auch bei singulären, quadratischen Matrizen, für die keine Direkte Inverse berechenbar ist. Die Konditionszahl einer rechteckigen Matrix errechnet sich prinzipiell wie schon angegeben, wobei Dividend und Divisor mathematisch anders ermittelt werden, wie in einem späteren Kapitel folgt. Der Rang einer rechteckigen Matrix gilt als voll, sobald er der Dimension der kürzeren Seite der Matrix entspricht.

2.3.4. Komposition von Schallfeldgrößen

In prinzipiell jeder TPA sind berechnete Teilschalldrücke im Betrieb des Versuchsträgers zusammzusetzen, was vektoriell oder energetisch möglich ist. Beliebige Zeitdaten von Schallfeldgrößen lassen sich aus der Überlagerung von harmonischen Anteilen nachbilden und im Frequenzraum abbilden, sodass für sie letztendlich reell- oder komplexwertige Schmalbandspektren vorliegen. Für jede Frequenz in einem solchen ist dann die Amplitude bzw. deren RMS (Amp-RMS) bekannt, abgeleitet aus dem zugehörigen Auto-Leistungs-Dichte-Spektrum (A-LDS). Bei komplexwertigen Schmalbandspektren zusätzlich ihre Phase (Amp-Phase), hergestellt bzgl. weiterer Zeitdaten über ein Kreuz-Leistungs-Dichte-Spektrum (K-LDS). Das ermöglicht eine frequenzabhängige Darstellung als Vektor. Jetzt sollen Teilschalldrücke dieser Form angenommen und beide Varianten der Summierung zu einem betrieblichen Gesamtschalldruck verglichen werden.

Unter der ersten Annahme, zueinander vollständig kohärente Teilschalldrücke bei einer Frequenz, ist vektoriell zu einem komplexwertigen Gesamtschalldruck zu addieren. Zwischen den Teilschalldrücken bestehen dann stabile Zusammenhänge bzw. so angenommene bei dieser Frequenz. Die Amp-Phasen bleiben relativ konstant zueinander ausgerichtet, auch wenn sich die einzelnen Amp-RMS verändern. Das kann bis zu wenigen hundert Hz zutreffen. Abhängig von Anzahl, Orientierungen und Längen der einzelnen Vektoren bei einer bestimmten Frequenz, ergibt sich als Gesamtschalldruck ein entsprechender Vektor.

$$p_{sum^{vekt}} = \sum_i p_i \quad (2.h)$$

$p_{sum^{vekt}}$ *komplexwertiger Gesamtschalldruck im Frequenzraum bei vektorieller Summierung in Pa*
 p_i *komplexwertiger Teilschalldruck im Frequenzraum in Pa*

Unter der zweiten Annahme, zueinander vollständig inkohärente Teilschalldrücke bei einer Frequenz, ist energetisch zu einem reellwertigen Gesamtschalldruck zu addieren. Zwischen den Teilschalldrücken bestehen keine fixen Zusammenhänge bzw. so angenommene bei dieser Frequenz. Das ist charakteristisch für ein diffuses Schallfeld ab ca. 1 kHz. Es können sich neben den Amp-RMS auch die Amp-Phasen beliebig zueinander verändern bei einer solchen Frequenz. Für den Gesamtschalldruck werden immer nur die Amp-RMS der einzelnen Vektoren verarbeitet, sodass danach kein Vektor mehr aufgespannt werden kann.

$$p_{sum^{energ}} = \sqrt{\sum_i |p_i|^2} \quad (2.i)$$

$p_{sum^{energ}}$ *reellwertiger Gesamtschalldruck im Frequenzraum bei energetischer Summierung in Pa*

Die frequenzabhängige Kohärenz zeigt übrigens die vorherrschenden Beziehungen mit Werten von 0 bei zufälligem bzw. keinem bis 1 bei kausalem bzw. vollem linearem Zusammenhang an. Sie wird in einer KS-LS-TPA als Kohärenz-Funktion angegeben.

3. Körperschall-Luftschall-Transfer-Pfad-Analyse

3.1. Platzierung der Sensorik und Strukturanregung

Der messtechnische Schritt 1 der KS-LS-TPA setzt voraus, dass das vibroakustische System verstanden und mögliche Quellen für KS bekannt sind. Formell geht es um die KS-LS-TP bzw. die messtechnische Feststellung ihrer F-p-TF. Das kann direkt oder unter bestimmten Voraussetzungen reziprok erfolgen, wobei hier der traditionelle direkte Weg wichtig ist. Die in Ruhe der Struktur bei künstlicher Anregung eingebrachte vibroakustische Energie wirkt sich an einer untersuchten Senke für LS aus. Der Schalldruck als Wirkung und die dynamische Schnittkraft als Ursache werden messtechnisch festgestellt. Die künstliche Anregung erfolgt immer an allen DoF, wobei es genügt, den Schalldruck an nur einem Ort zu erfassen. Von Interesse können aber auch weitere Orte im System sein. Abb. 03-01 zeigt das schematisch.

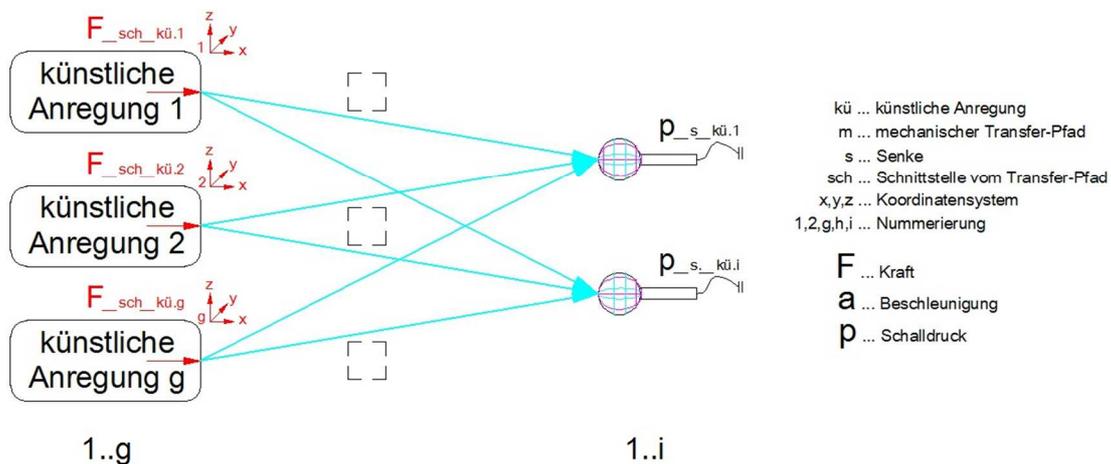


Abb. 03-01: Bestimmung von allen F-p-TF in Schritt 1

Alle TF ausgehend von einer künstlichen Anregung können durch eine mit dem Messsystem verbundene Analysesoftware standardisiert berechnet werden. Eine gesuchte F-p-TF ist der Quotient aus senkenseitigem Schalldruck und quellseitiger dynamischer Schnittkraft.

$$H_{ig}^{p_s/F_{sch}} = \frac{p_{s_{k\ddot{u}.i}}}{F_{sch_{k\ddot{u}.g}}} \tag{3.a}$$

$H_{ig}^{p_s/F_{sch}}$ *F-p-TF von dynamischer Schnittkraft ^(g) zu Schalldruck ⁽ⁱ⁾ in Pa/N*
 $F_{sch_{k\ddot{u}.g}}$ *künstlich erzeugte dynamische Schnittkraft als Strukturanregung an Stelle ^(g) in N*
 $p_{s_{k\ddot{u}.i}}$ *Schalldruck als senkenseitig künstlich erzeugte Systemantwort an Stelle ⁽ⁱ⁾ in Pa*

Mit den frequenzabhängigen F-p-TF kann und soll man zugleich alle F-a-TF ermitteln, obwohl sie nicht zum messtechnischen Schritt 1 gezählt werden dürfen. Sie sind abhängig von Schritt 2 erforderlich oder nicht. Bei der KS-LS-TPA nach Matrix-Inversions-Methode werden sie benötigt. In Abb. 03-02 sind sie je nach berücksichtigtem XT skizziert.

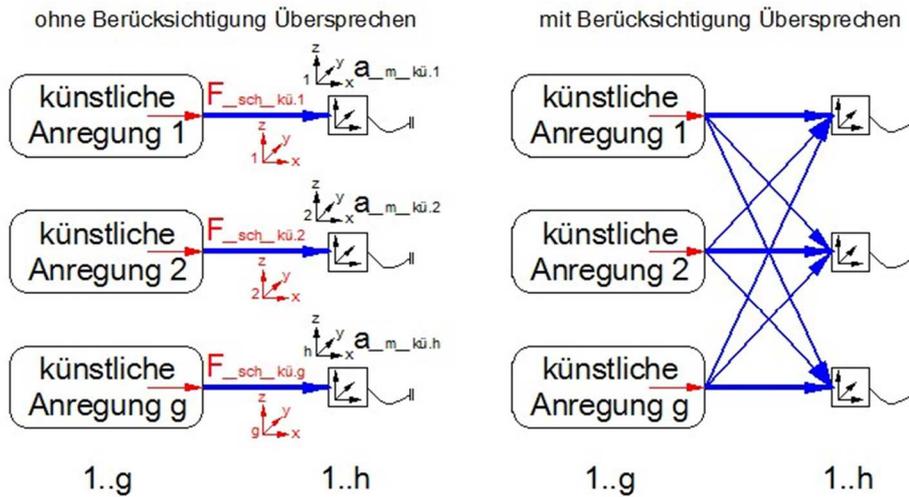


Abb. 03-02: Zugleiche Bestimmung von allen F-a-TF in Schritt 1 ohne und mit berücksichtigtem Übersprechen

Der Quotient aus Beschleunigung und dynamischer Schnittkraft ist eine gesuchte F-a-TF.

$$H_{hg}^{a_m/F_{sch}} = \frac{a_{m_{k\ddot{u}.h}}}{F_{sch_{k\ddot{u}.g}}}$$
(3.b)

$H_{ig}^{p_s/F_{sch}}$ *F-p-TF von dynamischer Schnittkraft ^(g) zu Schalldruck ⁽ⁱ⁾ in Pa/N*
 $F_{sch_{k\ddot{u}.g}}$ *künstlich erzeugte dynamische Schnittkraft als Strukturanregung an Stelle ^(g) in N*
 $p_{s_{k\ddot{u}.i}}$ *Schalldruck als senkenseitig künstlich erzeugte Systemantwort an Stelle ⁽ⁱ⁾ in Pa*

Aus allen FRF lassen sich zwei separate Matrizen aufspannen, in denen evtl. nicht eruierte bzw. nicht benötigte Einträge, die nur in den Nebendiagonalen auftreten sollten, mit 0 besetzt sind. Das trifft auf die Matrix der F-a-TF zu, die damit auch nur diagonal-besetzt sein kann.

$$H_{hg}^{a_m/F_{sch}} = \begin{bmatrix} H_{11}^{a_m/F_{sch}} & \dots & H_{1g}^{a_m/F_{sch}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{h1}^{a_m/F_{sch}} & \dots & H_{hg}^{a_m/F_{sch}} \end{bmatrix}$$
(3.c)

$$H_{ig}^{p_s/F_{sch}} = \begin{bmatrix} H_{11}^{p_s/F_{sch}} & \dots & H_{1g}^{p_s/F_{sch}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{i1}^{p_s/F_{sch}} & \dots & H_{ig}^{p_s/F_{sch}} \end{bmatrix}$$
(3.d)

$H_{hg}^{a_m/F_{sch}}$ *Matrix der F-a-TF von ^(g) dynamischen Schnittkräften zu ^(h) Beschleunigungen in (m/s²)/N*
 $H_{ig}^{p_s/F_{sch}}$ *Matrix der F-p-TF von ^(g) dynamischen Schnittkräften zu ⁽ⁱ⁾ Schalldrücken in Pa/N*

Im Fall genau einer Senke für LS liegt anstelle der Matrix ein Vektor der F-p-TF vor. Alle Orte, an denen Beschleunigungen gemessen werden, kann man als Senken für KS ansehen. Es können mehr sein als jene mit künstlicher Anregung. Dann wird eine rechteckige Matrix der F-a-TF aufgespannt. Mit dem unterschiedlich berücksichtigten XT sind die F-a-TF in Erinnerung zu rufen, die in jedem Fall benötigt werden und in der Matrix die

Hauptdiagonale bilden. Durch die am besten sehr kurze Strecke zwischen Strukturanregung und Systemantwort, kann mit einer solchen festgestellt werden, wie gut die vibroakustische Energie eintritt bzw. welchen Widerstand es zu überwinden gibt. Die F-a-TF zu entfernten DoF bzw. zu zusätzlichen Positionen dienen zur Quantifizierung des XT bzw. zur etwaigen Überdeterminierung und sind als Nebendiagonalelemente nicht zwingend notwendig.

Jede in der KS-LS-TPA nach Matrix-Inversions-Methode modellierte dynamische Schnittkraft bzw. deren DoF, erfordert mindestens einen Beschleunigungssensor, sofern einachsige Typen eingesetzt sind. Wird in Schritt 2 die Steifigkeits-Methode verfolgt, sind zwei örtlich getrennte Beschleunigungen je mechanischer Schnittstelle zu erfassen. Jeder modellierte Gesamtschalldruck erfordert bei beiden Methoden genau ein Mikrofon. Positionen sind von Interesse, an denen ein menschlicher Kopf sein sollte, z.B. über einem Sitz im WK eines Sfz. Es sollte dort ortsfest angebracht sein während der gesamten Messkampagne. Die Anzahl an Beschleunigungssensoren hängt abgesehen von den Typen, also ein- oder dreiachsig, vom Versuchsträger selbst ab. Umfang und Komplexität der zu untersuchenden technischen Abläufe sind entscheidend, sofern sie Quellen für KS mit relevantem vibroakustischen Einfluss darstellen. Bzgl. solcher muss ein Beschleunigungssensor in unmittelbarer Nähe appliziert und knapp daneben künstlich angeregt werden, damit zueinander linear unabhängige F-a-PF leichter generierbar sind. Es sollte kein Nachteil sein, ist aber nicht zwingend notwendig, die Beschleunigungssensoren am festgelegten Koordinatensystem vom Versuchsträger zu orientieren. Eine Zugehörigkeit zu den Achsenrichtungen x, y, oder z ist bei dreiachsigen Beschleunigungssensoren mit eingepprägten Achsensystemen ohnehin naheliegend. Solche decken zugleich drei mechanische Schnittstellen ab. Je nach Umsetzung erhält man eine Matrix der F-a-TF, die mehr oder weniger geeignet ist für das Inverse Problem, bedingt durch die Konditionierung.

3.1.1. Methoden zur künstlichen Anregung

Es gibt mit der Impulshammer- und Shaker-Methode zwei etablierte Varianten, um das passive Subsystem des Versuchsträgers in dessen Ruhe direkt künstlich anzuregen. Die Reziprok-Methode ist die Alternative mit indirekter künstlicher Anregung. Deren jeweilige Eignungen hängen von Versuchsträger, Umgebungsbedingungen, vertretbarem Aufwand, etc. ab. Auch persönliche Erfahrungen können für eine Variante sprechen.

Die für den Einsatz bei Sfz wahrscheinlich wichtigste Variante beim Industriepartner ist die Impulshammer-Methode. Ein im Impulshammer integrierter Kraftaufnehmer erfasst die impulsartige dynamische Schnittkraft beim manuell ausgeführten Anschlag. Mit zugleich gemessenen Systemantworten werden alle FRF bzgl. des jeweiligen DoF berechnet. Zur Absicherung kann die Analysesoftware anhand mehrmalig möglichst reproduzierter Anschläge eine Optimierung dieser vornehmen. Abb. 03-03 zeigt dazu beispielhaft den Anschlag auf einen Bauteil, der bei einem bestimmten Sfz als mechanische Schnittstelle zwischen dessen DG und WK gilt.

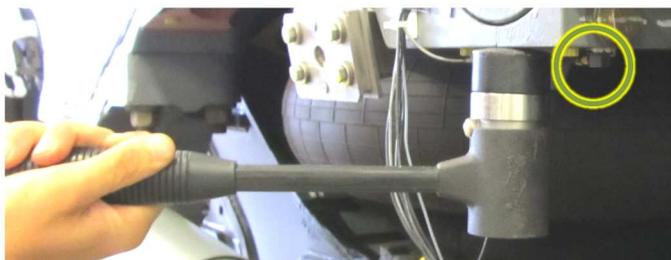


Abb. 03-03: Einsatz eines Impulshammers zur Bestimmung der TF

Denkt man an die Abmaße eines DG, dann dürfte die Distanz zum daneben befindlichen einachsigen Beschleunigungssensor gering genug sein für die betreffende F-a-PF. Man erkennt, dass achs- bzw. flächenparallel zum Beschleunigungssensor angeschlagen wird.

Alternativ kann mit einem Shaker bzw. Schwingungserregers die direkte künstliche Anregung maschinell erfolgen. Es gibt sie von handgroß bis hin zu massiven Standgeräten. Wie im Impulshammer nimmt ein Kraftaufnehmer, im oder am Shaker verbaut, die dynamische Schnittkraft auf. Diese kann extern aufgezwungen werden, sodass z.B. mit ansteigenden Frequenzen (Sinus-Sweep) oder breitbandig (weißes Rauschen) gearbeitet werden kann. Abb. 03-04 zeigt die beispielhafte Anbindung eines Shakers zu einem Bauteil eines Sfz.



Abb. 03-04: Einsatz eines Shakers zur Bestimmung der TF, [SI]

Man sieht, dass keine achs- bzw. flächenparallele Anordnung zum Beschleunigungssensor besteht bzw. aufgrund der Gegebenheiten möglich ist. Außerdem dient eine Stange als Verlängerung, die einen frequenzabhängigen Einfluss auf die Ergebnisse haben kann. Die externe Versorgung mit Energie spricht zudem gegen den Einsatz der Shaker-Methode außerhalb von Prüfstandsumgebungen.

Die alternativ anwendbare Reziprok-Methode betrifft alle F-p-TF. Sie nutzt die vibroakustische Reziprozität und arbeitet indirekt. Ihre Berechtigung schöpft sie aus ihren Vorteilen, zu denen zählt, dass nur an einem Ort künstlich anzuregen ist und evtl. enge Platzverhältnisse bei den mechanischen Schnittstellen nicht erschwerend sind. Wo bisher die Senke für LS bzw. das Mikrofon angegeben wurde, ist eine Volumen-Schallquelle anzubringen, die eine definierte Schall-Volumenbeschleunigung erzeugt. Die notwendigen Systemantworten werden bei den DoF erfasst, also dort wo im Fall der Matrix-Inversions-Methode die Beschleunigungssensoren appliziert sind. Es werden bei ruhendem Versuchsträger dann \dot{Q} -a-TF ermittelt. Diese sind den F-p-TF gleichzusetzen.

$$H_{hi}^{a_m/\dot{Q}_{sch}} = \frac{a_{m_{k\u00f6.h}}}{\dot{Q}_{sch_{k\u00f6.i}}} \quad (3.e)$$

$$H_{ig}^{p_s/F_{sch}} := H_{hi}^{a_m/\dot{Q}_{sch}} \quad \text{für vibroakustische Reziprozität} \quad (3.f)$$

$$\begin{array}{ll} H_{hi}^{a_m/\dot{Q}_{sch}} & \dot{Q}\text{-a-TF von Schall-Volumenbeschleunigung }^{(i)} \text{ zu Beschleunigung }^{(h)} \text{ in } 1/m^2 \\ \dot{Q}_{sch_{k\u00f6.i}} & \text{k\u00fcnstlich erzeugte Schall-Volumenbeschleunigung als Strukturanregung} \\ & \text{an Stelle }^{(i)} \text{ in } m^3/s^2 \end{array}$$

Laut [02] und [23] muss sich eine geeignete Volumen-Schallquelle wie eine omnidirektionale Punktschallquelle verhalten und eine \u00e4hnliche Richtcharakteristik besitzen wie ein Mikrofon. Abmessung und Geometrie der Volumen-Schallquelle sind meist nachrangig, vor allem innerhalb gr\u00f6\u00dferer Volumen, jedoch sollte sie das vorherrschende Schallfeld nicht zu sehr beeinflussen. Zur Ansteuerung eignet sich ein Sinus-Sweep.

Nach [16], [23] und [24] k\u00f6nnen bei niedrigen Frequenzen bereits zwei in Phase betriebene Lautsprecher diese Anforderungen erf\u00fcllen. Ab wenigen hundert Hz ist die Annahme einer Punktschallquelle dann aber nicht mehr erf\u00fcllbar. Eigens konzipierte Systeme decken aber auch den Bereich bis zu mehreren kHz ab. Sie k\u00f6nnen die tats\u00e4chlich erzeugte Schall-Volumenbeschleunigung teils mit implementierter Sensorik erfassen. Eine Kalibrierung in der vorgesehenen Umgebung mit dem dort vorherrschenden Schallfeld ist trotzdem notwendig.

3.2. Dynamische Schnittkr\u00e4fte im Betrieb

Der messtechnische Schritt 2 der KS-LS-TPA dient zur Bestimmung der dynamischen Schnittkr\u00e4fte im Betrieb in den festgelegten DoF, damit zusammen mit den F-p-TF aus Schritt 1 in weiterer Folge die betrieblichen Teilschalldr\u00fccke berechenbar sind. Im Betrieb eines Versuchstr\u00e4gers ist der direkte Weg der Messung h\u00e4ufig nicht umsetzbar, auch wenn damit die genauesten Resultate zu erwarten sind. Es erfordert in den mechanischen Schnittstellen zus\u00e4tzlich verbaute Kraftaufnehmer oder mit piezoelektrischen Sensoren, Dehnungsmessstreifen, etc. best\u00fcckte mechanische K\u00f6ppelemente. Das ist zwar zielorientiert, jedoch ist das z.B. wegen Aufwand, Kosten, Sicherheit, Zeit, etc. nachteilig, speziell bei gro\u00dfen Maschinen oder Anlagen, die in kleinen St\u00fcckzahlen produziert werden. Deshalb werden die dynamischen Schnittkr\u00e4fte im Betrieb auf indirektem Weg festgestellt. Dazu dienen die Steifigkeits-Methode oder die hier wichtige Matrix-Inversions-Methode.

Bei beiden werden im Betrieb die Zeitdaten der Sensorik durch ein Datenerfassungssystem aufgezeichnet, das bei Sfz im Innenraum mitgef\u00fchrt wird. Bei der sp\u00e4teren Umlegung in den Frequenzraum gehen neben Teilen des Messrauschens auch etwaige transiente und/oder impulsartige Ph\u00e4nomene teils verloren, weshalb sich station\u00e4re Betriebsmodi von Vorteil sind. Es sind speziell jene Betriebsmodi von Interesse, bei denen die bekannten vibroakustischen Probleme aufgrund der Quellen f\u00fcr KS auftreten. Eine breitbandige Strukturanregung mit vielen auftretenden Eigenmoden ist im Betrieb meist gegeben. Bei der

SAGÖ, Graz sind zur Auswertung meist bestimmte Geschwindigkeiten der Sfz in Kombination mit unterschiedlichen Schienenfahrwegen (Sfw) relevant. Dazu werden z.B. unterschiedliche 10-Sek.-Abschnitte aus den Messdaten separiert.

3.2.1. Steifigkeits-Methode oder Matrix-Inversions-Methode

Die Steifigkeits-Methode (Mount-, Dynamic- bzw. Complex-Stiffness-Method) arbeitet ohne die bereits behandelten F-a-TF. Sie bedient sich nämlich dem Hooke'schen Federgesetz. Die dynamische Verformung in einer mechanischen Koppelung verhält sich proportional zur verursachenden dynamischen Schnittkraft. Im Frequenzraum wird dieser Bezug über die dynamische Steifigkeit hergestellt.

$$F_{sch_be} = K \cdot (x_{m_be}^{akt} - x_{m_be}^{pas}) \tag{3.g}$$

- F_{sch_be} betriebliche dynamische Schnittkraft über eine mechanische Koppelung in N
- K dynamische Steifigkeit einer mechanischen Koppelung im komplexwertigen Frequenzraum in N/m
- $x_{m_be}^{akt}$ betriebliche dynamische Verformung einer mechanischen Koppelung aktivseitig als Systemantwort in m
- $x_{m_be}^{pas}$ betriebliche dynamische Verformung einer mechanischen Koppelung passivseitig als Systemantwort in m

Statt dynamischen Verformungen können betriebliche Beschleunigungen beidseitig und nahe an der mechanischen Koppelung erfasst werden, also an aktiver und passiver Seite. In Abb. 03-05 ist Schritt 2 der KS-LS-TPA nach Steifigkeits-Methode für die drei DoF eines Lagerelements angedeutet, sowie die Eruiierung der dynamischen Steifigkeit am Prüfstand.

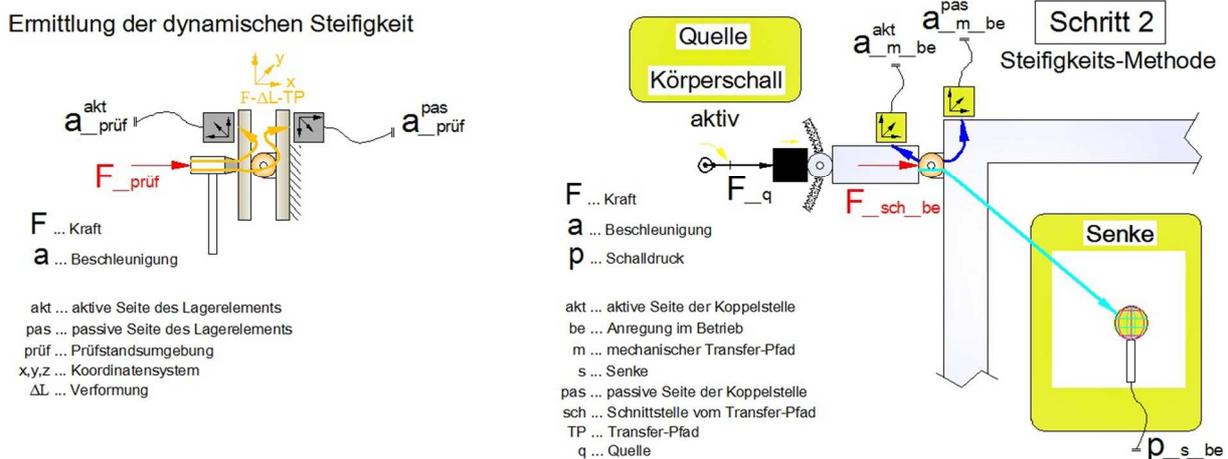


Abb. 03-05: Ermittlung der dynamischen Steifigkeit und Schritt 2 in der KS-LS-TPA nach Steifigkeits-Methode

Nach [04] erfolgt in der Regel eine unabhängige Betrachtung aller Achsenrichtungen. Es wird kein Übersprechen zwischen den DoF über die dynamischen Steifigkeiten modelliert. Die

betriebliche dynamische Schnittkraft kann gemäß der vorherigen Darstellung über die zweimalige zeitliche Integration der Differenz der Beschleunigungen angeschrieben werden, was der messtechnischen Praxis entspricht.

$$F_{sch_be} = K \cdot \frac{a_{m_be}^{akt} - a_{m_be}^{pas}}{-\omega^2} \tag{3.h}$$

- $a_{m_be}^{akt}$ betriebliche Beschleunigung einer mechanischen Koppelung aktivseitig als Systemantwort in m/s^2
- $a_{m_be}^{pas}$ betriebliche Beschleunigung einer mechanischen Koppelung passivseitig als Systemantwort in m/s^2
- ω Kreisfrequenz in 1/Sek. bzw. Hz

Bei der Bestimmung der dynamischen Steifigkeit ist eine statische Vorlast entsprechend der realen Einbausituation aufzubringen. Andere Umgebungsbedingungen, sowie nur baugleiche anstatt identer mechanischer Koppellemente, speisen Fehler in die daraus berechneten betrieblichen dynamischen Schnittkräfte ein. Ebenso entscheiden ist die Positionierung der Beschleunigungssensoren. Sie sollte im Betrieb und am Prüfstand ident sein. Außerdem sollten die betrieblichen dynamischen Verformungen groß genug sein, damit Messrauschen weniger Einfluss hat. Geringe dynamische Steifigkeiten bzw. hohe dynamische Schnittkräfte sind deshalb von Vorteil, wobei der lineare Bereich nicht überschritten werden sollte. Einige dieser Gründe sprechen gegen den Einsatz an den DG von Sfz.

Für starre mechanische Koppelstellen eignet sich zur Berechnung der dynamischen Schnittkräfte im Betrieb die Matrix-Inversions-Methode. Sie wird ferner Inverse-FRF-, Inertanz-Matrix- oder Matrix-Methode genannt. Sie nutzt die Beschleunigungssensoren, die bei künstlicher Anregung für die F-a-TF relevant sind. Für ein vibroakustisches System mit einer mechanischen Koppelung und drei DoF in den Achsenrichtungen x, y und z, sind bei je einer Quelle für KS und Senke für LS, die messtechnischen Schritte in Abb. 03-06 skizziert.

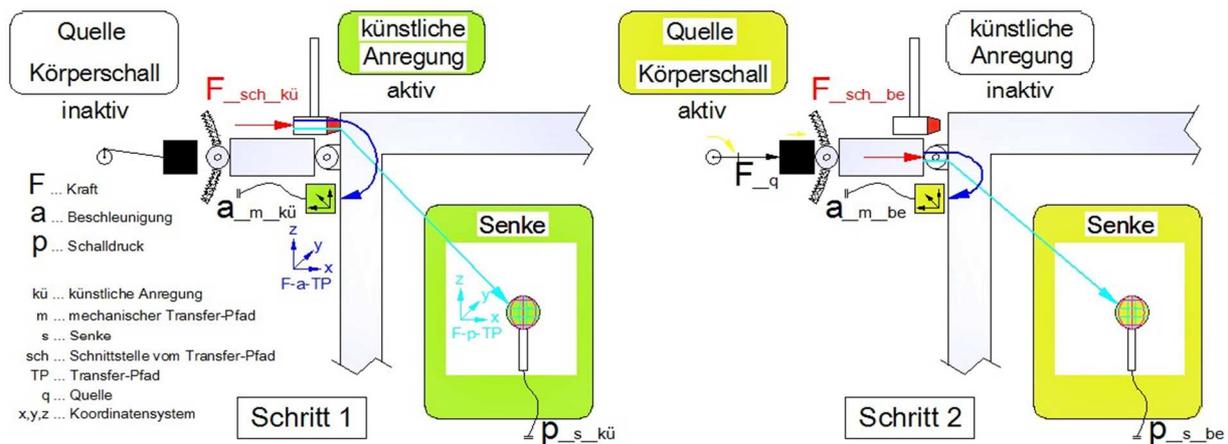


Abb. 03-06: Zwei messtechnische Schritte in der KS-LS-TPA nach Matrix-Inversions-Methode

Erst mit der Matrix-Inversions-Methode in Schritt 2 sind die bereits mit Schritt 1 behandelten F-a-TF wirklich notwendig. Beginnend soll von einer rechteckigen Matrix der F-a-TF ausgegangen werden. Ihr inverses Pendant ist für jede Frequenz mit dem Vektor der betrieblichen Beschleunigungen zu multiplizieren. Dieses Inverse Problem hat als Lösung einen Vektor der dynamischen Schnittkräfte bzgl. aller verwerteten DoF.

$$\begin{Bmatrix} F_{sch_be.1} \\ \vdots \\ F_{sch_be.g} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}^{a_m/F_sch} & \dots & H_{1g}^{a_m/F_sch} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{h1}^{a_m/F_sch} & \dots & H_{hg}^{a_m/F_sch} \end{bmatrix}^+ \cdot \begin{Bmatrix} a_{m_be.1} \\ \vdots \\ a_{m_be.h} \end{Bmatrix} \quad \text{für } h > g \quad (3.i)$$

$$F_{sch_be.g} = \left(H_{hg}^{a_m/F_sch} \right)^+ \cdot a_{m_be.h} \quad \text{für } h > g \quad (3.j)$$

$F_{sch_be.g}$ Vektor der $(g \times 1)$ betrieblichen dynamischen Schnittkräfte in N
 $a_{m_be.h}$ Vektor der $(h \times 1)$ betrieblichen Beschleunigungen in m/s^2
 $[\dots]^+$ Pseudoinverse der Matrix

Die Pseudoinverse ist angeschrieben, da sie auch bei quadratischer Matrix zielführend ist. Falls hier nur von Inversion geschrieben wird, kann auch eine Pseudoinversion gemeint sein.

$$\left(H_{hg}^{a_m/F_sch} \right)^{-1} := \left(H_{hg}^{a_m/F_sch} \right)^+ \quad \text{für } h = g \quad (3.k)$$

Nun ist von einer quadratischen Matrix der F-a-TF auszugehen. Diese kann unterschiedlich besetzt sein. Entweder sind nicht alle Einträge eruiert oder manche bleiben unberücksichtigt. Das hat enormen Einfluss auf die Ergebnisse, besonders bei XT. Eine Gliederung nach der Besetzung ist deshalb sinnvoll. Abb. 03-07 zeigt schematisch für die Diagonale-, Geblockte- und Volle-Matrix-Inversions-Methode eine entsprechende 6x6-Matrix auf.

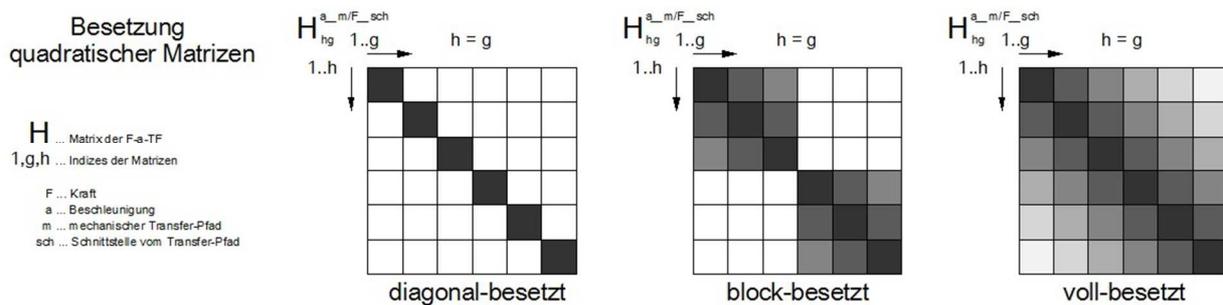


Abb. 03-07: Unterschiedlich besetzte quadratische 6x6-Matrix der F-a-TF

Eine dunkle Schattierung deutet stärkeres Übersprechen bei der betrachteten Frequenz an. In einer F-a-PF ist es demnach am intensivsten, wobei es sich dann eigentlich um kein XT handelt. In den Nebendiagonalelementen tritt real ein inhomogeneres Übersprechen auf als angedeutet ist. Es sollte trotzdem die angedeutete Symmetrie bzgl. der Hauptdiagonale herrschen, was auf die vibromechanische Reziprozität zurückzuführen ist. Mit der Besetzung

steigt der Aufwand in der Messdatenverarbeitung an. Dafür darf man auch von einer zunehmenden Qualität des Modells der KS-LS-TPA ausgehen. Das ist aber nicht prinzipiell so, wenn man an die Konditionszahl der Matrix der F-a-TF denkt. Fehlereinflüsse können sich unter Umständen bei voller Besetzung stärker auswirken als bei diagonaler Besetzung. Die Zusammenhänge sind wie das XT immer frequenzabhängig.

Die Diagonale-Matrix-Inversions-Methode geht von nicht gekoppelten DoF. Eine gemessene Beschleunigung wird in dieser Annahme von der nächstgelegenen mechanischen Schnittstelle verursacht. XT ist nicht modelliert, was bei weit entfernten Quellen für KS und/oder gut gedämmten bzw. gedämpften Strukturen annähernd zutreffen kann. Mit der Inversion werden die F-a-PF als Hauptdiagonalelemente lediglich in Dynamische Massen umgekehrt. Beim Industriepartner wurde bisher ausschließlich auf diese Weise gearbeitet.

Die Geblockte-Matrix-Inversions-Methode berücksichtigt teils das XT. Vor allem innerhalb der drei Achsenrichtungen von mechanischen Koppelungen, da sie nahe zusammenliegen bzw. teils dreiaxsig Beschleunigungssensoren appliziert sind. Es kann aber auch eine geblockte Besetzung aus identen Achsenrichtungen örtlich getrennter DoF generiert werden.

Die Volle-Matrix-Inversions-Methode geht von möglichen Interaktionen zwischen allen DoF aus. Eine gemessene Beschleunigung kann durch XT von jeder berücksichtigten Quelle für KS verursacht bzw. beeinflusst worden sein. Alle Haupt- und Nebendiagonalelemente werden verarbeitet. Sind als Erweiterung dazu zusätzliche Einträge vorhanden, kann das als Überdeterminierte-Matrix-Inversions-Methode bezeichnet werden. Eine rechteckige Matrix der F-a-TF ist praktisch immer voll-besetzt.

3.3. Teil- und Gesamtschalldrücke im Betrieb

Weiters sind in einer KS-LS-TPA die betrieblichen Teilschalldrücke zu berechnen. Das erfordert je nach Anzahl der Senken für LS einerseits die Matrix oder den Vektor der F-p-TF und andererseits den Vektor der betrieblichen dynamischen Schnittkräfte, der abhängig von der Anzahl an Senken für LS evtl. mehrmals in eine neue Matrix anzuordnen ist. Durch elementweise Multiplikation kann damit eine Matrix oder im Fall nur eines Mikrofons ein Vektor der betrieblichen Teilschalldrücke berechnet werden.

$$\begin{bmatrix} p_{s_be.11} & \cdots & p_{s_be.i1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{s_be.1g} & \cdots & p_{s_be.ig} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} H_{11}^{p_s/F_sch} & \cdots & H_{1g}^{p_s/F_sch} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{i1}^{p_s/F_sch} & \cdots & H_{ig}^{p_s/F_sch} \end{bmatrix} \diamond \begin{bmatrix} F_{sch_be.1} & \cdots & F_{sch_be.1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{sch_be.g} & \cdots & F_{sch_be.g} \end{bmatrix}^T \quad (3.1)$$

$$(\mathbf{p}_{s_be.1g} \cdots \mathbf{p}_{s_be.ig})^T = \mathbf{H}_{ig}^{p_s/F_sch} \diamond (\mathbf{F}_{sch_be.g} \cdots \mathbf{F}_{sch_be.g})^T \quad (3.m)$$

$$\mathbf{P}_{s_be.ig}^\circ = \mathbf{H}_{ig}^{p_s/F_sch} \diamond \mathbf{F}_{sch_be.ig}^\circ \quad (3.n)$$

$[\dots]^T$ *Transponierte der Matrix bzw. des Vektors*
 \diamond *elementweise Multiplikation (Hadamard- bzw. Schur-Produkt)*

$p_{s_be.ig}$	<i>Teilschalldruck der betrieblichen dynamischen Schnittkraft ^(g) an Stelle ⁽ⁱ⁾ in Pa</i>
$\mathbf{p}_{s_be.ig}$	<i>Vektor der ^(g x 1) Teilschalldrücke an Stelle ⁽ⁱ⁾ in Pa</i>
$\mathbf{P}^o_{s_be.ig}$	<i>Matrix der betrieblichen Teilschalldrücke von ^(g) betrieblichen dynamischen Schnittkräften zu ⁽ⁱ⁾ Stellen in Pa</i>
$\mathbf{F}^o_{sch_be.ig}$	<i>Matrix der ⁽ⁱ⁾ identen betrieblichen dynamischen Schnittkräfte an ^(g) Stellen in N</i>

Durch die elementweise Multiplikation haben alle Matrizen idente Dimensionen. Tritt nur eine Senke für LS auf, reduzieren sie sich auf Vektoren. Bei dieser Transponierten drehen sich die Vorzeichen der etwaig vorhandenen Imaginärteile nicht um.

Die damit vorliegenden Teilschalldrücke im Betrieb sind charakteristisch für die DoF bzw. Quellen für KS und die zugehörigen KS-LS-TP. Ihr Vergleich in Frequenzbereichen mit vibroakustischen Problemen, sowie die Betrachtung der betrieblichen dynamischen Schnittkräfte und F-p-TF, kann Ursachen aufdecken und Handlungsfelder öffnen.

Zuletzt ist ein betrieblicher Gesamtschalldruck an jeder Senke für LS geeignet zu bilden. Das ist mit oder ohne Amp-Phasen, also vektoriell oder energetisch durchführbar. Damit kann die KS-LS-TPA mittels realer betrieblicher Schalldrücken evaluiert werden. Es sollte eine gute Übereinstimmung erreicht werden, speziell im Frequenzbereich, wo Quellen für KS größeren Einfluss haben, also bis zu mehreren hundert Hz bzw. wenigen kHz. Der berechnete Amp-RMS sollte aber quantitativ immer unter dem der Messung liegen. In der Praxis teils unberücksichtigte Quellen für KS bzw. LS erfordern das prinzipiell. Tritt häufig das Gegenteil ein, deutet das auf gravierende Fehlereinflüsse. Zu bedenken ist, dass gute Übereinstimmungen zwar wünschenswert sind, aber nur eine hinreichende und keine notwendige Bedingung für eine makellos umgesetzte KS-LS-TPA. Für einen einfacheren Vergleich kann jeweils die Bandbreite im Frequenzraum durch energetische Summierung reduziert werden, im Extremfall zu einem energieäquivalenten Dauerschalldruckpegel für einen ausgewählten Frequenzbereich. Er steht darin für einen theoretisch konstanten Schalldruck mit selbigem Energieinhalt im gleich langen Zeitfenster.

In [25] und [26] ist die zulässige Abweichung für vertrauenswürdige Ergebnisse konkret mit 3 dB bzgl. des Amp-RMS angegeben.

Wichtig für eine jede KS-LS-TPA sind auch aussagekräftige Darstellungsformen, da Interpretationen häufig nur anhand visueller Vergleiche erfolgen. Kommerzielle Systeme haben diverse Varianten implementiert und etabliert. Mit dem Praktischen / Numerischen Teil dieser Masterarbeit werden einige selbst über Matlab[®] umgesetzte Möglichkeiten aufgezeigt.

3.4. Limitierungen und Lösungsvorschläge

In einer KS-LS-TPA nach Matrix-Inversions-Methode gibt es mehrere Ebenen für mögliche Fehler mit bekannter bzw. systematischer oder unbekannter bzw. zufälliger Natur. Eine korrekt und umfassende Umsetzung ist in der Praxis meist nicht möglich. Teils liegt das auch an versteckten Einflüssen der Messdatengenerierung und -verarbeitung. Hier sind basierend

auf der einschlägigen Literatur einige Limitierungen und Lösungsvorschläge angegeben und abschließend mit der KS-LS-OTPA eine ähnliche und bereits häufig umgesetzte Alternative.

3.4.1. Modell-, Daten- und/oder Numerikfehler

Nicht jeder Versuchsträger ist gleichermaßen für eine KS-LS-TPA geeignet. Solche mit wenigen, örtlich verteilten Quellen für KS, die zueinander inkohärente und ähnlich intensive Anregungen in einer Struktur mit möglichst geringem XT und linearem Verhalten verursachen, eignen sich besser. Aber auch für baugleiche Maschinen, Anlagen, Fahrzeuge, etc. sind abweichende vibroakustische Eigenschaften zwischen den identen passiven Systemen vorzufinden.

Laut [27] und [28] ist das frequenzabhängig ausgeprägt und bedingt durch zulässige und/oder unzulässige Fertigungs-, Material-, Montagetoleranzen, etc. der meist zutreffende Fall. Das beeinflusst bei höheren Frequenzen zunehmend die dämpfenden Eigenschaften. Anhand der Streuung der FRF-Amp einer F-p-TF in dB re 1 Pa/N, die für dutzende neue Kfz nach Verlassen der Produktion messtechnisch unter sukzessiv ausgeschlossenen systematischen Fehlern eruiert wurde, zeigt sich, dass auch bei relativ niedrigen Frequenzen unter 500 Hz eine Streuung in der entsprechenden FRF-Amp von bis zu ca. 10 dB auftritt.

Diese Differenzen betreffen Schritt 1 der KS-LS-TPA. Analog dazu darf man in Schritt 2 nicht davon ausgehen, dass idente Betriebsmodi eingestellt werden können, vor allem außerhalb von Prüfstandsumgebungen. Zeitdaten können immer nur begrenzt reproduziert werden, auch wenn sie mit nur einem einzigen Versuchsträger generiert werden.

Alle Resultate hängen nach [29] von der Messdatengenerierung und -verarbeitung ab, die in unterschiedlichen kommerziellen Systeme teils anders erfolgt. Wie für den beispielhaften Hochlauf eines Kfz am Prüfstand die berechneten Teil- bzw. Gesamtschalldrücke aufgrund dessen abweichen können, zeigt Abb. 03-08 bzgl. einer Senke für LS im Innenraum auf.

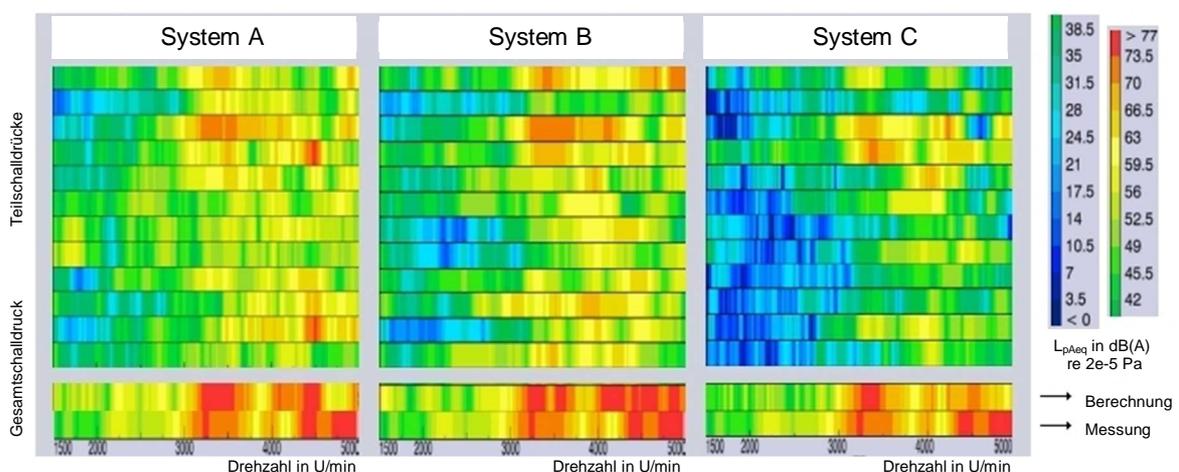


Abb. 03-08: Ergebnisse einer KS-LS-TPA mit unterschiedlichen kommerziellen Systemen nach [29]

In den horizontalen Achsen ist die Drehzahl der Verbrennungskraftmaschine aufgetragen. Die berechneten Teil- und Gesamtschalldrücke sind darüber gereiht, ebenso der gemessene Schalldruck. Nur dieser alleine ist in allen drei Varianten halbwegs ident, trotz jeweils adäquater Voraussetzungen. Berechnete Resultate in einer KS-LS-TPA sind deshalb immer mit gesunder Skepsis zu interpretieren, auch wenn sie aus kommerziellen Systemen stammen. Es handelt sich in dieser Darstellung übrigens um energieäquivalente Dauerschalldruckpegel bei den jeweiligen Drehzahlen. Angegeben ist deren Amp-RMS in dB(A) re 2e-5 Pa.

In [30] werden für genau diese namentlich nicht genannten kommerziellen Systeme die Unterschiede in den Amp-RMS der Teilschalldrücke mit bis zu ca. 10 dB beziffert. Begründet wird das mit abweichenden experimentellen Ansätzen und/oder deren unterschiedlichen mathematischen bzw. numerischen Algorithmen.

Beim Abstrahieren des Versuchsträgers sind Vereinfachungen zu treffen. Die Realität kann trotz zeitlicher und räumlicher Abgrenzung nur oberflächlich modelliert werden. Modellfehler sind die Folge. Von der Tatsache, dass Quellen für LS unberücksichtigt sind, obwohl sie mit zunehmender Frequenz immer relevanter werden, z.B. in einem fahrenden Sfz, darf man absehen. Es gibt für das Modell eines Versuchsträgers in einer KS-LS-TPA qualitative Unterschiede schon alleine aufgrund Feingefühl, Erfahrung und Absichten der ausführenden Person bzw. weiters wegen der vorgegebenen und einzuhaltenden Rahmenbedingungen, z.B. Zeit und Kosten. Werden von den relevanten Quellen für KS z.B. zu wenige berücksichtigt, wirkt sich das frequenzabhängig mit unter- und/oder überbewerteten dynamischen Schnittkräften bzw. Teilschalldrücken aus, falls XT vorhanden ist. Auch prinzipiell zulässige Annahmen, z.B. basierend auf der vibromechanischen und/oder vibroakustischen Reziprozität, reduzieren die Qualität des Modells und der Ergebnisse.

Unter anderem ist in [27] und [30] als problematisch angegeben, dass mit Messdaten aus separaten Schritten gearbeitet wird. Außerhalb von Prüfstandsumgebungen ändern sich z.B. Temperatur, Druck, Feuchtigkeit, etc. ständig, was sich auf das vibroakustische Verhalten der Struktur und die Sensorik auswirkt. Mit zunehmender Frequenz treten nichtlineare Vorgänge mehr in den Vordergrund, speziell wenn nichtmetallische Werkstoffe beteiligt sind. Bei höheren Frequenzen sind linear modellierte FRF außerdem ohnehin ungenauer.

Bei der künstlichen Anregung ist es nach [29] und [31] speziell bei großen und massiven Strukturen nämlich schwierig, auch in Bereichen über ca. 1 kHz genügend vibroakustische Energie für die Systemantworten einzubringen, wodurch die FRF ungenauer werden.

Gegenteilig spielt die Masse der Struktur in Relation zu den Beschleunigungssensoren eine Rolle, falls sie nicht um einige Zehnerpotenzen auseinanderliegen. Ferner gibt es kapazitive Limitierungen hinsichtlich der verfügbaren Kanäle der Messtechnik, was eine praktische Grenze für die mögliche Anzahl an berücksichtigten DoF vorgibt.

Von Messrauschen in den Datenreihen muss immer ausgegangen werden, speziell bei höheren Frequenzen. Das ist mit eingesetzter Sensorik, Signalkonditionierung, -übertragung und -verarbeitung verbunden. Diese Datenfehler können durch die Numerikfehler, die z.B.

beim Abschätzen von Lösungen oder Runden von Zahlen in numerischen Algorithmen auftreten, verstärkt werden. Das gilt auch bei Inversen Problemen, also für die Matrix-Inversions-Methode. Die Konditionszahl ist abhängig vom XT zwischen den DoF, sowie von der Besetzung der aufgespannten Matrix, ferner von ihrer Dimension.

Laut [16] ist ihre Konditionierung oftmals im niederfrequenten Bereich schlechter. Wenige Eigenmoden und/oder örtlich nahegelegene mechanische Schnittstellen verursachen stärkere lineare Abhängigkeiten zwischen den F-a-TF. Im höherfrequenten Bereich mit zunehmender modaler Überlappung und besserer Dämpfung treten dafür wieder nichtlineare Effekte intensiver auf.

Der Zusammenhang zwischen Konditionszahl und Übersprechen wird in [32] und [33] über das modale Verhalten der Struktur erbracht. Bei niedrigen Frequenzen mit geringer modaler Überlappung treten wenige, dafür gewissermaßen großflächige Eigenmoden auf. Deren signifikante Auslenkungen werden teils sehr ähnlich durch mehrere und evtl. eng platzierte Beschleunigungssensoren erfasst, auch in verschiedenen Achsenrichtungen. Die Spalten in der Matrix der F-a-TF haben dann ähnliche Einträge. Es besteht die Gefahr, dass sich ihr Rang bis zur Singularität reduziert. Auch wenn es nicht so gravierend eintritt, bedingt das eine schlechtere Konditionierung. Bei höheren Frequenzen tritt das aufgrund zeitlich und räumlich überlagerter Eigenmoden bzw. Beschleunigungen weniger auf. Dieser Effekt ist für zwei mechanische Schnittstellen bei deren künstlicher Anregung zur Bestimmung der F-a-TF und F-a-PF in Abb. 03-09 angedeutet.

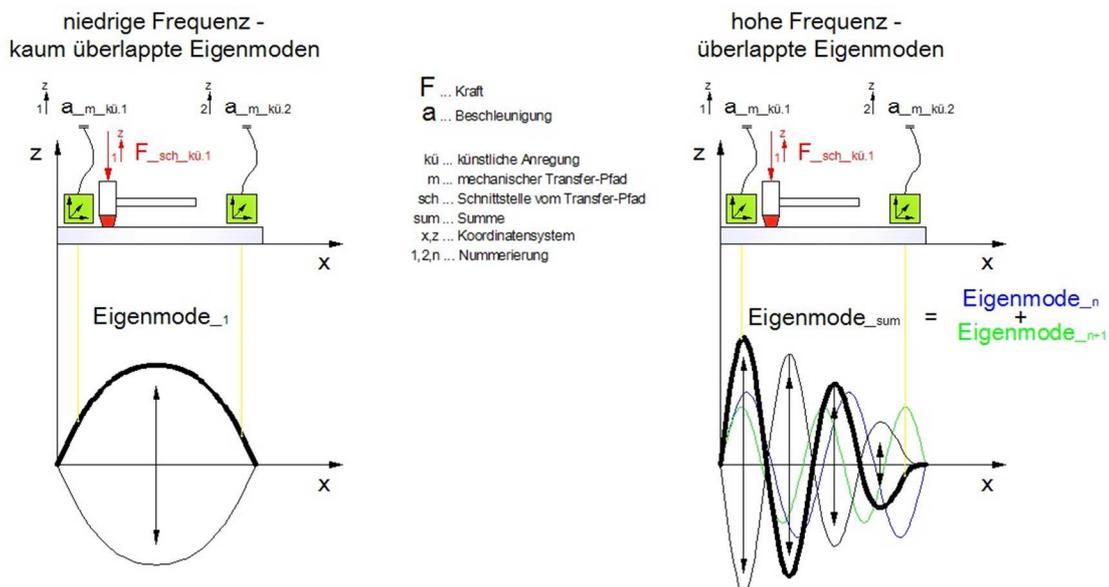


Abb. 03-09: Frequenzabhängige Überlappung der Eigenmoden bei der Messung einer F-a-PF bzw. F-a-TF

3.4.2. Empfehlungen für die messtechnischen Schritte

Alle messtechnischen Schritte sind prinzipiell an ein und demselben Versuchsträger umzusetzen. Bei der Wiederholung einer Messkampagne, z.B. zur Absicherung von

Resultaten oder zum Testen konstruktiver Änderungen, ist eine ähnliche Ausgangssituation herzustellen. Das betrifft z.B. Betriebsmodi, Umgebungsbedingungen, usw., aber auch die Messtechnik und Analysesoftware. Damit verbunden auch die Einstellungen, z.B. mit dem jeweils gewählten „H-estimator“ oder mit den Optionen für die FFT.

Abweichungen treten nach [34] für eine F-a-TF bzw. deren zeitlich integrierte F-v-TF aber auch dann auf, falls unterschiedliche Shaker bzw. ein Impulshammer samt jeweils zugehöriger Analysesoftware eingesetzt werden, auch wenn systematisch bedingte Fehler explizit vermieden werden. Das ist beispielhaft in Abb. 03-10 als FRF-Amp in dB re 1 (m/s)/N angeführt.

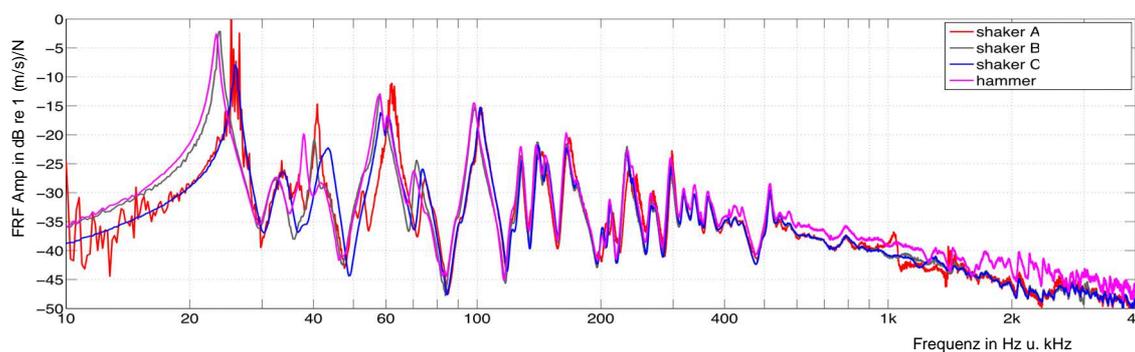


Abb. 03-10: Unterschiedlich eruierte F-v-TF an einer simplen Struktur nach [34]

Ein Vergleich zwischen Impulshammer- und Shaker-Methode am DG eines Sfz durch die SAGÖ, Graz hat vor Jahren Ähnliches zum Vorschein gebracht. Allgemein bedeutet das für eine KS-LS-TPA, dass alle berechneten Resultate bereits aufgrund der unsicheren TF nur eingeschränkt zuverlässig sind. Man kann nicht erwarten, dass eine der beiden Methoden zur direkten künstlichen Anregung prinzipiell genauere FRF liefert. Qualitative Aussagen dazu können am einfachsten anhand der Kohärenz-Funktionen getroffen werden.

Welche Methode besser geeignet ist, kann aber objektiv beurteilt werden. Für zeitlich enge Rahmenbedingungen und außerhalb von Prüfstandsumgebungen ist die Impulshammer-Methode von Vorteil. Dabei sollte stets auf Position und Richtung der künstlichen Anregung Wert gelegt werden, vor allem wenn mit mehreren reproduzierten Anschlägen die FRF durch die Analysesoftware optimiert wird. Ein Zurückfedern und/oder doppelter Anschlag ist zu vermeiden. Über die Hammermasse sowie Steifigkeit der Spitze kann das und der besser verwertbare Frequenzbereich beeinflusst werden. Ein Anschlag geschieht am besten sehr nahe zum jeweiligen DoF bzw. dessen Beschleunigungssensor, außerdem achs- und flächenparallel. Deshalb ist bei dreiachsigen Typen auf die rotatorische Ausrichtung zu achten. Die Konditionierung des linearen Gleichungssystems hängt damit zusammen.

Bzgl. der Aufhängungspunkte einer Verbrennungskraftmaschine in einem bestimmten Kfz wird in [30] angegeben, dass es für deren F-p-TF in den Innenraum zu Differenzen von bis zu ca. 10 dB bei den FRF-Amp kommen kann, wenn übliche Abweichungen bei Position und Richtung der Anschläge mittels Impulshammer auftreten. Das wurde versuchsweise für

Distanzen von 35 mm bzw. Winkel von 15 ° festgestellt. Unterschiedliche Temperaturen von z.B. 40 °C wirken sich mit ca. 5 dB aus. Diese möglichen Einflüsse sind in Abb. 03-11 für diverse Frequenzbereiche zu sehen, wobei die ebenfalls betroffenen FRF-Phasen nicht angegeben sind.

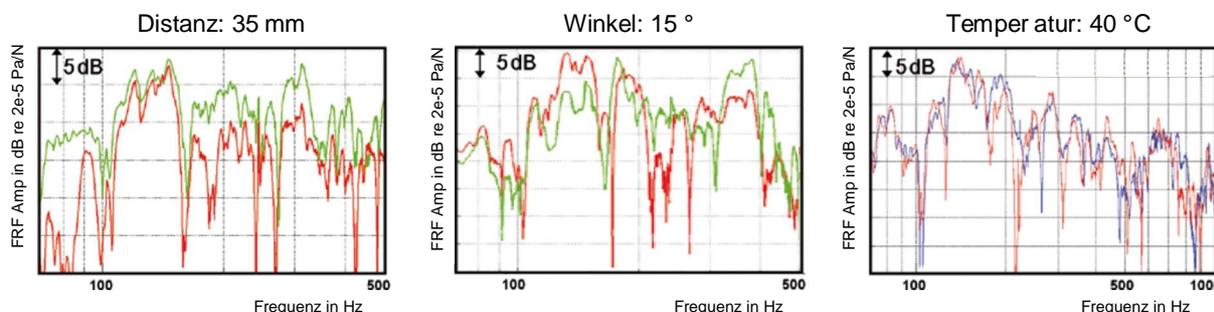


Abb. 03-11: Einflüsse auf die FRF-Amp einer F-p-TF bei der Impulshammer-Methode nach [30]

In [02] und [26] wird empfohlen, dass eine TF bei direkter künstlicher Anregung festzustellen ist, nachdem die jeweilige Struktur der Quelle für KS entfernt wurde, sofern das möglich ist. Das trifft dann zu, wenn diese relativ starr mit der passiven Struktur verbunden ist und in sich den KS gut überträgt, was z.B. auf die Verbrennungskraftmaschine in einem Kfz zutrifft.

In [35] wird eine Untersuchung mit dem Stoßdämpfer in einem Kfz durchgeführt, wobei eine Validierung die F-a-TF und F-p-TF nach dessen Ausbau als besser geeignet einstuft.

Letztendlich ist aufgrund der Literaturrecherche feststellbar, dass das vor Jahren noch häufig empfohlene und umgesetzte Demontieren der anregenden Strukturen vor dem Eruiern der FRF, heute meist vernachlässigt wird. Die damit verbundenen Fehler werden wegen des deutlich geringeren Aufwands in Kauf genommen. Legt man die Überlegungen auf die mechanischen Schnittstellen zwischen DG und WK eines Sfz um, müssten die beiden voneinander getrennt bzw. eigentlich schon vor ihrer Zusammenführung untersucht werden.

Mit der in Schritt 1 alternativ möglichen Reziprok-Methode, die \dot{Q} -a-TF anstelle von F-p-TF ermittelt, sind in der Praxis ebenso Fehler verbunden. Das hängt z.B. von der Volumen-Schallquelle und vom räumlichen Ausmaß des Versuchsträgers ab. Beim Industriepartner konnte an einem bestimmten Sfz die theoretisch vorhandene vibroakustische Reziprozität zusammen mit der Impulshammer-Methode nur wenig zufriedenstellend nachgewiesen werden, was auch auf eine zu geringe Schall-Volumenbeschleunigung zurückführbar ist.

Um unabhängig von der Feststellung einer FRF und ihrer Qualität die in der KS-LS-TPA verwertbaren Frequenzbereiche einzugrenzen, können im Stillstand des Versuchsträgers gemessene Beschleunigungen und Schalldrücke auf ihr Mess- bzw. Hintergrundrauschen hin analysiert werden, wie in [24] gezeigt wird. Das kann im Vergleich mit deren Pendanten geschehen, die in den ausgewählten zeitlichen Segmenten verwertet werden sollen.

3.4.3. Verringerung der Konditionszahl

In Inversen Problemen muss man sich mit der Konditionszahl auseinandersetzen, die im besten Fall genau 1 ist, was in der Praxis nicht zutreffen wird. Ab wann in der KS-LS-TPA nach Matrix-Inversions-Methode von einer schlechten Konditionierung die Rede ist und wie das Übersprechen sowie die Besetzung der Matrix der F-a-TF sie beeinflussen, soll hier behandelt werden. Da jede Frequenz ihre Konditionszahl hat, sind allgemeine Aussagen für einen weiteren Frequenzbereich nur vorsichtig machbar.

In [16] wird als akzeptabel für eine 3x3-Matrix eine Konditionszahl von ca. 50 angegeben. In [32] für eine 4x4-Matrix bis zu ca. 100. In [25] und [36] ebenfalls ca. 100, allerdings ohne Angabe zum linearen Gleichungssystem. Nach [04] und [25] sollte bei einer Konditionszahl ab ca. 100 und spätestens ab ca. 1.000 etwas zu ihrer Reduktion unternommen werden.

Hervorzuheben ist einerseits die Überdeterminierung, die im gesamten Frequenzraum mehr oder weniger wirkt. Andererseits gibt es mathematische Methoden zum Berechnen linear unabhängiger Beziehungen, wobei dazu die Singulärwertzerlegung (Singular-Value-Decomposition = SVD), die teils auch Hauptkomponentenanalyse (Principal-Component-Analysis), Faktorenanalyse oder Hauptachsentransformation genannt wird, praktische die einzige mit Relevanz in diesem Kontext ist. Sie arbeitet außerdem in Verbindung mit Regularisierungsmethoden und kann auch gezielt für bestimmte Frequenzen mit hohen Konditionszahlen umgesetzt werden.

Eine bei XT für die Modellgüte vorteilhafte voll-besetzte Matrix der F-a-TF wirkt sich nach [29], [30] eher nachteilig auf die Konditionszahl aus, sodass möglicherweise eine block-besetzte Matrix innerhalb der jeweils drei Achsenrichtungen bzw. DoF aller mechanischen Koppelstellen die stimmigsten Ergebnisse für die dynamischen Schnittkräfte und Teilschalldrücke hervorbringt. Die Konditionszahl ist dann oftmals etwas niedriger. Das trifft häufig zu, gilt aber nicht pauschal für alle Frequenzen. Bei der diagonal-besetzten Matrix kann sie noch niedriger sein, allerdings ist davon wegen des praktisch immer vorhandenen XT abzuraten. Wie sich die Konditionszahl bei der Überdeterminierung einer einfachen 2x2- zur 3x2-Matrix der F-a-T verhalten kann, deutet die grafische Interpretation in Abb. 03-12 an.

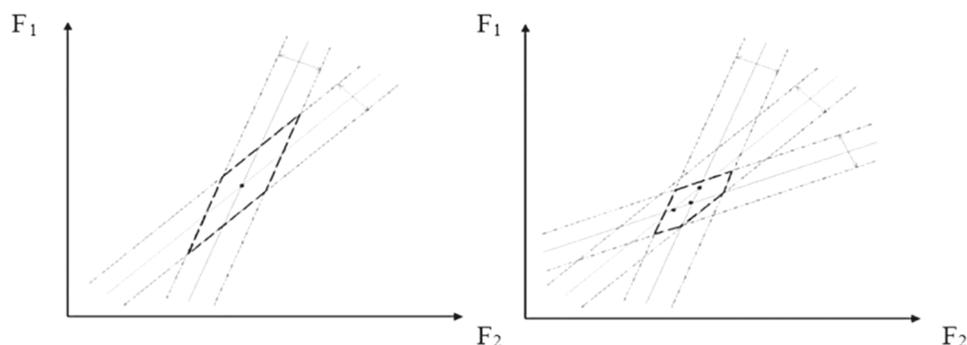


Abb. 03-12: Grafisch interpretierte Überdeterminierung einer 2x2- zur 3x2-Matrix der F-a-TF, [04]

Für die 2x2-Matrix gibt eine aufgespannte Fläche zwischen den fehlerhaften Geraden die mögliche Lösung des linearen Gleichungssystems an. In dieser variiert der Abstand zum Schnittpunkt der mittigen fehlerfreien Geraden. Sind die Fehler beider Geraden gering, ist die Fläche klein. Ist die Orthogonalität beider Geraden gut, ist die Fläche eher quadratisch und die Konditionszahl damit besser. Bei Überdeterminierung zur 3x2-Matrix wird eine Reduktion der Fläche und Änderung ihrer Geometrie erzwungen. Bei der am besten orthogonalen Orientierung der dritten fehlerhaften Geraden zu einer der beiden bestehenden Geraden, verkleinert sich die Konditionszahl am effektivsten. Im angegebenen Fall wird damit ein Bereich der Fläche abgetrennt, der vom tatsächlichen Schnittpunkt weit entfernt ist. Diese grafische Interpretation kann auf größere lineare Gleichungssysteme übertragen werden. Die einfache Vorstellbarkeit endet aber mit einer 3x3-Matrix, wofür die mögliche Lösung des linearen Gleichungssystems in einem Volumen liegt. Zu bedenken ist aber stets, dass es durch die Überdeterminierung keine eindeutige Lösung bzw. definierten Schnittpunkt mehr gibt. Es kann aber ein von allen möglichen Schnittpunkten zugleich am wenigsten abweichender Punkt gefunden werden. Bei einer dazu eingesetzten Methode der kleinsten Fehlerquadrate trifft das auf quadratischen Abweichungen bzw. Residuen zu.

Nach [04], [16], [32] sollte die Überdeterminierung zur rechteckigen Matrix der F-a-TF der beste Weg sein, um ihre Konditionszahl effektiv zu senken, auch wenn das in niedrigen Frequenzbereichen nicht immer funktioniert, da dort nur wenige Eigenmoden bzw. eine geringe modale Überlappungen auftreten. Mit den zusätzlichen Beschleunigungen können im Vergleich zu den bereits vorhandenen eben nur begrenzt abweichende F-a-TF und Zeitdaten generiert werden, sodass frequenzabhängig immer Korrelation innerhalb der Messdaten vorhanden ist. Damit sie geringer ist, sollten die Beschleunigungssensoren zur Überdeterminierung nicht direkt bei den DoF liegen. Der Hinweis erfolgt deshalb, da mit einem dreiachsigen Beschleunigungssensor eine mechanische Schnittstelle abgedeckt und die anderen zwei Beschleunigungen zur Überdeterminierung genutzt werden können, wovon somit abzuraten ist.

Die erzielbare Reduktion der Konditionszahl hängt immer von den Positionen und Orientierungen der zusätzlich applizierten Beschleunigungssensoren bzgl. aller vorhandenen ab. Für diese sollten meinem Empfinden nach Abstände in den Größenordnungen von ca. 100 mm bis ca. 200 mm bei Anwendungen an Sfz zielführend sein. Das kann damit begründet werden, da sich dazwischen genügend Eigenmoden ausbilden sollten und alle DoF auf einer Seite der DG bzw. WK ohnehin kaum weiter als ca. 1500 mm getrennt sind.

Häufig wird, so wie in [03], [04] und [13] empfohlen, die Überdeterminierung mit einem Faktor von 2 umzusetzen. Im Sinne einer genaueren Lösung kann dieser Faktor noch größer sein, was aber nicht praxisnah ist. Ein großer Einfluss auf die Konditionszahl ist dann ohnehin nicht mehr zu erwarten, wie basierend auf Erfahrungen Abb. 03-13 zeigt.

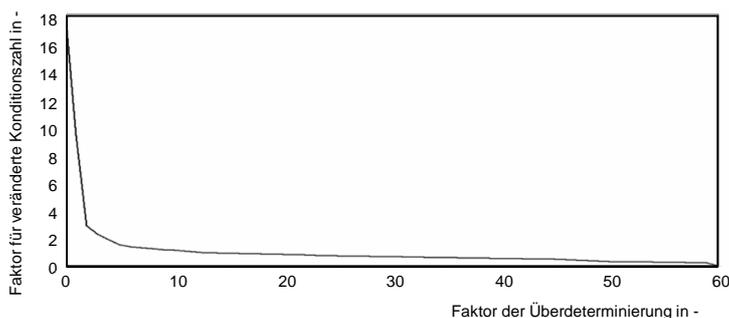


Abb. 03-13: Veränderung der Konditionszahl in Abhängigkeit vom Faktor der Überdeterminierung nach [04]

Falls eine schlecht konditionierte Matrix der F-a-TF vorhanden, aber die Überdeterminierung nicht mehr umsetzbar ist, kann eine regularisierte SVD zielführend sein. Die SVD wird in vielen Natur- und Geisteswissenschaften eingesetzt. Bei der KS-LS-TPA steht sie immer in Zusammenhang mit Regularisierungsmethoden. Die SVD einer rechteckigen Matrix stellt sich nach der dabei durchgeführten Zerlegung bzw. Auflösung, aus drei Matrizen mit jeweils charakteristischen Eigenschaften auf, was samt weiterer allgemeiner Informationen dazu aus [17], [18], [37] und [38] sinngemäß entnommen ist.

$$\mathbf{P} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{V}^* \quad (3.0)$$

\mathbf{P}	rechteckige Matrix bekannter linearer Zusammenhänge von (n) Ein- zu (m) Ausgängen
\mathbf{U}	quadratische orthogonale Matrix aus den (m) linken $(m \times 1)$ Singulärvektoren von \mathbf{P}
\mathbf{S}	rechteckige diagonal-besetzte Matrix mit Singulärwerten für (n) orthogonale Ein- zu (m) orthogonale Ausgänge von \mathbf{P}
\mathbf{V}	quadratische orthogonale Matrix aus den (n) rechten $(n \times 1)$ Singulärvektoren von \mathbf{P}

Singulärvektoren werden aus den Eigenvektoren der aufgelösten Matrix in Verbindung mit ihrer Adjungierten bzw. Transponierten erhalten. Zudem auch die reellwertigen Singulärwerte größer gleich 0, die in der Hauptdiagonale ihrer Matrix der Größe nach fallend angeordnet sind. Deren Anzahl entspricht dem Rang der zerlegten Matrix.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & \sigma_n \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3.p)$$

σ_n Singulärwert (n) von \mathbf{S} bzw. \mathbf{P}

Laut [36] geben Singulärwerte, als skalare Multiplikatoren zwischen zueinander orthogonalen Singulärvektoren bzgl. der Eingänge und solchen bzgl. der Ausgänge, jeweils die Relevanz zweier verknüpfter Singulärvektoren an. Orthogonalität liegt übrigens vor, wenn das Skalar-Produkt 0 ergibt. Durch Weglassen von durchwegs mit 0 besetzten Zeilen in der Matrix der Singulärwerte wird sie quadratisch. Damit werden auch bestimmte Singulärvektoren vernachlässigbar. Ist die zerlegte Matrix allerdings ohnehin quadratisch und nichtsingulär, erübrigt sich diese Vereinfachung zur Thin-SVD. In Abb. 03-14 ist genau das schematisch skizziert, was als Sonderfall nicht mehr explizit behandelt wird.

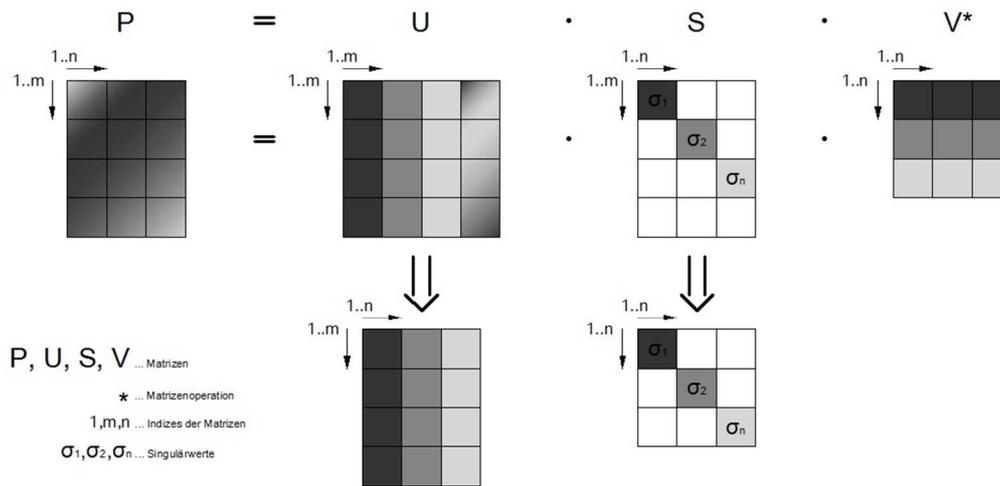


Abb. 03-14: Schema für die Reduktion der SVD einer rechteckigen Matrix zur Thin-SVD

Über das umgeformte lineare Gleichungssystem kann auch die Pseudoinverse der ursprünglichen Matrix angeschrieben werden, wobei dann die Kehrwerte der Singulärwerte auftreten. Die Anordnung ist damit aber gestürzt, also der Größe nach aufsteigend in der entsprechenden Hauptdiagonale.

$$P^+ = V \cdot S^+ \cdot U^* \tag{3.q}$$

$$S^+ = \begin{bmatrix} 1/\sigma_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 1/\sigma_2 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1/\sigma_n & 0 \end{bmatrix} \tag{3.r}$$

Wird die SVD bei einer KS-LS-TPA auf die Matrix der F-a-TF angewendet, kann ihr linear unabhängiges Pendant gefunden und es zur Berechnung der dynamischen Schnittkräfte eingesetzt werden.

$$H_{hg}^{a_m/F_{sch}} = (U \cdot S \cdot V^*)_{hg}^{a_m/F_{sch}} \tag{3.s}$$

$$F_{sch_{be,g}} = (V \cdot S^+ \cdot U^*)_{hg}^{a_m/F_{sch}} \cdot a_{m_{be,h}} \tag{3.t}$$

In [04] wird für die SVD einer solchen Matrix angegeben, dass mit der Umformung quasi voneinander unabhängig auftretende Eigenmoden bei der jeweiligen Eigenfrequenz beschrieben werden. Der erste Singulärwert, in der Hauptdiagonale seiner Matrix ganz oben, gehört zu jenem mit der stärksten Auslenkung. Diese Interpretation ist aber physikalisch nicht korrekt.

Je weiter unten ein Singulärwert sitzt und je kleiner er in Relation zum ersten ganz oben ist, umso problematischer ist er laut [16] und [39]. Das kann somit auch mehrere betreffen, abhängig von der Dimension der zerlegten Matrix. In den berechneten dynamischen Schnittkräften stehen sie in Verbindung mit Anteilen unerwünschter und irrelevanter Phänomene, z.B. Messrauschen. Diese Singulärwerte sind im Inversen Problem wegen der großen Kehrwerte aber verstärkt, was sich fehlerhaft auf die dynamischen Schnittkräfte

auswirken kann. Der Quotient zwischen größtem und kleinstem Singulärwert entspricht der Konditionszahl der zuvor aufgelösten Matrix. Sie verändert sich mit der SVD alleine also definitiv nicht.

Nach [16], [33] und [36] ist das mit dem frequenzabhängigen Bearbeiten, Filtern, Eliminieren, Löschen bzw. Ausscheiden dieser Singulärwerte aber erzwingbar. Deren Anteile in den dynamischen Schnittkräften verschwinden damit je nach Regularisierungsmethode teilweise oder völlig. Im Fall totaler Ausscheidung eines oder mehrerer Singulärwerte verringert sich der Rang des orthogonalen linearen Gleichungssystems entsprechend bei dieser Frequenz. Wird das zu sehr forciert, ergeben sich unplausible dynamische Schnittkräfte, was es zu vermeiden gilt. Dazu dienen Algorithmen, die das Bearbeiten abhängig von Parametern reglementieren. Es werden Filterfaktoren zwischen 0 und 1 eingesetzt, die multipliziert mit den Singulärwerten bzw. alternativ deren Kehrwerten, die entsprechenden Anteile an den dynamischen Schnittkräften regulieren.

$$\mathbf{S}_f^+ = \begin{bmatrix} f_1 \cdot 1/\sigma_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & f_2 \cdot 1/\sigma_2 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & f_n \cdot 1/\sigma_n & 0 \end{bmatrix} \quad (3.u)$$

\mathbf{S}_f^+ *regularisierte Pseudoinverse von S*
 f_n *Filterfaktor⁽ⁿ⁾ in \mathbf{S}_f^+*

Die Festlegung der Filterfaktoren kann laut [16] und [39] auf verschiedene Arten erfolgen. Am einfachsten ist es, eine fixe Anzahl an Singulärwerten zu behalten. Die Filterfaktoren sind bis zu einer zuvor festgelegten Ordnung durchgehend 1 und danach immer 0. Die Schwierigkeit in diesem rudimentären Ansatz liegt bei der manuellen Vorgabe, die für viele Frequenzen passend sein soll. Besser ist es deshalb, eine Grenze für die zulässige Konditionszahl festzulegen. Damit können für jede Frequenz unterschiedlich viele Singulärwerte mit Filterfaktoren von 0 ausgeschieden werden. Speziell für besonders hohe Konditionszahlen empfiehlt sich aber eine weichere Trennung durch gänzlich variable Filterfaktoren. Neben den Singulärwerten hängen sie von zusätzlich einzustellenden Parametern ab, die z.B. bei der Tikhonov-Regularisierung über die Kreuz-Validierung oder die L-Kurven-Methode festgelegt werden können. Alternativ können Filterfaktoren abhängig gemacht werden vom bekannten bzw. vermuteten Messrauschen in der Matrix der F-a-TF bzw. in den gemessenen Beschleunigungen. Ein Bezug dazu wird z.B. mit der Signal-Noise-Ratio-Methode hergestellt, wobei dann auch Singulärwerte und bestimmte manuell einzustellende Koeffizienten berücksichtigt sind.

Die Effektivität einer Regularisierungsmethode wird in [35] über die KS-LS-TPA an der Radaufhängung eines Kfz gezeigt. Trotz hoher Konditionszahlen zwischen ca. 1.000 und ca. 10.000 in der 24x24-Matrix der F-a-TF, werden mit der regularisierten SVD im relevanten Frequenzbereich ähnliche Resultate erzielt wie durch eine überdeterminierte 42x24-Matrix mit Konditionszahlen bis ca. 200.

Stellt man sich die generelle Frage, ob anstelle einer regularisierten SVD die Konditionierung nicht auch wirkungsvoll verbessert werden kann, indem Nebendiagonalelemente aus der

Matrix der F-a-TF aufgrund gewisser Kriterien ausgeschieden werden, so ist dies laut [04] klar zu verneinen, da das nur die Modellgüte verringert.

Ergänzend sei nach [02], [13] und [40] auch auf die Normalisierung, Skalierung bzw. Balancierung von Singulärwerten hingewiesen, was im Fall unterschiedlicher TF bzw. Einheiten innerhalb der Matrix der TF relevant ist. Kombiniert man in dieser z.B. F-a-TF und Q-a-TF, so sind hohe Konditionszahlen unvermeidbar und die Singulärwerte sind in zwei Gruppen geteilt. Mit einer Gewichtung dieser beiden Gruppen vor dem Einsatz einer Regularisierungsmethode, kann das mehr oder weniger behoben werden.

3.4.4. Operative-Körperschall-Luftschall-Transfer-Pfad-Analyse als Alternative

Die Präsenz der OTPA bzw. OPA, ferner Transmissibilitäts-Matrix-Methode genannt, hat in den letzten Jahren zugenommen. Hier werden neben Abläufen auch Vor- und Nachteile dieser mit Wirkungs-Wirkungs-Modellierung arbeitenden Einschrittmethode angegeben.

Nach [40], [41] und [42] wurde die KS-LS-OTPA aus einem in den 1990er Jahren publizierten Verfahren abgewandelt, mit dem bei Versuchsträgern mit Quellen für KS, die Beschleunigungen im Betrieb auf der Struktur an unzugänglichen Stellen aufgrund gemessener an erreichbaren Stellen eruiert werden. Die daraus abgeleitete KS-LS-OTPA ist seit Beginn des 21. Jhdt. im Automobilsektor im Einsatz. Daneben auch an komplex und/oder in geringen Stückzahlen gebauten Maschinen, Fahrzeugen, technischen Anlagen, etc. immer häufiger, z.B. im Industriebau oder in der Luftfahrtindustrie.

Vorteilhaft im Vergleich zur KS-LS-TPA ist vor allem das Wegfallen deren Schritt 1 in Ruhe des Versuchsträgers. Für die Transmissibilitäts-Pfade (TMP) bzw. KS-LS-TMP werden dann die TMF bzw. a-p-TMF, die keine Systemeigenschaften abbilden und nicht wie die kausalen F-p-TF zu interpretieren sind, nur über Messungen im Betrieb quantifiziert. Dieser muss dazu nicht prinzipiell unterbrochen werden. Es fallen damit etwaige Unsicherheiten weg, die mit separaten Messschritten verbunden sind. Die früher vorgestellte Direkte Variante der KS-LS-OTPA, in der die a-p-TMF direkt für die festzustellenden Pseudo-Teilschalldrücke dienen, arbeitet ohne dynamische Schnittkräfte. Die Indirekte Variante der KS-LS-OTPA dagegen mit solchen, wobei dann wieder der Vorteil des geringeren messtechnischen Aufwands wegfällt. Unabhängig davon ist für beide Varianten eine TMF zwischen senken- und quellseitiger Systemantworten im komplexwertigen Frequenzraum allgemein formulierbar.

$$T^{q/r}(j\omega) = \frac{q(j\omega)}{r(j\omega)} \quad (3.v)$$

$T^{q/r}(j\omega)$	<i>TMF zwischen Systemantworten im komplexwertigen Frequenzraum</i>
$q(j\omega)$	<i>Systemantwort senkenseitig im komplexwertigen Frequenzraum</i>
$r(j\omega)$	<i>Systemantwort quellseitig im komplexwertigen Frequenzraum</i>

Da meist mehr Sensorik an einem Versuchsträger appliziert ist, können viele separate TMF festgestellt und aus ihnen Matrizen aufgespannt werden. Es sind meist ein senkenseitiger

Schalldruck oder evtl. ein paar davon und diverse quellseitige Beschleunigungen vorhanden. Ihr Zusammenhang ist anschließend ohne die explizite Angabe von $(j\omega)$ formuliert.

$$\mathbf{q}_i = \mathbf{T}_{ig}^{q/r} \cdot \mathbf{r}_g \quad (3.w)$$

$\mathbf{T}_{ig}^{q/r}$	Matrix der $(i \times g)$ TMF von (g) Systemantworten quellseitig zu (i) Systemantwort senkenseitig
\mathbf{q}_i	Vektor der $(i \times 1)$ Systemantworten senkenseitig
\mathbf{r}_g	Vektor der $(g \times 1)$ Systemantworten quellseitig

Nach [13], [25] [31], [36] und [41] ist dazu eine spezielle Messdatengenerierung und -verarbeitung in einer KS-LS-OTPA notwendig. Die gemessenen Zeitdaten sind in Blöcke zu unterteilen, bevor sie innerhalb dieser mittels FFT in den Frequenzraum zu bringen sind. Bei separaten stationären Betriebsmodi ist das naheliegend. Aus instationären Betriebsmodi sind für die Blöcke zeitliche Sektionen mit quasistationärem Verhalten zu trennen. Dazu können wenige Sek. je Block ausreichen. Eine Überdeterminierung durch mehr Blöcke als darin befindliche Beschleunigungen ist ratsam. Alle Beschleunigungen und Schalldrücke im Frequenzraum sind bzgl. der anderen Blöcke als unabhängig anzusehen. Wegen Fehlereinflüssen in all diesen sind aber nur voneinander abweichende Matrizen der a-p-TMF bestimmbar. Das gesuchte lineare Gleichungssystem soll aber für alle Blöcke gültig sein. Dazu braucht es eine optimierte Matrix der a-p-TMF, wozu unter anderem die Pseudoinverse der Matrix der Beschleunigungen zu bilden ist.

$$\begin{bmatrix} q_{11} & \cdots & q_{1b} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{i1} & \cdots & q_{ib} \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} T_{11}^{q/r} & \cdots & T_{1g}^{q/r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{i1}^{q/r} & \cdots & T_{ig}^{q/r} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1b} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{g1} & \cdots & r_{gb} \end{bmatrix} \quad \text{für alle Blöcke} \quad (3.x)$$

$$\mathbf{T}_{ig}^{q/r} := \mathbf{Q}_{ib} \cdot (\mathbf{R}_{gb})^+ \quad \text{für alle Blöcke} \quad (3.y)$$

\mathbf{Q}_{ib}	Matrix der $(i \times b)$ Systemantworten senkenseitig für alle Blöcke
\mathbf{R}_{gb}	Matrix der $(g \times b)$ Systemantworten quellseitig für alle Blöcke

Laut [36] und [41] ist diese Pseudoinverse zum einen entweder mit einer Methode der kleinsten Fehlerquadrate abschätzbar, oder zum anderen durch eine SVD eruiert.

$$(\mathbf{R}_{gb})^+ = \left((\mathbf{R}_{gb})^T \cdot \mathbf{R}_{gb} \right)^{-1} \cdot (\mathbf{R}_{gb})^T \quad (3.z)$$

$$(\mathbf{R}_{gb})^+ = (\mathbf{V} \cdot \mathbf{S}^+ \cdot \mathbf{U}^*)_{gb} \quad (3.\alpha)$$

Bzgl. dieser SVD ist mit den dann orthogonalen a-p-TMF laut [13], [40] und [36] auch die Rede von Kompensation bzw. Löschung des XT. Zur Begrenzung der Fehlereinflüsse empfiehlt auch sich das Filtern der Singulärwerte.

Wie für den Ablauf einer KS-LS-OTPA in [15] und [36] angegeben ist, erfolgt mit den grob identifizierten Quellen für KS und festgelegten Senken für LS die Installation der Sensorik. Zur Wahl der besser geeigneten Methode zur Berechnung der Pseudoinverse der Matrix der

Beschleunigungen, sollten zwischen allen darin die Kohärenz-Funktionen berechnet und analysiert werden. Bei frequenzabhängiger Kohärenz über ca. 0,3 sollte eine regularisierte SVD genutzt werden und nicht eine Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Mit der optimierten Matrix der a-p-TMF und gemessenen Beschleunigungen sind Pseudo-Teilschalldrücke feststellbar bzw. zur Pseudo-Evaluierung ein Pseudo-Gesamtschalldruck, der hier für eine Senke angegeben ist.

$$q_{i_zer}^g = T_{ig}^{q/r} \cdot r_g \quad (3.\beta)$$

$$q_{i_zer} = \sum_g q_{i_zer}^g \quad (3.\gamma)$$

$q_{i_zer}^g$	<i>Pseudo-Teilantwort ⁽¹⁾ senkenseitig aufgrund Systemantwort ⁽²⁾ quellseitig</i>
q_{i_zer}	<i>Pseudo-Gesamtantwort ⁽¹⁾ senkenseitig aufgrund ⁽²⁾ Systemantworten quellseitig</i>

Nach [25] und [41] ist die zuvor festgelegte Anzahl berücksichtigter Beschleunigungen besonders relevant. Von den real vorhandenen Quellen für KS werden manchmal nicht alle vorab richtig identifiziert und damit berücksichtigt. Wenige, klar getrennte und unabhängig voneinander agierenden Quellen für KS, erleichtern die Festlegung. Bei der Positionierung und Orientierung der Beschleunigungssensoren ist sonst sehr ähnlich wie in der KS-LS-TPA nach Matrix-Inversions-Methode vorzugehen.

Laut [15], [42] und [43] wirkt sich eine bzgl. einer mechanischen Koppelstelle sehr nahe dazu aufgenommene Beschleunigung positiv auf die Präsenz der Hauptdiagonale in der später optimierten Matrix der a-p-TMF und das mögliche Potential der KS-LS-OTPA aus. Das ist auf eine besser konditionierte Matrix der Beschleunigungen zurückzuführen.

In [31] und [40] ist bzgl. Anzahl, Positionierung und Orientierung der zu applizierenden ein- oder dreiachsigen Beschleunigungssensoren angegeben, dass bei mehreren indizierten Achsenrichtungen einer mechanischen Koppelstelle deren teilkohärente Beschleunigungen nachteilig sind. Dafür kann mit mehreren KS-LS-TMP feiner differenziert werden. Die Zerlegung des Schalldrucks sollte, wenn am Versuchsträger sonst alle relevanten Quellen für KS indiziert sind und Quellen für LS keine Rolle spielen, theoretisch gleichwertig erfolgen. D.h. die Summe der Pseudo-Teilschalldrücke mehrerer Achsenrichtungen eines DoF sollte jenem Pseudo-Teilschalldruck entsprechen, der mit einer Achsenrichtung erzielt wird. Es liegen für genau diesen KS-LS-TMP in beiden Fällen aber abweichende a-p-TMF vor. Falls eine Quelle für KS in einer Achsenrichtung fälschlicherweise doppelt indiziert wird, sind mit praktisch identen und somit vollständig kohärenten Beschleunigungen zwei Pseudo-Teilschalldrücke zu erwarten, deren Summe einer korrekterweise einfachen Indizierung entspricht. Fehlt hingegen die Indizierung einer relevanten Anregung komplett, hat das Auswirkungen abhängig von ihrer Kohärenz zu den korrekt indizierten Anregungen, was in Abb. 03-15 angedeutet ist.

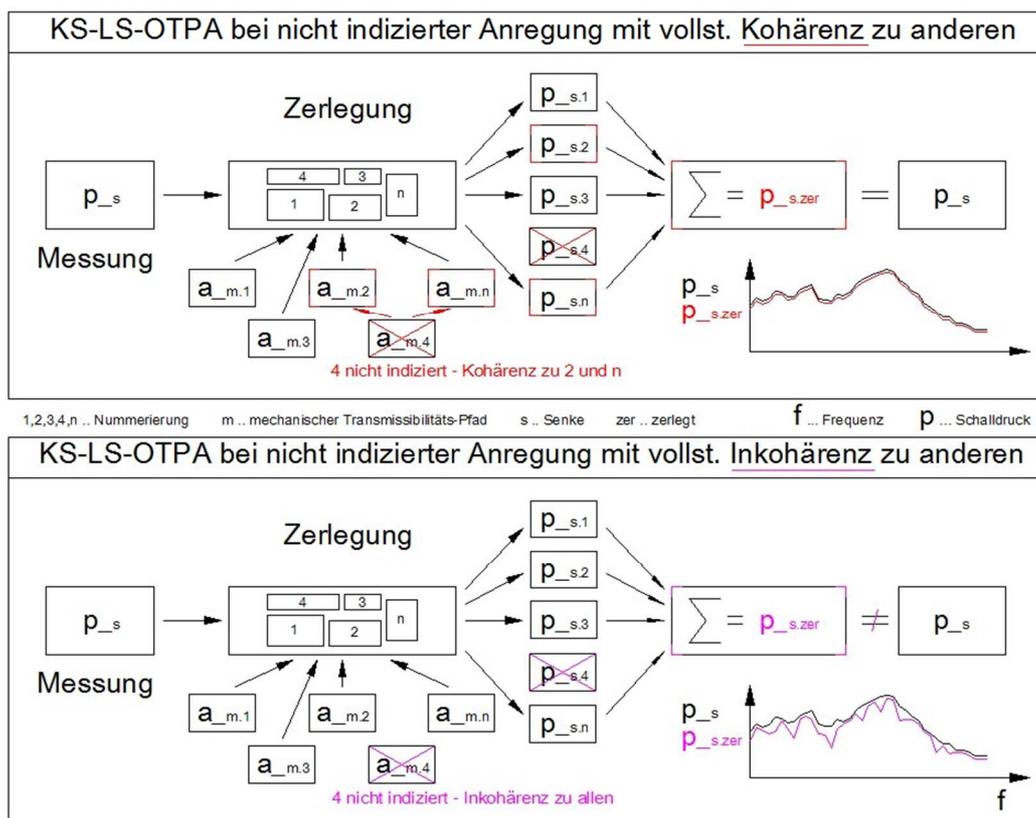


Abb. 03-15: Einfluss der Kohärenz unberücksichtigter Quellen für KS in einer KS-LS-OTPA

Nach [13], [25], [31] und [36] scheint für die unberücksichtigte Anregung weder eine a-p-TMF noch ein Pseudo-Teilschalldruck auf, jedoch wird sie teilweise oder komplett auf die indizierten Anregungen bzw. deren a-p-TMF und Pseudo-Teilschalldrücke aufgeteilt. Das Ausmaß hängt von frequenzabhängigem XT, applizierten Beschleunigungssensoren, sowie Kohärenz der nicht indizierten zu den berücksichtigten Anregungen ab. Wird der Pseudo-Gesamtschalldruck gebildet, stimmt dieser, im Fall einer fehlenden Anregung mit vollständiger Kohärenz zu beliebig vielen der berücksichtigten, mit jenem überein, falls diese nicht fehlt. Er entspricht dann auch relativ gut dem gemessenen Schalldruck, weshalb die Pseudo-Evaluierung den fehlerhaften Umstand nicht aufdeckt. Anders dagegen bei vollständiger Inkohärenz der nicht indizierten Anregung. Davon bleiben die vorhandenen a-p-TMF und Pseudo-Teilschalldrücke unbeeinflusst. Die Pseudo-Evaluierung deckt den fehlerhaften Umstand durch eine größere Differenz zwischen Pseudo-Gesamtschalldruck und gemessenem Schalldruck auf. In der Praxis wird aber keiner der beiden Fälle ausschließlich zutreffen, da immer Teilkohärenz zu erwarten ist und zudem Quellen für LS relevant sein können.

Es ist wichtig zu verstehen, dass eine gute Übereinstimmung zwischen Pseudo-Gesamtschalldruck und gemessenem Schalldruck prinzipiell gut ist, aber kein hinreichendes Indiz für eine qualitativ gute KS-LS-OTPA. Man darf auch nicht vergessen, dass eine aus allen Blöcken optimierte Matrix der a-p-TMF viele nichtlineare Einflüsse überdeckt. Im Fall einer regularisierten SVD der Matrix der Beschleunigungen ist zudem das lineare Gleichungssystem frequenzabhängig oder im gesamten Frequenzraum verändert.

Tragen alle real vorhandenen Quellen für KS ähnlich zum Schalldruck bei, dann sind laut [13], [31] und [41] bei vollständiger Indizierung die a-p-TMF und Pseudo-Teilschalldrücke am hochwertigsten. Sie haben zwar prinzipiell einen geringeren Nutzen als ihre Pendanten der KS-LS-TPA, jedoch sollten bei korrekter Umsetzung selbige Interpretationen möglich sein. Das hängt auch von den Betriebsmodi und den generierten Blöcken ab. Messrauschen ist je nach Länge der zeitlichen Segmente und umgesetzter FFT ein weiteres Thema. Separat angefahrte Betriebsmodi sind besser geeignet als solche, die aus Hochläufen geschnitten werden und nur quasistationär sind. In den unterschiedlichen Blöcken ist es von Vorteil, wenn dieselben Quellen für KS mit ähnlichen Anteilen zum Schalldruck beitragen. Das gilt auch bei variierenden Lasten und/oder Drehzahlen, was besser für eine geringe Kohärenz zwischen den Blöcken in der Matrix der Beschleunigungen ist und ihr speziell bei niedrigen Frequenzen mit stärkerem Übersprechen eine bessere Konditionierung verschafft.

Wie in [43] zur Positionierung der Beschleunigungssensoren vermerkt ist, kann bei mechanischen Koppelungen mit eindeutigen aktiven und passiven Seiten die Indizierung zwar auf beiden Seiten erfolgen, allerdings sind an den jeweils aktiven Seiten inkohärente Beschleunigungen möglicherweise leichter feststellbar. Unabhängig davon ist es am gesamten Versuchsträger konsistent umzusetzen. Bei größeren elastischen Verformungen mit linearem Verhalten kann auch beidseitig indiziert werden. Durch zweimalige zeitliche Integration der Differenzen der Beschleunigungen können dynamische Verformungen als quellseitige Systemantworten genutzt werden, was eine diagonal-besetzte optimierte Matrix der s-p-TMF mit kausalen Zusammenhängen für genauere Ergebnisse zulässt. Zudem können mit etwaig bekannten dynamischen Steifigkeiten der mechanischen Koppelungen auch dynamische Schnittkräfte berechnet werden, so wie es sonst nur der Indirekten Variante der KS-LS-OTPA vorbehalten ist.

Ähnlich wird eine mehrfache Indizierung in [42] beschrieben, jedoch um einen KS-LS-TMP für feinere Analysen in mehrere Sektionen zu unterteilen. Einige separate a-a-TMF und eine abschließende a-p-TMF ergeben in Serie wieder eine a-p-TMF, die gültig ist von der, zur Quelle für KS am nächsten gemessenen Beschleunigung, zum senkenseitigen Schalldruck.

Nach [30] und [29] dienen in der Indirekten Variante der KS-LS-OTPA diverse TMF dazu, um in der damit wieder verfolgten Zwischrittmethode zur Ursache-Wirkungs-Modellierung zu gelangen. Dazu sind neben den a-p-TMF im Betrieb auch \dot{Q} -a-TF mittels Reziprok-Methode in Ruhe festzustellen. Letztere werden aber nicht den F-p-TF bei direkter künstlicher Anregung gleichgesetzt, sondern den nicht zugänglichen F-p-TMF im Betrieb. Mit der Zusammenführung beider separater Messschritte können F-a-TMF abgeleitet werden, die mit betrieblichen Beschleunigungen wie in der KS-LS-TPA nach Matrix-Inversions-Methode zu verarbeiten sind. Für solche F-a-TMF ist eine gleiche Qualität angegeben wie für die mittels Impulshammer-Methode eruierten F-a-TF. Der zusätzliche Aufwand hält sich dank der Reziprok-Methode zwar in Grenzen, jedoch sind immer mindestens so viele Mikrofone einzusetzen bzw. Orte mit der Volumen-Schallquelle künstlich anzuregen, wie letztendlich dynamische Schnittkräfte gefragt sind. Diese Orte sollen gewisse geometrische Abstände nicht unterschreiten, damit zueinander inkohärente Schalldrücke leichter möglich sind. Teil- und Gesamtschalldrücke werden dann wie in der KS-LS-TPA berechnet und so interpretiert.

4. Bestehendes Verfahren: Einsatz an einem Schienenfahrzeug

In diesem Kapitel wird ein typischer Versuchsträger hinsichtlich seines technischen Aufbaus vorgestellt und bzgl. der akustischen und/oder vibroakustischen Eigenschaften untersucht. Am betreffenden Triebzug wurde im Jahr 2012 eine Messkampagne durchgeführt, was der „bisherigen“ TPA diene. Ein schematischer Überblick dazu gibt die trotz der vielen Vereinfachungen relativ aufwändige Vorgehensweise an, die bisher für jegliche Sfz zum Einsatz kam. Dazu werden auch die zugehörigen Ergebnisse quantitativ aufgezeigt.

4.1. Versuchsträger

4.1.1. Eckdaten und Aufbau

Laut [44] zählen die Triebzüge des Typs Velaro zu den schnellsten weltweit. In einer serienmäßigen Variante wurden bereits über 400 km/h erreicht. Achtteilig konzipiert, ist er auch in 7-, 10- oder 16-teiliger Ausführung mit verschiedenen Spurweiten, Breiten der WK, Innenausbauten, etc. für bis zu vier Netzsysteme adaptierbar. Als Velaro D BR 407 wird er von der Deutsche Bahn AG für den grenzüberschreitenden Schienenverkehr eingesetzt. Um die Ausmaße und Eigenschaften fassbar zu machen, sind einige gerundete Eckdaten in Abb. 04-01 angegeben.

Eigenschaftsmerkmale - Velaro D BR 407	Eckdaten gerundet
Wägen / Achsen gesamt / angetrieben bzw. Fahrmotoren	8 / 32 / 16
Sitzplätze (EW8 bzw. TW7)	460 (64 bzw. 72)
Länge / Breite / Höhe / Spurweite	200,720 m / 2,920 m / 4,340 m / 1,435 m
Drehzapfenabstand / Radsatzabstand	17,375 m / 2,500 m
Eigenmasse lauffähig und unbeladen	454 to
maximale Nutzlast / maximale Radsatzlast	74 to (160 kg je Sitzplatz) / 17 to
maximale Traktionsleistung bei Wechsel- bzw. Gleichstrom	8000 kW bzw. 4200 kW
maximale Anfahrzugkraft / mittlere Anfahrbeschleunigung	300 kN / 0,5 m/s ² (0 bis 120 km/h)
zulässige Höchstgeschwindigkeit	320 km/h

Abb. 04-01: Gerundete Eckdaten des Velaro D BR 407 nach [SI] und [45]

Es erfolgt eine Unterteilung der Wägen in vier Kategorien zu je zwei fast identen Wägen. Das sind Endwägen (EW), Trafowägen (TW), Stromrichterwägen (SW), und Mittelwägen (MW). Abhängig von ihrer Funktion und Eingliederung sind sie technisch unterschiedlich aufgebaut und im Innenausbau ausgeführt. Ein Merkmal von Triebzügen ist, dass Traktionsaggregate verteilt sind. Abb. 04-02 zeigt das farblich markiert und zudem die Anordnung der Wägen.



Abb. 04-02: Anordnung der Wägen und verteilte Traktionsaggregate des Velaro D BR 407, [SI]

4.1.2. Unterflur- und Dachkomponenten, Drehgestelle und Traktionsaggregate

Die Rohbauten der WK sind nach [SI] in Aluminium-Integralbauweise aus verschweißten Profilen und Blechen gefertigt. Bei den unterflur befindlichen DG ist zu unterscheiden zwischen Triebdrehgestell (TDG) und Laufdrehgestell (LDG). Weitere dort angebrachte Unterflurkomponenten zählen teils zu den Traktions- oder Hilfsaggregaten. Auch ein Teil der Dachkomponenten zählt zu diesen. Alle acht Wägen haben dort oben ihre Klimaanlage. Die Führerstände sind mit separaten Klimaanlage ausgestattet. Über den beiden MW sind kinematisch aus ihrer Ruhelage ausfahrbare Pantographen für Wechselstrom je doppelt, auf den beiden TW für Gleichstrom je einfach vorhanden. Das Hochdach, eine mittig über den beiden EW beginnende Verkleidung, die sich nach oben abgesetzt über die Wägen dazwischen erstreckt, wirkt sich unter anderem positiv auf Aerodynamikgeräusche aus, z.B. bei Tunneleinfahrt. Auch Aggregatgeräusche der darunter befindlichen Dachkomponenten werden abgeschirmt. Unterflur haben alle Wägen ihre Fortluftgeräte verbaut. Die beiden Fahrmotoren eines TDG werden mit je einem unterflur angebrachten Fahrmotorlüfter gekühlt. Diese Wägen haben dort auch je einen Stromrichter samt dazugehöriger Kühlanlage. Bei solchen mit LDG ist dafür ein zwangsbelüfteter Energieversorgungsblock montiert. Ein Haupttransformator samt Kühlanlagen ist unter jedem TW aufgehängt. Beide MW haben unterflur je einen Luftpresser. Alle erwähnten Unterflur- und Dachkomponenten sind schalltechnisch mehr oder weniger relevant. Ihre Integration ist in Abb. 04-03 referenziert, wobei darin der Bereich der Messkampagne bzgl. EW8 und TW7 mit dem dazu auch extra festgelegten Fahrzeugkoordinatensystem gekennzeichnet sind.

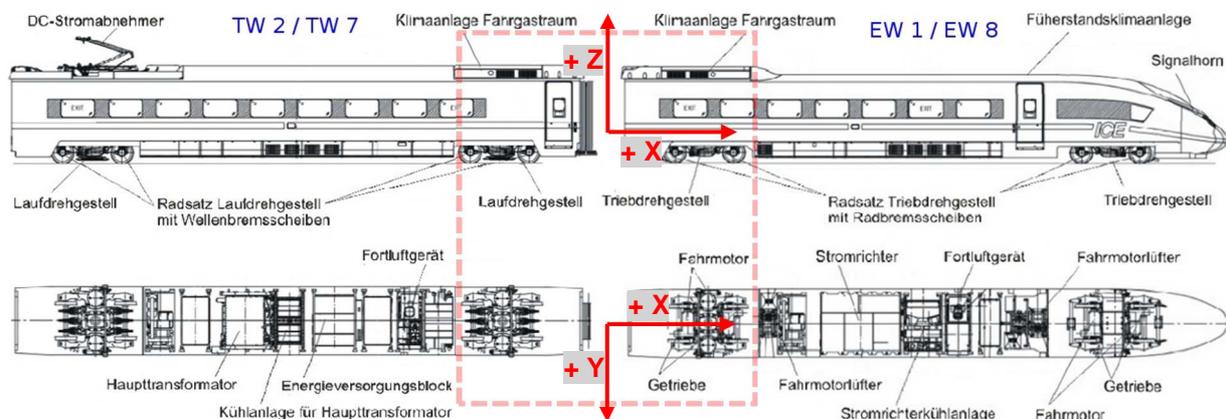


Abb. 04-03: Schalltechnisch relevante Komponenten von EW8 und TW7 des Velaro D BR 407, [SI]

Die verbauten DG tragen die übergeordnete Bezeichnung SF 500 DG. Die „bisherige“ TPA betraf ein TDG des EW8 und ein LDG des TW7. Der Aufbau beider ist hier aufgeschlüsselt. Das dient auch zum Verständnis, wo und wie KS in einen WK gelangt, sodass er darin hör- und/oder spürbar wird. Abb. 04-04 zeigt als CAD-Modelle die ident bauende mechanische Verbindung zum WK der beiden teils baugleichen DG.

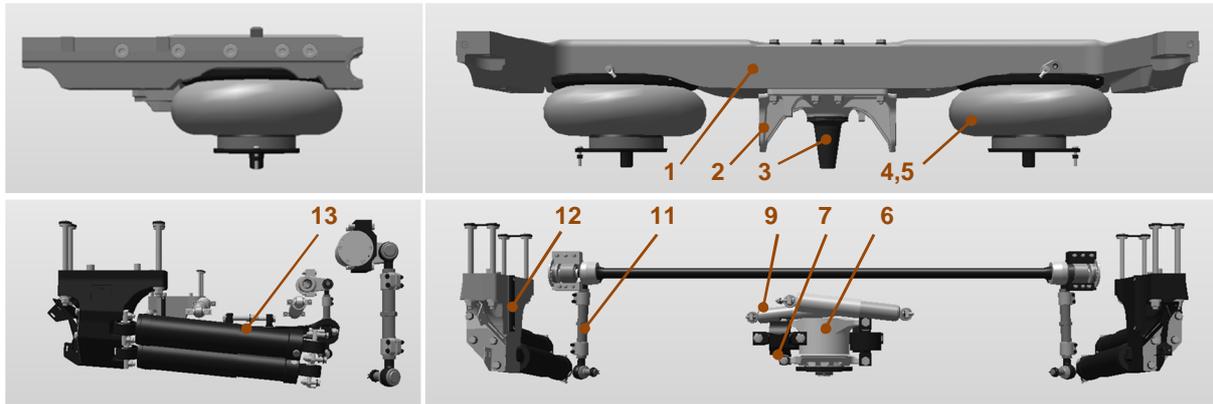


Abb. 04-04: Mechanische Verbindung der beiden SF 500 DG zum WK nach [SI]

In [46] und [47] wird erklärt, dass ein betreffendes DG mit seinem WK bzw. dessen beidseitig unterflur ganz außen befindlichen Längsträgern (LT) über die Traverse /1/ verbunden ist, die aus produktionstechnischer Sicht zum DG zählt. Eine mittig unter ihr verschraubte Drehzapfenkonsole (DZK) /2/ bzw. deren Drehzapfen /3/ überträgt hauptsächlich Längskräfte zwischen DG und WK, also Antriebs- und/oder Bremskräfte. Die Sekundärfederstufe, ausgeführt als links und rechts am DG stehendes Luftfedersystem, überträgt vertikal bzw. normal zu ihrer Auflageebene wirkende Kräfte. In den Bälgen /4/ stehende Notfedern /5/ sichern das Luftfedersystem ab, für das der Hohlraum der geschweißten Traverse ein Zusatzvolumen bietet. Der Drehzapfen wird seitens des DG durch das Joch /6/ ummantelt, wobei über zwei Lemniskatenlenker /7/ eine Verbindung mit dem H-Rahmen /8/ besteht. Relativbewegungen normal zur Gleisachse werden mit den Querdämpfern /9/ zwischen DZK und H-Rahmen reduziert und zusätzlich mit Querpuffern /10/ begrenzt. Beidseitig am DG kommen verbundene Wankstützen (WS) /11/ zum Einsatz, um die Neigung des WK zu stabilisieren. Die ebenfalls beidseitig fast horizontal zwischen angeschraubten Konsolen am LT des WK /12/ und H-Rahmen des DG eingebauten hydraulischen Drehdämpfer (DD) /13/ bzw. Schlingerdämpfer, sorgen in redundanter Ausführung bei höheren Geschwindigkeiten für mehr Stabilität, wenn durch den Sinuslauf prinzipiell bedingte oszillierende Drehbewegungen des DG um seine mittig gedachte vertikale Achse relevant sind. Die aufgezählten Komponenten sind integriert in die H-Rahmen von TDG und LDG als CAD-Modelle ersichtlich in Abb. 04-05, wobei es durch die Messkampagne bzgl. der WK innen und außen, links und rechts, sowie nummerierte Achsen gibt.

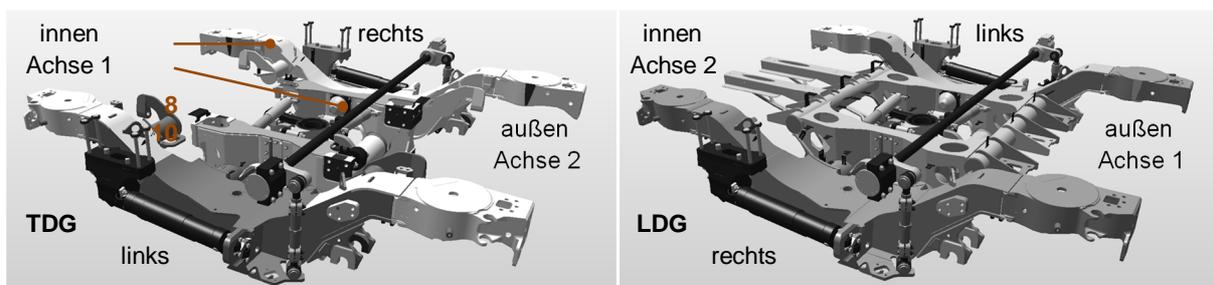


Abb. 04-05: H-Rahmen der beiden SF 500 DG nach [SI]

Laut [46] sind beide Radsätze eines DG mittels horizontal verlaufender Radsatzführungen am H-Rahmen befestigt, welche die Antriebs- und/oder Bremskräfte übertragen. Das geschieht auch über die Radsatzlagergehäuse auf den Wellen- bzw. Achsenden. Die Fixpunkte am H-Rahmen sind elastisch ausgeführt, sodass eine vertikale und horizontale Beweglichkeit gegeben ist. Der bei TDG und LDG unterschiedlich ausgeführte Radsatz hat eine mehrfach abgesetzte Welle bzw. Achse mit aufgeschumpften Rädern. Mittig verteilt auf der Achse eines LDG sind drei Wellenbremsscheiben angeschraubt. Bei den TDG werden dagegen Radbremsscheiben jeweils beidseitig der Räder verbaut. Die Bremszangen sind somit an beiden H-Rahmen an unterschiedlichen Positionen. Bei jedem LDG ist außerdem eine Wirbelstrombremse unter dem H-Rahmen befestigt. Die Primärfederung ist die insgesamt vierfach ausgeführte vertikale Verbindung von den Radsatzlagergehäusen zum H-Rahmen. Parallel zu diesen doppelten Schraubenfedern befinden sich auch immer hydraulische Vertikaldämpfer.

Nach [48] setzen sich beide H-Rahmen prinzipiell aus Blechen, Rohren, Schmiede- und Gussteilen zusammen. Konstruktiv sind es zwei durchgekröpfte Träger und dazwischen eine Brücke, die quer dazu nochmals durch zwei kleinere rohrförmige Träger verschweißt ist. Beide quer zur Gleisachse verbauten Drehstrom-Asynchronmotoren sind an einen Hilfsrahmen befestigt, der zum H-Rahmen über beidseitige Blattfedern und Dämpfer elastisch gekoppelt ist. Die Verbindung zu den beiden achsreitenden einstufigen Stirnradgetrieben, die jeweils über Schichtfedern am H-Rahmen hängen, erfolgt mittels Bogenzahnkupplungen.

Bzgl. der 16 Fahrmotoren des Velaro D BR 407 ist noch zu erwähnen, dass zum Erreichen ihrer vom Netzsystem unabhängigen Funktion, ein modulierter Dreiphasen-Wechselstrom über die vier Stromrichter zur Verfügung gestellt wird. Diese dienen der Ansteuerung, indem durch die Erhöhung der Spannung ein stärkeres Drehmoment und durch die Erhöhung der mittels Pulsmuster angenäherten sinusförmigen Frequenz eine höhere Drehzahl erzwungen wird. Bei Netzsystemen mit Wechselstrom wird die Spannung zuvor über die Haupttransformatoren reduziert, was bei Netzsystemen mit Gleichstrom entfällt. Die Verzögerung erfolgt je nach verfügbarer Zeit durch Ausrollen bzw. Generator-, Wirbelstrom- und/oder Scheibenbremsung.

4.1.3. Schalltechnische Eigenschaften und vibroakustische Einträge

Alle Verursacher schalltechnischer Phänomene lassen sich nach Häufigkeit und Charakter in Dauer- und Kurzzeitgeräusche unterteilen. Erstere sind zurückzuführen auf Roll- und Aggregatgeräusche. Aerodynamikgeräusche sind hier ausgenommen. Kurzzeitgeräusche sind zeitlich gesehen nur in Bruchteilen relevant und sind meist bedingt durch Quellen für LS. Diese zeitlichen Segmente sind möglichst auszuschließen.

Nach [SI] gilt die Annahme, dass der Velaro D BR 407 aus schalltechnischer Sicht um seine mittig zwischen beiden MW gedachte y-z-Ebene symmetrisch ist. Für die in der z-x-Ebene gespiegelten Seiten links und rechts gilt das für alle Wägen mit Ausnahme der beiden MW.

Um eine Einordnung der noch folgenden Pegelangaben bzgl. der Schalldrücke im Innenraum des Velaro D BR 407 möglich zu machen, ist in Abb. 04-06 aus den vertraglich vereinbarten bzw. gesetzlich reglementierten schalltechnischen Zielwerten ein kleiner Auszug angegeben, wobei diese energieäquivalenten Dauerschalldruckpegel auf bestimmten Sfw bei genau vorgegebenen Betriebsmodi einzuhalten waren, was problemlos erreicht wurde.

Ort im Velaro D BR 407; Betriebszustand	Gültigkeit und Feststellung	Zielwert in dB(A) re 2e-5 Pa
Fahrgastraum Sitzbereich; $v \leq 300\text{km/h}$	energ. im Raum gemittelt	$L_p \text{ Aeq} = 70$
	max. zul. Einzelwert	$L_p \text{ Amax} = 72$
Fahrgastraum Sitzbereich; Stand	energ. im Raum gemittelt	$L_p \text{ Aeq} = 55$
	max. zul. Einzelwert	$L_p \text{ Amax} = 58$
Übergang; $v \leq 300\text{km/h}$	energ. im Raum gemittelt	$L_p \text{ Aeq} = 81$
	max. zul. Einzelwert	$L_p \text{ Amax} = 83$

Abb. 04-06: Auszug der schalltechnische Zielwerte für den Innenraum des Velaro D BR 407 nach [SI]

Aufgrund der durch die Messkampagne vorhandenen Zeitdaten, können die Auswirkungen der schalltechnischen Phänomene betreffend der Innenräume gezeigt werden. Das ist anschließend für einen relativ kontinuierlich beschleunigten Hochlauf von ca. 10 km/h bis ca. 145 km/h angegeben, wobei es sich in Abb. 04-07 um Schalldrücke an vergleichbaren Orten in EW8 und TW7 handelt.

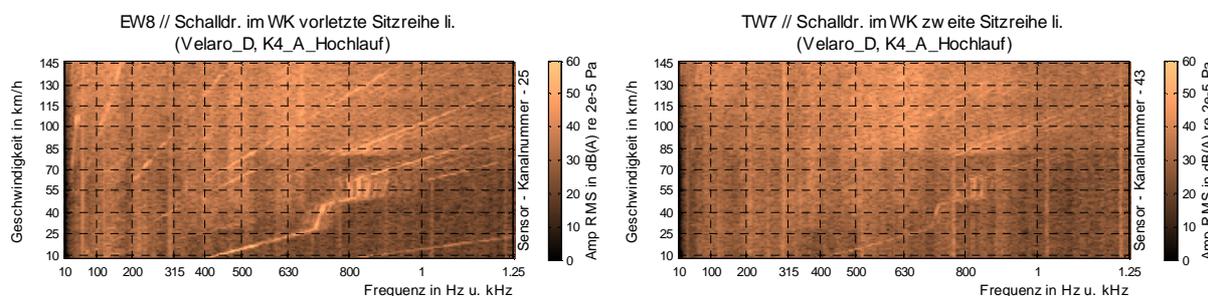


Abb. 04-07: EW8, TW7, K4_A_Hochlauf // Campbellplots für Schalldruck im WK

Bei diesen beiden und noch folgenden Campbellplots handelt es sich um berechnete Schmalbandspektren, die gültig sind für den auf der horizontalen linearen Achse zwischen 10 Hz und 1,25 kHz mit einer Bandbreite von 1 Hz angegebenen Frequenzraum. Sie sind zudem abhängig von der Zeit berechnet, im konkreten Fall von den 61 Sek. des Hochlaufs, indiziert durch die in der linearen senkrechten Achse aufgetragene Geschwindigkeit. Farblich differenziert ist der jeweils zugehörige Schalldruck in dB(A) re 2e-5 Pa angegeben. Diese Campbellplots sind mit einer in der Akustikgruppe des Industriepartners in Matlab[®] entwickelten Funktion generiert. Diese verarbeitet gemessene Zeitdaten wie die interne Funktion „time2nb(..)“, die bei der Analyse der „bisherigen“ TPA noch behandelt wird.

Schräg verlaufend sind die systematisch bedingten und von der Geschwindigkeit abhängigen periodischen Anregungen bzw. deren akustische und/oder vibroakustische Auswirkungen erkennbar. Solche gibt es über die Rad/Schiene-Kontakte und zugleich durch die Traktions- und Hilfsaggregate. Aerodynamikgeräusche sind erst bei noch höheren Geschwindigkeiten als hier angegeben relevant, was dann auch über einen breiteren Frequenzbereich ersichtlich ist. Jene Dauer- und Kurzzeitgeräusche, die sich von der Geschwindigkeit unabhängig verhalten, äußern sich durch vertikal verlaufende Sektionen. Sind sie breitbandig bzw. treten sie zufällig über die Rad/Schiene-Kontakte auf, haben sie auch eine horizontale Ausdehnung im Frequenzraum. Die auffälligen Stufen, speziell ersichtlich für den EW8, können durch geänderte Pulsmuster bei der Ansteuerung der Fahrmotoren erklärt werden, womit sich auch die Anregungen des Antriebssystems samt Auswirkungen im WK ändern.

Charakteristisch auftretende Frequenzen lassen sich teils vorherbestimmen. Hier sind solche der Roll- und Aggregatgeräusche gemeint, die als zusätzliche Informationen in einer KS-LS-TPA zur Feststellung möglicher Ursachen vibroakustischer Probleme hilfreich sein können.

Spezifisch und unabhängig vom Sfw treten durch jedes Rad periodische Anregungen bzw. höhere Harmonische davon auf. Eine höhere Harmonische ist allgemein ein ganzzahliges Vielfaches bzw. eine bestimmte Ordnung einer grundlegenden Frequenz, die in diesem Zusammenhang bzgl. der geometrischen Exzentrizität des drehenden Rades gegeben ist.

$$f_{per.Rad} = \frac{t_{Rad} \cdot v_{Sfz}}{3,6 \cdot d_{Rad} \cdot \pi} \quad (4.a)$$

$f_{per.Rad}$	<i>Frequenz der periodischen Anregung durch das Rad in Hz</i>
t_{Rad}	<i>Ordnung der periodischen Anregung durch das Rad in -</i>
v_{Sfz}	<i>Geschwindigkeit des Sfz in km/h</i>
d_{Rad}	<i>mittlerer Raddurchmesser in m</i>

Beim Velaro D BR 407 fällt die geometrische Exzentrizität des neuen Rades z.B. bei 100 km/h auf ca. 9 Hz. Bzgl. der relevanten Frequenzbereiche einer KS-LS-TPA sollten höhere Harmonische auch bei Höchstgeschwindigkeit erst ab der 3. Ordnung relevant sein.

Zusätzlich gibt es von der Geschwindigkeit abhängige periodische Anregungen bedingt durch die Ausführung des Oberbaus, z.B. die Schwellenfachfrequenz durch gegebene Abstände zwischen Schwellen oder Schienenbefestigungselementen. Lokal treten auch makroskopische Fehler auf der Schienenfahrfläche, z.B. Riffel, Wellen, etc. und/oder Störungen im Oberbau, z.B. Gleislagefehler, usw. auf. Sie verursachen periodische Anregungen. Nicht direkt als Fehler zu werten sind Mechanismen auf mikroskopischer Ebene, also immer vorhandene feinere Rauigkeiten der Schienenfahrfläche.

$$f_{per.Gleis} = \frac{v_{Sfz}}{3,6 \cdot \lambda_{Gleis}} \quad (4.b)$$

$f_{per.Gleis}$	<i>Frequenz der periodischen Anregung durch das Gleis in Hz</i>
λ_{Gleis}	<i>periodische Wellenlänge am Gleis in m</i>

Unabhängig vom Sfw ist je nach Sfw z.B. bei 100 km/h eine Schwellenfachfrequenz von ca. 45 Hz zu erwarten. Für den verwertbaren Frequenzbereich einer KS-LS-TPA ist das somit bei Geschwindigkeiten über ca. 200 km/h interessant. Für charakteristische Riffel können z.B. bei 100 km/h die Frequenzen zwischen ca. 250 Hz und ca. 3 kHz relevant sein.

Die hör- und fühlbaren Anregungen der Traktions- und Hilfsaggregate können sich in ihren Frequenzen entweder gänzlich und/oder teils zur gefahrenen Geschwindigkeit linear verhalten, z.B. bei Fahrmotor und Getriebe, oder davon unabhängig geregelt sein, z.B. bei Fahrmotorlüfter und Klimaanlage. Das hängt auch von den jeweils zu erfüllenden Funktionen und Betriebsmodi ab. Für einen Fahrmotor und sein Getriebe kann allgemein eine grundlegende Frequenz der periodischen Anregung über einfache Beziehungen hergeleitet werden, wobei auch wieder höhere Harmonische davon bemerkbar auftreten können.

$$f_{per.Get} = \frac{t_{Get} \cdot v_{Sfz}}{3,6 \cdot d_{Rad} \cdot \pi} \quad (4.c)$$

$$f_{per.Mot} = \frac{t_{Mot} \cdot v_{Sfz} \cdot i_{Get}}{3,6 \cdot d_{Rad} \cdot \pi} \quad (4.d)$$

$f_{per.Get}$	<i>Frequenz der periodischen Anregung durch das Getriebe in Hz</i>
$f_{per.Mot}$	<i>Frequenz der periodischen Anregung durch den Fahrmotor in Hz</i>
t_{Get}	<i>Ordnung der der periodischen Anregung durch das Getriebe in -</i>
t_{Mot}	<i>Ordnung der der periodischen Anregung durch den Fahrmotor in -</i>
i_{Get}	<i>Übersetzungsverhältnis (starr) des Getriebes in -</i>

Beim Velaro D BR 407 ist mit bekanntem starren Übersetzungsverhältnis und neuen Rädern z.B. bei 100 km/h von ca. 27 Hz für einen Fahrmotor und von ca. 10 Hz für sein Getriebe auszugehen. Bzgl. des Frequenzbereichs einer KS-LS-TPA sind dann vor allem die höheren Harmonischen davon relevant. Zudem treten Anregung beim Wechsel zur Rekuperation und umgekehrt auf, sowie solche durch die Änderung der Pulsmuster.

4.2. Ablauf und Resultate

4.2.1. Schema der Messdatengenerierung und -verarbeitung

Hier wird die „bisherige“ TPA, unabhängig von der Charakterisierung als Zweischrittmethode, in ihre Messdatengenerierung und -verarbeitung gegliedert. Diese beiden Abläufe kamen bisher beim Industriepartner für jegliche Sfw mit geringer Anpassung zum Einsatz. Die zeitlich abgegrenzten Prozesse sind zum Einstieg in Abb. 04-08 schematisch angeführt, was vorerst noch unkommentiert bleibt.

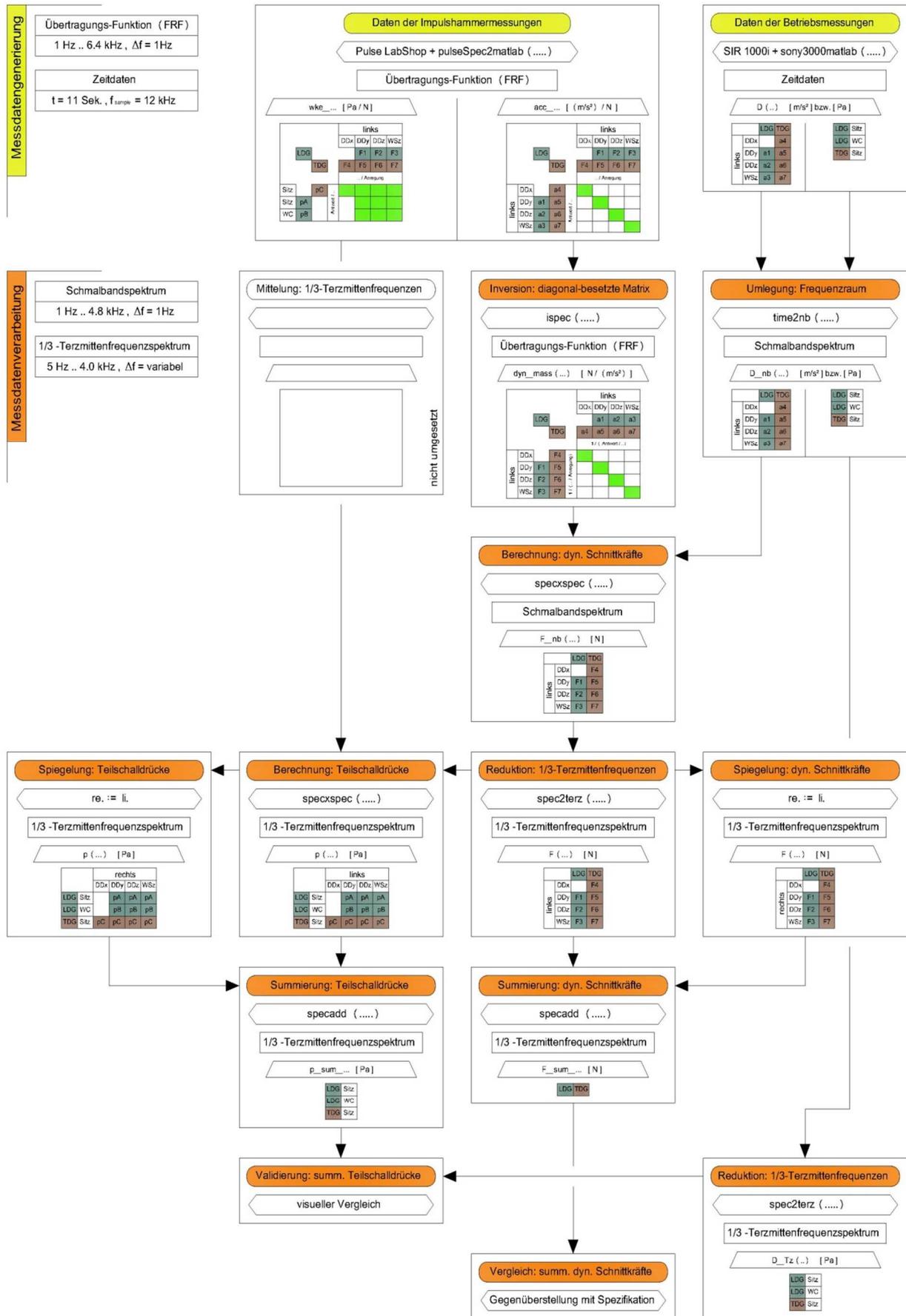


Abb. 04-08: „bisherige“ TPA // Schematischer Ablauf der Messdatengenerierung und -verarbeitung

4.2.2. Energetische Summe der dynamischen Schnittkräfte

Auch die zukünftige „optimierte“ bzw. „empfohlene“ TPA hat die energetische Summe der dynamischen Schnittkräfte zwischen DG und WK festzustellen. Separat für alle 10 repräsentativen 10-Sek.-Abschnitte bzgl. des Velaro D, von dem hier die Messdaten zu verwerthen sind, wurde sie auch durch die „bisherigen“ TPA eruiert und mit einer im Frequenzraum vorgegebenen Grenzkurve verglichen. Die daraus feststellbaren und zu hoch liegenden Wertebereiche, der aus beiden Seiten energetisch summierten dynamischen Schnittkräfte aus vier DoF zwischen TDG und EW8 bzw. drei zwischen LDG und TW7, zeigt Abb. 04-09.

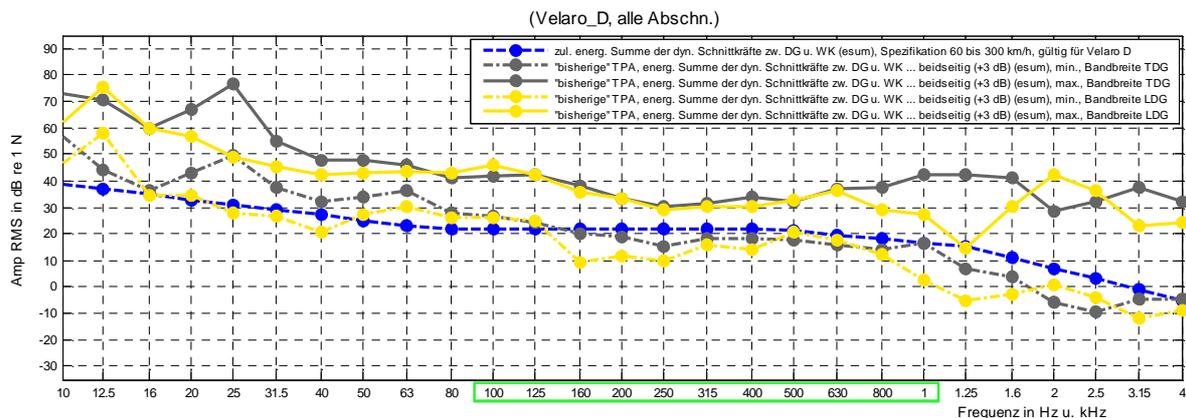


Abb. 04-09: „bisherige“ TPA, TDG, LDG, EW8, TW7, alle Abschnitte // Wertebereich: energetisch summierte dynamische Schnittkräfte

Hier ist der Amp-RMS von dynamischen Schnittkräften, Beschleunigungen oder Schalldrücken entweder im Schmalbandspektrum mit konstanter Bandbreite von 1 Hz im Frequenzraum angegeben, oder im 1/3-Terzmittenfrequenzspektrum, seinem über die allgemein gültigen 1/3-Terzmittenfrequenzen energetisch summierten Pendant (esum), mit größerer und auch variabler Bandbreite. Letzteres ist zuvor ersichtlich in dB re 1 N. Beide Varianten stehen für dieselbe Leistung der Feldgröße in einem begrenzten Frequenzbereich. Zu beachten ist, dass die Verbindungslinien zwischen den 1/3-Terzmittenfrequenzen bedeutungslos sind. Der Frequenzbereich mit der am höchsten vermuteten Qualität ist außerdem farblich gekennzeichnet.

4.2.3. Dynamische Schnittkraft am Längsträger

Die Grenzkurve wird praktisch durchwegs durch die resultierenden Wertebereiche der „bisherigen“ TPA überschritten. Das kann durch z.B. unzulässige vereinfachte Annahmen, ungenaue Messdaten, mangelhafte Berechnungen, unbekannte Fehlereinflüsse, etc. bedingt sein. Ein anderer möglicher Aspekt ist, dass die Grenzkurve in diesem Zusammenhang ungeeignet ist. Sie kam vor einigen Jahren, anhand der Erkenntnisse einer hier als „vereinfachten“ TPA deklarierten KS-LS-TPA, an einem dem Velaro D ähnlichen Triebzug

zustande. Laut meinen Informationen wurde dazu je DG und WK nur eine einzige dynamische Schnittkraft bzgl. des LT in Achsenrichtung z eruiert. Dazu wurde vertikal nach oben künstlich angeregt und eine auf einen DoF reduzierte Diagonale-Matrix-Inversion angewendet. Zusätzlich wurde eine Anhebung des Amp-RMS um 3 dB vorgenommen, entsprechend einer theoretisch am linken und rechten LT ident wirkenden dynamischen Schnittkraft. Die eingestellten Betriebsmodi und messtechnischen Rahmenbedingungen sind mir unbekannt. Unabhängig davon entstand nach manueller Anpassung diese Grenzkurve für Geschwindigkeiten zwischen 60 km/h und 300 km/h. Da bei der durchgeführten Messkampagne am linken der beiden LT unter EW8 und TW7 jeweils einachsige Beschleunigungssensoren entsprechend montiert und die F-a-PF eruiert wurden, wie Abb. 04-10 zeigt, konnte hier die „vereinfachte“ TPA nachvollzogen werden. Abb. 04-11 zeigt für selbige auszuwertende 10-Sek.-Abschnitte, separat für die LT beider Wagen, die Wertebereiche der energetisch summierten dynamischen Schnittkräfte, falls sie links und rechts ident wirken, was eine Annahme ist.

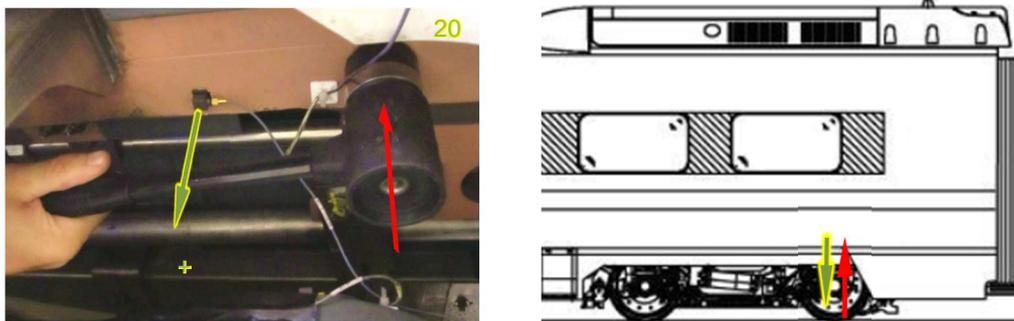


Abb. 04-10: „vereinfachte“ TPA, TDG, EW8 // Künstliche Anregung und Beschleunigungssensor am LT

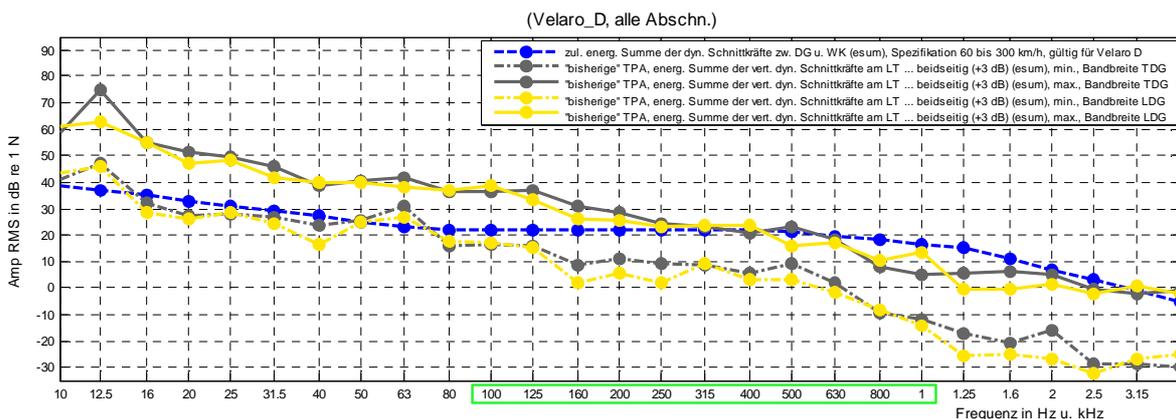


Abb. 04-11: „vereinfachte“ TPA, TDG, LDG, EW8, TW7, alle Abschnitte // Wertebereich: dynamische Schnittkräfte am LT

Bei adäquater Messdatenverarbeitung wie in der „bisherigen“ TPA, ist die Grenzkurve besser eingehalten. Die Erkenntnis daraus ist, dass sie nur für die „vereinfachte“ TPA geeignet ist,

die auch zukünftig zur Beurteilung der vibroakustischen Qualität der DG umgesetzt werden kann. Hier wird die Grenzkurve vorerst als unabhängiger Maßstab beibehalten, wobei auch noch ein Vorschlag zur Anpassung erfolgt. Man darf nicht davon ausgehen, dass es bei Umsetzung der „optimierten“ bzw. „empfohlenen“ TPA zur Einhaltung kommt, auch wenn eine Annäherung möglich ist.

4.2.4. Energetisch summierte Teilschalldrücke

Ein weiterer Aspekt für die „optimierte“ bzw. „empfohlene“ TPA ist die Übereinstimmung zwischen gemessenem Schalldruck und berechnetem Gesamtschalldruck, die akzeptabel für große Frequenzbereiche sein sollte. Das ist durch vielschichtige Verbesserungen der „bisherigen“ TPA erreichbar. Ihre Abweichungen sind in Abb. 04-12 bzgl. des Velaro D und aller 10-Sek.-Abschnitte als Wertebereich angegeben, getrennt für drei Orte in beiden WK.

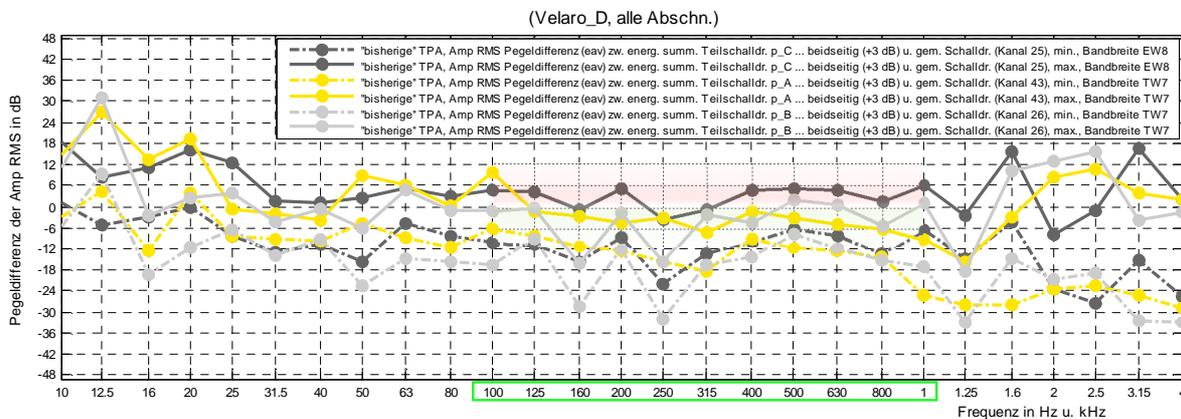


Abb. 04-12: „bisherige“ TPA, TDG, LDG, EW8, TW7, alle Abschnitte // Wertebereich: Differenz zwischen berechnetem Gesamtschalldruck und gemessenem Schalldruck

Der Wertebereich einer 1/3-Terzmittenfrequenz entsteht, wie schon bei der energetischen Summe der dynamischen Schnittkräfte, jeweils aus den beiden von allen 10 repräsentativen 10-Sek.-Abschnitten entnommenen Extremwerten. Sie gibt in diesem Fall an einer Senke für LS den Quotient der Amp-RMS zwischen berechnetem Gesamtschalldruck und gemessenem Schalldruck an. Für diese dimensionslose Größe entspricht z.B. +/- 6 dB einem linearen Faktor von 2 bzw. 0,5. Ein positiver Wert bedeutet einen zu niedrigeren gemessenen Schalldruck, was unplausibel ist. Eine solche Überbewertung tritt bei Umsetzung der „bisherigen“ TPA im vertrauenswürdigen Frequenzbereich, der von der Akustikgruppe der SAGÖ, Graz zwischen ca. 100 Hz und ca. 1 kHz abgesteckt ist, häufig auf. Eine Unterbewertung kann dagegen logisch erklärt werden kann, z.B. mit unberücksichtigten Quellen für KS und/oder LS.

Zusammenfassend gilt, dass alle Resultate einer „optimierten“ bzw. „empfohlenen“ TPA, trotz weiterhin überschaubarem Aufwand für Messdatengenerierung und -verarbeitung, mit höherer und zuverlässigerer Genauigkeit erzielt werden sollten. Bzgl. der Erwartungshaltung

an den abzudeckenden Frequenzbereich ist zu bemerken, dass für unser menschliches Gehör erst Frequenzen über ca. 20 Hz relevant sind, was gewissermaßen eine untere Grenze in einer KS-LS-TPA darstellen kann. Der Frequenzbereich darunter ist aber sehr wohl für schwingungstechnische Belange und bzgl. Vibrationen von Interesse. Eine realistische obere Grenze ist zwischen ca. 1 kHz und ca. 2 kHz zu erwarten. Mit noch höheren Frequenzen werden ohnehin die hier unberücksichtigten Quellen für LS dominant.

4.2.5. Grundlegende Kritikpunkte

Nur rudimentär umgesetzt, wird für komplexe Fragestellungen die „bisherige“ TPA von den Verantwortlichen beim Industriepartner als undetailliert und teils unplausibel eingestuft. Folgende grundlegende Kritikpunkte sind dafür ausschlaggebend:

- Berücksichtigung zu weniger mechanischer Koppelstellen
- Ignoriertes strukturelles Übersprechen
- Vereinfachte mathematische Lösung
- Berechnungen durchwegs ohne Phasenbeziehungen
- Resultate in geringer Auflösung

Daneben gibt es noch weitere Limitierungen, die im anschließenden Kapitel aufgezeigt werden. Zudem ist die aufwändige Messdatenverarbeitung nur für einfach modellierte Versuchsträger mit wenigen DoF geeignet, was in Hinblick auf eine erstrebenswerte Reduktion von Zeit und Kosten zudem für Einschränkungen sorgt.

5. Entwicklung des modifizierten Verfahrens für Schienenfahrzeuge

Es wird in diesem Kapitel die im Zuge dieser Masterarbeit entwickelte und bei jeglichen Sfz einsetzbare „empfohlene“ TPA vorgestellt. Es erfolgt eine Umsetzung als „optimierte“ TPA anhand der Messdaten des LDG bzw. TW7 vom Velaro D. Visualisiert werden nur Ausschnitte des gesamten Frequenzraums. Zur Messdatenverarbeitung dient Matlab® der Version R2012b als Werkzeug. Alle hier aufgezeigten Resultate werden nicht bzgl. vibroakustischer Belange interpretiert, sondern sie dienen dem prinzipiellen Vergleich, um systematische Unterschiede in den umgesetzten Verfahren zu verstehen. Es werden auch die von mir neu entwickelten Funktionen behandelt, die bereit für den Einsatz sind.

5.1. Adaptierung der Messdatengenerierung

Die korrigierte System- und Modellbeschreibung des exemplarisch betrachteten Velaro D als Versuchsträger ist auf den Einsatz der beim Industriepartner vorhandenen Messtechnik abgestimmt. Weitere Analysen dienen davor zum Aufzeigen der Abläufe und der unabhängig vom Sfz zu erwartenden Fehler in den Messdaten, was zum Abschätzen eines qualitativ höherwertigen Frequenzbereichs dient.

5.1.1. Messtechnik, -ablauf, -daten und -rauschen

Beginnend ist in Abb. 05-01 die im Rahmen der „bisherigen“ TPA am Velaro D über ca. drei Wochen eingesetzte Messtechnik und Sensorik samt Bezug zur Messkampagne gelistet.

Messtechnik			Sensorik		
Bezeichnung	Anzahl	Hersteller / Typ	Kanal	Zuordnung	Hersteller / Typ
Impulshammer + Kappe	1	PCB: TLD 086D20 + 084A63	14	a_WK_DDI_x	B&K: Beschleunigungssensor 4524 B
Mikrofonkalibrator	1	B&K: 4231	15	a_WK_DDI_y	
Beschleunigungskalibrator	1	PCB: 394C	16	a_WK_DDI_z	
Digitales Bangerät 16 Kanal	1	SONY: SIR-1000i	17	a_WK_WSI_z	B&K: Beschleunigungssensor 4507 B
Erweiterung 16 Kanal für Digitales Badgerät	2	SONY: SCX 32i	25	p_WK_TDG_Sitz	B&K: Voverstärker 2671 + Mikrofon 4188
Modulrahmen 5-fach LAN-XI	1	B&K: 3660C	26	p_WK_LD_Gang	B&K: Voverstärker 2671 + Mikrofon 4188
Einschub 6 Kanal LAN-XI für Modulrahmen	3	B&K: 3050-A-6/0	38	a_WK_DDI_y	B&K: Beschleunigungssensor 4507 B
Einschub Akku LAN-XI für Modulrahmen	2	B&K: 2831	39	a_WK_DDI_z	B&K: Beschleunigungssensor 4507 B
Software für FFT Analyse	1	B&K: Pulse LabShop + 7770	40	a_WK_WSI_z	B&K: Beschleunigungssensor 4507 B
			43	p_WK_LD_Gang	B&K: Voverstärker 2671 + Mikrofon 4188

Abb. 05-01: „bisherige“ TPA // Messtechnik und Sensorik am Velaro D BR 407

Bei der Impulshammer-Methode werden, mit der gewählten Einstellung auf mindestens fünf wiederholte Anschläge nahe eines jeden DoF, durch die Analysesoftware bereits statistisch optimierte TF abgeschätzt. Zudem reduziert der verwendete „H₁-estimator“ den nachteiligen Einfluss von Messrauschen. Bei der umgesetzten FFT ist die Fenster-Funktion „Uniform“ in Verwendung. Ihre rechteckige Form führt praktisch keine Gewichtung durch, was bei

impulsartiger Strukturanregung mit breitbandigem Charakter zielführend sein soll. Die komplexwertigen F-a-TF (`acc_..`) bzw. F-p-TF (`wke_..`) und ihre reellwertigen Kohärenz-Funktionen (`coh_..`) liegen direkt nach dem letzten der mehr oder weniger gut reproduzierten Anschläge, zwischen 1 Hz und 6,4 kHz mit einer konstanten Bandbreite von 1 Hz vor. Für einen beliebigen DoF zeigt Abb. 05-02, bei einmaliger künstlicher Anregung, die mit dem Messsystem aufgezeichneten und über die Analysesoftware visualisierten Zeitdaten von dynamischer Schnittkraft, Beschleunigung und Schalldruck, sowie deren berechnete Pendanten im komplexwertigen Frequenzraum.

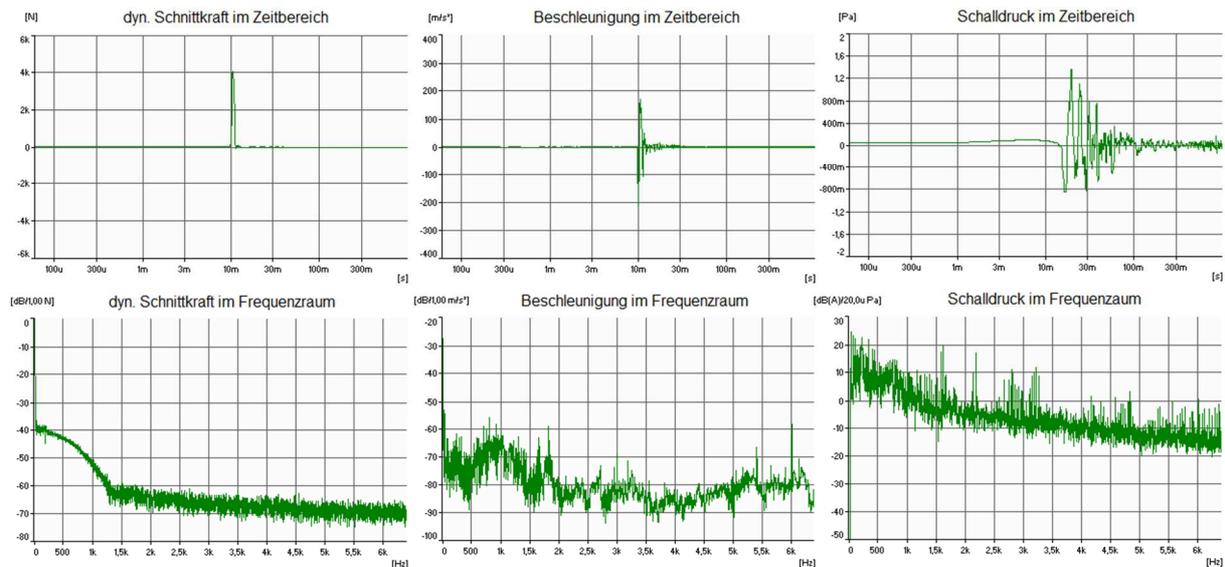


Abb. 05-02: „bisherige“ TPA // Strukturanregung und Systemantworten in Zeitbereich und Frequenzraum

Das verwendete Messsystem, mit derzeit 18 und mindestens 12 erweiterbaren Kanälen, ist in Verbindung mit der Analysesoftware, die mehrere dutzende Zeitdaten simultan verarbeiten kann, in der Lage bis zu 17 FRF ausgehend von einer mechanischen Schnittstelle mit künstlicher Anregung zu eruieren. Geht man von nur einem Mikrofon aus, sind 16 DoF mit einer KS-LS-TPA modellierbar. In der „bisherigen“ TPA wurden nur vier bzw. drei modelliert.

Der eingesetzte Impulshammer mit ca. 1,1 kg und harter Kunststoffkappe erscheint geeignet. Laut Datenblatt ist bei Anschlag auf eine steife Platte einen Abfall im Amp-RMS der dynamischen Schnittkraft um ca. 10 dB zwischen ca. 100 Hz und ca. 1 kHz zu erwarten. Das deckt sich mit dem Schmalbandspektrum von vorhin. Ab ca. 20 dB Abfall, also über ca. 1,4 kHz, nimmt vermutlich die Verwertbarkeit aller FRF ab.

Beschleunigungssensoren und Mikrofone sind bei der SAGÖ, Graz ausreichend verfügbar. Es kommen bevorzugt solche zum Einsatz, die digital mit ihren spezifischen Merkmalen versehen sind, die von der Analysesoftware automatisch ausgelesen werden. Am Velaro D wurden Beschleunigungssensoren ausschließlich auf der linken Seite eingesetzt. Für die „bisherige“ TPA ein dreiachsiger und ein einachsiger Typ am TDG bzw. EW8 sowie drei dazu idente einachsige Typen am LDG bzw. TW7. In spezielle Befestigungsclips gesteckt,

wurden diese mittels 2-Komponenten-Kleber angebracht, was üblich ist. Abb. 05-03 zeigt am TDG bzw. EW8 neben den beiden Beschleunigungssensoren auch die Anschläge und das am eigenen Kabel im Innenraum abgehängte Mikrofon über der vorletzten Sitzreihe auf der ebenfalls linken Seite.

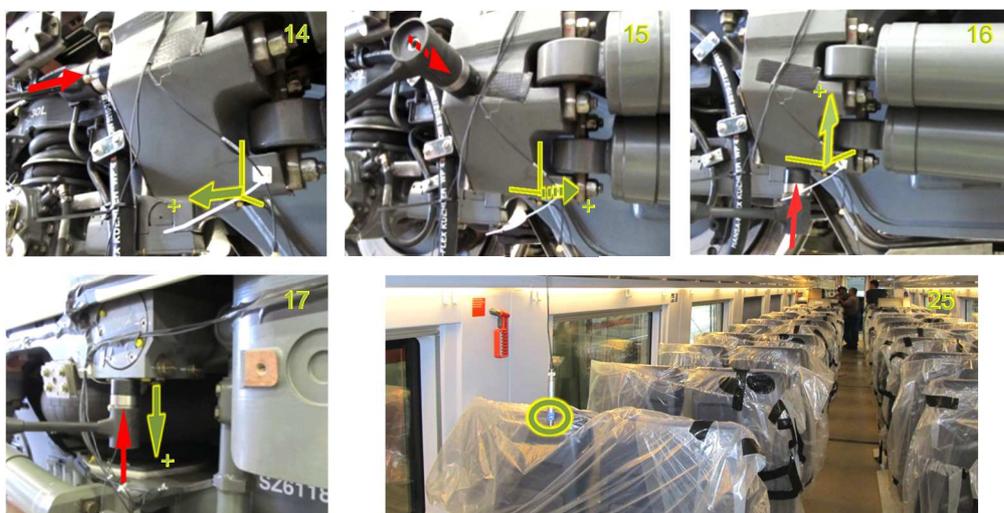


Abb. 05-03: „bisherige“ TPA, TDG, EW8 // Impulshammer, Beschleunigungssensoren, Mikrofon

Die eingepprägten Achsensysteme der Beschleunigungssensoren sind in ihren Vorzeichen nicht automatisch mit jenen der künstlichen Anregungen und/oder dem für eine Messkampagne festgelegten Fahrzeugkoordinatensystem ident. Das hatte keinen Einfluss auf die „bisherige“ TPA, in der gänzlich ohne Phasenbeziehungen und teils nur mit 1/3-Terzmittenfrequenzen gearbeitet wurde. In der „optimierten“ bzw. „empfohlenen“ TPA wird genauer vorgegangen, womit evtl. eine Abhängigkeit besteht. Eine überlegte und konsistente Vorgehensweise zur Applizierung der Beschleunigungssensoren und beim Anschlag mittels Impulshammer am gesamten Sfz ist daher ratsam. Der Hinweis erfolgt auch deshalb, da im konkreten Fall am LDG bzw. TW7 die Beschleunigungssensoren nicht ident platziert und orientiert wurden, was unter anderem daran liegt, dass ein- und dreiachsige Typen gemischt zum Einsatz kamen. Wo, wie und welche eingesetzt werden, beeinflusst die Messdaten der Impulshammer- und Betriebsmessungen. Dreiachsige Typen empfehlen sich, um den Aufwand für Montage und Verkabelung einzuschränken. Nachteilig ist, dass die künstliche Anregung für zwei der drei DoF aufgrund konstruktiver Gegebenheiten teils nur distanziert erfolgen kann und starkes XT zwischen den drei DoF zu erwarten ist. Einachsige Typen sind letztendlich auch für die Konditionszahl der Matrix der F-a-TF besser. Bei den Mikrofonen im WK ist ihr exakter Ort weniger wichtig. Ein solches befindet sich meist über einem Sitz oberhalb eines untersuchten DG. Zu beachten ist, dass bei den Impulshammermessungen keine sonstige intern und/oder extern verursachten Geräusche aufgenommen werden, die über ein Hintergrundrauschen hinausgehen. Neben einem leisen Umfeld ist somit das Abrüsten des Sfz ratsam, damit alle Hilfsaggregate außer Betrieb sind. Wegen der zu messenden Beschleunigungen sollte sich im WK außerdem kein Mensch fortbewegen. Bei den Impulshammermessungen am Velaro D wurden extra die beiden Außen- und Innentüren

der betreffenden WK geschlossen. Als leicht problematisch kann man im Nachhinein sehen, dass die Innentüren während der Betriebsmessungen wegen der Verkabelungen anderer Messkampagnen geöffnet sein mussten. Der Fehlereinfluss betrifft alle F-p-TF und in weiterer Folge deren Teil- und Gesamtschalldrücke. Da eines der beiden Mikrofone im TW7 näher zum EW8 angrenzte, war subjektiv und objektiv ein großer Einfluss des TDG feststellbar, weshalb diese Senke für LS in der „optimierten“ TPA ganz ausgeklammert ist.

Die Qualität einer beliebigen TF kann man neben ihrer Kohärenz-Funktion auch aus ihrer Reproduzierbarkeit beurteilen. Messtechnisch bedingte Unterschiede lassen Rückschlüsse darauf zu. Das ist für die F-a-PF einer beliebig gewählten mechanischen Schnittstelle zwischen TDG und EW8 der Abb. 05-04 und für die entsprechende F-p-TF zum Mikrophon im WK der Abb. 05-05 zu entnehmen.

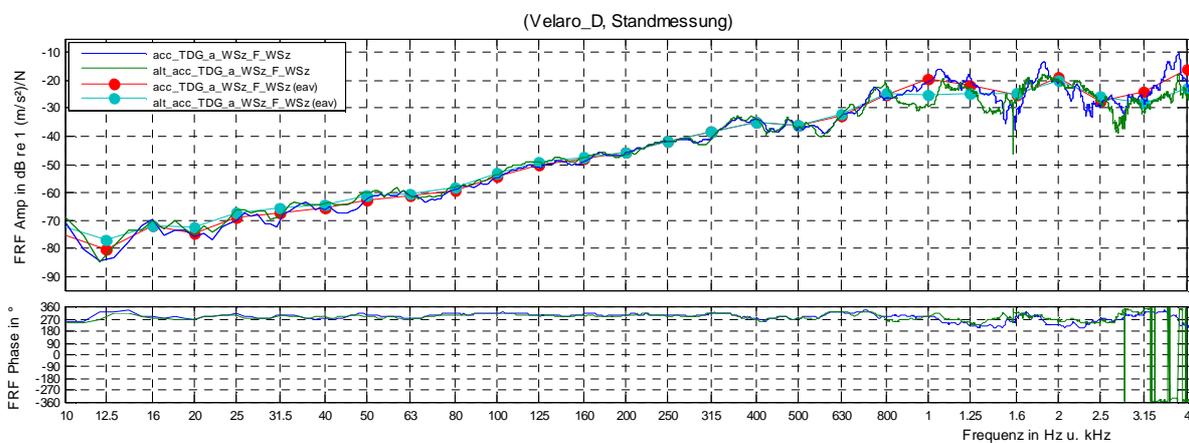


Abb. 05-04: TDG, EW8 // F-a-PF: Reproduzierbarkeit

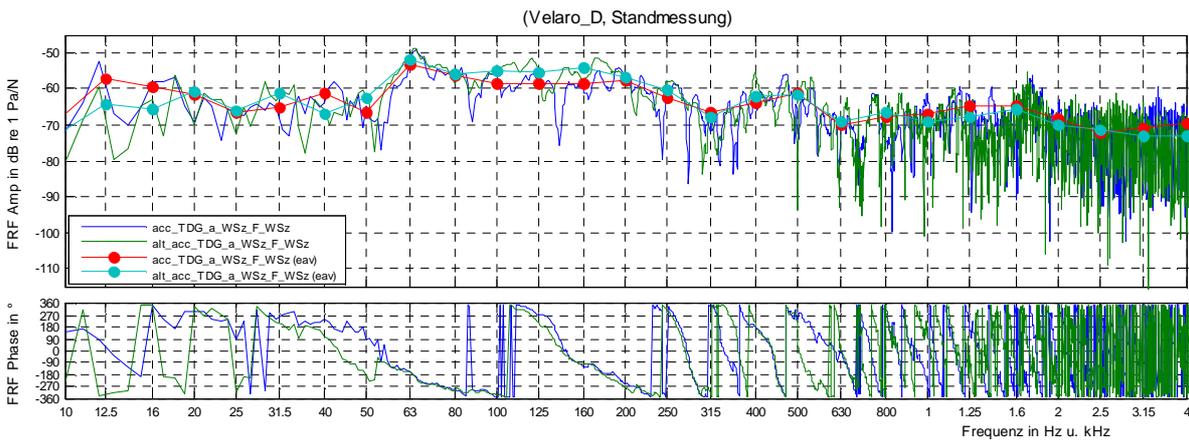


Abb. 05-05: TDG, EW8 // F-p-TF: Reproduzierbarkeit

Es handelt sich jeweils um die aus Real- und Imaginärteil zusammengesetzte FRF-Amp in dB re 1 (m/s²)/N bzw. dB re 1 Pa/N und um die bis +/- 360 ° erweiterte FRF-Phase, in der

Sprünge zwischen den beiden Extremwerten keine physikalische Bedeutung haben. Bei den FRF-Amp sind neben ihren Bandbreiten im Frequenzraum von 1 Hz auch deren energetisch auf 1/3-Terzmittenfrequenzen gemittelte Pendants (eav) mit Verbindungslinien ohne quantitative Aussage eingetragen. Berechnet sind sie mit „spec2terz(..)“, eine durch die Akustikgruppe des Industriepartners in Matlab[®] entwickelte Funktion. So auch „pulseSpec2matlab(..)“, die zum Import einzelner TF dient, welche aus der Analysesoftware exportiert als strukturierte Textdateien vorliegen. Nach ihrer Bearbeitung erfolgt damit die Ausgabe in eine Datenstruktur mit einigen Metadaten in einem für Format für Matlab[®].

Für die FRF-Amp dieser F-a-PF ist die Reproduzierbarkeit bis ca. 800 Hz sehr gut und darüber mäßig, für die der F-p-TF im gesamten gezeigten Frequenzbereich mäßig. Die 1/3-Terzmittenfrequenzen schneiden wie erwartet besser ab. Die FRF-Phase der F-a-PF bleibt stabil im gezeigten Frequenzbereich, was von der anderen nur teilweise behauptet werden kann. Zur nur bedingten Reproduzierbarkeit ist aber zu erwähnen, dass bei den erstmaligen Impulshammermessungen, ihr ca. zwei Wochen späteres Wiederholen nicht vorgesehen war, was Abweichungen durch z.B. ungenau reproduzierte Anschläge bzw. sonstige Umgebungseinflüsse erklärbar macht. Die gesamte innen und außen angebrachte Sensorik blieb aber unverändert, jedoch war der Velaro D mehrmals mit bis zu 350 km/h unterwegs. Sieht man über geringen Verschleiß der Komponenten hinweg, sollte sein vibroakustischer Zustand unverändert geblieben sein. Nicht zu vergessen ist, dass mit einer Analysesoftware berechnete FRF per Definition nur Abschätzungen sind, auch wenn über mehrmalige Anschläge eine statistische Optimierung erfolgt. Beim Wegfall dieser Unsicherheiten sollte eine wesentlich bessere Reproduzierbarkeit nachweisbar sein. Unter diesem Aspekt vermute ich eine ausreichend hohe Qualität der F-a-PF zwischen ca. 20 Hz und ca. 2 kHz. Für die F-p-TF wage ich keine Aussage dazu.

Die manuell aus den Betriebsmessungen gesuchten 10-Sek.-Abschnitte sind zeitliche Segmente aus mehreren Std. langen Aufzeichnungen. Sie können prinzipiell auch länger oder kürzer gewählt sein. Deren konkrete Auswahl nach geplanten Vorgaben erfolgt im Datenanalyseteil auf Basis der Messdatengenerierung. Auf die Kriterien zum Finden der 10-Sek.-Abschnitte in der „bisherigen“ TPA soll hier nicht eingegangen werden. Diese werden auch zukünftig beibehalten, allerdings sollten einige Hinweise aus dieser Masterarbeit beachtet werden. Zur besseren Einordnung sind in Abb. 05-06 die Geschwindigkeiten bei den betreffenden 10-Sek.-Abschnitten angegeben, die auch der „optimierten“ TPA dienen.

Betriebsmessungen										
10-Sek.-Abschnitt	K2_A01	K2_A02	K2_A03	K4_A17	K2_A08	K2_A10	K2_A07	K4_A21	K4_A18	K2_A11
Geschwindigkeit in km/h	70 - 90	100	150 - 160	160	250	250	270	310	350	100 - 85

Abb. 05-06: TDG, LDG, alle Abschnitte // Gefahrene Geschwindigkeiten der verwerteten Betriebsmessungen

Aus technischer Sicht ist bzgl. der Betriebsmessungen zu erwähnen, dass die analogen Signale, diskretisiert durch das im EW8 befindliche Datenerfassungssystem, mit einem Dynamikbereich von 16-bit auf 8 mm Datenbänder zu je 25 Gbyte Speichervermögen aufgezeichnet wurden. Neben jenen der Sensorik, wurde für die Geschwindigkeit auch je

eines von Bordelektronik und mitgeführtem GPS-Empfänger aufgenommen. Das Datenerfassungssystem war so justiert, dass auf den Datenbändern jetzt 12.000 reellwertige Datenpunkte bzw. Samples je Sek. vorliegen. Ihr Lesen erfolgt immer mittels Streamer und dazugehöriger Software. Nach Import einer damit generierten Binärdatei mit der internen Funktion „sony3000matlab(..)“, liegen die Datenpunkte in einer zu Matlab® konformen Datenstruktur zusammen mit Metadaten vor. Bei berücksichtigtem Abtasttheorem bzw. Nyquist-Kriterium sind sie im Frequenzraum bis maximal ca. 6 kHz, eher etwas niedriger verwertbar. Die Messdatenverarbeitung ist letztendlich bis zu 4,8 kHz umgesetzt.

Die interne Funktion nutzt auch die vom Hersteller angegebenen Empfindlichkeiten der Sensorik. Da sie auf Prüfstandsumgebungen zutreffen, machen Kalibrierungsmessungen Sinn, so wie damals mit speziellen Kalibratoren erfolgte. Sie erzeugen bei vorgegebener Frequenz einen reproduzierbaren Amp-RMS einer Beschleunigung bzw. eines Schalldrucks. Beim Impulshammer wurde ein abgehängter Festkörper mit bekannter Masse angeschlagen und neben der dynamischen Schnittkraft gleichzeitig dessen Beschleunigung gemessen, wodurch mit dem zweiten Newton'schen Axiom wieder auf die dynamische Schnittkraft geschlossen wurde. Bei der späteren Auswertung der mit dem Datenerfassungssystem aufgezeichneten Kalibrierungsmessungen, kam für alle sieben relevanten Beschleunigungen eine höhere Empfindlichkeit in Form einer Überbewertung von je ca. 1 dB heraus. Für die drei Mikrofone konnte je ca. 0,3 dB Unterbewertung nachgewiesen werden, was praktisch keine Relevanz hat. Auch für den Impulshammer konnte ein gutes Ergebnis erzielt werden, allerdings liegt das quantitativ nicht mehr vor. Diese Kalibrierungsmessungen dienen derzeit aber nur zum Überprüfen der Empfindlichkeiten. Zu hinterfragen sind speziell die Abweichungen der Beschleunigungen, die alleinig mit den Datenblättern nicht erklärbar sind. Dass mit der Diskretisierung im Datenerfassungssystem Fehlereinflüsse verbunden sind und keine Prüfstandsumgebungen vorlagen, ist meiner Meinung nach zu vernachlässigen. Beim Beschleunigungskalibrator sind die 1 g Amp-RMS bei 159,2 Hz mit einer maximalen Abweichung von ca. +/- 0,3 dB angegeben und beim Mikrofonkalibrator die 94 dB re 2e-5 Amp-RMS bei 1 kHz mit ca. +/- 0,2 dB. Das scheidet somit ebenfalls aus. Da ein defekter Beschleunigungskalibrator, auf dem die Beschleunigungssensoren mit speziellem Wachs geklebt wurden, ebenfalls eher auszuschließen ist und weil ähnliche Überbewertungen auch bei weiteren Beschleunigungen mit einer sehr geringen Streuung von ca. +/- 1 % aufgetreten sind, tippe ich auf einen kleinen systematischen Fehler im Datenanalyseteil. Ein solcher kann z.B. in der auch dafür verwendeten internen Funktion „sony3000matlab(..)“ liegen oder in jener, die aus den Zeitdaten einen Amp-RMS im Frequenzraum berechnet. Vorausgreifend auf spätere Erläuterungen die Information, dass die externe Validierung der „optimierten“ TPA diese Vermutung untermauert. Abweichungen in diesem Ausmaß sind zwar weniger problematisch, dennoch sollten ihre Folgen bekannt sein. Sie werden dann relevant, wenn sie nicht für die gesamte Sensorik gleichwertig und/oder nicht in den Betriebs- und Impulshammermessungen zugleich auftreten. Sonst wirken sie wie skalare Multiplikatoren, die sich in der KS-LS-TPA nach Matrix-Inversions-Methode wieder eliminieren.

Das bei Inversen Problemen wichtige Messrauschen ist im Datenblatt der vier einachsigen Beschleunigungssensoren mit maximal ca. 0,0035 m/s² beziffert, was zwischen 1 Hz und 6 kHz als energieäquivalenter Amp-RMS zu interpretieren ist und ca. - 50 dB re 1 m/s² ist. Auch der Wert für den dreiachsigen Typen ist ähnlich angegeben. Ein 1/3-Terzbandspektrum

ist nicht notwendig, da ich auf einen anderen Aspekt hinaus will, der mit den 10-Sek.-Abschnitten und dem tatsächlich aufgetretenen Messrauschen zu tun hat. Dazu dient eine wenige Sek. andauernde Phase, kurze Augenblicke nachdem der Velaro D verzögert wurde. Für diesen Stillstand sind in Abb. 05-07 alle sieben in der „bisherigen“ TPA relevanten Beschleunigungen auf bekannte Weise angeführt.

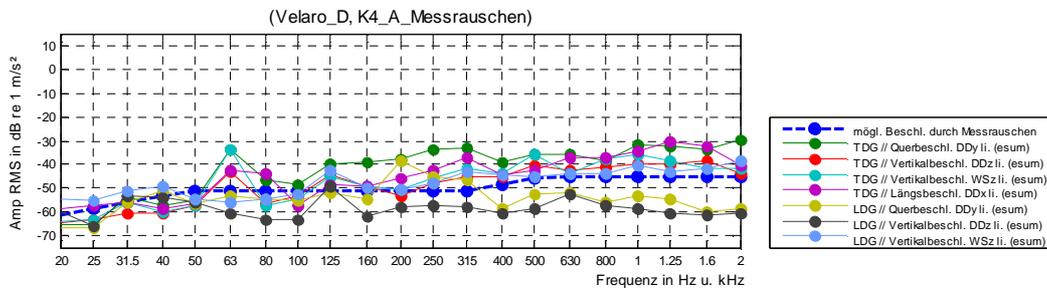


Abb. 05-07: TDG, LDG, EW8, TW7, K4_A_Messrauschen // Messrauschen der relevanten Beschleunigungen

Das eingetragene fiktive 1/3-Terzmittenfrequenzspektrum der möglichen Beschleunigung durch Messrauschen scheint auf den ersten Blick zu niedrig. Die Phase des Stillstands wurde allerdings nicht speziell erhoben, sodass definitiv auch Hilfsaggregate im Betrieb waren. Evtl. bewegten sich auch Personen im WK. Zum Einpassen der fiktiven Kurve sind hier deshalb baugleiche einachsige Beschleunigungssensoren zum Einsatz gekommen, die an ihren insgesamt 10 Positionen an den H-Rahmen der beiden DG appliziert und dort besser vom WK entkoppelt waren. Abb. 05-08 zeigt deren Auswertung und die aufgrund dessen manuell eingepasste mögliche Beschleunigung durch Messrauschen.

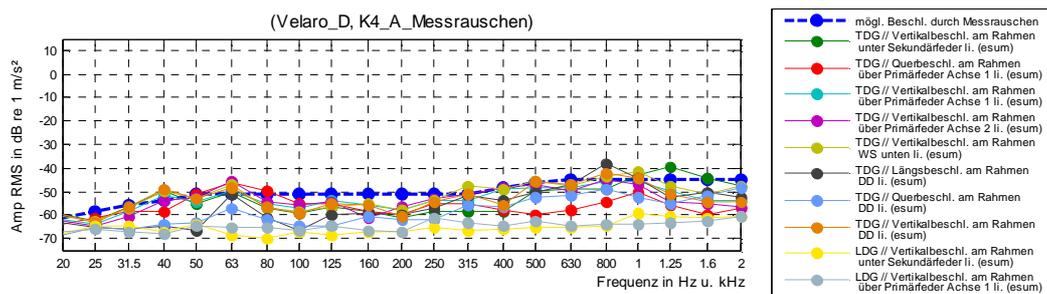


Abb. 05-08: TDG, LDG, EW8, TW7, K4_A_Messrauschen // Messrauschen der Beschleunigungen am H-Rahmen

Man erkennt eine Abhängigkeit von der konkreten Position bzw. auch vom DG. Am H-Rahmen sind die Beschleunigungen tendenziell niedriger als bei den eigentlich wichtigen DoF. Analysiert man weiters die sieben relevanten Beschleunigungen in den 10-Sek.-Abschnitten, so erkennt man eine Abhängigkeit vom jeweiligen Betriebsmodi, was hier aber nicht umfangreich dargelegt wird. Abb. 05-09 zeigt das nur für einen beliebig gewählten 10-Sek.-Abschnitt „K2_A10“.

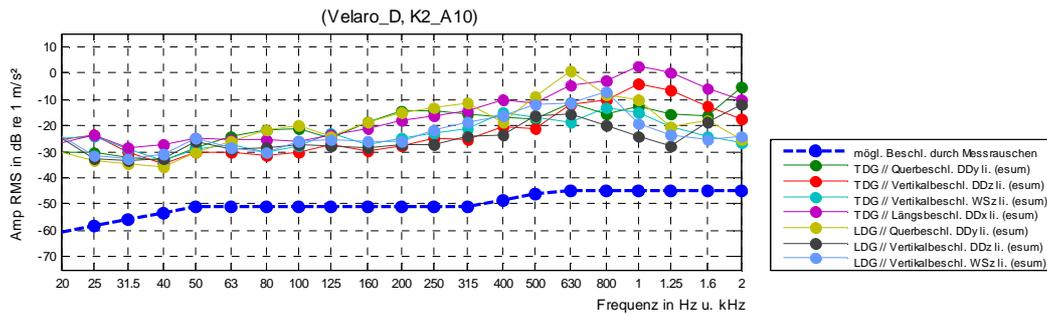


Abb. 05-09: TDG, LDG, EW8, TW7, K2_A10 // Messrauschen der relevanten Beschleunigungen

Abhängig vom 10-Sek.-Abschnitt und der 1/3-Terzmittenfrequenz kommt es mehr oder weniger zur Annäherung an die angenommene mögliche Beschleunigung bei Messrauschen. Da mit geringen Differenzen die Qualität der Messdaten in diesen Frequenzbereichen sinkt, was besonders bei hohen Konditionszahlen des linearen Gleichungssystem ungünstig ist, kann z.B. ein einzuhaltender Abstand definiert werden. Dazu schlage ich für den Amp-RMS jeder 1/3-Terzmittenfrequenz ca. 20 dB vor, was im ungünstigsten Fall ein Messrauschen von ca. 10 % ausmacht. Lediglich mit dieser Annahme sollte der besser verwertbare Frequenzbereich zwischen ca. 50 Hz und ca. 1,6 kHz liegen. Ganz unabhängig davon kann zukünftig in der „empfohlenen“ TPA die Auswahl der 10-Sek.-Abschnitte neben weiteren Kriterien auf diese neue Weise erfolgen, wobei schadhafte Beschleunigungssensoren und/oder deren Kabel leichter registriert und die Messdatenverarbeitung entsprechend angepasst werden kann. Nennenswert sind auch die vom Hersteller angegebenen Frequenzbereiche, die bzgl. der Mikrofone und ihrer Vorverstärker nach unten mit ca. 20 Hz begrenzt sind bzw. bzgl. der ein- und dreiachsigen Beschleunigungssensoren nach oben mit ca. 6 kHz und 3 kHz.

Zum Messablauf selbst empfehle ich eine systematisch verbesserte Vorgehensweise bei den Impulshammermessungen. Zum einen für einen geringeren Aufwand und zum anderen für eine höhere Zuverlässigkeit. Dazu zählt, dass keine andere baugleiche Sensorik und/oder Verkabelung verwendet werden sollte als in den Betriebsmessungen. Dieser Hinweis erfolgt, da das bei der durchgeführten Messkampagne am Velaro D nicht der Fall war. Weiters besteht in Hinblick auf den separaten Export einer jeden FRF aus der Analysesoftware in eine eigene Textdatei und den späteren separaten Import auf jeden Fall Potential für einen reduzierten Aufwand und eine gleichzeitige Vermeidung von möglichen Fehlern auf menschlicher Seite. Das gilt vor allem, wenn viele TF einzupflegen sind, wie es mit der „empfohlenen“ TPA der hauptsächliche Fall sein wird. Eine standardisierte und vom Sfz entkoppelte Systematik zur Bezeichnung und Nummerierung der mechanischen Schnittstellen, Senken für LS, etc. bietet sich dazu an. Auch zum Messablauf zu zählen ist die zeitliche Komponente bei der Durchführung beider separaten Messschritte. Bei der entsprechenden Messkampagne waren diese über ca. drei Wochen verteilt, was jedoch nicht anders möglich war. In der Zwischenzeit kann sich ein Versuchsträger aus vibroakustischer Sicht verändern. Für die gesamte Messtechnik spielen außerdem die Umgebungsbedingungen eine Rolle. Diese können im Betrieb des Sfz auch durch die Wärmeabgabe aller Aggregate beeinflusst sein. Äußere mechanische Einwirkungen bei

Geschwindigkeiten jenseits von 300 km/h können zudem die nach außen geführte Verkabelung in Mitleidenschaft ziehen.

5.1.2. System- und Modellbeschreibung

Von den für die „bisherige“ TPA festgestellten F-a-TF wurden mit der impliziten Diagonalen-Matrix-Inversion nur jene in den Hauptdiagonalen der beiden aufspannbaren Matrizen tatsächlich verarbeitet, weshalb sie erst gar nicht zwischen allen DoF eruiert wurden. Für die „optimierte“ TPA ist für einen abgängigen Teil davon die vibromechanische Reziprozität genutzt und den anderen eine Abschätzung vorgenommen. Von den F-p-TF wurde dagegen immer die volle Anzahl entsprechend der mechanischen Schnittstellen und Senken für LS messtechnisch festgestellt. Aus ihnen kann man ebenfalls Matrizen bzw. auch nur Vektoren bilden. Abb. 05-10 zeigt das schematisch und farblich differenziert auf.

LDG und TW7				3x3-Matrix der F-a-TF (acc...)			
		Farbkodex	Impulshammermessung				
			vibromech. Reziprozität				
			Abschätzung				
DoF/DoF		... / DDy	... / DDz	... / WSz			
		... / F1y	... / F2z	... / F3z			
DDy / ...	a1y / ..	a1y / F1y acc_LDG_a_DDy_F_DDy	a1y / F2z acc_LDG_a_DDy_F_DDz	a1y / F3z acc_LDG_a_DDy_F_WSz			
	a2z / ..	acc_a_1y_F_1y	acc_a_1y_F_2z	acc_a_1y_F_3z			
DDz / ...	a2z / ..	a2z / F1y acc_LDG_a_DDz_F_DDy	a2z / F2z acc_LDG_a_DDz_F_DDz	a2z / F3z acc_LDG_a_DDz_F_WSz			
	a3z / ..	acc_a_2z_F_1y	acc_a_2z_F_2z	acc_a_2z_F_3z			
WSz / ...	a3z / ..	a3z / F1y acc_LDG_a_WSz_F_DDy	a3z / F2z acc_LDG_a_WSz_F_DDz	a3z / F3z acc_LDG_a_WSz_F_WSz			
	a4z / ..	acc_a_3z_F_1y	acc_a_3z_F_2z	acc_a_3z_F_3z			

TDG und EW8				4x4-Matrix der F-a-TF (acc...)			
DoF / DoF		... / DDx	... / DDy	... / DDz	... / WSz		
		... / F4x	... / F5y	... / F6z	... / F7z		
DDx / ...	a4x / ..	a4x / F4x acc_TDG_a_DDx_F_DDx	a4x / F5y acc_TDG_a_DDx_F_Dy	a4x / F6z acc_TDG_a_DDx_F_DDz	a4x / F7z acc_TDG_a_DDx_F_WSz		
	a5y / ..	acc_a_4x_F_4x	acc_a_4x_F_5y	acc_a_4x_F_6z	acc_a_4x_F_7z		
DDy / ...	a5y / ..	a5y / F4x acc_TDG_a_Dy_F_DDx	a5y / F5y acc_TDG_a_Dy_F_Dy	a5y / F6z acc_TDG_a_Dy_F_DDz	a5y / F7z acc_TDG_a_Dy_F_WSz		
	a6z / ..	acc_a_5y_F_4x	acc_a_5y_F_5y	acc_a_5y_F_6z	acc_a_5y_F_7z		
DDz / ...	a6z / ..	a6z / F4x acc_TDG_a_DDz_F_DDx	a6z / F5y acc_TDG_a_DDz_F_Dy	a6z / F6z acc_TDG_a_DDz_F_DDz	a6z / F7z acc_TDG_a_DDz_F_WSz		
	a7z / ..	acc_a_6z_F_4x	acc_a_6z_F_5y	acc_a_6z_F_6z	acc_a_6z_F_7z		
WSz / ...	a7z / ..	a7z / F4x acc_TDG_a_WSz_F_DDx	a7z / F5y acc_TDG_a_WSz_F_Dy	a7z / F6z acc_TDG_a_WSz_F_DDz	a7z / F7z acc_TDG_a_WSz_F_WSz		
	a8z / ..	acc_a_7z_F_4x	acc_a_7z_F_5y	acc_a_7z_F_6z	acc_a_7z_F_7z		

LDG und TW7				2x3-Matrix der F-p-TF (wke...)			
p/DoF		... / DDy	... / DDz	... / WSz			
		... / F1y	... / F2z	... / F3z			
pSitz / ...	pA / ..	pA / F1y wke_LDG_p_WK_Gang_F_DDy	pA / F2z wke_LDG_p_WK_Gang_F_DDz	pA / F3z wke_LDG_p_WK_Gang_F_WSz			
	pB / ..	wke_p_A_F_1y	wke_p_A_F_2z	wke_p_A_F_3z			
pWC / ...	pB / ..	pB / F1y wke_LDG_p_WK_WC_F_DDy	pB / F2z wke_LDG_p_WK_WC_F_DDz	pB / F3z wke_LDG_p_WK_WC_F_WSz			
	pC / ..	wke_p_B_F_1y	wke_p_B_F_2z	wke_p_B_F_3z			

TDG und EW8				1x4-Matrix der F-p-TF (wke...)			
p/DoF		... / DDx	... / DDy	... / DDz	... / WSz		
		... / F4x	... / F5y	... / F6z	... / F7z		
pSitz / ...	pC / ..	pC / F4x wke_TDG_p_WK_F_DDx	pC / F5y wke_TDG_p_WK_F_DDy	pC / F6z wke_TDG_p_WK_F_DDz	pC / F7z wke_TDG_p_WK_F_WSz		
	pD / ..	wke_p_C_F_4x	wke_p_C_F_5y	wke_p_C_F_6z	wke_p_C_F_7z		

Abb. 05-10: „optimierte“ TPA, TDG, LDG, EW8, TW7 // F-a-TF und F-p-TF: Matrizen und Vektoren

Mithilfe der bei den Impulshammermessungen zugleich berechneten Kohärenz-Funktionen, können höherwertige Frequenzbereiche abgegrenzt werden, in denen lineare Beziehungen am besten zutreffen und/oder Messrauschen in den Zeitdaten bei künstlicher Anregung nur geringen Einfluss hatte. Diese Kohärenz-Funktionen sind mit der jeweiligen FRF-Amp ihrer TF von LDG bzw. EW8 in Abb. 05-11 und Abb. 05-12 strukturiert angegeben.

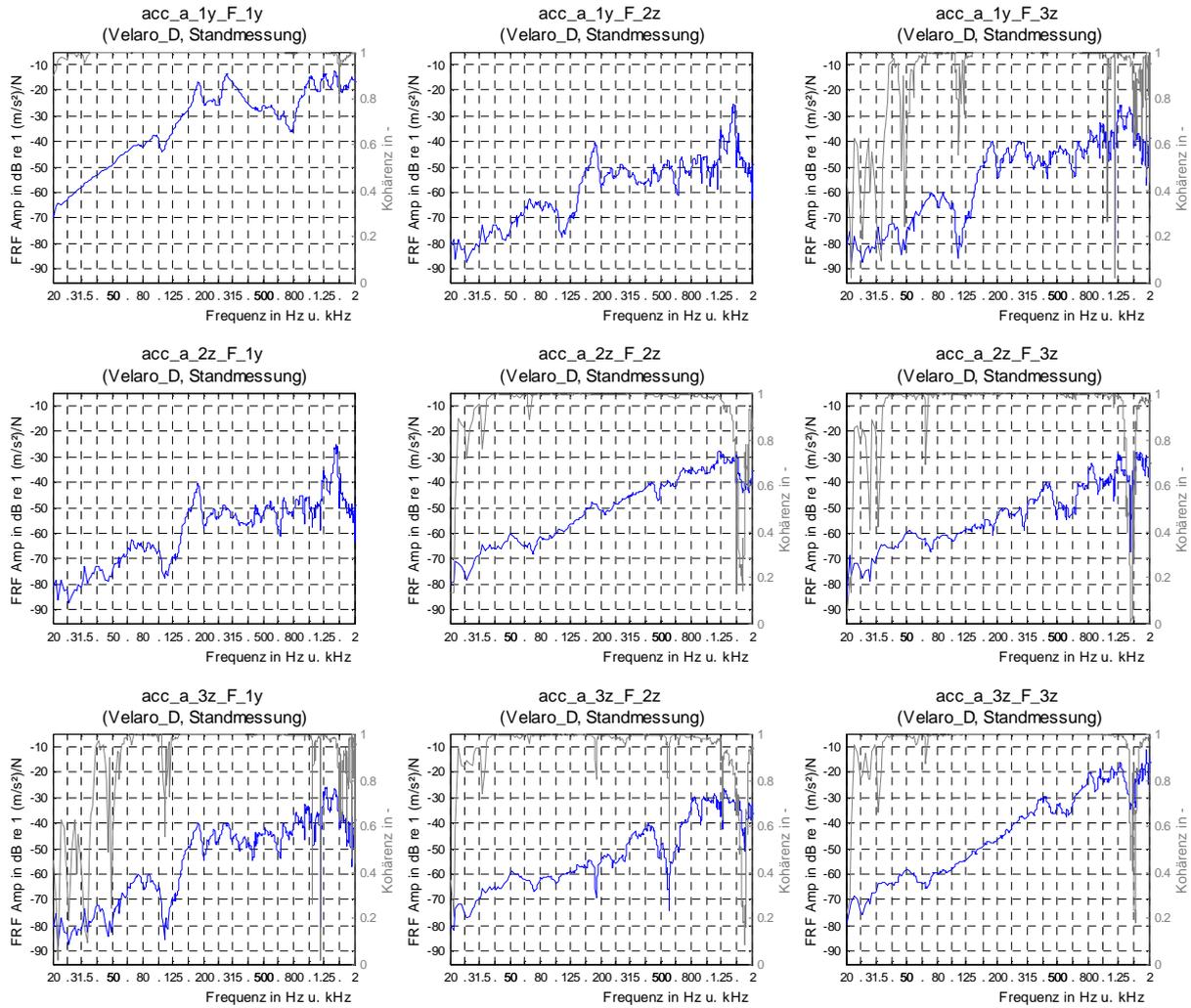


Abb. 05-11: „optimierte“ TPA, LDG, TW7 // F-a-TF: 3x3-Matrix

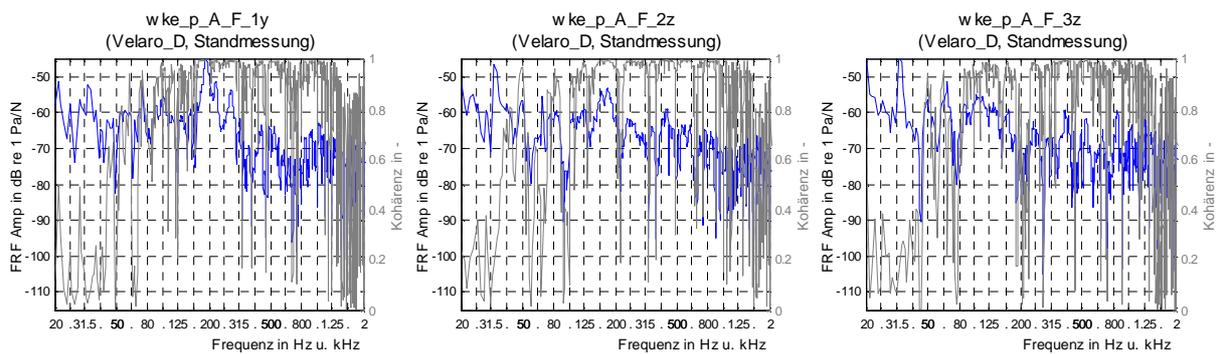


Abb. 05-12: „optimierte“ TPA, LDG, TW7 // F-p-TF: zu Schalldruck im WK zweite Sitzreihe links

Die spätere Umsetzung der „optimierten“ TPA erfolgt anhand genau diesen. Für alle F-a-PF in der Hauptdiagonale ist feststellbar, dass deren Kohärenz-Funktionen zwischen ca. 40 Hz und ca. 1,4 kHz zufriedenstellend verlaufen. Mit beachteten Nebendiagonalelementen ist dieser Frequenzbereich enger abzustecken. Für das TDG bzw. den EW8 ist die Situation

vergleichbar, was hier nicht angegeben ist. Stärkere Einbrüche in den Kohärenz-Funktionen können auf das modale Verhalten der Struktur hinweisen. Bei den F-p-TF sieht man unetwigerere und sprunghaftere Verläufe mit vielen Einbrüchen und einer Abnahme der Kohärenz im oberen Frequenzbereich. Zu begründen ist das evtl. mit einem zunehmend diffusen Schallfeld im WK, bis es anscheinend ab ca. 1 kHz nur mehr so vorliegt. Die Abgrenzung eines höherwertigen Frequenzbereichs ist insgesamt nicht so eindeutig möglich wie bei den F-a-TF. Alle Teil- und Gesamtschalldrücke bei Frequenzen unter ca. 80 Hz und über ca. 1,25 kHz sollte man später eher vorsichtig interpretieren. Mit den beiden anderen Senken für LS lässt sich selbiger Frequenzbereich bestätigen.

Die zuvor aufgezeigte neue Kennzeichnung der mechanischen Schnittstellen und Senken für LS mit den Nummerierungen 1y, 2z, 3z am LDG und Bezeichnungen A, B am TW7 bzw. 4x, 5y, 6z, 7z am TDG und C am EW8, dienen einem vom S_{fz} unabhängigen Modell der KS-LS-TPA. In Zukunft kann diese Systematik immer angewendet werden, was auch eine Standardisierung im Datenanalyseteil möglich macht. Für die „empfohlene“ TPA sind aber noch weitere DoF als relevant einzustufen, wie hier im Fall des Velaro D aufgezeigt wird. Abb. 05-13 gibt die ident ausgeführten mechanischen Koppelstellen zwischen den unterschiedlich gebauten DG und WK in einem separierten CAD-Modell samt angedeuteter dynamischer Schnittkräfte an, die unabhängig vom Fahrzeugkoordinatensystem die jeweilige Richtung der künstlichen Anregung zeigen.

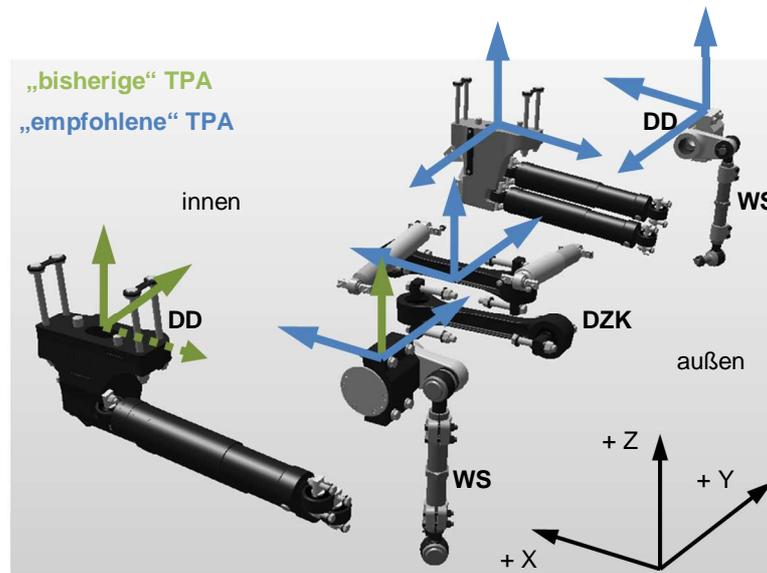


Abb. 05-13: „bisherige“ und „empfohlene“ TPA, TDG, LDG, EW8, TW7 // DoF und dynamische Schnittkräfte

Diese Baugruppen sind wie die nicht abgebildete Traverse aus produktionstechnischer Sicht dem DG zuzuordnen. Durch diese fünf örtlich abgegrenzten mechanischen Koppelstellen zwischen DG und WK sind dank relativ starrer mechanischer Verbindungen die Voraussetzungen für die Matrix-Inversions-Methode erfüllt, wobei auch die verfügbaren Kanäle des Messsystems dafür ausreichen. Es tritt bei diesen Komponenten, der mittigen DZK sowie den beidseitigen DD und WS, im Betrieb sehr wahrscheinlich relevanter KS auf,

zumindest wenn man von weiteren Baugruppen absieht, die in Extremsituationen zusätzlich wirken. Die Beschleunigungssensoren wurden bis dato nur einseitig angebracht und die DZK blieb unberücksichtigt, wobei gegen ihre Einbindung nur die Zugänglichkeit in der Mitte unter der Traverse sprechen kann, speziell zur künstlichen Anregung. Sie ist abgesehen von den zu übertragenden Bremskräften eher für die Antriebskräfte beim TDG von Bedeutung. An der „bisherigen“ TPA zu bemängeln ist weiters, dass für beide DG der DD unterschiedlich und die WS nicht in allen Achsenrichtungen berücksichtigt wurde.

Zu den Orientierungen der dynamischen Schnittkräfte ist zu erwähnen, dass diese praktisch immer symmetrisch um die x-z-Ebene aufgestellt sind und die möglichen Richtungen der Anschläge angeben. Die eingeprägten Achsensystemen der Beschleunigungssensoren sind teilweise entgegengesetzt dazu orientiert. Das hängt neben dem konkreten DoF auch davon ab, ob ein- oder dreiachsige Typen angebracht sind. Bei ausschließlicher Verwertung der FRF-Amp, so wie in der „bisherigen“ TPA, ist das irrelevant. Es stellt sich die Frage, ob es bei Berücksichtigung der FRF-Phasen eine Rolle spielt. Grundsätzlich ist es egal, ob die künstliche Anregung aus positiver oder negativer Richtung erfolgt, da sich die später berechnete dynamische Schnittkraft daran anpasst, falls mit Phasenbeziehungen gearbeitet wird. Ein um $\pm 180^\circ$ entgegengesetzter Anschlag verdreht die FRF-Phase um diesen Winkel. Die Amp-Phase der betreffenden dynamischen Schnittkraft ist dann ebenso verdreht bei jeder Frequenz. Alle Amp-RMS sollten unverändert bleiben. Auf den Teilschalldruck hat es keinen Einfluss, da seine grundlegende F-p-TF ebenso verdreht ist. Gefahr birgt eine inkonsistente Umsetzung erst, wenn die vibromechanische Reziprozität bzw. Symmetrie links/rechts zur Reduktion des messtechnischen Aufwands genutzt wird. Zur Erklärung wird anschließend in drei Fällen von ein und demselben simplen Versuchsträger ausgegangen, der immer ident nacheinander an seinen beiden DoF künstlich angeregt wird, wobei hier jeweils nur die F-a-TF zum weiter entfernten der beiden Beschleunigungssensoren von Interesse ist. In den drei Fällen nicht ident sind die positiv bzw. negativ orientierten Beschleunigungssensoren in Relation zum Anschlag und damit teils die FRF-Phasen. Es verdrehen sich auch die der lokalen F-a-PF um $\pm 180^\circ$, was jetzt aber irrelevant ist. Abb. 05-14 zeigt das.

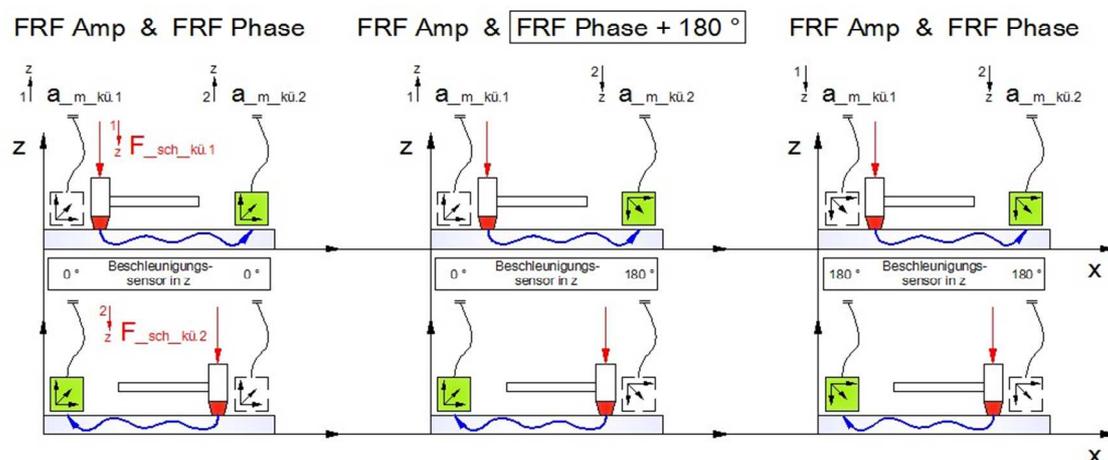


Abb. 05-14: Einschränkungen und mögliche Fehler bei genutzter vibromechanischer Reziprozität bzw. Symmetrie links/rechts

Dieser leicht übersehbare Umstand der evtl. verdrehten FRF-Phasen ist nur bei Nutzung der bisher nur angenommenen vibromechanischer Reziprozität und/oder Symmetrie links/rechts zu beachten. Durch beide können die tatsächlich festzustellenden F-a-TF auf bis zu ein Drittel reduziert werden. Es sollte aber bzgl. der z-x-Ebene des Fahrzeugkoordinatensystems beidseitig am DG mit dem Impulshammer symmetrisch angeschlagen und jeder Beschleunigungssensor ebenso positioniert werden. Das entspricht einer gespiegelten Vorgehensweise. Die Nutzung der vibromechanischen Reziprozität und/oder Symmetrie links/rechts kann deshalb interessant sein, da in der Messdatenverarbeitung der „bisherigen“ TPA der manuelle Aufwand mit der Anzahl der FRF fast linear anstieg. Das heißt aber nicht, dass ich beide unbedingt empfehle, da zugleich eine verringerte Modellgüte und zusätzliches Potential für Fehler im Datenanalyseteil zu erwarten ist.

Ob die vibromechanische Reziprozität im vorliegenden Fall überhaupt zutrifft und ihre evtl. Nutzung legitim ist, soll über zwei mechanischen Schnittstellen von TDG bzw. EW8 und ihre F-a-TF zum jeweils anderen DoF untersucht werden, wie in Abb. 05-15 ersichtlich ist.

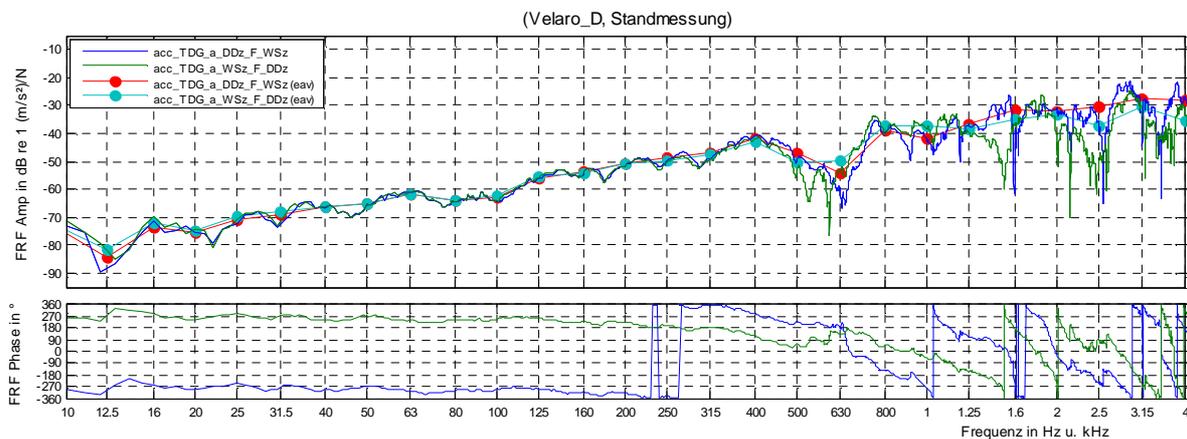


Abb. 05-15: TDG, EW8 // F-a-TF: vibromechanische Reziprozität

Symmetrisch liegende Nebendiagonalelemente in der Matrix der F-a-TF, die zwischen den betreffenden DoF das XT quantifizieren, sollten ident sein, zumindest bzgl. ihrer FRF-Amp. Das trifft zwischen ca. 20 Hz und ca. 500 Hz sehr gut zu, ebenso für ihre energetisch auf 1/3-Terzmittenfrequenzen gemittelten Pendants. Bei der FRF-Phase ist das auch der Fall, wobei eine erklärable Phasenverschiebung von $\pm 180^\circ$ auftritt. Auch die ab ca. 500 Hz in der FRF-Amp erkennbaren Unterschiede können begründet werden. Theoretisch erfolgen beide künstlichen Anregungen genau am Ort des jeweiligen Beschleunigungssensors, achs- und flächenparallel zu diesem, mehrmals mit selbiger Intensität, sodass die Analysesoftware immer gleichwertige F-a-TF zum anderen DoF abschätzt, da Messrauschen in dieser optimalen Vorstellung auch nicht auftritt. In der Praxis ist das nicht erfüllbar, was sich bei höheren Frequenzen mit größerer modaler Überlappung eher auswirkt. Im Vergleich zu den beiden lokalen F-a-PF, die bzgl. Reproduzierbarkeit bereits angeführt wurden, treten ähnliche Abweichungen im relevanten Frequenzbereich auf, was somit die Nutzung der vibromechanischen Reziprozität legitimiert. Im Fall einer quadratischen Matrix der F-a-TF

genügt es damit, neben den Elementen der Hauptdiagonale nur die oberen oder unteren Nebendiagonalelemente messtechnisch festzustellen.

Die vibromechanische Symmetrie links/rechts baut auf der Annahme, dass aus schalltechnischer Sicht die in der z-x-Ebene des Fahrzeugkoordinatensystems gespiegelten Seiten links und rechts von DG und WK symmetrisch sind. Beidseitig ident applizierte baugleiche Beschleunigungssensoren sollten, mit den ebenfalls symmetrisch bei den entsprechenden DoF ausgeführten künstlichen Anregungen, adäquate F-a-TF liefern. Ob die Annahme der vibromechanischen Symmetrie links/rechts zulässig ist, soll anhand zweier beidseitig ermittelter F-a-PF eines DoF des TDG bzw. EW8 geklärt werden, wobei die Messdaten an einem Velaro E generiert wurden. Die Gegenüberstellung zeigt Abb. 05-16.

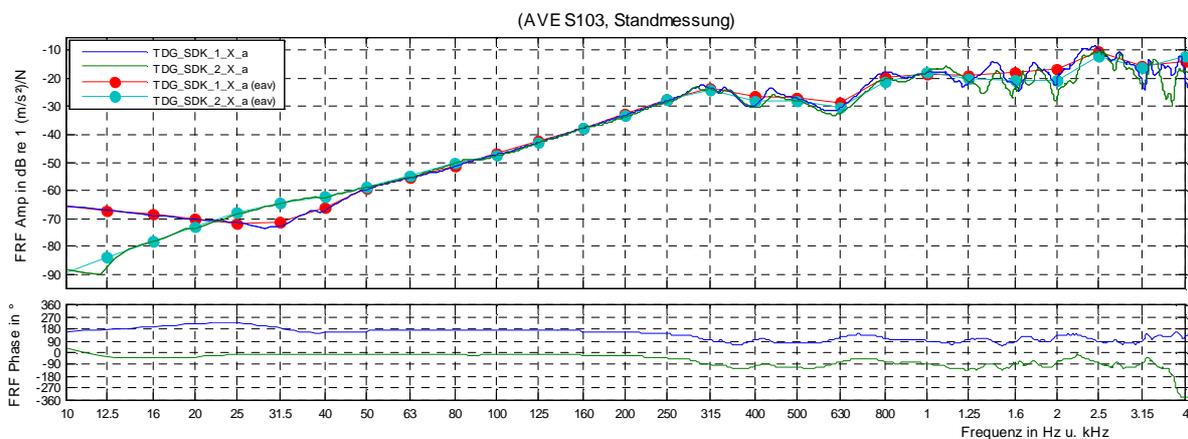


Abb. 05-16: Velaro E // F-a-PF: vibromechanische Symmetrie links/rechts

Messtechnisch ist sie gut nachweisbar, obwohl mit Sicherheit nicht vollkommen gespiegelt gearbeitet wurde und DG bzw. WK nicht bis ins letzte Detail symmetrisch um z-x-Ebene aufgebaut sind. Die geringen Unterschiede sind so erklärbar wie bei der vibromechanischen Reziprozität. Auch die +/- 180 ° Phasenverschiebung tritt mit vorangegangener Begründung auf. Im Frequenzbereich zwischen ca. 50 Hz und ca. 1 kHz hält die vibromechanische Symmetrie links/rechts daher stand. Warum darunter eine große Differenz in der FRF-Amp auftritt, ist für mich unerklärbar, was aber nicht weiter relevant sein soll. Zu beachten ist, dass die Annahme nicht übergreifend zwischen TDG und LDG gilt. Zwischen diesen beiden treten, über den gesamten angegebenen Frequenzbereich, bei den energetisch gemittelten 1/3-Terzmittenfrequenzen der FRF-Amp meist Differenzen von bis zu ca. 10 dB auf.

Abschließend ist zu beantworten, wie weit sich der Aufwand für Impulshammermessungen durch diese beiden Vereinfachungen tatsächlich reduzieren ließe, was anhand der fünf identifizierten mechanischen Koppelstellen zwischen einem SF 500 DG und dessen WK überlegt wird. Es müssen letztendlich 225 FRF vorliegen. Ein Nebendiagonalelement kommt bei erfüllter vibromechanischer Symmetrie links/rechts immer doppelt vor, mit inkludierter vibromechanischer Reziprozität sogar vierfach. Bestimmte Elemente der Hauptdiagonale, nämlich jene F-a-PF der DD und WS, treten ebenso doppelt auf. Bei Anwendung in der

„empfohlenen“ TPA müssen die künstlichen Anregungen damit nur einseitig an DD und WS sowie an der mittig verbauten DZK erfolgen. Die Systemantworten für eine voll-besetzte Matrix der F-a-TF sind dann nur an einem Teil der DoF aufzunehmen. Das gilt aber nicht für die Betriebsmessungen.

Auch alle F-a-TF für eine etwaige Überdeterminierung sind mit selbiger Logik reduzierbar. Bei 18 vorhandenen Kanälen des Messsystems, wovon bereits 17 mit den vorgeschlagenen DoF belegt sind, kann eine Überdeterminierung mit einem wirkungsvollen Faktor von 2 nur über eine zweite Serie von Anschlägen erfolgen. Im konkreten Fall an selbigen 15 DoF, wobei dann maximal 17 Systemantworten von den weiteren Beschleunigungssensoren feststellbar sind. Die zusätzlich mit den separaten Impulshammermessungen in die dann rechteckige Matrix der F-a-TF eingespeisten Fehler sollten dank besserer Konditionierung des linearen Gleichungssystems mehr als kompensiert sein.

Ergänzend soll die vibroakustische Symmetrie links/rechts untersucht werden, bei der zu überprüfen ist, ob die Feststellung gleichwertiger F-p-TF von beidseitig identen DoF bis zum Mikrofon im WK möglich ist. Abb. 05-17 zeigt den Vergleich, der wieder auf Messdaten vom Velaro E basiert.

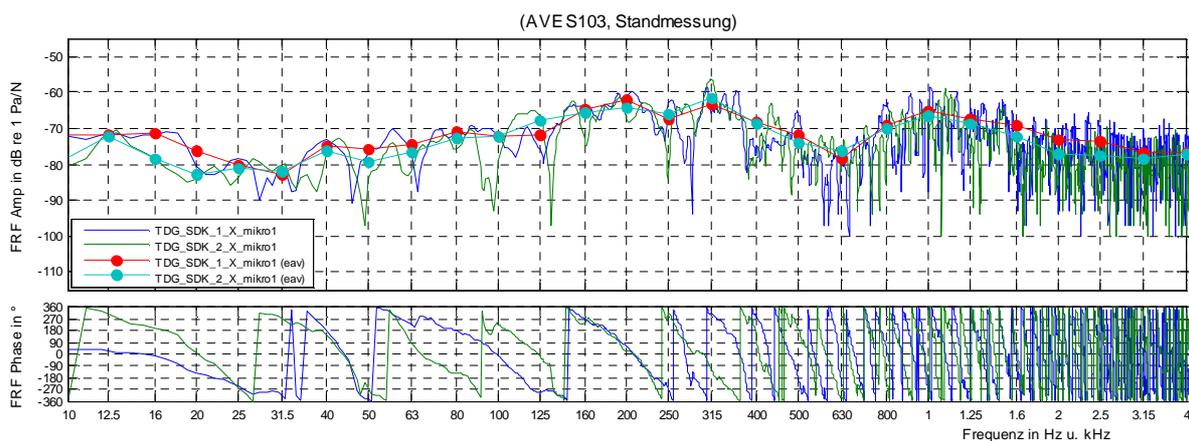


Abb. 05-17: Velaro E // F-p-TF: vibroakustische Symmetrie links/rechts

Das Abschneiden ist schlechter als bei den F-a-TF. Hier kommt neben den bei der vibromechanischen Symmetrie links/rechts schon genannten möglichen Begründungen, dass der Innenausbau eines WK, im Gegensatz zu dessen Rohbau, definitiv unsymmetrisch ausgeführt ist. Außerdem lag das Mikrofon nicht direkt auf der z-x-Ebene des Fahrzeugkoordinatensystems, sondern oberhalb eines der außermittig befindlichen Sitze. Bei höheren Frequenzen ist zudem von einem diffusen Schallfeld im WK auszugehen.

Der letzte Punkt zur System- und Modellbeschreibung betrifft nochmals das XT, allerdings in einem weiteren Blickwinkel. Wie erläutert, wurde in der „bisherigen“ TPA nur eine Seite von DG und WK berücksichtigt. Die Auswirkungen dessen, wegen dem zweifellos vorhandenen Übersprechen von und zur anderen Seite, wurden behandelt. Hier soll noch ein ähnlicher

Aspekt am gesamten Sfz durchdacht werden. Es ist XT evtl. auch zwischen den beiden DG eines WK in geringem Maße vorhanden. Möglicherweise ebenso zwischen den DG zweier gekoppelter Wägen. Die entsprechenden F-a-TF können darüber Aufschluss geben. Interessant sind auch die F-p-TF, die von den DoF zwischen TDG und WK zum Mikrofon im anderen WK mit LDG führen. Die Antriebsaggregate können einen erheblichen Anteil am dort bei den Betriebsmessungen erfassten Schalldruck haben. Das hat besonders dann Relevanz, wenn die Innentüren unvermeidbar geöffnet sind. Es betrifft daher die Modellgüte und Verwertbarkeit der KS-LS-TPA. Abb. 05-18 zeigt schematisch diese Überlegungen.



Abb. 05-18: TDG, LDG, EW8, TW7 // F-a-TF und F-p-TF: Mögliches Übersprechen nach [49]

Zusammenfassend gilt, dass alle vereinfachten Annahmen die Modellgüte reduzieren und in weiterer Folge die berechneten dynamischen Schnittkräfte und Teilschalldrücke verfälschen. Die „empfohlene“ TPA sollte bei korrekter Nutzung dieser zulässigen Möglichkeiten trotzdem Resultate mit höherer Qualität als die „optimierte“ TPA liefern, die durch die vorhandenen Messdaten noch eingeschränkt ist. Ich empfehle aber, alle FRF weiterhin messtechnisch festzustellen und die interne Funktion „pulseSpec2matlab(.)“ dafür anzupassen, damit deren sichere und schnelle Messdatenverarbeitung mit einem einzigen auszuführenden Schritt im möglich ist. Vorgehend der Hinweis, dass das im Zuge dieser Masterarbeit erfolgt.

5.2. Adaptierung der Messdatenverarbeitung

Zur Korrektur der im Überblick bereits angegebenen Messdatenverarbeitung der „bisherigen“ TPA können zum einen die vorhandenen Messdaten vollständig und detaillierter genutzt werden, was mit der „optimierten“ TPA beim LDG bzw. TW7 des Velaro D geschieht, zum anderen können zukünftig umfangreichere Messdaten generiert werden, was mit der „empfohlenen“ TPA vorgeschlagen ist. Beides erfordert einen adaptierten Datenanalyseteil, der im besten Fall auch in weiteren Punkten optimiert ist. Die mathematischen und/oder numerischen Operationen sind dazu ausschließlich in Matlab[®] umgesetzt. Diverse interne Funktionen der Akustikgruppe des Industriepartners sind bereits vorhanden. Sie führen meist auch logische Abfragen aus und vervollständigen die Datenstruktur mit Metadaten. Teilweise dienen sie aber nur zur Visualisierung. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden von mir einige Skripte und interne Funktionen überarbeitet oder von Grund auf neu programmiert. Sie arbeiten in Kombination mit den Messdaten bzw. älteren internen Funktionen. Später zwar schematisch aufgezeigt, werden tiefere Einblicke aber nicht gegeben, da sie außerhalb der SAGÖ, Graz nicht zugänglich sein sollten.

5.2.1. Inversion: diagonal-besetzte Matrix

Die „bisherige“ TPA nutzt in der Diagonalen-Matrix-Inversion nur die Hauptdiagonalelemente. Im Fall des LDG bzw. TW7 die in der 3x3-Matrix der F-a-TF. Das erfolgt lediglich über die voneinander unabhängige Kehrwerte, also die Dynamischen Massen (dyn_mass...), weshalb hier auch von einer impliziten Diagonalen-Matrix-Inversion geschrieben wird. Das geschieht jeweils mit der internen Funktion „ispec(..)“. Da bei der „bisherigen“ TPA niemals eine voll-besetzte bzw. überdeterminierte Matrix genutzt wurde, war diese Vorgehensweise zielführend. Jetzt ist die Gewöhnliche Inverse bzw. Pseudoinverse zu bilden. Das kann in Matlab[®] mit den standardisierten Funktionen „inv(..)“ bzw. „pinv(..)“ erfolgen. Zweitere ist als Pseudoinverse zu bevorzugen, da sie die Direkte Inverse mit abdeckt und auch innerhalb einer regulierten SVD funktioniert, d.h. wenn eine diagonal-besetzte quadratische Matrix der Singulärwerte mit reduziertem Rang auftritt.

In Zusammenhang mit Inversen Problemen ist die Konditionszahl immer von Interesse. Sie ist in Matlab[®] durch die implementierte Funktion „cond(..)“ bestimmbar. Über Umwege geht das auch durch andere standardisierte Funktionen, die aber nur als Basis dienen und entsprechend kombiniert werden müssen. Abb. 05-19 zeigt von der entsprechenden 3x3-Matrix der F-a-TF die frequenzabhängige Konditionszahl für drei verschiedene Fälle.

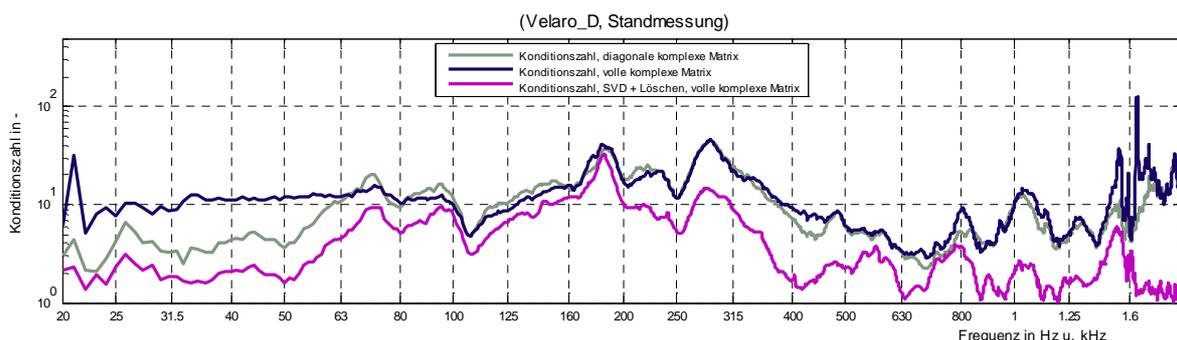


Abb. 05-19: „optimierte“ TPA, LDG, TW7 // F-a-TF: Konditionszahl der 3x3-Matrix

Zu diesen Fällen zählt die in der „bisherigen“ TPA implizit verwendete komplexwertige diagonal-besetzte Matrix, deren Konditionszahl übrigens auch dem reellwertigen Pendant entspricht. Zusätzlich jene mit inkludierten Nebendiagonalelementen, die relevant ist in der „optimierten“ TPA, aber eine zum reellwertigen Pendant abweichende Konditionszahl hat. Außerdem die Konditionszahl bei regulierter SVD der komplexwertigen voll-besetzten Matrix. Sie entspricht der von der diagonal-besetzten Matrix der Singulärwerte mit einem nachträglich gelöschten Singulärwert. Die SVD selbst kann in Matlab[®] mit „svd(..)“ umgesetzt werden. In Abb. 05-20 sind die zugehörigen frequenzabhängigen Singulärwerte angegeben.

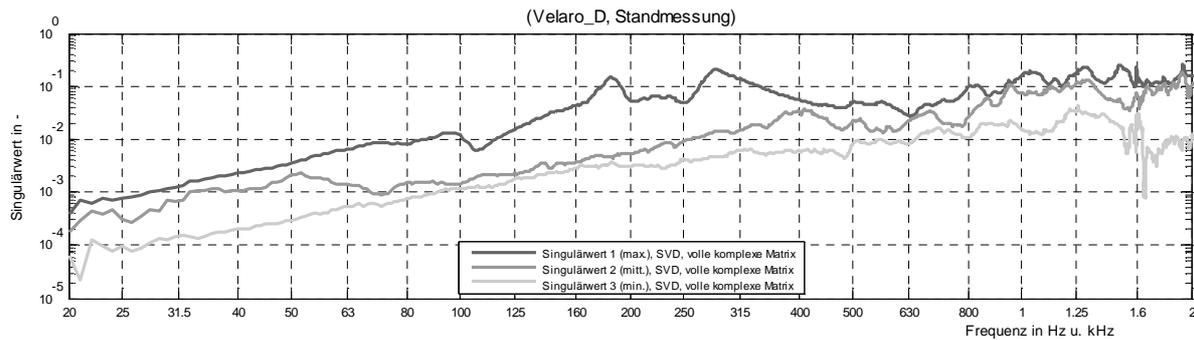


Abb. 05-20: „optimierte“ TPA, LDG, TW7 // F-a-TF: Singulärwerte der 3x3-Matrix

Im Vergleich der Konditionszahlen und Singulärwerte zu den FRF-Amp der neun F-a-TF kann man feststellen, dass sich ähnliche Größenordnungen innerhalb der drei Elemente der Hauptdiagonale positiv auswirken, wie z.B. um ca. 700 Hz. Extremwerte bei manchen Frequenzen, z.B. bei ca. 1,65 kHz, entstehen offenbar durch gewachsene FRF-Amp der sechs Nebendiagonalelemente. Das bedeutet, dass das Übersprechen stärker ausgeprägt ist. Zwischen ca. 80 Hz und ca. 1,4 kHz sind in den Konditionszahlen beider komplexwertiger Matrizen keine relevanten Unterschiede feststellbar, was daher auf geringes XT deutet. Die der komplexwertigen Matrix der F-a-TF ist außerdem fast immer niedriger als die Konditionszahl ihres reellwertigen Pendant, was für ein besser gestelltes Problem steht. Die regularisierte SVD der komplexwertigen voll-besetzten Matrix ist zum Aufzeigen ihrer Wirkung im gesamten Frequenzraum ident umgesetzt. Zwischen ca. 400 Hz und ca. 1,4 kHz ist sie im vorliegenden Fall aber definitiv nicht notwendig. Sie wird zum Verständnis später auch für die explizite Diagonale-Matrix-Inversion gezeigt, in der sie aber nicht erforderlich ist.

Als nächstes soll geklärt werden, welchen Einfluss die in den F-a-TF enthaltenen Fehler haben. Das erfolgt durch begrenzte Variationen in der komplexwertigen voll-besetzten Matrix. Zum einen in den neun einzelnen FRF-Amp um +/- 1 dB und +/- 3 dB, zum anderen in den neun einzelnen FRF-Phasen um +/- 10 ° und +/- 30 °. Separat für die kleineren und größeren der eingespeisten Fehler, spannen in Abb. 05-21 und Abb. 05-22 jeweils 36 neue Matrizen pro Frequenz, für die Konditionszahl einen eigenen Wertebereich auf.

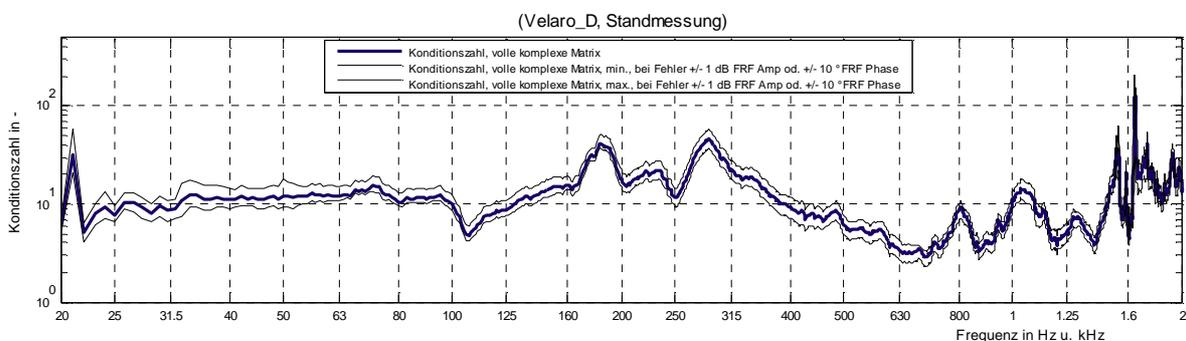


Abb. 05-21: „optimierte“ TPA, LDG, TW7 // F-a-TF: Konditionszahl für fehlerhafte 3x3-Matrix (+/- 1 dB; +/- 10 °)

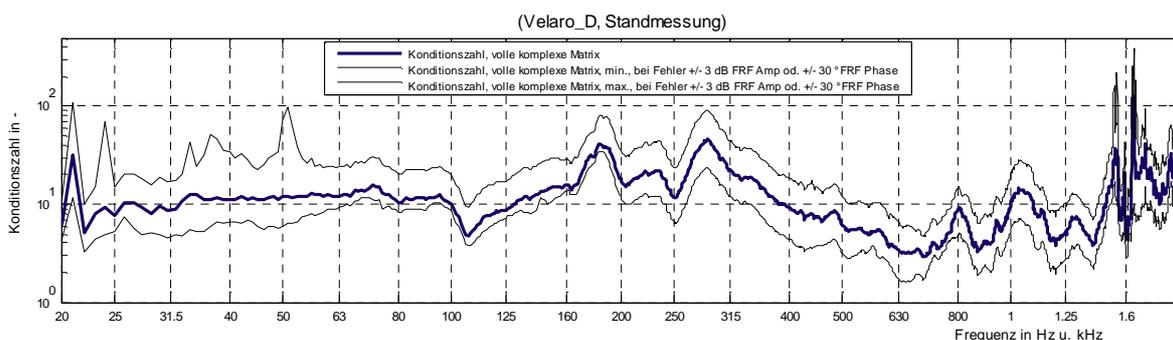


Abb. 05-22: „optimierte“ TPA, LDG, TW7 // F-a-TF: Konditionszahl für fehlerhafte 3x3-Matrix (+/- 3 dB; +/- 30 °)

Die stärkere Variation verursacht wie erwartet eine stärkere Veränderung der Konditionszahl. Es ist auch zu erkennen, dass mit Fehlern nicht unbedingt eine schlechtere Konditionierung einhergeht. Interessant ist, dass die angeführten Wertebereiche fast ausschließlich und meist eindeutig durch die variierten FRF-Amp aufgespannt werden und sich positive verdrehte FRF-Phasen praktisch ident wie negativ verdrehte auswirken.

5.2.2. Umlegung: Frequenzraum

Es wurden bereits mehrfach reellwertige Schmalbandspektren aufgezeigt, auch in erweiterter Form als Campbellplots. Reellwertig bedeutet hier, dass in der „bisherigen“ TPA aus den Zeitdaten der Beschleunigungen und Schalldrücke bei den Betriebsmessungen nur die Amp-RMS berechnet wurden. Im konkreten Fall mit Bandbreiten von 1 Hz im Frequenzraum zwischen 1 Hz und 4,8 kHz. Das soll weiterhin ähnlich umgesetzt werden, allerdings sind zukünftig auch Amp-Phasen bei allen Zeitdaten von Interesse, weshalb komplexwertige Schmalbandspektren zu berechnen sind.

Die Umwandlung reellwertiger Datenpunkte in den Frequenzraum erfolgte in der „bisherigen“ TPA mit der internen Funktion „time2nb(..)“. Diese ruft die in Matlab[®] implementierte Funktion „pwelch(..)“ auf, innerhalb der nach der Methode von Welch eine FFT durchgeführt und im Anschluss ein reellwertiges A-LDS berechnet wird. Als Fenster-Funktion kam „Hanning“ mit einer zeitlichen Länge von 1 Sek. und 50 % Überlappung zur Anwendung. Das A-LDS gibt die Leistung der in den Frequenzraum gebrachten Zeitdaten an, und zwar für eine zuvor darin festgelegte Bandbreite. Mit „time2nb(..)“ wird aber die Quadratwurzel vom A-LDS ausgegeben. Normiert auf 1 Sek. ist es das reellwertige Schmalbandspektrum.

Eine nicht vorhandene Option in „time2nb(..)“ ist das Generieren von Phasenbeziehungen zur Ausgabe komplexwertiger Schmalbandspektren. Sind diese bei den Beschleunigungen bekannt, können komplexwertige dynamische Schnittkräfte und Teilschalldrücke berechnet werden. Eine Amp-Phase kann im Gegensatz zum Amp-RMS nur in Relation zu anderen Zeitdaten berechnet werden. Das funktioniert ähnlich wie vorhin beschrieben über das K-LDS, wofür es keine interne Funktion gibt. Es kann mit „cpsd(..)“ aber eine in Matlab[®] implementierte Funktion zum Teil genutzt werden, in der grundlegende Einstellungen wie für „pwelch(..)“ zu treffen sind. Die FFT setzt sie darin für zwei verschiedene Zeitdaten ident um.

Als Erklärung eines reellwertigen A-LDS sei hier angegeben, dass es durch elementweise Multiplikation seiner mit der FFT in den Frequenzraum umgelegten Zeitdaten mit dem komplex konjugierten Pendant entsteht. Die Realteile der Multiplikatoren sind ident und die Imaginärteile haben entgegengesetzte Vorzeichen. Die Quadratwurzel ist der Amp-RMS für das reell- bzw. komplexwertige Schmalbandspektrum.

Ähnlich kann ein komplexwertiges K-LDS zwischen zweier in den Frequenzraum gebrachter, unterschiedlicher Zeitdaten berechnet werden. Das geschieht wieder nach der separaten FFT und mit einem komplex konjugierten Multiplikator. Es kommt aber nicht mehr zur zwangsweisen Aufhebung der Imaginärteile, weshalb vom K-LDS neben einem hier weniger wichtigen Amp-RMS auch die interessante Amp-Phase zugänglich ist und weiters ein Phasenspektrum daraus abgeleitet werden kann, das hier dem komplexwertigen Schmalbandspektrum dient. Ein Vertauschen der Zeitdaten bei der Berechnung bewirkt übrigens lediglich die Umkehrung der Vorzeichen der Imaginärteile bzw. des Winkels zwischen den beiden. Das K-LDS gibt an, welche Leistung in beiden Zeitdaten bei der betrachteten Frequenz gleichermaßen enthalten ist, auch wenn diese phasenverschoben bzw. zeitlich versetzt auftreten. Das K-LDS zwischen identen Zeitdaten entspricht dem A-LDS beider. Das trifft auch dann zu, wenn sie um 180° phasenverschoben sind. Ergänzend die Information, dass der „ H_1 -estimator“ zum Abschätzen komplexwertiger FRF meist die Division des K-LDS mit dem A-LDS der Strukturanregung vornimmt. Reellwertige FRF ergeben sich über die Division beider A-LDS. Der Überblick in Abb. 05-23 soll die eben gebrachten Informationen nochmals zusammenfassen.

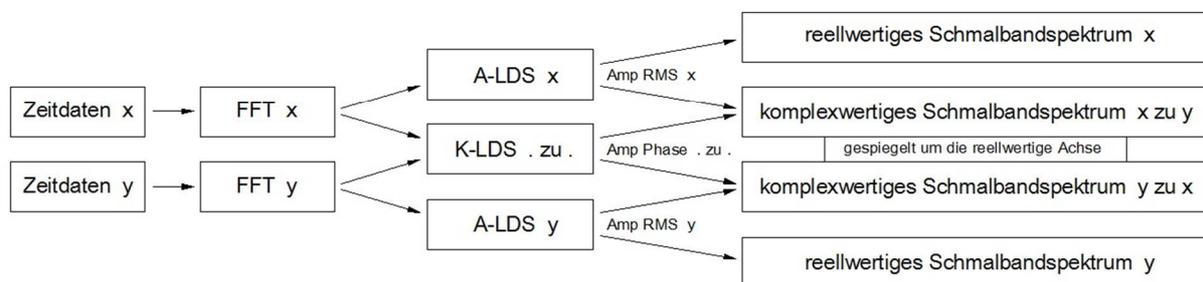


Abb. 05-23: Umlegung von Zeitdaten in den Frequenzraum mit oder ohne Phasenbeziehungen

Ein hier so bezeichnetes komplexwertiges Schmalbandspektrum einer Feldgröße ist aus dem Amp-RMS vom A-LDS zusammen mit der Amp-Phase vom K-LDS gebildet. Zum Herstellen der Phasenbeziehungen eignet sich der Schalldruck an der Senke für LS, da dieser später auch anhand des berechneten Gesamtschalldrucks nachzuweisen ist. In der „empfohlenen“ TPA sollten somit zukünftig alle Zeitdaten komplexwertig genutzt werden können. Abb. 05-24 zeigt bzgl. LDG und TW7, abermals für den in weiterer Folge mehrmals herangezogenen „K2_A10“, die Zeitdaten der drei Beschleunigungssensoren und des Mikrofons, die mit der „bisherigen“ und „optimierten“ TPA verwertet werden.

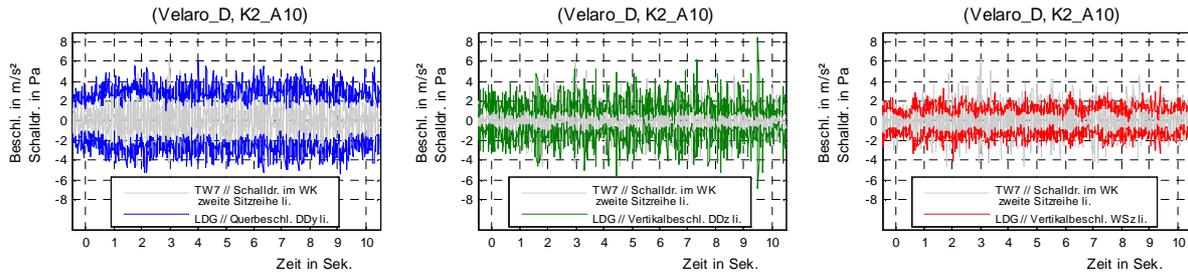


Abb. 05-24: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Zeitdaten von Beschleunigung und Schalldruck

In die komplexwertigen Schmalbandspektren zwischen 1 Hz und 4,8 kHz fließen hier immer eine halbe Sek. davor und danach mit ein, was mit der Einstellung der FFT zusammenhängt. Zu diesen 11 Sek. langen Zeitdaten sieht man in Abb. 05-25 aus den jeweiligen A-LDS einen Amp-RMS, sowie in Abb. 05-26 aus den getrennten K-LDS einen weniger relevanten Amp-RMS und die im adaptierten Datenanalyseteil nun auch zu verwendende Amp-Phase.

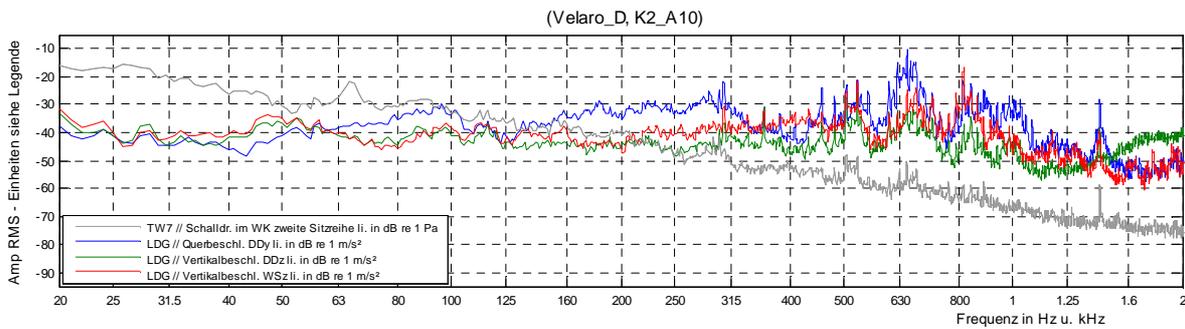


Abb. 05-25: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Zeitdaten über A-LDS zum reellwertigen Frequenzraum

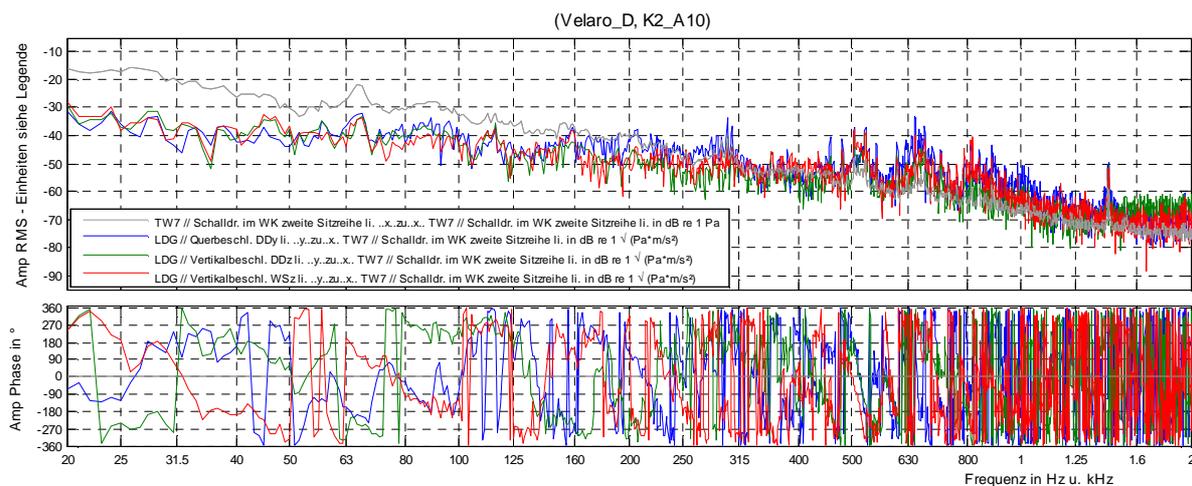


Abb. 05-26: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Zeitdaten über K-LDS zum komplexwertigen Frequenzraum

5.2.3. Berechnung: dynamische Schnittkräfte

Die betrieblichen dynamischen Schnittkräfte für eine Seite des Sfz kamen in der „bisherigen“ TPA aus der impliziten Diagonalen-Matrix-Inversion. Dazu wurden die Dynamischen Massen mit den zugehörigen Amp-RMS der Beschleunigungen in der immer einzeln aufgerufenen internen Funktion „specspec(..)“ multipliziert. Amp-Phasen blieben unberücksichtigt bzw. waren ohnehin nicht vorhanden, weshalb stets nur die jeweilige FRF-Amp verarbeitet wurde. Etwaig unterschiedliche Bandbreiten der Multiplikatoren im Frequenzraum sind übrigens durch eine Interpolation in „specspec(..)“ ausgemerzt.

Diese Vorgehensweise ist zukünftig nicht mehr zielführend. Es bieten sich dafür in Matlab[®] implementierte Funktionen zum Lösen linearer Gleichungssysteme an. Das sind z.B. „linsolve(..)“ oder „lscov(..)“. Daneben existieren noch weitere Varianten bzw. Funktionen. Für mehr Transparenz empfehle ich aber den kurzen Umweg über „inv(..)“ oder „pinv(..)“, je nachdem ob quadratische oder rechteckige Matrizen zu verarbeiten sind. Die erhaltene Gewöhnliche Inverse bzw. Pseudoinverse muss dann mit dem Vektor der Beschleunigungen multipliziert werden. Ebenso können stattdessen die drei mit „svd(..)“ erhaltenen Matrizen nach geeigneter Umformung eingesetzt werden. Für die „optimierte“ und „empfohlene“ TPA ist, in Hinblick auf eine regularisierte SVD und ihre Matrix der Singulärwerte mit reduziertem Rang, die Kombination mit „pinv(..)“ am besten geeignet.

Unabhängig davon liefern auch die anderen Funktionen, abgesehen von der regularisierten SVD, bei Anwendung auf die vorhandenen Messdaten gleichwertige Ergebnisse in Form eines Vektors der dynamischen Schnittkräfte für die drei DoF, aus dem die jeweiligen Amp-RMS und Amp-Phasen über die Regeln der komplexwertigen Rechnung zugänglich sind. Hier ist das für „K2_A10“ bei der Diagonalen- und Vollen-Matrix-Inversion gegenübergestellt, wie Abb. 05-27, Abb. 05-28 und Abb. 05-29 zeigen.

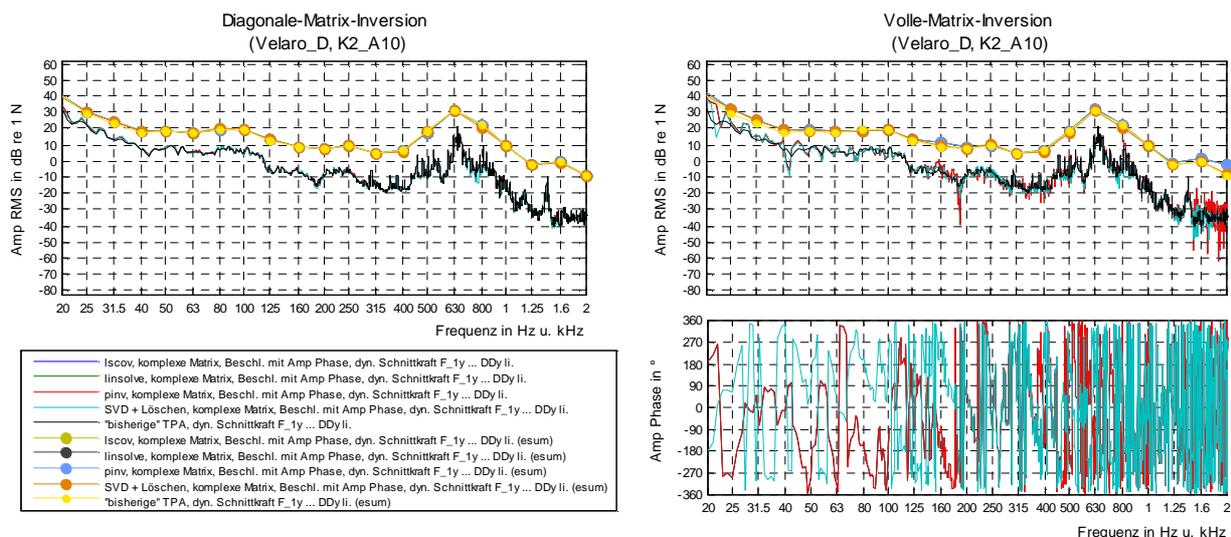


Abb. 05-27: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Unterschiedlich berechnete dynamische Schnittkraft F_1y

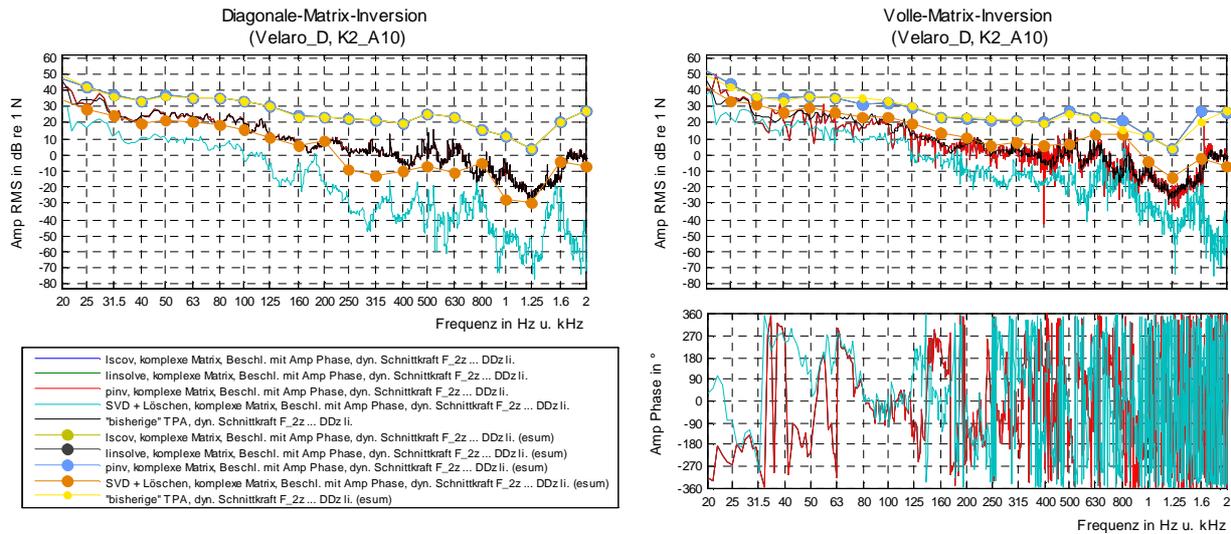


Abb. 05-28: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Unterschiedlich berechnete dynamische Schnittkraft F_2z

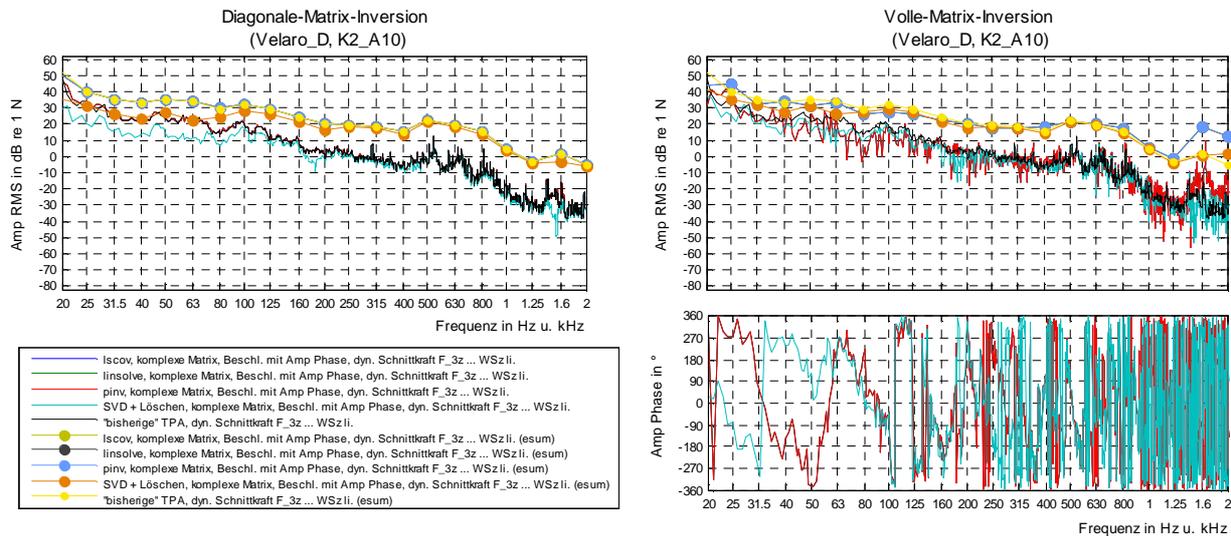


Abb. 05-29: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Unterschiedlich berechnete dynamische Schnittkraft F_3z

Bei Überlagerung gleichwertiger Ergebnisse sieht man nur die in beliebiger Reihenfolge zuletzt eingetragenen dynamischen Schnittkräfte. Die Amp-Phasen sind bei der zusätzlich in der „optimierten“ TPA umgesetzten expliziten Diagonalen-Matrix-Inversion zwar vorhanden, aber hier nicht als Phasenspektren dargestellt. Im Vergleich zur impliziten Diagonalen-Matrix-Inversion der „bisherigen“ TPA sind deren Amp-RMS praktisch ident. Kleinere Differenzen sind evtl. numerisch bedingt. Dabei spielt es noch keine Rolle, ob mit Amp-Phasen der Beschleunigungen bzw. FRF-Phasen der F-a-PF gearbeitet wird. Nicht so bei der Vollen-Matrix-Inversion. Sie liefert aber ohnehin andere Resultate, da das Übersprechen erstmals berücksichtigt ist. Bei den betreffenden Amp-RMS fällt auf, dass innerhalb kleiner Frequenzbereiche starke Veränderungen auftreten, was den Einfluss der sechs zusätzlichen F-a-TF zeigt und nicht unbedingt auf eine schlechte Konditionierung hindeutet, da es auch bei der regularisierten SVD ähnlich ist. Zu dieser ist zu erwähnen, dass für alle Frequenzen,

unabhängig von der jeweiligen Konditionszahl, immer der letzte bzw. kleinste der drei Singulärwerte ausgeschlossen ist. Das hat stark unterschiedliche Wirkungen auf die stets unveränderte Anzahl an dynamischen Schnittkräften. Es bedingt nicht zwingend niedrigere Amp-RMS, wie in den komplexwertigen Schmalbandspektren zu erkennen ist, obwohl sie tendenziell abnehmen, wie die 1/3-Terzmittenfrequenzen zeigen. Betrachtet werden in weiterer Folge nur mehr jene Resultate, die über „pinv(..)“ und/oder „svd(..)“ berechnet sind.

Hier sollen noch weitere Zusammenhänge gefunden werden, die den Einfluss reell- und/oder komplexwertiger F-a-TF bzw. Beschleunigungen in der Vollen-Matrix-Inversion betreffen. Es gibt dann vier Möglichkeiten, um die dynamischen Schnittkräfte festzustellen, wobei die wichtige Variante bereits angegeben ist. Versuche haben gezeigt, dass mit jeweils reellwertigen TF und Beschleunigungen abweichende Amp-RMS eruiert werden, wobei die Amp-Phasen stets 0 sind. Weiters, dass mit reellwertigen TF und komplexwertigen Beschleunigungen auch zu vorherigem Versuch abweichende Amp-RMS und Amp-Phasen berechnet werden, sowie im umgekehrten Fall abermals andere Amp-RMS und Amp-Phasen. In allen vier Fällen sind damit unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten. Bei der expliziten Diagonalen-Matrix-Inversion sind die Amp-RMS in den vier Fällen gleichwertig, die Amp-Phasen dagegen nicht. Sie hängen aber immer nur von den zwei Multiplikatoren ab.

Außerdem soll geklärt werden, welchen Einfluss die in den Amp-RMS und Amp-Phasen der Beschleunigungen enthaltenen Fehler auf die dynamischen Schnittkräfte haben. Das erfolgt durch ihre begrenzte Variation, zum einen in den einzelnen Amp-RMS um $\pm 0,1$ dB und $\pm 0,3$ dB, zum anderen in den einzelnen Amp-Phasen um $\pm 10^\circ$ und $\pm 30^\circ$, sodass bei jeder Frequenz zusätzlich 24 neue Lösungen des linearen Gleichungssystems entstehen. Damit gibt es ausgehend von der Vollen-Matrix-Inversion, umgesetzt mit „pinv(..)“ für „K2_A10“, jeweils für beide möglichen Fehler voneinander unabhängige Wertebereiche der dynamischen Schnittkräfte. Aufgrund ähnlicher Auswirkungen sind nur mehr jene für den Amp-RMS des letzten DoF in Abb. 05-30 angegeben.

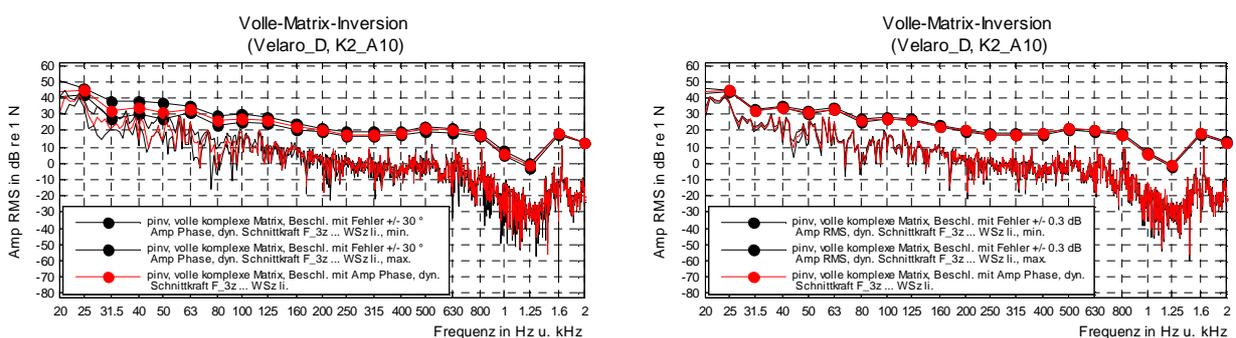


Abb. 05-30: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Dynamische Schnittkraft F_3z bei fehlerhaften Beschleunigungen

In beiden Fällen sind auch die als Phasenspektren darstellbaren Amp-Phasen der dynamischen Schnittkräfte betroffen. Die ersichtlichen Wertebereiche sind fast durchwegs durch die größten Fehler aufgespannt. In den 1/3-Terzmittenfrequenzspektren erkennt man,

dass die Wertebereiche mit der Anzahl ihrer erfassten Frequenzen schmaler werden. Im relevanten Frequenzbereich einer KS-LS-TPA ist diese bei veränderten Amp-Phasen bis zu ca. 3 dB breit. In den komplexwertigen Schmalbandspektren kommen dabei vereinzelt auch Wertebereiche mit ca. 30 dB vor. Für die veränderten Amp-RMS ist analog dazu ca. 1 dB bzw. ca. 10 dB feststellbar. Problematisch sind aus meiner Sicht daher eher Fehler in den Amp-Phasen der Beschleunigungen. Versuchsweise konnte ich für beide Varianten der Matrix-Inversions-Methode außerdem feststellen, dass sich bei identer Verdrehung aller Beschleunigungen um einen gleichen Winkel in selbige Richtung, lediglich alle Amp-Phasen der dynamischen Schnittkräfte ebenso verdrehen. Ist die Matrix der F-a-TF nur diagonal-besetzt, so bewirkt eine Verdrehung einer Beschleunigung eine idente Verdrehung der zugehörigen dynamischen Schnittkraft. Ist sie voll-besetzt, dann bewirkt eine Verdrehung einer Beschleunigung unterschiedliche Reaktionen in den Amp-RMS und Amp-Phasen aller dynamischen Schnittkräfte, wobei das vom XT abhängig ist. Diese Erkenntnisse sind auch auf größere lineare Gleichungssysteme übertragbar.

5.2.4. Reduktion: 1/3-Terzmittenfrequenzen

Jetzt geht es um die energetisch auf definierte 1/3-Terzmittenfrequenzen summierten Amp-RMS. Damit können die 1/3-Terzmittenfrequenzspektren von gemessenen oder berechneten Feldgrößen angegeben werden, die bzgl. der Energie gleichwertige Informationen bieten wie ihre Schmalbandspektren. In einer KS-LS-TPA ist das für den visuellen Vergleich und zur Interpretation von Beschleunigungen, dynamischen Schnittkräften oder Schalldrücken auf jeden Fall legitim, da mit Schmalbandspektren unbewusst eine hohe Genauigkeit der Ergebnisse assoziiert wird, die evtl. nicht zutrifft. Umgesetzt wurde die Umrechnung in der „bisherigen“ und „optimierten“ TPA mit der internen Funktion „spec2terz(..)“. Das kann auch zukünftig so erfolgen. Auf die standardisierte Vorgehensweise bei der Berechnung wird hier nicht eingegangen, dafür auf ein Problem mit den 1/3-Terzmittenfrequenzspektre. In der „bisherigen“ TPA wurden sie auch rechnerisch verarbeitet. Das sollte jedoch nur mit den Feldgrößen in den Schmalbandspektren geschehen. Im genannten Fall betrifft es die dynamischen Schnittkräfte. Somit waren in Folge auch für die Teilschalldrücke keine Schmalbandspektren mehr verfügbar, was einen erheblichen Informationsverlust darstellt. Bei korrekter Umsetzung ist es rein energetisch betrachtet zwar gleichwertig, in Hinblick auf einen zukünftig auch vektoriell summierten Gesamtschalldruck aber der falsche Weg. Allgemein kann man damit auch fordern, dass in einer KS-LS-TPA mit der höchsten verfügbaren Qualität aller FRF bzw. gemessenen und/oder berechneten Feldgrößen gearbeitet werden sollte.

5.2.5. Berechnung: Teilschalldrücke

Die Berechnung der betrieblichen Teilschalldrücke, in der „bisherigen“ TPA immer nur ausgehend von den mechanischen Schnittstellen auf einer Seite des Sfz, erfolgte darin mit der jeweils separat aufgerufenen internen Funktion „specspec(..)“. Ihre implementierte Interpolation glich die unterschiedlich vorhandenen Bandbreiten im Frequenzraum beider Multiplikatoren aus, sodass von der FRF-Amp einer betreffenden F-p-TF ebenfalls nur jene

1/3-Terzmittenfrequenzen verarbeitet wurden, an denen von der zugehörigen dynamischen Schnittkraft der energetisch summierte Amp-RMS vorlag. Das führte zu einem Amp-RMS vom Teilschalldruck in eben diesen selbigen 1/3-Terzmittenfrequenzen. Vorhandene FRF-Phasen blieben gänzlich unberücksichtigt. Nicht vorhandene Amp-Phasen der dynamischen Schnittkräfte wären zuvor schon verloren gegangen.

Dieser Vorgang ist problematisch aus zweierlei Gründen. Zum einen, da die reellwertigen Schmalbandspektren der dynamischen Schnittkräfte nicht verarbeitet wurden. Mit den in dieser Masterarbeit eingeführten Änderungen werden komplexwertige Schmalbandspektren verarbeitet. Zum anderen ist der bestehende Vorgang problematisch, da mit der Interpolation in „specspec(..)“ ein zusätzlicher Fehler auftrat. Es ist im konkreten Fall überflüssig, da es bei den 1/3-Terzmittenfrequenzen schon eine FRF-Amp gibt. Falsch ist es außerdem, da es auch bei zweckmäßiger Interpolation keinen Einfluss hat, wie die F-p-TF im Frequenzraum zwischen den 1/3-Terzmittenfrequenzen aussieht. Bei den dynamischen Schnittkräften ist das anders, da sie energetisch summiert sind. Zur Korrektur der „bisherigen“ TPA ist es notwendig, die FRF-Amp im gesamten Frequenzraum auf 1/3-Terzmittenfrequenzen energetisch zu mitteln. Die Möglichkeit dazu ist mit „spec2terz(..)“ sogar gegeben. Die korrigierte Variante der „bisherigen“ TPA wird in weiterer Folge auch quantitativ angegeben. Sie darf jetzt aber nicht mit der „optimierten“ bzw. „empfohlenen“ TPA verwechselt werden, bei der das Problem prinzipiell wegfällt.

Der bei den dynamischen Schnittkräften gezeigte Vergleich wird ausgehend von „pinv(..)“ und/oder „svd(..)“ für die Teilschalldrücke fortgeführt. Aus genannten Gründen treten Unterschiede zwischen den Teilschalldrücken der nun zweifach angegebenen impliziten zur expliziten Diagonalen-Matrix-Inversion auf. Die Ergebnisse der „optimierten“ TPA sind wie gehabt für „K2_A10“ bei Diagonaler- und Voller-Matrix-Inversion bzw. zur „bisherigen“ TPA und ihrer zusätzlich korrigierten Variante gegenübergestellt, was in Abb. 05-31 für einen der drei Teilschalldrücke ersichtlich ist.

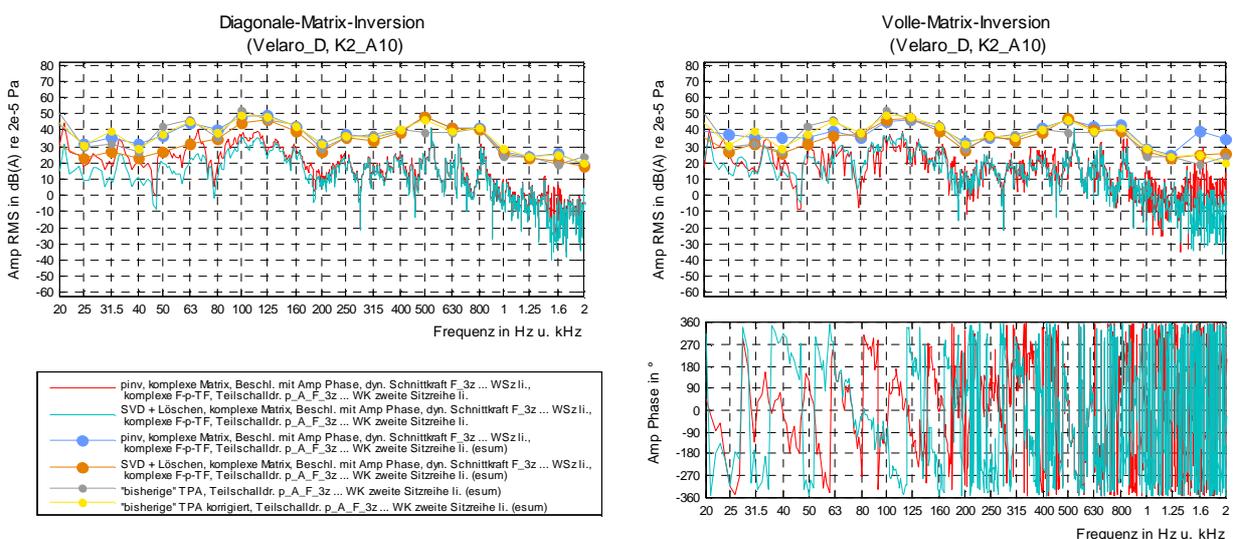


Abb. 05-31: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Unterschiedlich berechneter Teilschalldruck pA_F_3z

Auch dazu soll überlegt werden, welchen Einfluss die in den F-p-TF enthaltenen Fehler haben. Solche in den FRF-Phasen verursachen gleichwertig abweichende Amp-Phasen. Sie sind nur im Phasenspektrum erkennbar und im Fall später vektoriell summierter Teilschalldrücke relevant. Fehler in den FRF-Amp wirken lediglich als skalare Multiplikatoren. Generell ist zu den Teilschalldrücken zu empfehlen, sie unabhängig von auftretenden bzw. vermuteten Fehlern und ohne Rücksicht auf die später ausgeführte Art ihrer Summierung zu einem Gesamtschalldruck, komplexwertig zu berechnen.

5.2.6. Spiegelung: dynamische Schnittkräfte und Teilschalldrücke

In der Messdatenverarbeitung der „bisherigen“ TPA wurden die einseitig berechneten dynamischen Schnittkräfte im Betrieb auf die andere Seite des Sfz gespiegelt, indem ihre energetische Summe verdoppelt wurde. Selbiges betraf auch die zugehörigen Teilschalldrücke. Beides war die Folge aller zuvor getätigten Vereinfachungen und Annahmen im entsprechenden Modell der KS-LS-TPA. Im ersten Moment erscheint das unproblematisch und nachvollziehbar, z.B. wenn man an die vibromechanische Symmetrie links/rechts denkt oder weiß, dass die zeitlichen Segmente der Betriebsmessungen meist geradlinig verlaufende und relativ gleichmäßige Sfw betrifft. Bei genauer Überlegung gibt es Kritikpunkte an dieser Spiegelung, die in der „empfohlenen“ TPA wegen der höheren Modellgüte mit beidseitig am Sfz berücksichtigten DoF nicht mehr relevant ist. In der „optimierten“ TPA ist sie ebenfalls nicht mehr ausgeführt.

Größter Kritikpunkt ist das unberücksichtigte XT zwischen den DoF der linken und rechten Seite. Ein Teil der in den Betriebsmessungen erfassten Beschleunigungen ist immer auf Ursachen an der gegenüberliegenden Seite zurückzuführen. Stellvertretend für viele Sfz sind am Velaro D die Voraussetzungen für Übersprechen zweifellos gegeben, z.B. durch den H-Rahmen oder die Traverse. Die später zu bildende energetische Summe der dynamischen Schnittkräfte zwischen DG und WK und der berechnete Gesamtschalldruck sind damit tendenziell überbewertet. Eine nicht perfekt erfüllbare vibromechanische Symmetrie links/rechts bzgl. der z-x-Ebene des Sfz begünstigt weitere Fehlereinflüsse. Im Fall der TDG zählt auch, wie sich die Anregungen jeweils beider außermittig angebrachter Fahrmotoren und Getriebe verteilen. Ein weiterer Kritikpunkt betrifft die Anregungen aller vier Rad/Schiene-Kontakte. Sie sind auch bei einer hohen Qualität des Sfw nicht gleichwertig und hängen auch von den Rädern ab. Auch bei optimalen Bedingungen treten, in den 1/3-Terzmittenfrequenzen der vertikal gemessenen Beschleunigungen über den vier Achslagern eines DG, teils Abweichungen der Amp-RMS zwischen linken und rechten Seiten von bis zu ca. 5 dB auf. Das ist auch bei beidseitig identen DoF im Modell der KS-LS-TPA zu erwarten. Der letzte Kritikpunkt betrifft nur die Spiegelung der Teilschalldrücke. Dazu ist von der nicht ausreichend erfüllbaren vibroakustischen Symmetrie links/rechts des Sfz auszugehen.

5.2.7. Evaluierung: summierter Gesamtschalldruck

Der betriebliche Gesamtschalldruck sollte je nach frequenzabhängiger Kohärenz zwischen den Teilschalldrücken entweder vektoriell oder energetisch gebildet werden. Eine Trennung

dürfte für den WK eines Sfz um ca. 500 Hz zulässig sein. In der „bisherigen“ TPA wurde ausschließlich die energetische Summe gebildet, zwar aus den in der internen Funktion „specadd(..)“ doppelt eingesetzten und von der linken Seite ausgehenden Teilschalldrücken. Konkret wurden somit je sechs an den 1/3-Terzmittenfrequenzen vorhandene Amp-RMS verarbeitet. In der „optimierten“ TPA wird einerseits ebenfalls die energetische Summe gebildet, allerdings aufgrund komplexwertiger Teilschalldrücke nicht mit genannter Funktion. Außerdem sind nur drei davon verarbeitet, da die Spiegelung nicht vorgenommen wird. Das Resultat ist auch reellwertig, wobei eine höhere Auflösung im Frequenzraum vorliegt, die nachfolgend nur zur Visualisierung zusätzlich auf 1/3-Terzmittenfrequenzen reduziert ist. Andererseits ist auch die vektorielle Summierung erstmals umgesetzt. Sie führt zu einem komplexwertigen Schmalbandspektrum, das ebenfalls zusätzlich reduziert ist auf 1/3-Terzmittenfrequenzen.

Die zur Evaluierung prinzipiell geforderte Übereinstimmung zum gemessenen Schalldruck, kann aber auch mit der „optimierten“ TPA weder theoretisch noch praktisch erreicht werden, da gemäß der vorhandenen Messdaten nur drei DoF zu berücksichtigen sind und zudem in jedem 10-Sek.-Abschnitt mit Sicherheit einige relevante Quellen für LS einen Einfluss hatten. Diese Evaluierung selbst spielt deshalb hier keine tragende Rolle. Die bei den Teilschalldrücken schon festgestellten Unterschiede, basierend auf jenen der abweichend berechneten dynamischen Schnittkräfte, sollten sich unabhängig von der Art der Summierung damit fortsetzen. Mit bekannter Systematik sind, für „K2_A10“ in Abb. 05-32 bzw. Abb. 05-33 von der „bisherigen“ und „optimierten“ TPA, die unterschiedlich summierten Gesamtschalldrücke separat angegeben und auch dem gemessenen Schalldruck an der Senke für LS bzw. dem Ort des Mikrofons im TW7 gegenübergestellt.

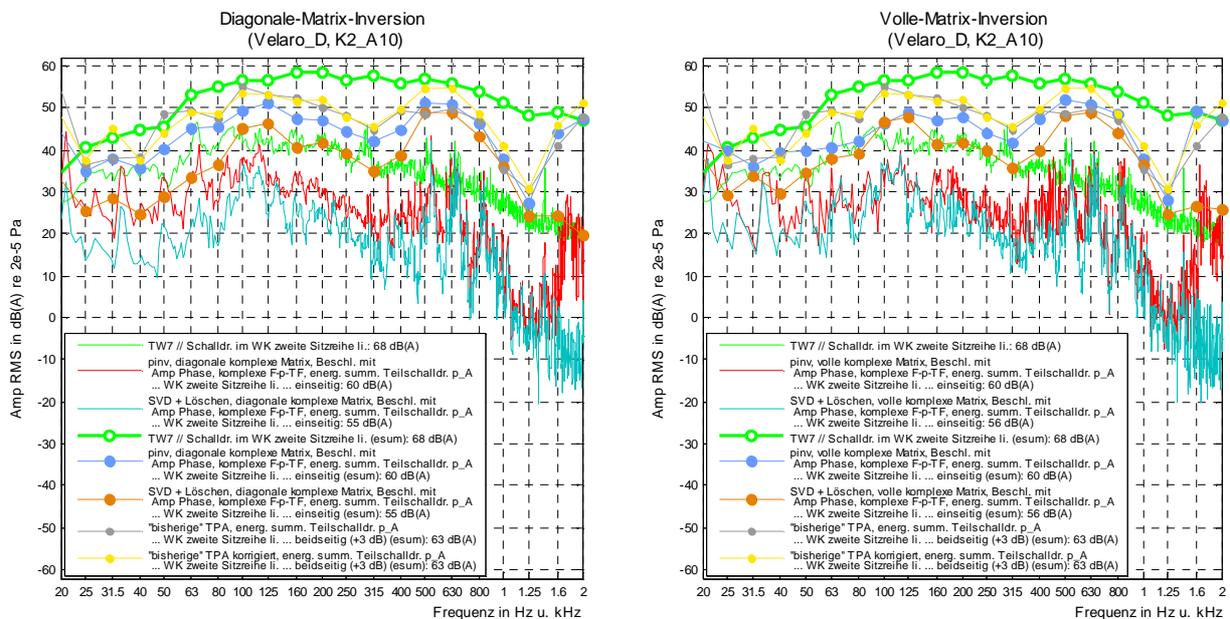


Abb. 05-32: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Überblick der energetisch summierten Teilschalldruck

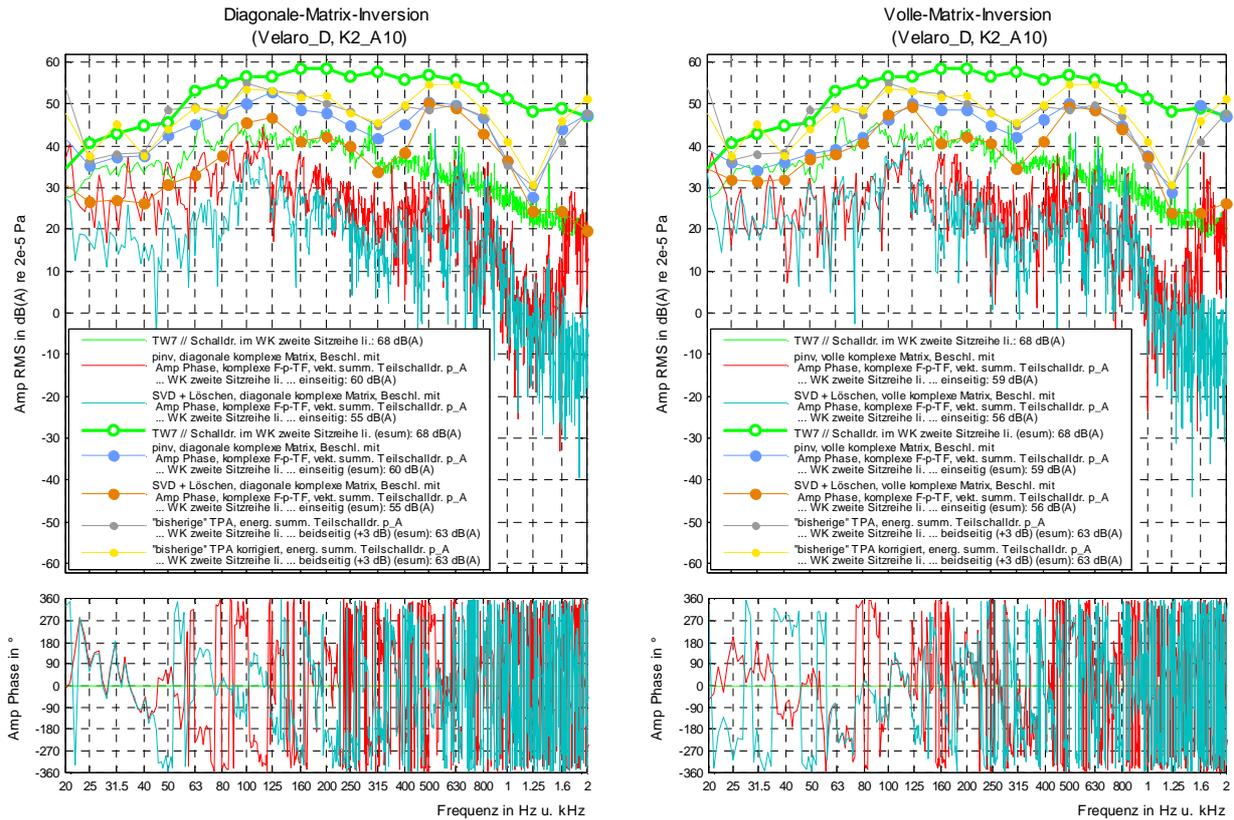


Abb. 05-33: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Überblick der vektorieell summierten Teilschalldruck

Im direkten Vergleich zwischen den unterschiedlich summierten Pendanten zeigt sich, dass ein vektorieell summierter Gesamtschalldruck im komplexwertigen Schmalbandspektrum stets eine größere Streuung seines Amp-RMS besitzt. Das ist mit der etwaigen gegenseitigen Auslöschung bzw. Verstärkung der Teilschalldrücke möglich. Die Fehler können bei evtl. ungenauen Phasenbeziehungen damit aber auch größer werden als bei energetischer Addition.

Zur Veranschaulichung des vektorieell summierten Gesamtschalldrucks und der damit genauer möglichen Evaluierung der KS-LS-TPA sind in Abb. 05-34 die Scatter- bzw. Vektorplots, ausgehend von „pinv(..)“ in der Vollen-Matrix-Inversion bei „K2_A10“, für einen begrenzten Frequenzbereich und daraus gewählten 115 Hz angegeben. Diese beiden Formen der Visualisierung werden hier erstmals gezeigt. Ein Scatterplot gibt farblich den Amp-RMS vom Teilschalldruck im nach unten und oben begrenzten Frequenzradius bzw. -bereich an. Die Richtung einer der punktförmigen Markierungen entsteht durch die zugehörige Amp-Phase, deren Abstand zum Mittelpunkt durch die betreffende Frequenz. Ein Vektorplot gibt ähnliche Informationen an, jedoch immer nur für eine einzige Frequenz des Scatterplots. Länge und Farbe des Vektors entstehen durch den Amp-RMS, seine Orientierung durch die Amp-Phase, die sich am gemessenen Schalldruck im TW7 orientiert. Dieser ist es, der anhand der Teilschalldrücke nachgebildet werden soll.

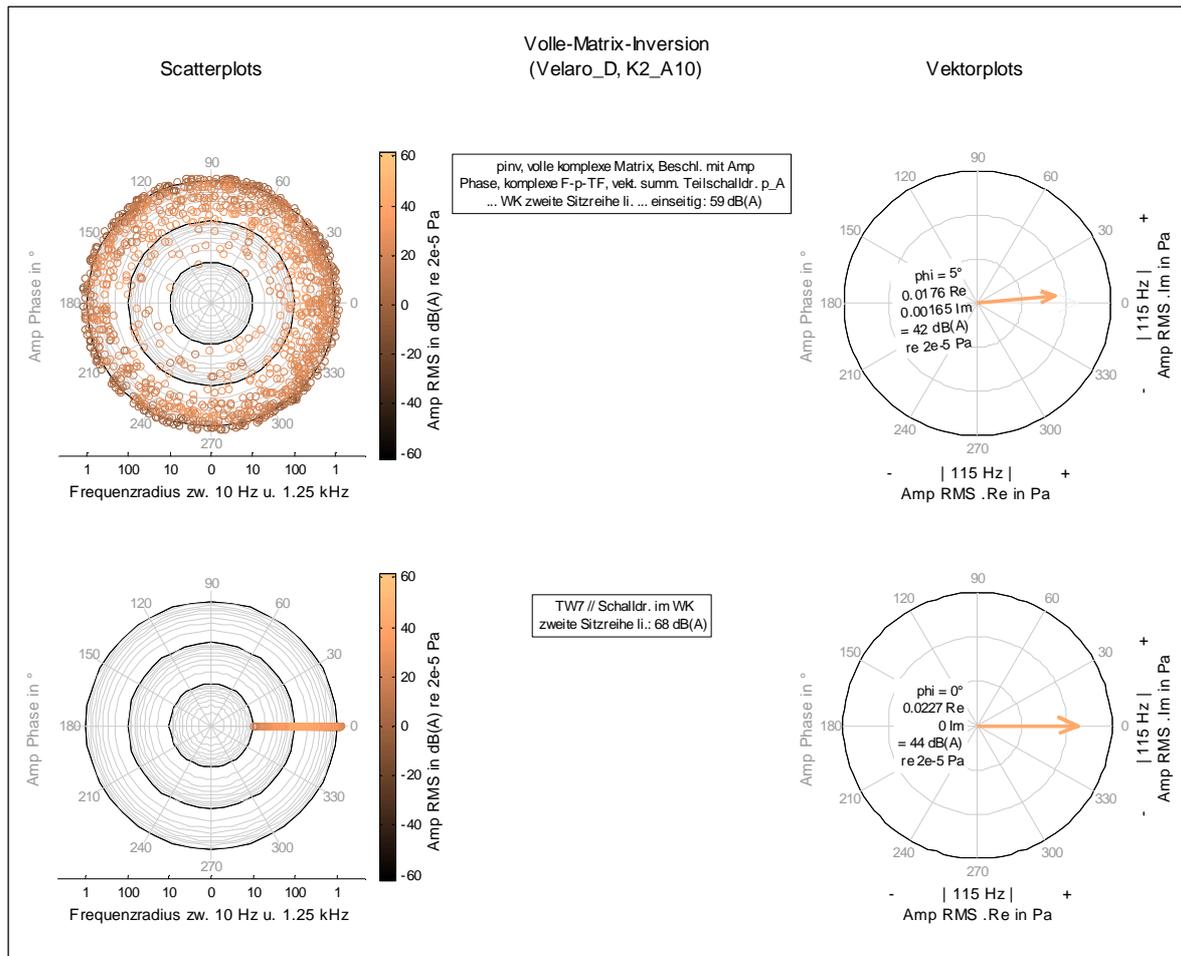


Abb. 05-34: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Scatter- und Vektorplots zur Evaluierung

Man sieht eine gute Übereinstimmung bei 115 Hz. Der Scatterplot zeigt, dass das im angegebenen Frequenzbereich aber meist nicht zutrifft. Mit der „empfohlenen“ TPA sollte sich das verbessern. Bei 115 Hz haben nur zwei Teilschalldrücke einen wesentlichen Einfluss an der vektoriellen Summe. Das trifft dann auch auf den energetisch summierten Gesamtschalldruck zu. Dieser ist in diesem Fall niedriger, da beide Teilschalldrücke kaum phasenverschoben sind. Eine geringe Modellgüte und/oder unbekannte Fehlereinflüsse sprechen für die energetische Summierung. Zur Evaluierung kann es aber genügen, nur die 1/3-Terzmittenfrequenzspektren zu vergleichen. Je detaillierter die KS-LS-TPA auszuführen ist und je wichtiger niedrige Frequenzen sind, umso interessanter wird die vektorielle Summierung. Daneben kann sie bei Frequenzen mit bekannten vibroakustischen Problemen, die dann möglicherweise zutreffende gegenseitige Verstärkung der Teilschalldrücke aufzeigen. In der „empfohlenen“ TPA sollten deshalb beide Arten umsetzbar sein.

5.2.8. Vergleich: summierte dynamische Schnittkräfte

In der bestehenden Methode wurden die einseitigen dynamischen Schnittkräfte beim energetischen Addieren mit der internen Funktion „specadd(..)“ jeweils doppelt berücksichtigt

und dadurch gespiegelt. Im konkreten Fall waren deshalb je sechs an den 1/3-Terzmittenfrequenzen vorhandene Amp-RMS relevant. Dass deren ursprünglich reellwertige Schmalbandspektren ungenutzt blieben, hatte keinen Einfluss. Bei der „optimierten“ TPA ist die energetische Summierung aus bereits genannten Gründen prinzipiell ohne Spiegelung vorgesehen. Außerdem basiert diese jetzt auf komplexwertigen Schmalbandspektren. Die Visualisierung kann allerdings weiterhin über 1/3-Terzmittenfrequenzspektren erfolgen. Eine Zusammenfassung aller relevanten 10-Sek.-Abschnitte in Form eines Wertebereichs dürfte insgesamt am besten geeignet sein. Dies wird bzgl. der verarbeiteten Messdaten noch angeführt.

5.3. Programmierte Funktionen und Routinen

Die mit dieser Masterarbeit vorgeschlagene Messdatengenerierung und -verarbeitung erfordert eine neue Vorgehensweise in Matlab®. In der zukünftigen Anwendung der „empfohlenen“ TPA sollte aber auch eine Beschleunigung der damit verbundenen Abläufe möglich sein. Dazu wurden von mir entsprechende Funktionen und Routinen programmiert. Ein durchdachter und standardisierter Prozess, der unabhängig vom Versuchsträger die Quellen für KS bzw. Senken für LS anhand der vorangegangenen Messdatengenerierung automatisiert importiert und strukturiert, ermöglicht danach über manuell wählbare Einstellungen die Berechnung der Resultate und gibt sie dem Anwender reproduzierbar aus.

Geht man von den technisch unverändert erfassten Messdaten aus, so kann anhand aller als Textdateien vorliegenden TF und mit den über „sony3000matlab(..)“ importierten Zeitdaten, die weitere Messdatenverarbeitung nach wesentlich kürzerer Vorarbeit abgewickelt werden. In der „bisherigen“ TPA war dazu mindestens ein Tag notwendig und es gab großes Potential für menschlich bedingte Fehler. Es sind in weiterer Folge nur mehr fünf unterschiedliche neue Funktionen aufzurufen. Die darin integrierte Funktion „spec2terz(..)“ ist nach einer Änderung nun auch für komplexwertige Schmalbandspektren geeignet. Auf die fünf neuen, von denen drei nur ein einziges Mal einzusetzen sind und zwei jeweils doppelt, wird bzgl. ihrer grundlegenden Aufgaben, Optionen und rückgegebenen Ergebnisse kurz eingegangen.

- „pulseFRF2matlabMatrix(..)“
 - Importiert einmalig alle F-a-TF bzw. F-p-TF.
 - Erstellt jeweils Datenstrukturen und spannt quadratische oder rechteckige Matrix bzw. Vektor der Daten auf.
 - Berechnet für alle FRF-Amp auch energetisch gemittelte 1/3-Terzmittenfrequenzen.
 - Optional: Strukturierte Visualisierung und/oder Ausgabe in Tabellenkalkulationsdatei.
 - Optional: Interaktive Angabe des frequenzabhängigen XT zwischen mechanischen Schnittstellen.

- „time2complexnb(..)“
 - Importiert einmalig alle Zeitdaten der Beschleunigungen und/oder Schalldrücke und stellt Phasenbeziehungen her.
 - Erstellt jeweils Datenstrukturen und spannt Vektor der Daten auf.
 - Berechnet für alle Amp-RMS auch energetisch summierte 1/3- Terzmittenfrequenzen.
 - Optional: Strukturierte Visualisierung.

- „force_from_inv(..)“
 - Importiert einmalig alle strukturierten Daten der F-a-TF und Beschleunigungen.
 - Ermittelt und visualisiert die frequenzabhängige Konditionszahl und den zugehörigen Rang der Matrix.
 - Berechnet komplexwertige dynamischen Schnittkräfte entweder nach Diagonaler-, Voller- oder Überdeterminierter-Matrix-Inversion bzw. regularisierter SVD bei gewählter zulässiger Konditionszahl.
 - Erstellt Datenstrukturen aller dynamischen Schnittkräfte und spannt Vektor der Daten auf.
 - Berechnet für alle Amp-RMS auch energetisch summierte 1/3- Terzmittenfrequenzen.
 - Optional: Strukturierte Visualisierung und/oder Ausgabe in Tabellenkalkulationsdatei.

- „partial_pressure_calc(..)“
 - Importiert einmalig strukturierte Daten der F-p-TF und dynamischen Schnittkräfte.
 - Berechnet die komplexwertigen Teilschalldrücke.
 - Erstellt Datenstrukturen aller Teilschalldrücke und spannt Vektor der Daten auf.
 - Berechnet für alle Amp-RMS auch energetisch summierte 1/3- Terzmittenfrequenzen.
 - Optional: Strukturierte Visualisierung und/oder Ausgabe in Tabellenkalkulationsdatei.

- „sum_spec(..)“
 - Importiert einmalig strukturierte Daten der dynamischen Schnittkräfte oder Teilschalldrücke.
 - Berechnet wahlweise die energetische oder vektorielle Summe.
 - Erstellt Datenstruktur der reell- oder komplexwertigen Summe.
 - Berechnet für alle Amp-RMS auch energetisch summierte 1/3- Terzmittenfrequenzen.
 - Optional: Strukturierte Visualisierung und/oder Ausgabe in Tabellenkalkulationsdatei.
 - Optional: Interaktive Darstellung der frequenzabhängigen Verkettung bei vektorieller Addition.

Abb. 05-35 zeigt aus Matlab[®] übernommen den exemplarischen Einsatz bzgl. der relevanten Messdaten. Abb. 05-36, Abb. 05-37 und Abb. 05-38 zeigen die damit hervorgerufenen Rückgaben in diesen beispielhaften Fall.

```

pulseFRF2matlabMatrix('Test_acc_F_1y.txt','Test_acc_F_2z.txt','Test_acc_F_3z.txt',...
    'Velaro_D','Impulshammermessungen','Stand','Test-3x3-Matrix-der-acc','plot','chart',20,2000);

pulseFRF2matlabMatrix('Test_wke_F_1y.txt','Test_wke_F_2z.txt','Test_wke_F_3z.txt',...
    'Velaro_D','Impulshammermessungen','Stand','Test-1x3-Vektor-der-wke','noplots','nochart',20,2000);

time2komplexb('Test_D_K2_A10.mat',...
    43,38,39,40,'Test-3x1-Vektor-der-a-K2_A10','noplots',20,2000);

force_from_Inv('Test-3x3-Matrix-der-acc.mat','Test-3x1-Vektor-der-a-K2_A10.mat',...
    'Voll',30,'Test-3x1-Vektor-der-F-K2_A10','noplots','nochart',20,2000);

sum_spec('Test-3x1-Vektor-der-F-K2_A10.mat',...
    'energ','Test-1x1-Vektor-der-Fsum-energ-K2_A10','noplots','nochart',20,2000);

partial_pressure_calc('Test-1x3-Vektor-der-wke.mat','Test-3x1-Vektor-der-F-K2_A10.mat',...
    'Test-1x3-Matrix-der-pp-K2_A10','noplots','nochart',20,2000);

sum_spec('Test-1x3-Matrix-der-pp-K2_A10.mat',...
    'vekt','Test-1x1-Vektor-der-psum-vekt-K2_A10','plot','chart',20,2000);
    
```

Abb. 05-35: „optimierte“ TPA // Einsatz der neu entwickelten Funktionen

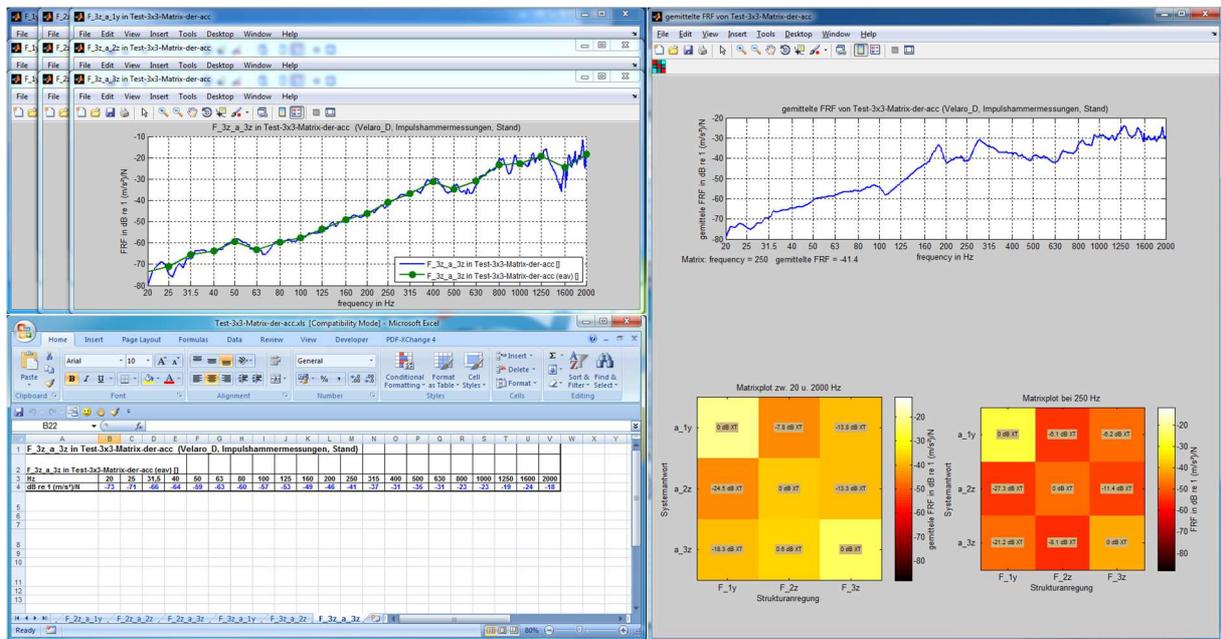


Abb. 05-36: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, alle Abschnitte // Strukturierte Rückgabe von „pulseFRF2matlabMatrix(.)“

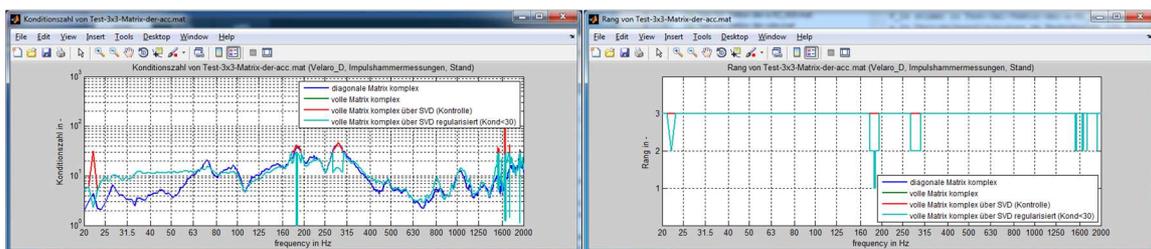


Abb. 05-37: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, alle Abschnitte // Konditionszahl und Rang von „force_from_Inv(.)“

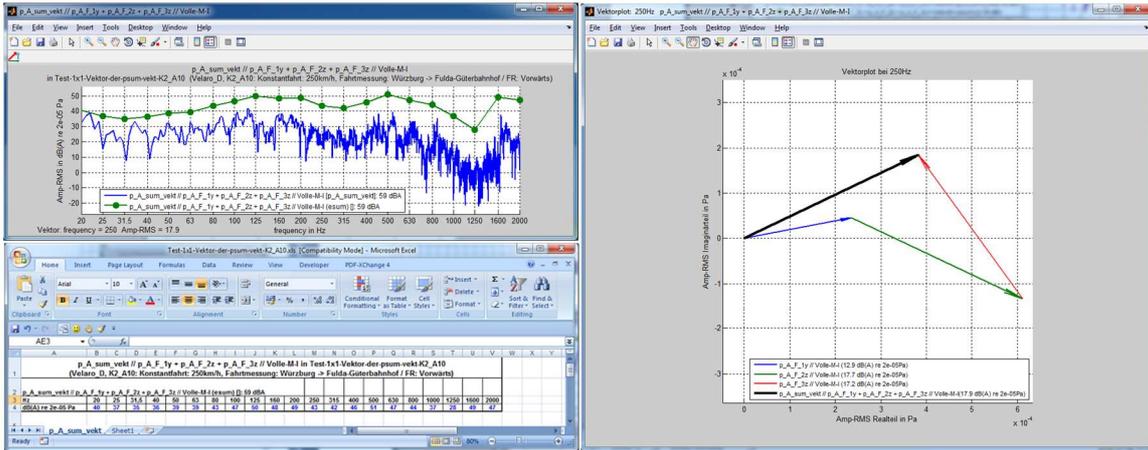


Abb. 05-38: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Strukturierte Rückgabe von „sum_spec(..)“

Die in den neuen Funktionen am Ende ersichtlichen Zahlenwerte legen den Frequenzbereich zur Rückgabe fest. Bei der „bisherigen“ TPA musste das völlig separat über weitere interne Funktionen erfolgen, die im dazu skizzierten schematischen Ablauf aber nicht vermerkt waren. Die zukünftige Messdatengenerierung und -verarbeitung der „empfohlenen“ TPA ist in Abb. 05-39 als schematisch angeführt, wobei trotz weniger Schritte nun auch die visuelle Rückgabe und automatisierte Sicherung der Daten beim einmaligen Durchlauf inbegriffen ist.

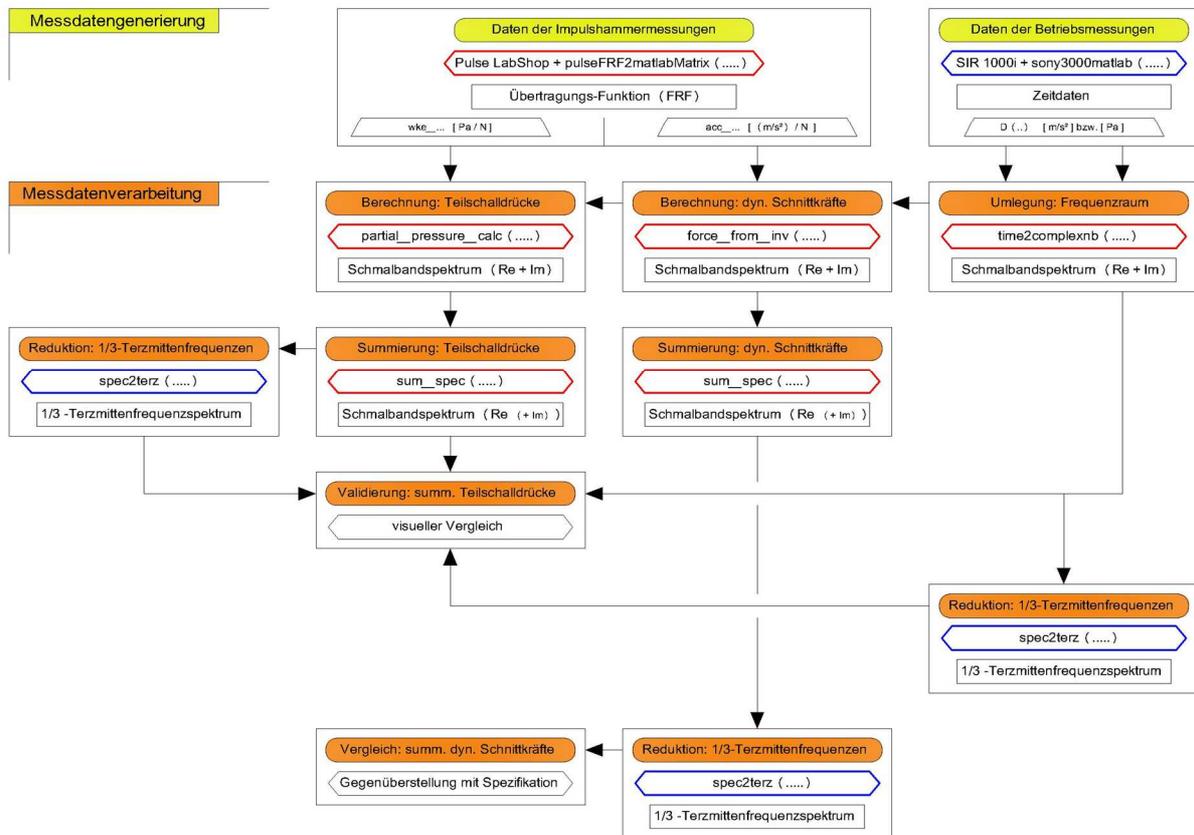


Abb. 05-39: „empfohlene“ TPA // Schematischer Ablauf im Datenanalyseteil

Das angegebene XT im Matrixplot bzw. auch der vektoriell summierte Gesamtschalldruck im Vektorplot sind je bei 250 Hz durch die interaktive Auswahl per Mausklick auf den Plot zusätzlich ausgegeben. Das kann für jede Frequenz und beliebig oft erfolgen. Die Rückgaben der weiteren neuen Routinen und Funktionen sehen übrigens ähnlich aus. Alleinig Konditionszahl und Rang werden immer visualisiert. Sie zeigen damit sehr gut den Einfluss einer regularisierten SVD auf die Matrix der F-a-TF, bei einer zuvor vom Anwender festzulegenden zulässigen Konditionszahl.

Zu bemerken ist, dass alle in dieser Masterarbeit angegebenen Resultate noch nicht mit den fünf neuen Funktionen berechnet sind. Sie sind unabhängig von den davor von mir noch sehr viel umfangreicher erstellten Skripten ausgeführt und von Grund auf neu entwickelt, um sie auf das Wesentliche zurückzuführen. Das diente zugleich der gegenseitigen Validierung, wobei das zu absolut identen Resultaten führte.

5.4. Anpassung der bestehenden Grenzkurve zur vibroakustischen Bewertung

Die bei der SAGÖ, Graz in internen Spezifikationen für diverse S_{fz} verwendete Grenzkurve wird hier nochmals beleuchtet bzw. es wird untersucht, ob sie geeignet ist für den Velaro D. An der Definition einer energetischen Summe der dynamischen Schnittkräfte bei den 1/3-Terzmittenfrequenzen soll aber prinzipiell festgehalten werden. Zu den Annahmen bei der früheren Festlegung zählte, dass entsprechend der „vereinfachten“ TPA auf der Unterseite des LT in Achsenrichtung z eine F-a-PF vorlag, die zeitlich integriert eine konstante F-v-PF von - 110 dB re 1 (m/s)/N bei allen 1/3-Terzmittenfrequenzen angab. Da jeweils am linken LT des EW8 und TW7 die Impulshammermessung umgesetzt wurde, können Vergleiche zur Annahme gezogen werden, wie in Abb. 05-40 ersichtlich ist.

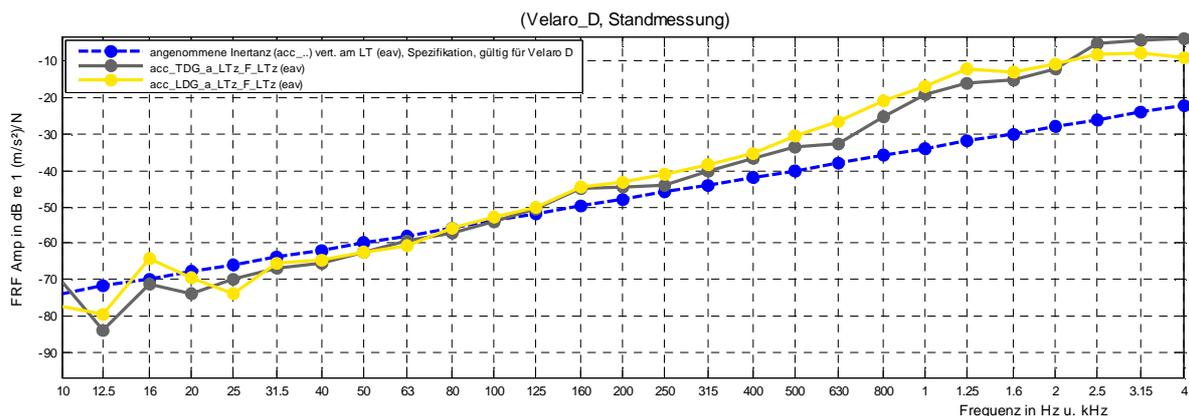


Abb. 05-40: EW8, TW7 // F-a-PF: LT in Achsenrichtung z aus Messung und Spezifikation

Wegen der offensichtlichen Abweichungen bzgl. des Velaro D, sollte die darauf basierende Grenzkurve für die energetisch summierten dynamischen Schnittkräfte angepasst werden. Es betrifft immer das jeweils untersuchte S_{fz}. Zwischen fast baugleichen WK sind die

Unterschiede relativ gering. In Abb. 05-41 ist eine mögliche Adaptierung angegeben, wobei dazu beide gemessenen F-a-PF verwertet sind.

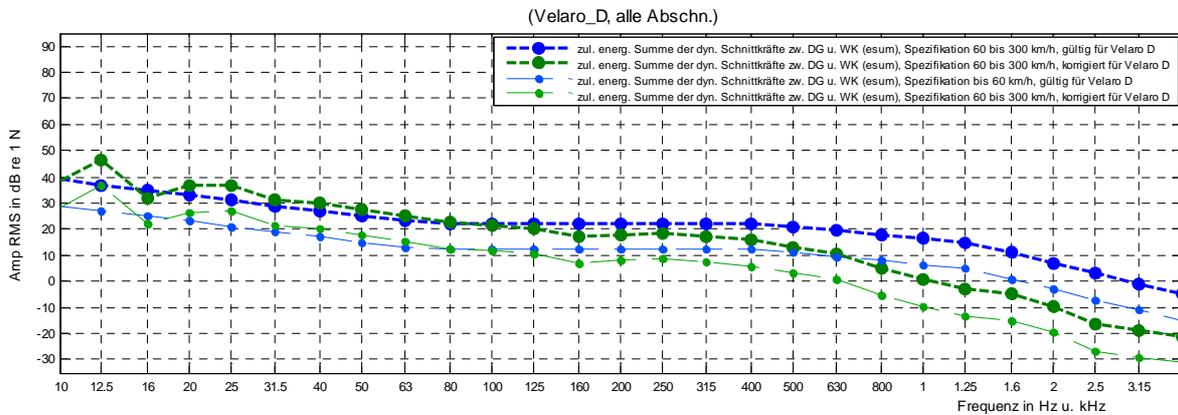


Abb. 05-41: TDG, LDG, EW8, TW7 // Adaptierte Grenzkurve für energetisch summierte dynamische Schnittkräfte

Zur Anpassung kann man sich vorstellen, dass eine F-a-PF im Prinzip angibt, wie sehr die Oberfläche schwingt, wenn genau dort eine Anregung erfolgt. Mit ansteigender Frequenz erfordert das im konkreten Fall eine kleinere dynamische Schnittkraft als es früher für die Spezifikation angenommen wurde. Der über den LT eingebrachte KS pflanzt sich im WK fort und ist darin hör- und/oder spürbar. Falls aufgrund dessen ein gewisser Schalldruck nicht überschritten werden darf, dann erlaubt eine in ihrer FRF-Amp niedrigere F-a-PF die Anhebung der Grenzkurve. Das Gegenteil sollte zwingend zu einer Absenkung führen. Daneben erscheint auch die unabhängig von Betriebsmodi des S_{fz} und befahrenem S_{fw} geforderte Einhaltung fragwürdig. Es gibt derzeit zwei Geschwindigkeitsbereiche, getrennt bei 60 km/h, wovon hier aufgrund der verwerteten 10-Sek.-Abschnitte immer der obere relevant ist. Der untere hat je 1/3-Terzmittenfrequenz einen genau um 10 dB abgesenkten Amp-RMS, wie vorhin auch eingetragen ist. Eine feinere Abstufung ist meiner Meinung nach sinnvoll, z.B. beginnend mit der Grenzkurve bis 60 km/h, die für alle weiteren 50 km/h um 2 dB angehoben wird, sodass bei 310 km/h das derzeitige Maximum erreicht ist. Die Spezifikation sollte evtl. auch zwischen verschiedenen S_{fz} und/oder S_{fw} unterscheiden bzw. ihnen separate Grenzkurven zuordnen. Ebenso sind Rahmenbedingungen und Angaben zu den relevanten Punkten der immer erforderlichen KS-LS-TPA anzugeben, die rein zu diesem Zweck am besten als „vereinfachte“ TPA umgesetzt werden sollte. Das kann auch parallel zur „empfohlenen“ TPA erfolgen, da der Aufwand sehr gering ist. Für das mit dieser Masterarbeit erweiterte Verfahren, das detaillierter und genauer ist, könnte natürlich auch eine zugehörige Grenzkurve definiert werden. Dazu fehlen momentan aber noch Messdaten bzw. Erfahrungswerte.

6. Ergebnisse

6.1. Vergleich des bestehenden und neu entwickelten Verfahrens

Die energetische Summe der dynamischen Schnittkräfte im Betrieb kann von nun an auf komplexwertigen Schmalbandspektren basieren. Für den ergänzenden Vergleich mit der Grenzkurve, die am besten immer auf das untersuchte S_{fz} adaptiert ist, eignet sich aber nach wie vor nur ein 1/3-Terzmittenfrequenzspektrum. Basierend auf identen Messdaten ist die energetische Summe der drei dynamischen Schnittkräfte zwischen LDG und TW7 bzgl. des Velaro D, einseitig in der „optimierten“ TPA berücksichtigt und ungeeigneter Weise beidseitig bzw. doppelt in der „bisherige“ TPA, ist als Wertebereich aller 10 relevanten 10-Sek.-Abschnitte samt beider Grenzkurven in Abb. 06-01 angeführt.

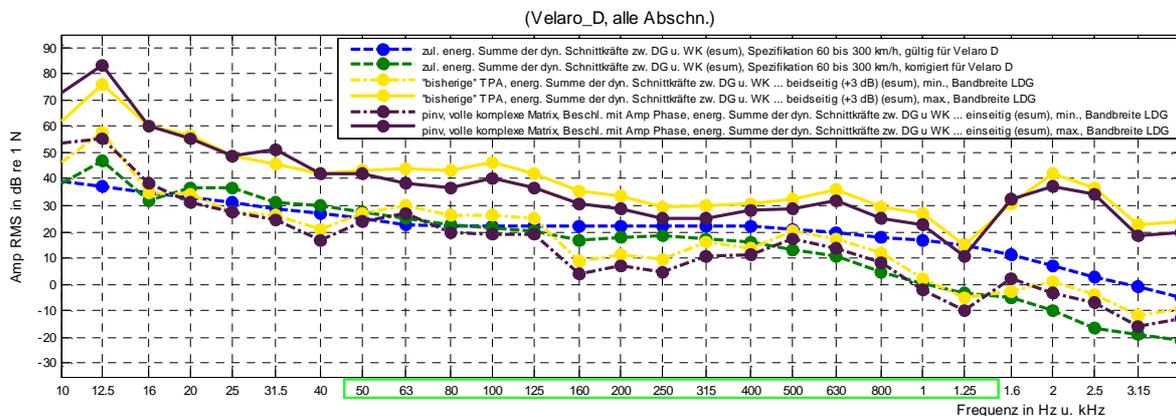


Abb. 06-01: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, alle Abschnitte // Wertebereich: energetisch summierte dynamische Schnittkräfte

Dass auch mit der „optimierten“ TPA die beginnend noch geforderte Einhaltung kaum möglich war, wurde begründet. Es ist deshalb kein Maßstab für ihre Qualität, die wegen begrenzter Messdaten außerdem nicht jene der „empfohlenen“ TPA erreicht. Die für die Spezifikation besser geeignete „vereinfachte“ TPA kann dazu eigenständig umgesetzt werden, allerdings nach den in dieser Masterarbeit geforderten Prinzipien. Wie Analysen gezeigt haben, können alle Varianten zwischen ca. 50 Hz und ca. 1,4 kHz die betrieblichen dynamischen Schnittkräfte mit der höchsten Qualität und Genauigkeit angeben.

Zur Überprüfung der geforderten Übereinstimmung zwischen gemessenem Schalldruck und berechnetem Gesamtschalldruck, sind für den Ort des Mikrofons im TW7, bei unterschiedlich summierten Teilschalldrücken in der „optimierten“ TPA und energetischer Summe in der „bisherigen“ TPA, die Wertebereiche der 10-Sek.-Abschnitte gegenüberzustellen. Zwischen beiden Varianten der „optimierten“ TPA, also mit energetischer und vektorieller Summierung, treten dabei offensichtlich keine gravierenden Unterschiede auf. Das liegt speziell an der Reduktion auf 1/3-Terzmittenfrequenzen. Beide können parallel umgesetzt werden. Eine Trennung bei der Interpretation ist ab ca. 500 Hz sinnvoll. Im Vergleich zum Wertebereich

der „bisherigen“ TPA sind die Unterschiede jeweils größer. Das zeigt, dass bereits durch den veränderten Datenanalyseteil eine wesentlich erkennbare Korrektur erzielt werden konnte. In Abb. 06-02 und Abb. 06-03 sind die betreffenden Wertebereiche angegeben.

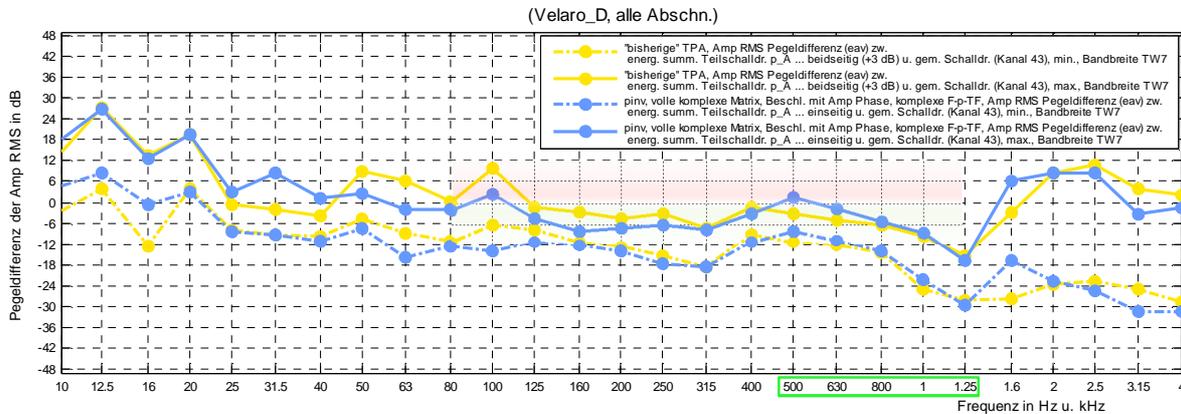


Abb. 06-02: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, alle Abschnitte // Wertebereich: Differenz zwischen energetisch berechnetem Gesamtschalldruck und gemessenem Schalldruck

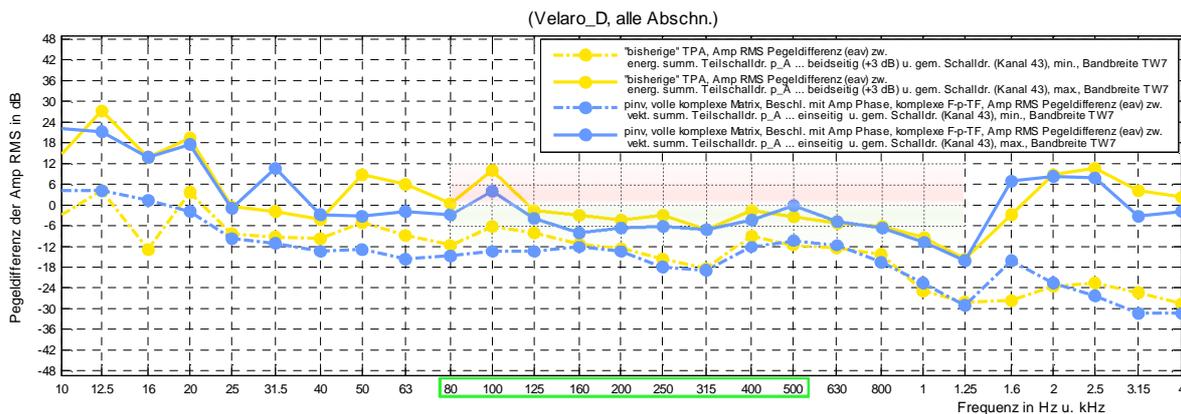


Abb. 06-03: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, alle Abschnitte // Wertebereich: Differenz zwischen vektoriell berechnetem Gesamtschalldruck und gemessenem Schalldruck

Die Ergebnisse sollten mit der „empfohlenen“ TPA deutlich besser ausfallen, da diese eine erweiterte Messdatengenerierung verfolgt. Man sollte aber bedenken, dass eine geringe Abweichung zwischen Berechnung und Messung zwar erstrebenswert ist, aber niemals ein hinreichendes Indiz und zwingendes Erfordernis für eine gute und aussagekräftige KS-LS-TPA. Gründe dafür sind z.B. unberücksichtigte Quellen für KS und/oder LS, die praktisch immer einen Einfluss haben. Überbewertung der berechneten Gesamtschalldrücke ist definitiv der schlechtere Fall, denn das deutet im Gegensatz zur Unterbewertung auf Modellfehler hin. Der Fokus bei Interpretationen von Teil- oder Gesamtschalldrücken sollte vorwiegend im Frequenzbereich zwischen ca. 80 Hz und ca. 1,25 kHz liegen. Wie die durchgeführten Analysen gezeigt haben, ist darin eine höhere Qualität erzielbar.

6.2. Validierung der neuen Methodik

6.2.1. Einsatz eines kommerziellen Systems

Die neue Messdatenverarbeitung sollte anhand eines kommerziellen Systems für TPA schrittweise nachvollzogen und somit validiert werden. Es war der Beweis zu erbringen, dass sie ihren Zweck gemäß den Anforderungen erfüllt und im Stande ist, qualitativ hochwertige bzw. quantitativ reproduzierbare Resultate zu liefern. Es konnten dadurch etwaige Fehler leichter aufgedeckt werden. Das reicht vom Umlegen der Zeitdaten in den komplexwertigen Frequenzraum bis zum vektorieell summierten Gesamtschalldruck. Voraussetzung war, dass das kommerzielle System die KS-LS-TPA nach Matrix-Inversions-Methode unterstützt, was auf den Großteil der mir lediglich über die Literaturrecherche bekannten Software zutrif. Eine solche war in einem in der Nähe von Graz ansässigen Unternehmen im Zuge dieser Masterarbeit zugänglich für mich.

Laut den Beschreibungen in [04] ist „Virtual.Lab“ eine von LMS International entwickelte Software mit erweiterbarer Funktionalität, die unter anderem für test- und modellbasierte vibroakustische Belange eingesetzt wird. Ein Modul ist speziell für die KS-LS-TPA nach Steifigkeits- und/oder Matrix-Inversions-Methode konzipiert. Für letztere kann auch eine regularisierte SVD umgesetzt werden. Mit einer weiteren Option können direkt gemessene bzw. durch eine andere Art der Feststellung vorab bekannte dynamische Schnittkräfte in das Modell der KS-LS-TPA inkludiert werden, um die in den komplexwertigen Frequenzraum umgelegten Beschleunigungen nachträglich um deren Einfluss zu korrigieren.

Zum Datenaustausch mussten zuerst die neun F-a-TF bzw. drei F-p-TF und auch die vier relevanten Zeitdaten von „K2_A10“ in ein geeignetes Format gebracht werden. Sie lagen bis dahin in einer über Matlab® erstellten Datenstruktur zusammen mit Metadaten vor, die nur für die Akustikgruppe der SAGÖ, Graz bedeutend sind. Auch für „Virtual.Lab“ waren Metadaten anzugeben. Beide jeweils in Matlab® erstellten Datenstrukturen zeigt Abb. 06-04.

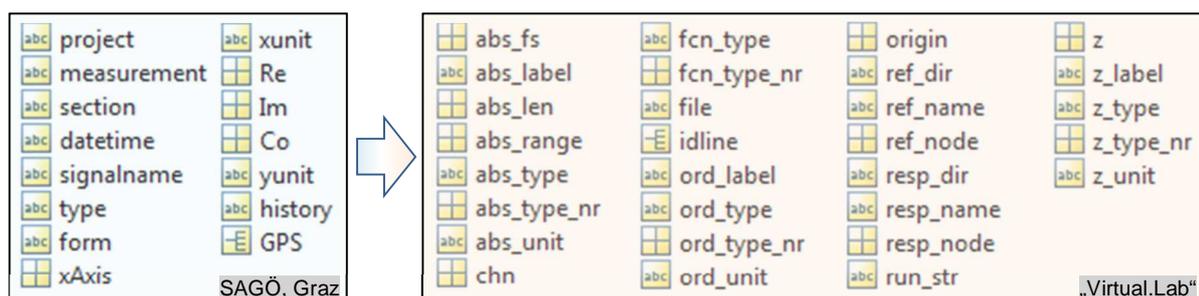


Abb. 06-04: Datenstrukturen im Vergleich

Jene für „Virtual.Lab“ ist angelehnt an dem für vibroakustische Analysen häufig verwendeten „Universal-File-Format-58“. Die Metadaten geben z.B. Achsenrichtungen, Bezeichnungen, Beziehungen zwischen DoF, Einheiten, physikalische Bedeutungen, etc. an. Diese spezielle Datenstruktur diente dazu, um das Modell in weiterer Folge teils automatisiert aufzubauen.

Die Resultate der „LMS Virtual.Lab“ TPA aufgrund selbiger Rohdaten werden später noch präsentiert und mit jenen der „optimierten“ TPA verglichen.

6.2.2. Resultate im Vergleich

Alle Resultate erhielt ich nach dem extern umgesetzten Datenanalyseteil mit „Virtual.Lab“ in Form von Tabellenkalkulationsdateien zurück. Sie mussten für den Vergleich zur „optimierten“ TPA wieder über Matlab® eingepflegt werden. Dazu der Hinweis, dass die im Anschluss zwischen den Ergebnissen ersichtlichen Unterschiede, größtenteils durch das Bringen der Zeitdaten in den komplexwertigen Frequenzraum bedingt sind. In der „LMS Virtual.Lab“ TPA für Körperschallquellen bei S_{fz} geschah das über eine begrenzt justierbare und deshalb anders eingestellte FFT. Es folgten komplexwertige Schmalbandspektren bis 6 kHz mit konstanten Bandbreiten von 1,465 Hz. Das kam durch die zeitliche Länge der mit 50 % Überlappung verwendeten Fenster-Funktion „Hanning“ von ca. 0,683 Sek. aufgrund ihrer 2¹³ Samples zustande, wobei die Zeitdaten 12.000 reellwertige Datenpunkte je Sek. hatten. Wie die Phasenbeziehungen hergestellt wurden, ist für mich nicht nachvollziehbar, da es automatisiert geschah. Das soll aber vernachlässigt werden. Als Folge der unterschiedlichen FFT mussten die komplexwertigen Schmalbandspektren der „LMS Virtual.Lab“ TPA nach ihrem Einpflegen auf gleichwertige Bandbreiten im Frequenzraum von ebenso 1 Hz umgerechnet werden. Das geschah für den Amp-RMS energieäquivalent und zudem mithilfe der in Matlab® implementierten Funktion „interp1(..)“, die zur stückweisen kubischen Interpolation der Datenreihen eingesetzt wurde. Für die Amp-Phasen war diese Interpolation ebenfalls geeignet. Der Vorgang wurde mit weiteren komplexwertigen Schmalbandspektren unterschiedlicher Bandbreiten auf Plausibilität überprüft. Diese wurden entsprechend der „optimierten“ TPA neu generiert und erfolgreich mit geringen Fehlern umgerechnet. Es gehen dabei aber immer Informationen verloren bzw. sind diese nur mit Ungenauigkeiten in einen anders aufgelösten Frequenzraum übertragbar. In Abb. 06-05 sind basierend auf selbigen Rohdaten von „K2_A10“, die komplexwertigen Schmalbandspektren der relevanten Beschleunigungen von „optimierter“ und „LMS Virtual.Lab“ TPA gegenübergestellt.

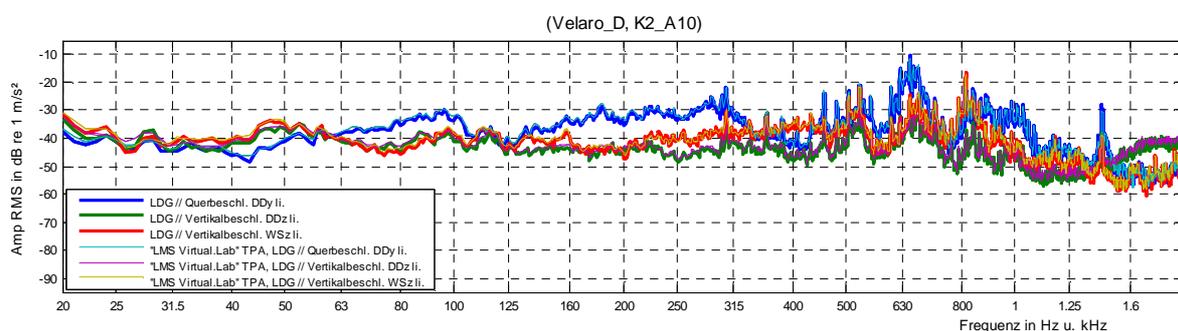


Abb. 06-05: „LMS Virtual.Lab“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Beschleunigung im komplexwertigen Frequenzraum

Die Differenzen in den Amp-RMS der Beschleunigungen sind akzeptabel. Ihre Amp-Phasen sind nicht angegeben, da die Berechnung der grundlegenden K-LDS in „Virtual.Lab“ ohnehin

bzgl. nicht nachvollziehbarer zweiter Zeitdaten geschah. In Abb. 06-06 sind neben beiden komplexwertigen Schmalbandspektren des gemessenen Schalldrucks noch die zugehörigen Phasenspektren angeführt, die prinzipiell und nicht wegen umgerechneter Frequenzräume völlig verschieden sind.

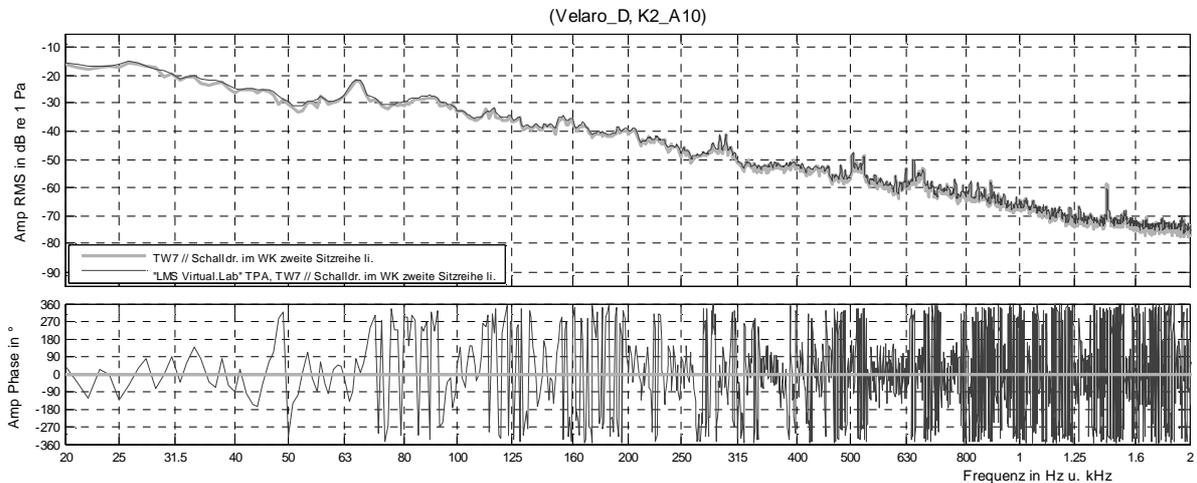


Abb. 06-06: „LMS Virtual.Lab“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Schalldruck im komplexwertigen Frequenzraum

Die F-a-TF liegen mit Bandbreiten von 1 Hz vor. Wie sie in „Virtual.Lab“ mit den Bandbreiten der Beschleunigungen von 1,465 Hz kombiniert wurden, bleibt offen. Es sorgt aber definitiv für einen weiteren Fehlereinfluss in den dynamischen Schnittkräften und weiters mit den F-p-TF auch in den Teilschalldrücken im Betrieb. Abb. 06-07 zeigt für „K2_A10“, von einer der drei dynamischen Schnittkräfte zwischen LDG und TW7, den Vergleich der 1/3-Terzmittenfrequenzspektren bzgl. „bisheriger“, „optimierter“ und „LMS Virtual.Lab“ TPA.

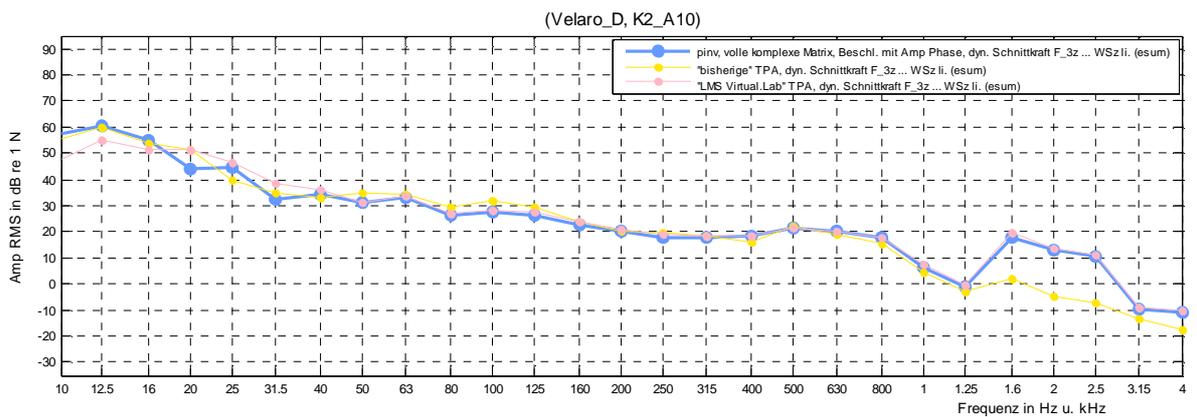


Abb. 06-07: „LMS Virtual.Lab“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Dynamische Schnittkraft F_3z

Für diese Darstellung ist das komplexwertige Schmalbandspektrum der „LMS Virtual.Lab“ TPA nach entsprechender Umrechnung in Folge energetisch auf 1/3-Terzmittenfrequenzen

summiert worden. Je mehr Frequenzen dadurch zusammengefasst sind, umso geringer sind die Differenzen zwischen „optimierter“ und „LMS Virtual.Lab“ TPA. Das liegt daran, da sich zufällige Abweichungen beider Vorzeichen statistisch gesehen eher auslöschen. Insgesamt darf man diesen Teil der Validierung ebenfalls erfolgreich werten. Die zuvor erkennbaren Abweichungen sind mittlerweile ohnehin mindestens doppelt begründet.

Eine energetische Summierung der dynamischen Schnittkräfte ist in „Virtual.Lab“ nicht vorgesehen. Im Gegensatz dazu ist sie in vektorieller Form für die Teilschalldrücke implementiert, was den letzten Teil der Validierung ausmacht. Nach Umrechnung des komplexwertigen Gesamtschalldrucks auf eine Bandbreite von 1 Hz und dessen zusätzlicher Reduktion auf 1/3-Terzmittenfrequenzen, ist in Abb. 06-08 der Vergleich der Amp-RMS zwischen „optimierter“ und „LMS Virtual.Lab“ TPA als Differenz angegeben.

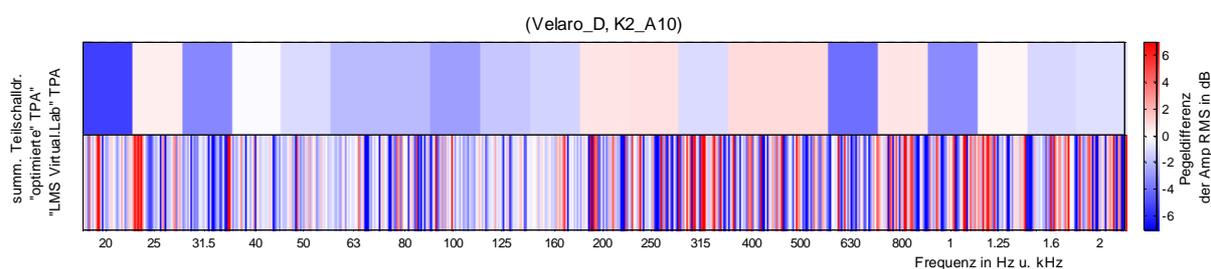


Abb. 06-08: „LMS Virtual.Lab“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Differenz zum vektoriell berechneten Gesamtschalldruck der „optimierten“ TPA.

Die Unterschiede in den Pegeln der komplexwertigen Schmalbandspektren bewegen sich in einem erklärbaren Rahmen und sind durch die Folgefehler mindestens dreifach zu begründen. In den 1/3-Terzmittenfrequenzspektren sind abermals entsprechend geringer.

Die erfolgreiche Validierung bestätigt, dass der mit der „optimierten“ und „empfohlenen“ TPA eingeführte Datenanalyseteil, jenem von einem kommerziellen System für TPA, das dieselben Prinzipien verfolgt, ebenbürtig ist.

7. Zusammenfassung

Im Zuge dieser Masterarbeit wurde die „empfohlene“ TPA für Körperschallquellen bei Sfz entwickelt. Damit sind betriebliche dynamische Schnittkräfte in relevanten mechanischen Schnittstellen zwischen DG und WK durch ein plausibles Modell definierbar und über optimierte numerische Algorithmen mit höherer Genauigkeit indirekt bestimmbar. In Folge sind damit auch qualitativ höherwertigere Teil- und Gesamtschalldrücke berechenbar. Bzgl. eingangs angeführter Schwerpunkte sind im Anschluss relevante Aspekte angeführt.

Die Theorie der KS-LS-TPA wurde grundlegend aufgearbeitet. Damit konnten Probleme der „bisherigen“ TPA identifiziert und erklärt werden, was für einige Modifikationen zur „empfohlenen“ TPA wichtig war. Mit dem Spektrum an Informationen aus der einschlägigen Literatur konnten Limitierungen und zugehörige Lösungsvorschläge genannt werden.

Für beide Schritte zur Messdatengenerierung wurden Empfehlungen in relevanten Punkten erarbeitet, sodass eine höhere Modellgüte des zu untersuchenden Systems erreichbar ist. Maßgeblich dafür ist vor allem die Berücksichtigung des strukturellen Übersprechens, womit stets eine voll-besetzte Matrix vorliegt. Mit der konstruktiven Untersuchung eines exemplarischen Triebzugs wurden an diesem einige bislang noch unberücksichtigte mechanische Schnittstellen identifiziert, die nun je drei Achsenrichtungen abdecken. Erfahrungsgemäß bedeutet das im messtechnischen Aufwand für jede ergänzte Position ca. eine zusätzliche Std. für Planung, Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung. Bei angeratener Überdeterminierung erhöht sich dieser entsprechend. Messtechnik und -daten wurden außerdem dahingehend untersucht, um Fehlereinflüsse, Genauigkeiten und mögliche vereinfachte Annahmen zu beurteilen. Für dynamische Schnittkräfte ist somit ein Frequenzbereich zwischen ca. 50 Hz und ca. 1,4 kHz als höherwertig einzustufen, für Teilschalldrücke zwischen ca. 80 Hz und ca. 1,25 kHz.

Die adaptierte Messdatenverarbeitung wurde optional und mit höherer Funktionalität neu gestaltet. Zu den Verbesserungen zählt die Generierung von Phasenbeziehungen zwischen gemessenen Beschleunigungen und Schalldrücken, die wahlweise Umsetzung der Diagonalen-, Vollen- oder Überdeterminierten-Matrix-Inversion bzw. im Bedarfsfall die regularisierte Singulärwertzerlegung in Abhängigkeit einer einzuhaltenden Konditionszahl des linearen Gleichungssystems, weiters die komplexwertige Berechnung von dynamischen Schnittkräften und Teilschalldrücken, sowie die für niedrige Frequenzbereiche geeignete vektorielle Summierung zum Gesamtschalldruck als Alternative zur energetischen Summe. Zusammen mit der höheren Modellgüte kann die Evaluierung über den im WK gemessenen Schalldruck zukünftig plausible Ergebnisse ohne Überbewertung liefern.

Die neu programmierte Umsetzung dieser adaptierten Messdatenverarbeitung in Matlab[®] erfordert unabhängig von der Anzahl an mechanischen Schnittstellen nun einen fast gleichbleibenden Aufwand für den Anwender. Bei der „bisherigen“ TPA ist dieser trotz stark vereinfachtem Modell annähernd linear angestiegen. Für die Verbesserungen sind die von mir entwickelten Routinen maßgeblich. Durch automatisierte Abläufe von davor noch manuell einzuleitenden Schritten ist das Fehlerpotential auf menschlicher Seite stark

reduziert. Liegen gemessene FRF und Zeitdaten am Arbeitsrechner vor, sind alle Resultate ohne wesentliche Vorarbeiten innerhalb ca. einer Std. einsehbar. Zuvor hätte das Tage dauern können. Es sind damit zukünftig bereits vor Ort erste Einblicke in die relevanten Ergebnisse möglich. Die Rückgaben der neu programmierten Routinen liegen als Grafiken und Tabellenkalkulationsdateien in einer standardisierten und übersichtlichen Form vor, womit sie direkt zur Berichterstellung verwendet werden können. Die Daten werden außerdem im Hintergrund gesichert. Eine Grundlage für die gestiegene Effizienz ist die adaptierte Klassifizierung der mechanischen Schnittstellen und Senken für LS bzw. Messdaten im Allgemeinen. Es liegt damit ein immer ähnlich beschriebenes und einfacher nachvollziehbares Modell des Versuchsträgers vor.

Ein Vergleich zwischen den voneinander teils deutlich abweichenden Ergebnissen der „bisherigen“ und „optimierten“ TPA, basierend auf identen Messdaten, wurde durchgeführt. Die externe Validierung anhand selbiger Messdaten hat gezeigt, dass die Auswertung eines etablierten kommerziellen Systems prinzipiell gleichwertig arbeitet und ihre Software, obwohl sie mit Anschaffung, Lizenzierung, Einschulung, etc. mehrere tausend € im Jahr kostet, keine umfassenderen Informationen und aussagekräftigere Visualisierungen bieten kann, als die im Zuge dieser Masterarbeit entwickelte Messdatenverarbeitung. Die Datenstruktur des kommerziellen Systems erfordert außerdem einen höheren Aufwand zur Definition von großteils nicht benötigten Metadaten. Die neuen Routinen der „empfohlenen“ TPA sind dagegen mit der reduzierten bzw. etablierten Datenstruktur beim Industriepartner kompatibel.

Die Untersuchung der bei der SAGÖ, Graz spezifizierten Grenzkurve für die energetische Summe der dynamischen Schnittkräfte zwischen DG und WK hat gezeigt, dass ihre Einhaltung, trotz Anpassung auf das konkrete S_{fz}, nur für die zu Grunde liegende Methodik erreicht werden kann. Die betreffende „vereinfachte“ TPA kann im Zuge einer umfangreichen Messkampagne relativ einfach zusätzlich umgesetzt werden.

Aufbauend auf diese Masterarbeit können weitere mögliche Schritte dazu dienen, die Messdatenverarbeitung weiter zu verbessern bzw. optionaler zu gestalten. Das betrifft z.B. die unterstützte Auswahl der 10-Sek.-Abschnitte oder die Zusammenfassung ihrer separaten Ergebnisse. Es kann z.B. auch eine intuitiv zu bedienende grafische Benutzeroberfläche die Justierung der entwickelten Routinen in den Hintergrund verlagern. Alternativ können z.B. mit der KS-LS-OTPA neue Wege in der Messdatenverarbeitung erprobt werden. Davor sollte aber die „empfohlene“ TPA etabliert werden, was im Zuge einer Messkampagne innerhalb der nächsten Monate geplant ist.

Quellenverzeichnis

- [01] Genuit, K. (Hrsg.): „*Sound-Engineering im Automobilbereich*“, 1. Auflage, Springer Verlag, 2010
- [02] White Paper: „*Transfer Path Analysis*“ // LMS International, 2011, Verfügbar:
<http://www.lmsgermany.com/download.asp?id=A5AF1B71-301F-4DB2-992F-D8A213AE37F2>, [03/13]
- [03] Schulungsunterlagen: *CADA-X TPA*, LMS International, Archiv SAGÖ, Graz, 1999
- [04] Schulungsunterlagen: *Virtual.Lab TPA*, LMS International, Archiv SAGÖ, Graz, 2006
- [05] Broschüre: *Source Path Contribution*, Brüel & Kjær (B&K), 2006, Verfügbar:
http://www.midebien.com/literature_93936/Contribución_de_la_Fuente_7798, [05/13]
- [06] Broschüre: *DATS Source Path Analysis*, Prosig, 2009, Verfügbar:
<http://prosig.com/wp-content/uploads/pdf/datasheets/prosigDatsSourcePath.pdf>, [05/13]
- [07] Broschüre: *PROGNO[I]SE*, HEAD acoustics, 2014, Verfügbar:
http://www.head-acoustics.de/downloads/de/prognose/D4914_PROGNOISE_g.pdf, [05/14]
- [08] Broschüre: *PAK*, Müller-BBM VibroAkustik Systeme, 2010, Verfügbar:
http://www.muellerbbm-vas.de/fileadmin/user_upload/vas/Broschueren/PAKTPA1005.pdf, [12/13]
- [09] Broschüre: *ATPA*, Ingeniería para el Control del Ruido (ICR), 2012, Verfügbar:
<http://www.icrsl.com/uploads/Download/20/ATPA-Method-Benefits.pdf>, [05/13]
- [10] Broschüre: *V-PATH*, SCS Euroacoustic, 2011, Verfügbar:
<http://www.scs-controlsys.com/pdf/VPATH.pdf>, [05/13]
- [11] Broschüre: *OROS TPA*, OROS, 2006, Verfügbar:
http://www.oros-deutschland.com/unsere-produkte/neuigkeiten/archiv.html?year=2006&file=tl_files/OROS/DE/Neuigkeiten/pdf/imw%20oros_gmbh_info-letter_3_2006.pdf, [05/13]
- [12] Broschüre: *I-DEAS Noise Path Analysis*, MTS Systems Corporation, 2001, Verfügbar:
http://www.bksv.com/downloads/ideas/npa_manual.pdf, [05/13]
- [13] Gajdatsy, P.; Janssens, K.; Desmet, W.; van der Auweraer, H.: „*Application of the Transmissibility Concept in Transfer Path Analysis*“ // International Conference on Noise and Vibration Engineering - ISMA2010, Proceedings, 2010
- [14] Zeller, P. (Hrsg.): „*Handbuch Fahrzeugakustik*“, 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2012
- [15] Tcherniak, D.; Schuhmacher, A. P.: „*Application of the Transmissibility Matrix Method to NVH Source Contribution Analysis*“ // International Modal Analysis Conference - IMAC XXVII, Proceedings, 2009
- [16] Schevenels P.; van der Linden, P. J. G.; Vermeir, G.: „*An Inverse Force Measurement Method to Determine the Injected Structure-Borne Sound Power from an Installation into a Building Element*“ // Journal of Building Acoustics, Volume 17, Number 3, 2010
- [17] Burdick, J.: „*1. The Moore-Penrose Pseudo Inverse, 2. The Singular Value Decomposition*“, Skriptum, Vorlesung ME 115 - 2013/14: Introduction to Kinematics and Robotics, California Institute of Technology, USA, Verfügbar: <http://robotics.caltech.edu/~jwb/courses/ME115/handouts/pseudo.pdf>, [04/13]
- [18] Orfanidis, S. J.: „*SVD, PCA, KLT, CCA, and All That*“, Skriptum, Vorlesung 332:525 - 2002-2007: Optimum Signal Processing, Rutgers University, USA, Verfügbar:
<http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ece525/svd.pdf>, [04/13]
- [19]* „*Inverse Matrix*“, Verfügbar: http://de.wikipedia.org/wiki/Inverse_Matrix, [12/13]
- [20]* „*Pseudoinverse*“, Verfügbar: <http://de.wikipedia.org/wiki/Pseudoinverse>, [12/13]
- [21]* „*Kondition (Mathematik)*“, Verfügbar: [http://de.wikipedia.org/wiki/Kondition_\(Mathematik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Kondition_(Mathematik)), [12/13]
- [23] Tschöke, H.; Henze, W.; (Hrsg.): „*Motor- und Aggregate-Akustik II*“, 1. Auflage // Brill, U. (Hrsg.): Haus der Technik Fachbuch 51, Expert Verlag, 2005

- [24] Sottek, R.; Sellerbeck, P.; Klemenz, M.: „*An Artificial Head which Speaks from its Ears: Investigations on Reciprocal Transfer Path Analysis in Vehicles, Using a Binaural Sound Source*“ // SAE Technical Paper 2003-01-1635, 2003
- [25] Roozen, N. B.; Leclere, Q.; Sandier, C.: „*Operational transfer path analysis applied to a small gearbox test set-up*“ // Acoustics 2012 Nantes Conference, Proceedings, 2012
- [26] Sandier, C.; Leclere, Q.; Roozen, N. B.: „*Operational transfer path analysis: theoretical aspects and experimental validation*“ // Acoustics 2012 Nantes Conference, Proceedings, 2012
- [27] Plunt, J.: „*Predictability of Mid- and High Frequency Dynamic Properties of Industrial Products. Using Simplified Modelling and NVH Design Strategy.*“ // International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics - RASD 2003, Proceedings, 2003
- [28] Kompella, M. S.; Bernhard, R. J.: „*Measurement of the Statistical Variation of Structural-Acoustic Characteristics of Automotive Vehicles*“ // SAE Technical Paper 931272, 2003
- [29] Brandl, S.; Pribsch, H.-H.; Brandl, F. K.; Biermayer, W.; Höldrich, R.; Sontacchi, A.: „*Challenges and New Solutions for Transfer Path Analysis*“ // International Conference on Noise and Vibration Engineering - ISMA2008, Proceedings, 2008
- [30] Brandl, F. K.; Brandl, S.; Höldrich, R.; Sontacchi, A.; Pribsch, H.-H.: „*Effiziente und exakte Bestimmung der Übertragungscharakteristik von Fahrzeugkarosserien*“ // Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), 11/2009 Jahrgang 111, 2009
- [31] Perrin, A. F.; Martner, B. O.; Lohrmann, M.: „*Contribution analysis of vibroacoustic sources in perceived quality with Operational Transfer Path Synthesis Method*“ // Automotive and Railway Comfort congress - V Symposium, Proceedings, 2008
- [32] Thite, A. N.; Thompson, D. J.: „*The quantification of structure-borne transmission paths by inverse methods. Part 1: Improved singular value rejection methods*“ // Journal of Sound and Vibration, Volume 264, Number 2, 2003
- [33] Thite, A. N.; Thompson, D. J.: „*The quantification of structure-borne transmission paths by inverse methods. Part 2: Use of regularization techniques*“ // Journal of Sound and Vibration, Volume 264, Number 2, 2003
- [34] Dietrich, P.; Masiero, B.; Lievens, M.; Vorländer, M.; Bistafa, S.; Gerges, S. N. Y.: „*Open transfer path measurement round-robin using a simplified measurement object*“ // International Conference on Noise and Vibration Engineering - ISMA2010, Proceedings, 2010
- [35] Bogema, D.; Goodes, P.; Apelian, C.; Csakan, M.: „*Noise Path Analysis Process Evaluation of Automotive Shock Absorber Transient Noise*“ // SAE Technical Paper 2009-01-2091, 2009
- [36] de Klerk, D.; Ossipov, A.: „*Operational Transfer Path Analysis: Theory, Guidelines & Tire Noise Application*“ // International Conference on Noise and Vibration Engineering - ISMA2010, Proceedings, 2010
- [37]* „*Singulärwertzerlegung*“, Verfügbar: <http://de.wikipedia.org/wiki/Singul%C3%A4rwertzerlegung>, [02/14]
- [38]* „*Hauptkomponentenanalyse*“, Verfügbar: <http://de.wikipedia.org/wiki/Hauptkomponentenanalyse>, [02/14]
- [39] Gauthier, P. A.; Gerard, A.; Camier, C.; Berry, A.: „*Acoustical inverse problems regularization: direct definition of filter factors using Signal-to-Noise Ratio*“ // Acoustics 2012 Nantes Conference, Proceedings, 2012
- [40] Plunt, J.: „*Operating Transfer Path Analysis (OTPA). Can this novel technology be applied successfully outside the automotive sector?*“ // Baltic-Nordic Acoustics Meeting - BNAM 2010, Proceedings, 2010
- [41] Tcherniak, D.; Schuhmacher, A. P.: „*Application of decomposition-based technique in NVH source contribution analysis*“ // International Conference on Noise and Vibration Engineering - ISMA2008, Proceedings, 2008

- [42] Putner, J.; Fastl, H.; Lohrmann, M.; Kaltenhauser, A.; Ullrich, F.: „Operational transfer path analysis predicting contributions to the vehicle interior noise for different excitations from the same sound source“ // International Congress on Noise Control Engineering - INTER-NOISE 2012, Proceedings, 2012
- [43] Tcherniak, D.; Ryu, S. R.: „*Developments in Transmissibility Matrix method in application for structure borne noise path analysis*“ // JSAE Technical Paper 20095174, 2009
- [44] White Paper: „*Siemens Velaro - Weltweit auf der Schiene, Hochgeschwindigkeitsprojekte von Siemens*“ // SIEMENS AG, 2010, Verfügbar: http://www.siemens.com/press/pool/de/events/industry/mobility/2010-04-velaro-d/whitepaper_siemens_velaro_projekte_de.pdf, [02/14]
- [45] Broschüre: „*Hochgeschwindigkeitszug Velaro D (BR 407)*“ // SIEMENS AG, 2010, Verfügbar: http://www.siemens.com/press/pool/de/events/industry/mobility/2010-04-velaro-d/datasheet_siemens_velaro-d_de.pdf, [02/14]
- [46] Broschüre: „*Das System Bahn - Der ICE*“ // DB Systemtechnik // Goethe-Gymnasium Regensburg, 2013, Verfügbar: http://www.db-systemtechnik.de/file/4124110/data/Das_System_Bahn_Der_ICE.pdf, [02/14]
- [47] Broschüre: „*Fahrwerke erster Klasse*“ // SIEMENS AG, 2008, Verfügbar: <https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/de/rail-solutions/components-and-systems/bogies-catalog-de.pdf>, [02/14]
- [48] „*Die Drehgestelle im ICE 3*“, Verfügbar: http://www.ice-fansite.com/index.php?option=com_content&view=article&id=183:ice3-drehgestelle&catid=49:ice3&Itemid=68, [02/14]
- [49] „*Velaro D BR 407*“, Verfügbar: <http://www.tee-usa.com/store/media/f398001.jpg>, [05/14]
- [SI] Interne Dokumente und Schulungsunterlagen, Archiv SAGÖ, Graz,
- []* diene als Quelle zur Kontrolle

Abbildungsverzeichnis

,[.]" originale Abb. ist unbearbeitet übernommen;

nach [..]" originale Abb. ist bearbeitet bzw. erweitert;

Abb. 01-01: Transfer-Pfad-Analyse für Körperschallquellen bei Schienenfahrzeugen	2
Abb. 02-01: Modellierte Quellen, TP und Senke eines abstrakten Systems	4
Abb. 02-02: Zusammensetzungs- und Zerlegungsgruppe	5
Abb. 02-03: Auswahl kommerzieller Systeme für TPA und/oder OTPA.....	6
Abb. 02-04: Abstrahierte Subsysteme in einer KS-LS-TPA nach Matrix-Inversions-Methode.....	7
Abb. 02-05: Varianten der Fremdlagerung bei der Abkoppelungs-Methode	8
Abb. 02-06: Mögliche TF in einer KS-LS-TPA.....	9
Abb. 02-07: Mechanische Koppelung zwischen zwei DoF mit Übersprechen und vibromechanischer Reziprozität	10
Abb. 02-08: Gut und schlecht konditioniertes Problem	11
Abb. 03-01: Bestimmung von allen F-p-TF in Schritt 1	14
Abb. 03-02: Zugleiche Bestimmung von allen F-a-TF in Schritt 1 ohne und mit berücksichtigtem Übersprechen	15
Abb. 03-03: Einsatz eines Impulshammers zur Bestimmung der TF	17
Abb. 03-04: Einsatz eines Shakers zur Bestimmung der TF, [SI].....	17
Abb. 03-05: Ermittlung der dynamischen Steifigkeit und Schritt 2 in der KS-LS-TPA nach Steifigkeits- Methode	19
Abb. 03-06: Zwei messtechnische Schritte in der KS-LS-TPA nach Matrix-Inversions-Methode	20
Abb. 03-07: Unterschiedlich besetzte quadratische 6x6-Matrix der F-a-TF	21
Abb. 03-08: Ergebnisse einer KS-LS-TPA mit unterschiedlichen kommerziellen Systemen nach [29].....	24
Abb. 03-09: Frequenzabhängige Überlappung der Eigenmoden bei der Messung einer F-a-PF bzw. F-a-TF.....	26
Abb. 03-10: Unterschiedlich eruierte F-v-TF an einer simplen Struktur nach [34]	27
Abb. 03-11: Einflüsse auf die FRF-Amp einer F-p-TF bei der Impulshammer-Methode nach [30]	28
Abb. 03-12: Grafisch interpretierte Überdeterminierung einer 2x2- zur 3x2-Matrix der F-a-TF, [04].....	29
Abb. 03-13: Veränderung der Konditionszahl in Abhängigkeit vom Faktor der Überdeterminierung nach [04].....	31
Abb. 03-14: Schema für die Reduktion der SVD einer rechteckigen Matrix zur Thin-SVD.....	32
Abb. 03-15: Einfluss der Kohärenz unberücksichtigter Quellen für KS in einer KS-LS-OTPA.....	37
Abb. 04-01: Gerundete Eckdaten des Velaro D BR 407 nach [SI] und [45]	39
Abb. 04-02: Anordnung der Wägen und verteilte Traktionsaggregate des Velaro D BR 407, [SI]	39
Abb. 04-03: Schalltechnisch relevante Komponenten von EW8 und TW7 des Velaro D BR 407, [SI].....	40
Abb. 04-04: Mechanische Verbindung der beiden SF 500 DG zum WK nach [SI]	41
Abb. 04-05: H-Rahmen der beiden SF 500 DG nach [SI]	41
Abb. 04-06: Auszug der schalltechnische Zielwerte für den Innenraum des Velaro D BR 407 nach [SI]	43
Abb. 04-07: EW8, TW7, K4_A_Hochlauf // Campbellplots für Schalldruck im WK	43
Abb. 04-08: „bisherige“ TPA // Schematischer Ablauf der Messdatengenerierung und -verarbeitung	46
Abb. 04-09: „bisherige“ TPA, TDG, LDG, EW8, TW7, alle Abschnitte // Wertebereich: energetisch summierte dynamische Schnittkräfte	47
Abb. 04-10: „vereinfachte“ TPA, TDG, EW8 // Künstliche Anregung und Beschleunigungssensor am LT.....	48

Abb. 04-11: „vereinfachte“ TPA, TDG, LDG, EW8, TW7, alle Abschnitte // Wertebereich: dynamische Schnittkräfte am LT.....	48
Abb. 04-12: „bisherige“ TPA, TDG, LDG, EW8, TW7, alle Abschnitte // Wertebereich: Differenz zwischen berechnetem Gesamtschalldruck und gemessenem Schalldruck.....	49
Abb. 05-01: „bisherige“ TPA // Messtechnik und Sensorik am Velaro D BR 407.....	51
Abb. 05-02: „bisherige“ TPA // Strukturanregung und Systemantworten in Zeitbereich und Frequenzraum.....	52
Abb. 05-03: „bisherige“ TPA, TDG, EW8 // Impulshammer, Beschleunigungssensoren, Mikrofon.....	53
Abb. 05-04: TDG, EW8 // F-a-PF: Reproduzierbarkeit.....	54
Abb. 05-05: TDG, EW8 // F-p-TF: Reproduzierbarkeit.....	54
Abb. 05-06: TDG, LDG, alle Abschnitte // Gefahrene Geschwindigkeiten der verwerteten Betriebsmessungen.....	55
Abb. 05-07: TDG, LDG, EW8, TW7, K4_A_Messrauschen // Messrauschen der relevanten Beschleunigungen.....	57
Abb. 05-08: TDG, LDG, EW8, TW7, K4_A_Messrauschen // Messrauschen der Beschleunigungen am H-Rahmen.....	57
Abb. 05-09: TDG, LDG, EW8, TW7, K2_A10 // Messrauschen der relevanten Beschleunigungen.....	58
Abb. 05-10: „optimierte“ TPA, TDG, LDG, EW8, TW7 // F-a-TF und F-p-TF: Matrizen und Vektoren.....	59
Abb. 05-11: „optimierte“ TPA, LDG, TW7 // F-a-TF: 3x3-Matrix.....	60
Abb. 05-12: „optimierte“ TPA, LDG, TW7 // F-p-TF: zu Schalldruck im WK zweite Sitzreihe links.....	60
Abb. 05-13: „bisherige“ und „empfohlene“ TPA, TDG, LDG, EW8, TW7 // DoF und dynamische Schnittkräfte.....	61
Abb. 05-14: Einschränkungen und mögliche Fehler bei genutzter vibromechanischer Reziprozität bzw. Symmetrie links/rechts.....	62
Abb. 05-15: TDG, EW8 // F-a-TF: vibromechanische Reziprozität.....	63
Abb. 05-16: Velaro E // F-a-PF: vibromechanische Symmetrie links/rechts.....	64
Abb. 05-17: Velaro E // F-p-TF: vibroakustische Symmetrie links/rechts.....	65
Abb. 05-18: TDG, LDG, EW8, TW7 // F-a-TF und F-p-TF: Mögliches Übersprechen nach [49].....	66
Abb. 05-19: „optimierte“ TPA, LDG, TW7 // F-a-TF: Konditionszahl der 3x3-Matrix.....	67
Abb. 05-20: „optimierte“ TPA, LDG, TW7 // F-a-TF: Singulärwerte der 3x3-Matrix.....	68
Abb. 05-21: „optimierte“ TPA, LDG, TW7 // F-a-TF: Konditionszahl für fehlerhafte 3x3-Matrix (+/- 1 dB; +/- 10 °).....	68
Abb. 05-22: „optimierte“ TPA, LDG, TW7 // F-a-TF: Konditionszahl für fehlerhafte 3x3-Matrix (+/- 3 dB; +/- 30 °).....	69
Abb. 05-23: Umlegung von Zeitdaten in den Frequenzraum mit oder ohne Phasenbeziehungen.....	70
Abb. 05-24: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Zeitdaten von Beschleunigung und Schalldruck.....	71
Abb. 05-25: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Zeitdaten über A-LDS zum reellwertigen Frequenzraum.....	71
Abb. 05-26: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Zeitdaten über K-LDS zum komplexwertigen Frequenzraum.....	71
Abb. 05-27: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Unterschiedlich berechnete dynamische Schnittkraft F_1y.....	72
Abb. 05-28: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Unterschiedlich berechnete dynamische Schnittkraft F_2z.....	73
Abb. 05-29: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Unterschiedlich berechnete dynamische Schnittkraft F_3z.....	73

Abb. 05-30: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Dynamische Schnittkraft F_{3z} bei fehlerhaften Beschleunigungen	74
Abb. 05-31: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Unterschiedlich berechneter Teilschalldruck $pA_{F_{3z}}$	76
Abb. 05-32: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Überblick der energetisch summierten Teilschalldruck	78
Abb. 05-33: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Überblick der vektoriell summierten Teilschalldruck	79
Abb. 05-34: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Scatter- und Vektorplots zur Evaluierung	80
Abb. 05-35: „optimierte“ TPA // Einsatz der neu entwickelten Funktionen	83
Abb. 05-36: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, alle Abschnitte // Strukturierte Rückgabe von „pulseFRF2matlabMatrix(..)“	83
Abb. 05-37: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, alle Abschnitte // Konditionszahl und Rang von „force_from_inv(..)“	83
Abb. 05-38: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Strukturierte Rückgabe von „sum_spec(..)“	84
Abb. 05-39: „empfohlene“ TPA // Schematischer Ablauf im Datenanalyseteil	84
Abb. 05-40: EW8, TW7 // F-a-PF: LT in Achsenrichtung z aus Messung und Spezifikation	85
Abb. 05-41: TDG, LDG, EW8, TW7 // Adaptierte Grenzkurve für energetisch summierte dynamische Schnittkräfte	86
Abb. 06-01: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, alle Abschnitte // Wertebereich: energetisch summierte dynamische Schnittkräfte	87
Abb. 06-02: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, alle Abschnitte // Wertebereich: Differenz zwischen energetisch berechnetem Gesamtschalldruck und gemessenem Schalldruck	88
Abb. 06-03: „optimierte“ TPA, LDG, TW7, alle Abschnitte // Wertebereich: Differenz zwischen vektoriell berechnetem Gesamtschalldruck und gemessenem Schalldruck	88
Abb. 06-04: Datenstrukturen im Vergleich	89
Abb. 06-05: „LMS Virtual.Lab“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Beschleunigung im komplexwertigen Frequenzraum	90
Abb. 06-06: „LMS Virtual.Lab“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Schalldruck im komplexwertigen Frequenzraum	91
Abb. 06-07: „LMS Virtual.Lab“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Dynamische Schnittkraft F_{3z}	91
Abb. 06-08: „LMS Virtual.Lab“ TPA, LDG, TW7, K2_A10 // Differenz zum vektoriell berechneten Gesamtschalldruck der „optimierten“ TPA	92

