

Diploma Thesis

A Data-Driven Method for Analysing the Multi-Body-Dynamical Behaviour of Simply Supported Bridges Under High-Speed Rail Traffic

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Datengestützte Methode zur Analyse des mehrkörperdynamischen Verhaltens einfeldriger Eisenbahnbrücken bei Hochgeschwindigkeitsverkehr

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Julian Wieser, BSc

Matr.Nr.: 01225754

unter der Anleitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Josef Fink**

Dipl.-Ing. **Bernhard Glatz**

Institut für Tragkonstruktionen
Forschungsbereich Stahlbau
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/E212-01, 1040 Wien, Österreich

Wien, im November 2019



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Größtmöglicher Dank gebührt der demokratischen Republik Österreich, die mir durch den freien Hochschulzugang das Studium des Bauingenieurwesens ermöglichte.

Außerdem möchte ich mich zutiefst bei Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Fink und Dipl.-Ing. Bernhard Glatz für die Betreuung meiner Diplomarbeit bedanken. Herr Dipl.-Ing. Glatz hatte immer den richtigen Rat, ein motivierendes Wort sowie eine Prise Humor parat.

Für Lehrveranstaltungen von höchster Exzellenz an der TU Wien möchte ich mich bedanken bei: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Fink (Stahlbau, Stahlbau 2, Stahlbau 3, Brückenbau), O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. M.Eng. Johann Kollegger (Betonbau, Betonbau 2, Concrete Bridges), Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hellmich (Festigkeitslehre, Flächentragwerke Theorie), Assoc. Prof. Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Pichler (Baustatik 2, Flächentragwerke Theorie), Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Bucher (Mechanik 1, Mechanik 2, Baudynamik, Strukturoptimierung, Risikobewertung im Bauingenieurwesen), Univ.Prof. (i.R.) Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Tschernutter (Konstruktiver Wasserbau, Talsperren, Dammbau), Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Schuster (Mathematik 1, 2 & 3) sowie Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Bamer (Mechanik 1 & 2 Übungen) und Dipl.-Ing. Dr.techn. Gabriel Maresch (Mathematik 1 & 2 Übungen).

Für exzellente Lehrveranstaltungen an der University of Bristol möchte ich mich bedanken bei: Professor Dawei Han (Hydraulics 2), Dr. James Norman (Design 2), Dr. Andrea Diambra (Geotechnics 2) sowie Dr. Brian Hawkins (Geology 2, *requiescat in pace*).

Auch meinen ehemaligen Lehrern am GRG XVI Wien Maroltingergasse will ich für eine erstklassige Allgemeinbildung danken, wobei insbesondere Herrn Mag. Burger (Altgriechisch, Sprachwissenschaft, Einblicke in die Logik, Philosophie, Mathematik, Sanskrit, Katalanisch, Spanisch, Indonesisch usw.), Frau Dr. Santos (Physik), Frau Mag. Meindl (Biologie), Frau Mag. Tomasini (Spanisch), Herrn Dr. Buchmann (Geschichte), Frau Mag. Frank-Hoffmann (Mathematik), Frau Mag. Gantner (Englisch), Herrn MMag. Angelotti (Latein) und Frau Dr. Breyer (Latein) mein Dank gebührt.

Meiner Mutter, Dr. med. Ruthilde Tatzer, danke ich für immerwährende, bedingungslose Unterstützung in allen Lebenslagen – tausend Dank!

Herrn Dipl.-Ing. Helmut Kulhanek danke ich dafür, mir früh einen Einblick in das Bauwesen gegeben zu haben – und für seinen Humor.

Meinem Großvater, Herrn Dr. Wieser, danke ich für weise Worte und seinen vorbildhaften Lebenswandel.

Zudem danke ich meinen langjährigen Freunden und Kommilitonen BSc Lucas Putz (16 Jahre Freundschaft), MSc Laurenz Berger (speziell dafür, dass er mich in Myanmar mehrmals vor dem Tod bewahrt hat und für 16 Jahre Freundschaft), BSc Philip Buttres-Grove, MA Anna Huber, Mag. Sebastian Vogg (für 23 Jahre Freundschaft), Dr. med. Niklas Wasilewski (für 23 Jahre Freundschaft), Dr. Michael Ziegler, Maximilian Wirrer (für seine Expertise innerhalb und außerhalb des Maschinenbaus), BSc Julian Sigmund (für eine gute Studienzeit), Dipl. Ing. Christoph Vorlen (für eine gute Studienzeit) sowie meinen Cousins Mag. Wolfram Grosser, LL.B. Mathias Krapfenbauer, LL.B. Mathias Huber und BSc Lorenz Lang für ihre aufrichtige Freundschaft und ihre Unterstützung, auch in schwierigen Zeiten.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit zeigt eine datengestützte Methode zur Analyse des mehrkörperdynamischen Verhaltens von Eisenbahnbrücken auf. Dabei wird insbesondere auf die Tragwerksantwort infolge mehrkörperdynamischer Berechnungen eingegangen. Dies ist für die Ingenieurpraxis relevant, da sich aus mehrkörperdynamischen Berechnungen in vielen Fällen eine Reduktion der Tragwerksantwort (im Vergleich zu dynamischen Berechnungen mittels Einkörpermodell) ergibt. Dadurch könnten zukünftige Brückentragwerke wirtschaftlicher werden.

Hierzu wird die Tragwerksantwort von 1000 fiktiven Einfeldträgerbrücken mit Stützweiten bis 40 m bei der Überfahrt von konkreten Zugkonfigurationen im Hochgeschwindigkeitsverkehr mit zwei unterschiedlichen Berechnungsmodellen numerisch untersucht.

Dazu werden zunächst Brückendaten, die tatsächlich existierende Brückentragwerke beschreiben, ausgewertet. Unter der Anwendung stochastischer Methoden lässt sich anhand dieser Brückendaten ein Parameterfeld aus Brückenparametern erzeugen, das für dynamische Berechnungen herangezogen werden kann. Dabei entspricht jeder Punkt des Parameterfeldes einem fiktiven Brückentragwerk. In einem weiteren Schritt werden dynamische Berechnungen für alle so erzeugten, fiktiven Brücken durchgeführt. Als Berechnungsmodelle kommen dabei ein Einkörpermodell, bei dem überfahrende Züge durch Einzellasten ersetzt werden, sowie ein Mehrkörpermodell, bei dem überfahrende Züge durch Mehrmassenschwinger ersetzt werden, zur Anwendung. Danach wird die Differenz der Tragwerksantwort aus den beiden Berechnungsmodellen in Abhängigkeit der Parameter des Parameterfeldes ausgewertet. Zwischen den Berechnungsergebnissen wird linear interpoliert, wodurch die funktionelle Abhängigkeit oben erwähnter Differenz von den Brückenparametern numerisch beschrieben wird. Zudem werden dynamische Berechnungen an zwei simplen Feder-Dämpfer-Modellen, denen die Parameter des Parameterfeldes zugeordnet werden, vorgenommen. Für die beiden Feder-Dämpfer-Modelle wird ebenfalls die Differenz der Tragwerksantwort berechnet und diese mit der Differenz der Tragwerksantwort aus den ersten beiden Berechnungsmodellen verglichen. Es wird untersucht, ob eine Korrelation zwischen den beiden Differenzen der Tragwerksantwort vorliegt.

Durch obige Vorgangsweise ergibt sich für die betrachteten Zugkonfigurationen ein Zusammenhang zwischen der Differenz der Tragwerksantwort einerseits und Brückenparametern andererseits. Der beschriebene Zusammenhang kann je nach zugrunde gelegtem Berechnungsaufwand entweder zur Abschätzung oder zur Bestimmung der Änderung der Tragwerksantwort zufolge mehrkörperdynamischer Berechnungen (im Vergleich zu dynamischen Berechnungen mittels Einkörpermodell) herangezogen werden. Außerdem zeigen die Berechnungsergebnisse, dass simple Feder-Dämpfer-Modelle unter bestimmten Voraussetzungen für eine grobe Abschätzung des gefundenen Zusammenhanges herangezogen werden können.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

This diploma thesis analyses the multi-body-dynamical behaviour of railway bridges which is characterised in terms of dynamical bridge responses. Predicting this behaviour is astute to engineering design, since multi-body-dynamical analyses of railway bridges often result in a reduction of dynamical bridge responses (compared to the responses obtained by single-body-dynamical analyses). Thus, the design efficiency of railway bridges can be increased.

The study of multi-body-dynamical behaviour of railway bridges was conducted by using 1000 virtual simply-supported railway bridges with spans of up to 40 m subjected to high-speed rail traffic. Using two different mechanical models, all bridges were analysed during the passage of specified train configurations.

First, a data set of existing railway bridges was statistically analysed. Using stochastic methods, a parameter field for bridge parameters could be obtained from the data set. Each point of the parameter field represented a virtual bridge. Second, single-body as well as multi-body dynamic analyses were conducted for every virtual bridge. For the single-body dynamic analyses, trains were replaced by point loads acting on the bridge girder. For the multi-body dynamic analyses, trains were replaced by multiple degree of freedom systems. The differences in bridge responses obtained from the two mechanical models was computed as a function of the bridge parameters. Using linear interpolation, a numerical function describing the differences in bridge responses was obtained. In addition, bridge parameters were assigned to two common spring-damper-models. The two spring-damper-models – subjected to dynamic loads – were analysed using dynamic analysis. The differences in dynamic responses of the two models was computed and compared to the differences in dynamic bridge responses obtained before. The correlation of the differences was also examined.

With the help of results obtained using the methods described above, a relation between bridge parameters and the differences in dynamic bridge responses between the single-body and the multi-body model was derived. Depending on the computational effort made, this relation can be used to either estimate or to predict the differences in dynamic bridge responses between the single-body and the multi-body model. It is concluded that the results obtained using the spring-damper-models allow for a gross estimate of the differences in dynamic bridge responses between the single-body and the multi-body model.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Motivation der vorliegenden Arbeit	11
1.2	Stand der Technik	12
1.2.1	Dynamische Analyse einfeldriger Eisenbahnbrücken	12
1.2.2	Überblick über vorhandene Publikationen	12
1.3	Zielsetzung der vorliegenden Arbeit	14
1.4	Umfang der vorliegenden Arbeit	15
2	Mechanische Grundlagen	16
2.1	Modellbildung Brücken	16
2.1.1	Verwendete Strukturmechanische Theorie	16
2.1.2	Mechanisches Modell	17
2.2	Modellbildung Züge	20
2.2.1	Moving Load Model	20
2.2.2	Detailed Interaction Model	21
2.3	Kritische Geschwindigkeiten aus Resonanzphänomenen	24
2.3.1	Bestimmungsformel für kritische Geschwindigkeiten	26
2.3.2	Änderung der kritischen Geschwindigkeiten bei DIM Berechnungen	26
2.4	Eingangsgrößen für dynamische Berechnungen	27
2.4.1	Eingangsgrößen für MLM Berechnungen	27
2.4.2	Eingangsgrößen für DIM Berechnungen	27
2.5	MLM versus DIM - Eine Gegenüberstellung	29
2.5.1	Zusammenfassung MLM	29
2.5.2	Zusammenfassung DIM	29
2.6	Numerische Lösung der Differentialgleichungen bei MLM und DIM	30
3	Methode zur Parameterfelderzeugung	31
3.1	Stochastische Grundlagen	32
3.1.1	Verwendete Schätzer	32
3.1.2	Verwendete Verteilungsfunktionen	33
3.1.3	Verteilungstests	33
3.1.4	Nataf Modell	34
3.2	Statistische Analyse von Brückendaten	37
3.2.1	Ermittlung statistischer Kenngrößen aus Brückendaten	37
3.2.2	Histogramme	39
3.3	Erzeugung des Parameterfeldes	40
3.3.1	Gewählte Verteilungsfunktionen	40
3.3.2	Verteilungstests an gewählten Verteilungsfunktionen	42
3.3.3	Rechtfertigung für die Annahme einer lognormalverteilten Dämpfung	45
3.3.4	Anwendung des Nataf Modells zur Parameterfelderzeugung	46

4	Dynamische Berechnung	55
4.1	Festlegung der Eingangsgrößen	55
4.1.1	Festlegung der Brückenparameter	55
4.1.2	Festlegung der Zugparameter	56
4.1.3	Festlegung weiterer Eingangsgrößen	58
4.2	Programmstruktur und Ausgabegrößen	59
4.3	Methodik zur Ergebnisauswertung	61
4.3.1	Ergebnisauswertung für kritische Geschwindigkeiten zwischen 100 und 350 km/h	61
4.3.2	Ergebnisauswertung für die erste kritische Geschwindigkeit	63
4.3.3	Ergebnisauswertung für weitere kritische Geschwindigkeiten	63
4.4	Ergebnisdarstellung	64
5	Berechnungsergebnisse	65
5.1	Berechnungsergebnisse für kritische Geschwindigkeiten zwischen 100 und 350 km/h	66
5.1.1	Erste Zugkonfiguration: acht Reisezugwagen	66
5.1.2	Zweite Zugkonfiguration: sieben Reisezugwagen mit Lok	70
5.2	Berechnungsergebnisse für die erste kritische Geschwindigkeit	75
5.2.1	Erste Zugkonfiguration: acht Reisezugwagen	75
5.2.2	Zweite Zugkonfiguration: sieben Reisezugwagen mit Lok	79
5.3	Berechnungsergebnisse für weitere kritische Geschwindigkeiten	83
5.4	Einschränkung des Definitionsbereichs der linearen Interpolationsfunktion	83
5.5	Anwendungsbeispiel	89
6	Feder-Dämpfer-Modelle	92
6.1	SDOF – Einmassenschwinger	92
6.2	MDOF – Zweimassenschwinger	94
6.3	Gegenüberstellung von Berechnungsergebnissen – SDOF-MDOF versus MLM-DIM	96
6.3.1	Gegenüberstellung für die erste kritische Geschwindigkeit zwischen 100 und 350 km/h	97
6.3.2	Gegenüberstellung für die erste kritische Geschwindigkeit	101
6.3.3	Anwendungsbeispiel	105
7	Schlussfolgerungen und Ausblick	108
7.1	Schlussfolgerungen	108
7.1.1	Erste Kernfrage – Parameterfeld	108
7.1.2	Zweite Kernfrage – Brückenparameter und Änderung der Tragwerksantwort	109
7.1.3	Dritte Kernfrage – Abstraktion mittels Feder-Dämpfer-Modellen	109
7.2	Ausblick	110
	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	113
	Symbolverzeichnis	115
	Anhang A	120
	Program Code zur Erzeugung des Parameterfeldes	120
	Anhang B	137
	Program Code zur Ergebnisauswertung	137

Anhang C	169
Program Code zur Einschränkung des Definitionsbereichs	169
Anhang D	175
Program Code zur Berechnung der Feder-Dämpfer-Modelle	175
Anhang E	198
Tabellarische Auswertung für die erste Zugkonfiguration	198
Anhang F	201
Tabellarische Auswertung für die zweite Zugkonfiguration	201

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation der vorliegenden Arbeit

Im Rahmen des Weißbuchs von 2011 [7] wird von der Europäischen Kommission unter anderem folgendes Ziel definiert, um eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 60 % zu erreichen:

Vollendung eines europäischen Hochgeschwindigkeitsschienennetzes bis 2050. Verdreifachung der Länge des bestehenden Netzes bis 2030 und Aufrechterhaltung eines dichten Schienennetzes in allen Mitgliedstaaten. Bis 2050 sollte der Großteil der Personenbeförderung über mittlere Entfernungen auf die Eisenbahn entfallen.

Dementsprechend ist davon auszugehen, dass bis zum Jahr 2050 die Instandsetzung sowie der Ausbau der Schienen- und Eisenbahninfrastruktur der Mitgliedsstaaten der Europäischen Union vorangetrieben werden wird. Brückentragwerke stellen einen wesentlichen Teil der für den Eisenbahnverkehr notwendigen Infrastruktur dar, wobei speziell Brückentragwerken mit geringen Stützweiten eine besondere Bedeutung zukommt, da diese einen sehr großen Anteil an der Gesamtzahl aller Eisenbahnbrücken ausmachen. Beispielsweise beträgt der Anteil schlanker Eisenbahnbrücken mit Stützweiten bis circa 10 m an der Gesamtzahl aller Eisenbahnbrücken im Schienennetz der Österreichischen Bundesbahnen circa 80 % [10]. Es lässt sich also festhalten, dass der dynamischen Berechnung und Bemessung von Eisenbahnbrücken mit geringen Stützweiten - auch unter Hochgeschwindigkeitsverkehr - eine wesentliche Bedeutung zukommt: Dynamische Berechnungen sind allerdings nicht Teil jedweder Bemessung von Eisenbahnbrücken. Dynamische Berechnungen werden nach derzeitiger Normungssituation für die in [9] (insbesondere Bild 6.9) genannten Fälle erforderlich. Dies ist beispielsweise bei Überfahrtsgeschwindigkeiten über 200 km/h oder der Nichtanwendbarkeit des Hochgeschwindigkeitslastmodells HSLM der Fall.

Bei der dynamischen Berechnung von Eisenbahnbrücken bei Zugüberfahrten muss eine ausreichende Modellierungstiefe gewählt werden, wobei mit steigendem Abstraktionsgrad des Berechnungsmodells der Berechnungsaufwand, gemessen in Berechnungszeit, sinkt: Als sehr realitätsnah sind dreidimensionale Berechnungsmodelle einzustufen, bei denen zum Beispiel die Methode der Finiten Elemente Anwendung findet. Einen höheren Abstraktionsgrad weisen zweidimensionale Berechnungsmodelle auf, bei denen dreidimensionale Brückentragwerke und Züge ausschließlich in einer Ebene - der Systemebene - betrachtet werden. Innerhalb der Gruppe der zweidimensionalen Berechnungsmodelle können bei der Berechnung wiederum Berechnungsmodelle mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden gewählt werden. Zwei mögliche Arten zweidimensionaler Berechnungsmodelle, die z.B. bei Mähr [14] detailliert beschrieben werden, sind:

- Zweidimensionales Mehrkörpermodell: Zugüberfahrten über Brückentragwerke werden simuliert, indem sowohl der Zug als auch die Brücke durch mechanische Modelle ersetzt und aneinander gekoppelt werden. Man spricht in diesem Fall von Mehrkörpermodellen beziehungsweise Mehrkörpersystemen, da mehrere Körper (z.B.: Wagenkästen, Radsätze, Brückentragwerk usw.) über sogenannte Zwangsbedingungen (z.B. die Radsätze sind zu jedem Zeitpunkt in Kontakt mit der Schiene) aneinander gekoppelt werden.

- Zweidimensionales Modell „überfahrende Einzellasten“: Zugüberfahrten über Brückentragwerke werden simuliert, indem die Brücke durch ein mechanisches Modell ersetzt wird. Der überfahrende Zug selbst kommt im Berechnungsmodell nicht mehr vor, sondern wird durch auf die Brücke wirkende Lasten ersetzt.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden erwähnten zweidimensionalen Modellen besteht darin, dass bei Mehrkörpermodellen die Fahrzeug-Brücken-Interaktion (FBI) berücksichtigt wird. Bei dem Modell „überfahrende Einzellasten“ hingegen ist eine Berücksichtigung der FBI a priori unmöglich, da der überfahrende Zug durch Lasten ersetzt wird. Da die FBI aber einen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse einer dynamischen Berechnung haben kann, wäre es aus ingenieurpraktischer Sicht von Interesse, diese Effekte bereits im Vorhinein - also ohne eine zeitlich aufwendige Berechnung per Mehrkörpersystem - abschätzen zu können. Eine derartige Abschätzung kann durch einen Zusammenhang zwischen Zug- beziehungsweise Brückenparametern einerseits und der Änderung der dynamischen Tragwerksantwort zwischen Mehrkörpermodell und dem Modell „überfahrende Einzellasten“ andererseits, erfolgen.

Gelingt es, einen derartigen Zusammenhang zu finden, was die Motivation der vorliegenden Arbeit ist, kann eine zeitlich unaufwendige Berechnung mit dem Modell „überfahrende Einzellasten“ erfolgen. Effekte aus der FBI können dann mithilfe des genannten Zusammenhanges bestimmt werden.

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Dynamische Analyse einfeldriger Eisenbahnbrücken

In der Ingenieurpraxis erfolgen dynamische Berechnungen von Einfeldträgerbrücken unter Hochgeschwindigkeitsverkehr oftmals entsprechend [9] mit dem Modell „überfahrende Einzellasten“, im Folgenden mit Moving Load Model (MLM) bezeichnet. Etwaige sich positiv auf das zu berechnende Tragwerk auswirkende Effekte aus der FBI, die mit Hilfe der Mehrkörperdynamik erfasst werden können, - jedes zu dem bei Mähr [14] dargestellten analoge Mehrkörpermodell wird im Folgenden mit Detailed Interaction Model (DIM) bezeichnet - dürfen für Brücken mit Stützweiten bis 30 m durch Addition einer Zusatzdämpfung, welche auf [6] zurückgeht, berücksichtigt werden.

1.2.2 Überblick über vorhandene Publikationen

Bereits publizierte Untersuchungen zur Ermittlung eines Zusammenhangs zwischen Zug- beziehungsweise Brückenparametern einerseits und der Änderung der dynamischen Tragwerksantwort (im Folgenden verkürzt als „Tragwerksantwort“ bezeichnet) zwischen MLM und DIM andererseits, unterscheiden sich in ihrer Methodik.

Grundsätzlich gibt es 19 Parameter, die in eine DIM-Berechnung von Einfeldträgerbrücken einfließen. Sofern die Überfahrtsgeschwindigkeit, die Anzahl der zu berücksichtigenden Eigenformen sowie die Anzahl der Wagen festgelegt sind, reduziert sich die Anzahl der Parameter auf 16. Von besagten 16 Parametern sind 4 Parameter dem Brückentragwerk zuzuordnen („Brückenparameter“), wohingegen 12 Parameter durch den jeweiligen Zug bestimmt sind („Zugparameter“). Im Wesentlichen basieren diverse durchgeführte Parameterstudien [5, 13, 18] darauf, dass eine Auswahl dieser 16 Parameter getroffen und anschließend variiert wird. Für jede Parameterkombination wird anschließend die absolute oder relative Differenz in der Tragwerksantwort zwischen MLM und DIM berechnet. Da bei wissenschaftlichen Untersuchungen die Fragestellung auftritt, für welche Brücken die Überfahrtssimulationen durchgeführt werden sollen, wird üblicherweise ein Parameterfeld für die Tragwerke definiert, um möglichst allgemeingültige Ergebnisse zu erhalten.

Tabelle 1.1 bietet eine Übersicht über drei publizierte Parameterstudien. Bei allen drei Parameterstudien werden Triebwagen durch gewöhnliche Wagen ersetzt um Störeffekte, die durch den Triebwagen verursacht werden, auszuschließen. Diese Vorgangsweise ist üblich, da ein allgemeiner Zusammenhang ermittelt werden soll, der nicht durch die Andersartigkeit des Triebwagens im Vergleich zu gewöhnlichen Wagen verzerrt werden soll. Der Fokus der vorliegenden Studien liegt also auf Resonanzphänomenen aus regelmäßig wiederkehrender Anregung anstatt der Belastung durch einen Einzelpuls, der durch die üblicherweise höheren Achslasten des Triebwagens hervorgerufen wird. Eine detaillierte Auseinandersetzung mit dem Einfluss des Triebwagens auf die dynamische Tragwerksantwort von einfeldrigen Eisenbahnbrücken findet sich in [2].

Alle im Folgenden angeführten Parameterstudien haben gemein, dass sie einen Zusammenhang zwischen gewählten Parametern einerseits und den Effekten aus der FBI andererseits, feststellen.

Tab. 1.1: Zusammenfassung dreier Parameterstudien. Als „Bezogene Parameter“ werden im Folgenden Quotienten von zwei oder mehr Brücken- beziehungsweise Zugparametern bezeichnet. Die diversen Parameter werden diskretisiert: Für die jeweiligen Parameter werden Werte in festen oder veränderlichen Abständen gewählt. „Minimale Diskretisierung“ bezeichnet die geringste Anzahl an Werten, die für irgendeinen Parameter gewählt wird. „Maximale Diskretisierung“ bezeichnet die größte Anzahl an Werten, die für irgendeinen Parameter gewählt wird

Parameterstudie	Doménech et al. [5]	Liu et al. [13]	Treder [18]
Brückenparameter	1	2	–
Zugparameter	–	–	–
Bezogene Parameter	12	2	3
Diskretisierung im Parameterraum	fest	fest	veränderlich
Minimale Diskretisierung	3	3	7
Maximale Diskretisierung	7	30	23
Median der Diskretisierung	3	12.5	10

Parameterstudie von Doménech et aliis

Die Vorgangsweise von Doménech et al. [5] lässt sich verkürzt wie folgt zusammenfassen: In einem ersten Schritt wird die Parameteranzahl reduziert, indem anstatt der Absolutwerte der Parameter Verhältnisse von Parametern herangezogen werden. Dabei werden Quotienten dreier Brückenparameter und aller Zugparameter als bezogene Parameter gewählt. Danach wird die Überfahrtsgeschwindigkeit, die Anzahl der zu berücksichtigenden Eigenformen sowie die Anzahl der Wagen festgelegt. Somit verbleiben 12 bezogene Parameter und ein Brückenparameter, nämlich die Tragwerksdämpfung, die im Laufe der Parameterstudie allerdings nur drei verschiedene Werte annimmt. In einem weiteren Schritt werden aus Datensätzen real existierender Brücken und Wagen Ober- und Untergrenzen für die 12 bezogenen Parameter und die Tragwerksdämpfung festgelegt. Danach werden, begründet durch vorhergehende Untersuchungen, willkürliche Werte in festen Abständen für die 12 bezogenen Parameter und die Tragwerksdämpfung gewählt (es sei erwähnt, dass für einen Parameter zwei zusätzliche Zwischenwerte eingefügt werden). Die Berechnung von MLM und DIM erfolgt für drei verschiedene Zugkonfigurationen. Anschließend wird eine bezogene Differenz der Tragwerksantwort (in Form der maximalen Vertikalbeschleunigung in Brückenmitte) zwischen MLM und DIM ermittelt und für drei Parameter, die als wesentlich identifiziert wurden, dargestellt.

Parameterstudie von Liu et alii

Liu et al. [13] gehen anders vor: Es werden zwei bezogene Parameter, zwei Brückenparameter, eine Referenzbrücke sowie eine Referenzzug gewählt. Anschließend wird jeweils nur ein einzelner Parameter variiert, wobei alle anderen Parameter konstant gehalten werden. Die Variation erfolgt mit konstanten, willkürlich gewählten Schrittlängen zwischen willkürlich gewählten Grenzen; Es liegt also eine Diskretisierung in festen Abständen vor. Die Berechnung von MLM und DIM erfolgt für eine Zugkonfiguration. Danach wird ein dynamischer Vergrößerungsfaktor (in Form des Quotienten der maximalen dynamischen Verschiebung und der maximalen statischen Verschiebung in Brückenmitte) in Abhängigkeit des jeweils variierten Parameters berechnet.

Parameterstudie von Treder

Treder [18] hingegen variiert drei bezogene Parameter, deren Einfluss auf die Tragwerksantwort in [5] als maßgeblich beschrieben wird. Die Berechnung von MLM und DIM erfolgt für eine Zugkonfiguration. Die Parameter werden mit veränderlichen Schrittlängen variiert, wobei diese willkürlich gewählt werden. Anschließend wird eine bezogene Differenz der Tragwerksantwort (in Form der maximalen Vertikalbeschleunigung in Brückenmitte) zwischen MLM und DIM ermittelt.

Schlussfolgerungen aus vorhandenen Publikationen

In Anbetracht der drei Parameterstudien aus Tabelle 1.1 lassen sich folgende Punkte festhalten:

- In keiner der angeführten Parameterstudien werden alle vier Brückenparameter variiert.
- Alle angeführten Parameterstudien arbeiten mit bezogenen Parametern. Diese beinhalten jeweils zumindest teilweise Zugparameter. Eine „echte“ Variation der Zugparameter, indem die Zugparameter selbst und nicht etwa deren Quotienten mit anderen Parametern variiert werden, findet in keiner der angeführten Parameterstudien statt.
- Die Diskretisierung des Parameterraumes erfolgt in allen angeführten Parameterstudien willkürlich, wobei beispielsweise bei Treder [18] das Parameterfeld in manchen Bereichen verdichtet wird.
- Die Dichte des Parameternetzes, also jener Werte, die die Parameter während der Berechnung im Parameterraum annehmen, ist bei allen angeführten Parameterstudien gering. Etwaige Sprungstellen oder lokale Extrema in numerisch ermittelten Ergebnissen können dadurch möglicherweise nicht erfasst werden.

1.3 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Methode zur Ermittlung eines Zusammenhangs zwischen Zugs- beziehungsweise Brückenparametern einerseits und der Änderung der Tragwerksantwort zwischen MLM und DIM andererseits, aufzuzeigen. Dies geschieht anhand von Einfeldträgerbrücken unter Hochgeschwindigkeitsverkehr mit Stützweiten bis 40 m.

Zur Untersuchung dieses Zusammenhanges werden in ausführlichen dynamischen Berechnungen sämtliche Brückenparameter, die einen Einfluss auf die Tragwerksantwort von Einfeldträgerbrücken haben, variiert. Die Variation der Brückenparameter wird so durchgeführt, dass in Bereichen von großer Bedeutung eine ausreichende Dichte des Parameternetzes erreicht wird. Bereiche von großer Bedeutung bezeichnen jene Bereiche des Parameterfeldes, innerhalb derer ein Großteil (im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wird definiert, ab welchem Prozentsatz von einem „Großteil“ gesprochen werden kann) aller real existierenden Brückentragwerke anzutreffen ist. Die Zugparameter werden hingegen festgelegt: Es werden also Überfahrten von festgelegten

Zugkonfigurationen (und nicht etwa Überfahrten aller möglichen fiktiven Züge) simuliert. Eine Variation der Zugparameter erfolgt insofern, dass die Berechnung für alle Brückenparameter für unterschiedliche Zugkonfigurationen beziehungsweise Züge durchgeführt wird. Somit lässt sich für einen konkreten Zug beziehungsweise eine konkrete Zugkonfiguration eine Aussage über alle Brückentragwerke treffen, die innerhalb eines vorher definierten Bereiches von großer Bedeutung des Parameterraumes liegen.

Außerdem wird die Berechnungszeit zur Bestimmung des genannten Zusammenhanges gering gehalten. Zusätzlich wird überprüft, ob etwaige Ergebnisse durch Abstraktion auf einfachere Feder-Dämpfer-Modelle zurückgeführt werden können.

Dementsprechend ergeben sich folgende Fragestellungen, die im Laufe der vorliegenden Arbeit beantwortet werden:

1. Wie kann ein Parameterfeld für Brückenparameter erzeugt werden, das eine möglichst geringe Anzahl an Parameterpunkten enthält, aber dennoch eine ausreichende Dichte in Bereichen von großer Bedeutung hat?
2. Lässt sich für konkrete Zugkonfigurationen ein Zusammenhang zwischen Brückenparametern einerseits und der Änderung der Tragwerksantwort zwischen MLM und DIM andererseits, bestimmen?
3. Lässt sich ein derartiger Zusammenhang, sofern er existiert, durch Abstraktion auf wesentlich einfachere Feder-Dämpfer-Modelle zurückführen?

1.4 Umfang der vorliegenden Arbeit

In Kapitel 2 wird näher auf die wesentlichen mechanischen Grundlagen für dynamische Berechnungen mittels MLM und DIM eingegangen. Die Ausführungen zu den mechanischen Grundlagen werden bewusst kurz und bündig gehalten, da sich sehr ausführliche Beschreibungen ebendieser in [2, 14, 18] finden lassen. Im Anschluss daran wird in Kapitel 3 die Frage nach der Erzeugung eines Parameterfeldes, das den Anforderung gemäß Unterkapitel 1.3 genügt, beantwortet. Hierbei wird zunächst allein auf die verwendete Methodik zur Erzeugung eines solchen Parameterfeldes eingegangen.

In Kapitel 4 und Kapitel 5 wird eine dynamische Berechnung mittels MLM und DIM anhand eines konkreten Parameterfeldes und ausgewählten Zügen respektive Zugkonfigurationen beschrieben. Danach wird dem Leser dieser Arbeit in Kapitel 6 veranschaulicht, wie etwaige Ergebnisse aus Kapitel 5 auf einfache Feder-Dämpfer-Modelle zurückgeführt werden könnten.

Abschließend wird Kapitel 7 eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf Künftiges geboten.

Kapitel 2

Mechanische Grundlagen

Wie bereits in Unterkapitel 1.4 erwähnt, erfolgt in diesem Kapitel eine kurze Zusammenfassung der mechanischen Grundlagen, die den im weiteren Verlauf der Arbeit durchgeführten dynamischen Berechnungen zu Grunde liegen. Der Leser sei darauf hingewiesen, dass im Folgenden nur die nötigsten Gleichungen und Formeln angeführt werden, da sich bei Mähr [14], Bettinelli [2] sowie Treder [18] sehr detaillierte Ausführungen über die in diesem Kapitel behandelten mechanischen Grundlagen finden. Das folgende Kapitel stellt also eine Zusammenfassung bereits vorhandener Arbeiten dar.

2.1 Modellbildung Brücken

2.1.1 Verwendete Strukturmechanische Theorie

In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich Brücken betrachtet, die so beschaffen sind, dass sie sich idealisiert mithilfe der schubstarrten Stabtheorie I. Ordnung („Theorie für schlanke, gerade und schubstarre Stäbe mit konstanten Querschnittseigenschaften unter Biege- und Axialkraftbeanspruchung bei kleinen Verschiebungen und kleinen Querschnittsrotationen“) beschreiben lassen. Das bedeutet unter anderem, dass das dreidimensionale Kontinuum Brückentragwerk durch das eindimensionale Kontinuum „Stab“ ersetzt wird. Der eindimensionale Stab wird innerhalb der Systemebene belastet und betrachtet, was schlussendlich zu einem zweidimensionalen Berechnungsmodell führt.

Die Annahmen der schubstarrten Stabtheorie I. Ordnung lassen sich beziehend auf [11, 16] wie folgt zusammenfassen:

- Ebenes Tragwerk, Belastung in der Systemebene
- Kleine Querschnittsverdrehungen, konstante Querschnittsabmessungen
- Ebenbleiben der Querschnitte, orthogonal zur verformten Stabachse, sinnvoll für Querschnittshöhen h_{QS} und Querschnittsbreiten b_{QS} , für die folgende Beziehung zur Stablänge (beziehungsweise Stützweite) l gilt

$$h_{QS}, b_{QS} \ll l \quad (2.1)$$

- Kleine Stabachsenverschiebungen $\vec{u}(\vec{X})$ im Vergleich zu den Querschnittsabmessungen; Aufgrund der Kleinheit der Stabachsenverschiebungen dürfen diese, anstatt auf die Koordinaten der unverformten Lage $\vec{X} = (X, Y, Z)^T$, auf die Koordinaten der verformten Lage $\vec{x} = (x, y, z)^T$ bezogen werden.

$$\|\vec{u}(\vec{X})\| \approx \|\vec{u}(\vec{x})\| \ll h_{QS}, b_{QS} \quad (2.2)$$

- Kleine Verschiebungsableitungen

$$\left\| \frac{\partial \vec{u}}{\partial \vec{x}} \right\| \ll 1 \quad (2.3)$$

Dementsprechend kann der Green-Lagrangesche-Verzerrungstensor $\underline{E}(\vec{X})$ in eine Taylorreihe um $\vec{0}$ entwickelt werden, die nach dem linearen Term abgebrochen wird. Er wird also durch den linearisierten Verzerrungstensor $\underline{\varepsilon}(\vec{x})$ ersetzt

$$\underline{E}(\vec{X}) \approx \underline{\varepsilon}(\vec{x}) \quad (2.4)$$

- Linear elastisches Materialverhalten (die verwendeten Materialien sind homogen und isotrop)
- Vernachlässigung von Schubverzerrungen; Für die Schubsteifigkeit $G\tilde{A}$ gilt also

$$G\tilde{A} \rightarrow \infty \quad (2.5)$$

2.1.2 Mechanisches Modell

Randbedingungen

Sämtliche Brücken, die im Folgenden behandelt werden, sind Einfeldträgerbrücken. Es liegen also bei allen Brücken die gleichen Randbedingungen vor.

- Dynamische Randbedingungen: Das Biegemoment M_y muss sich an beiden Auflagern zu Null ergeben.

$$M_y(x=0, t) = M_y(x=l, t) = 0 \quad (2.6)$$

- Geometrische Randbedingungen: Die Stabachsenverschiebung $w(x, t)$ in \vec{e}_z muss sich an beiden Auflagern zu Null ergeben.

$$w(x=0, t) = w(x=l, t) = 0 \quad (2.7)$$

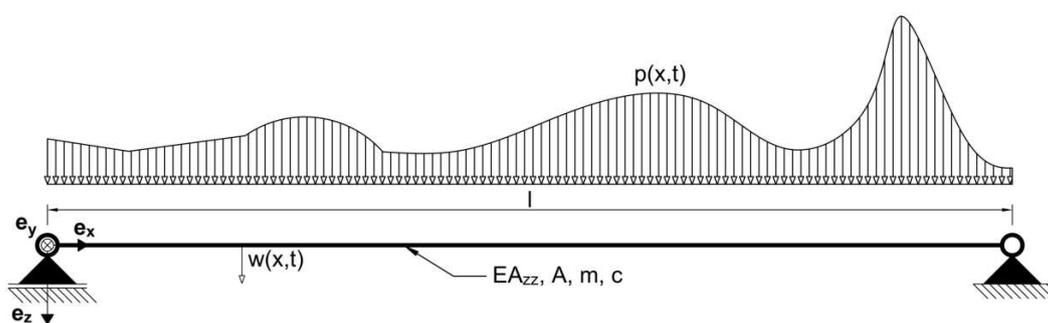


Abb. 2.1: Brückenbalken mit Biegesteifigkeit EA_{zz} , Querschnittsfläche A , Massenbelegung m , Dämpfungskonstante c , Stützweite l , dynamischer Belastung $p(x, t)$;

Bewegungsgleichung, des beidseits gelenkig gelagerten Bernoulli-Euler-Balkens

Stäbe, die die Voraussetzungen gemäß Unterkapitel 2.1.1 erfüllen, werden in der Literatur auch als Bernoulli-Euler-Balken bezeichnet. Unter der Voraussetzung, dass keine Streckenmomente

einwirken, also $m_y(x, t) = 0$, ergibt sich die Bewegungsgleichung des beidseits gelenkig gelagerten Bernoulli-Euler-Balkens gemäß Mähr [14] zu

$$EA_{zz} \cdot w_{,xxxx}(x, t) + m \cdot \ddot{w}(x, t) + c \cdot \dot{w}(x, t) = p(x, t) \quad (2.8)$$

Hierbei handelt es sich um eine lineare, inhomogene, partielle Differentialgleichung 4. Ordnung in zwei Veränderlichen mit konstanten Koeffizienten. Entsprechend Abb. 2.1 bezeichnet dabei EA_{zz} die Biegesteifigkeit, m die Massenbelegung, c die Dämpfungskonstante, $w(x, t)$ die Biegeordinate und $p(x, t)$ die dynamische Belastungsfunktion. Im weiteren Verlauf wird die Bewegungsgleichung (2.8) per Modalanalyse gelöst. Daher wird die Dämpfungskonstante c , wie bei der Modalanalyse üblich, unter der Annahme modaler Dämpfung durch die Diagonaleinträge der modalen Dämpfungsmatrix c_j ersetzt.

Eigenformen und Eigenfrequenzen

Betrachtet man ausschließlich das homogene, ungedämpfte Problem, also

$$c = 0 \quad p(x, t) = 0 \quad (2.9)$$

lässt sich (2.8) umschreiben zu

$$EA_{zz} \cdot w_{,xxxx}(x, t) + m \cdot \ddot{w}(x, t) = 0 \quad (2.10)$$

Man erhält also eine lineare, homogene, partielle Differentialgleichung 4. Ordnung in zwei Variablen mit konstanten Koeffizienten, die die freie, harmonische Schwingung des Bernoulli-Euler-Balkens beschreibt. Diese lässt sich mithilfe eines Separationsansatzes der Form

$$w(x, t) = \phi(x) \cdot q(t) \quad (2.11)$$

in zwei lineare, homogene, gewöhnliche Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten aufspalten, wobei die a priori unbekanntes Eigenkreisfrequenzen ω_j eingeführt werden. Nach weiterer Behandlung dieser Gleichungen, wie sie beispielsweise in [14] zu finden ist, und unter Berücksichtigung von (2.6) sowie (2.7) erhält man folgendes Resultat für die Eigenkreisfrequenzen ω_j und Eigenformen $\phi_j(x)$ (beziehungsweise Eigenfunktionen) des ungedämpften Bernoulli-Euler-Balkens

$$\omega_j = \left(\frac{j\pi}{l}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{EA_{zz}}{m}} \quad \text{mit} \quad j \in \mathbb{N} \quad (2.12)$$

$$\phi_j(x) = c_1 \cdot \sin\left(\frac{j\pi x}{l}\right) \quad \text{mit} \quad j \in \mathbb{N} \quad \text{und} \quad c_1 = \text{const.} \in \mathbb{R} \quad (2.13)$$

Unter der Annahme unterkritischer Dämpfung ergibt sich die Eigenkreisfrequenz des gedämpften Bernoulli-Euler-Balkens $\omega_{D,j}$ mit dem Lehrschen Dämpfungsmaß $z < 1$ zu

$$\omega_{D,j} = \omega_j \cdot \sqrt{1 - z^2} \quad \text{mit} \quad j \in \mathbb{N} \quad (2.14)$$

und für $z \ll 1$ gilt

$$\omega_{D,j} \approx \omega_j \quad (2.15)$$

Es gilt selbstverständlich der allgemein bekannte Zusammenhang zwischen Biegeeigenfrequenzen f_j , Perioden T_j und Eigenkreisfrequenzen ω_j .

$$\omega_j = 2\pi f_j = \frac{2\pi}{T_j} \quad (2.16)$$

Lösung der Bewegungsgleichung per Modalanalyse

Gleichung (2.8) kann mittels Modalanalyse gelöst werden, da die Eigenformen aus (2.13) und die Eigenkreisfrequenzen aus (2.14) bekannt sind. In [14] findet sich eine detaillierte Beschreibung der Vorgangsweise, welche im Folgenden nur kurz skizziert wird. Mithilfe des Ritzschen Ansatzes,

$$w^*(x, t) = \sum_{j=1}^n \phi_j(x) \cdot q_j(t) \quad (2.17)$$

bei dem eine endliche Anzahl n an Eigenformen überlagert wird, um $w(x, t)$ zu approximieren, kann (2.8) gelöst werden. Zunächst wird (2.17) in (2.8) eingesetzt. Durch eine Koordinatentransformation in die Basis der Eigenfunktionen $\phi_j(x)$ und die Anwendung grundlegender linearer Algebra lässt sich die so erhaltene Gleichung in ein entkoppeltes Gleichungssystem aus gewöhnlichen, linearen, homogenen Differentialgleichungen zweiter Ordnung in den generalisierten Lagekoordinaten $\vec{q}(t)$ umschreiben. Danach folgen Äquivalenzumformungen des erhaltenen Differentialgleichungssystems sowie die Berechnung der in ihr vorkommenden generalisierten Steifigkeits-, Dämpfungs- sowie Massenmatrix. Dabei werden insbesondere die in Mähr [14] angegebenen Orthogonalitätsrelationen der Eigenfunktionen herangezogen. Somit ergibt sich folgendes Gleichungssystem,

$$\underline{\underline{M}} \cdot \ddot{\vec{q}}(t) + \underline{\underline{C}} \cdot \dot{\vec{q}}(t) + \underline{\underline{K}} \cdot \vec{q}(t) = \vec{p}(x, t) \quad (2.18)$$

das eine andere Form von (2.8) darstellt. Dabei haben die generalisierte Massenmatrix $\underline{\underline{M}}$, die generalisierte Dämpfungsmatrix $\underline{\underline{C}}$ und die generalisierte Steifigkeitsmatrix $\underline{\underline{K}}$ gemäß [2] folgende Form:

$$\begin{aligned} \underline{\underline{M}} &= m \cdot \frac{l}{2} \cdot \underline{\underline{I}} \\ \underline{\underline{C}} &= \frac{l}{2} \cdot \underline{\underline{I}} \cdot \left[\sum_{j=1}^n \vec{e}_j \otimes \vec{e}_j \cdot c_j \right] \\ \underline{\underline{K}} &= EA_{zz} \cdot \frac{l}{2} \cdot \underline{\underline{I}} \cdot \left[\sum_{j=1}^n \vec{e}_j \otimes \vec{e}_j \cdot \left(\frac{j\pi}{l} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

Dabei bezeichnen c_j die Diagonaleinträge der modalen Dämpfungsmatrix, für die folgender Zusammenhang gilt:

$$c_j = 2zm\omega_j \quad (2.20)$$

Die in (2.18) auftretenden generalisierten Lagekoordinaten $\vec{q}(t)$ und der generalisierte Belastungsvektor $\vec{p}(x, t)$ haben gemäß [2] wiederum folgende Gestalt:

$$\begin{aligned} \vec{q}(t) &= \int_0^l \begin{pmatrix} q_1(t) \cdot \phi_1(x) \\ q_2(t) \cdot \phi_2(x) \\ \vdots \\ q_n(t) \cdot \phi_n(x) \end{pmatrix} dx \\ \vec{p}(x, t) &= \int_0^l p(x, t) \cdot \vec{\phi}(x) dx \end{aligned} \quad (2.21)$$

Dabei ist

$$\vec{\phi}(x) = \begin{pmatrix} \phi_1(x) \\ \phi_2(x) \\ \dots \\ \phi_n(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \\ \sin\left(\frac{2\pi x}{l}\right) \\ \dots \\ \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Wird (2.18) gelöst und eine Lösung für die generalisierte Lagekoordinate $\vec{q}(t)$ erhalten, kann die Biegeordinate anhand von (2.17) bestimmt werden.

2.2 Modellbildung Züge

Wie bereits in Unterkapitel 1.1 erwähnt, gibt es mehrere Möglichkeiten Zugüberfahrten über Brückentragwerke anhand von mechanischen Berechnungsmodellen zu untersuchen. Im vorliegenden Kapitel wird näher auf zwei konkrete mechanische Modelle für über ein Brückentragwerk fahrende Züge eingegangen.

2.2.1 Moving Load Model

Beim Moving Load Model (MLM) wird der über das Brückentragwerk fahrende Zug durch Einzellasten P_k ersetzt, die mit einer konstanten Geschwindigkeit v entlang der Stabachse des Brückentragwerks verschoben werden. Dabei erfolgt die Betrachtung ausschließlich in der x - z -Systemebene. Die Einzellasten wirken normal zur Stabachse an jener Stelle x auf das Brückentragwerk, an der der ideale Berührungspunkt zwischen Radsatz und Schiene liegt. Eine Darstellung des MLM kann Abb. 2.2 entnommen werden. Die Abstände der Einzellasten vom Ursprung des Koordinatensystems x_j lassen sich mithilfe der konstanten Geschwindigkeit $v = \text{const.}$ und der zeitlichen Abstände der Einzellasten ausdrücken.

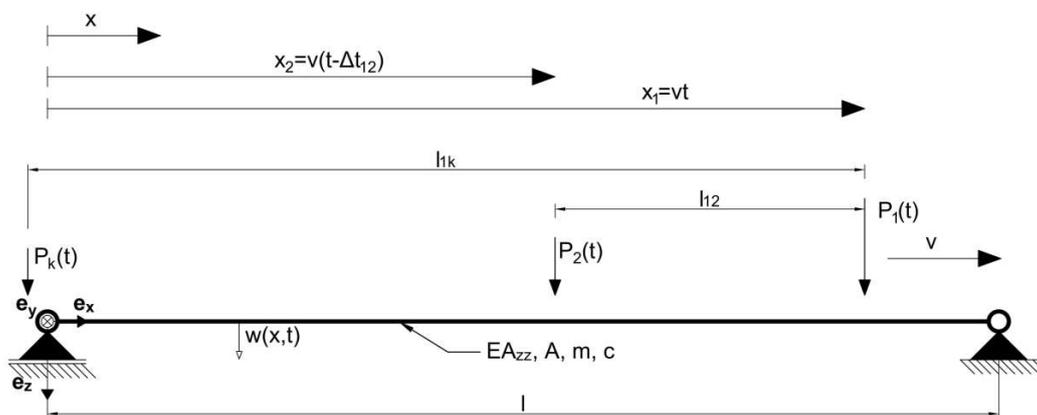


Abb. 2.2: Moving Load Model: Brückenbalken belastet durch Einzellasten P_k zum Zeitpunkt t

Dementsprechend kann die Belastungsfunktion $p(x, t)$ aus (2.8) folgendermaßen angeschrieben werden [2],

$$p(x, t) = \sum_{k=1}^m P_k \cdot \Gamma(x_k) \cdot \delta(x - x_k) \quad (2.23)$$

wobei $\Gamma(x_k)$ und $\delta(x - x_k)$ die bei Mähr [14] angeführte Gamma- beziehungsweise Deltafunktion bezeichnet.

$$\Gamma(x_k) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } 0 \leq x_k \leq l \\ 0 & \text{wenn } x_k < 0 \vee x_k > l \end{cases}$$

$$\delta(x - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } x - x_k = 0 \\ 0 & \text{wenn } x - x_k \neq 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

Durch Ausnutzung der Eigenschaften von $\delta(x - x_k)$ erhält man durch Einsetzen von (2.23) in (2.21) folgendes Resultat für den Belastungsvektor $\vec{p}(x, t)$ [2, 14]

$$\vec{p}(x, t) = \begin{pmatrix} p_1(x, t) \\ p_2(x, t) \\ \dots \\ p_n(x, t) \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^m \begin{pmatrix} P_k \cdot \Gamma(x_k) \cdot \phi_1(x_k) \\ P_k \cdot \Gamma(x_k) \cdot \phi_2(x_k) \\ \dots \\ P_k \cdot \Gamma(x_k) \cdot \phi_n(x_k) \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^m \begin{pmatrix} P_k \cdot \Gamma(x_k) \cdot \sin(\Omega_1 t + \theta_1) \\ P_k \cdot \Gamma(x_k) \cdot \sin(\Omega_2 t + \theta_2) \\ \dots \\ P_k \cdot \Gamma(x_k) \cdot \sin(\Omega_n t + \theta_n) \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

Dabei bezeichnet Ω_j die Erregerkreisfrequenz der Einzellast P_k für die j-te Schwingungsmode und θ_j die Phasenverschiebung der Einzellast P_k zur Einzellast P_1 [2].

$$\Omega_j = \frac{j\pi v}{l}$$

$$\theta_j = \frac{j\pi l_{1k}}{l} \quad (2.26)$$

2.2.2 Detailed Interaction Model

Beim Detailed Interaction Model (DIM) werden die mit konstanter Geschwindigkeit v über das Brückentragwerk fahrenden Wagen durch Mehrmassenschwinger [2] modelliert, die mittels Zwangsbedingung an das Brückentragwerk gekoppelt sind. Dadurch wird die Anzahl der Freiheitsgrade des Wagens von 10 auf 6 reduziert und es entsteht ein Mehrkörpersystem, das aus den Wagen und der Brücke besteht. Die Wagen wiederum bestehen aus Wagenkästen („car body“, Index c), Drehgestellen („bogie“, Index b) sowie Radsätzen („wheel set“, Index w) [2], die mittels Federn und Dämpfern miteinander verbunden sind. Das in dieser Arbeit für jeweils einen Wagen verwendete Modell ist in Abb. 2.3 dargestellt. Dabei werden die Bezeichnungen aus [2] übernommen.

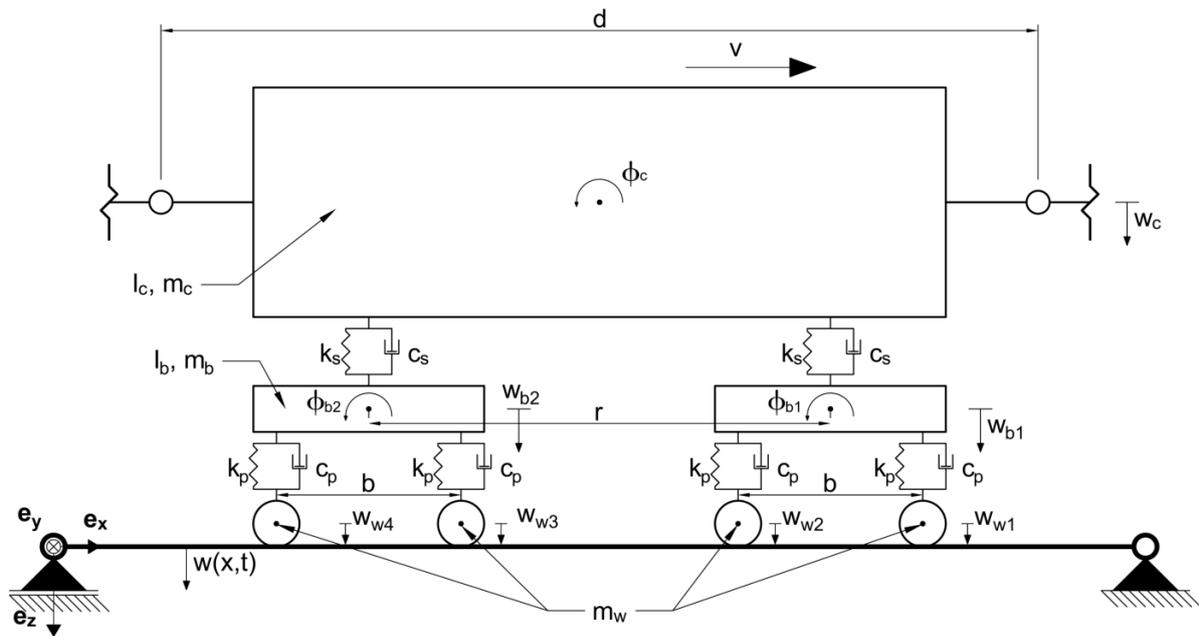


Abb. 2.3: Detailed Interaction Model: Rotation des Wagenkastens ϕ_c ; Rotation der Drehgestelle ϕ_{b1}, ϕ_{b2} ; Translation des Wagenkastens w_c , Translation der Drehgestelle w_{b1}, w_{b2} ; Translation der Radsätze $w_{w1}, w_{w2}, w_{w3}, w_{w4}$; Fahrzeug- beziehungsweise Wagenlänge gemessen von Puffer zu Puffer d ; Schwerpunktabstand der Drehgestelle r ; Schwerpunktabstand der Radsätze des Drehgestells b ; Radsatzmasse m_w ; Masse des Drehgestells m_b ; Masse des Wagenkastens m_c ; Massenträgheitsmoment des Drehgestells I_b ; Massenträgheitsmoment des Wagenkastens I_c ; Federsteifigkeit der Primärstufe k_p ; Federsteifigkeit der Sekundärstufe k_s ; Dämpfungskonstante der Primärstufe c_p ; Dämpfungskonstante der Sekundärstufe c_s ; Geschwindigkeit $v = const.$; Biegeordinate des Brückenbalkens $w(x, t)$

Bewegungsgleichung des auf der Schiene abrollenden Systems

Mähr [14] gibt eine detaillierte Beschreibung des DIM sowie eine Herleitung der Bewegungsgleichungen unter Verwendung des D'Alembertschen Prinzips an. Die Annahmen, die von Mähr [14] getroffen werden, um schlussendlich die Bewegungsgleichungen zu erhalten, lauten:

1. Das Fahrzeug bewegt sich gleichförmig mit konstanter Geschwindigkeit v .
2. Alle kinematischen Beziehungen können um einen Bezugszustand linearisiert werden.
3. Für die Federn gilt das Hookesche Gesetz. Die Dämpfer sind viskos mit konstanten Dämpfungskoeffizienten.
4. Alle Körper sind starr.
5. In vertikaler Richtung herrscht stets Kontakt zwischen Rad und Schiene (kinematische Zwangsbedingung).
6. Die Räder rollen reibungslos und ohne Schlupf auf dem Gleis ab.

Das resultierende Differentialgleichungssystem für das auf der Schiene abrollende System ergibt sich zu [2, 14]

$$\underline{M}_Z \cdot \ddot{\vec{u}}_{def}(t) + \underline{C}_Z \cdot \dot{\vec{u}}_{def}(t) + \underline{K}_Z \cdot \vec{u}_{def}(t) = -\vec{F}_w(x, t) - \vec{F}_{\dot{w}}(x, t) \quad (2.27)$$

Die in (2.27) auftretende Massen-, Dämpfungs- und Steifkeitsmatrix des Fahrzeuges haben folgende Gestalt [2]

$$\begin{aligned}
 \widetilde{M}_Z &= \begin{pmatrix} m_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{zz,c} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{zz,b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{zz,b} \end{pmatrix} \\
 \widetilde{C}_Z &= \begin{pmatrix} 2c_s & 0 & -2c_s & 0 & -2c_s & 0 \\ 0 & \frac{c_s r^2}{2} & -\frac{c_s r}{2} & 0 & \frac{c_s r}{2} & 0 \\ -c_s & -\frac{c_s r}{2} & 2c_p + c_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{c_p b^2}{2} & 0 & 0 \\ -c_s & \frac{c_s r}{2} & 0 & 0 & 2c_p + c_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_p b^2}{2} \end{pmatrix} \\
 \widetilde{K}_Z &= \begin{pmatrix} 2k_s & 0 & -2k_s & 0 & -2k_s & 0 \\ 0 & \frac{k_s r^2}{2} & -\frac{k_s r}{2} & 0 & \frac{k_s r}{2} & 0 \\ -k_s & -\frac{k_s r}{2} & 2k_p + k_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_p b^2}{2} & 0 & 0 \\ -k_s & \frac{k_s r}{2} & 0 & 0 & 2k_p + k_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_p b^2}{2} \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

Die in (2.27) auftretenden Lastvektoren lauten

$$\begin{aligned}
 \vec{F}_w(x, t) &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -k_p w_{w1} - k_p w_{w2} \\ -\frac{k_p w_{w1} b}{2} + \frac{k_p w_{w2} b}{2} \\ -k_p w_{w3} - k_p w_{w4} \\ -\frac{k_p w_{w3} b}{2} + \frac{k_p w_{w4} b}{2} \end{pmatrix} \\
 \vec{F}_{\dot{w}}(x, t) &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -c_p \dot{w}_{w1} - c_p \dot{w}_{w2} \\ -\frac{c_p \dot{w}_{w1} b}{2} + \frac{c_p \dot{w}_{w2} b}{2} \\ -c_p \dot{w}_{w3} - c_p \dot{w}_{w4} \\ -\frac{c_p \dot{w}_{w3} b}{2} + \frac{c_p \dot{w}_{w4} b}{2} \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

Der Vektor der Deformationsgrößen $\vec{u}_{def}(t)$ enthält folgende 6 Freiheitsgrade

$$\vec{u}_{def}(t) = \begin{pmatrix} w_c \\ \phi_c \\ w_{b1} \\ \phi_{b1} \\ w_{b2} \\ \phi_{b2} \end{pmatrix} \tag{2.30}$$

Bestimmung des Belastungsvektors

Da das Mehrkörpersystem ja nicht nur aus den Wagen sondern auch aus der Brücke besteht, gilt es den Belastungsvektor $\vec{p}(x, t)$ auf der Rechten Seite von Gleichung (2.8) gemäß (2.21) zu bestimmen. Mähr [14] geht dabei ähnlich zur Bestimmung des Belastungsvektors beim MLM (siehe Unterkapitel 2.2.1) vor, wobei anstatt der Einzellasten nun Kopplungskräfte P_k auf den Brückenbalken wirken. Die Kopplungskraft aus dem k-ten Rad ergibt sich zu [14],

$$P_k(x_k) = F_{st,k} - F_{kp,k} - F_{cp,k} - m_{w,k} \ddot{w}(x_k) \tag{2.31}$$

wobei $F_{st,k}$ die statische Aufstandskraft des k -ten Radsatzes, $F_{kp,k}$ die Fedekraft der Primärstufe des k -ten Radsatzes und $F_{cp,k}$ die Dämpferkraft der Primärstufe des k -ten Radsatzes bezeichnet. Schlussendlich erhält man für einen Wagen wie er in Abb. 2.3 dargestellt ist, einen Belastungsvektor $\vec{p}(x, t)$ der Form [14]

$$\vec{p}(x, t) = \sum_{k=1}^4 \left\{ F_{st,k} - F_{kp,k} - F_{cp,k} - m_{w,k} \cdot \sum_{j=1}^n \left[\ddot{q}(t) \phi_j(x) + 2v \dot{q}(t) \phi_{j,x}(x) + v^2 q(t) \phi_{j,xx}(x) \right] \right\} \Gamma_k(x_k) \vec{\phi}(x_k) \quad (2.32)$$

Dabei ist $\vec{\phi}(x_k)$ entsprechend Gleichung (2.22) der Vektor der die Eigenformen des Bernoulli-Euler-Balkens enthält. Dessen Einträge lauten unter Berücksichtigung von (2.26)

$$\phi_j(x) = \sin(\Omega_j t - \theta_{k,j}) \quad (2.33)$$

Aus Gleichung (2.32) wird ersichtlich, dass die Bewegungsgleichung des Brückenbalkens (2.18) und die Bewegungsgleichung des auf der Schiene abrollenden Systems (2.27) gemeinsam betrachtet werden müssen, da im Belastungsvektor $\vec{p}(x, t)$ Aufstands-, Feder- und Dämpferkräfte auftreten, die nur unter Berücksichtigung von (2.27) bestimmt werden können.

2.3 Kritische Geschwindigkeiten aus Resonanzphänomenen

Von Mähr [14], Treder [18], Bettinelli [2] und Stollwitzer [17] durchgeführte dynamische Berechnungen belegen, dass um sogenannte kritische Geschwindigkeiten v_{cr} lokale Extrema in der Tragwerksantwort auftreten können. Die Ursache für diese lokalen Extrema sind zumeist Resonanzphänomene aus der regelmäßig wiederkehrenden Anregung durch überfahrende Züge. Dementsprechend werden besagte kritische Geschwindigkeiten in der Literatur auch als Resonanzgeschwindigkeiten bezeichnet. Sie hängen von der Wagenlänge d sowie der ersten Biegeeigenfrequenz f ab.

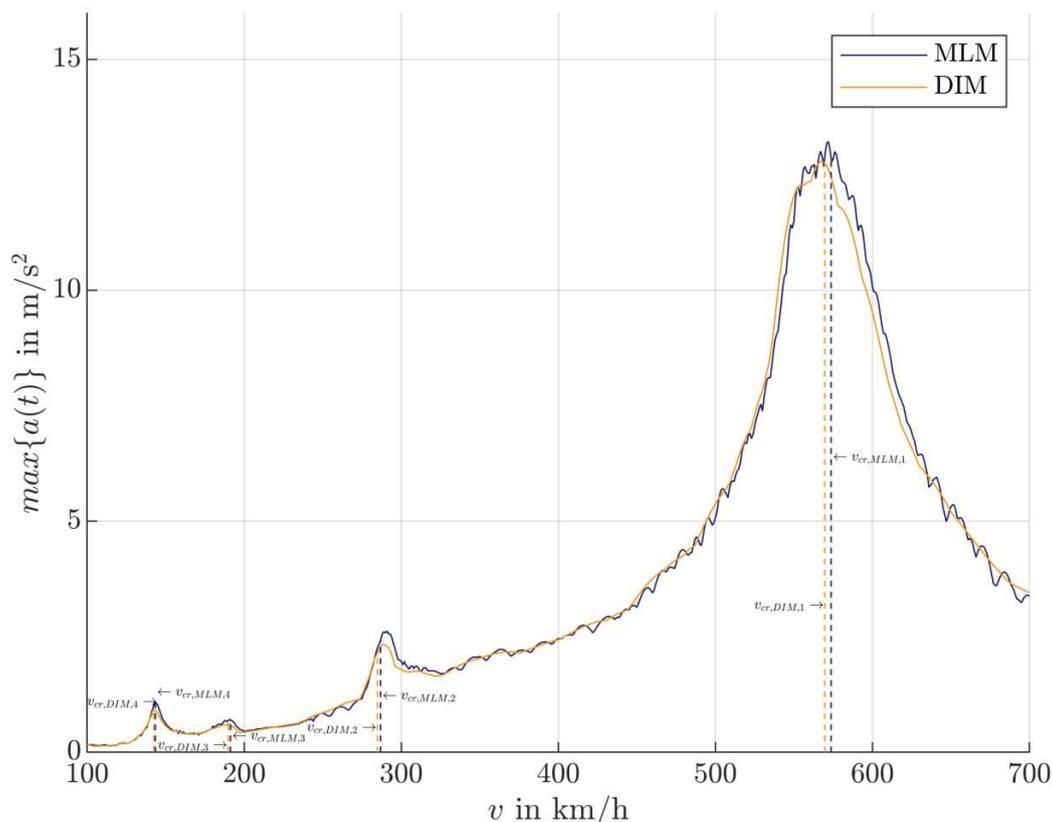


Abb. 2.4: Maximum der Vertikalbeschleunigung aus dem Zeitverlauf in Brückenmitte ($x = \frac{l}{2}$) für eine Brücke mit Stützweite $l = 17.4$ m, Massenbelegung $m = 16.2$ t/m, erster Biegeeigenfrequenz $f = 5.4$ Hz und Lehrschem Dämpfungsmaß $z = 1.21$ %.

Abb. 2.4 zeigt die Ergebnisse einer MLM sowie DIM Berechnung einer Zugüberfahrt von 8 Reisezugwagen des Railjet über eine Brücke. Anhand von Abb. 2.4 wird ersichtlich, dass im Bereich kritischer Geschwindigkeiten Spitzen bzw. lokale Maxima der Vertikalbeschleunigung des Brückentragwerks in Tragwerksmitte auftreten. Außerdem liegen die kritischen Geschwindigkeiten des DIM unter jenen des MLM.

Insbesondere bei Brücken mit hohen Biegeeigenfrequenzen können Beschleunigungsspitzen der Vertikalbeschleunigung auftreten, die nicht durch das Phänomen der Resonanzgeschwindigkeiten aus der Wagenlänge d begründet sind [17]. Derartige Beschleunigungsspitzen treten beispielsweise bei kritischen Geschwindigkeiten auf, die von den Drehgestellabständen r oder den Radsatzabständen b abhängig sind (siehe Abb. 2.3). Außerdem können einzelne Beschleunigungsspitzen durch eine impulsartige Anregung durch einzelne Achslasten hervorgerufen werden. Zudem treten auch Auslöschungseffekte bei bestimmten Geschwindigkeiten auf, die sich berechnen lassen. Auf diese wird im weiteren Verlauf nicht näher eingegangen. Der Leser sei auf vorangegangene Arbeiten [2] verwiesen.

2.3.1 Bestimmungsformel für kritische Geschwindigkeiten

Mähr [14] gibt eine Bestimmungsformel für die oben erwähnten kritischen Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Wagenlänge d an, wobei Gebrauch von (2.15) gemacht wird

$$v_{cr,MLM,j} = \frac{fd}{j} \quad \text{mit} \quad j \in \mathbb{N} \quad (2.34)$$

Dabei bezeichnet f die erste Biegeeigenfrequenz der Einfeldträgerbrücke, wobei der Subindex „1“ weggelassen wird, und d einen regelmäßigen Lastabstand. Im Fall von Zugüberfahrten mit Wagen gleicher Bauweise entspricht d der Wagenlänge, gemessen von Puffer zu Puffer. Die mit (2.34) berechneten kritischen Geschwindigkeiten werden im Folgenden für MLM Berechnungen herangezogen, weshalb in (2.34) der Subindex „MLM“ verwendet wird.

2.3.2 Änderung der kritischen Geschwindigkeiten bei DIM Berechnungen

Bei der Anwendung des DIM zur dynamischen Berechnung von Zugüberfahrten treten durchwegs niedrigere kritische Geschwindigkeiten auf, als sie mit (2.34) erhalten werden. Diese Reduktion der kritischen Geschwindigkeiten, die in Abb. 2.4 dargestellt ist, ist darauf zurückzuführen, dass es beim Mehrkörpersystem des DIM zur Kopplung der Radsatzmassen an den Brückenbalken kommt. Diese Kopplung führt dazu, dass Biegeeigenfrequenzen des Brückenbalkens temporär reduziert werden. Dieser Effekt kann näherungsweise durch einen Berechnungsansatz von Stollwitzer [17] berücksichtigt werden: Stollwitzer [17] gibt mehrere Berechnungsansätze für das MLM an und vergleicht die erhaltenen Ergebnisse mit Ergebnissen aus DIM Berechnungen. „Berechnungsansatz 3“ liefert dabei Ergebnisse, die „eine durchaus zufriedenstellende Annäherung an das DIM“ [17] darstellen. „Berechnungsansatz 3“ basiert darauf, dass eine über das Brückentragwerk verschmierte Zusatzmasse Δm aufgebracht wird und die Achslasten P_k aliquot reduziert werden. Die Größe der Zusatzmasse ist von den Radsatzmassen abhängig und beträgt bei einer Wagenzahl gleichartiger Wagen N_c , der Radsatzanzahl pro Wagen N_w , der Radsatzmasse m_w und der Zuglänge l_{tr}

$$\Delta m = \frac{N_c N_w m_w}{l_{tr}} \quad (2.35)$$

Unter Verwendung von (2.12) und (2.16) kann die errechnete Zusatzmasse Δm in einen zusätzlichen Beitrag zur ersten Biegeeigenfrequenz Δf umgerechnet werden. Dieser wird zur ersten Biegeeigenfrequenz f addiert. Dabei wird der Subindex „1“ der ersten Biegeeigenfrequenz weggelassen. Die genaue Berechnung von $f + \Delta f$ folgt im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit. Somit erhält man eine Abschätzungsformel für die kritischen Geschwindigkeiten bei DIM Berechnungen.

$$v_{cr,DIM,j} \approx \frac{(f + \Delta f)d}{j} \quad \text{mit} \quad j \in \mathbb{N} \quad (2.36)$$

Die mit (2.36) berechneten kritischen Geschwindigkeiten werden in den im Verlauf der vorliegenden Arbeit durchgeführten DIM Berechnungen herangezogen, um kritische Geschwindigkeiten zu berechnen. Daher wird in (2.36) der Subindex „DIM“ verwendet.

2.4 Eingangsgrößen für dynamische Berechnungen

2.4.1 Eingangsgrößen für MLM Berechnungen

Um dynamische Berechnungen mittels MLM durchführen zu können, sind neun Eingangsgrößen festzulegen, die im Folgenden beschrieben werden.

Brückenparameter

Brückenseitig treten unter Beachtung von (2.8), (2.19), (2.12), (2.16) und Abb 2.1 folgende vier Parameter auf, die in eine dynamische Berechnung von Einfeldträgerbrücken mit MLM eingehen:

1. Stützweite l : In die Berechnung geht die Stützweite und nicht etwa die Brückenlänge ein. Die Stützweite ist der Abstand zwischen den Auflagern jenes Einfeldträgers, der als mechanisches Modell das jeweilige Brückentragwerk repräsentiert.
2. Massenbelegung m : Die Brückenmasse wird durch die Brückenlänge dividiert. Somit wird ein Wert für die Massenbelegung erhalten.
3. Erste Biegeeigenfrequenz f : Die Erste Biegeeigenfrequenz kann unter Verwendung von (2.12) und (2.16) aus der Biegesteifigkeit berechnet werden.
4. Dämpfung (Lehrsches Dämpfungsmaß) z : Im Folgenden wird ausschließlich mit Dämpfungen (Lehrschen Dämpfungsmaßen) gemäß Eurocode [9] anstatt etwa mit gemessenen Werten gearbeitet. Die Berechnungsergebnisse sind somit nach dem Stand der europäischen Normung ermittelt.

Zugparameter

Zugseitig gehen bei MLM Berechnungen unter Beachtung von (2.25), (2.26) folgende Parameter in die Berechnung ein:

1. Achslasten P_k : Die Achslasten sind durch die jeweilige Zugkonfiguration und die Bauform der Wagen bestimmt.
2. Achsabstände l_{AA} : Die Achsabstände legen die Längen l_{1k} (siehe Abbildung. 2.2) fest. Sie sind durch die jeweilige Zugkonfiguration und die Bauform der Wagen bestimmt.

Weitere Eingangsgrößen

1. Überfahrtgeschwindigkeit v : Die Überfahrtgeschwindigkeit hat, wie aus [2, 14, 17] ersichtlich ist, einen wesentlichen Einfluss auf die Tragwerksantwort.
2. Anzahl der Wagen N_c : Die Anzahl der Wagen ist durch die Zugkonfiguration bestimmt. Der Subindex „c“ steht dabei für „car“.
3. Anzahl der Eigenformen N_m : Theoretisch wäre eine Berücksichtigung von beliebig vielen Eigenformen möglich. Allerdings beschränken bereits durchgeführte Publikationen [5] und Arbeiten [2, 17] die Anzahl der Eigenformen, die in die Berechnung eingehen auf einstellige Werte. Doménech et al. [5] beschränken die Anzahl der Eigenformen z.B. auf $N_m = 3$. Der Subindex „m“ steht dabei für „modes“.

2.4.2 Eingangsgrößen für DIM Berechnungen

Um dynamische Berechnungen mittels DIM durchführen zu können, gilt es 19 Eingangsgrößen festzulegen, die im Folgenden beschrieben werden.

Brückenparameter

Da sowohl bei MLM als auch DIM das gleiche mechanische Modell für den Brückenbalken verwendet wird (siehe Unterkapitel 2.1.2), gehen beim DIM die gleichen Brückenparameter in die Berechnung ein, wie beim MLM. Dementsprechend können die Brückenparameter und deren Beschreibung aus Unterkapitel 2.4.1 für das DIM übernommen werden.

1. Stützweite l
2. Massenbelegung m
3. Erste Biegeeigenfrequenz f
4. Dämpfung (Lehrsches Dämpfungsmaß) z

Zugparameter

In Abb 2.3 sind die auftretenden Zugparameter des DIM dargestellt. Um dem Leser eine bessere Übersicht zu bieten folgt eine kurze Auflistung der Zugparameter. Die Nomenklatur wird dabei von Bettinelli [2] übernommen.

1. Fahrzeug- beziehungsweise Wagenlänge gemessen von Puffer zu Puffer d
2. Schwerpunktabstand der Drehgestelle r
3. Schwerpunktabstand der Radsätze des Drehgestells b
4. Radsatzmasse m_w
5. Masse des Drehgestells m_b
6. Masse des Wagenkastens m_c
7. Massenträgheitsmoment des Drehgestells I_b
8. Massenträgheitsmoment des Wagenkastens I_c
9. Federsteifigkeit der Primärstufe k_p
10. Federsteifigkeit der Sekundärstufe k_s
11. Dämpfung der Primärstufe c_p
12. Dämpfung der Sekundärstufe c_s

Weitere Eingangsgrößen

Es gelten die Beschreibungen aus Unterkapitel 2.4.1.

1. Überfahrtgeschwindigkeit v
2. Anzahl der Wagen N_c
3. Anzahl der Eigenformen N_m

2.5 MLM versus DIM - Eine Gegenüberstellung

2.5.1 Zusammenfassung MLM

Bei einer MLM Berechnung muss das Differentialgleichungssystem (2.18) gelöst werden

$$\underline{\mathbf{M}} \cdot \ddot{\vec{q}}(t) + \underline{\mathbf{C}} \cdot \dot{\vec{q}}(t) + \underline{\mathbf{K}} \cdot \vec{q}(t) = \vec{p}(x, t)$$

Dabei hat der Belastungsvektor $\vec{p}(x, t)$ gemäß (2.25) die Gestalt

$$\vec{p}(x, t) = \begin{pmatrix} p_1(x, t) \\ p_2(x, t) \\ \dots \\ p_n(x, t) \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^m \begin{pmatrix} P_k \cdot \Gamma(x_k) \cdot \phi_1(x_k) \\ P_k \cdot \Gamma(x_k) \cdot \phi_2(x_k) \\ \dots \\ P_k \cdot \Gamma(x_k) \cdot \phi_n(x_k) \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^m \begin{pmatrix} P_k \cdot \Gamma(x_k) \cdot \sin(\Omega_1 t + \theta_1) \\ P_k \cdot \Gamma(x_k) \cdot \sin(\Omega_2 t + \theta_2) \\ \dots \\ P_k \cdot \Gamma(x_k) \cdot \sin(\Omega_n t + \theta_n) \end{pmatrix}$$

Die kritischen Geschwindigkeiten bei einer MLM Berechnung ergeben sich entsprechend (2.34) zu

$$v_{cr,MLM,j} = \frac{fd}{j} \quad \text{mit} \quad j \in \mathbb{N}$$

Die FBI wird bei MLM Berechnungen nicht erfasst, da der Zug im Berechnungsmodell selbst nicht vorkommt, sondern durch sich entlang des Tragwerks bewegende Einzellasten ersetzt wird. Entsprechend Unterkapitel 2.4.1 gehen neun Eingangsgrößen in eine MLM Berechnung ein.

Vorgriff: Im weiteren Verlauf der Arbeit werden sämtliche Zugparameter und die Anzahl der Wagen N_c festgelegt, indem dynamische Berechnungen für jeweils festgelegte Zugkonfigurationen durchgeführt werden. Außerdem wird die Anzahl der zu berücksichtigenden Eigenformen mit $N_m = 3$ gewählt. Somit verbleiben ausschließlich die vier Brückenparameter und die Geschwindigkeit v als zu variierende Größen. Es findet also eine Variation von fünf Eingangsgrößen statt. Diese Vorgangsweise wird gleichermaßen auf alle folgenden MLM sowie DIM Berechnungen angewendet.

2.5.2 Zusammenfassung DIM

Bei einer DIM Berechnung muss das Differentialgleichungssystem bestehend aus (2.18) und (2.27) gelöst werden

$$\underline{\mathbf{M}} \cdot \ddot{\vec{q}}(t) + \underline{\mathbf{C}} \cdot \dot{\vec{q}}(t) + \underline{\mathbf{K}} \cdot \vec{q}(t) = \vec{p}(x, t)$$

$$\underline{\mathbf{M}}_Z \cdot \ddot{\vec{u}}(t) + \underline{\mathbf{C}}_Z \cdot \dot{\vec{u}}(t) + \underline{\mathbf{K}}_Z \cdot \vec{u}(t) = -\vec{F}_w(x, t) - \vec{F}_w(x, t)$$

Dabei hat der Belastungsvektor $\vec{p}(x, t)$ gemäß (2.32) die Gestalt

$$\vec{p}(x, t) = \sum_{k=1}^4 \left\{ F_{st,k} - F_{kp,k} - F_{cp,k} - m_{w,k} \cdot \sum_{j=1}^n \left[\ddot{q}(t) \phi_j(x) + 2v \dot{q}(t) \phi_{j,x}(x) + v^2 q(t) \phi_{j,xx}(x) \right] \right\} \Gamma_k(x_k) \vec{\phi}(x_k)$$

Die kritischen Geschwindigkeiten bei einer DIM Berechnung ergeben sich entsprechend (2.36) zu

$$v_{cr,DIM,j} \approx \frac{(f + \Delta f)d}{j} \quad \text{mit} \quad j \in \mathbb{N}$$

Die FBI wird bei DIM Berechnungen erfasst, da der Zug im Berechnungsmodell auftritt. Entsprechend Unterkapitel 2.4.2 gehen 19 Eingangsgrößen in eine DIM Berechnung ein.

Vorgriff: Bei allen folgenden DIM Berechnungen wird die im letzten Absatz von Unterkapitel 2.5.1 beschriebene Vorgangsweise gewählt.

2.6 Numerische Lösung der Differentialgleichungen bei MLM und DIM

Die numerische Lösung der bei MLM und DIM auftretenden Differentialgleichungssysteme (siehe Unterkapitel 2.5) erfolgt mit MATLAB-Berechnungsprogrammen von Mähr [14]. In [14] ist eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise der Berechnungsprogramme für das MLM sowie für das DIM zu finden. Die Programme simulieren Zugüberfahrten von festgelegten Zugkonfigurationen über Einfeldträgerbrücken und erlauben die Festlegung aller Eingangsgrößen, die in Unterkapitel 2.4 angeführt werden. Außerdem erlaubt das von Mähr [14] entwickelte DIM Berechnungsprogramm die Berücksichtigung eines Modells für den Schotteroberbau sowie die Berücksichtigung einer Normalkraft nach Theorie II. Ordnung. Von beiden Möglichkeiten wird in der vorliegenden Arbeit kein Gebrauch gemacht. Die einzelnen Differentialgleichungen werden in den Berechnungsprogrammen iterativ für eine vom Solver gewählte Anzahl an Zeitschritten mithilfe des Solvers ODE15s (ODE - ordinary differential equations, s - stiff) gelöst. Stollwitzer [17] gibt eine genauere Beschreibung alternativer Solver und des verwendeten Solvers an, weshalb in der vorliegenden Arbeit nicht näher auf diese Problematik eingegangen wird.

Die von Mähr [14] entwickelten Programme, die dem Autor dieser Arbeit vom Forschungsbereich Stahlbau des Instituts für Tragkonstruktionen der Technischen Universität Wien zur Verfügung gestellt wurden, werden im Folgenden nur insofern adaptiert, dass sie mithilfe einer for-Schleife nicht nur eine, sondern endliche viele Überfahrtssimulationen einer festen Zugkonfiguration über endlich viele Brücken durchführen.

Kapitel 3

Methode zur Parameterfelderzeugung

Um die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit, auf die in Unterkapitel 1.3 bereits näher eingegangen wurde, zu erfüllen, bedarf es multipler dynamischer Berechnungen. Diese werden herangezogen um einen Zusammenhang zwischen Zug- und Brückenparametern einerseits und der Änderung der Tragwerksantwort zwischen MLM und DIM andererseits, zu bestimmen. In den Unterkapiteln 2.4.1 und 2.4.2 wurden sämtliche Eingangsgrößen für MLM sowie DIM Berechnungen aufgelistet. Die in die dynamischen Berechnungen eingehenden Eingangsgrößen lassen sich in drei Subkategorien zusammenfassen: Brückenparameter, Zugparameter und weitere Eingangsgrößen. Ergo ist eine Festlegung der Brückenparameter, der Zugparameter sowie der weiteren Eingangsgrößen für sämtliche MLM und DIM Berechnungen erforderlich. Allerdings werden, wie bereits in den Unterkapiteln 2.4.1, 2.4.2 sowie 1.3 beschrieben, die Zugparameter sowie alle weiteren Eingangsgrößen außer der Überfahrtsgeschwindigkeit v festgelegt. Die Festlegung der Zugparameter erfolgt dabei durch die Wahl konkreter Zugkonfigurationen bei allen MLM sowie DIM Berechnungen. Somit verbleiben lediglich die vier Brückenparameter (Stützweite l , Massenbelegung m , erste Biegeeigenfrequenz f sowie Dämpfung (Lehrsches Dämpfungsmaß ermittelt nach Eurocode [9]) und die Überfahrtsgeschwindigkeit v als zu variierende Eingangsgrößen für die dynamischen Berechnungen. Im vorliegenden Kapitel wird ausschließlich auf die Variation der Brückenparameter eingegangen. Die Festlegung aller anderen Eingangsgrößen für die dynamischen Berechnungen findet im darauffolgenden Kapitel statt.

Um eine Variation der vier Brückenparameter zu ermöglichen, muss für diese eine Definitionsmenge im \mathbb{R}^4_+ definiert werden. Diese Definitionsmenge wird im Folgenden als Parameterfeld bezeichnet. Bei der Erzeugung eines derartigen Parameterfeldes ist es zur Minimierung der Berechnungszeit zielführend, darauf zu achten, ein möglichst kleines Parameterfeld zu erzeugen, das die Grundgesamtheit aller Einfeldträgerbrücken mit Stützweiten bis 40 m möglichst gut beschreibt. Dabei können aus der Natur gemessene Werte (im Falle der Dämpfung z , wird mit gemäß Eurocode [9] berechneten Werten gearbeitet) herangezogen werden, um die Grundgesamtheit aller Einfeldträgerbrücken zu beschreiben. Diese Messwerte, die dem Autor in Form eines Datensatzes des Forschungsbereiches Stahlbau des Instituts für Tragkonstruktionen der TU Wien vorliegen, werden im vorliegenden Kapitel herangezogen um ein Parameterfeld zu bestimmen. Es erfolgt also eine datengestützte Ermittlung des Parameterfeldes, wobei Methoden der Stochastik angewendet werden, um aus den vorliegenden Daten ein Parameterfeld zu generieren.

Im Folgenden wird die datengestützte Erzeugung eines Parameterfeldes veranschaulicht, wobei zunächst auf die stochastischen Grundlagen eingegangen wird, die der Erzeugung des Parameterfeldes zugrunde liegen. Es wird also die erste Kernfrage aus Unterkapitel 1.3 beantwortet. Alle in diesem Kapitel durchgeführten Berechnungen werden mit der open-source Software Octave 5.1.0 durchgeführt. Zusätzlich wird Gebrauch von dem open-source Softwarepaket „statistics“ gemacht, das in Octave installiert und eingeladen wird. Im Anschluss an die mathematische Beschreibung der einzelnen Berechnungsschritte zur Erzeugung des Parameterfeldes werden die zugehörigen Teile des Program Codes angegeben.

Der gesamte Program Code, der zur Berechnung herangezogen wird, ist in Anhang A abgedruckt. Außerdem werden die entsprechenden Teile des Codes jeweils an jenen Stellen abgedruckt, an denen sich die zugehörige verbale respektive mathematische Beschreibung jener Probleme findet, die durch den Code gelöst werden.

3.1 Stochastische Grundlagen

Im Folgenden werden sämtliche mathematischen Methoden aus dem Bereich der Stochastik angeführt, die im weiteren Verlauf dieses Kapitels und darüber hinaus verwendet werden. Dies geschieht, um die Übersichtlichkeit der vorliegenden Arbeit für den Leser zu erhöhen.

3.1.1 Verwendete Schätzer

Schätzer beziehungsweise Schätzfunktionen werden verwendet, um Schätzwerte aus vorhandenen Daten zu bestimmen. Somit können statistische Kenngrößen wie zum Beispiel Mittelwerte, Varianzen, Korrelationen usw. aus Daten geschätzt werden.

Mittelwertschätzer

Der Mittelwertschätzer M_n für den Mittelwert (respektive Erwartungswert) μ_X einer Zufallsvariable X , deren n Stichproben x_k bekannt sind, ist konsistent und erwartungstreu [4].

$$E[X] = \mu_X \approx M_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (3.1)$$

Varianzschätzer

Der Varianzschätzer S_n^2 für die Varianz σ_X^2 einer Zufallsvariable X , deren n Stichproben x_k bekannt sind, ist konsistent und erwartungstreu [4].

$$E[(X - \mu_X)^2] = \sigma_X^2 \approx S_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - M_n)^2 \quad (3.2)$$

Um die Standardabweichung $\sigma_X \approx S_n$ zu erhalten, kann die Quadratwurzel aus (3.2) gezogen werden.

Korrelationschätzer

Der Korrelationschätzer $r_{ij,n}$ für die lineare Korrelation ρ_{X_i, X_j} zweier Zufallsvariablen X_i, X_j , deren n Stichproben $x_{i,k}, x_{j,k}$ bekannt sind, ist erwartungstreu und lässt sich mithilfe des Schätzers für die Standardabweichung (also der Quadratwurzel der Varianz) folgendermaßen anschreiben,

$$\rho_{X_i, X_j} \approx r_{ij,n} = \frac{S_{ij,n}}{\sqrt{S_{i,n}^2 S_{j,n}^2}} \quad (3.3)$$

wobei

$$S_{ij,n} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - M_{X_i,n})(x_{j,k} - M_{X_j,n}) \quad (3.4)$$

Dabei bezeichnen $S_{i,n}^2, S_{j,n}^2$ die geschätzten Varianzen gemäß Gleichung (3.2). Es gilt außerdem

$$-1 \leq \rho_{X_i, X_j} \leq 1 \quad (3.5)$$

3.1.2 Verwendete Verteilungsfunktionen

Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich mit Lognormalverteilungen operiert, da diese die in weiterer Folge betrachteten Grundgesamtheiten besser beschreiben als diverse andere Wahrscheinlichkeitsverteilungen (Normalverteilung, Exponentialverteilung, Weibullverteilung sowie GEV-Verteilung). Die Lognormalverteilung einer Zufallsvariable X , die die Werte x annimmt, wird durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

$$f_X(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}s} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\ln\left(\frac{x}{m}\right)}{s} \right]^2} \quad x \in \mathbb{R}^+ \quad (3.6)$$

oder aber ihre Stammfunktion, die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion

$$F_X(x) = \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{x}{m}\right)}{s}\right) \quad x \in \mathbb{R}^+ \quad (3.7)$$

beschrieben, wobei

$$\begin{aligned} m &= \mu_X \cdot e^{-\frac{s^2}{2}} \\ s &= \sqrt{\ln\left(\frac{\sigma_X^2}{\mu_X^2} + 1\right)} \\ \Phi(z) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^z e^{-\frac{u^2}{2}} du \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.1.3 Verteilungstests

Im Folgenden werden Verteilungstest an Wahrscheinlichkeitsverteilungen vorgenommen. Verteilungstest dienen dazu, die sogenannte „Nullhypothese“ zu überprüfen. Die Nullhypothese besagt, dass die tatsächliche Wahrscheinlichkeitsverteilung $F_X(x)$ der gewählten Verteilung $F_0(x)$ entspricht.

$$\text{Nullhypothese :} \quad F_X(x) = F_0(x) \quad \text{bzw.} \quad f_X(x) = f_0(x) \quad (3.9)$$

Um die Nullhypothese zu überprüfen, kommt in der vorliegenden Arbeit ausschließlich der χ -Quadrat Test zum Einsatz. Dabei wird die Testgröße χ^2 mit einem Wert χ_a^2 verglichen, der sich aus einem gewählten Irrtumsniveau a , der Anzahl der Klassen n_c und der χ -Quadrat-Verteilung ergibt. Bei der Anwendung des χ -Quadrat Tests ist zu berücksichtigen, dass es sich um einen Negativtest handelt. Ist die Anforderung an die Testgröße nicht erfüllt, muss die Nullhypothese verworfen werden. Ist sie aber erfüllt, erhält man keine Aussage. Die Vorgangsweise lautet:

1. Aufstellen der Nullhypothese bzw. Wahl einer hypothetischen Verteilungsfunktion
2. Festlegen eines Irrtumsniveaus a

$$0 \leq a \leq 1 \quad \text{oft :} \quad a = 0.05 \quad (3.10)$$

3. Festlegen der Anzahl der Klassen n_c

4. Berechnung der Testgröße χ^2 ; Die Testgröße χ^2 ist χ -Quadrat-verteilt [4].

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^n \frac{(m_j - n \cdot p_j)^2}{n \cdot p_j} \quad (3.11)$$

Dabei bezeichnet m_j die Anzahl jener Stichproben, die sich tatsächlich in der j -ten Klasse befinden, n die Anzahl aller Stichproben und p_j die Wahrscheinlichkeit, dass eine Stichprobe in der j -ten Klasse liegt, wenn man voraussetzt, dass die Nullhypothese gilt. p_j kann dabei aus der angenommenen Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion rückgerechnet werden, da durch das Festlegen der Anzahl der Klassen alle Klassengrenzen bekannt sind. Wenn also die Klassenobergrenzen x_{j+1} und die Klassenuntergrenzen x_j bekannt sind, ergibt sich p_j zu

$$p_j = F_0(x_{j+1}) - F_0(x_j) \quad (3.12)$$

χ^2 kann als Summe der bezogenen Abstandsquadrate der Anzahl der Stichproben, die tatsächlich in der j -ten Klasse liegen, zu der Anzahl an Stichproben, die zufolge der Nullhypothese in der j -ten Klasse liegen sollten, interpretiert werden.

5. Berechnung von χ_a^2 ; χ_a^2 ist jenes χ^2 , unter dem alle möglichen χ^2 mit einer Wahrscheinlichkeit von $1 - a$ liegen. χ_a^2 ist also der $1 - a$ Fraktilewert der χ -Quadrat Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion. Dabei muss die χ -Quadrat Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion mit Freiheitsgrad $n_c - 1$ zur Berechnung herangezogen werden [4]. Zur Berechnung wird die Umkehrfunktion der χ -Quadrat Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion auf die Wahrscheinlichkeit $1 - a$ angewendet.

$$\chi_a^2 = \left(\chi_{n_c-1}^2 \right)^{-1} (1 - a) \quad (3.13)$$

6. Vergleich der Testgröße χ^2 mit χ_a^2

$$\chi^2 \begin{cases} \leq \chi_a^2 & \text{keine Aussage} \\ \geq \chi_a^2 & \text{Die Nullhypothese muss verworfen werden} \end{cases} \quad (3.14)$$

3.1.4 Nataf Modell

Das von Nataf, Liu und Der Kiureghian entwickelte Modell erlaubt es, die Verbunddichtefunktion $f_{\vec{X}}$ (gemeinsame multivariate Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion) mehrerer Zufallsvariablen im Ursprungswahrscheinlichkeitsraum durch die – z.B. aus Daten – bekannten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen $f_{X_j}(x_j)$ (bzw. die einzelnen Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen $F_{X_j}(x_j)$) der einzelnen Zufallsvariablen und die – z.B. aus Daten – bekannten linearen Korrelationskoeffizienten ρ_{X_i, X_j} der einzelnen Zufallsvariablen zueinander zu beschreiben [3]. Das Nataf Modell basiert auf der Annahme, dass mehrere Zufallsvariablen X_j im Standard-Gaußraum eine Verbunddichte in Form einer multivariaten Normalverteilung aufweisen. Als Standard-Gaußraum wird jeder Wahrscheinlichkeitsraum bezeichnet, in dem die Zufallsvariablen X_j jeweils standard-normalverteilt sind. Da im weiteren Verlauf ausschließlich numerische Berechnungen durchgeführt werden, wird darauf verzichtet, analytische Funktionsvorschriften für die Verbunddichten im Ursprungswahrscheinlichkeitsraum sowie im Standard-Gaußraum anzugeben. Diese finden sich bei Bucher [3]. Stattdessen wird die numerische Anwendung des Modells auf lognormalverteilte Zufallsvariablen beschrieben. Das schrittweise Vorgehen bei der numerischen Ermittlung der Verbunddichte im Ursprungswahrscheinlichkeitsraum – in der vorliegenden Arbeit ist das der l - m - f - z Parameterwahrscheinlichkeitsraum – lautet:

1. Es werden unkorrelierte standardnormalverteilte Zufallsvariablen U_j im Standard-Gaußraum als Gegenüber der Zufallsvariablen des Ursprungsraums X_j – im Fall der vorliegenden Arbeit sind das die 4 Brückenparameter – eingeführt. Sie werden im Zufallsvektor \vec{U} zusammengefasst und weisen jeweils den Mittelwert 0 sowie die Standardabweichung 1 auf.

$$\vec{U} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_n \end{pmatrix} \quad \vec{\mu}_{\vec{U}}(\vec{U}) = \vec{0} \quad \vec{\sigma}_{\vec{U}}(\vec{U}) = \begin{pmatrix} 1 \\ \dots \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

Bei numerischen Berechnungen werden N-viele standardnormalverteilte Zufallszahlen $u_{j,i}$ für jede Zufallsvariable erzeugt. Diese werden in einer Matrix \underline{u} , die in ihren Zeilen jeweils die i-ten Zufallszahlen der j-ten Zufallsvariable enthält, gesammelt.

$$\underline{u} = \begin{pmatrix} u_{1,1} & u_{1,2} & \dots & u_{1,m} \\ u_{2,1} & u_{2,2} & \dots & u_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{n,1} & u_{n,2} & \dots & u_{n,m} \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

2. Die bekannten linearen Korrelationskoeffizienten im Ursprungswahrscheinlichkeitsraum ρ_{X_i, X_j} aller Zufallsvariablen zueinander werden mittels Koordinatentransformation in den Standard-Gaußraum transformiert, wobei die Indizes i und j die jeweiligen Zufallsvariablen bezeichnen und nicht mit jenen aus (3.16) zu verwechseln sind. Dadurch werden die linearen Korrelationskoeffizienten ρ'_{X_i, X_j} im Standard-Gaußraum erhalten. Für beliebige Wahrscheinlichkeitsverteilungen der einzelnen Zufallsvariablen geschieht dies gemäß Bucher [3] durch numerisches Auflösen folgender Integralgleichung nach ρ'_{X_i, X_j}

$$\sigma_{X_i} \sigma_{X_j} \rho_{X_i, X_j} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - \mu_{X_i})(x_j - \mu_{X_j}) f_{X_i, X_j}(x_i, x_j, \rho'_{X_i, X_j}) dx_i dx_j \quad (3.17)$$

Dabei bezeichnet $f_{X_i, X_j}(x_i, x_j, \rho'_{X_i, X_j})$ die Verbunddichte von jeweils zwei Zufallsvariablen im Ursprungsraum. Sie wird allerdings so angeschrieben, dass die Zufallsvariablen \vec{X} (Die einzelnen Zufallsvariablen X_j werden in einem Zufallsvektor zusammengefasst) per Rosenblatt Transformation (Koordinatentransformation in den Standard-Gaußraum) ausgedrückt werden.

$$V_j = \Phi^{-1}(F_{X_j}(X_j)) \quad (3.18)$$

Die Rosenblatt Transformation erlaubt es die Zufallsvariablen \vec{X} durch ihre Pendanten im Standard-Gaußraum \vec{V} auszudrücken. \vec{V} (sämtliche V_i werden in einem Zufallsvektor zusammengefasst) bezeichnet dabei die korrelierten Zufallsvariablen im Standard-Gaußraum, deren lineare Korrelationskoeffizienten ρ'_{X_i, X_j} a priori unbekannt sind. Dabei sind die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen $F_{X_j}(x_j)$ bekannt. Sie werden für die jeweiligen Zufallsvariablen aus Daten geschätzt. Beim Anschreiben der Verbunddichte im Ursprungswahrscheinlichkeitsraum $f_{X_i, X_j}(x_i, x_j, \rho'_{X_i, X_j})$ tritt dann ρ'_{X_i, X_j} als a priori unbekannte Größe in der Funktionsvorschrift auf. Bucher [3] gibt in seinem Buch Beispiele für $f_{X_i, X_j}(x_i, x_j, \rho'_{X_i, X_j})$ an. Für den Fall zweier Lognormalverteilungen lässt sich (3.17) analytisch nach ρ'_{X_i, X_j} auflösen und man erhält [3]

$$\rho'_{X_i, X_j} = \frac{\ln(1 + \rho_{X_i, X_j} s_i s_j)}{\sqrt{\ln(1 + s_i^2) \ln(1 + s_j^2)}} \quad (3.19)$$

Hierbei bezeichnen s_i und s_j die Hilfswerte nach (3.8). Dementsprechend lassen sich alle Einträge der Korrelationsmatrix im Ursprungswahrscheinlichkeitsraum $\underline{\rho}$, deren Einträge unter Verwendung des Korrelationssschätzers aus (3.3) durch Stichproben geschätzt werden können, (der Subindex n wird vernachlässigt)

$$\underline{\rho} \approx \underline{r} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & \dots & \dots & r_{1m} \\ & r_{22} & \dots & \dots & \dots & r_{2m} \\ & & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & r_{jj} & \dots & r_{jm} \\ & & & & \dots & \dots \\ \text{symm.} & & & & & r_{mm} \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

transformieren und man erhält $\underline{\rho}'$, die lineare Korrelationsmatrix im Standard-Gaußraum

$$\underline{\rho}' \approx \underline{r}' = \begin{pmatrix} r'_{11} & r'_{12} & \dots & \dots & \dots & r'_{1m} \\ & r'_{22} & \dots & \dots & \dots & r'_{2m} \\ & & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & r'_{jj} & \dots & r'_{jm} \\ & & & & \dots & \dots \\ \text{symm.} & & & & & r'_{mm} \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

Um das Nataf Modell anwenden zu können, muss $\underline{\rho}'$ positiv definit sein [3].

- Die im ersten Schritt erzeugten standardnormalverteilten Zufallszahlen werden mit den im zweiten Schritt errechneten linearen Korrelationskoeffizienten im Standard-Gaußraum zueinander korreliert. Dazu wird zunächst eine Cholesky-Zerlegung der Korrelationsmatrix $\underline{\rho}'$ durchgeführt. Bei der Cholesky-Zerlegung wird eine Matrix in das Produkt einer oberen Dreiecksmatrix \underline{L}^T und einer unteren Dreiecksmatrix \underline{L} zerlegt, wobei die obere Dreiecksmatrix die Transponierte der unteren Dreiecksmatrix ist.

$$\underline{\rho}' = \underline{L}\underline{L}^T \quad (3.22)$$

Korrelierte Zufallsvariablen \vec{V} und unkorrelierte Zufallsvariablen \vec{U} lassen sich – nicht nur aber auch im Standard-Gaußraum – mit der Hilfe von (3.22) zueinander in Bezug setzen.

$$\vec{V} = \underline{L} \cdot \vec{U} \quad (3.23)$$

Bei der numerischen Berechnung wird anstatt des Zufallsvektors \vec{U} die Matrix der Zufallszahlen \underline{u} aus dem ersten Schritt herangezogen und als Ergebnis die Matrix \underline{v} erhalten, die korrelierte Zufallszahlen im Standard-Gaußraum enthält.

$$\underline{v} = \underline{L} \cdot \underline{u} \quad (3.24)$$

Dabei enthält \underline{v} in seinen Zeilen die einzelnen Werte der nun korrelierten, standardnormalverteilten Zufallszahlen.

$$\underline{v} = \begin{pmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & \dots & \dots & v_{1,m} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & \dots & \dots & v_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{n,1} & v_{n,2} & \dots & \dots & v_{n,m} \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

Somit sind die korrelierten, standardnormalverteilten Zufallsvariablen \vec{V} im Standard-Gaußraum bekannt. Sie sind die Pendanten der Zufallsvariablen des Ursprungsraums \vec{X} .

4. Letztendlich können unter Verwendung der inversen Rosenblatt Transformation aus (3.18) die korrelierten Zufallsvariablen im Ursprungsraum errechnet werden.

$$X_j = F_{X_j}^{-1}(\Phi(V_j)) \quad (3.26)$$

Für Lognormalverteilungen ergibt sich die Rosenblatt Transformation wegen (3.7) und (3.8) zu

$$V_j = \frac{\ln\left(\frac{X_j}{m_j}\right)}{s_j} \quad (3.27)$$

und damit die inverse Rosenblatt Transformation zu

$$X_j = m_j \cdot e^{V_j \cdot s_j} \quad (3.28)$$

Bei einer numerischen Berechnung wird die inverse Rosenblatt Transformation auf die jeweiligen Zeilen von \underline{v} angewendet und die Matrix \underline{x} erhalten.

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \dots & x_{1,m} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \dots & x_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \dots & x_{n,m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_1 \cdot e^{v_{1,1} \cdot s_1} & m_1 \cdot e^{v_{1,2} \cdot s_1} & \dots & m_1 \cdot e^{v_{1,m} \cdot s_1} \\ m_2 \cdot e^{v_{2,1} \cdot s_2} & m_2 \cdot e^{v_{2,2} \cdot s_2} & \dots & m_2 \cdot e^{v_{2,m} \cdot s_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_n \cdot e^{v_{n,1} \cdot s_n} & m_n \cdot e^{v_{n,2} \cdot s_n} & \dots & m_n \cdot e^{v_{n,m} \cdot s_n} \end{pmatrix} \quad (3.29)$$

Damit ist die Verbunddichte im Ursprungsraum gemäß (3.26) analytisch und gemäß (3.29) numerisch berechnet.

3.2 Statistische Analyse von Brückendaten

Dem Autor liegt ein Datensatz des Forschungsbereiches Stahlbau des Instituts für Tragkonstruktionen der Technischen Universität Wien vor, der 132 real existierende Eisenbahnbrücken umfasst. Bei sämtlichen 132 Tragwerken handelt es sich um Einfeldträgerbrücken mit Stützweiten kleiner als 40 m. Der Datensatz enthält sowohl Stahlbeton- als auch Stahltragwerke. Von den erwähnten Tragwerken befinden sich 97 im Schienennetz der Österreichischen Bundesbahnen. Die restlichen 25 Tragwerke befinden sich in anderen Ländern der Europäischen Union. Der Datensatz enthält für alle 132 Tragwerke Stichproben für alle Brückenparameter aus Unterkapitel 2.4.1, von denen angenommen wird, dass sie sich mit den Methoden der Stochastik beschreiben lassen:

Annahme: Die Brückenparameter l (Stützweite), m (Massenbelegung), f (erste Biegeeigenfrequenz), z (Dämpfung gemäß [9]) aus Unterkapitel 2.4.1 sind stochastische Größen.

3.2.1 Ermittlung statistischer Kenngrößen aus Brückendaten

Die Mittelwerte, Standardabweichungen, Maxima und Minima der Brückenparameter können aus den 132 Stichproben berechnet werden. Dabei werden die Mittelwerte mithilfe des Mittelwertschätzers aus (3.1) und die Standardabweichungen mithilfe des Varianzschätzers aus (3.2) berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tab. 3.1 dargestellt.

Tab. 3.1: Schätzwerte für die Mittelwerte, Standardabweichungen und Maxima sowie Minima der Brückenparameter von 132 Einfeldträgerbrücken mit Stützweiten kleiner als 40 m. Bei den Brücken handelt es sich um Eisenbahnbrücken in Stahl- oder Stahlbetonbauweise

Brückenparameter	$M_{132} \approx \mu_X$	$S_{132} \approx \sigma_X$	$\min\{X\}$	$\max\{X\}$
l	13,40 m	5,77 m	2,40 m	33,30 m
m	21,861 t/m	11,299 t/m	7,620 t/m	60,650 t/m
f	8,4 Hz	7,20 Hz	2,60 Hz	49,52 Hz
z	1,80 %	0,51 %	0,5 %	2,73 %

In einem weiteren Schritt wird die lineare Korrelationsmatrix berechnet. Dabei handelt es sich um jene Matrix, die in ihren Spalten und Zeilen die linearen Korrelationskoeffizienten der 4 Brückenparameter aus dem vorliegenden Datensatz enthält. Unter Zuhilfenahme des Korrelationsschätzers aus Gleichung (3.3) ergibt sich die lineare Korrelationsmatrix $\underline{\rho}$ unter Vernachlässigung des Subindex $n = 132$ zu

$$\underline{\rho} \approx \underline{r}_{n=132} = \begin{pmatrix} r_{ll} & r_{lm} & r_{lf} & r_{lz} \\ & r_{mm} & r_{mf} & r_{mz} \\ & & r_{ff} & r_{fz} \\ \text{symm.} & & & r_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0.23 & -0.64 & -0.82 \\ & 1 & -0.23 & -0.06 \\ & & 1 & 0.60 \\ \text{symm.} & & & 1 \end{pmatrix} \quad (3.30)$$

Aus Gleichung (3.30) sowie Abb. 3.1, die sämtliche Brückendaten aller 132 Brücken zueinander in Verhältnis setzt, kann man folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Stützweite l und die erste Biegeeigenfrequenz f , die Stützweite l und die Dämpfung z sowie die erste Biegeeigenfrequenz f und die Dämpfung z weisen eine hohe lineare Korrelation auf (Korrelationskoeffizienten $|r_{ij}| \geq 0.6$).
- Die Stützweite l und die Massenbelegung m sowie die Massenbelegung m und die erste Biegeeigenfrequenz f weisen jeweils eine mäßig große lineare Korrelation auf (Korrelationskoeffizienten $|r_{ij}| \geq 0.2$).
- Die Massenbelegung m und die Dämpfung z weisen eine sehr geringe lineare Korrelation auf (Korrelationskoeffizient $|r_{mz}| = 0.06 \ll 1$).

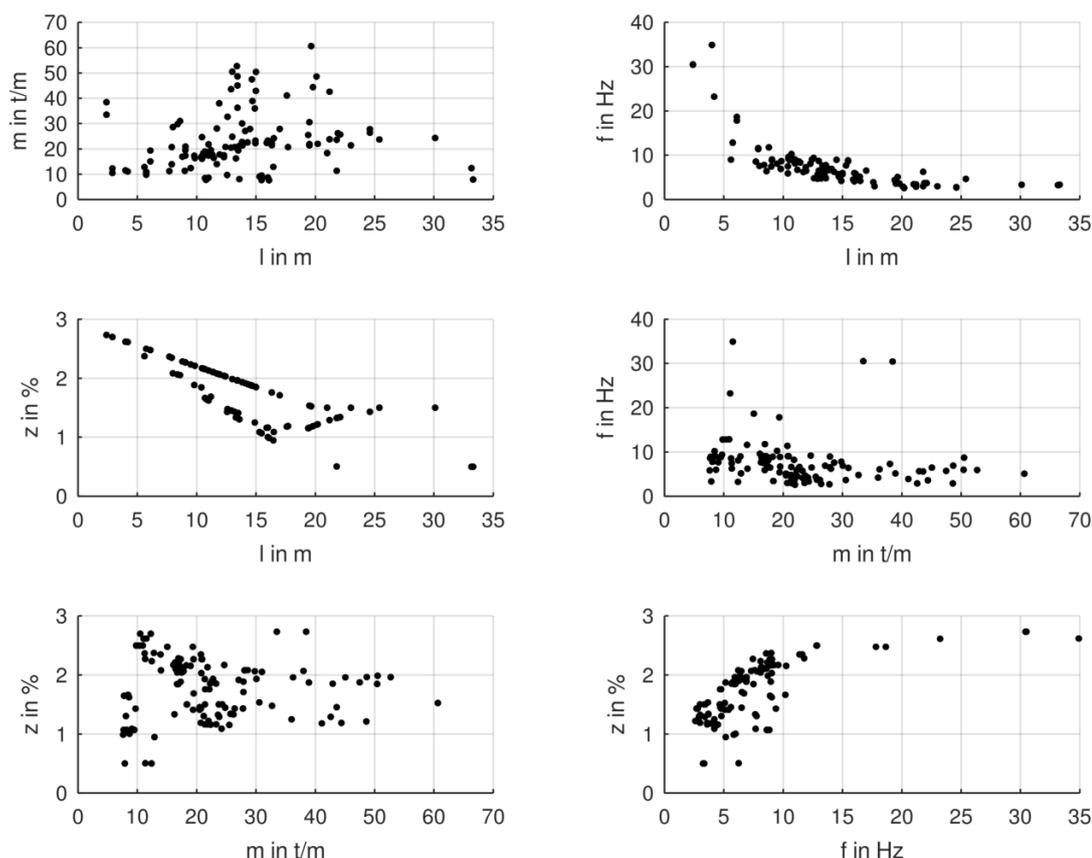


Abb. 3.1: Stützweite l , Massenbelegung m , erste Biegeeigenfrequenz f , Dämpfung z gemäß [9] aus einem Datensatz des Forschungsbereichs Stahlbau des Instituts für Tragkonstruktionen der Technischen Universität Wien. Die lineare Korrelation zwischen Stützweite l und Dämpfung z beträgt $r_{lz} = -0.82$. Die lineare Korrelation zwischen der Massenbelegung m und der Dämpfung z ergibt sich zu $r_{mz} = -0.06$.

3.2.2 Histogramme

Histogramme geben Aufschluss über die Verteilung stochastischer Größen. Für eine Stichprobenzahl von $n \rightarrow \infty$ und gegen Null gehende Klassenbreiten konvergiert das jeweilige Histogramm gegen die jeweilige Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Für eine große Anzahl von Klassen, beispielsweise $n_c = 10$ lassen sich folgende Beobachtungen anstellen: Aufgrund einer geringen absoluten Häufigkeit in den oberen Klassen von l , m und f bei gleichzeitiger Regelmäßigkeit der Abnahme der absoluten Häufigkeiten von Klasse zu Klasse, sowie das Vorhandensein einer leeren Klasse bei z legt nahe, dass das „Verhalten“ des Datensatzes auch mit einer geringeren Klassenanzahl als $n_c = 10$ beschrieben werden kann. Daher wird die Anzahl der Klassen für die einzelnen Brückenparameter solange reduziert, bis oben erwähnte Phänomene (z.B. leere Klassen) nicht mehr auftreten. Somit werden die in Abb. 3.2 dargestellten Histogramme erhalten.

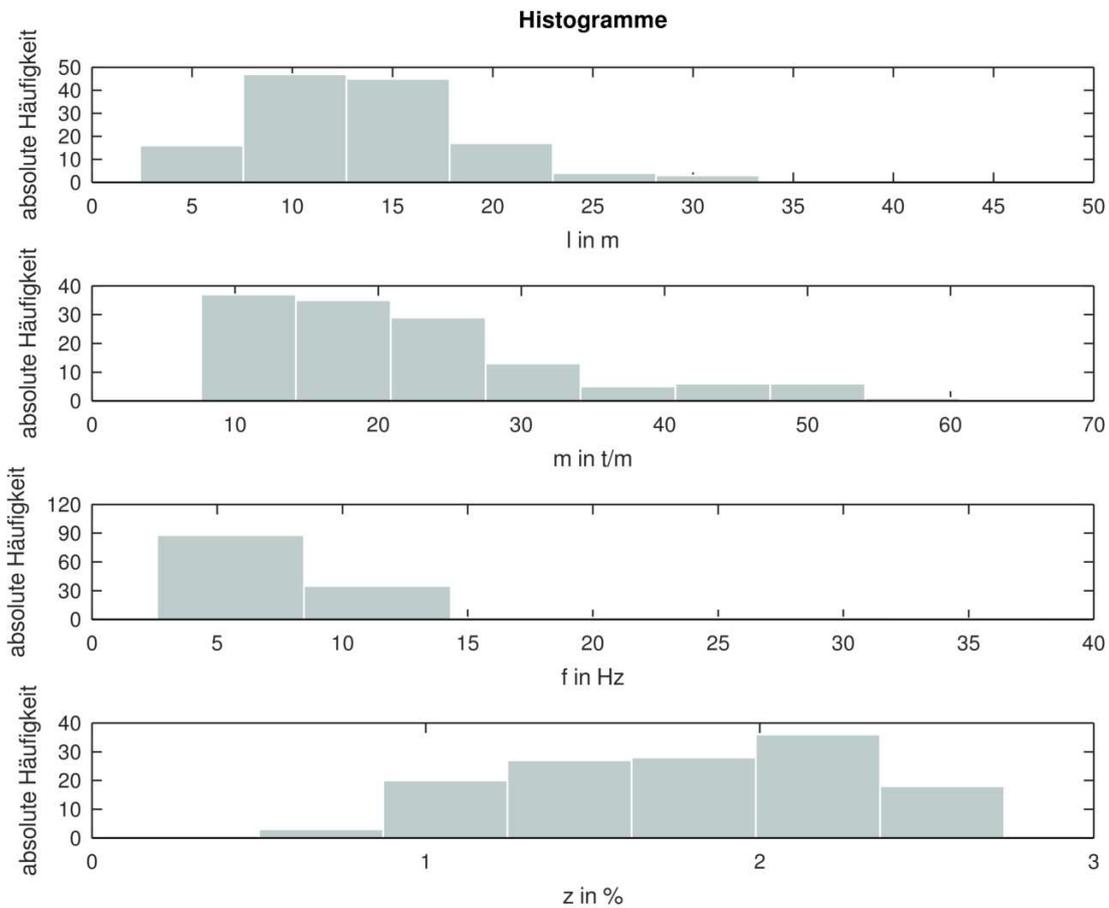


Abb. 3.2: Histogramme der 4 Brückenparameter Stützweite l (6 Klassen), Massenbelegung m (8 Klassen), erste Biegeeigenfrequenz f (6 Klassen), Dämpfung z gemäß [9] (6 Klassen); Die oberen Klassen von f weisen eine sehr geringe, aber von Null verschiedene absolute Häufigkeit auf.

3.3 Erzeugung des Parameterfeldes

Um ein Parameterfeld anhand der Brückendaten aus Unterkapitel 3.2 zu erzeugen, wird zunächst diskutiert, welche Verteilungsfunktionen die Stichproben der Brückenparameter aus Unterkapitel 3.2 zum Zwecke der Erzeugung eines Parameterfeldes ausreichend gut beschreiben.

3.3.1 Gewählte Verteilungsfunktionen

Es werden Lognormalverteilungen für alle 4 Brückenparameter aus Unterkapitel 2.4.1 gewählt. Dies ist dadurch begründet, dass Lognormalverteilungen entsprechend (3.6) ausschließlich auf \mathbb{R}^+ definiert sind und somit keine Werte für negative Brückenparameter erzeugen können. Würden beispielsweise Normalverteilungen herangezogen, würde dies z.B. die Existenz negativer Stützweiten l implizieren, was unbedingt zu vermeiden ist. Es werden die Hilfswerte m und s aus (3.8) für alle 4 Brückenparameter berechnet und dabei für die Mittelwerte und Standardabweichungen die Schätzwerte aus Tab. 3.1 eingesetzt. Damit ergeben sich die in Abb. 3.3 dargestellten Lognormalverteilungen wie folgt:

- für die Stützweite l

$$\begin{aligned}
 s_l &= 0.41276 \\
 m_l &= 12.302 \\
 f_l(l) &= \frac{1}{l\sqrt{2\pi}0.41276} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\ln\left(\frac{l}{12.302}\right)}{0.41276} \right]^2}
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

- für die Massenbelegung m

$$\begin{aligned}
 s_m &= 0.48659 \\
 m_m &= 19.420 \\
 f_m(m) &= \frac{1}{m\sqrt{2\pi}0.48659} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\ln\left(\frac{m}{19.420}\right)}{0.48659} \right]^2}
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

- für die erste Biegeeigenfrequenz f

$$\begin{aligned}
 s_f &= 0.74046 \\
 m_f &= 6.4089 \\
 f_f(f) &= \frac{1}{f\sqrt{2\pi}0.74046} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\ln\left(\frac{f}{6.4089}\right)}{0.74046} \right]^2}
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

- für die Dämpfung z

$$\begin{aligned}
 s_z &= 0.27925 \\
 m_z &= 1.7276 \\
 f_z(z) &= \frac{1}{z\sqrt{2\pi}0.27925} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\ln\left(\frac{z}{1.7276}\right)}{0.27925} \right]^2}
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

Dabei wird bei der Notation darauf verzichtet symbolisch zwischen den stochastischen Größen X und ihren Werten x zu unterscheiden, um eine bessere Lesbarkeit zu garantieren.

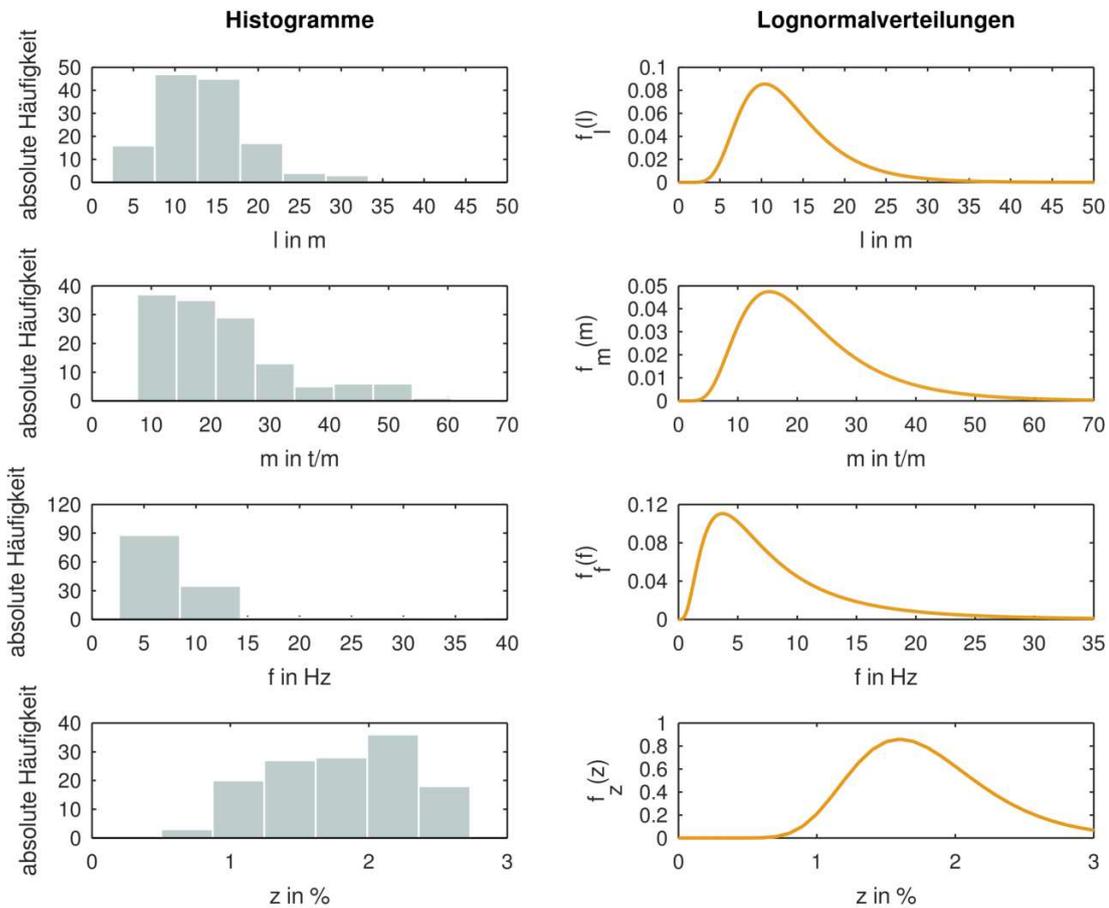


Abb. 3.3: Gewählte Lognormalverteilungen und Histogramme der 4 Brückenparameter Stützweite l (6 Klassen), Massenbelegung m (8 Klassen), erste Biegeeigenfrequenz f (6 Klassen), Dämpfung z gemäß [9] (6 Klassen)

3.3.2 Verteilungstests an gewählten Verteilungsfunktionen

Um die Qualität der gewählten Verteilungen zu überprüfen, werden χ -Quadrat Tests an den Verteilungen aller 4 Brückenparameter durchgeführt. Die Berechnungsschritte aus Unterkapitel 3.1.3 werden dabei in Octave programmiert.

- Die Nullhypothese wird formuliert, wobei als Verteilungsfunktionen die Lognormalverteilungen aus den Gleichungen (3.31),(3.32),(3.33) sowie (3.34) gewählt werden. Dieser Umstand wird in den nachfolgenden Gleichungen durch Äquivalenzzeichen verdeutlicht.

$$\begin{aligned}
 f_l(l) &= f_0(l) \equiv f_l(l) \\
 f_m(m) &= f_0(m) \equiv f_m(m) \\
 f_f(f) &= f_0(f) \equiv f_f(f) \\
 f_z(z) &= f_0(z) \equiv f_z(z)
 \end{aligned}
 \tag{3.35}$$

- Der Vertrauensbereich wird festgelegt.

$$a = 0.05 \quad (3.36)$$

- Die Anzahl der Klassen für den jeweiligen Brückenparameter wird gewählt. Dabei werden die Klassenanzahlen gemäß Abb. 3.3 und Tab. 3.2 gewählt. Die gewählten Klassenanzahlen liegen im unteren Bereich der üblicherweise verwendeten Klassenanzahlen (Faustformel: $n_c \approx \sqrt{n}$). Die Zulässigkeit dieser Vorgangsweise wird weiter unten begründet.

Tab. 3.2: Gewählte Klassenbreiten auf jenen Intervallen, in denen reale Brückendaten aus einem Datensatz von 132 Einfeldträgerbrücken liegen

Brückenparameter	Klassenanzahl	Klassenbreite	Intervall
l	6	5,55 m	[0; 33.30] m
m	8	7,581 t/m	[0; 60.650] t/m
f	6	8,25 Hz	[0; 49.52] Hz
z	6	0,46 %	[0; 2.73] %

Die Berechnung der Klassenbreiten für die Klassen, in die die Intervalle aus Tab. 3.2 eingeteilt werden, erfolgt in Octave mit dem Program Code 3.1. In den Zeilen 6 bis 9 werden die Klassenbreiten aus den Quotienten der Maxima der Brückenparameter und der Anzahl der Klassen errechnet. Dabei wird ein kleiner Offset von 0.1 beziehungsweise 0.01 addiert. Dieser verhindert im weiteren Verlauf der Berechnung auftretende Fehler, die durch Klassengrenzen, die sich zu 0 ergeben, verursacht wird. In den Zeilen 10 bis 13 werden Felder initialisiert. Ihre Werte sind jeweils die Klassengrenzen.

Program Code 3.1: Einteilung der Intervalle, in denen die Brückendaten von 132 Einfeldträgerbrücken liegen, in Klassen.

```

1      ##Xi-Quadrat Test
2      %Anmerkung: der letzte Ausgabewert von histc ist die Anzahl der
           Elemente von l,
3      %die exakt der letzten Grenze von l_b entsprechen (also in der
           Regel 0)
4      %
5      %Klassenbegrenzungen für Histogramme fuer Xi-quadrat-Test
6      breite_l=((l_max)/n_kl_l)+0.1;
7      breite_m=((m_max)/n_kl_m)+0.1;
8      breite_f=((f_max)/n_kl_f)+0.1;
9      breite_z=((z_max)/n_kl_z)+0.01;
10     l_b=[];
11     m_b=[];
12     f_b=[];
13     z_b=[];
14     for j=0:n_kl_l
15         l_b=[l_b, j*breite_l];
16     endfor
17     for j=0:n_kl_m
18         m_b=[m_b, j*breite_m];
19     endfor
20     for j=0:n_kl_f

```

```

21     f_b=[f_b, j*breite_f];
22     endfor
23     for j=0:n_kl_z
24         z_b=[z_b, j*breite_z];
25     endfor

```

- Die Testgröße χ^2 und χ_a^2 werden berechnet. Die Berechnungen erfolgen entsprechend (3.11) und (3.13) mit dem Program Code 3.2. Die Felder l, m, f und z enthalten jeweils die Brückendaten aus 132 Stichproben. Unter Verwendung der Funktion *histc()* wird in den Zeilen 2 bis 9 die Anzahl aller Stichproben, die in der jeweiligen Klasse liegen, berechnet. In den Zeilen 18 bis 32 wird die Anzahl der Elemente, die entsprechend der angenommenen Lognormalverteilungen in den jeweiligen Klassen liegen sollten, ermittelt. Dies geschieht durch Differenzen der Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen der Lognormalverteilungen *logncdf()*. Dabei steht *cdf* für *cumulative distribution function*. In den Zeilen 36, 40, 44 und 48 werden jeweils die Werte für χ^2 berechnet. In den Zeilen 37, 41, 45 und 49 findet die Berechnung der Werte für χ_a^2 unter Verwendung der Umkehrfunktion der χ -Quadrat-Verteilung statt.

Program Code 3.2: Chi-Quadrat-Test für die gewählten Lognormalverteilungen der vier Brückenparameter.

```

1         %Elementzahl der Elemente, die tatsächlich in der jeweiligen
           Klasse liegen
2         [l_j_histc]=histc(l,l_b);
3         [m_j_histc]=histc(m,m_b);
4         [f_j_histc]=histc(f,f_b);
5         [z_j_histc]=histc(z,z_b);
6         l_j=l_j_histc(1:n_kl_l);
7         m_j=m_j_histc(1:n_kl_m);
8         f_j=f_j_histc(1:n_kl_f);
9         z_j=z_j_histc(1:n_kl_z);
10        %
11        %Elementzahl, die sich aus der Verteilung ergibt. Anm:jeweils
           korrekte
12        %Verteilungsfunktion verwenden!
13        l_Fx_j=[];
14        m_Fx_j=[];
15        f_Fx_j=[];
16        z_Fx_j=[];
17        % Anmerkung: num_l=num_m=num_f=num_z=132=Anzahl der Stichproben
18        for k=2:(n_kl_l+1)
19            l_Fx_j=[l_Fx_j; num_l*( logncdf(l_b(k),log(m_l),s_l) - logncdf(
                l_b(k-1),log(m_l),s_l) ))];
20        endfor
21
22        for k=2:(n_kl_m+1)
23            m_Fx_j=[m_Fx_j; num_m*( logncdf(m_b(k),log(m_m),s_m) - logncdf(
                m_b(k-1),log(m_m),s_m) ))];
24        endfor
25
26        for k=2:(n_kl_f+1)
27            f_Fx_j=[f_Fx_j; num_f*( logncdf(f_b(k),log(m_f),s_f) - logncdf(
                f_b(k-1),log(m_f),s_f) ))];
28        endfor

```

```

29
30     for k=2:(n_kl_z+1)
31         z_Fx_j=[z_Fx_j; num_z*( logncdf(z_b(k),log(m_z),s_z) - logncdf(
32             z_b(k-1),log(m_z),s_z) ))];
33     endfor
34
35     %Xi-Quadrat berechnen
36     Xi_l_sq_j=((l_j-l_Fx_j).^2)./l_Fx_j;
37     Xi_l_sq=sum(Xi_l_sq_j);
38     Xi_l_sq_alpha=chi2inv(1-a,n_kl_l-1);
39
40     Xi_m_sq_j=((m_j-m_Fx_j).^2)./m_Fx_j;
41     Xi_m_sq=sum(Xi_m_sq_j);
42     Xi_m_sq_alpha=chi2inv(1-a,n_kl_m-1);
43
44     Xi_f_sq_j=((f_j-f_Fx_j).^2)./f_Fx_j;
45     Xi_f_sq=sum(Xi_f_sq_j);
46     Xi_f_sq_alpha=chi2inv(1-a,n_kl_f-1);
47
48     Xi_z_sq_j=((z_j-z_Fx_j).^2)./z_Fx_j;
49     Xi_z_sq=sum(Xi_z_sq_j);
50     Xi_z_sq_alpha=chi2inv(1-a,n_kl_z-1);

```

- Letztendlich wird die Testgröße χ^2 mit χ_a^2 verglichen und man erhält das Ergebnis

$$\begin{aligned}
 \chi_l^2 &= 9.90 < \chi_{a,l}^2 = 11.07 && \text{keine Aussage} \\
 \chi_m^2 &= 11.67 < \chi_{a,m}^2 = 14.07 && \text{keine Aussage} \\
 \chi_f^2 &= 9.48 < \chi_{a,f}^2 = 11.07 && \text{keine Aussage} \\
 \chi_z^2 &= 19.42 > \chi_{a,z}^2 = 11.07 && \text{die Nullhypothese muss verworfen werden} \quad (3.37)
 \end{aligned}$$

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die gewählten Lognormalverteilungen für die Stützweite l , die Massenbelegung m und die erste Biegeeigenfrequenz f für die gewählten Klassen und Klassenbreiten zumindest nicht verworfen werden müssen. Die Klassenanzahl wurde dabei gering gewählt, um leere Klassen zu vermeiden. Die gewählte Lognormalverteilung für die Dämpfung z beschreibt entsprechend (3.37) für ein Konfidenzniveau von 0.95 die Verteilung der Dämpfung nur unzureichend. Dementsprechend ist die Annahme einer Lognormalverteilung für die Dämpfung eigentlich unzulässig. Es wird im Folgenden darauf eingegangen, warum dennoch eine Lognormalverteilung für die Dämpfung angenommen wird. Es sei angemerkt, dass für Messwerte der Dämpfung z , die an den 132 Einfeldträgerbrücken gemessen wurden, die Annahme einer Lognormalverteilung nicht verworfen werden muss. Die Messwerte – die um Verwechslungen zu vermeiden nicht in dieser Arbeit abgedruckt sind – weisen im Histogramm eine sehr gleichmäßige Verteilung auf, die an eine Lognormalverteilung erinnert. Dies lässt den Schluss zu, dass eine Berechnung der Dämpfung nach [9] reale Dämpfungen größenordnungsmäßig korrekt erfasst, aber die in [9] angegebene Berechnungsmethode die reale Verteilung der Dämpfung nicht korrekt reproduziert.

3.3.3 Rechtfertigung für die Annahme einer lognormalverteilten Dämpfung

Aus Unterkapitel 3.3.2 geht hervor, dass die Annahme einer Lognormalverteilung für die Dämpfung z unzulässig ist. Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wird dennoch mit der Lognormalverteilung aus Unterkapitel 3.3.1 operiert. Diese Vorgangsweise bedarf einer Rechtfertigung.

Rechtfertigung: Obwohl der χ -Quadrat Test für die Dämpfung z nicht erfüllt ist, wird eine Lognormalverteilung für z angenommen, da die Dämpfung z eine Häufung um ihren Mittelwert aufweist (und nicht etwa beliebige Werte in \mathbb{R}^+ annimmt). Das führt im weiteren Verlauf dazu, dass bei der Erzeugung des Parameterfeldes ausreichend viele Werte um den Mittelwert von z erzeugt werden. Es wird dabei in Kauf genommen, dass etwaige lineare Korrelationen von z mit anderen Brückenparametern nur näherungsweise abgebildet werden.

Das weiter unten erzeugte Parameterfeld darf also nur als Näherung der Grundgesamtheit aller Einfeldträgerbrücken mit Stützweiten bis 40 m betrachtet werden. Die Näherung der tatsächlichen Verteilung der Dämpfung durch eine Lognormalverteilung ist auch der Grund, warum in Unterkapitel 3.3.2 mit vergleichsmäßig wenigen Klassen gearbeitet wurde, ohne diese Vorgangsweise detailliert zu begründen: Da die Annahme einer lognormalverteilten Dämpfung ohnehin eine Näherung darstellt, wäre es sinnlos, äußerst komplizierte Verteilungsfunktionen für die anderen Brückenparameter zu wählen, die für eine größere Zahl an Klassen die Verteilungstests bestehen, als die gewählten Lognormalverteilungen. Um sicherzustellen, dass das im Folgenden erzeugte Parameterfeld tatsächlich eine Näherung der Grundgesamtheit aller real existierenden Einfeldträgerbrücken mit Stützweiten bis 40 m darstellt, werden weiter unten die statistischen Kenngrößen des erzeugten Parameterfeldes ermittelt und mit jenen aus 3.2.1 verglichen.

3.3.4 Anwendung des Nataf Modells zur Parameterfelderzeugung

Entsprechend der ersten Kernfrage aus Unterkapitel 1.3 gilt es ein Parameterfeld zu finden, das eine möglichst geringe Anzahl an Parameterpunkten enthält, aber dennoch eine ausreichende Dichte in Bereichen von großer Bedeutung aufweist. In allen bisherigen Kapiteln und Unterkapiteln wurde darauf verwiesen, dass eine Definition des Begriffes „Bereich von großer Bedeutung“ weiter unten folgen würde. Der Begriff wird nun definiert:

Bereich von großer Bedeutung: Als Bereich von großer Bedeutung wird der Nahbereich um den Mittelwertvektor der Brückenparameter im l - m - f - z Parameterwahrscheinlichkeitsraum bezeichnet.

Diese Definition ist sinnvoll, da um den Bereich des Mittelwertvektors eine Häufung der Auftretenswahrscheinlichkeit der Brückenparameter zu erwarten ist. Es wäre auch folgende Formulierung zulässig: Es ist davon auszugehen, dass ein wesentlicher Teil aller realen Einfeldträgerbrücken mit Stützweiten unter 40 m Brückenparameter aufweisen, die in der Nähe der jeweiligen Mittelwerte des jeweiligen Brückenparameters liegen. Gleichzeitig ist es aber wünschenswert, den restlichen Bereich des Parameterfeldes ebenfalls abzudecken, wobei sich die Feinheit dieser Abdeckung danach richten soll, wie stark die einzelnen Brückenparameter streuen. In diesem Fall hätte man nämlich ein Parameterfeld gefunden, das die Grundgesamtheit aller Einfeldträgerbrücken mit Stützweiten unter 40 m bestmöglich abdeckt. Anhand dieser Forderungen und Grundkenntnissen der Stochastik wird klar, dass ein optimales Parameterfeld aus Stichproben der Verbunddichte $f_{\bar{x}}$ der Brückenparameter besteht. Unter Beachtung von Unterkapitel 3.1.4, Unterkapitel 3.3.1 sowie der Annahme aus 3.2 lässt sich die erste Kernfrage aus Unterkapitel 1.3 also umformulieren zu:

Wie lässt sich die Verbunddichte $f_{\bar{x}}$ der Brückenparameter aus Unterkapitel 2.4.1 berechnen?

Dieses Problem lässt sich unter Verwendung des Nataf Modells, das in Unterkapitel 3.1.4 beschrieben ist, lösen. Die beschriebene Vorgangsweise wird nun auf die vier Brückenparameter Stützweite l , Massenbelegung m , erste Biegeeigenfrequenz f und Dämpfung z gemäß [9] angewendet.

Ausschlusskriterien und Lernfähigkeit

Der im Anschluss beschriebene Algorithmus zur Parameterfelderzeugung erzeugt Parameterfelder, die Brücken mit Stützweiten l von weniger als 5 m aufweisen. Da im weiteren Verlauf der Arbeit dynamische Berechnungen an Einfeldträgerbrücken durchgeführt werden, ist es sinnvoll Brücken mit Stützweiten $l < l_{\text{grenz}} = 5\text{m}$ aus dem Parameterfeld auszuschließen, da bei diesen eine Anwendung der schubstarrten Stabtheorie I. Ordnung in den meisten Fällen unzulässig ist. Dies ist durch die Annahmen aus Unterkapitel 2.1.1 begründet. Dies führt zu folgendem Problem: Zu Beginn der Berechnung des Parameterfeldes muss eine Zahl N angegeben werden, die festlegt, wieviele Parameterpunkte erzeugt werden sollen. Durch den Ausschluss einiger Parameterpunkte verringert sich die Zahl der letztendlich zur dynamischen Berechnung geeigneten Parameterpunkte von N auf $M < N$. Das Problem wird dadurch gelöst, dass 52 Parameterfelder generiert und dabei jedes mal sowohl N als auch M in eine Datei („num_par.txt“) abgespeichert werden. Diese Daten werden mittels Program Code 3.3 dazu verwendet, bei zukünftigen Berechnungen N so zu wählen, dass automatisch N_{soll} viele Parameterpunkte erzeugt werden. N_{soll} bezeichnet die Anzahl der Stichproben beziehungsweise Parameterpunkte mit Stützweiten über 5 m, die erzeugt werden sollen. Dazu müssen aber $N > N_{\text{soll}}$ viele Parameterpunkte erzeugt werden, um das Wegfallen einiger Parameterpunkte zu kompensieren. Die Anzahl N wird aus Daten rückgerechnet. Dazu wird in Zeile drei eine Datei eingelesen, die in der ersten Spalte N , die Anzahl der zu erzeugenden Parameterpunkte, und in der zweiten Spalte M , die Anzahl der erzeugten Parameterpunkte aus 52 Berechnungen enthält. Aus dem Mittelwert aller Quotienten von M und N , der in Zeile zehn berechnet wird, wird in Zeile 21 die Zahl N für zukünftige Berechnungen festgelegt. N ergibt sich für zukünftige Berechnungen aus dem Quotienten von N_{soll} sowie besagtem Mittelwert.

Program Code 3.3: Programmabschnitt der dazu dient die Eingangswerte des Programms zur Erzeugung eines Parameterfeldes so zu adaptieren, dass die gewünschte Anzahl an Punkten im Parameterraum erzeugt wird.

```

1      %Datensatz Stichprobenzahl: enthaelt jeweils die Zahl der
        tatsaechlich
2      %erstellten sowie der gewuenschten Stichproben.
3      dat_stichprobenzahl=importdata('num_par.txt');
4
5      %Mittelwert des Verhaeltnisses der erzeugten zu den zu erzeugenden
6      %Parameterpunkten errechnen
7      stichpr_soll=dat_stichprobenzahl(:,1); %so viele sollten erzeugt
        werden
8      stichpr_ist=dat_stichprobenzahl(:,2); %so viele wurden erzeugt
9      stichpr_verh=stichpr_ist./stichpr_soll;
10     mu_stichpr_verh=mean(stichpr_verh);
11
12     %Mittelwert des Verhaeltnisses der erzeugten zu den zu erzeugenden
13     %Parameterpunkten errechnen
14     stichpr_soll=dat_stichprobenzahl(:,1); %so viele sollten erzeugt
        werden
15     stichpr_ist=dat_stichprobenzahl(:,2); %so viele wurden erzeugt
16     stichpr_verh=stichpr_ist./stichpr_soll;
17     mu_stichpr_verh=mean(stichpr_verh);
18
19     %Anzahl der zu erzeugenden Punkte im R^4
20     N_soll=1000; %so viele Parameterpunkte sollen erzeugt werden
21     N=round(N_soll/mu_stichpr_verh); %schaetze aus vergangen Daten ab,
        wieviele

```

```

22      %Punkte man erzeugen muss um N_soll viele Punkte zu erhalten, deren
23      %Brueckenlaenge groesser als l_grenz ist.

```

Numerische Berechnung der Verbunddichte im l-m-f-z Parameterwahrscheinlichkeitsraum

1. Es werden für jeden Brückenparameter N-viele unkorrelierte, standardnormalverteilte Zufallszahlen im Standard-Gaußraum erzeugt und in eine Matrix \underline{u} entsprechend (3.16) geschrieben.

Program Code 3.4: Erzeugung unkorrelierter, standardnormalverteilter Zufallszahlen

```

1      %Erzeuge unkorrelierte, mittelwertfreie Zufallszahlen im Gau
      %ßraum
2      %(standardisiert!)
3      u=stdnormal_rnd(4,N);

```

2. Die linearen Korrelationskoeffizienten im Standard-Gaußraum $\rho'_{X_i X_j}$ werden gemäß (3.19) aus den bekannten linearen Korrelationskoeffizienten im Ursprungswahrscheinlichkeitsraum $\rho_{X_i X_j}$, die in (3.30) berechnet wurden, bestimmt. Danach werden sie in die lineare Korrelationsmatrix im Standard-Gaußraum $\underline{\rho}'$ geschrieben. Außerdem werden die Eigenwerte von $\underline{\rho}'$ berechnet und in einen Vektor $\underline{\lambda}$ geschrieben. Sie sind allesamt positiv, weshalb $\underline{\rho}'$ positiv definit ist. Diese Berechnung wird mittels Program Code 3.5 realisiert: In den Zeilen zwei bis vier wird eine Funktion zur Berechnung der Korrelationskoeffizienten im Standard-Gaußraum deklariert. Diese wird in den Zeilen sechs bis elf auf die bekannten Korrelationskoeffizienten im Parameterwahrscheinlichkeitsraum $r_{ij,1000}$ angewendet.

Program Code 3.5: Berechnung der linearen Korrelationsmatrix im Standard-Gaußraum aus den linearen Korrelationen im Ursprungswahrscheinlichkeitsraum der Brückenparameter.

```

1      %Funktion zur Berechnung der Korrelation im Gaußraum
2      function y=rhodash(s_i,s_j,r_ij)
3      y=( log(1+r_ij*s_i*s_j) )/( sqrt( log(1+(s_i^2))*log(1+(s_j
      ^2)) ) );
4      endfunction
5      %Korrelationen im Gaußraum ermitteln
6      rho_lm=rhodash(s_l,s_m,r_lm);
7      rho_lf=rhodash(s_l,s_f,r_lf);
8      rho_lz=rhodash(s_l,s_z,r_lz);
9      rho_mf=rhodash(s_m,s_f,r_mf);
10     rho_mz=rhodash(s_m,s_z,r_mz);
11     rho_fz=rhodash(s_f,s_z,r_fz);
12
13     %Korrelationsmatrix im Gaußraum
14     R=[1, rho_lm, rho_lf, rho_lz;
15     rho_lm, 1, rho_mf, rho_mz;
16     rho_lf, rho_mf, 1, rho_fz;
17     rho_lz, rho_mz, rho_fz, 1];
18     lamda_R=eig(R);

```

3. Die lineare Korrelationsmatrix im Standard-Gaußraum $\underline{\rho}'$ wird per Cholesky-Zerlegung gemäß (3.22) in das Produkt einer oberen Dreiecksmatrix \underline{L}^T und einer unteren Dreiecksmatrix \underline{L} zerlegt. Danach werden die korrelierten Zufallszahlen im Standard-Gaußraum \underline{v} mit dem in (3.24) gegebenen Zusammenhang berechnet. In Program Code 3.6 wird diese Vorgangsweise wie folgt umgesetzt: Mit der Funktion `chol()` wird eine Cholesky-Zerlegung durchgeführt. Allerdings gibt die Funktion `chol()` eine obere Dreiecksmatrix aus. Daher wird diese in Zeile fünf transponiert, um eine untere Dreiecksmatrix zu erhalten.

Program Code 3.6: Cholesky-Zerlegung der Korrelationsmatrix sowie Korrelieren der zuvor unkorrelierten Zufallszahlen im Standard-Gaußraum

```

1      %Cholesky Zerlegung der Korrelationsmatrix
2      L=chol(R);
3      %Korreliere die Variablen im Gaußraum mit der inversen
        Cholesky Matrix L'
4      %(standardisiert aber korreliert!)
5      v=(L')*u;

```

4. Mit der inversen Rosenblatt Transformation aus (3.28) wird die Verbunddichte im Ursprungswahrscheinlichkeitsraum (also dem Parameterwahrscheinlichkeitsraum), wie in (3.29) abgedruckt, berechnet. Diese Transformation wird in Program Code 3.7 in den Zeilen sieben bis zehn realisiert.

Program Code 3.7: Transformation in den l-m-f-z Parameterwahrscheinlichkeitsraum

```

1      %Transformiere nun korrelierte Variablen vom Gaußraum in den
        l,m,f,z-Raum
2      %(mache Standardisierung 'rückgängig')
3      v_l=v(1,:);
4      v_m=v(2,:);
5      v_f=v(3,:);
6      v_z=v(4,:);
7      x_l=m_l*exp(v_l*s_l);
8      x_m=m_m*exp(v_m*s_m);
9      x_f=m_f*exp(v_f*s_f);
10     x_z=m_z*exp(v_z*s_z);

```

Somit werden, nachdem wie oben erwähnt Parameterpunkte mit $l < 5m$ ausgeschlossen wurden, $N_{soll} = 1000$ Stichproben der Verbunddichte $f_{\underline{X}}$ numerisch berechnet.

Qualität der Näherung

Wie in Unterkapitel 3.3.3 beschrieben, handelt es sich bei den 1000 numerisch berechneten Stichproben der Verbunddichte nur um eine Näherung der tatsächlichen Verbunddichte der

Brückenparameter. Die Qualität dieser Näherung soll nun überprüft werden, indem die Korrelationsmatrix des berechneten Parameterfeldes berechnet wird. Sie ergibt sich zu

$$\underline{\rho} \approx \underline{r}_{N=1000} = \begin{pmatrix} r_{ll} & r_{lm} & r_{lf} & r_{lz} \\ & r_{mm} & r_{mf} & r_{mz} \\ & & r_{ff} & r_{fz} \\ \text{symm.} & & & r_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0.21 & -0.61 & -0.83 \\ & 1 & -0.22 & -0.02 \\ & & 1 & 0.51 \\ \text{symm.} & & & 1 \end{pmatrix} \quad (3.38)$$

Es wird eine Fehlerschranke für den Absolutbetrag des absoluten Fehlers der Korrelationskoeffizienten festgelegt:

$$\epsilon = 0.1 \quad (3.39)$$

Berechnet man die absoluten Fehler aus (3.38) und (3.30)

$$\mathfrak{f}_{ij,abs} = r_{ij,N=1000} - r_{ij,n=132} \quad (3.40)$$

und schreibt sie in eine Matrix, erhält man

$$\underline{\mathfrak{f}}_{abs} = \begin{pmatrix} \mathfrak{f}_{ll} & \mathfrak{f}_{lm} & \mathfrak{f}_{lf} & \mathfrak{f}_{lz} \\ & \mathfrak{f}_{mm} & \mathfrak{f}_{mf} & \mathfrak{f}_{mz} \\ & & \mathfrak{f}_{ff} & \mathfrak{f}_{fz} \\ \text{symm.} & & & \mathfrak{f}_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -0.02 & 0.03 & -0.01 \\ & 0 & 0.01 & 0.04 \\ & & 0 & -0.09 \\ \text{symm.} & & & 0 \end{pmatrix} \quad (3.41)$$

Berechnet man die relativen Fehler aus (3.38) und (3.30)

$$\mathfrak{f}_{ij,rel} = \left| \frac{r_{ij,N=1000} - r_{ij,n=132}}{r_{ij,n=132}} \right| \quad (3.42)$$

und schreibt sie in eine Matrix, erhält man

$$\underline{\mathfrak{f}}_{rel} = \begin{pmatrix} \mathfrak{f}_{ll} & \mathfrak{f}_{lm} & \mathfrak{f}_{lf} & \mathfrak{f}_{lz} \\ & \mathfrak{f}_{mm} & \mathfrak{f}_{mf} & \mathfrak{f}_{mz} \\ & & \mathfrak{f}_{ff} & \mathfrak{f}_{fz} \\ \text{symm.} & & & \mathfrak{f}_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0.08 & 0.04 & 0.01 \\ & 0 & 0.04 & 0.67 \\ & & 0 & 0.15 \\ \text{symm.} & & & 0 \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

Aus (3.41) kann man erkennen, dass die Absolutbeträge der absoluten Fehler bis auf die Fälle r_{mz} und r_{fz} eine Dimension kleiner sind, als die Korrelationen aus (3.30).

$$|\mathfrak{f}_{ij,abs}| \ll r_{ij,n=132} \quad \text{für } ij \neq mz, fz \quad (3.44)$$

Aus (3.43) geht hervor, dass der relative Fehler bei r_{mz} 67% und jener bei r_{fz} 15% beträgt. Dies könnte durch die Annahme aus Unterkapitel 3.3.3 begründet sein, da beide Korrelationen die Dämpfung z beinhalten. Schlussendlich lässt sich aber unter Berücksichtigung von (3.41) festhalten, dass die Absolutbeträge der absoluten Fehler unterhalb der gewählten Fehlerschranke bleiben, weshalb die Qualität der Näherung für ausreichend befunden wird.

$$|\mathfrak{f}_{ij,abs}| \leq \epsilon = 0.1 \quad (3.45)$$

Eine nicht näher angeführte Berechnung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Werte der Brückenparameter des Parameterfeldes ergibt, dass diese nicht oder nur geringfügig von jenen des Datensatzes bestehend aus 132 Brückentragwerken abweichen.

Visualisierung und Plausibilitätskontrolle

Im Rahmen der Visualisierung erfolgt auch eine visuelle Plausibilitätskontrolle des erzeugten Parameterfeldes. Bei Betrachtung von Abb. 3.4, Abb. 3.5, Abb. 3.6, Abb. 3.7 und Abb. 3.8 stellt man fest, dass das erzeugte Parameterfeld (also die 1000 Stichproben aus der numerisch näherungsweise berechneten Verbunddichte) grundsätzlich dieselben Formen aufweist und dieselben Bereiche des Parameterraumes abdeckt, wie der Datensatz von 132 Einfeldträgerbrücken. Bei genauerer Untersuchung von Abb. 3.4 und Abb. 3.5 fällt auf, dass das Parameterfeld eine höhere Dichte im Bereich hoher erster Biegeeigenfrequenzen hat, als die Brückendaten. Dasselbe gilt für Abb. 3.4, Abb. 3.6 und niedrige Dämpfungen sowie Abb. 3.4, Abb. 3.8 und hohe Stützweiten. Das erzeugte Parameterfeld besteht eine visuelle Plausibilitätskontrolle allerdings, da es offensichtlich das Verhalten der Brückendaten in guter Näherung nachbildet.

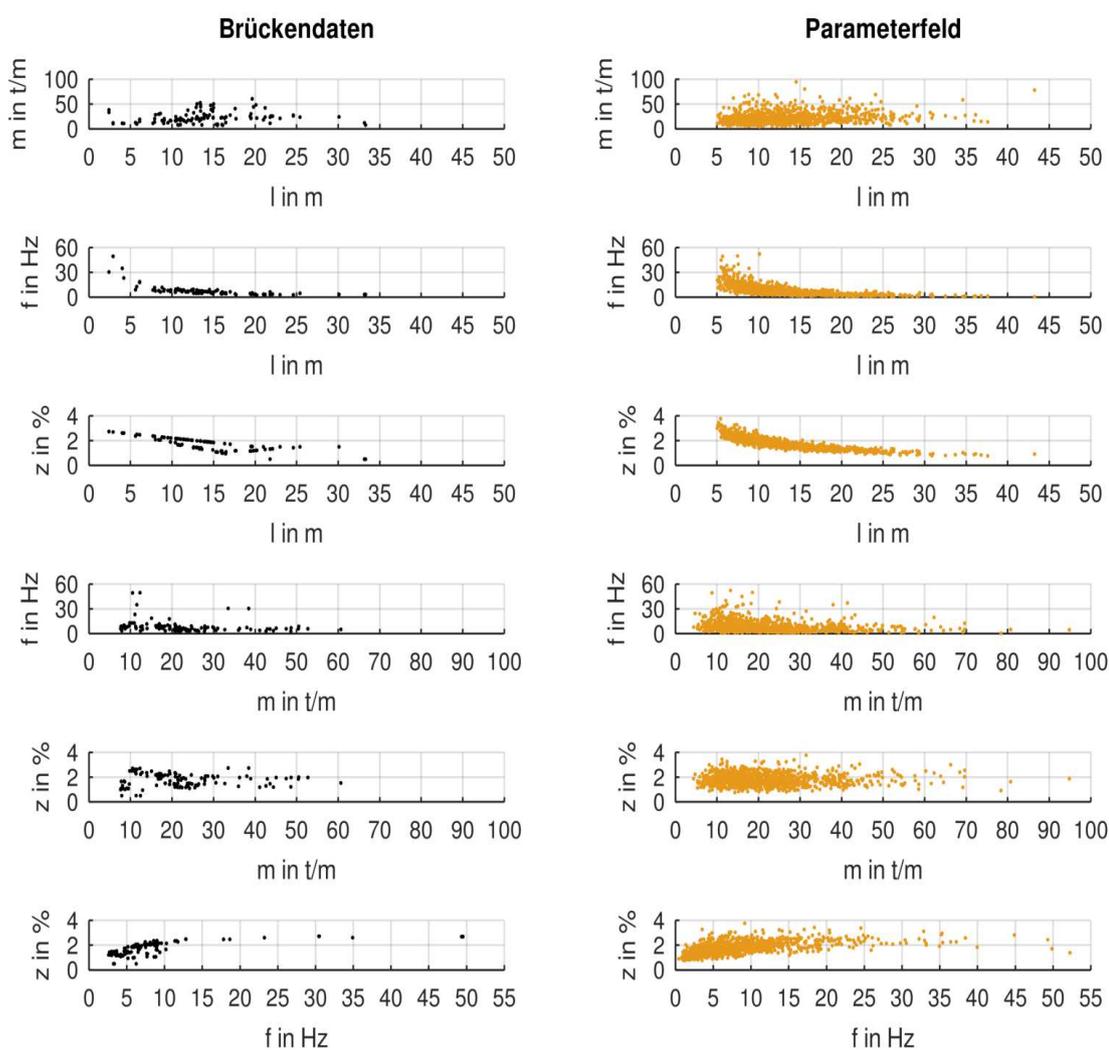


Abb. 3.4: Gegenüberstellung des Datensatzes bestehend aus 132 Einfeldträgerbrücken (links) und des erzeugten Parameterfeldes bestehend aus $N=1000$ Parameterpunkten (rechts)

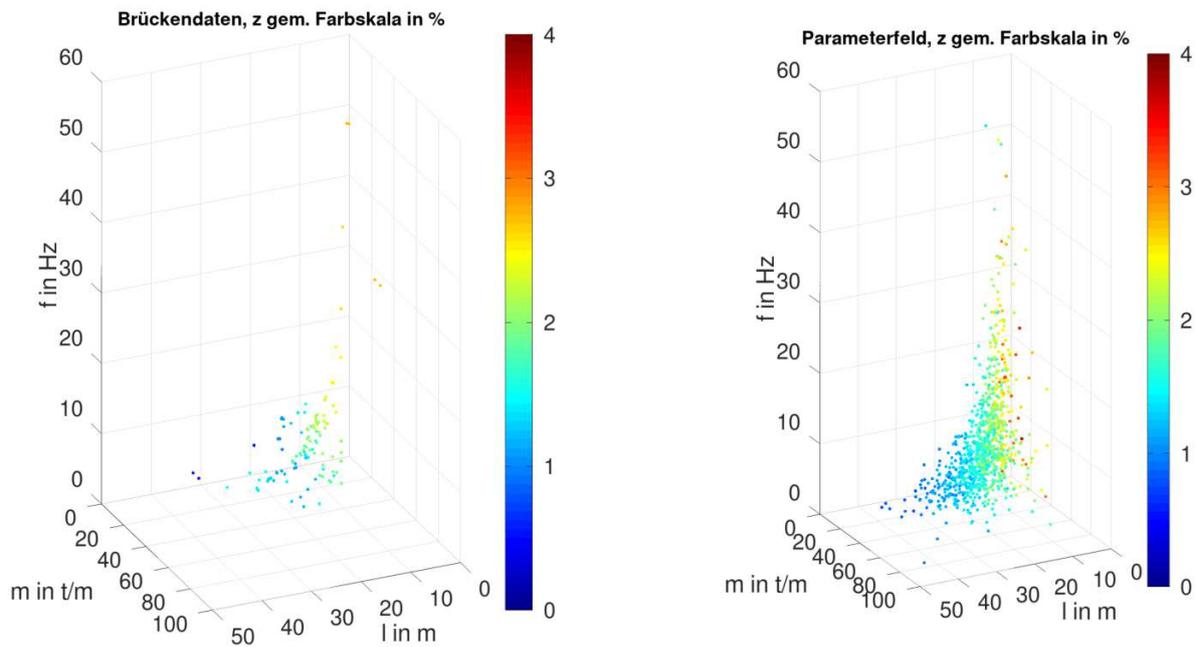


Abb. 3.5: Gegenüberstellung des Datensatzes bestehend aus 132 Einfeldträgerbrücken (links) und des erzeugten Parameterfeldes bestehend aus $N=1000$ Parameterpunkten (rechts). Dämpfung z gemäß Farbskala in %

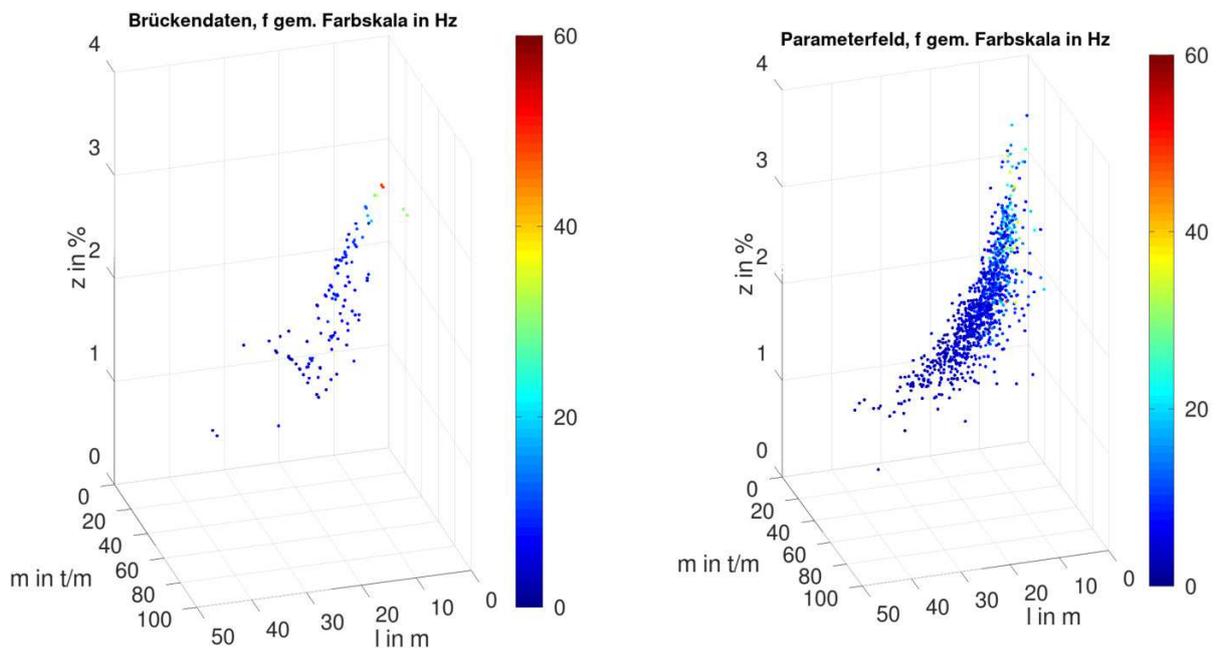


Abb. 3.6: Gegenüberstellung des Datensatzes bestehend aus 132 Einfeldträgerbrücken (links) und des erzeugten Parameterfeldes bestehend aus $N=1000$ Parameterpunkten (rechts). Erste Biegeeigenfrequenz f gemäß Farbskala in Hz

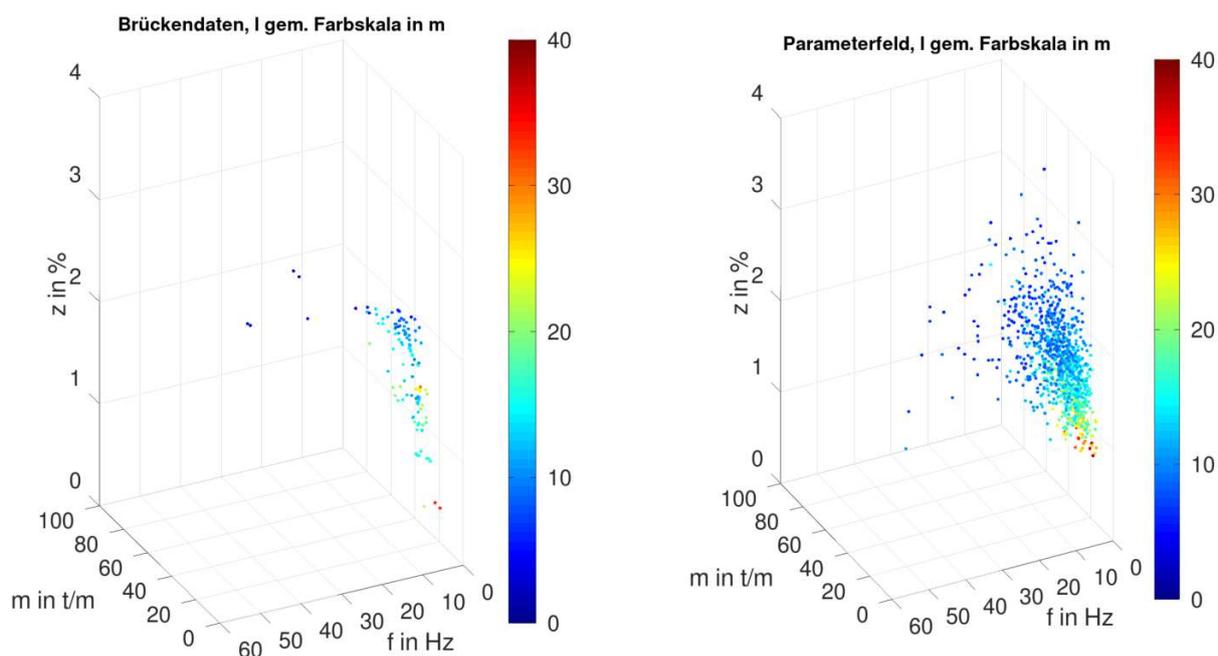


Abb. 3.7: Gegenüberstellung des Datensatzes bestehend aus 132 Einfeldträgerbrücken (links) und des erzeugten Parameterfeldes bestehend aus $N=1000$ Parameterpunkten (rechts). Stützweite l gemäß Farbskala in m

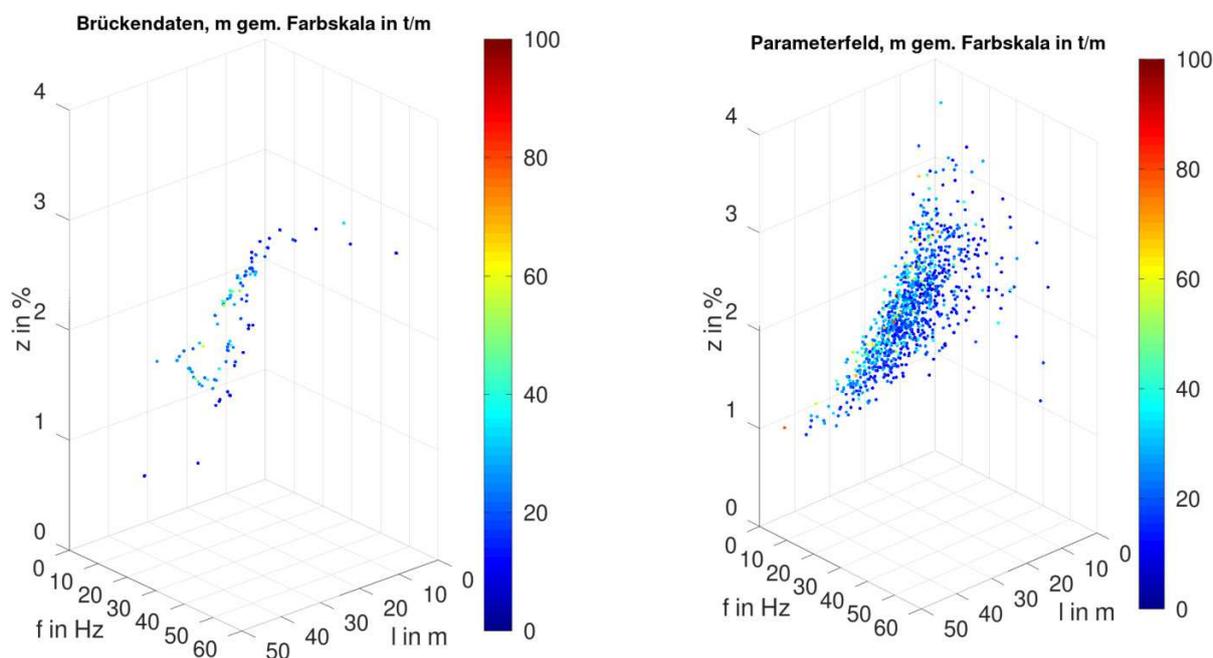


Abb. 3.8: Gegenüberstellung des Datensatzes bestehend aus 132 Einfeldträgerbrücken (links) und des erzeugten Parameterfeldes bestehend aus $N=1000$ Parameterpunkten (rechts). Massenbelegung m gemäß Farbskala in t/m

Nachverdichtung

Ein wesentlicher Vorteil der Verwendung der oben beschriebenen Methode zur Generierung eines Parameterfeldes ist, dass das Parameterfeld jederzeit nachverdichtet werden kann, indem weitere Punkte mit dem oben angeführten Program Code erzeugt werden. Da der Program Code lediglich Stichproben aus der Verbunddicke der Brückenparameter erzeugt, verändert eine nachträgliche Nachverdichtung des Parameterfeldes die statistischen Kenngrößen des Parameterfeldes nur unwesentlich (dies wurde überprüft, wird in der vorliegenden Arbeit aber nicht näher ausgeführt).

Kapitel 4

Dynamische Berechnung

Damit der in Unterkapitel 1.3 beschriebene Zusammenhang zwischen Brückenparametern einerseits und der Änderung der Tragwerksantwort zwischen MLM und DIM andererseits, bestimmt werden kann, sind multiple dynamische Berechnungen erforderlich, bei denen die in Unterkapitel 2.4.2 erwähnten Brückenparameter variiert werden. Es werden also für ein Parameterfeld von Brückenparametern MLM und DIM Berechnungen durchgeführt und deren Ergebnisse miteinander verglichen. Eine Gegenüberstellung der Berechnungsmodelle MLM und DIM kann Unterkapitel 2.5 entnommen werden.

Um MLM und DIM Berechnungen durchführen zu können, müssen bei jeder einzelnen Berechnung sämtliche Eingangsgrößen aus Unterkapitel 2.4.1 und Unterkapitel 2.4.2 festgelegt werden. Wie bereits in den im Vorsatz erwähnten Unterkapiteln vorweggenommen, werden für alle Berechnungen die Zugparameter und alle weiteren Eingangsgrößen außer der Überfahrts-*geschwindigkeit* v a priori festgelegt. Eine Variation der Zugparameter erfolgt nur insofern, dass alle dynamischen Berechnungen für zwei unterschiedliche Zugkonfigurationen des Railjet durchgeführt werden. Demgegenüber stehen die Brückenparameter, die bei den dynamischen Berechnungen variiert werden. Die Überfahrts-*geschwindigkeit* v wird dabei jeweils pro Brückentragwerk variiert. Somit wird für jeden Punkt des Parameterfeldes im Parameterraum, der ein Brückentragwerk repräsentiert, eine MLM und eine DIM Berechnung pro Zugkonfiguration über einem vorher festgelegten Geschwindigkeitsbereich durchgeführt. Der Geschwindigkeitsbereich der Überfahrts-*geschwindigkeit* v wird dabei so eingegrenzt, dass Berechnungen nur in Intervallen um ausgewählte kritische Geschwindigkeiten stattfinden. Die getroffene Festlegung der Eingangsgrößen resultiert in 2000 MLM und 2000 DIM Berechnungen pro Geschwindigkeitsschritt (Berechnung von 1000 Brückentragwerken mittels MLM und DIM pro Zugkonfiguration und Geschwindigkeitsschritt). Im folgenden Kapitel wird festgelegt, welche Werte die Eingangsgrößen, die in die dynamischen Berechnungen eingehen, annehmen. Außerdem erfolgt eine Beschreibung der verwendeten Programmstruktur und der Ausgabegrößen, die aus der Berechnung hervorgehen. Abschließend wird auf die Methodik eingegangen, die zur Ergebnisauswertung herangezogen wird.

4.1 Festlegung der Eingangsgrößen

Zunächst wird festgelegt, welche Werte die Eingangsgrößen aus Unterkapitel 2.4.1 und Unterkapitel 2.4.2 bei den dynamischen Berechnungen mittels MLM beziehungsweise DIM annehmen.

4.1.1 Festlegung der Brückenparameter

Alle MLM und DIM Berechnungen werden auf dem in Unterkapitel 3.3 erzeugten Parameterfeld durchgeführt. Das in Abb. 3.4, Abb. 3.5, Abb. 3.6, Abb. 3.7 und Abb. 3.8 dargestellte Parameterfeld umfasst 1000 Einfeldträgerbrücken mit einer Stützweite unter 40 m. Dementsprechend sind bei jeder der 1000 MLM und 1000 DIM Berechnungen pro Zugkonfigurationen die

Brückenparameter Stützweite l , Massenbelegung m , erste Biegeeigenfrequenz f und Dämpfung z festgelegt.

4.1.2 Festlegung der Zugparameter

Für alle 1000 Brückentragwerke des Parameterfeldes werden MLM und DIM Berechnungen für zwei unterschiedliche Zugkonfigurationen des Railjet durchgeführt. Die beiden Zugkonfigurationen lauten:

1. Konfiguration: Acht Reisezugwagen (Mittelwagen der zweiten Klasse) des Railjet
2. Konfiguration: Eine Lokomotive (Typ Taurus) mit sieben darauffolgenden Reisezugwagen (Mittelwagen der zweiten Klasse) des Railjet

Dabei ist die erste Zugkonfiguration, die in Abb. 4.1 dargestellt ist, eine Idealisierung der zweiten Zugkonfiguration: Die Lokomotive wird durch einen Reisezugwagen ersetzt. Diese Vorgangsweise wurde gewählt um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass für eine Vielzahl von Einfeldträgerbrücken mit Stützweiten bis 40 m Beschleunigungsspitzen der Vertikalbeschleunigung aus einer regelmäßig wiederkehrenden Anregung durch überfahrende Wagen und nicht etwa durch andere Phänomene wie z.B. Einzelimpulse resultieren. Diese Herangehensweise ist für Parameterstudien zur Untersuchung der Fahrzeug-Brücken-Interaktion (FBI) üblich und wurde beispielsweise ebenfalls von Doménech et al. [5] gewählt. Bettinelli [2] geht in ihrer Arbeit mit dem Titel „Einfluss des Triebwagens auf die dynamische Tragwerksantwort von einfeldrigen Eisenbahnbrücken bei Hochgeschwindigkeitsverkehr“ ausführlich auf den Einfluss des Triebwagens bzw. der Lok bei dynamischen Berechnungen zur Untersuchung der FBI ein.

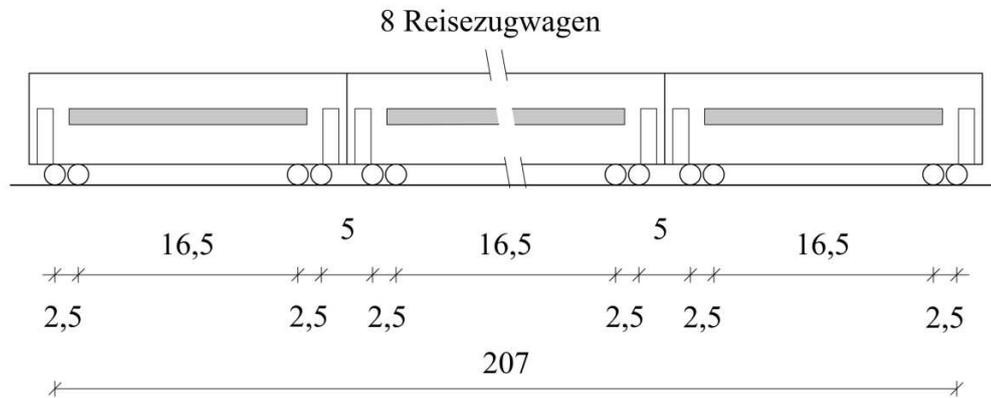


Abb. 4.1: Erste Zugkonfiguration des Railjet bestehend aus acht Reisezugwagen (Mittelwagen der zweiten Klasse); Die in der Abbildung eingetragenen Achsabstände l_{AA} in m ergeben sich aus den Zugdaten, die in Tab. 4.1 angeführt sind.

Bei der zweiten Zugkonfiguration, die in Abb. 4.2 dargestellt ist, handelt es sich um die Basiskonfiguration des Railjet. Sie wird in der vorliegenden Arbeit zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens von Brücken herangezogen, da eine Vielzahl von Zugkonfigurationen, die nach derzeitiger Normung zur dynamischen Berechnung herangezogen werden [1], aus einer Zusammensetzung der Basiskonfiguration per Doppeltraktion hervorgeht.

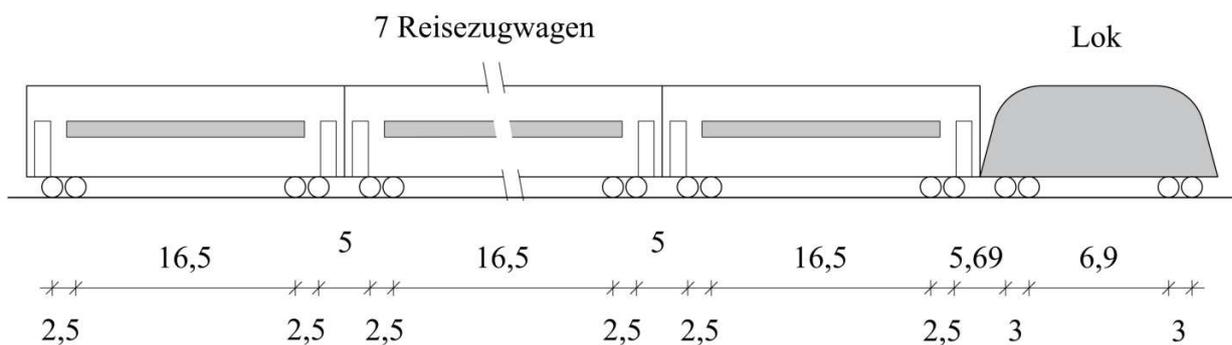


Abb. 4.2: Zweite Zugkonfiguration des Railjet bestehend aus einer Lokomotive des Typs Taurus und sieben Reisezugwagen (Mittelwagen der zweiten Klasse); Die in der Abbildung eingetragenen Achsabstände l_{AA} in m ergeben sich aus den Zugdaten, die in Tab. 4.1 angeführt sind.

Die Zugdaten der Lokomotive (Typ Taurus) sowie der Reisezugwagen (Mittelwagen der zweiten Klasse) wurden dem Autor vom Forschungsbereich Stahlbau des Instituts für Tragkonstruktionen der TU Wien zur Verfügung gestellt und können Tab. 4.1 entnommen werden. Sie sind in Abb. 2.2 und Abb. 2.3 dargestellt und gehen als Zugparameter in die dynamischen Berechnungen ein.

Tab. 4.1: Zugparameter des Railjet aus einem Datensatz des Forschungsbereichs Stahlbau des Instituts für Tragkonstruktionen der TU Wien

Zugparameter	Lokomotive	Reisezugwagen
Achslasten P_k	215 623,8 N	148 415,49 N
Wagenlänge d	19,28 m	26,5 m
Schwerpunktastand der Drehgestelle r	9,9 m	19 m
Schwerpunktastand der Radsätze b	3 m	2,5 m
Radsatzmasse m_w	2495 kg	1900 kg
Masse des Drehgestells m_b	13 220 kg	2800 kg
Masse des Wagenkastens m_c	51 500 kg	47 316 kg
Massenträgheitsmoment des Drehgestells I_b	27 100 kgm ²	1700 kgm ²
Massenträgheitsmoment des Wagenkastens I_c	882 000 kgm ²	3 070 000 kgm ²
Federsteifigkeit der Primärstufe k_p	3 680 000 N/m	1 690 000 N/m
Federsteifigkeit der Sekundärstufe k_s	2 720 000 N/m	280 000 N/m
Dämpfung der Primärstufe c_p	80 000 Ns/m	20 000 Ns/m
Dämpfung der Sekundärstufe c_s	200 000 Ns/m	14 000 Ns/m

Aus den in Tab. 4.1 gegebenen Wagenlängen d , Schwerpunktabständen der Drehgestelle r und den Schwerpunktabständen der Radsätze b lassen sich die in Abb. 4.1 und Abb. 4.2 dargestellten Achsabstände l_{AA} bestimmen. Somit sind alle Zugparameter, die gemäß Unterkapitel 2.4.1 und Unterkapitel 2.4.2 in die MLM und DIM Berechnungen für beide Zugkonfigurationen eingehen, bekannt.

4.1.3 Festlegung weiterer Eingangsgrößen

Überfahrtsgeschwindigkeit

Die Überfahrtsgeschwindigkeit v wird bei der Berechnung jedes einzelnen Tragwerks insofern variiert, dass MLM und DIM Berechnungen ausschließlich auf Geschwindigkeitsintervallen um kritische Geschwindigkeiten durchgeführt werden. Dazu werden zuerst für jedes Brückentragwerk des Parameterfeldes die ersten 50 kritischen Geschwindigkeiten gemäß Unterkapitel 2.3 berechnet. Die kritischen Geschwindigkeiten für MLM Berechnungen werden gemäß (2.34) berechnet.

Die kritischen Geschwindigkeiten bei DIM Berechnungen sind durchwegs geringer als jene bei MLM Berechnungen, da die Radsatzmassen mit dem Brückenbalken mitschwingen. Daher werden sie mit der adaptierten Berechnungsformel (2.36) bestimmt. Um der Tatsache der mitschwingenden Radsatzmassen Rechnung zu tragen, wird bei der Ermittlung der kritischen Geschwindigkeiten für DIM Berechnungen ein zusätzlicher Beitrag zur Massenbelegung Δm zur Massenbelegung m jedes einzelnen Tragwerks addiert. Daraus ergibt sich eine reduzierte erste Biegeeigenfrequenz $f + \Delta f$. Die Zusatzmasse Δm , die gemäß (2.35) für acht Reisezugwagen des Railjet berechnet wird, ergibt sich mit $N_c = 8$, $N_w = 4$, $m_w = 1900$ kg gemäß Tab. 4.1 und $l_{tr} = 207$ m gemäß Abb. 4.1 zu

$$\Delta m = \frac{N_c N_w m_w}{l_{tr}} = 293.72 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad (4.1)$$

Daraus folgt für jedes Tragwerk in Abhängigkeit der jeweiligen Massenbelegung m und der jeweiligen Biegesteifigkeit EA_{zz} , die sich gemäß (2.12) und (2.16) wiederum aus der ersten Biegeeigenfrequenz f ergibt, ein Wert für $f + \Delta f$.

$$f + \Delta f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{EA_{zz}}{m + \Delta m}} \quad (4.2)$$

Somit werden für jedes Tragwerk die ersten 50 kritischen Geschwindigkeiten für das DIM berechnet.

Für die weitere Berechnung werden aus den 50 ersten kritischen Geschwindigkeiten für das MLM und für das DIM ausschließlich folgende kritische Geschwindigkeiten für jedes Brückentragwerk behalten und abgespeichert:

- Die ersten drei kritischen Geschwindigkeiten
- Falls die dritte kritische Geschwindigkeit unter 350 km/h liegt: die vierte und die fünfte kritische Geschwindigkeit
- Falls die dritte kritische Geschwindigkeit über 350 km/h liegt: die ersten zwei kritischen Geschwindigkeiten unter 350 km/h

Dabei wird die Grenze für obiges Kriterium bei 350 km/h gewählt um sicherzustellen, dass für jedes Brückentragwerk des Parameterfeldes kritische Geschwindigkeiten in dem für den Railjet relevanten Geschwindigkeitsbereich bis 350 km/h erhalten werden. Somit werden jeweils fünf kritische Geschwindigkeiten für die MLM und DIM Berechnungen erhalten. Anschließend werden Geschwindigkeitsintervalle von ± 75 km/h um die jeweiligen kritischen Geschwindigkeiten erzeugt. In der vorliegenden Arbeit werden die Geschwindigkeitsintervalle in der Form von Feldern mit Hilfe der open-source Software Octave 5.1.0 erstellt. Dabei werden für Intervalle um kritische Geschwindigkeiten unter 350 km/h Geschwindigkeitsschritte von 2 km/h und für Intervalle um kritische Geschwindigkeiten über 350 km/h Geschwindigkeitsschritte von 10 km/h gewählt.

Diese Vorgangsweise wird für MLM und DIM Berechnungen gleichermaßen angewendet. Die auf diese Weise erzeugten Geschwindigkeitsintervalle werden dann an die in Unterkapitel 2.6 erwähnten Berechnungsprogramme für das MLM und das DIM zur dynamischen Berechnung übergeben.

Anzahl der Wagen

Die Anzahl der Wagen N_c ergibt sich aus den beiden in Unterkapitel 4.1.2 beschriebenen Zugkonfigurationen.

$$N_c = 8 \quad (4.3)$$

Anzahl der Eigenformen

Die Anzahl der Eigenformen wird zu

$$N_m = 3 \quad (4.4)$$

gewählt. Diese Vorgangsweise gleicht der vorangegangener Arbeiten [2, 5] und entspricht den Anforderungen nach Abschnitt A2.4.4.2.4 des Eurocode 0 [2, 8]. Gemäß (2.13) haben die ersten drei Eigenformen folgende Gestalt:

1. Eigenform: Sinushalbwellen; Die betragsmäßig maximale Biegeordinate liegt in Brückenmitte.
2. Eigenform: Sinuswellen; Die Biegeordinate in Brückenmitte ergibt sich zu Null.
3. Eigenform: Drei Sinushalbwellen; Die betragsmäßig maximale Biegeordinate liegt in Brückenmitte (sowie in den Sechstelpunkten der Stützweite l).

4.2 Programmstruktur und Ausgabegrößen

Die gesamte Programmstruktur, die bei der dynamischen Berechnung des Unterschieds der Tragwerksantwort zwischen MLM und DIM in Abhängigkeit von Brückenparametern zur Anwendung kommt, ist in Abb. 4.3 veranschaulicht. Sie umfasst die Erzeugung des Parameterfeldes, die dynamische Berechnung selbst sowie die Ergebnisauswertung. Zunächst wird mit dem Octave Programm *parameterfeld.m* ein Parameterfeld erzeugt. Es wird in der Textdatei *parameterfeld.txt*, die die Brückenparameter sowie kritische Geschwindigkeiten enthält, abgespeichert. Außerdem werden Geschwindigkeitsintervalle um die kritischen Geschwindigkeiten gemäß Unterkapitel 4.1.3 erstellt und in *v_MLM_RJ.txt* sowie *v_DIM_RJ.txt* abgespeichert. Zusätzlich werden die Dateien *plot_b_MLM_RJ.txt* sowie *plot_b_DIM_RJ.txt* erstellt, die die Ober- und Untergrenzen der Geschwindigkeitsintervalle enthalten. Sie werden für das automatisierte Erstellen von Abbildungen der dynamischen Berechnungen benötigt. Das Parameterfeld sowie die Geschwindigkeitsintervalle werden anschließend an die Matlab Programme *MLM.m* und *DIM.m* übergeben, mit denen dynamische Berechnungen mittels MLM und DIM durchgeführt werden und die dem Autor vom Forschungsbereich Stahlbau des Instituts für Tragkonstruktionen der TU Wien zur Verfügung gestellt wurden. Schließlich werden für jedes Brückentragwerk folgende Ausgabegrößen der dynamischen Berechnungen, die in Textdateien der Form *res_XXX_Railjet_XXX.txt* abgespeichert werden, zur Filterung, Weiterverarbeitung und Visualisierung an das Matlab Programm *Ergebnisauswertung.m* übergeben:

- Überfahrtsgeschwindigkeiten v_k für die die MLM bzw. DIM Berechnung durchgeführt wurde
- Zur jeweiligen Überfahrtsgeschwindigkeit zugehörige, betragsmäßig maximale Vertikalbeschleunigung in Brückenmitte des jeweiligen Brückentragwerks „s“ $\max\{a(t, v_k)_{MLM}\}_s$ bzw. $\max\{a(t, v_k)_{DIM}\}_s$; Dabei werden die Maximalwerte aus dem Zeitverlauf der Vertikalbeschleunigung in Brückenmitte bestimmt. Eine Darstellung dieser Maximalwerte für

ein Brückentragwerk in Abhängigkeit der Überfahrtsgeschwindigkeiten v_k ist in Abb. 4.4 zu finden.

- Zur jeweiligen Überfahrtsgeschwindigkeit zugehörige, betragsmäßig maximale Biegeordinate in Brückenmitte des jeweiligen Brückentragwerks $\max\{w(t, v_k)_{MLM}\}_s$ bzw. $\max\{w(t, v_k)_{DIM}\}_s$; Dabei werden die Maximalwerte aus dem Zeitverlauf der Biegeordinate in Brückenmitte bestimmt.

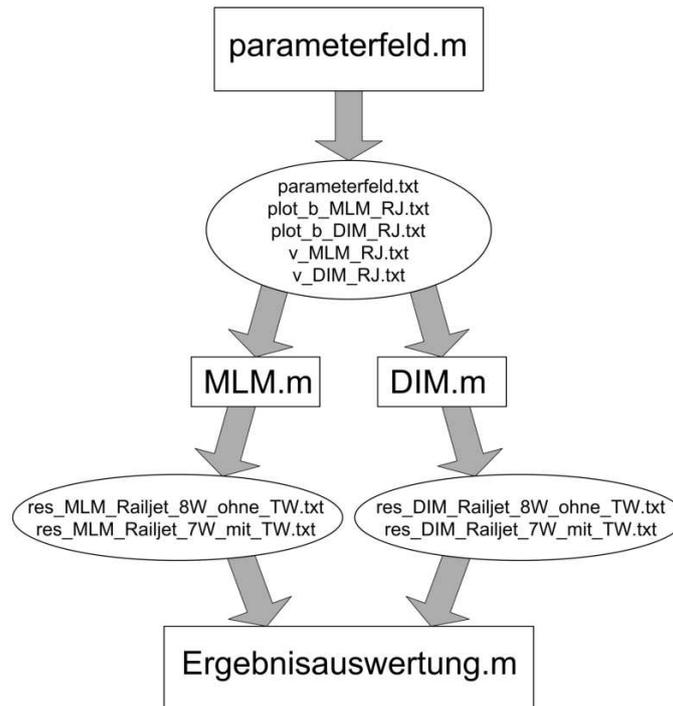


Abb. 4.3: Programmstruktur zur dynamischen Berechnung des Unterschieds der Tragwerksantwort zwischen MLM und DIM in Abhängigkeit von Brückenparametern

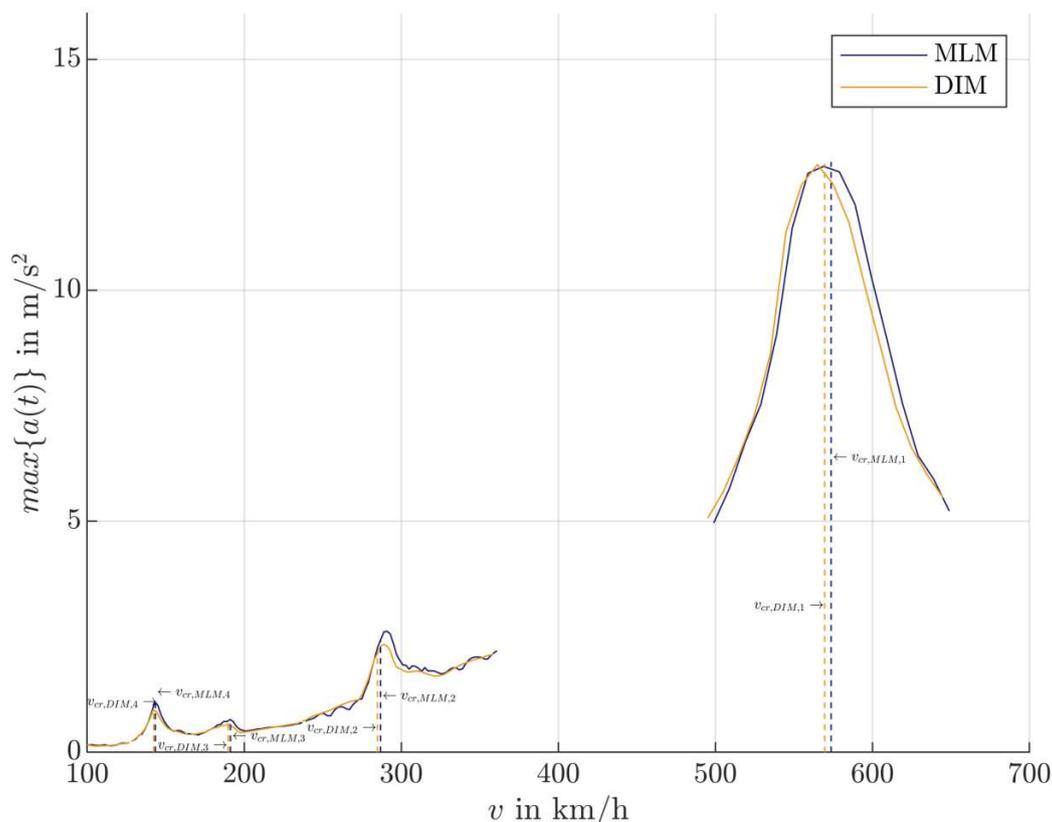


Abb. 4.4: Ergebnis der dynamischen Berechnung mittels MLM und DIM; Dabei erfolgt die Berechnung um ± 75 km/h Intervalle um die kritischen Geschwindigkeiten

4.3 Methodik zur Ergebnisauswertung

4.3.1 Ergebnisauswertung für kritische Geschwindigkeiten zwischen 100 und 350 km/h

Bei der Ergebnisauswertung werden die in Unterkapitel 4.2 angeführten Ausgabegrößen der dynamischen Berechnungen weiterverarbeitet und gefiltert. Aus Unterkapitel 4.1.3 geht hervor, dass für jedes Brückentragwerk des Parameterfeldes mindestens zwei kritische Überfahrtsgeschwindigkeiten unter 350 km/h bekannt sind. Um Ergebnisse zu erhalten, die den Geschwindigkeitsbereich abdecken, in dem Züge des Railjet tatsächlich verkehren, werden zunächst ausschließlich jene Werte der Ausgabegrößen aus den MLM und DIM Berechnungen betrachtet, die bei Geschwindigkeiten unter 350 km/h auftreten. Aus diesen gefilterten Ausgabegrößen werden danach in Intervallen um kritische Geschwindigkeiten die Maxima $a_{MLM,max,s}$ bzw. $a_{DIM,max,s}$ der betragsmäßig im Zeitverlauf maximalen Vertikalbeschleunigungen in Brückenmitte $max\{a(t, v_k)_{MLM}\}_s$ bzw. $max\{a(t, v_k)_{DIM}\}_s$ bestimmt. Der Subindex „s“ steht dabei für das jeweilige Tragwerk. Die zu $a_{MLM,max,s}$ bzw. $a_{DIM,max,s}$ zugehörigen Biegeordinaten $w_{MLM,s}$ bzw. $w_{DIM,s}$ werden der Vollständigkeit halber abgespeichert, aber nicht weiter behandelt. Danach werden alle Ausgabegrößen verworfen, die bei Überfahrtsgeschwindigkeiten unter 100 km/h auftreten, da in der Ingenieurpraxis für Geschwindigkeiten unter 100 km/h keine dynamischen Berechnungen

durchgeführt werden. Zu guter Letzt wird für jedes Brückentragwerk des Parameterfeldes die Differenz

$$\Delta a_{max,s} = a_{MLM,max,s} - a_{DIM,max,s} \quad (4.5)$$

bestimmt. Die Gesamtheit dieser Differenzen stellt das wesentliche Berechnungsergebnis der vorliegenden Arbeit da, da sie eine Änderung der Tragwerksantwort zwischen MLM und DIM in Abhängigkeit der Brückenparameter, die durch das Parameterfeld von 1000 Brückentragwerken repräsentiert werden, verkörpert.

Die im vorigen Absatz verbal umschriebene Vorgangsweise – es wurden dabei einige Details ausgelassen, um die Leserlichkeit des Fließtextes zu gewährleisten – wird in der folgenden Aufzählung noch einmal detailliert beschrieben:

1. Herausfiltern der Ausgabegrößen aus Unterkapitel 4.2 um die ersten zwei kritischen Geschwindigkeiten unter 350 km/h aus den MLM und DIM Berechnungen für jedes Tragwerk des Parameterfeldes;
2. Bestimmung der Maximalwerte der Vertikalbeschleunigung innerhalb von Intervallen von ± 10 km/h um die jeweiligen kritischen Geschwindigkeiten.

$$\begin{aligned} a_{MLM,max,s} &= \max\{\max\{a(t, v_k)_{MLM}\}_s\} \\ a_{DIM,max,s} &= \max\{\max\{a(t, v_k)_{DIM}\}_s\} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Dabei ist die innere Maximumfunktion so zu verstehen, als dass sie die betragsmäßigen Maximalwerte aus dem Zeitverlauf der Vertikalbeschleunigung in Brückenmitte eines jeweiligen Tragwerks bei einer konkreten Überfahrtsgeschwindigkeit v_k ausgibt. Dieser Berechnungsschritt erfolgt während der jeweiligen MLM bzw. DIM Berechnung des jeweiligen Tragwerks. Die äußere Maximumfunktion gibt den Maximalwert der Maximalwerte $\max\{a(t, v_k)_{MLM}\}_s$ bzw. $\max\{a(t, v_k)_{DIM}\}_s$, die bei mehreren Überfahrtsgeschwindigkeiten v_k in ± 10 km/h Intervallen um die jeweilige kritische Geschwindigkeit auftreten, aus. Die Intervallbreite wird mit ± 10 km/h gewählt um zu vermeiden, dass bei nahe beieinander liegenden kritischen Geschwindigkeiten eine benachbarte Beschleunigungsspitze erfasst wird. Außerdem verhindert eine Intervallbreite von ± 10 km/h, dass hohe Beschleunigungen aus einem aufsteigenden Ast einer kritischen Geschwindigkeit über 350 km/h fälschlicherweise bei der Berechnung der Maxima der Vertikalbeschleunigung mitberücksichtigt werden. Die Richtigkeit der gewählten Intervallbreite wird durch visuelle Kontrolle gewährleistet. Zur visuellen Kontrolle werden dabei Abbildungen herangezogen, die Abb. 4.4 gleichen.

3. Für jedes Tragwerk des Parameterfeldes: Bestimmung, welche der beiden kritischen Geschwindigkeiten unter 350 km/h die größere Vertikalbeschleunigung $a_{MLM,max,s}$ beim MLM liefert; Abspeichern des Index der jeweiligen kritischen Geschwindigkeit.
4. Für jedes Tragwerk des Parameterfeldes: Abspeichern der maximalen Vertikalbeschleunigung $a_{DIM,max,s}$, die bei der DIM Berechnung in einem Intervall um jene kritische Geschwindigkeit unter 350 km/h auftritt, die beim MLM die maximale Vertikalbeschleunigung erzeugt. Die Intervallbreite für die Maximumsbildung beträgt ebenfalls ± 10 km/h um die jeweilige kritische Geschwindigkeit.
5. Ausschluss jener Tragwerke, deren maximale Vertikalbeschleunigung beim MLM $a_{MLM,max,s}$ bei Geschwindigkeiten unter 100 km/h auftreten;
6. Für jedes Tragwerk des Parameterfeldes: Berechnung der Differenz $\Delta a_{max,s}$ gemäß (4.5);

Das auf obige Art bestimmte Berechnungsergebnis,

$$\Delta a_{max,s} \quad s \in \{1, 2, 3 \dots S\}$$

also die Gesamtheit der Vertikalbeschleunigungsdifferenzen aller Tragwerke „S“, für die maximale Vertikalbeschleunigungen im Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h bis 350 km/h auftreten, wird nun als Grundlage für eine lineare Interpolation herangezogen. Um eine lineare Interpolation zwischen den Berechnungsergebnisse $\Delta a_{max,s}$ zu erhalten, wird die Matlab-Funktion *scatteredInterpolant()* auf ebendiese angewendet. Dabei werden die einzelnen Werte $\Delta a_{max,s}$ als Funktion der Brückenparameter des jeweiligen Tragwerks betrachtet (die Abhängigkeit von der Überfahrtsgeschwindigkeit sowie des jeweiligen Zeitschrittes wurde durch die doppelte Anwendung der Maximumfunktion eliminiert). Man kann also schreiben

$$\Delta a_{max,s} = \Delta a_{max,s}(l_s, m_s, f_s, z_s) \quad (4.7)$$

Die durch die Interpolation erhaltene lineare Funktion in mehreren Variablen $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ stellt eine Näherung der unbekanntenen Funktion $\Delta a_{max}(l, m, f, z)$ dar, die den Zusammenhang zwischen der Änderung der maximalen Vertikalbeschleunigung in Brückenmitte (Tragwerksantwort) einerseits und den Brückenparametern andererseits, exakt beschreibt. Würde man die in der vorliegenden Arbeit gewählte Vorgangsweise auf ein unendlich großes Parameterfeld anwenden, ist grundsätzlich davon auszugehen, dass $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ gegen $\Delta a_{max}(l, m, f, z)$ konvergiert (über die Art und Güte der Konvergenz wird keine Aussage getroffen).

4.3.2 Ergebnisauswertung für die erste kritische Geschwindigkeit

Ausgabegrößen aus MLM und DIM Berechnungen, die bei Überfahrtsgeschwindigkeiten größer als 350 km/h auftreten, liegen außerhalb des realistischen Geschwindigkeitsbereiches des Railjet. Ihre Aussagekraft ist rein theoretischer Natur und für die Ingenieurpraxis irrelevant. Bei der Ergebnisauswertung wird ähnlich vorgegangen, wie in Unterkapitel 4.3.1. Allerdings wird die erste kritischen Geschwindigkeit herangezogen, um $a_{MLM,max,p}$ bzw. $a_{DIM,max,p}$ zu berechnen. Dabei steht der Subindex „p“ für das jeweilige Tragwerk (grundsätzlich entspricht der Subindex „p“ dem Subindex „s“ aus Unterkapitel 4.3.1 – die Indizes werden zur Unterscheidung eingeführt).

Für die erste kritische Geschwindigkeit wird die Intervallbreite um ebendiese zu ± 75 km/h gewählt. Dies ist erforderlich, da etliche Tragwerke erste kritische Geschwindigkeiten aufweisen, die weit über 350 km/h liegen (Die ersten kritischen Geschwindigkeiten betragen bei einer Vielzahl von Tragwerken $10^2 \div 10^4$ km/h). Bei hohen kritischen Geschwindigkeiten treten in Abbildungen wie Abb. 4.4 breitere Geschwindigkeitsspitzen und höhere betragsmäßig maximale Vertikalbeschleunigungen $\max\{a(t, v_k)_{MLM}\}_p$ bzw. $\max\{a(t, v_k)_{DIM}\}_p$ auf. Ergo muss die Intervallbreite, wie oben beschrieben, breiter gewählt werden um die Beschleunigungsspitzen zu erfassen.

Das Resultat dieser Vorgangsweise ist die Gesamtheit der Differenzen $\Delta a_{max,p}$, die analog zu (4.5) für die Vertikalbeschleunigungsmaxima aus einem Intervall um die erste kritische Geschwindigkeit des p-ten Tragwerks berechnet wird. Schlussendlich erfolgt eine lineare Interpolation der Berechnungsergebnisse analog zu Unterkapitel 4.3.1.

4.3.3 Ergebnisauswertung für weitere kritische Geschwindigkeiten

Die Ergebnisauswertung für weitere kritische Geschwindigkeiten erfolgt analog zu Unterkapitel 4.3.2. Allerdings werden zur Berechnung von $\Delta a_{max,p}$ jeweils die maximalen Vertikalbeschleunigungen herangezogen, die sich aus Intervallen um die j-te kritische Geschwindigkeit ergeben.

4.4 Ergebnisdarstellung

Die Berechnungsergebnisse, die unter Anwendung der Methodik aus Unterkapitel 4.3 bestimmt werden, müssen zur Analyse und Interpretation visualisiert werden. Es gilt also die Vertikalbeschleunigungsdifferenzen aus MLM und DIM Berechnungen $\Delta a_{max,s}(l_s, m_s, f_s, z_s)$ sowie deren lineare Interpolationsfunktion $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ graphisch darzustellen.

Die Berechnungsergebnisse werden als Funktionen in zwei Variablen dargestellt. Dabei wird der Definitionsbereich als Teilbereich des \mathbb{R}_+^2 gewählt, wobei zwei Varianten der Zuordnung der Brückenparameter zu den Koordinatenachsen gewählt werden:

- Auf den Koordinatenachsen des Definitionsbereiches wird jeweils das Produkt zweier Brückenparameter aufgetragen. Es ergeben sich drei Kombinationen für eine sinnvolle Zuordnung der Brückenparameter zu den Koordinatenachsen (Doppelzuordnungen eines Parameters werden ausgeschlossen).
- Auf einer Koordinatenachse des Definitionsbereiches wird das Produkt dreier Brückenparameter aufgetragen. Auf der verbleibenden Koordinatenachse wird der vierte Brückenparameter aufgetragen. Es ergeben sich vier Kombinationen für eine sinnvolle Zuordnung der Brückenparameter zu den Koordinatenachsen.

Die erhaltenen Kombinationen für die jeweiligen Koordinatenachsen sind in Tab. 4.2 angeführt.

Tab. 4.2: Zuordnung der Brückenparameter l , m , f und z zu den Koordinatenachsen x_1 und x_2

x_1	x_2
$l \cdot m$	$f \cdot z$
$l \cdot f$	$m \cdot z$
$l \cdot z$	$m \cdot f$
$l \cdot m \cdot f$	z
$l \cdot m \cdot z$	f
$l \cdot f \cdot z$	m
$m \cdot f \cdot z$	l

Kapitel 5

Berechnungsergebnisse

Die Berechnungsergebnisse werden entsprechend Kapitel 4 bestimmt und im folgenden Kapitel dargestellt. Sie sind so beschaffen, dass die zweite Kernfrage aus Unterkapitel 1.3 beantwortet werden kann: Für beide Zugkonfigurationen aus Unterkapitel 4.1.2 gibt es einen Zusammenhang zwischen den Brückenparametern und der Änderung der Tragwerksantwort zwischen MLM und DIM, die durch die Vertikalbeschleunigungsdifferenz $\Delta a_{max}(l, m, f, z)$ gemäß Unterkapitel 4.3.1 ausgedrückt wird. Diese wird durch die lineare Interpolationsfunktion $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ angenähert, die linear zwischen den Punkten $\Delta a_{max,s}$ bzw. $\Delta a_{max,p}$ interpoliert. Dabei ergibt sich insbesondere für die erste Zuordnung der Brückenparameter zu den Koordinatenachsen x_1 und x_2 des \mathbb{R}_+^2 aus Tab. 4.2 ein einheitliches Funktionsgebirge, das Regelmäßigkeiten aufweist. Das erhaltene Funktionsgebirge tritt in ähnlicher Gestalt für beide betrachtete Zugkonfigurationen und für alle Varianten der Ergebnisauswertung aus Unterkapitel 4.3 auf. Allerdings treten dabei folgende Merkmale des Funktionsgebirges von $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ jeweils unterschiedlich stark ausgeprägt auf:

- lokale Extrema
- globale Extrema

Alle anderen Zuordnungen der Brückenparameter zu den Koordinatenachsen gemäß Tab. 4.2 führen zu Funktionsgebirgen mit stärker ausgeprägten lokalen Extremwerten. Zudem liegen bei diesen lokale Maxima mit positivem Funktionswert und lokale Minima mit negativem Funktionswert unmittelbar nebeneinander, sodass die erhaltenen Funktionsgebirge eine Vielzahl von Sprüngen aufweisen. Mit Ausnahme der vierten Zuordnung aus Tab. 4.2 ergeben sich dadurch unbrauchbare - da stark sprunghafte - Funktionsgebirge. Die vierte Zuordnung aus Tab. 4.2 resultiert zwar in einem weniger sprunghaftem Funktionsgebirge, allerdings weist dieses dennoch mehr Sprungstellen auf, als das Funktionsgebirge das aus der ersten Zuordnung erhalten wird. Im folgenden werden daher ausschließlich die Funktionsgebirge dargestellt, die aus der ersten Zuordnung der Brückenparameter zu den Koordinatenachsen, gemäß Tab. 4.2 erhalten werden. Es wird also auf der x_1 -Achse das Produkt von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ und auf der x_2 -Achse das Produkt der ersten Biegeeigenfrequenz und der Dämpfung $f \cdot z$ aufgetragen. Auf der x_3 -Achse werden die Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnungen $\Delta a_{max,s}$ bzw. $\Delta a_{max,p}$ und deren lineare Interpolationsfunktion $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ aufgetragen. Dabei werden die Berechnungsergebnisse nach Zugkonfiguration und Art der Ergebnisauswertung (also den betrachteten kritischen Geschwindigkeiten) aufgeschlüsselt. Alle Berechnungsergebnisse, die für den Geschwindigkeitsbereich gelten, der für den Eisenbahnverkehr in der Praxis relevant ist, sind in Anhang E und Anhang F in Tabellenform abgedruckt.

Positive Werte von $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ respektive $\Delta a_{max,s}$ bzw. $\Delta a_{max,p}$ repräsentieren eine Reduktion der maximalen Vertikalbeschleunigung in Brückenmitte durch eine DIM Berechnung im Vergleich zu einer MLM Berechnung. Negative Werte stehen für gegenteiliges Phänomen.

5.1 Berechnungsergebnisse für kritische Geschwindigkeiten zwischen 100 und 350 km/h

Die folgenden Berechnungsergebnisse werden durch das Vorgehen aus Unterkapitel 4.3.1 erhalten. Es werden also nur maximale Vertikalbeschleunigung in Brückenmitte herangezogen, die zwischen 100 km/h und 350 km/h auftreten. Dadurch wird sichergestellt, dass der reale Geschwindigkeitsbereich des Eisenbahnverkehrs abgedeckt wird. Die Berechnungsergebnisse des folgenden Kapitels sind somit für die Ingenieurpraxis relevant. Alle Berechnungsergebnisse des folgenden Unterkapitels sind in Anhang E und Anhang F in Tabellenform abgedruckt.

5.1.1 Erste Zugkonfiguration: acht Reisezugwagen

Zunächst werden die Berechnungsergebnisse für die erste Zugkonfiguration bestehend aus acht Reisezugwagen des Railjet gemäß Unterkapitel 4.1.2 dargestellt. Es werden sieben Brückentragwerke von den Ergebnissen ausgeschlossen, da bei ihnen die maximale Vertikalbeschleunigung beim MLM $a_{MLM,max,s}$ bei Geschwindigkeiten unter 100 km/h auftritt. Somit umfassen die Berechnungsergebnisse 993 Brückentragwerke. Für diese 993 Brücken werden die maximalen Vertikalbeschleunigungen in Brückenmitte $\Delta a_{max,s}$ über der $lm-fz$ -Ebene aufgetragen. Sie werden in den folgenden Abbildungen als schwarze Punkte dargestellt. Zwischen diesen wird linear interpoliert, wodurch die Interpolationsfunktion $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ erhalten wird, die ebenfalls in den folgenden Abbildungen dargestellt ist.

Das auffällige lokale Minimum in Abb. 5.3 tritt bei einem Brückentragwerk mit einer Stützweite von $l = 7.41\text{m}$, einer Massenbelegung von $m = 19.21\text{t/m}$, einer ersten Biegeeigenfrequenz von $f = 3.53\text{Hz}$ und einer vergleichsweise großen Dämpfung von $z = 3.28\%$ auf.

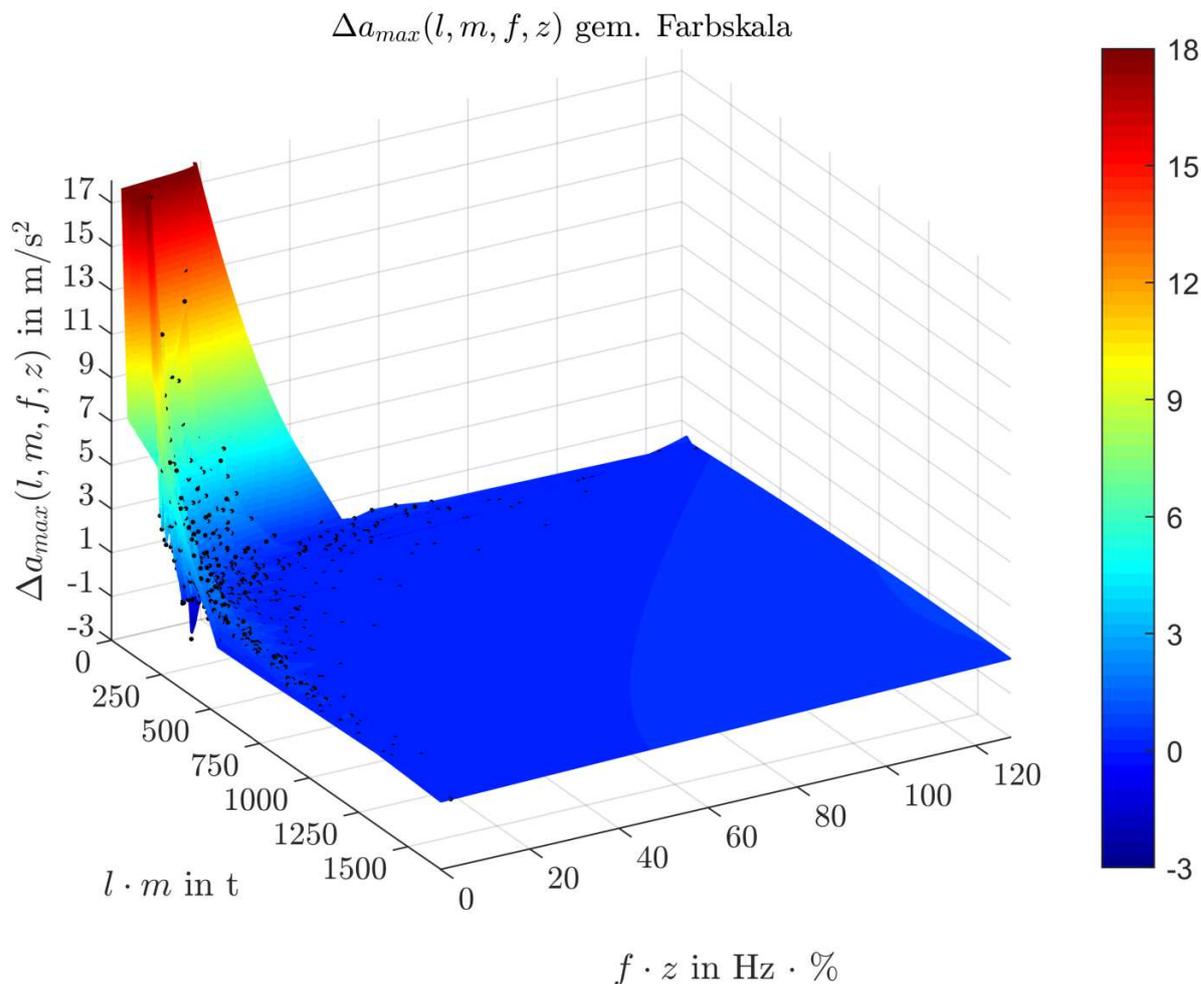


Abb. 5.1: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung von 993 Brücken des Parameterfeldes für den Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h bis 350 km/h; $\Delta a_{max,s}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$;

Aus Abb. 5.1 geht hervor, dass im Bereich um den Ursprung der lm - fz -Ebene ein globales Maximum der unbekannteten Funktion $\Delta a_{max}(l, m, f, z)$, die durch $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ angenähert wird, liegt. Mit zunehmender positiver Entfernung vom Ursprung der lm - fz -Ebene ist eine Abflachung von $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ zu beobachten, wobei $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ betragsmäßig geringe Funktionswerte im Bereich um Null annimmt. Selbiges gilt für die Berechnungsergebnisse $\Delta a_{max,s}$.

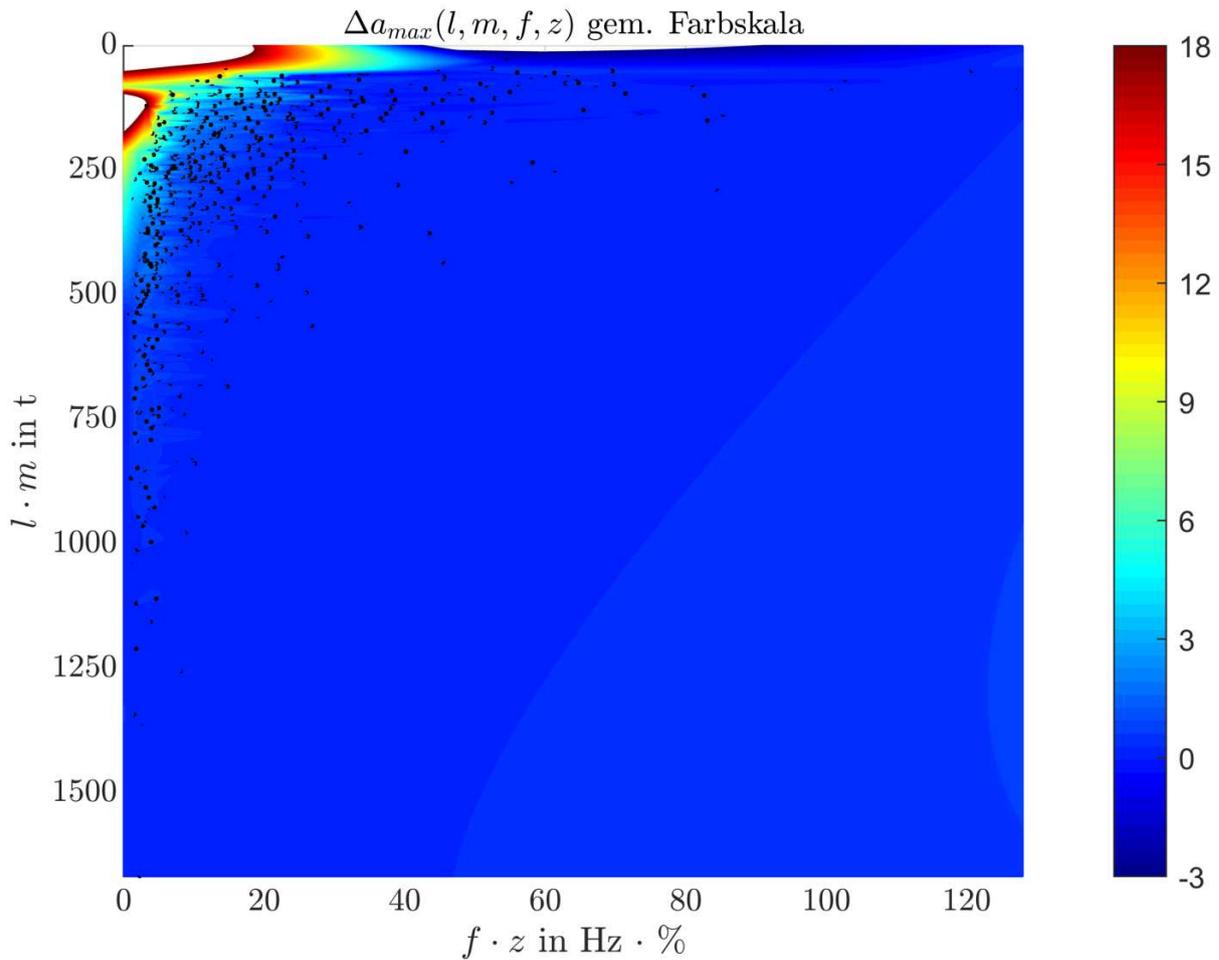


Abb. 5.2: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung von 993 Brücken des Parameterfeldes für den Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h bis 350 km/h; $\Delta a_{max,s}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$; Blick gegen die x_3 -Achse (Draufsicht)

Anhand der Draufsicht aus Abb. 5.2 wird jener Bereich der lm - fz -Ebene ersichtlich, in dem eine Häufung von Brückentragwerken – dargestellt durch schwarze Punkte – zu verzeichnen ist. Die weißen Bereiche in der Nähe des Ursprungs sind darauf zurückzuführen, dass in Abb. 5.2 für die Darstellung ein Maximalwert der Vertikalbeschleunigung von 18 m/s^2 gewählt wird. Die Interpolationsfunktion wird also bei 18 m/s^2 abgeschnitten. Diese Einschränkung wird vorgenommen, da im Laufe der dynamischen Berechnungen keine maximalen Vertikalbeschleunigungen $\Delta a_{max,s}$ gemäß Unterkapitel 4.3.1 über 18 m/s^2 erhalten wurden.

Außerdem gibt es entlang circa $l \cdot m = 0 \text{ t}$ bei circa $f \cdot z = 50 \div 100 \text{ Hz} \cdot \%$ einen Bereich, in dem es zu einer Vergrößerung der maximalen Vertikalbeschleunigung durch DIM Berechnungen kommt. Dies wird durch negative Funktionswerte von $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ impliziert.

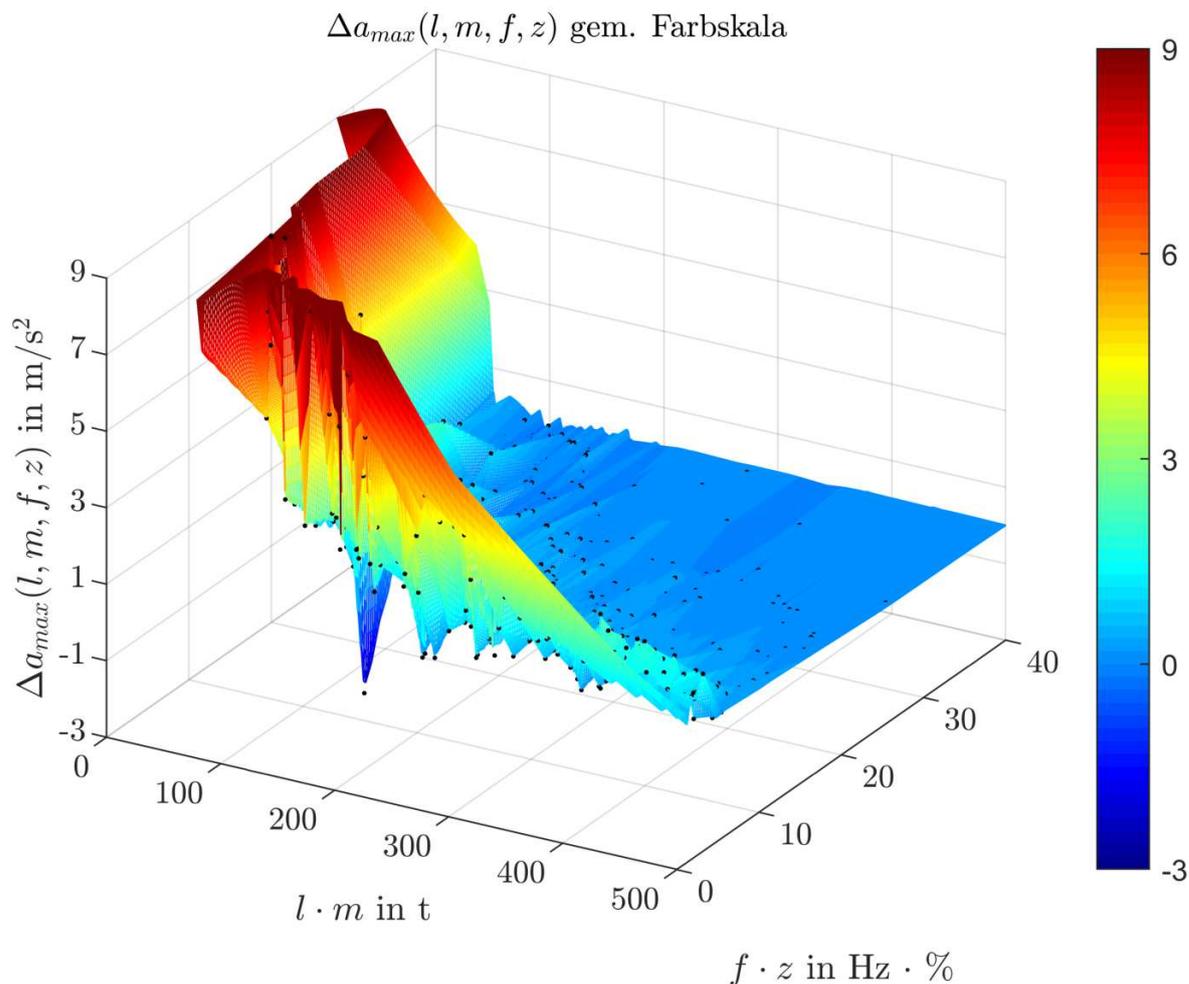


Abb. 5.3: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung von 993 Brücken des Parameterfeldes für den Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h bis 350 km/h; $\Delta a_{max,s}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$; Nahbereich um das globale Maximum

Im Nahbereich um das globale Maximum, der in Abb. 5.3 dargestellt ist, treten vermehrt lokale Extrema auf. Dabei nehmen die Differenzen benachbarter lokaler Maxima und Minima zu, je weiter man sich dem Ursprung nähert. Allerdings bleibt der globale Trend zu zunehmenden Maximalbeschleunigungen im Bereich des Ursprungs erhalten.

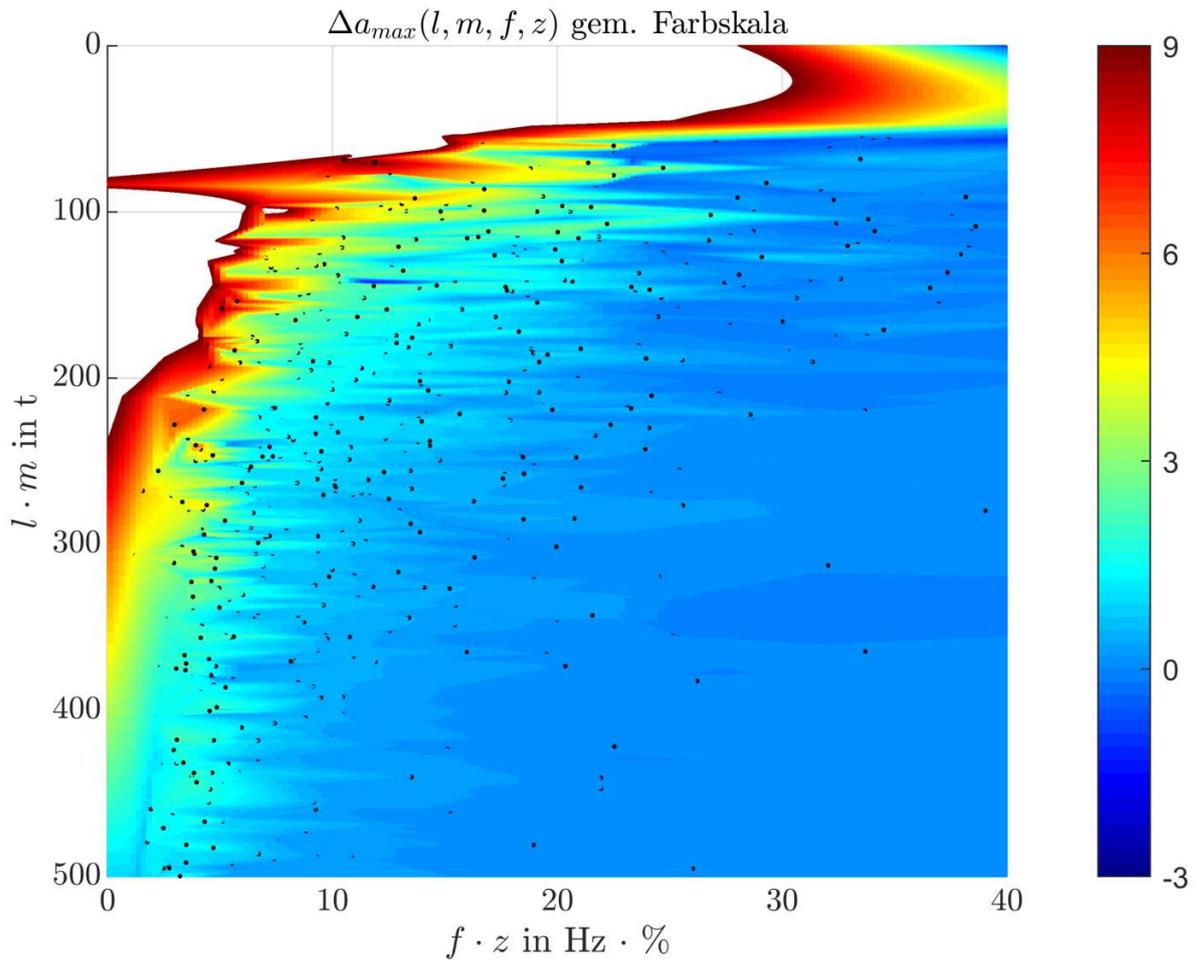


Abb. 5.4: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung von 993 Brücken des Parameterfeldes für den Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h bis 350 km/h; $\Delta a_{max,s}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$; Blick gegen die x_3 -Achse im Nahbereich um das globale Maximum (Draufsicht)

Anhand von Abb. 5.4 wird eine gewisse Regelmäßigkeit der lokalen Extrema im Nahbereich des Ursprungs ersichtlich: In der Draufsicht sind dünne Spitzen in Richtung der x_2 -Achse, also der fz -Achse, erkennbar. Diese resultieren aus „Wellen“, die parallel zur fz -Achse verlaufen. Die Wellenberge bestehen aus mehreren lokalen Maxima, die in etwa entlang einer Parallele zur fz -Achse auftreten. Die Wellentäler wiederum bestehen aus lokalen Minima, die in etwa entlang einer Parallele zur fz -Achse auftreten.

5.1.2 Zweite Zugkonfiguration: sieben Reisezugwagen mit Lok

Die Berechnungsergebnisse für zweite Zugkonfiguration bestehend aus sieben Reisezugwagen des Railjet und einer Lok gemäß Unterkapitel 4.1.2 sind im Folgenden dargestellt. Es werden dabei sieben Brückentragwerke von den Ergebnissen ausgeschlossen, da bei ihnen die maximale Vertikalbeschleunigung beim MLM $a_{MLM,max,s}$ bei Geschwindigkeiten unter 100 km/h auftritt.

Somit umfassen die Berechnungsergebnisse 993 Brückentragwerke. Die folgenden Abbildungen haben grundsätzlich dieselbe Gestalt wie jene aus Unterkapitel 5.1.1. Auch die Bemerkungen zum Verhalten von $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ sowie $\Delta a_{max,s}$ können aus obigem Unterkapitel übernommen werden.

Das auffällige lokale Minimum in Abb. 5.7 tritt bei demselben Brückentragwerk wie in Unterkapitel 5.1.1 auf.

Im Folgenden wird auf die Unterschiede der Berechnungsergebnisse der zweiten Zugkonfiguration im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen der ersten Zugkonfiguration eingegangen.

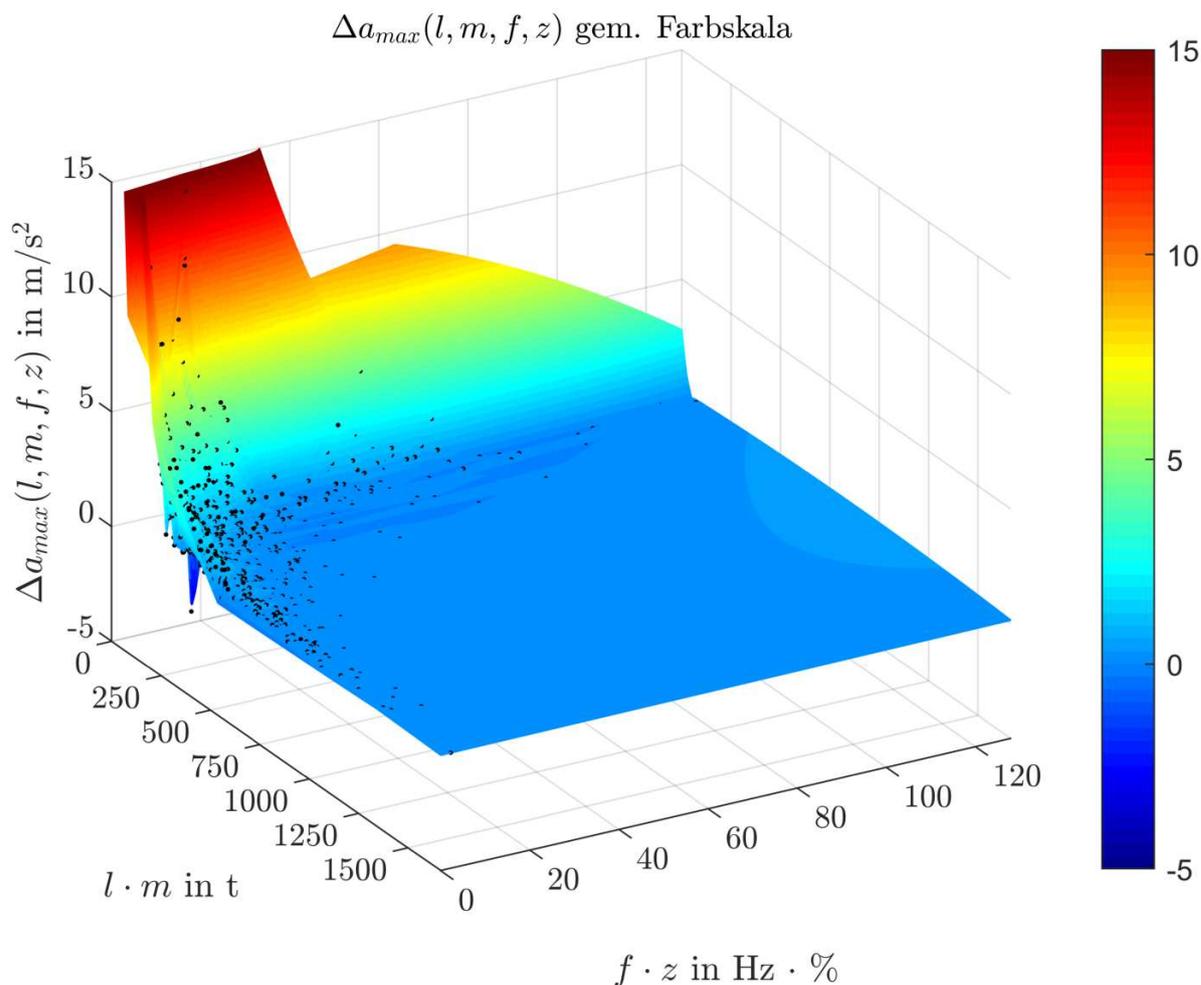


Abb. 5.5: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung von 993 Brücken des Parameterfeldes für den Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h bis 350 km/h; $\Delta a_{max,s}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$;

Gemäß Abb. 5.5 ist eine Reduktion des Funktionswertes des globalen Maximums von $\Delta a_{max,s}$ im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen aus Unterkapitel 5.1.1 zu beobachten. Gleichzeitig kommt es zu einer Reduktion des Funktionswertes des globalen Minimums.

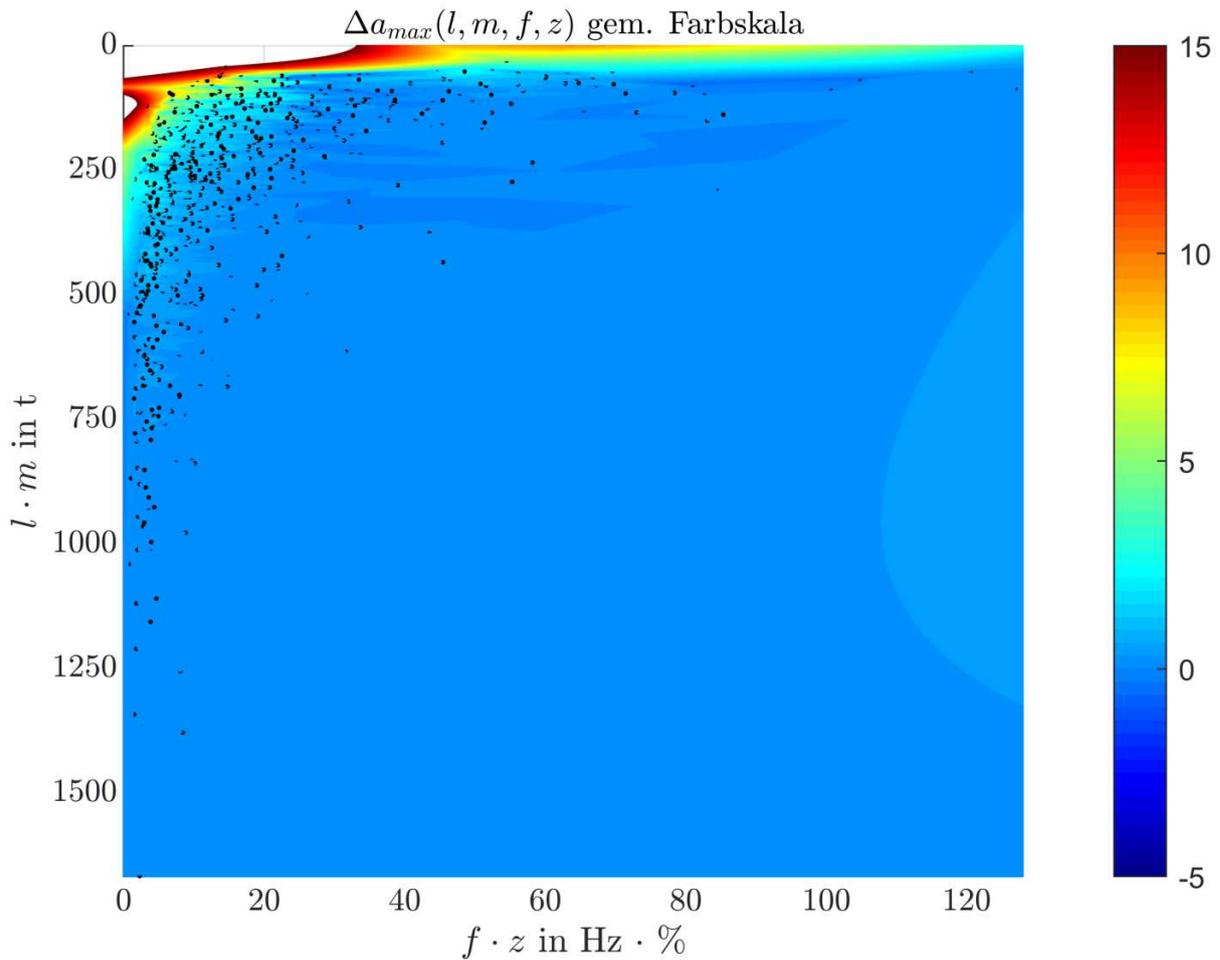


Abb. 5.6: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung von 993 Brücken des Parameterfeldes für den Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h bis 350 km/h; $\Delta a_{max,s}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$; Blick gegen die x_3 -Achse (Draufsicht)

Ein Vergleich von Abb. 5.6 mit Abb. 5.2 ergibt, dass der Bereich entlang circa $l \cdot m = 0$ t bei circa $f \cdot z = 50 \div 100$ Hz · %, in dem eine Vergrößerung der Vertikalbeschleunigung zufolge einer DIM Berechnung zu erwarten ist, bei dynamischen Berechnungen für die zweite Zugkonfiguration weitgehend verschwindet.

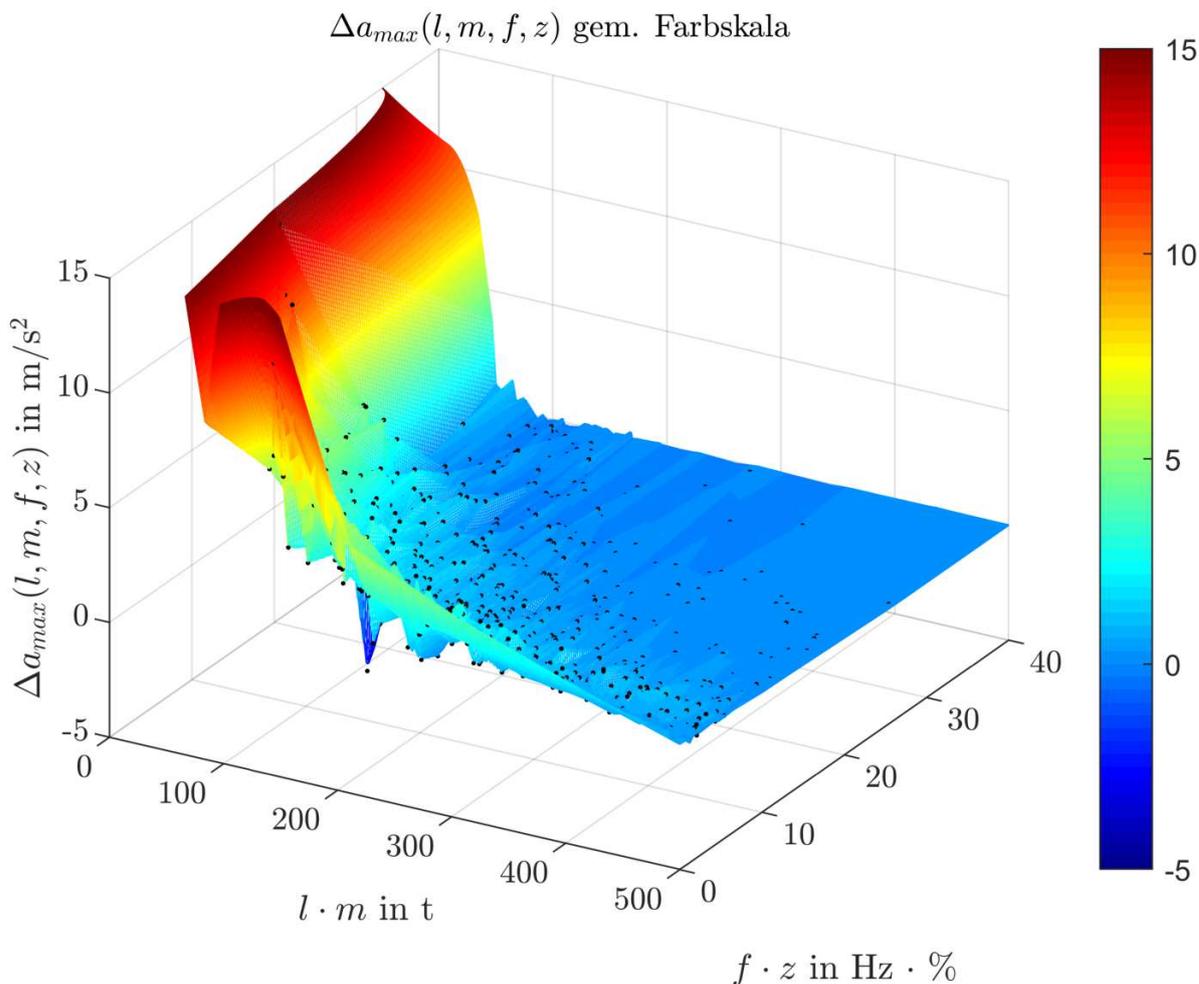


Abb. 5.7: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung von 993 Brücken des Parameterfeldes für den Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h bis 350 km/h; $\Delta a_{max,s}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$; Nahbereich um das globale Maximum

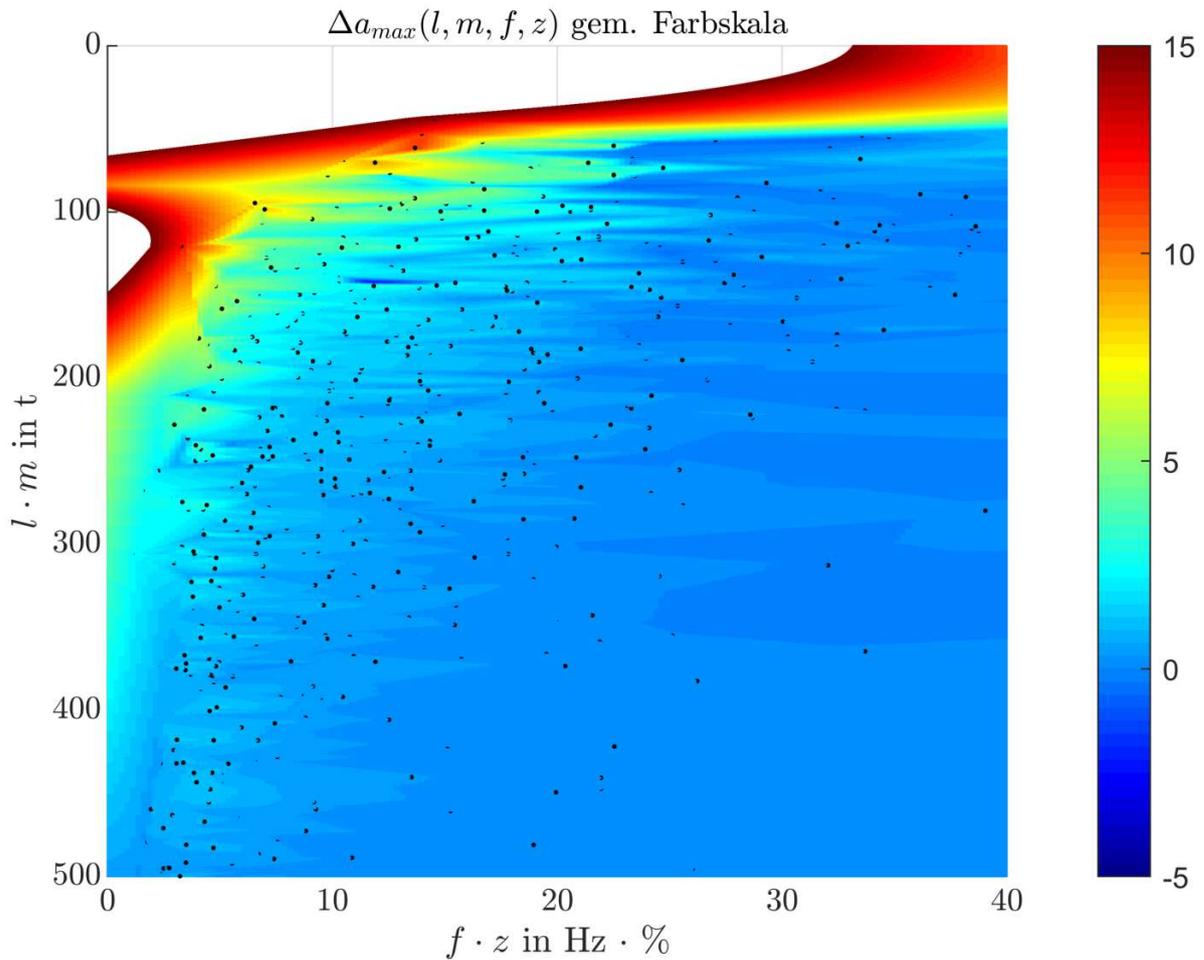


Abb. 5.8: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung von 993 Brücken des Parameterfeldes für den Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h bis 350 km/h; $\Delta a_{max,s}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$; Blick gegen die x_3 -Achse im Nahbereich um das globale Maximum (Draufsicht)

Eine numerische Überprüfung der Berechnungsergebnisse ergibt, dass in etwa zwei Drittel der Brücken (exakt 65%) bei Zugüberfahrten der zweiten Zugkonfiguration geringere maximale Vertikalbeschleunigungsdifferenzen $\Delta a_{max,s}$ aufweisen, als bei Zugüberfahrten der ersten Zugkonfiguration. Dabei beträgt der Median der absoluten Abweichung ($\Delta a_{max,s}$ aus der ersten Zugkonfiguration minus $\Delta a_{max,s}$ aus der zweiten Zugkonfiguration) gerundet $0,04 \text{ m/s}^2$. Der zugehörige Mittelwert der Abweichung beträgt gerundet $0,18 \text{ m/s}^2$. Aufgrund der geringen mittleren absoluten Abweichungen ist in Abb. 5.5, Abb. 5.6, Abb. 5.7 und Abb. 5.8 visuell kein grundsätzlicher Unterschied zu den Abbildungen aus Unterkapitel 5.1.1 zu erkennen. Die Farbskala sowie die Grenzen der x_3 -Achse werden im vorliegenden Unterkapitel allerdings anders gewählt um eine bessere Abdeckung der Berechnungsergebnisse durch den Farbverlauf zu gewährleisten.

5.2 Berechnungsergebnisse für die erste kritische Geschwindigkeit

Die Berechnungsergebnisse für die erste kritische Geschwindigkeit werden unter Anwendung der Vorgehensweise aus Unterkapitel 4.3.2 erhalten. Wie oben erwähnt, sind sie für den realen Eisenbahnverkehr nicht relevant. Dies liegt daran, dass die ersten kritischen Geschwindigkeiten einzelner Brücken bei mehreren tausend km/h liegen können. Die Berechnungsergebnisse für die erste kritische Geschwindigkeit werden im Folgenden dennoch dargestellt, da sie das oben erwähnte - allgemeine Verhalten des in den Abbildungen dieses Kapitels dargestellten Zusammenhangs verdeutlichen. Bei den gemäß Unterkapitel 4.3.2 ermittelten Ergebnissen treten betragsmäßig größere lokale und globale Extrema auf, als im für den Eisenbahnverkehr relevanten Geschwindigkeitsbereich.

5.2.1 Erste Zugkonfiguration: acht Reisezugwagen

Im Folgenden werden die Berechnungsergebnisse für die erste Zugkonfiguration bestehend aus acht Reisezugwagen des Railjet gemäß Unterkapitel 4.1.2 dargestellt. Es werden analog zu Unterkapitel 5.1.1 sechs Brückentragwerke von den Ergebnissen ausgeschlossen. Für die verbleibenden 994 Brücken werden die maximalen Verikalbeschleunigungen in Brückenmitte $\Delta a_{max,p}$ über der lm - fz -Ebene aufgetragen. Sie werden in den folgenden Abbildungen als schwarze Punkte dargestellt. Zwischen diesen wird linear interpoliert, wodurch die Interpolationsfunktion $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ erhalten wird, die ebenfalls in den folgenden Abbildungen dargestellt ist.

Grundsätzlich ähneln die Berechnungsergebnisse jenen aus Unterkapitel 5.1.1, weshalb die Beschreibung der Berechnungsergebnisse von dort übernommen wird. Im Folgenden wird lediglich auf wesentliche Unterschiede zwischen der Berechnungsergebnissen für die erste kritische Geschwindigkeit und jenen aus Unterkapitel 5.1.1 eingegangen.

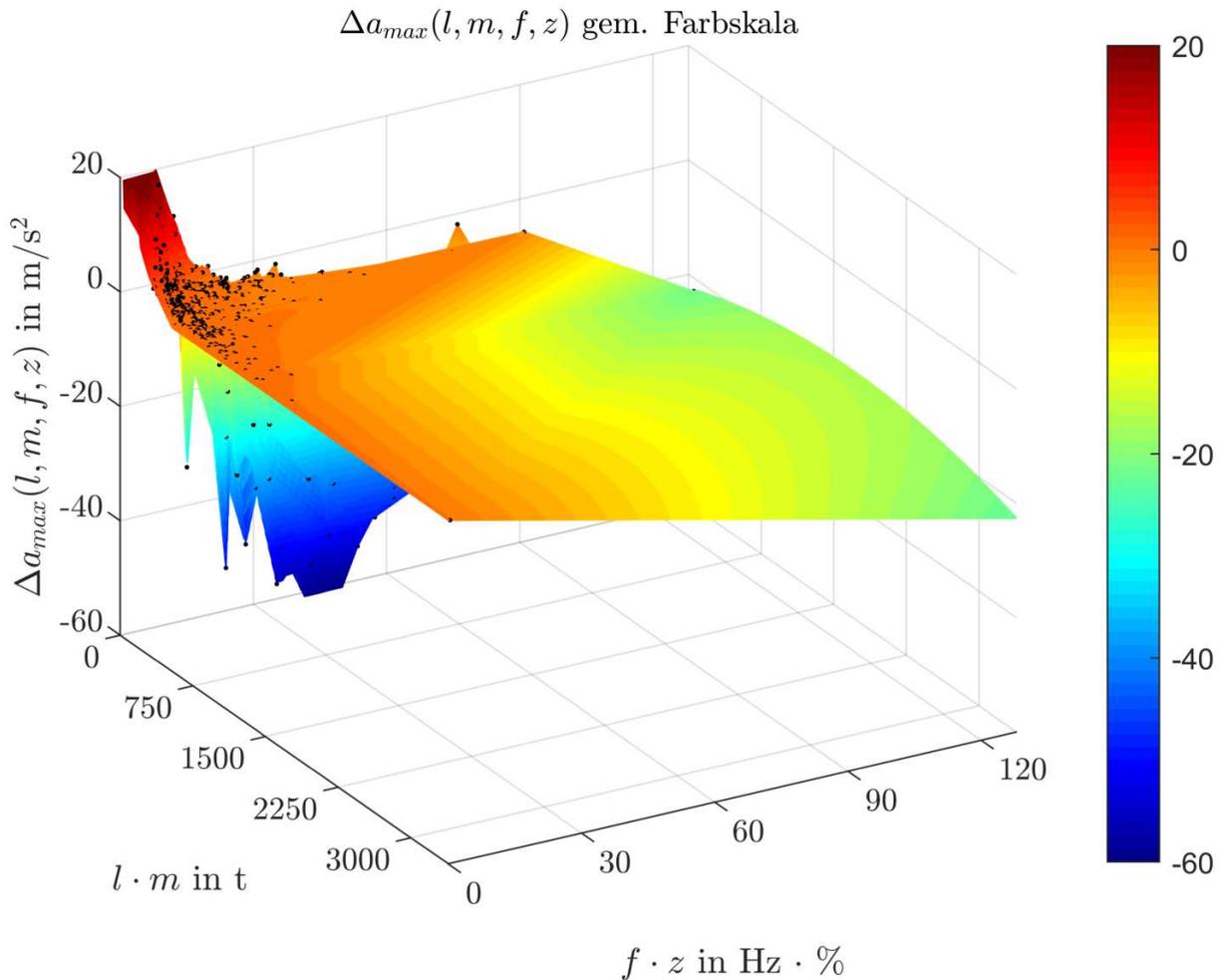


Abb. 5.9: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung für 994 Brücken des Parameterfeldes für die erste kritische Geschwindigkeit; $\Delta a_{max,p}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$;

Abb. 5.9 zeigt, dass $\Delta a_{max,p}$ betragsmäßig wesentlich größere Werte annimmt, als $\Delta a_{max,s}$ aus Unterkapitel 5.1.1. Dies ist dadurch begründet, dass bei den teilweise sehr großen ersten kritischen Geschwindigkeiten größere Beschleunigungsspitzen auftreten, als sie im realen Geschwindigkeitsbereich auftreten. Die betragsmäßige Vergrößerung der Funktionswerte wirkt sich allerdings stärker auf negative Funktionswerte aus, als auf positive. Dieses Verhalten führt dazu, dass sämtliche Tendenzen des Funktionsgebirges aus Unterkapitel 5.1.1 verstärkt werden.

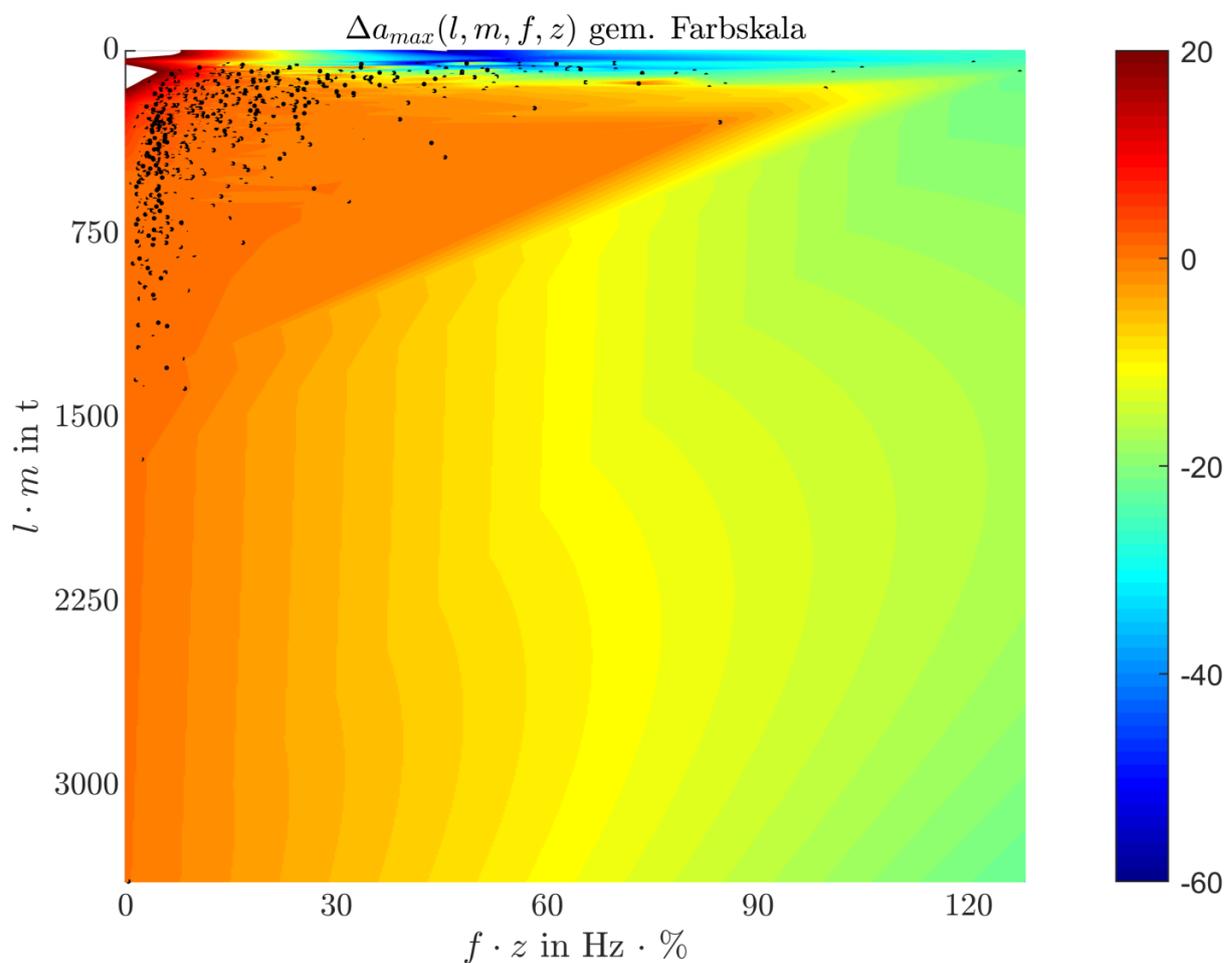


Abb. 5.10: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung für 994 Brücken des Parameterfeldes für die erste kritische Geschwindigkeit; $\Delta a_{max,p}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$; Blick gegen die x_3 -Achse (Draufsicht)

Anhand von Abb. 5.10 wird ersichtlich, dass der Bereich, in dem eine Vergrößerung der Vertikalbeschleunigung zufolge einer DIM Berechnung zu erwarten ist, größer wird. Er erstreckt sich nun entlang circa $l \cdot m = 0$ t von circa $f \cdot z = 30 \div 120$ Hz · %.

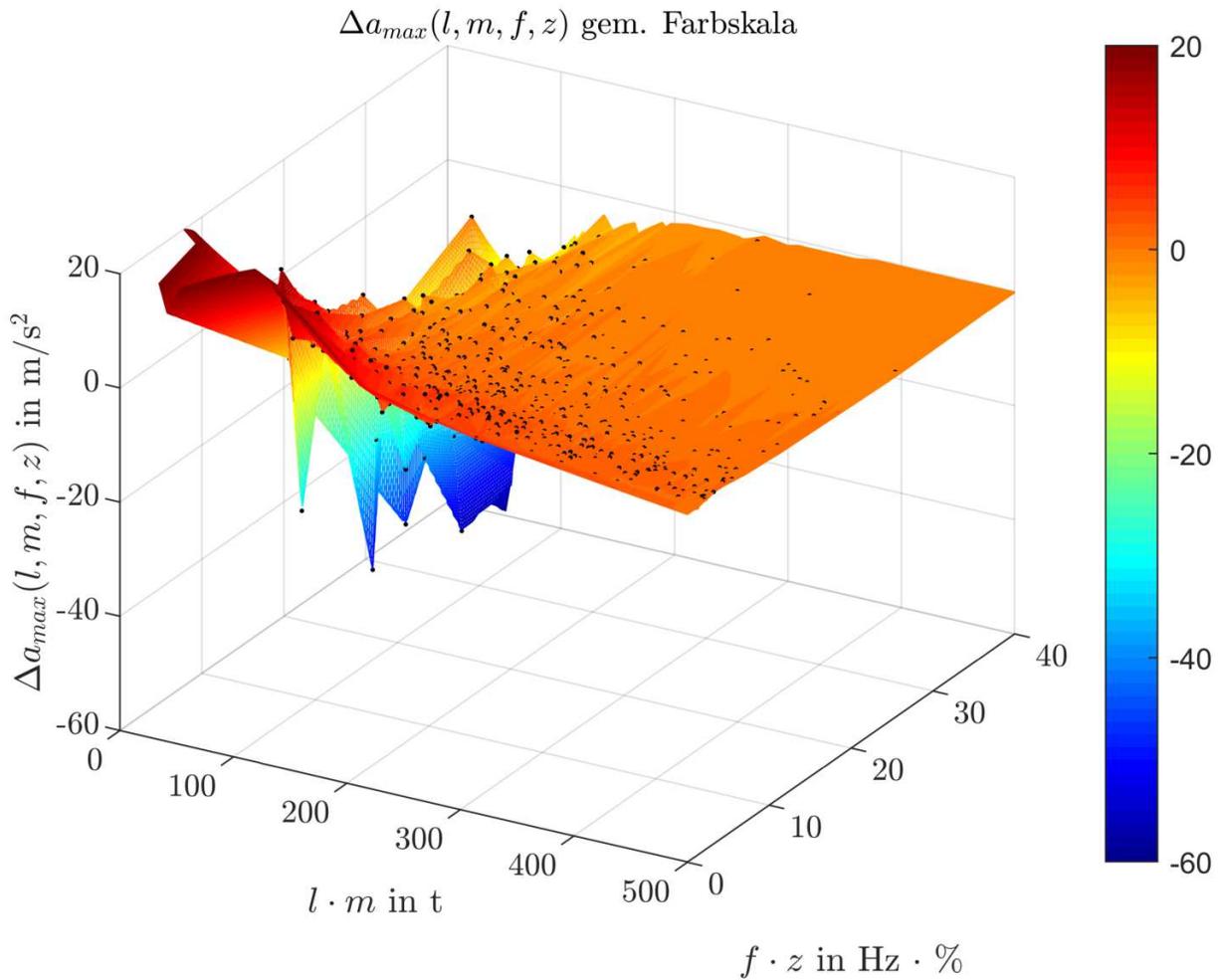


Abb. 5.11: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung für 994 Brücken des Parameterfeldes für die erste kritische Geschwindigkeit; $\Delta a_{max,p}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$; Nahbereich um das globale Maximum

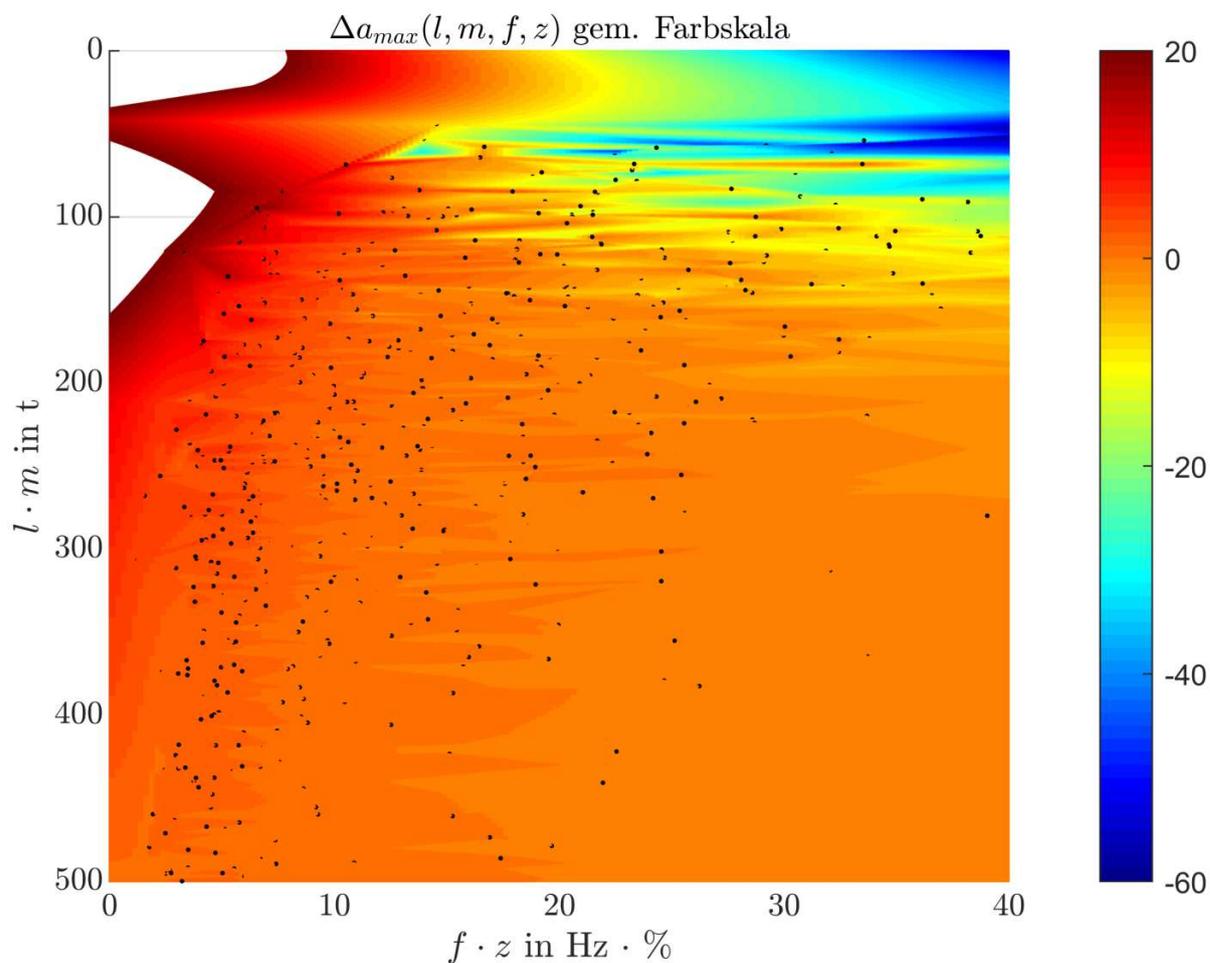


Abb. 5.12: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung für 994 Brücken des Parameterfeldes für die erste kritische Geschwindigkeit; $\Delta a_{max,p}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$; Blick gegen die x_3 -Achse im Nahbereich um das globale Maximum (Draufsicht)

5.2.2 Zweite Zugkonfiguration: sieben Reisezugwagen mit Lok

Abschließend werden die Berechnungsergebnisse für die zweite Zugkonfiguration bestehend aus sieben Reisezugwagen des Railjet und einer Lok gemäß Unterkapitel 4.1.2 dargestellt. Dabei werden vier Brückentragwerke von den Ergebnissen ausgeschlossen, da bei ihnen die maximale Vertikalbeschleunigung beim MLM $a_{MLM,max,p}$ bei Geschwindigkeiten unter 100 km/h auftritt. Somit umfassen die Berechnungsergebnisse 996 Brückentragwerke. Für die verbleibenden 996 Brücken werden die maximalen Verikalbeschleunigungen in Brückenmitte $\Delta a_{max,p}$ über der lm - fz -Ebene aufgetragen. Sie werden in den folgenden Abbildungen als schwarze Punkte dargestellt. Zwischen diesen wird linear interpoliert, wodurch die Interpolationsfunktion $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ erhalten wird, die ebenfalls in den folgenden Abbildungen dargestellt ist. Die Beschreibung der Berechnungsergebnisse kann im Wesentlichen aus Unterkapitel 5.2.1 übernommen werden. Im

Folgendes wird lediglich auf wesentliche Merkmale der Berechnungsergebnisse eingegangen, die nicht in den obigen Unterkapiteln erwähnt sind.

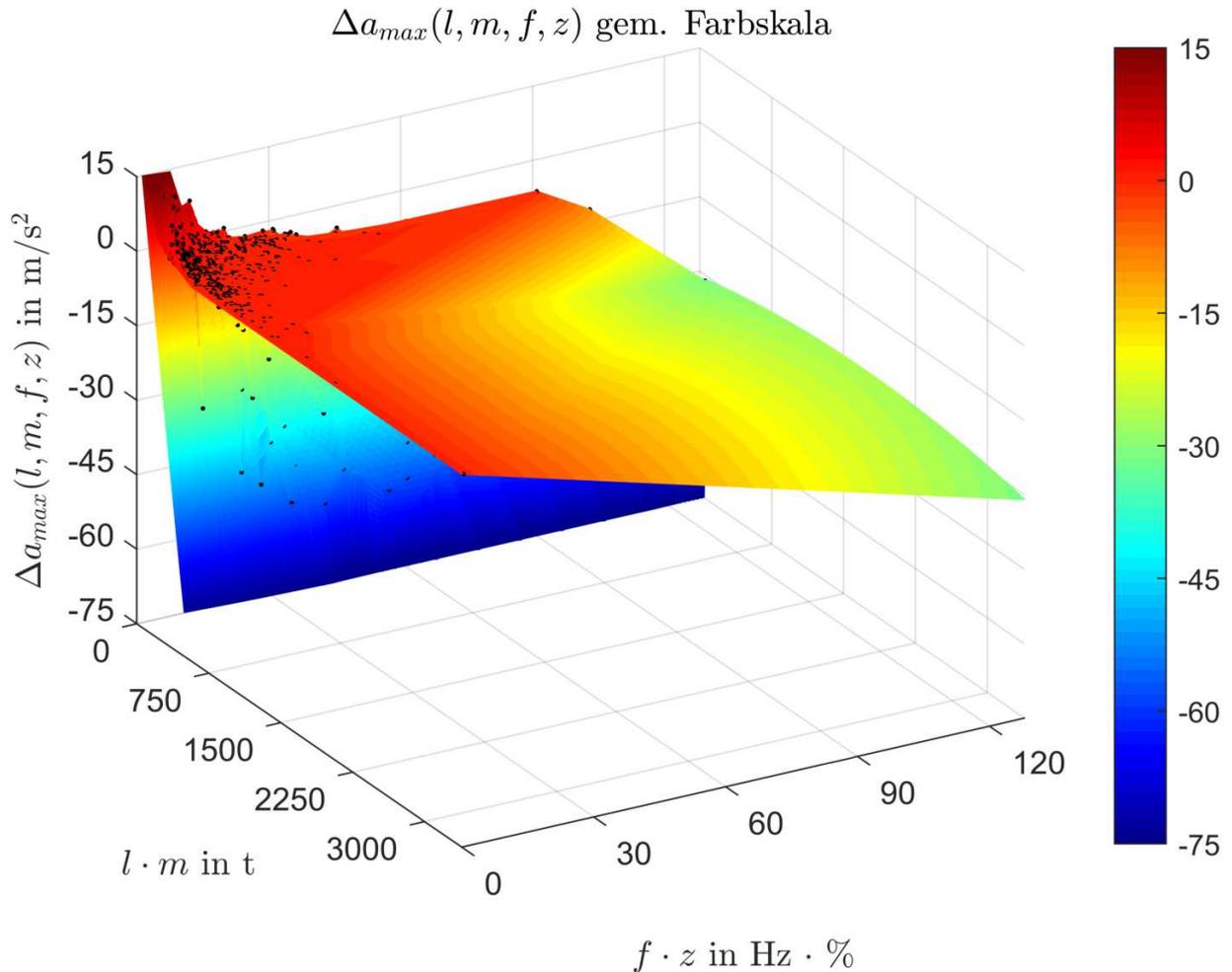


Abb. 5.13: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung für 996 Brücken des Parameterfeldes für die erste kritische Geschwindigkeit; $\Delta a_{max,s}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$;

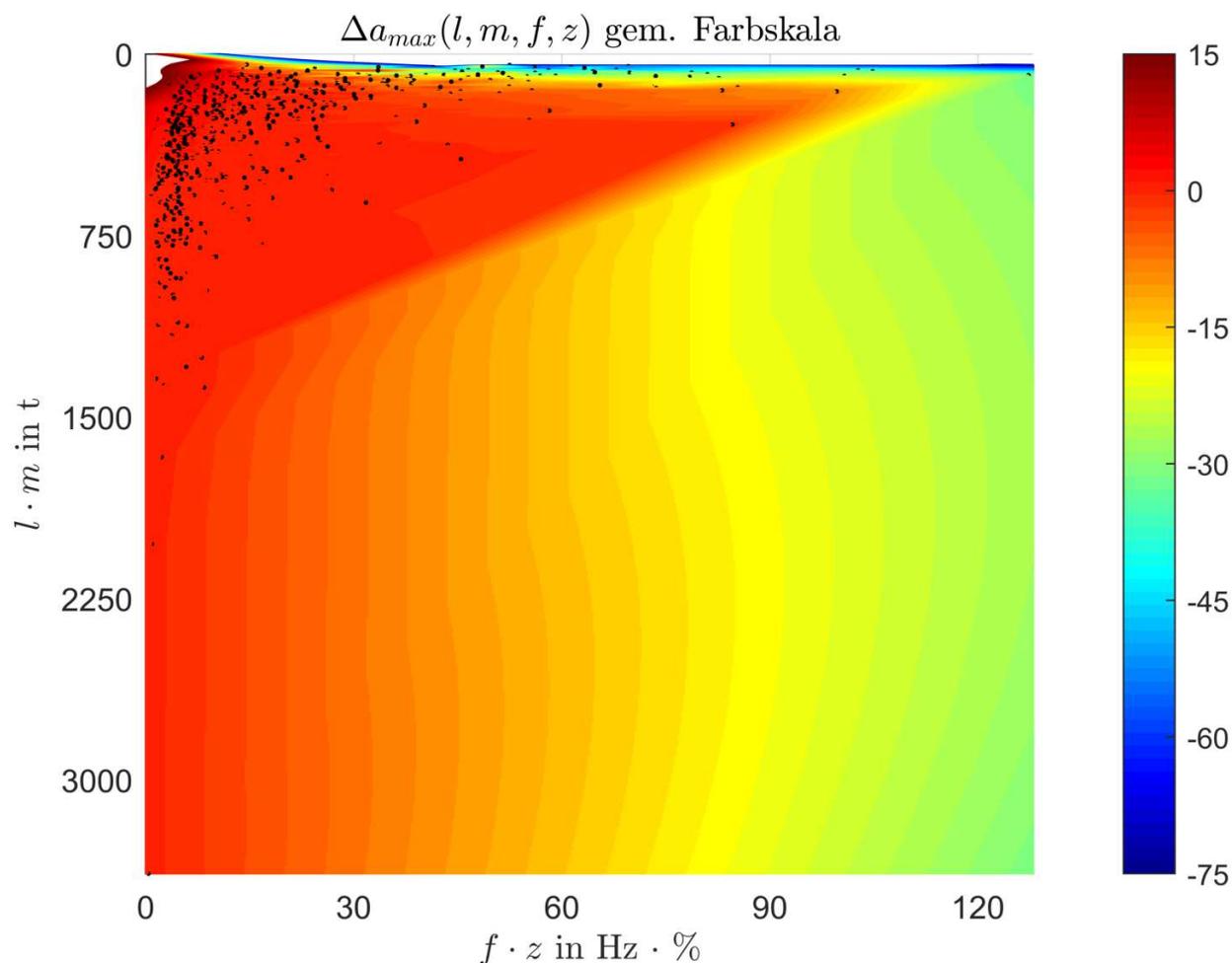


Abb. 5.14: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung für 996 Brücken des Parameterfeldes für die erste kritische Geschwindigkeit; $\Delta a_{max,s}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$; Blick gegen die x_3 -Achse (Draufsicht)

Anhand von Abb. 5.14 erkennt man, dass nun – im Gegensatz zu den Berechnungsergebnissen aus Unterkapitel 5.1.2 – ein ausgeprägter Bereich auftritt, in dem eine starke Vergrößerung der maximalen Vertikalbeschleunigung zufolge einer DIM Berechnung zu erwarten ist. Er befindet sich entlang circa $l \cdot m = 0$ t bei circa $f \cdot z = 10 \div 130$ Hz · %.

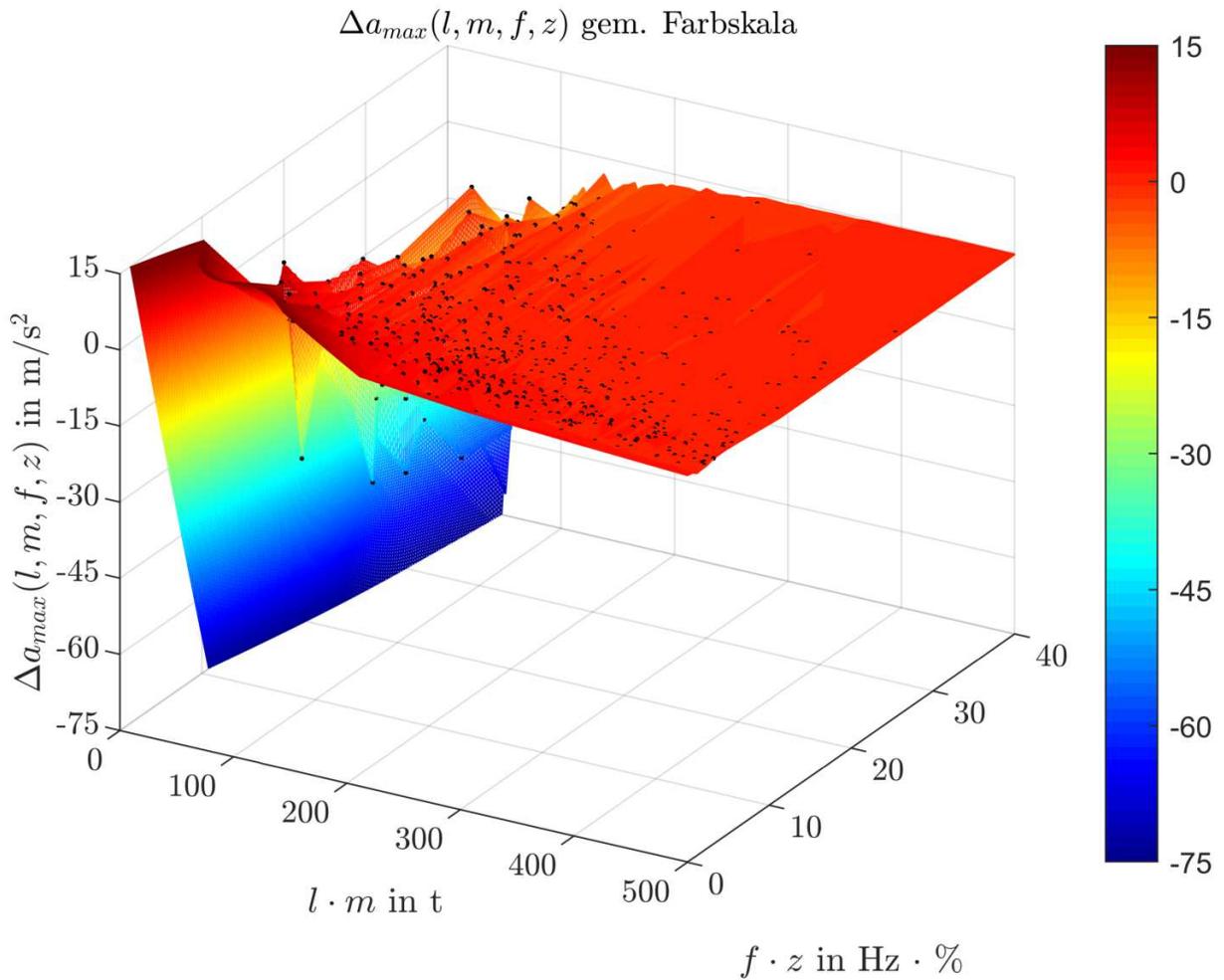


Abb. 5.15: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung für 996 Brücken des Parameterfeldes für die erste kritische Geschwindigkeit; $\Delta a_{max,s}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$; Nahbereich um das globale Maximum

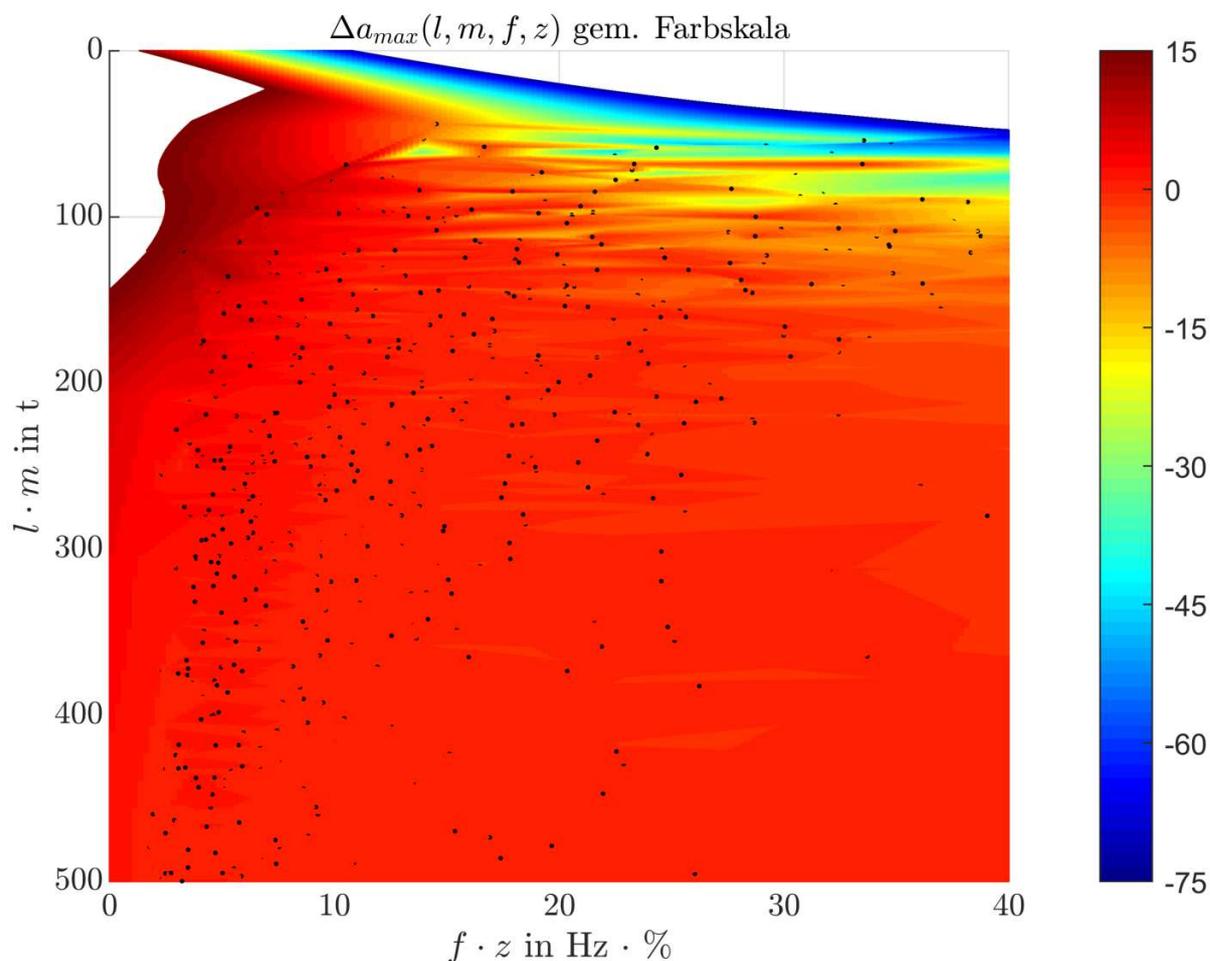


Abb. 5.16: Berechnungsergebnisse der dynamischen Berechnung für 996 Brücken des Parameterfeldes für die erste kritische Geschwindigkeit; $\Delta a_{max,s}$ beziehungsweise $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ in Abhängigkeit des Produktes von Stützweite und Massenbelegung $l \cdot m$ sowie des Produktes von erster Biegeeigenfrequenz und Dämpfung $f \cdot z$; Blick gegen die x_3 -Achse im Nahbereich um das globale Maximum (Draufsicht)

5.3 Berechnungsergebnisse für weitere kritische Geschwindigkeiten

Die Berechnungsergebnisse für weitere kritische Geschwindigkeiten sind im Folgenden nicht dargestellt. Sie werden entsprechend Unterkapitel 4.3.3 bestimmt. Es wird allerdings festgehalten, dass die erhaltenen Funktionsgebirge jenen aus Unterkapitel 5.1 und Unterkapitel 5.2 ähneln.

5.4 Einschränkung des Definitionsbereichs der linearen Interpolationsfunktion

Da das Parameterfeld nur bestimmte Bereiche des Parameterraumes abdeckt, ist es erforderlich den Definitionsbereich (bzw. die Definitionsmenge) der Funktion $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ aus Unterkapitel 4.3 einzuschränken. Damit wird sichergestellt, dass $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ nur dann

zur Anwendung kommt, wenn die Brückenparameter in jenem Bereich des Parameterraumes liegen, in dem ausreichend viele Brückentragwerke des Parameterfeldes vorzufinden sind.

Auf die Anwendung von $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ zur Abschätzung von Δa_{max} wird im letzten Kapitel der vorliegenden Arbeit eingegangen.

Die Einschränkung des Definitionsbereiches von $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ erfolgt mittels Anwendung statistischer Methoden sowie durch visuelle Anpassung der Grenzen des Definitionsbereiches. Die folgenden Berechnungen werden mit der open-source Software Octave 5.1.0 durchgeführt. Der verwendete Programmcode ist in Anhang C abgedruckt. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

1. Zunächst werden Konfidenzniveaus über Irrtumsniveaus a_j festgelegt, um äußerst selten auftretende Werte der Brückenparameter auszuschließen. Die verwendeten Subindizes bezeichnen dabei jeweils die Brückenparameter aus Unterkapitel 2.4.1.

$$a_l = a_m = a_f = a_z = 0.02 \quad (5.1)$$

2. Unter Anwendung der Lognormalverteilungen für die Brückenparameter l und f , die durch (3.31) und (3.33) bestimmt sind, werden Fraktilwerte für die Einzelnen Parameter berechnet.

$$\begin{aligned} l_{99\%} &= F_l^{-1}\left(1 - \frac{a_l}{2}\right) = 31.47 \text{ m} \\ l_{1\%} &= F_l^{-1}\left(\frac{a_l}{2}\right) = 4.82 \text{ m} < 5 \text{ m} \quad ! \\ f_{99\%} &= F_f^{-1}\left(1 - \frac{a_f}{2}\right) = 33.85 \text{ Hz} \\ f_{1\%} &= F_f^{-1}\left(\frac{a_f}{2}\right) = 1.26 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Es werden also 1% sowie 99 % Fraktilwerte berechnet. Da Stützweiten l unter 5 m oben ausgeschlossen wurden, wird der Definitionsbereich im Folgenden nicht durch den 1% Fraktilwert von l sondern durch $l_u = 5\text{m}$ begrenzt.

3. Es werden lineare Regressionen von m auf l und z auf f ermittelt. Die Regressionsgeraden $m_{regr}(l)$ und $z_{regr}(f)$ werden aus den vorliegenden Brückendaten, die in Abb. 3.1 aus Unterkapitel 3.2 dargestellt sind, berechnet. Damit ergeben sich unter Verwendung der Schätzwerte aus Tab. 3.1 folgende lineare Regressionsfunktionen:

$$\begin{aligned} m_{regr}(l) &= \alpha_m + \beta_m \cdot l = 16.27 + 0.44 \cdot l \\ z_{regr}(f) &= \alpha_z + \beta_z \cdot f = 1.481 + 0.036 \cdot f \end{aligned} \quad (5.3)$$

Dabei erhält man β_m zu

$$\beta_m = \frac{\sum_{k=1}^{132} (l_k - M_{l,132}) \cdot (m_k - M_{m,132})}{\sum_{k=1}^{132} (l_k - M_{l,132})^2} = 0.44 \frac{\text{t}}{\text{m}^2} \quad (5.4)$$

und

$$\alpha_m = M_{m,132} - \beta \cdot M_{l,132} = 16.27 \frac{\text{t}}{\text{m}} \quad (5.5)$$

wobei $M_{m,132}$ und $M_{l,132}$ die aus den oben erwähnten Brückendaten geschätzten Mittelwerte der Massenbelegung m sowie der Stützweite l bezeichnen. Die Berechnung von α_z und β_z erfolgt analog. Die so erhaltenen linearen Regressionsgeraden sind in Abb. 5.17 dargestellt.

4. Es werden Vertrauensbereiche um die linearen Regressionen berechnet. Vertrauensbereiche sind jene Bereiche, innerhalb derer zukünftige Stichproben einer stochastischen Größe mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind. Die Wahrscheinlichkeit wird dabei über die Konfidenzniveaus aus (5.1) festgelegt. Außerdem wird angenommen, dass der Fehler - also die Abweichung der Stichproben von der Regressionsgerade - normalverteilt ist. Die Standardabweichung $\sigma_{Fehler,i}(x_j)$ des normalverteilten Fehlers der Zufallsvariable X_i , deren lineare Regression auf der Zufallsvariable X_j bestimmt wurde, ergibt sich an der Stelle x_j durch Schätzung mit dem Schätzer $S_{Fehler,i,N}(x_j)$ zu [12]:

$$\sigma_{Fehler,i}(x_j) \approx S_{Fehler,i,N}(x_j) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (x_{i,k} - x_{i,k,regr})^2}{N-2}} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(x_j - M_{n,j})^2}{\sum_{k=1}^N (x_{j,k} - M_{n,j})^2}} \quad (5.6)$$

Dabei bezeichnet N die Anzahl der Stichproben, $x_{i,k}$ Stichproben der Zufallsvariable X_i , $x_{i,k,regr}$ den Wert der Regressionsgerade an der Stelle der Stichprobe $x_{i,k}$, $M_{n,j}$ den Schätzwert des Mittelwertes der Zufallsvariable X_j aus n Stichproben, $x_{j,k}$ Stichproben der Zufallsvariable X_j und x_j einen Wert (bzw. eine Stelle) der Zufallsvariable X_j . Somit können die Standardabweichungen der Abweichungen der Stichproben von den linearen Regressionen $m_{regr}(l)$ und $z_{regr}(f)$ bestimmt werden. Dazu werden als Stichproben jeweils die Werte der Brückenparameter des Parameterfeldes aus Unterkapitel 3.3 herangezogen. Dementsprechend ergibt sich $N = 1000$ und $n = 1000$. Die Werte $x_{i,k,regr}$ werden aus den oben errechneten linearen Regressionen bestimmt. Somit lassen sich $\sigma_{Fehler,m}(l)$ und $\sigma_{Fehler,z}(f)$ an jeder Stelle von l und f numerisch berechnen. Zudem wird mithilfe der inversen t-Verteilung und den Konfidenzniveaus die Wahrscheinlichkeit festgelegt, mit der zukünftige Stichproben (also Brückentragwerke) innerhalb des gewählten Vertrauensbereiches liegen. Die t-Verteilung kann diversen Stochastik Büchern entnommen werden und wird im Folgenden nicht explizit angeschrieben, da es sich bei der vorliegenden Berechnung ohnehin um eine numerische Berechnung handelt, die ohne das erzeugte Parameterfeld nicht reproduzierbar ist. Bei der Berechnung wurde auf das *statistics* Paket von Octave 5.1.0 zurückgegriffen, das die t-Verteilung als Funktion enthält. Daraus ergeben sich die Gleichungen für die Vertrauensbereiche zu:

$$\begin{aligned} m_{\text{Vertrauensbereich}}(l) &= m_{regr}(l) \pm S_{Fehler,m,N=1000}(l) \cdot t^{-1}\left(1 - \frac{a_m}{2}, N-2\right) \\ z_{\text{Vertrauensbereich}}(f) &= z_{regr}(f) \pm S_{Fehler,z,N=1000}(f) \cdot t^{-1}\left(1 - \frac{a_z}{2}, N-2\right) \end{aligned} \quad (5.7)$$

Dabei bezeichnet t^{-1} die inverse t-Verteilung deren Freiheitsgrad mit $N - 2 = 998$ gewählt wird. Somit sind die Vertrauensbereiche numerisch berechnet. Aufgrund der Wahl der Konfidenzniveaus von 0.98 handelt es sich dabei um 98% Vertrauensbereiche. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine zukünftige Stichprobe innerhalb des jeweiligen Vertrauensbereiches liegt beträgt also 98%. Die Vertrauensbereiche sind in Abb. 5.17 dargestellt.

5. In einem weiteren Schritt werden Grenzfunktionen gewählt. Die Grenzen für l und m ergeben sich aus den im zweiten Unterpunkt angeführten Fraktalwerten (mit Ausnahme der Untergrenze für die Stützweite l , die mit $l_u = 5\text{m}$ gewählt wird). Die Grenzen für die Massenbelegung m und Dämpfung z ergeben sich wie folgt: Die Vertrauensbereiche werden zunächst so parallelverschoben, dass sie den Bereich der Stichproben besser abdecken. Dabei wird darauf geachtet, dass zumindest nicht weniger – bestenfalls sogar mehr – Stichproben innerhalb der verschobenen Vertrauensbereiche liegen, als innerhalb des Vertrauensbereiches. Danach werden die verschobenen Vertrauensbereiche teilweise durch konstante Funktionen

ersetzt. Dabei wird ebenfalls darauf geachtet, dass es zu keiner wesentlichen Reduktion der Stichproben kommt, die im Inneren des so eingegrenzten Bereiches liegen. Letztendlich werden die so erhaltenen Bereichsgrenzen noch insofern angepasst, als dass die eigentlich nichtlinearen verschobenen Vertrauensbereiche durch lineare Funktionen ersetzt werden. Von der Nichtlinearität der Funktionen, die die Vertrauensbereiche beschränken, kann man sich anhand von (5.7) überzeugen. Somit ergeben sich folgende Grenzfunktionen, die in Abb. 5.17 dargestellt sind:

$$\begin{aligned}
 m_{\text{Obergrenze}} &= \begin{cases} 0.430 \cdot l + 52.953 \text{ t/m} & \text{wenn } 5\text{m} \leq l \leq 16.4\text{m} \\ 60 \text{ t/m} & \text{wenn } 16.4\text{m} < l \leq 31.47\text{m} \end{cases} \\
 m_{\text{Untergrenze}} &= \begin{cases} 5 \text{ t/m} & \text{wenn } 5\text{m} \leq l \leq 19.1\text{m} \\ 0.409 \cdot l - 2.811 \text{ t/m} & \text{wenn } 19.1\text{m} < l \leq 31.47\text{m} \end{cases} \\
 z_{\text{Obergrenze}} &= \begin{cases} 0.0360 \cdot f + 2.4420 \% & \text{wenn } 1.26\text{Hz} \leq f \leq 15.5\text{Hz} \\ 3 \% & \text{wenn } 15.5\text{Hz} < f \leq 33.85\text{Hz} \end{cases} \\
 z_{\text{Untergrenze}} &= 0.0356 \cdot f + 0.6200 \% \quad \text{wenn } 1.26\text{Hz} \leq f \leq 33.85\text{Hz} \quad (5.8)
 \end{aligned}$$

6. Danach werden die Randextrema, also die extremalen Produkte $l \cdot m$ sowie $f \cdot z$, aus den gewählten Grenzfunktionen aus (5.8) berechnet. Sie liegen jeweils am rechten oberen bzw. linken unteren Randpunkt der durch die Grenzfunktionen beschränkten Bereiche in Abb. 5.17 und ergeben sich zu:

$$\begin{aligned}
 (l \cdot m)_{\text{max}} &= 1888.1 \text{ t} \\
 (l \cdot m)_{\text{min}} &= 25 \text{ t} \\
 (f \cdot z)_{\text{max}} &= 101.560 \text{ Hz} \cdot \% \\
 (f \cdot z)_{\text{min}} &= 0.783 \text{ Hz} \cdot \% \quad (5.9)
 \end{aligned}$$

7. Die Randextrema werden, wie in Abb. 5.18 dargestellt, in die lm - fz -Ebene übertragen.
8. In der lm - fz -Ebene werden nun vier zusätzliche Grenzfunktionen gewählt, die manuell so in die Ebene gelegt werden, dass 93.6 % aller 1000 Stichproben des Parameterfeldes zwischen ihnen liegen. Die Berechnung der erwähnten Wahrscheinlichkeit von 93.6 % anhand des gegebenen Parameterfeldes ist trivial und kann dem Program Code aus Anhang C entnommen werden. Außerdem wird darauf Wert gelegt, dass die Grenzfunktionen die Stichproben des Parameterfeldes gut umschließen. Dies wird durch visuelle Kontrolle sichergestellt. Die ersten beiden gewählten Grenzfunktionen lauten:

$$\begin{aligned}
 (f \cdot z)_{\text{Obergrenze}} &= \begin{cases} 70 \text{ Hz} \cdot \% & \text{wenn } 25 \text{ t} \leq l \cdot m \leq 148.9 \text{ t} \\ 5503.7 \cdot (l \cdot m)^{-0.85} - 8.2541 \text{ Hz} \cdot \% & \text{wenn } 148.9 \text{ t} \leq l \cdot m \leq 1888.1 \text{ t} \end{cases} \\
 (f \cdot z)_{\text{Untergrenze}} &= 5503.7 \cdot (l \cdot m + 290)^{-0.85} - 25.2541 \text{ Hz} \cdot \% \quad \text{wenn } 25 \text{ t} \leq l \cdot m \leq 1888.1 \text{ t} \quad (5.10)
 \end{aligned}$$

Die beiden zweiten gewählten Grenzfunktionen ergeben sich aus den Randextrema für $l \cdot m$. Sie lauten:

$$\begin{aligned}
 (l \cdot m)_{\text{Obergrenze}} &= (l \cdot m)_{\text{max}} = 1888.1 \text{ t} \\
 (l \cdot m)_{\text{Untergrenze}} &= (l \cdot m)_{\text{min}} = 25 \text{ t} \quad (5.11)
 \end{aligned}$$

Somit sind alle Grenzfunktionen bekannt.

9. Abschließend wird mittels Pfadwahrscheinlichkeit die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine zukünftige Stichprobe des Parameterfeldes innerhalb der zwölf Grenzfunktionen aus (5.2), (5.8), (5.10) und (5.11) liegt, bestimmt. Sie ergibt sich unter Berücksichtigung von (5.1) und der Wahrscheinlichkeit von 93.6 % für die Grenzfunktionen aus (5.10) zu

$$P_{ges} \approx P_l \cdot P_m \cdot P_f \cdot P_z \cdot P_{fz} = 0.98^4 \cdot 0.936 = 0.863 = 86.3 \% \quad (5.12)$$

Dabei handelt es sich um einen geschätzten Wert, da die Grenzen in (5.8) nicht aus den eigentlichen Vertrauensbereichen selbst stammen, sondern aus aus ihnen hervorgehenden, manuell angepassten, parallelverschobenen sowie linearisierten Grenzfunktionen. Allerdings wurde dabei so vorgegangen, dass die tatsächliche Wahrscheinlichkeit für zukünftige Stichproben innerhalb des von den Grenzfunktionen beschränkten Bereichs zu liegen sehr wahrscheinlich sogar größer ist als P_{ges} . Außerdem wird auf der sicheren Seite liegend angenommen, dass die Einzelwahrscheinlichkeiten innerhalb der jeweiligen Grenzfunktionen zu liegen unabhängig voneinander sind.

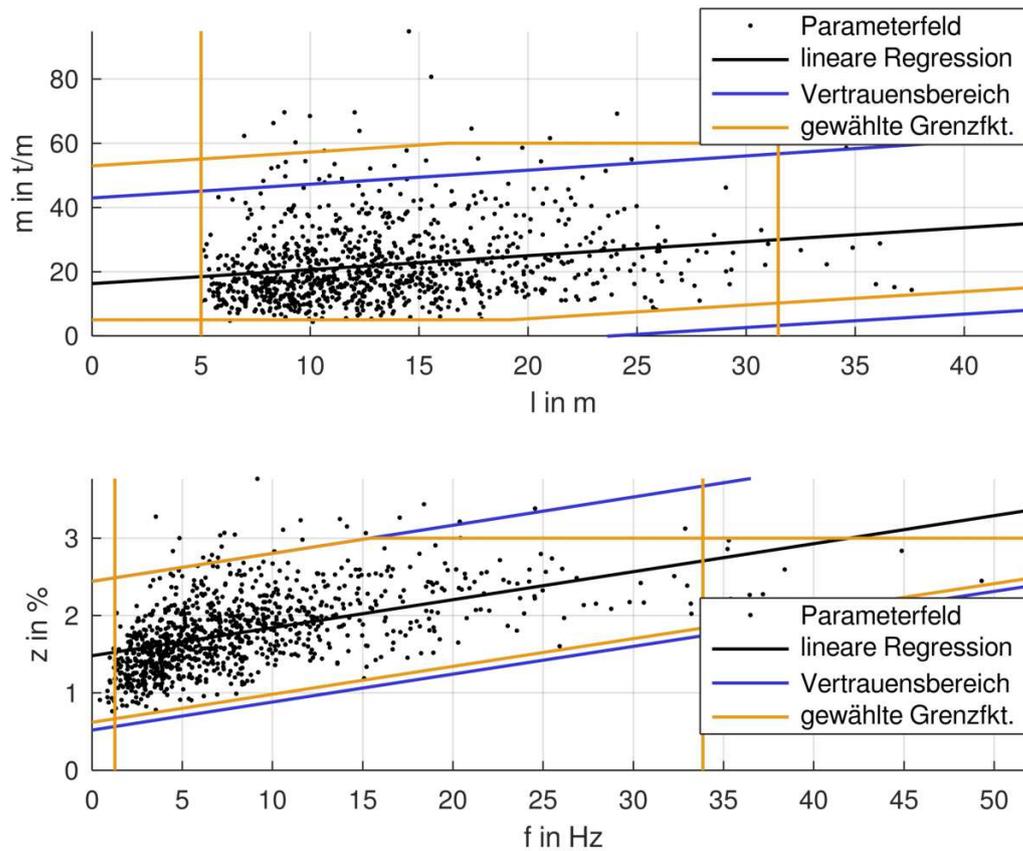


Abb. 5.17: Parameterfeld bestehend aus 1000 Brückentragwerken in Abhängigkeit der Brückenparameter Stützweite l , Massenbelegung m , erste Biegeeigenfrequenz f und Dämpfung z gemäß [9]. Der Definitionsbereich für die lineare Interpolationsfunktion $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ wird von den gewählten Grenzfunktionen (orange), die durch das manuelle verschieben und Anpassen von Vertrauensbereichen erhalten werden, beschränkt.

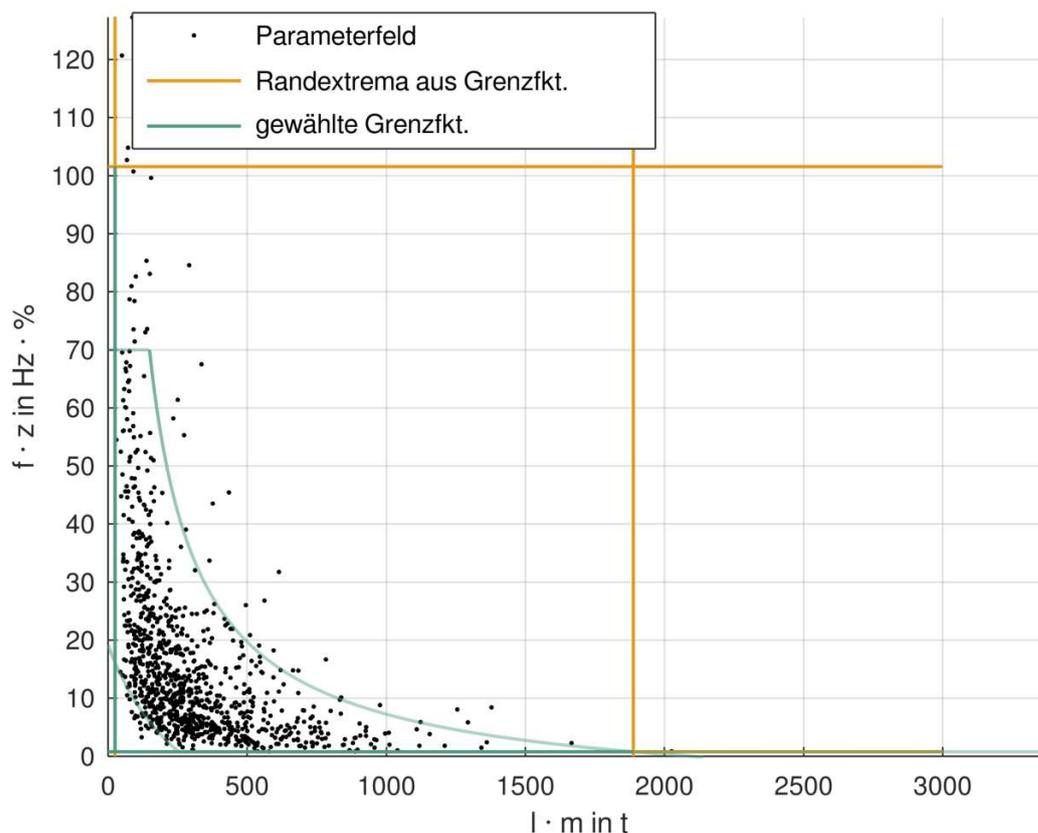


Abb. 5.18: Parameterfeld bestehend aus 1000 Brückentragwerken in Abhängigkeit der Brückenparameter Stützweite l , Massenbelegung m , erste Biegeeigenfrequenz f und Dämpfung z gemäß [9]. Der Definitionsbereich für die lineare Interpolationsfunktion $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ wird von den gewählten Grenzfunktionen (grün) beschränkt.

Der soeben durch Grenzfunktionen eingegrenzte Bereich wird als Definitionsbereich der linearen Interpolationsfunktion $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ gewählt. Der Definitionsbereich ist in Abb. 5.17 und Abb. 5.18 visualisiert, wobei beide Abbildungen gleichzeitig zu betrachten sind, da sie nur gemeinsam Aufschluss über den Definitionsbereich geben. Geht man davon aus, dass das Parameterfeld aus Unterkapitel 3.3 die Grundgesamtheit aller Einfeldträgerbrücken mit Stützweiten bis zu 40 m in guter Näherung beschreibt, ist unter Berücksichtigung von (5.12) außerdem folgende Aussage zulässig: Die Wahrscheinlichkeit, dass eine reale Brücke innerhalb des Definitionsbereiches von $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ liegt beträgt circa 86.3 %.

5.5 Anwendungsbeispiel

Im Folgenden wird gezeigt, wie die Berechnungsergebnisse aus Unterkapitel 5.1 herangezogen werden können, um für ein konkretes Brückentragwerk aus den Berechnungsergebnissen einer

MLM Berechnung auf die Berechnungsergebnisse einer DIM Berechnung zu schließen. Es wird eine dynamische Berechnung mittels MLM an folgender Brücke durchgeführt:

$$\begin{aligned} l &= 10 \text{ m} \\ m &= 20 \text{ t/m} \\ f &= 5 \text{ Hz} \\ z &= 1.5 \text{ \%} \end{aligned} \quad (5.13)$$

Dabei wird eine Zugüberfahrt der ersten Zugkonfiguration aus Unterkapitel 4.1.2 – also acht Reisezugwagen des Railjet – simuliert. Der resultierende Verlauf der maximalen Vertikalbeschleunigung aus der MLM Berechnung ist in Abb. 5.19 dargestellt. Man erhält einen Maximalwert der Vertikalbeschleunigung von

$$a_{MLM,max} = 10.73 \text{ m/s}^2 \quad (5.14)$$

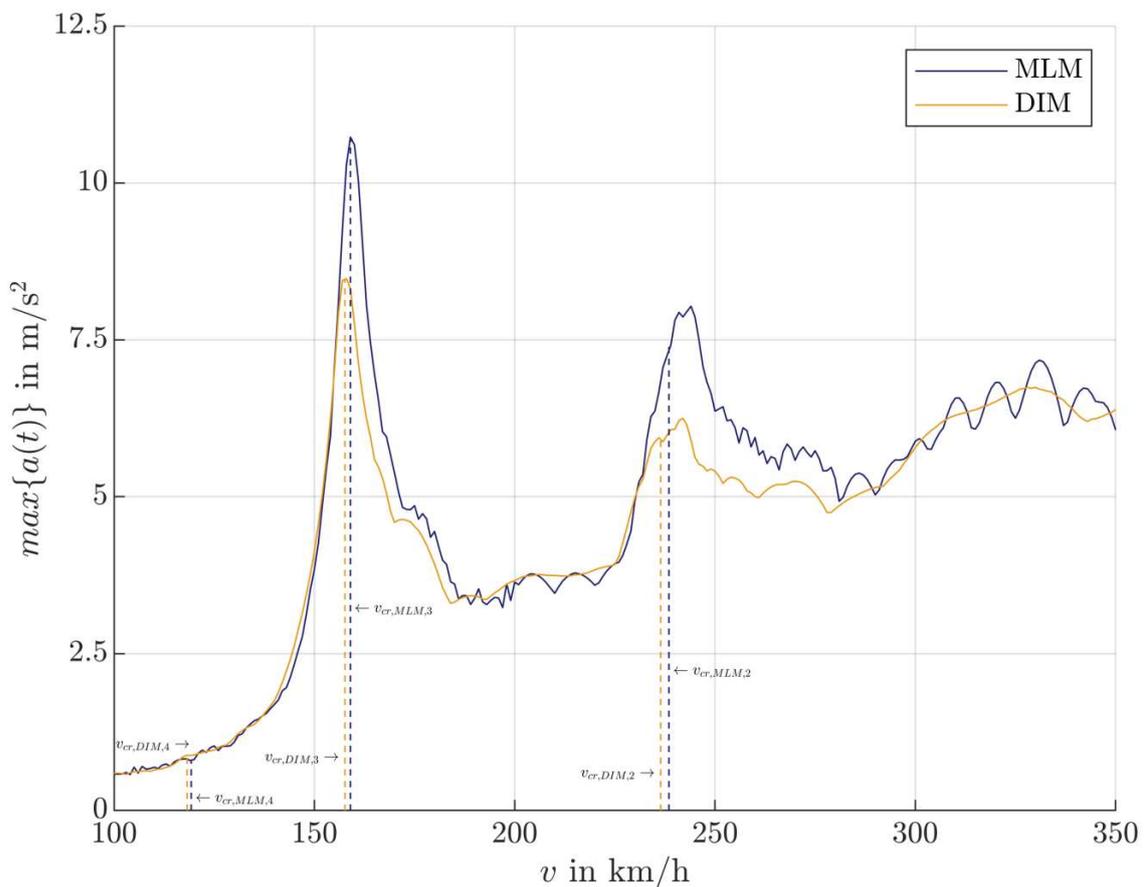


Abb. 5.19: Maximum der Vertikalbeschleunigung aus dem Zeitverlauf in Brückenmitte ($x = \frac{l}{2}$) für eine Brücke mit Stützweite $l = 10$ m, Massenbelegung $m = 20$ t/m, erster Biegeeigenfrequenz $f = 5$ Hz und Lehrschem Dämpfungsmaß $z = 1.5$ %.

Es werden nun die Berechnungsergebnisse aus Abb. 5.1 bzw. Abb. 5.2 angewendet, um aus der maximalen Vertikalbeschleunigung der MLM Berechnung $a_{MLM,max}$ die maximale

Vertikalbeschleunigung der zugehörigen DIM Berechnung $a_{DIM,max}$ zu bestimmen. Zunächst müssen die Parameterprodukte $l \cdot m$ und $f \cdot z$ berechnet werden.

$$\begin{aligned} l \cdot m &= 200 \quad \text{t} \\ f \cdot z &= 7.5 \quad \text{Hz} \cdot \% \end{aligned} \quad (5.15)$$

Danach gilt es, die Anwendungsgrenzen, die durch (5.2), (5.8), (5.10) und (5.11) definiert sind, zu überprüfen. Man erhält

$$\begin{aligned} l_u = 5 \leq l = 10 \leq l_{99\%} = 31.47 \quad \text{in m} & \quad OK \quad \checkmark \\ f_{1\%} = 1.26 \leq f = 5 \leq f_{99\%} = 33.85 \quad \text{in Hz} & \quad OK \quad \checkmark \\ m_{\text{Untergrenze}} = 5 \leq m = 20 \leq m_{\text{Obergrenze}} = 57.253 \quad \text{in t/m} & \quad OK \quad \checkmark \\ z_{\text{Untergrenze}} = 0.798 \leq z = 1.5 \leq z_{\text{Obergrenze}} = 2.622 \quad \text{in \%} & \quad OK \quad \checkmark \\ fz_{\text{Untergrenze}} = 3.190 \leq fz = 7.5 \leq fz_{\text{Obergrenze}} = 52.669 \quad \text{in Hz} \cdot \% & \quad OK \quad \checkmark \\ lm_{\text{Untergrenze}} = 25 \leq lm = 200 \leq lm_{\text{Obergrenze}} = 1888.1 \quad \text{in t} & \quad OK \quad \checkmark \end{aligned} \quad (5.16)$$

Die Anwendungsgrenzen sind erfüllt. Danach wird die Interpolationsfunktion $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ bestimmt. Sie ist eine lineare Interpolation zwischen den Vertikalbeschleunigungsdifferenzen

$$\Delta a_{max,s} = a_{MLM,max,s} - a_{DIM,max,s}$$

Die Bestimmung von $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ erfolgt gemäß der Tabelle aus Anhang E. Dabei wird auf der $f \cdot z$ -Achse zwischen den Werten 7 und 8 linear interpoliert. Man erhält für das gewählte Brückentragwerk

$$\Delta a_{max,interp}(l = 10, m = 20, f = 5, z = 1.5) = \frac{3.13 + 2.10}{2} = 2.62 \quad \text{m/s}^2 \quad (5.17)$$

Ist $\Delta a_{max,interp}$ bekannt, lässt sich ein Abschätzungswert für die maximale Vertikalbeschleunigung einer DIM Berechnung $a_{DIM,max,Absch}$ bestimmen. Mit (5.14) und (5.17) erhält man

$$a_{DIM,max,Absch} = a_{MLM,max} - \Delta a_{max,interp} = 10.73 - 2.62 = 8.11 \quad \text{m/s}^2 \quad (5.18)$$

Der tatsächliche Wert der maximalen Vertikalbeschleunigung, der aus einer DIM Berechnung für das gewählte Brückentragwerk resultiert, beträgt gemäß Abb. 5.19

$$a_{DIM,max} = 8.48 \quad \text{m/s}^2 \quad (5.19)$$

Der relative Fehler, der durch eine Anwendung Berechnungsergebnisse aus der Tabelle aus Anhang E entsteht, beträgt

$$\hat{f}_{a,DIM,max,rel} = \left| \frac{a_{DIM,max} - a_{DIM,max,Absch}}{a_{DIM,max}} \right| = \left| \frac{8.48 - 8.11}{8.48} \right| = 0.03 = 3\% \quad (5.20)$$

Kapitel 6

Feder-Dämpfer-Modelle

Im vorliegenden Kapitel wird die dritte Kernfrage aus Unterkapitel 1.3 behandelt. Es werden also die Berechnungsergebnisse $\Delta a_{max,s}$ bzw. $\Delta a_{max,p}$ aus Kapitel 5 in Bezug zu Berechnungsergebnissen aus wesentlich einfacheren Feder-Dämpfer-Modellen gesetzt. Dazu werden folgende zwei Feder-Dämpfer-Modelle herangezogen:

1. Single Degree of Freedom System (SDOF) – Einmassenschwinger
2. Multiple Degree of Freedom System (MDOF) – Mehrfreiheitsgradsystem (im Folgenden speziell: Zweimassenschwinger)

Jedes Single Degree of Freedom System (SDOF) repräsentiert eine Moving Load Model (MLM) Berechnung und jedes Multiple Degree of Freedom System (MDOF) eine Detailed Interaction Model (DIM) Berechnung. Dabei werden Die Brückenparameter des Parameterfeldes aus Unterkapitel 3.3 – sowie im Falle des MDOF einige Zugparameter – den SDOFs bzw. MDOFs zugeordnet. Die so für jedes Tragwerk des Parameterfeldes erhaltenen Feder-Dämpfer-Modelle werden im Anschluss daran mit einer einheitlichen Kraftamplitude P_0 harmonisch angeregt. Die aus der Anregung erhaltenen Vertikalbeschleunigungsdifferenzen der maximalen Vertikalbeschleunigung zwischen MDOF und SDOF werden dann mit den Berechnungsergebnissen aus Kapitel 5 verglichen.

Im Folgenden wird daher zunächst auf die Modellbildung des SDOF, dann auf die des MDOF und schließlich auf die Bestimmung der Vertikalbeschleunigungsdifferenzen zwischen allen MDOF und SDOF Berechnungen eingegangen. Zu guter Letzt erfolgt dann ein Vergleich dieser Vertikalbeschleunigungsdifferenzen mit den Berechnungsergebnissen aus Kapitel 5. Aus diesem Vergleich wird ein Zusammenhang zwischen den Vertikalbeschleunigungsdifferenzen und den genannten Berechnungsergebnissen bestimmt. Dabei werden alle Berechnungen mit Matlab R2018b durchgeführt. Der verwendete Program Code ist in Anhang D abgedruckt.

6.1 SDOF – Einmassenschwinger

Das verwendete SDOF ist in Abb. 6.1 dargestellt. Es repräsentiert den Brückenbalken, der im Laufe einer MLM Berechnung mit der Kraft $P(t)$, die in ihrer Größenordnung den Achslasten des Railjet entspricht, harmonisch angeregt wird.

$$P(t) = P_0 \cdot \sin(\Omega t) \quad (6.1)$$

Dabei bezeichnet Ω die Erregerkreisfrequenz und P_0 die Kraftamplitude. Die Kraftamplitude wird dabei für alle SDOF einheitlich zu

$$P_0 = 100 \text{ kN} \quad (6.2)$$

gewählt, da dies der Dimension der Achslasten P_k aus Tab. 4.1 entspricht.

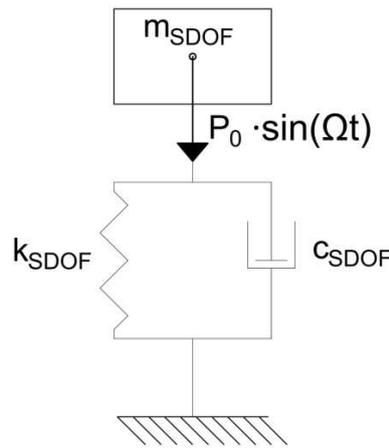


Abb. 6.1: Single Degree of Freedom System (SDOF) mit der Kraftamplitude $P_0 = 100\text{kN}$ und der Erregerkreisfrequenz Ω . Die Masse m_{SDOF} , Federsteifigkeit k_{SDOF} und Dämpfungskonstante c_{SDOF} ergeben sich aus den Werten der Brückenparameter des jeweiligen Tragwerks.

Die dem SDOF zugeordnete Masse m_{SDOF} , Federsteifigkeit k_{SDOF} bzw. Dämpfung z_{SDOF} ergibt sich unter Berücksichtigung von (2.19) aus der modalen Brückenmasse, modalen Federsteifigkeit bzw. der modalen Dämpfung des Brückentragwerks. Dabei kommt eine Analogiebetrachtung von (2.18) und einem allgemeinen SDOF zur Anwendung. Somit ergibt sich unter zusätzlicher Berücksichtigung von (2.16) und (2.20)

$$m_{SDOF} = \frac{m \cdot l}{2}$$

$$\omega_{SDOF} = 2\pi f$$

$$k_{SDOF} = m_{SDOF} \cdot \omega_{SDOF}^2$$

$$z_{SDOF} = z \quad (6.3)$$

$$c_{SDOF} = 2 \cdot m_{SDOF} \cdot z_{SDOF} \cdot \omega_{SDOF} \quad (6.4)$$

wobei ω_{SDOF} die erste Eigenkreisfrequenz des SDOF bezeichnet. Es wurde hierbei Gebrauch vom allgemeinen Zusammenhang des Einmassenschwingers

$$\omega_{SDOF} = \sqrt{\frac{k_{SDOF}}{m_{SDOF}}} \quad (6.5)$$

gemacht. Dabei ist darauf zu achten, dass für Dämpfung (Lehrsches Dämpfungsmaß) z_{SDOF} dimensionslose Werte – also nicht wie oben %-Werte – heranzuziehen sind. Die maximale Vertikalbeschleunigung des SDOF ergibt sich gemäß Petersen und Werkle [15] zu

$$a_{SDOF,max} = \frac{P_0}{m_{SDOF}} \cdot \eta_{SDOF}^2 \cdot V_{SDOF}(\eta_{SDOF}) \quad (6.6)$$

Hierbei steht η_{SDOF} für die Abstimmung, die den Quotienten aus Erreger- und Eigenkreisfrequenz des SDOF bezeichnet.

$$\eta_{SDOF} = \frac{\Omega}{\omega_{SDOF}} \quad (6.7)$$

Die dabei auftretende dynamische Vergrößerungsfunktion V_{SDOF} hat folgende Gestalt [15]:

$$V_{SDOF}(\eta_{SDOF}) = \frac{1}{\sqrt{[1 - \eta_{SDOF}]^2 + (2 \cdot z_{SDOF} \cdot \eta_{SDOF})^2}} \quad (6.8)$$

Aus (6.3), (6.6), (6.7) und (6.8) ergibt sich, dass für jedes Brückentragwerk des Parameterfeldes, dessen Stützweite l , Massenbelegung m , erste Biegeeigenfrequenz f sowie Dämpfung z bekannt sind, die maximale Vertikalbeschleunigung $a_{SDOF,max}$ in Abhängigkeit der Erregerkreisfrequenz Ω bzw. der Abstimmung η_{SDOF} berechnet werden kann. Daraus erhält man für alle Brückentragwerke des Parameterfeldes die Vertikalbeschleunigungen

$$a_{SDOF,max,s}(\eta_{SDOF,s}) \quad (6.9)$$

wobei der Subindex „s“ – wie oben – das jeweilige Brückentragwerk bezeichnet.

6.2 MDOF – Zweimassenschwinger

Das verwendete MDOF ist in Abb. 6.2 dargestellt. Es repräsentiert den Brückenbalken, der im Laufe einer DIM Berechnung mit der Kraft $P(t)$, die in ihrer Größenordnung den Achslasten des Railjet entspricht, harmonisch angeregt wird. Es wird analog zu den Überlegungen von Stollwitzer [17] (siehe „Berechnungsansatz 3“ aus Unterkapitel 2.3.2) davon ausgegangen, dass die Radsätze eines Drehgestells mit der Brücke mitschwingen. Dabei wird das Drehgestell über die Primärstufe aus Abb. 2.3 an die Brücke gekoppelt, wodurch ein Zweimassenschwinger entsteht. Daher werden zwei Radsatzmassen zu $m_w = 1900$ kg zur modalen Brückenmasse addiert. Die Radsatzmassen werden Tab. 4.1 entnommen und entsprechen jenen des Reisezugwagens.

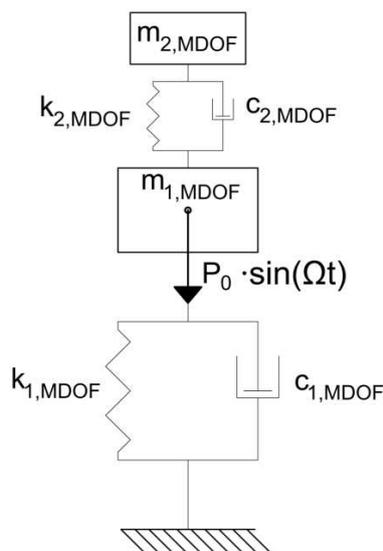


Abb. 6.2: Multiple Degree of Freedom System (MDOF) mit der Kraftamplitude $P_0 = 100\text{kN}$ und der Erregerkreisfrequenz Ω . Die Masse $m_{1,MDOF}$, Federsteifigkeit $k_{1,MDOF}$ und Dämpfungskonstante $c_{1,MDOF}$ des Hauptsystems ergeben sich aus den Werten der Brückenparameter des jeweiligen Tragwerks (Im Falle der Masse $m_{1,MDOF}$ werden zur modalen Brückenmasse zwei Radsatzmassen addiert). Die Masse $m_{2,MDOF}$, Federsteifigkeit $k_{2,MDOF}$ und Dämpfungskonstante $c_{2,MDOF}$ des Sekundärsystems ergeben sich aus den mechanischen Eigenschaften der Primärstufe bzw. des Drehgestells des Reisezugwagens des Railjet gemäß Tab. 4.1.

Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich durch dieselbe Überlegung wie beim SDOF die Massen, Federsteifigkeiten und Dämpfungen (Lehrsche Dämpfungsmaße) des Mehrmassenschwingers unter Berücksichtigung von Tab. 4.1 (es werden die mechanischen Eigenschaften der Primärstufe des Reisezugwagens zur Berechnung herangezogen) zu:

$$\begin{aligned}
 m_{1,MDOF} &= \frac{m \cdot l}{2} + 2 \cdot m_w \\
 \omega_{1,MDOF} &= 2\pi f \\
 k_{1,MDOF} &= m_{SDOF} \cdot \omega_{1,MDOF}^2 \\
 z_{1,MDOF} &= z \\
 c_{1,MDOF} &= 2 \cdot m_{1,MDOF} \cdot z_{1,MDOF} \cdot \omega_{1,MDOF}
 \end{aligned} \tag{6.10}$$

$$\begin{aligned}
 m_{2,MDOF} &= m_b = 2800 \text{ kg} \\
 k_{2,MDOF} &= k_p = 1690000 \text{ N/m} \\
 \omega_{2,DOF} &= \sqrt{\frac{k_{2,MDOF}}{m_{2,MDOF}}} \\
 z_{2,MDOF} &= \frac{c_p}{2 \cdot m_{2,MDOF} \cdot \omega_{2,MDOF}}
 \end{aligned} \tag{6.11}$$

mit

$$c_p = 20000 \text{ Ns/m}$$

Um die dynamische Vergrößerungsfunktion des MDOF zu berechnen, müssen zunächst folgende Hilfwerte berechnet werden [15]:

$$\begin{aligned}
 \kappa &= \frac{\omega_{2,MDOF}}{\omega_{1,MDOF}} && \text{Verstimmung} \\
 \eta_{MDOF} &= \frac{\Omega}{\omega_{1,MDOF}} && \text{Abstimmung} \\
 \mu &= \frac{m_{2,MDOF}}{m_{1,MDOF}} && \text{Massenverhältnis} \\
 b_1 &= \kappa^2 - \eta_{MDOF}^2 \\
 b_2 &= 2 \cdot \eta_{MDOF} \cdot \kappa \cdot z_{2,MDOF} \\
 b_3 &= \eta_{MDOF}^4 - \eta_{MDOF}^2 \cdot (1 + \kappa^2 + \mu \cdot \kappa^2 + 4\kappa \cdot z_{1,MDOF} \cdot z_{2,MDOF}) + \kappa^2 \\
 b_4 &= \eta_{MDOF} \cdot \left[2 \cdot z_{1,MDOF} \cdot (\kappa^2 - \eta_{MDOF}^2) + 2 \cdot \kappa \cdot z_{2,MDOF} \cdot (1 - \eta_{MDOF}^2 - \mu \cdot \eta_{MDOF}^2) \right]
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

Damit ergibt sich die dynamische Vergrößerungsfunktion des Hauptsystems zu

$$V_{MDOF}(\eta_{MDOF}) = \sqrt{\frac{b_1^2 + b_2^2}{b_3^2 + b_4^2}} \tag{6.13}$$

und die maximale Vertikalbeschleunigung des Hauptsystems (Subindex „1“), also der Brücke, zu

$$a_{MDOF,max} = \omega_{1,MDOF}^2 \cdot \eta_{MDOF}^2 \cdot V_{MDOF}(\eta_{MDOF}) \cdot \frac{P_0}{k_{1,MDOF}} \tag{6.14}$$

Unter Berücksichtigung von (6.10), (6.12) und (6.14) lassen sich die maximalen Vertikalbeschleunigungen

$$a_{MDOF,max,s}(\eta_{MDOF}) \tag{6.15}$$

für alle Brücken „s“ des Parameterfeldes in Abhängigkeit der Abstimmung η_{MDOF} berechnen.

6.3 Gegenüberstellung von Berechnungsergebnissen – SDOF-MDOF versus MLM-DIM

Zunächst werden die Vertikalbeschleunigungsdifferenzen

$$\Delta a_{M-S-DOF,max,s}(\eta) = a_{SDOF,max,s} - a_{MDOF,max,s} \tag{6.16}$$

für bestimmte kritischen Geschwindigkeiten berechnet, um diese mit den Berechnungsergebnissen aus Kapitel 5 vergleichen zu können. Dabei legt die jeweilige kritische Geschwindigkeit die Abstimmung $\eta = \eta_{MDOF} = \eta_{SDOF}$ fest, von der die Vertikalbeschleunigungsdifferenz $\Delta a_{M-S-DOF,max,s}$ abhängt. Dabei gilt für die j-te kritische Geschwindigkeit unter Berücksichtigung von $\omega_{SDOF} = \omega_{1,MDOF} = \omega$ gemäß (6.3) und (6.10) folgender Zusammenhang für η :

$$\eta_j = \frac{\Omega_j}{\omega} = \frac{1}{j} \quad j \in \mathbb{N} \tag{6.17}$$

Dieser Zusammenhang ist durch folgende Überlegung begründet: Gleicht die Überfahrtsgeschwindigkeit der ersten kritischen Geschwindigkeit, tritt die größtmögliche Anregung des Systems

auf. Gleich die Überfahrtsgeschwindigkeit der j -ten Überfahrtsgeschwindigkeit, die entsprechend (2.34) der j -te Bruchteil der ersten kritischen Geschwindigkeit ist, schwingt der Brückenbalken j -mal so oft, bis er wieder durch eine überfahrende Last angeregt wird. Somit muss sich die Erregerkreisfrequenz Ω mit zunehmendem Index j wie folgt verringern:

$$\Omega = \Omega_j = \frac{\Omega_1}{j} = \frac{\omega}{j} \quad j \in \mathbb{N} \quad (6.18)$$

6.3.1 Gegenüberstellung für die erste kritische Geschwindigkeit zwischen 100 und 350 km/h

Zunächst wird für jedes Brückentragwerk die maßgebliche Abstimmung η_j gemäß (6.17) bestimmt. Dabei wird jeweils der Index „ j “ jener kritischen Geschwindigkeit zwischen 100 km/h und 350 km/h herangezogen, bei der die maximale Vertikalbeschleunigung $\Delta a_{max,s}$ des jeweiligen Tragwerks auftritt. Dabei werden – wie in Unterkapitel 4.3.1 erläutert – nur die beiden größten kritischen Geschwindigkeit unter 350 km/h betrachtet. Somit können die maximalen Vertikalbeschleunigungen $a_{SDOF,max,s}$ und $a_{MDOF,max,s}$ entsprechend (6.6) und (6.14) für jedes Brückentragwerk des Parameterfeldes aus Unterkapitel 3.3 berechnet werden. Nun lässt sich $\Delta a_{M-S-DOF,max,s}$ gemäß (6.16) bestimmen.

Gegenüberstellung für die erste Zugkonfiguration

Zunächst werden die Berechnungsergebnisse aus Unterkapitel 5.1.1 für die erste Zugkonfiguration bestehend aus acht Reisezugwagen des Railjet gegenüber den berechneten Vertikalbeschleunigungsdifferenzen aus (6.16) aufgetragen. Die Differenzen $\Delta a_{M-S-DOF,max,s}$ werden mit dem Faktor 10^3 skaliert, da sie die Größenordnung 10^{-2} m/s² aufweisen. Die lineare Korrelation der so verglichenen Vertikalbeschleunigungsdifferenzen beträgt $r_{M-S-DOF,MLM-DIM,993} = 0.18$. Sie wird mit dem Korrelationsschätzer aus (3.3) berechnet. Es werden dabei dieselben sieben Brückentragwerke des Parameterfeldes wie in Unterkapitel 5.1.1 von den Berechnungsergebnissen der MDOF-SDOF-Berechnung ausgeschlossen. Damit ergeben sich die in Abb. 6.3 dargestellten Berechnungsergebnisse, die 993 Brückentragwerke des Parameterfeldes umfassen.

Um einen Zusammenhang der Vertikalbeschleunigungsdifferenzen $\Delta a_{M-S-DOF,max,s}$ und $\Delta a_{max,s}$ zu bestimmen, wird folgendermaßen vorgegangen:

1. Es wird eine polynomiale Interpolationsfunktion zwischen die errechneten Punkte, die in Abb. 6.3 dargestellt sind, gelegt. Sie ergibt sich zu

$$F_{interp}(10^3 \cdot \Delta a_{M-S-DOF,max}) = \sum_{k=0}^4 c_k \cdot 10^3 \cdot (\Delta a_{M-S-DOF,max})^k \quad (6.19)$$

mit

$$\begin{aligned} c_0 &= 1.13802 & c_1 &= 0.04381 & c_2 &= 0.00119 & c_3 &= 1.01721 \cdot 10^{-5} \\ c_4 &= 2.42436 \cdot 10^{-8} \end{aligned} \quad (6.20)$$

2. Die Interpolationsfunktion wird nach oben und nach unten verschoben um Grenzen eines Bandes zu erhalten. Dabei wird darauf geachtet, dass das Band, dessen Breite variiert,

möglichst viele Brückentragwerke des Parameterfeldes umfasst. Die Grenzfunktionen des Bandes ergeben sich zu

$$\begin{aligned} E_{\text{Obergrenze}} &= E_{\text{interp}}(10^3 \cdot \Delta a_{M-S-DOF,max}) + 3.0 \quad \text{m/s}^2 \\ E_{\text{Untergrenze}} &= E_{\text{interp}}(10^3 \cdot \Delta a_{M-S-DOF,max}) - 1.5 \quad \text{m/s}^2 \end{aligned} \quad (6.21)$$

3. Das Band wird an der Stelle $\Delta a_{M-S-DOF,max} = -50 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$ abgeschnitten, da links von diesem Wert ein näherungsweise konstanter Verlauf von $\Delta a_{max,s}$ zu beobachten ist. Dieser Vorgang wird durch die Vertikale in Abb. 6.3 dargestellt. Für eine Abschätzung reicht das Wissen um die Tatsache aus, dass im Bereich unter $\Delta a_{M-S-DOF,max} = -50 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$ mit einer Veränderung der Tragwerksantwort von circa $\pm 0.25 \text{ m/s}^2$ zu rechnen ist.
4. Abschließend werden alle Brückentragwerke betrachtet, die rechts der Vertikalen liegen. Es wird berechnet, wieviele Brückentragwerke innerhalb des durch die Grenzfunktionen begrenzten Bandes liegen. Somit kann auf die Wahrscheinlichkeit $P_{\text{innerhalb}}$ geschlossen werden, mit der zukünftige Stichproben des Parameterfeldes, für die $\Delta a_{M-S-DOF,max} > -50 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$ gilt, innerhalb des Bandes liegen. Die Berechnung ist trivial und wird nicht angeschrieben. Es ergibt sich

$$P_{\text{innerhalb}} = 0.92 = 92\% \quad (6.22)$$

Unter der Annahme, dass das Parameterfeld die Grundgesamtheit aller realen Einfeldträgerbrücken mit Stützweiten bis 40 m beschreibt, kann die Aussage (6.22) auf besagte Grundgesamtheit übertragen werden.

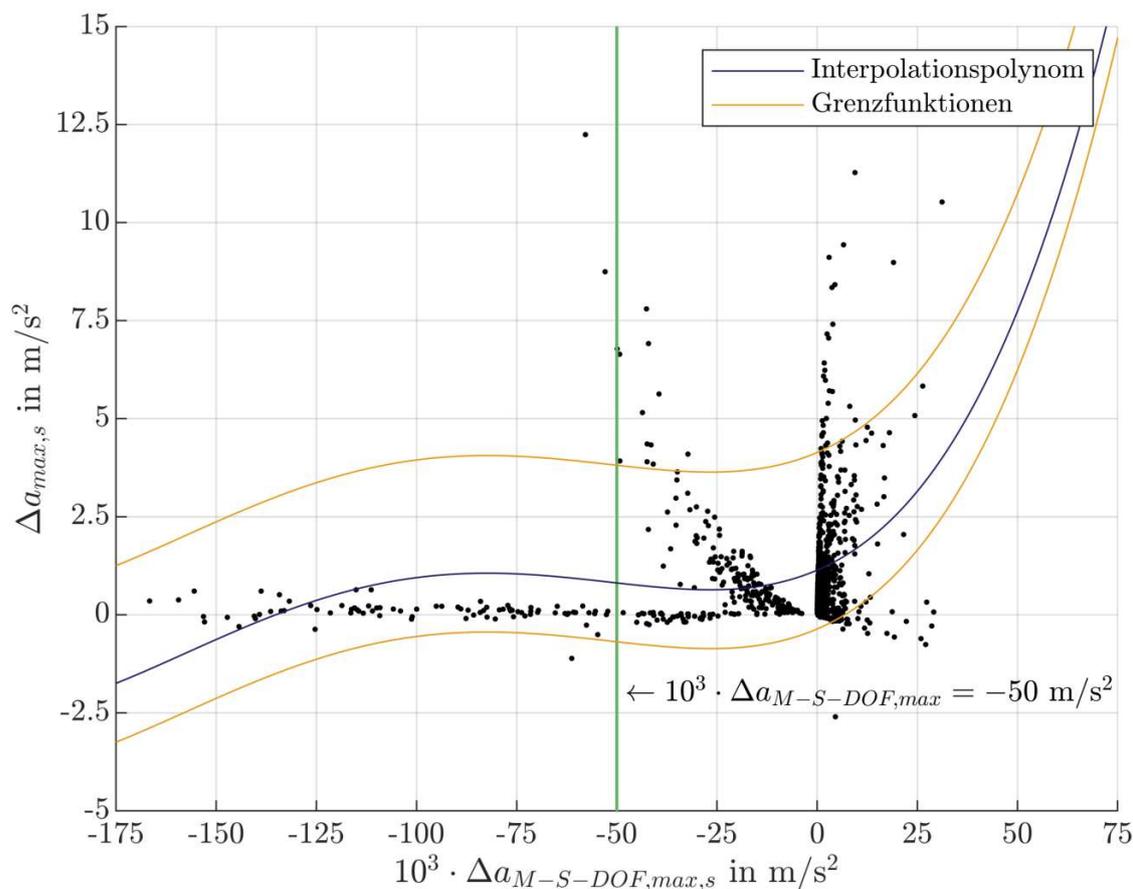


Abb. 6.3: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse einer MDOF-SDOF-Berechnung und einer MLM-DIM-Berechnung von 993 Brücken des Parameterfeldes. Das Band, das oben und unten von den Grenzfunktionen und links von der Vertikalen (grün) begrenzt wird, enthält 92% aller Tragwerke mit $\Delta a_{M-S-DOF,max} > -50 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$.

Abb. 6.3 zeigt, dass für die meisten Tragwerke des Parameterfeldes mit einer Vergrößerung oder aber einer geringen Reduktion von $\Delta a_{max,s}$ zu rechnen ist. Eine Vergrößerung von $\Delta a_{max,s}$ steht für eine Verbesserung der Tragwerksantwort (also einer geringeren maximalen Vertikalbeschleunigung in Brückenmitte) zufolge einer Berechnung mittels DIM. Anhand des Bandes, das von den Grenzfunktionen beschränkt wird, kann so aus einer MDOF-SDOF-Berechnung auf eine Bandbreite von $\Delta a_{max,s}$ geschlossen werden. Unterhalb von $\Delta a_{M-S-DOF,max} = -50 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$ ergibt sich eine konstante Bandbreite. Aufgrund der großen Streuung der Berechnungsergebnisse kann die in Abb. 6.3 dargestellte Bandbreite nur für eine grobe Abschätzung verwendet werden. Ihre Gültigkeit ist wahrscheinlich, aber nicht gewährleistet. Daher wird darauf verzichtet, den Definitionsbereich für die Brückenparameter einzuschränken.

Eine MDOF-SDOF-Berechnung kann also im Sinne einer Faustformel zur groben Abschätzung einer Bandbreite der Änderung der Tragwerksantwort zufolge einer DIM Berechnung herangezogen werden. Es gibt aber keine Garantie auf die Richtigkeit der erhaltenen Bandbreite.

Anhand von Abb. 6.3 lässt sich außerdem schlussfolgern, dass sich die Berechnungsergebnisse aus Kapitel 5 nur im Sinne einer Abschätzung in Form einer Bandbreite auf Feder-Dämpfer-Modelle zurückführen lassen.

Gegenüberstellung für die zweite Zugkonfiguration

Bei der zweiten Zugkonfiguration, die aus sieben Reisezugwagen des Railjet und einer Lok besteht, wird gleich vorgegangen wie bei der ersten Zugkonfiguration. Die lineare Korrelation der verglichenen Vertikalbeschleunigungsdifferenzen beträgt $r_{M-S-DOF,MLM-DIM,993} = 0.07$. Sie ist also sehr gering. Sämtliche Bemerkungen und Schlussfolgerungen können aufgrund der Ähnlichkeit der Berechnungsergebnisse aus Abb. 6.4 zu jenen aus Abb. 6.3 von oben übernommen werden. Damit erhält man mit obiger Vorgangsweise:

1. Es wird eine polynomiale Interpolationsfunktion zwischen die errechneten Punkte, die in Abb. 6.4 dargestellt sind, gelegt. Sie ergibt sich zu

$$F_{interp}(10^3 \cdot \Delta a_{M-S-DOF,max}) = \sum_{k=0}^4 c_k \cdot (10^3 \cdot \Delta a_{M-S-DOF,max})^k \quad (6.23)$$

mit

$$\begin{aligned} c_0 &= 0.88120 & c_1 &= 0.03875 & c_2 &= 0.00131 & c_3 &= 1.19360 \cdot 10^{-5} \\ c_4 &= 3.05138 \cdot 10^{-8} \end{aligned} \quad (6.24)$$

2. Die Grenzfunktionen des Bandes ergeben sich zu

$$\begin{aligned} E_{Obergrenze} &= F_{interp}(10^3 \cdot \Delta a_{M-S-DOF,max}) + 3.0 \quad \text{m/s}^2 \\ E_{Untergrenze} &= F_{interp}(10^3 \cdot \Delta a_{M-S-DOF,max}) - 1.5 \quad \text{m/s}^2 \end{aligned} \quad (6.25)$$

3. Das Band wird an der Stelle $\Delta a_{M-S-DOF,max} = -50 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$ abgeschnitten, da links von diesem Wert ein näherungsweise konstanter Verlauf von $\Delta a_{max,s}$ zu beobachten ist. Für eine Abschätzung der Vertikalbeschleunigungsdifferenzen reicht das Wissen um die Tatsache aus, dass im Bereich unter $\Delta a_{M-S-DOF,max} = -50 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$ mit einer Veränderung der Tragwerksantwort von circa $\pm 0.25 \text{ m/s}^2$ zu rechnen ist.

4. $P_{innerhalb}$ ergibt sich zu

$$P_{innerhalb} = 0.95 = 95\% \quad (6.26)$$

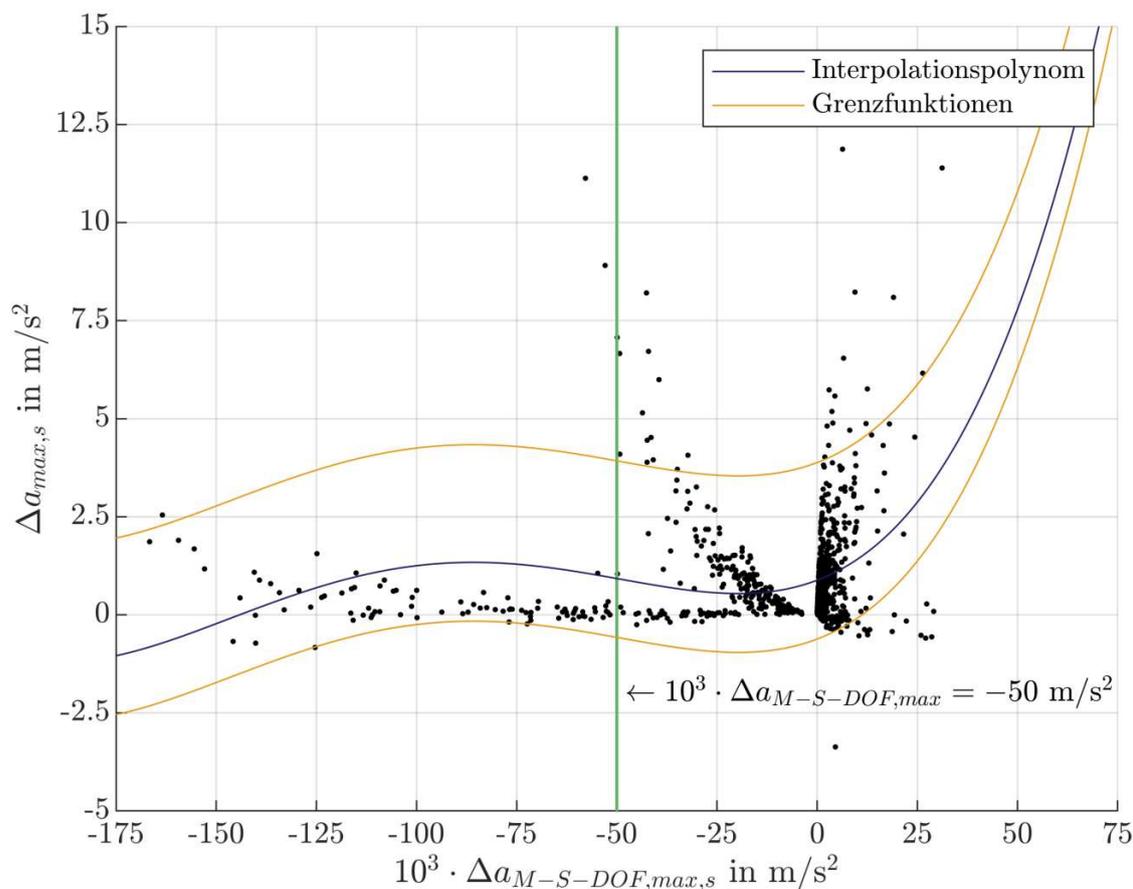


Abb. 6.4: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse einer MDOF-SDOF-Berechnung und einer MLM-DIM-Berechnung von 993 Brücken des Parameterfeldes. Das Band, das oben und unten von den Grenzfunktionen und links von der Vertikalen (grün) begrenzt wird, enthält 95% aller Tragwerke mit $\Delta a_{M-S-DOF,max} > -50 \cdot 10^3 \text{ m/s}^2$.

6.3.2 Gegenüberstellung für die erste kritische Geschwindigkeit

Für die erste kritische Geschwindigkeit gilt gemäß (6.17)

$$\eta = 1 \quad (6.27)$$

Somit können die maximalen Vertikalbeschleunigungen $a_{SDOF,max,p}$ und $a_{MDOF,max,p}$ entsprechend (6.6) und (6.14) für jedes Brückentragwerk des Parameterfeldes aus Unterkapitel 3.3 berechnet werden. Nun lässt sich $\Delta a_{M-S-DOF,max,p}$ gemäß (6.16) bestimmen, wobei der Subindex „p“ dem Subindex „s“ entspricht. Er wird verwendet um zu verdeutlichen, dass die erste kritische Geschwindigkeit zur Berechnung herangezogen wird. Die Vertikalbeschleunigungsdifferenzen $\Delta a_{M-S-DOF,max,p}$ werden in Bezug zu den Berechnungsergebnissen aus Unterkapitel 5.2 gesetzt. Dabei muss selbstverständlich zwischen den beiden Zugkonfigurationen aus Unterkapitel 4.1.2 unterschieden werden. Die Vorgangsweise für die erste kritische Geschwindigkeit entspricht grundsätzlich jener aus Unterkapitel 6.3.1. Allerdings wird aufgrund der größeren Streuung der Ergebnisse in einigen Details von der oben gewählten Vorgangsweise abgegangen.

Gegenüberstellung für die erste Zugkonfiguration

Zunächst werden die Berechnungsergebnisse aus Unterkapitel 5.2.1 für die erste Zugkonfiguration bestehend aus acht Reisezugwagen des Railjet gegenüber den berechneten Vertikalbeschleunigungsdifferenzen aus (6.16) aufgetragen, wobei – wie oben beschrieben – der Subindex „p“ verwendet wird. Die lineare Korrelation der so verglichenen Vertikalbeschleunigungsdifferenzen beträgt $r_{M-S-DOF,MLM-DIM,994} = -0.01$. Es gibt also keine lineare Korrelation zwischen den verglichenen Vertikalbeschleunigungsdifferenzen. Eine Skalierung von $\Delta a_{M-S-DOF,max}$ wird nicht vorgenommen.

Es werden dieselben sechs Brückentragwerke des Parameterfeldes wie in Unterkapitel 5.2.1 von den Berechnungsergebnissen der MDOF-SDOF-Berechnung ausgeschlossen. Damit ergeben sich die in Abb. 6.5 dargestellten Berechnungsergebnisse, die 994 Brückentragwerke des Parameterfeldes umfassen.

Um einen Zusammenhang der Vertikalbeschleunigungsdifferenzen $\Delta a_{M-S-DOF,max,p}$ und $\Delta a_{max,p}$ zu bestimmen, wird folgendermaßen vorgegangen:

1. Es wird eine polynomiale Interpolationsfunktion zwischen die errechneten Punkte, die in Abb. 6.5 dargestellt sind, gelegt. Sie ergibt sich zu

$$F_{interp}(\Delta a_{M-S-DOF,max}) = \sum_{k=0}^4 c_k \cdot (\Delta a_{M-S-DOF,max})^k \quad (6.28)$$

mit

$$\begin{aligned} c_0 &= 1.53263 & c_1 &= -1.25429 & c_2 &= 0.07828 & c_3 &= -0.00151 \\ c_4 &= 9.31420 \cdot 10^{-6} \end{aligned} \quad (6.29)$$

2. Die Interpolationsfunktion wird nach oben und nach unten verschoben um Grenzen eines Bandes zu erhalten. Da die Streuung von $\Delta a_{max,p}$ sehr groß ist (siehe Abb. 6.5), ist es unmöglich ein Band anzugeben, das sowohl mehr als 90 % aller Tragwerke umfasst als auch aussagekräftig ist (also bei dem die obere Grenzfunktion nicht gleich weit von Null entfernt ist wie die untere Grenzfunktion). Daher wird eine andere Vorgangsweise gewählt. Die Interpolationsfunktion wird so nach oben und nach unten verschoben, dass die dadurch erhaltenen Grenzfunktionen möglichst viele positive Werte von $\Delta a_{max,p}$ einschließen. Diese Vorgangsweise wird gewählt, damit aus dem erhaltenen Band zumindest folgende Aussage erhalten werden kann: „ $\Delta a_{max,p}$ einer gewählten Einfeldträgerbrücke liegt mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit innerhalb des Bandes. Es können aber große Abweichungen von den Werten, die das Band einschließt, auftreten.“ Die Grenzfunktionen des Bandes ergeben sich somit zu

$$\begin{aligned} F_{Obergrenze} &= F_{interp}(\Delta a_{M-S-DOF,max}) + 10 \quad \text{m/s}^2 \\ F_{Untergrenze} &= F_{interp}(\Delta a_{M-S-DOF,max}) - 2 \quad \text{m/s}^2 \end{aligned} \quad (6.30)$$

3. Alle berechneten $\Delta a_{M-S-DOF,max,p}$ sind größer als Null. Das Band wird nicht abgeschnitten.
4. Abschließend wird berechnet, wieviele Brückentragwerke innerhalb des durch die Grenzfunktionen begrenzten Bandes liegen. Somit kann auf die Wahrscheinlichkeit $P_{innerhalb}$

geschlossen werden, mit der zukünftige Stichproben des Parameterfeldes innerhalb des Bandes liegen. Die Berechnung ist trivial und wird nicht angeschrieben. Es ergibt sich

$$P_{\text{innerhalb}} = 0.82 = 82\% \quad (6.31)$$

Unter der Annahme, dass das Parameterfeld die Grundgesamtheit aller realen Einfeld-trägerbrücken mit Stützweiten bis 40 m beschreibt, kann die Aussage (6.31) auf besagte Grundgesamtheit übertragen werden.

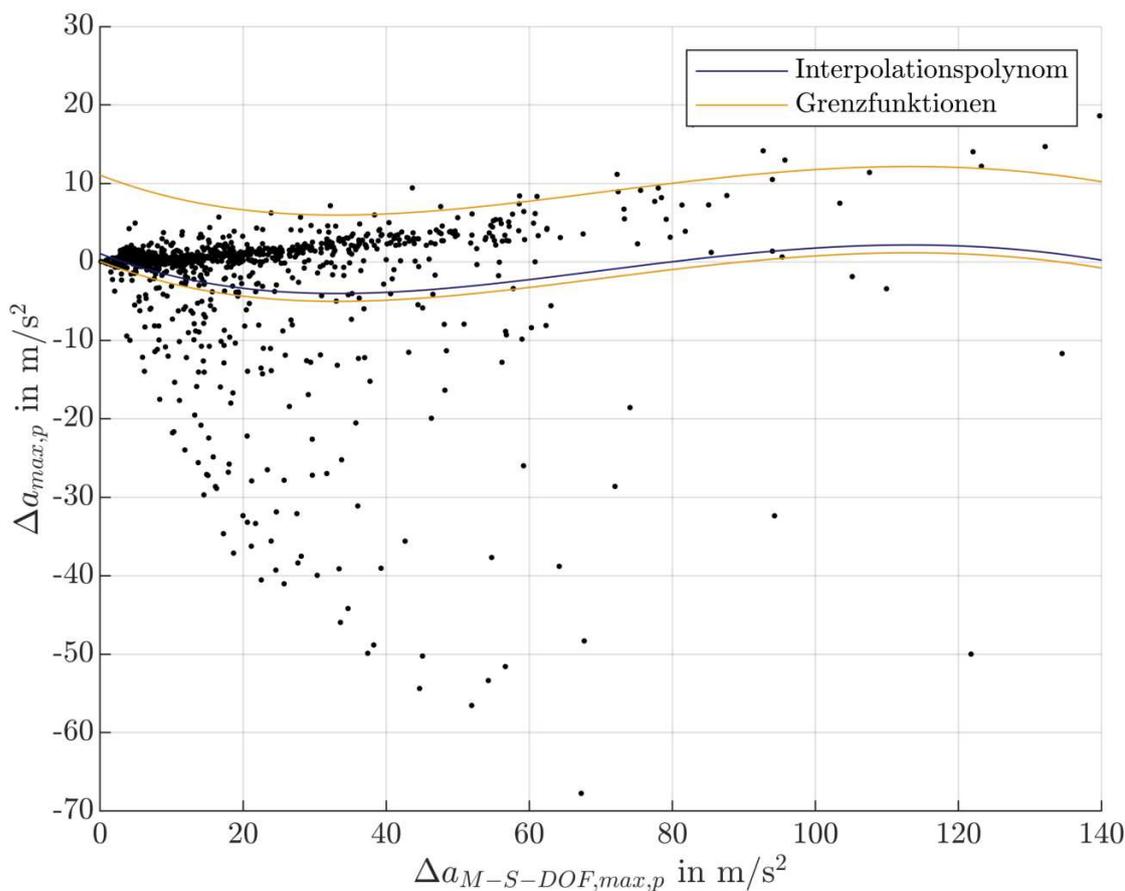


Abb. 6.5: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse einer MDOF-SDOF-Berechnung und einer DIM-MLM-Berechnung von 994 Brücken des Parameterfeldes. Das Band, das oben und unten von den Grenzfunktionen begrenzt wird, enthält 82% aller Tragwerke.

Gegenüberstellung für die zweite Zugkonfiguration

Die Vorgangsweise zur Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse für die zweite Zugkonfiguration – bestehend aus sieben Reisezugwagen und einer Lok des Railjet – ist ident zur Vorgangsweise für die erste Zugkonfiguration. Daher werden nur die wesentlichen Ergebnisse angeschrieben. Sämtliche Bemerkungen und Schlussfolgerungen können von oben übernommen werden. Es werden dieselben vier Tragwerke von der MDOF-SDOF-Berechnung ausgeschlossen, die in Unterkapitel 5.2.2 von der Berechnung ausgeschlossen wurden. Somit verbleiben 996 Brückentragwerke.

Die lineare Korrelation zwischen den Berechnungsergebnissen $\Delta a_{M-S-DOF,max,p}$ und $\Delta a_{max,p}$ beträgt $r_{M-S-DOF,MLM-DIM,996} = -0.12$. Die Gegenüberstellung der Verikalbeschleunigungen ist in Abb. 6.6 dargestellt.

1. Die Koeffizienten der polynomialen Interpolationsfunktion $F_{interp}(\Delta a_{M-S-DOF,max})$

$$F_{interp}(\Delta a_{M-S-DOF,max}) = \sum_{k=0}^4 c_k \cdot (\Delta a_{M-S-DOF,max})^k \quad (6.32)$$

lauten

$$\begin{aligned} c_0 &= 2.06820 & c_1 &= -1.63370 & c_2 &= 0.11462 & c_3 &= -0.00292 \\ c_4 &= 2.37987 \cdot 10^{-5} \end{aligned} \quad (6.33)$$

2. Die Grenzen (bzw. Grenzfunktionen) des Bandes ergeben sich zu

$$\begin{aligned} F_{Obergrenze} &= F_{interp}(\Delta a_{M-S-DOF,max}) + 10 \quad \text{m/s}^2 \\ F_{Untergrenze} &= F_{interp}(\Delta a_{M-S-DOF,max}) - 2 \quad \text{m/s}^2 \end{aligned} \quad (6.34)$$

3. Alle berechneten $\Delta a_{M-S-DOF,max,p}$ sind größer als Null. Das Band wird nicht abgeschnitten.
4. Die Wahrscheinlichkeit $P_{innerhalb}$ ergibt sich zu

$$P_{innerhalb} = 0.82 = 82\% \quad (6.35)$$

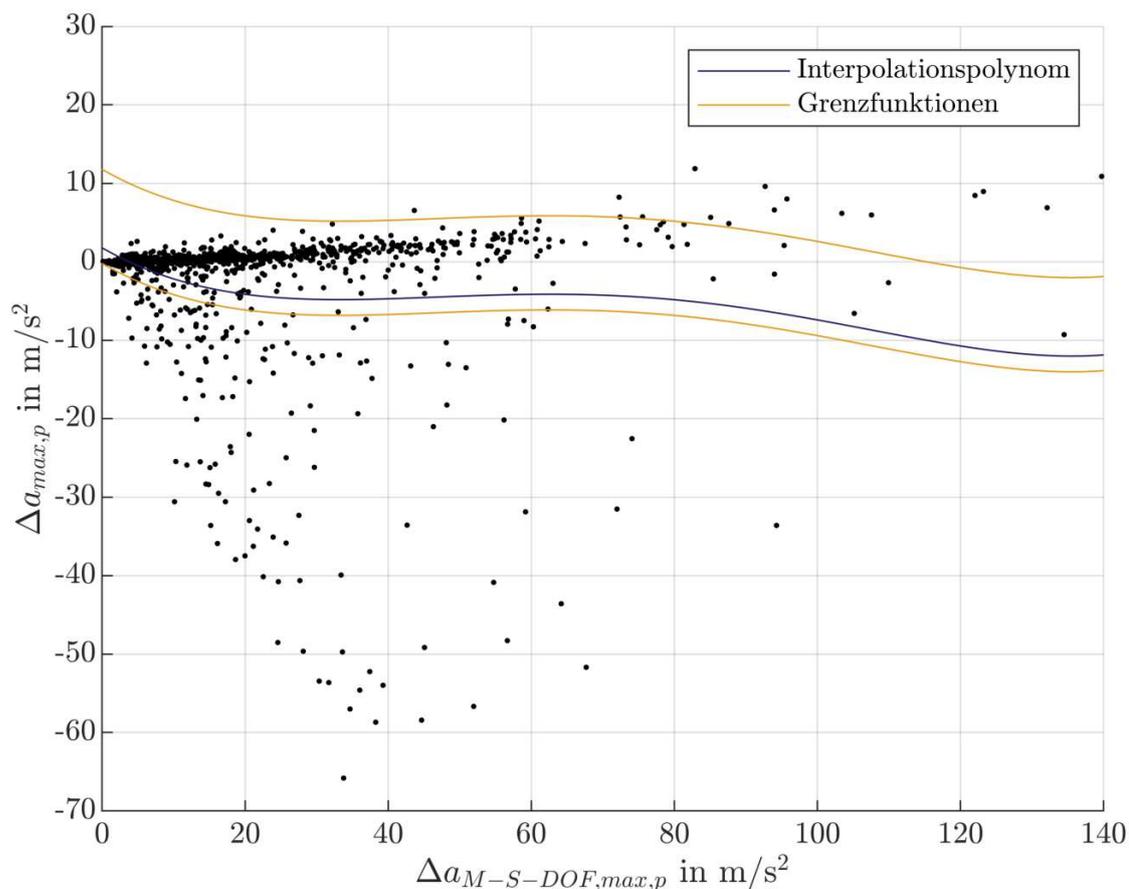


Abb. 6.6: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse einer MDOF-SDOF-Berechnung und einer MLM-DIM-Berechnung von 996 Brücken des Parameterfeldes. Das Band, das oben und unten von den Grenzfunktionen begrenzt wird, enthält 89% aller Tragwerke mit.

6.3.3 Anwendungsbeispiel

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer MDOF-SDOF-Berechnung herangezogen, um die Vertikalbeschleunigungsdifferenz Δa_{max} zwischen einer MLM und einer DIM Berechnung eines Tragwerks in Form einer Bandbreite grob abzuschätzen. Es ergibt sich eine Abschätzung in Form einer Bandbreite $a_{DIM,max,Absch}$ für die aus einer DIM Berechnung resultierende maximale Vertikalbeschleunigung. Dabei wird dasselbe Tragwerk gewählt, wie in Unterkapitel 5.5. Es wird von einer Zugüberfahrt der ersten Zugkonfiguration bestehend aus acht Reisezugwagen des Railjet ausgegangen. Die Brückenparameter des Tragwerks lauten entsprechend (5.13)

$$l = 10 \text{ m}$$

$$m = 20 \text{ t/m}$$

$$f = 5 \text{ Hz}$$

$$z = 1.5 \text{ \%}$$

Die tatsächlichen Verläufe der maximalen Vertikalbeschleunigung sind in Abb. 5.19 dargestellt. Anhand der Ergebnisse der MLM Berechnung aus Abb. 5.19 stellt man fest, dass die maximale Vertikalbeschleunigung zwischen 100 km/h und 350 km/h bei der dritten kritischen Geschwindigkeit auftritt. Daher ergibt sich gemäß (6.17) die Abstimmung zu

$$\eta = \eta_{MDOF} = \eta_{SDOF} = \frac{1}{3} \quad (6.36)$$

Es wird entsprechend Unterkapitel 6.1, Unterkapitel 6.2 sowie Gleichung (6.16) die Vertikalbeschleunigungsdifferenz $\Delta a_{M-S-DOF,max}$ bestimmt. Bei der SDOF Berechnung ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} P_0 &= 100 \text{ kN} \\ m_{SDOF} &= 100000 \text{ kg} \\ \omega_{SDOF} &= 31.42 \text{ Hz} \\ k_{SDOF} &= 98696044.01 \text{ N/m} \\ z_{SDOF} &= 0.0150 \\ V_{SDOF} \left(\eta_{SDOF} = \frac{1}{3} \right) &= 1.12493 \\ a_{SDOF,max} &= 0.1250 \text{ m/s}^2 \end{aligned} \quad (6.37)$$

Bei der MDOF Berechnung ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} P_0 &= 100 \text{ kN} \\ m_{1,MDOF} &= 103800 \text{ kg} \\ \omega_{1,MDOF} &= 31.42 \text{ Hz} \\ k_{1,MDOF} &= 102446493.68 \text{ N/m} \\ z_{1,MDOF} &= 0.0150 \\ m_{2,MDOF} &= 2800 \text{ kg} \\ k_{2,MDOF} &= 1690000 \text{ N/m} \\ \omega_{2,DOF} &= 24.57 \text{ Hz} \\ z_{2,MDOF} &= 0.1454 \\ \kappa &= 0.7820 \\ \mu &= 0.0270 \\ b_1 &= 0.5004 \\ b_2 &= 0.0758 \\ b_3 &= 0.4422 \\ b_4 &= 0.0721 \\ V_{MDOF} \left(\eta_{MDOF} = \frac{1}{3} \right) &= 1.12956 \\ a_{MDOF,max} &= 0.1209 \text{ m/s}^2 \end{aligned} \quad (6.38)$$

Somit erhält man für die maximale Vertikalbeschleunigungsdifferenz zwischen SDOF und MDOF Berechnung $\Delta a_{M-S-DOF,max}$

$$\Delta a_{M-S-DOF,max} = a_{SDOF,max} - a_{MDOF,max} = 0.1250 - 0.1209 = 0.0041 \quad \text{in } \text{m/s}^2 \quad (6.39)$$

Der erhaltene Wert für $\Delta a_{M-S-DOF,max}$ wird mit dem Faktor 10^3 skaliert, wodurch man folgenden Wert erhält:

$$10^3 \cdot \Delta a_{M-S-DOF,max} = 4.08 \quad \text{m/s}^2 \quad (6.40)$$

Trägt man diesem Wert in Abb. 6.3 auf der Abszisse ein, erhält man eine Bandbreite für Δa_{max} .

$$\Delta a_{max} = -0.16 \div 4.34 \quad \text{m/s}^2 \quad (6.41)$$

Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung des Wertes $a_{MLM,max} = 10.73 \text{ m/s}^2$ aus Abb 5.19 eine Bandbreite für $a_{DIM,max,Absch}$.

$$a_{DIM,max,Absch} = a_{MLM,max} - \Delta a_{max} = 10.73 - \Delta a_{max} = 6.39 \div 10.57 \quad \text{in } \text{m/s}^2 \quad (6.42)$$

Aus (6.42) erhält man folgende Aussage: Die maximale Vertikalbeschleunigung einer DIM Berechnung im Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h und 350 km/h liegt wahrscheinlich zwischen 6.39 m/s^2 und 10.57 m/s^2 . Der tatsächliche Wert kann aber, wenn auch mit einer geringen Wahrscheinlichkeit, stark von dieser Bandbreite abweichen. Ein Vergleich der errechneten Bandbreite mit den tatsächlichen Berechnungsergebnissen aus Abb. 5.19 zeigt, dass sich die Berechnungsergebnisse innerhalb der berechneten Bandbreite liegen.

Kapitel 7

Schlussfolgerungen und Ausblick

Im letzten Kapitel der vorliegenden Arbeit werden die in Unterkapitel 1.3 aufgeworfenen Kernfragen wiederholt. Anhand der wesentlichen Erkenntnisse aus Kapitel 3, Kapitel 5 und Kapitel 6 werden Schlussfolgerungen in Bezug auf die genannten Kernfragen getroffen. Es lässt sich vorwegnehmen, dass alle drei Kernfragen unter bestimmten Annahmen bzw. mit Einschränkungen positiv beantwortet werden können.

Im Anschluss an die Schlussfolgerungen in Bezug auf die Kernfragen wird ein Ausblick auf Zukünftiges geboten. Dabei wird veranschaulicht, welche Möglichkeiten die aufgezeigte Methode eröffnet.

Der Leser sei nichtsdestoweniger darauf hingewiesen, dass bei einer Anwendung der in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Methodik respektive Berechnungsergebnisse unbedingt sicherzustellen ist, dass sämtliche Annahmen, die in den vorangehenden Kapiteln angeführt wurden, zutreffen.

7.1 Schlussfolgerungen

Im Folgenden werden die drei Kernfragen aus Unterkapitel 1.3 nacheinander abgehandelt.

7.1.1 Erste Kernfrage – Parameterfeld

Die erste Kernfrage aus Unterkapitel 1.3 lautet:

Wie kann ein Parameterfeld für Brückenparameter erzeugt werden, das eine möglichst geringe Anzahl an Parameterpunkten enthält, aber dennoch eine ausreichende Dichte in Bereichen von großer Bedeutung hat?

Obige Frage kann anhand von Kapitel 3 beantwortet werden: In Unterkapitel 3.3 wurde gezeigt, dass es mithilfe des Nataf Modells möglich ist die Verbunddichte der Brückenparameter numerisch zu bestimmen, sofern man über Stichproben von Brücken und somit Brückenparametern verfügt. Dabei wurde näherungsweise eine Lognormalverteilung für die Dämpfung angenommen, was dazu führt, dass die numerisch bestimmte Verbunddichte der Brückenparameter nur eine gute Näherung der tatsächlichen Verbunddichte der Brückenparameter darstellt. Allerdings wurde die Qualität der Näherung überprüft. Anhand von Abb. 3.4, Abb. 3.5, Abb. 3.6, Abb. 3.7 und Abb. 3.8 lässt sich visuell feststellen, dass die numerisch berechnete Verbunddichte tatsächlich eine gute Näherung darstellt.

Da das Parameterfeld erhalten wird, indem aus der numerisch bestimmten Verbunddichte der Brückenparameter Stichproben gezogen werden, werden Bereiche von großer Bedeutung (also Bereiche um den Mittelwertvektor der Brückenparameter) mit mehr Stichproben abgedeckt, als Bereiche geringer Bedeutung (also Bereiche im Parameterwahrscheinlichkeitsraum, die weit entfernt vom Mittelwertvektor liegen). Das führt dazu, dass mit einer geringeren Anzahl an Punkten im Parameterraum eine bessere Abdeckung der Grundgesamtheit aller Einfeldträgerbrücken mit

Stützweiten bis 40 m erreicht wird, als bei der Verwendung von festen Rastern im Parameterraum (z.B. Gleichverteilung einzelner Brückenparameter). Außerdem erlaubt das so erzeugte Parameterfeld eine einfache Nachverdichtung, die jederzeit durch das Erzeugen zusätzlicher Stichproben der Brückenparameter aus der numerisch bestimmten Verbunddicke der Brückenparameter erfolgen kann.

Dies führt zu folgender Konklusion: Die in Unterkapitel 3.3 beschriebene Methode erlaubt es, ein Parameterfeld für die Brückenparameter zu erzeugen, das eine möglichst geringe Anzahl an Parameterpunkten enthält. Dabei weist es gleichzeitig eine hohe Dichte in Bereichen von großer Bedeutung auf.

7.1.2 Zweite Kernfrage – Brückenparameter und Änderung der Tragwerksantwort

Die zweite Kernfrage in Unterkapitel 1.3 aufgeworfene Frage ist:

Lässt sich für konkrete Zugkonfigurationen ein Zusammenhang zwischen Brückenparametern einerseits und der Änderung der Tragwerksantwort zwischen MLM und DIM andererseits, bestimmen?

Anhand von Kapitel 5 lassen sich folgende Schlüsse ziehen: Für jeweils eine Zugkonfiguration (es wurden zwei Zugkonfigurationen des Railjet untersucht) ergibt sich für alle Brückentragwerke des Parameterfeldes in der $lm-fz$ -Ebene in Abhängigkeit der Brückenparameter die Differenz der maximalen Vertikalbeschleunigung zwischen DIM und MLM zu $\Delta a_{max,s}$. Interpoliert man zwischen diesen Ergebniswerten linear, erhält man ein Funktionsgebirge $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$. Dieses beschreibt näherungsweise einen Zusammenhang, wie er in der obigen Frage gesucht wird. Dieser Umstand wird z.B. in Abb. 5.1 veranschaulicht.

Der gefundene numerische Zusammenhang $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ kann herangezogen werden, um die Differenz der maximalen Vertikalbeschleunigung zwischen einer MLM und einer DIM Berechnung für ein konkretes Brückentragwerk abzuschätzen. Dabei ist allerdings darauf zu achten, dass das gewählte Brückentragwerk innerhalb der Grenzfunktionen (5.2), (5.8), (5.10) sowie (5.11) liegt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für zwei Zugkonfigurationen des Railjet ein Zusammenhang zwischen Brückenparametern und der Änderung der Tragwerksantwort zwischen MLM und DIM in Form von $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ bestimmt werden konnte.

7.1.3 Dritte Kernfrage – Abstraktion mittels Feder-Dämpfer-Modellen

Die dritte und letzte Kernfrage der vorliegenden Arbeit lautet gemäß Unterkapitel 1.3:

Lässt sich ein derartiger Zusammenhang (sc. est.: wie in der zweiten Kernfrage erwähnt), sofern er existiert, durch Abstraktion auf wesentlich einfachere Feder-Dämpfer-Modelle zurückführen?

Unter Berücksichtigung von Abb. 6.3, Abb. 6.4, Abb. 6.5 und Abb. 6.6 aus Kapitel 6 lässt sich festhalten: Die Berechnungsergebnisse aus Kapitel 5, die den in der zweiten Kernfrage erwähnten Zusammenhang verkörpern, lassen sich nicht exakt auf die verwendeten Feder-Dämpfer-Modelle (Single Degree of Freedom System (SDOF), Multiple Degree of Freedom System (MDOF)) zurückführen. Allerdings lassen sie sich mithilfe der in den Abbildungen dargestellten Grenzfunktionen abschätzen. Aus den in den Abbildungen dargestellten Bändern lässt sich für ein konkretes Tragwerk eine Bandbreite der Vertikalbeschleunigungsdifferenz zwischen MLM und DIM Δa_{max} ermitteln, sofern man zuvor eine SDOF-MDOF-Berechnung für das zu untersuchende Tragwerk durchgeführt hat. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der so erhaltenen Bandbreite

nur um eine Abschätzung handelt, die wahrscheinlich korrekt ist – Abweichungen von ihr sind möglich. Dementsprechend ist die Anwendung von Feder-Dämpfer-Modellen, wie sie in Kapitel 6 beschrieben ist, nur für erste, grobe Abschätzungen von Δa_{max} sinnvoll.

7.2 Ausblick

Zunächst wird ein Gedanke aus Unterkapitel 4.3.1 aufgegriffen: Würde man die in Kapitel 4 beschriebene Methodik auf ein unendlich großes Parameterfeld – bestehend aus unendlich vielen Stichproben aus der Verbunddicke der Brückenparameter – anwenden, ist grundsätzlich davon auszugehen, dass die Interpolationsfunktion $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ gegen die unbekannt Funktion $\Delta a_{max}(l, m, f, z)$ konvergiert. $\Delta a_{max}(l, m, f, z)$ bezeichnet dabei jene unbekannt Funktion, die die Differenz der maximalen Vertikalbeschleunigung zwischen MLM und DIM in Abhängigkeit der Brückenparameter exakt beschreibt.

Da die Berechnung eines unendlich großen Parameterfeldes nicht zielführend ist, könnte man folgendermaßen vorgehen: Per Konvergenzstudie (z.B.: schrittweises Verdoppeln der Anzahl der Punkte des Parameterfeldes) könnte man feststellen, ab welcher Anzahl an Parameterpunkten sich in $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ keine wesentlichen Änderungen mehr einstellen. Sobald ein vorher festgelegtes Maß an Änderung von $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ bei gleichzeitiger Verdoppelung der Parameterpunkte unterschritten wäre, wäre ein akzeptables Maß an Konvergenz von $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ erreicht. Der so bestimmte Zusammenhang könnte nicht nur zur Abschätzung bzw. Vorhersage der Vertikalbeschleunigungsdifferenz zwischen MLM und DIM herangezogen werden; Er könnte eine DIM Berechnung ersetzen.

Weitete man diese Vorgehensweise auf alle sich im Eisenbahnverkehr befindlichen Zugkonfigurationen aus und erhalte man dabei akzeptable Berechnungsergebnisse, könnte die Differenz Δa_{max} für jedes Brückentragwerk bei Zugüberfahrten durch alle möglichen Zugkonfigurationen aus einer MLM Berechnung bestimmt werden.

Um obige Punkte zu klären, bedarf es weiterer Untersuchungen.

Literaturverzeichnis

- [1] Austrian Standards International. *ÖNORM B 1991-2:2018-08: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*. 2018.
- [2] L. Bettinelli. „Einfluss des Triebwagens auf die dynamische Tragwerksantwort von einfeldrigen Eisenbahnbrücken bei Hochgeschwindigkeitsverkehr“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2017.
- [3] C. Bucher. *Computational Analysis of Randomness in Structural Mechanics*. Vol. 3. Wien: CRC Press, 2009.
- [4] C. Bucher, A. Viglione und G. Blöschl. *Unterlagen zur Vorlesung aus Risikobewertung im Bauingenieurwesen*. WS 2018/2019. Wien: Institut für Hochbau, Baudynamik und Gebäudetechnik - Forschungsbereich Strukturmechanik und Risikobewertung von Tragwerken, Technische Universität Wien, 2018.
- [5] A. Doménech, P. Museros und M. Martínez-Rodrigo. „Influence of the vehicle model on the prediction of the maximum bending response of simply-supported bridges under high-speed railway traffic“. In: *Engineering Structures* 72 (2014), S. 123–139.
- [6] ERRI D214 Committee. *Rail bridges for speeds >200 km/h. Final report. Part A: Synthesis of the results of D 214 research*. European Rail Research Institute, 1999.
- [7] Europäische Kommission. *WEISSBUCH Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem*. 2011.
- [8] Europäisches Komitee für Normung. *EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010 – Grundlagen der Tragwerksplanung*. 2010.
- [9] Europäisches Komitee für Normung. *EN 1991-2:2010-12: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*. 2010.
- [10] J. Fink und F. Aigner. *Skriptum zur Vorlesung aus Brückenbau*. WS 2017/2018. Wien: Institut für Tragkonstruktionen - Forschungsbereich Stahlbau, Technische Universität Wien, 2017.
- [11] C. Hellmich und B. Pichler. *Skriptum zur Vorlesung aus Flächentragwerke Theorie*. SS 2017/2018. Wien: Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen, Technische Universität Wien, 2018.
- [12] U. Kück. *Unterlagen zur Vorlesung aus Statistik*. Rostock: Institut für Volkswirtschaftslehre - Lehrstuhl für Statistik und Ökonometrie, Universität Rostock, 2007.
- [13] K. Liu, G. De Roeck und G. Lombaert. „The effect of dynamic train–bridge interaction on the bridge response during a train passage“. In: *Journal of Sound and Vibration* 325 (2009), S. 240–251.
- [14] C. Mähr. „Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Eisenbahnbrücken mit Schotteroberbau unter Verkehrslast“. Dissertation. Technische Universität Wien, 2009.

- [15] C. Petersen und H. Werkle. *Dynamik der Baukonstruktionen*. Vol. 2. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [16] B. Pichler und J. Eberhardsteiner. *Skriptum zur Vorlesung aus Baustatik*. SS 2017/2018. Wien: Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen, Technische Universität Wien, 2018.
- [17] A. Stollwitzer. „Entwicklung eines alternativen Berechnungsansatzes für das Moving Load Model zur dynamischen Berechnung von Eisenbahnbrücken“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2017.
- [18] L. V. Treder. „Vorschlag einer alternativen Formulierung der fiktiven Zusatzdämpfung für Eisenbahnbrücken“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2017.

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

DIM Detailed Interaction Model

FBI Fahrzeug-Brücken-Interaktion

MDOF Multiple Degree of Freedom System

MLM Moving Load Model

SDOF Single Degree of Freedom System

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	[...]
a, a_j	Irrtumsniveau	1
$a(t, v_k)_{DIM}$	Vertikalbeschleunigung des DIM bei der k-ten Geschwindigkeit	m/s ²
$a(t, v_k)_{MLM}$	Vertikalbeschleunigung des MLM bei der k-ten Geschwindigkeit	m/s ²
$a_{DIM,max,s}$	maximale Vertikalbeschleunigung des DIM für das s-te Tragwerk	m/s ²
$a_{DIM,max,Absch}$	Abschätzung für $a_{DIM,max,s}$ für das s-te Tragwerk	m/s ²
$a_{MLM,max,s}$	maximale Vertikalbeschleunigung des MLM für das s-te Tragwerk	m/s ²
$a_{MDOF,max}$	maximale Vertikalbeschleunigung des MDOF	m/s ²
$a_{MDOF,max,s}$	maximale Vertikalbeschleunigung des s-ten MDOF	m/s ²
$a_{SDOF,max}$	maximale Vertikalbeschleunigung des SDOF	m/s ²
$a_{SDOF,max,s}$	maximale Vertikalbeschleunigung des s-ten SDOF	m/s ²
A	Querschnittsfläche	m ²
b	Schwerpunktastand der Radsätze eines Drehgestells	m
b_{QS}	Querschnittsbreite	m
c	Dämpfungskonstante	Ns/m
c_j	Diagonaleinträge der modalen Dämpfungsmatrix	Ns/m ²
c_p	Dämpfungskonstante der Primärstufe	Ns/m
c_s	Dämpfungskonstante der Sekundärstufe	Ns/m
d	Wagenlänge von Puffer zu Puffer	m
ϵ	Fehlerschranke	1
EA_{zz}	Biegesteifigkeit	Nm ²
$E[X]$	Erwartungswert der Zufallsvariable X	$[X]$
f	erste Biegeeigenfreq.	Hz
f_j	j-te Biegeeigenfrequenz	Hz
$f_X(x)$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	1/ $[X]$
$f_{\vec{X}}$	Verbunddichte	1/ $[\vec{X}]$
$f_0(x)$	gewählte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	1/ $[X]$
$\hat{f}_{a,DIM,max,rel}$	relativer Fehler der Abschätzung von $a_{DIM,max,s}$	1
$\hat{f}_{ij,abs}$	absoluter Fehler	1
$\hat{f}_{ij,rel}$	relativer Fehler	1
$F_{cp,k}$	Dämpferkraft	N
$F_{kp,k}$	Federkraft	N
$F_{st,k}$	statische Aufstandskraft	N
$F_X(x)$	Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion	1
$F_0(x)$	gewählte Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion	1
F_{interp}	Interpolationspolynom	m/s ²
$G\tilde{A}$	Schubsteifigkeit	N
h_{QS}	Querschnittshöhe	m
I_b	Massenträgheitsmoment des Drehgestells	kgm ²
I_c	Massenträgheitsmoment des Wagenkastens	kgm ²
k_p	Federsteifigkeit der Primärstufe	N/m
k_s	Federsteifigkeit der Sekundärstufe	N/m
k_{SDOF}	Federsteifigkeit des SDOF	N/m
$k_{1,MDOF}$	Federsteifigkeit des Hauptsystems des MDOF	N/m
$k_{2,MDOF}$	Federsteifigkeit des Sekundärsystems des MDOF	N/m

Symbol	Beschreibung	[...]
l	Stützweite	m
l_{AA}	Achsabstände	m
l_{1k}	Lastabstände	m
l_{tr}	Zuglänge	m
m	Massenbelegung	kg/m
$max\{\}$	Maximumsfunktion	-
$min\{\}$	Minimumsfunktion	-
m_b	Masse Drehgestell	kg
m_c	Masse Wagenkasten	kg
m_j	Anzahl der Stichproben in einer Klasse	-
m_{regr}	lineare Regression der Massenbelegung	kg/m
m_w	Radsatzmasse	kg
$m_y(x, t)$	Streckenmoment	Nm/m
m_{SDOF}	Masse des SDOF	kg
$m_{Vertrauensbereich}$	Vertrauensbereich der Massenbelegung	kg
$m_{1,MDOF}$	Masse des Hauptsystems des MDOF	kg
$m_{2,MDOF}$	Masse des Sekundärsystems des MDOF	kg
M	fest $\in \mathbb{N}$	-
M_n	Mittelwertschätzer	-
$M_y(x, t)$	Biegemoment	Nm
n, N, N_{soll}	fest $\in \mathbb{N}$	-
n_c	Anzahl der Klassen	-
N_c	Anzahl der Wagen	-
N_m	Anzahl der Eigenformen	-
p_j	Klassenwahrscheinlichkeit	-
$p(x, t)$	Belastungsfunktion	N/m
$P(t)$	harmonische Kraftanregung	N
P_i	Wahrscheinlichkeit, Subindex i	-
P_k	Achslast	N
P_0	Kraftamplitude	N
$q(t)$	generalisierte Lagekoordinate	m
r	Schwerpunktastand der Drehgestelle	m
$r_{ij,n}$	linearer Korrelationsschätzer	-
S_n	Schätzer für die Standardabweichung	-
S_n^2	Varianzschätzer	-
$S_{Fehler,i,N}$	Schätzer für die Standardabweichung des Fehlers	-
t	Zeit	s
$t^{-1}(P, N)$	inverse t-Verteilung vom Freiheitsgrad N , Wahrscheinlichkeit P	-
T_j	Perioden	s
v	Überfahrtsgeschwindigkeit	m/s
$v_{cr,MLM,j}$	kritische Geschwindigkeit	m/s
$v_{cr,DIM,j}$	für das DIM adaptierte kritische Geschwindigkeit	m/s
V_j	standardnormalverteilte, korrelierte Zufallsvariable	-
\dot{V}_{MDOF}	dynamische Vergrößerungsfunktion des MDOF	-
\dot{V}_{SDOF}	dynamische Vergrößerungsfunktion des SDOF	-

Symbol	Beschreibung	[...]
$w(x, t)$	Biegeordinate	m
w_{b1}, w_{b2}	Translation der Drehgestelle	m
w_c	Translation des Wagenkastens	m
$w_{w1}, w_{w2}, w_{w3}, w_{w4}$	Translation der Radsätze	m
$w^*(x, t)$	Ritzscher Ansatz	m
x, x_j	Wert einer Zufallsvariablen X bzw. X_j	$[X]$
x_j, x_{j+1}	Klassengrenzen der Zufallsvariablen X	$[X]$
$x_k, x_{i,k}, x_{j,k}$	Stichproben einer Zufallsvariablen X bzw. X_j	$[X]$
$x_{i,k,regr}$	Wert der Regressionsgerade	$[X]$
X, X_i, X_j	Zufallsvariablen, stochastische Größen	$[X]$
X_{regr}	lineare Regression der Zufallsvariable X	$[X]$
$X_{Vertrauensbereich}$	Vertrauensbereich der Zufallsvariable X	$[X]$
z	Lehrsches Dämpfungsmaß, Dämpfung nach Eurocode [9]	1
z_{regr}	lineare Regression der Dämpfung	1
z_{SDOF}	Lehrsche Dämpfung des SDOF	1
$z_{Vertrauensbereich}$	Vertrauensbereich der Dämpfung	1
$z_{1,MDOF}$	Lehrsche Dämpfung des Hauptsystems des MDOF	1
$z_{2,MDOF}$	Lehrsche Dämpfung des Sekundärsystems des MDOF	1
α	Regressionsparameter	-
β	Regressionsparameter	-
$\Gamma(x_k)$	Gammafunktion	-
$\delta(x - x_k)$	Deltafunktion	-
$\Delta a_{max,p}$	p-te Differenz der maximalen Vertikalbeschleunigung	m/s^2
$\Delta a_{max,s}$	s-te Differenz der maximalen Vertikalbeschleunigung	m/s^2
$\Delta a_{max,interp}$	lineare Interpolationsfunktion von $\Delta a_{max,s}$	m/s^2
Δa_{max}	Funktion der Differenz der maximalen Vertikalbeschleunigung	m/s^2
$\Delta a_{M-S-DOF,max,s}$	Vertikalbeschleunigungsdifferenz des s-ten SDOF und MDOF	m/s^2
Δf	zusätzlicher Beitrag zur ersten Biegeeigenfrequenz	Hz
Δm	Zusatzmasse	kg/m
η	Abstimmung	1
η_{MDOF}	Abstimmung des MDOF	1
η_{SDOF}	Abstimmung des SDOF	1
θ_j	Phasenverschiebung	1
κ	Verstimmung	N/m
μ	Massenverhältnis	1
μ_X	Mittelwert der Zufallsvariable X	$[X]$
ρ_{X_i, X_j}	lineare Korrelation	-
ρ'_{X_i, X_j}	lineare Korrelation im Standard-Gaußraum	-
$\sigma_{Fehler,i}(x_j)$	Standardabweichung des Fehlers	$[X_j]$
σ_X	Standardabweichung	$[X]$
σ_X^2	Varianz	$[X^2]$
$\phi(x)$	Ortsfunktion	1
ϕ_{b1}, ϕ_{b2}	Rotation der Drehgestelle	1
ϕ_c	Rotation des Wagenkastens	1
$\phi_j(x)$	Eigenfunktionen	1
$\Phi(z)$	Standardnormalverteilung	-

Symbol	Beschreibung	[...]
χ^2	Chi-Quadrat	-
χ_a^2	Vergleichsgröße für Chi-Quadrat	-
$(\chi_N^2)^{-1}(P)$	inverse Chi-Quadrat-Verteilung vom Freiheitsgrad N	-
ω_j	Eigenkreisfrequenzen	Hz
$\omega_{D,j}$	Eigenkreisfrequenzen des gedämpften Systems	Hz
ω_{SDOF}	Eigenkreisfrequenz des SDOF	Hz
$\omega_{1,MDOF}$	Eigenkreisfrequenz des Hauptsystems des MDOF	Hz
$\omega_{2,DOF}$	Eigenkreisfrequenz des Sekundärsystems des MDOF	Hz
Ω_j, Ω	Erregerkreisfrequenz	Hz
\mathbf{C}	generalisierte Dämpfungsmatrix	Ns/m
\mathbf{C}_Z	Dämpfungsmatrix des Fahrzeuges	-
$\mathbf{E}(\vec{\mathbf{X}})$	Green-Lagrangescher Verzerrungstensor	1
\mathbf{f}_{abs}	Matrix der absoluten Fehler	-
\mathbf{f}_{rel}	Matrix der relativen Fehler	-
$\vec{\mathbf{F}}_w(x, t)$	Lastvektor	-
$\vec{\mathbf{F}}_{\dot{w}}(x, t)$	Lastvektor	-
\mathbf{I}	Einheitsmatrix	-
\mathbf{K}	generalisierte Steifigkeitsmatrix	N/m
\mathbf{K}_Z	Steifigkeitsmatrix des Fahrzeuges	-
\mathbf{L}	untere Dreiecksmatrix	-
\mathbf{L}^T	obere Dreiecksmatrix	-
\mathbf{M}	generalisierte Massenmatrix	kg
\mathbf{M}_Z	Massenmatrix des Fahrzeuges	-
$\vec{\mathbf{p}}(x, t)$	Belastungsvektor	N
$\vec{\mathbf{q}}(t)$	Vektor der generalisierten Lagekoordinaten	m
\mathbf{r}	geschätzte lineare Korrelationsmatrix	-
\mathbf{r}'	geschätzte lineare Korrelationsmatrix im Standard-Gaußraum	-
$\vec{\mathbf{u}}(\vec{\mathbf{x}})$	$= (u, v, w)^T$ Verschiebungsfeld	m
\mathbf{u}	Matrix standardnormalverteilter, unkorrelierter Zufallszahlen	-
$\vec{\mathbf{u}}_{def}(t)$	Deformationsgrößenvektor	-
$\vec{\mathbf{U}}$	Zufallsvektor im Standardgaußraum	-
\mathbf{v}	Matrix korrelierter, standardnormalverteilter Zufallszahlen	-
$\vec{\mathbf{V}}$	Vektor korrelierter, standardnormalverteilter Zufallszahlen	-
$\vec{\mathbf{x}}$	$= (x, y, z)^T$ Koordinaten der verformten Lage	m
\mathbf{x}	Matrix korrelierter Zufallszahlen im Ursprungswahrscheinlichkeitsraum	-
$\vec{\mathbf{X}}$	$= (X, Y, Z)^T$ Koordinaten der unverformten Lage	m
$\varepsilon(\vec{\mathbf{x}})$	Linearisierter Verzerrungstensor	1
$\vec{\lambda}$	Vektor der Eigenwerte	-
$\vec{\mu}_{\vec{\mathbf{X}}}(\vec{\mathbf{X}})$	Mittelwertvektor	$[\vec{\mathbf{X}}]$
ρ	lineare Korrelationsmatrix	-
ρ'	lineare Korrelationsmatrix im Standard-Gaußraum	-
$\vec{\sigma}_{\vec{\mathbf{X}}}(\vec{\mathbf{X}})$	Vektor der Standardabweichungen	$[\vec{\mathbf{X}}]$
$\vec{\phi}(x)$	Vektor der Eigenfunktionen	1

Symbol	Beschreibung	[...]
\otimes	dyadisches Produkt	-
$(\cdot)_{max}, (\cdot)_{min}$	Randextrema	-
$(\cdot)_{Obergrenze}$	obere Grenzfunktion	-
$(\cdot)_{Untergrenze}$	untere Grenzfunktion	-
$\vec{(\cdot)}$	Spaltenvektor	-
(\cdot)	Matrix, Tensor zweiter Stufe	-

Anhang A

Program Code zur Erzeugung des Parameterfeldes

```
1      ##
      #####
2      ##STOCHASTISCHE AUFBEREITUNG DER BRÜCKENDATEN
3      ##(LÄNGE, MASSENBELEGUNG, ERSTE EIGENFREQUENZ, DÄMPFUNG)
4      ##DES FORSCHUNGSBEREICHS STAHLBAU DER TU WIEN
5      ##
      #####
6      clear;
7      clear all;
8      clc;
9      pkg load statistics;
10     pkg load geometry;
11     pkg load optim;
12
13     ##
      #####
14     ##DATENSATZ ZUR STICHPROBENZAHL LADEN UND AUSWERTEN
15     ##
      #####
16
17     %Datensatz Stichprobenzahl: enthaelt jeweils die Zahl der
      tatsaechlich
18     %erstellten sowie der gewuenschten Stichproben.
19     dat_stichprobenzahl=importdata('num_par.txt');
20
21     %Mittelwert des Verhaeltnisses der erzeugten zu den zu erzeugenden
22     %Parameterpunkten errechnen
23     stichpr_soll=dat_stichprobenzahl(:,1); %so viele sollten erzeugt
      werden
24     stichpr_ist=dat_stichprobenzahl(:,2); %so viele wurden erzeugt
25     stichpr_verh=stichpr_ist./stichpr_soll;
26     mu_stichpr_verh=mean(stichpr_verh);
27
28     ##
      #####
29     ##EINGABEPARAMETER
30     ##
      #####
31
32     %Anzahl der Klassen
33     n_kl_l=6; %6
34     n_kl_m=8; %8
```

```

35     n_kl_f=8; %6
36     n_kl_z=6; %6
37
38     %Vertrauensniveau
39     a=0.05;
40
41     %Plotbereich einstellen
42     x=[0:0.1:70];
43
44     %Anzahl der zu erzeugenden Punkte im R4
45     ##N=270;
46     N_soll=1000; %so viele Parameterpunkte sollen erzeugt werden
47     N=round(N_soll/mu_stichpr_verh); %schaetze aus vergangen Daten ab,
        wieviele
48     %Punkte man erzeugen muss um N_soll viele Punkte zu erhalten, deren
49     %Brueckenlaenge groesser als l_grenz ist.
50
51     %Anzahl der kritischen Geschwindigkeiten, die ueberhaupt berechnet
        werden sollen
52     N_v_cr=50; %EINE HOHE ZAHL z.B. 30 ist empfehlenswert!!!! erste
        Berechnung mit 10
53
54     %Anzahl der kritischen Geschwindigkeiten, die in das Parameterfeld
        aufgenommen
55     %werden sollen. z.b.: N_v_cr_keep=3 <=> es werden die ersten drei
        kritischen
56     %Geschwindigkeiten in das Parameterfeld geschrieben
57     N_v_cr_keep=3;
58
59     %Anzahl der kritischen Geschwindigkeiten, die kleiner als 350 km/h,
        die in das
60     %Parameterfeld aufgenommen werden sollen. z.b.: N_v_cr_keep_kl_350=3
        <=> es
61     %werden die ersten drei kritischen Geschwindigkeiten in das
        Parameterfeld
62     %geschrieben
63     N_v_cr_keep_kl_350=2;
64
65
66     %Verschobene Exponentialverteilung
67     ##function y=verschexp(X,mu)
68     ## y=expdf(X-7.6,mu);
69     ##endfunction
70
71     %Minimale Laenge fuer zu erzeugendes und auszugebendes Parameterfeld
        angeben
72     l_grenz=5; %in m
73
74     %Berechnungszeit pro Punkt bei DIM bzw MLM - wird zur Abschaetzung
        der
75     %Berechnungszeit benoetigt. In Sekunden.
76     t_DIM=55; %s ...Sekunden
77     t_MLM=1.7; %s ...Sekunden
78     %Anzahl der Instanzen der DIM bzw. MLM Berechnungen, die gleichzeitig
        laufen
79     num_inst=3;
80
81     ##
        #####

```

```

82     ##DATEN EINLESEN
83     ##
      #####

84
85     %Datensatz_A: vollständiger Datensatz (alle Parameter gegeben)
86     dat_A_alle=importdata('Daten_ges_IMP.txt');
87
88     %Datensatz_B: nur einzelne Parameter
89     %(andere Parameter für jeweilige Datenpunkte teilweise unbekannt)
90     ##dat_B_l=importdata('Daten_Laenge_IMP.txt');
91     ##dat_B_m=importdata('Daten_mu_IMP.txt');
92     ##dat_B_f=importdata('Daten_Frequenz_IMP.txt');
93     ##dat_B_z=importdata('Daten_Zeta_gesamt_IMP.txt');
94
95     %Datensatz_C: gemessene Daten
96
97
98
99     ##
      #####

100    ##DATEN AUS DATENSATZ DEN JEWEILIGEN PARAMETERN ZUORDNEN
101    ##
      #####

102
103    %Nummerierung der Tragwerke vergeben
104    %Vorsicht: doppelte Vergabe von Nummerierung im Originaldatensatz
      vorhanden
105    %(weil zwei verschiedene Quellen !!!)
106    %Tragwerksnummer
107    num_alt=dat_A_alle(:,1);
108    num_len=numel(num_alt);
109    num_neu=[1:1:num_len]';
110    dat_A_alle(:,1)=num_neu;
111
112    %Länge in m
113    l_corr=dat_A_alle(:,2);
114    l=dat_A_alle(:,2);
115    ##l=dat_B_l(:,2);
116    num_l=numel(l);
117
118    %Massenbelegung in t/m
119    m_corr=dat_A_alle(:,3);
120    m=dat_A_alle(:,3);
121    ##m=dat_B_m(:,2);
122    num_m=numel(m);
123
124    %Erste Eigenfrequenz in Hz
125    f_corr=dat_A_alle(:,4);
126    f=dat_A_alle(:,4);
127    ##f=dat_B_f(:,2);
128    num_f=numel(f);
129
130    %Dämpfung in % (Minimum des Messwertes, wenn Messert vorhanden; sonst
      gem. Norm)
131    z_corr=dat_A_alle(:,5);
132    z=dat_A_alle(:,5);
133    ##z=dat_B_z(:,2);

```

```

134     num_z=numel(z);
135
136     ##
137     #####
138     ##DATENANALYSE
139     ##
140     #####
141
142     %Minima der Datenreihen
143     l_min=min(l);
144     m_min=min(m);
145     f_min=min(f);
146     z_min=min(z);
147
148     %Maxima der Datenreihen
149     l_max=max(l);
150     m_max=max(m);
151     f_max=max(f);
152     z_max=max(z);
153
154     %Mittelwerte
155     mu_l=mean(l);
156     mu_m=mean(m);
157     mu_f=mean(f);
158     mu_z=mean(z);
159
160     %Standardabweichungen
161     sig_l=std(l);
162     sig_m=std(m);
163     sig_f=std(f);
164     sig_z=std(z);
165
166     %Korrelationskoeffizienten
167     r_lm=corr(l_corr,m_corr);
168     r_lf=corr(l_corr,f_corr);
169     r_lz=corr(l_corr,z_corr);
170     r_mf=corr(m_corr,f_corr);
171     r_mz=corr(m_corr,z_corr);
172     r_fz=corr(f_corr,z_corr);
173
174     %Lognormalverteilungen verschiedener Parameter errechnen
175     s_l=sqrt( log( ((sig_l/mu_l)^2)+1 ) );
176     m_l=mu_l*exp( -((s_l^2)/2) );
177     fx_l=lognpdf(x,log(m_l),s_l);
178
179     s_m=sqrt( log( ((sig_m/mu_m)^2)+1 ) );
180     m_m=mu_m*exp( -((s_m^2)/2) );
181     fx_m=lognpdf(x,log(m_m),s_m);
182
183     s_f=sqrt( log( ((sig_f/mu_f)^2)+1 ) );
184     m_f=mu_f*exp( -((s_f^2)/2) );
185     fx_f=lognpdf(x,log(m_f),s_f);
186
187     s_z=sqrt( log( ((sig_z/mu_z)^2)+1 ) );
188     m_z=mu_z*exp( -((s_z^2)/2) );
189     fx_z=lognpdf(x,log(m_z),s_z);
190
191     %Weitere Verteilungen verschiedener Parameter errechnen
192     fx2_m=exppdf(x-m_min,mu_m);

```

```

190
191
192     ##Xi-Quadrat Test
193     %Anmerkung: der letzte Ausgabewert von histc ist die Anzahl der
194     Elemente von l,
195     %die exakt der letzten Grenze von l_b entsprechen (also in der Regel
196     0)
197     %
198     %Klassenbegrenzungen für Histogramme fuer Xi-quadrat-Test
199     breite_l=((l_max)/n_kl_l)+0.1;%3.3333333333333333;
200     ##breite_m=((m_max-m_min)/n_kl)+0.1;%6.6666666666666666;
201     breite_m=((m_max)/n_kl_m)+0.1;
202     breite_f=((f_max)/n_kl_f)+0.1;%2.3333333333333333;
203     breite_z=((z_max)/n_kl_z)+0.01;%0.6666666666666666;
204     l_b=[];
205     m_b=[];
206     f_b=[];
207     z_b=[];
208     for j=0:n_kl_l
209         l_b=[l_b, j*breite_l];
210     endfor
211     for j=0:n_kl_m
212         ##m_b=[m_b, j*breite_m+m_min];
213         m_b=[m_b, j*breite_m];
214     endfor
215     for j=0:n_kl_f
216         f_b=[f_b, j*breite_f];
217     endfor
218     for j=0:n_kl_z
219         z_b=[z_b, j*breite_z];
220     endfor
221     %Elementzahl der Elemente, die tatsächlich in der jeweiligen Klasse
222     liegen
223     [l_j_histc]=histc(l,l_b);
224     [m_j_histc]=histc(m,m_b);
225     [f_j_histc]=histc(f,f_b);
226     [z_j_histc]=histc(z,z_b);
227     l_j=l_j_histc(1:n_kl_l);
228     m_j=m_j_histc(1:n_kl_m);
229     f_j=f_j_histc(1:n_kl_f);
230     z_j=z_j_histc(1:n_kl_z);
231     %
232     %Elementzahl, die sich aus der Verteilung ergibt. Anm:jeweils
233     korrekte
234     %Verteilungsfunktion verwenden!
235     l_Fx_j=[];
236     m_Fx_j=[];
237     f_Fx_j=[];
238     z_Fx_j=[];
239     arr_kontrolle_l=[];
240     arr_kontrolle_m=[];
241     arr_kontrolle_f=[];
242     arr_kontrolle_z=[];
243
244     for k=2:(n_kl_l+1)
245         l_Fx_j=[l_Fx_j; num_l*( logncdf(l_b(k),log(m_l),s_l) - logncdf(l_b(k
246         -1),log(m_l),s_l) )];
247         arr_kontrolle_l=[arr_kontrolle_l; ( logncdf(l_b(k),log(m_l),s_l) -
248         logncdf(l_b(k-1),log(m_l),s_l) )];
249     endfor

```

```

244
245     for k=2:(n_kl_m+1)
246         ##m_Fx_j=[m_Fx_j; num_m*( expcdf(m_b(k)-m_min,mu_m) - expcdf(m_b(k-1)
                -m_min,mu_m) )];
247         m_Fx_j=[m_Fx_j; num_m*( logncdf(m_b(k),log(m_m),s_m) - logncdf(m_b(k
                -1),log(m_m),s_m) )]);
248         ##arr_kontrolle_m=[arr_kontrolle_m; ( expcdf(m_b(k)-m_min,mu_m) -
                expcdf(m_b(k-1)-m_min,mu_m) )]);
249         arr_kontrolle_m=[arr_kontrolle_m; ( logncdf(m_b(k),log(m_m),s_m) -
                logncdf(m_b(k-1),log(m_m),s_m) )]);
250     endfor
251
252     for k=2:(n_kl_f+1)
253         f_Fx_j=[f_Fx_j; num_f*( logncdf(f_b(k),log(m_f),s_f) - logncdf(f_b(k
                -1),log(m_f),s_f) )]);
254         arr_kontrolle_f=[arr_kontrolle_f; ( logncdf(f_b(k),log(m_f),s_f) -
                logncdf(f_b(k-1),log(m_f),s_f) )]);
255     endfor
256
257     for k=2:(n_kl_z+1)
258         z_Fx_j=[z_Fx_j; num_z*( logncdf(z_b(k),log(m_z),s_z) - logncdf(z_b(k
                -1),log(m_z),s_z) )]);
259         arr_kontrolle_z=[arr_kontrolle_z; ( logncdf(z_b(k),log(m_z),s_z) -
                logncdf(z_b(k-1),log(m_z),s_z) )]);
260     endfor
261     %Kontrollen sollten annähernd 1 ergeben. Wenn nicht, dann Breite und
        Anzahl
262     %der Klassen erhöhen
263     kontrolle_l=sum(arr_kontrolle_l);
264     kontrolle_m=sum(arr_kontrolle_m);
265     kontrolle_f=sum(arr_kontrolle_f);
266     kontrolle_z=sum(arr_kontrolle_z);
267     %Kontrollen 2 sollen jeweils der Zahl an Datenpunkten für den
        jeweiligen
268     %Parameter entsprechen. Wenn nicht, dann Breite und Anzahl
        %der Klassen erhöhen
269     kontrolle2_l=sum(l_Fx_j);
270     kontrolle2_m=sum(m_Fx_j);
271     kontrolle2_f=sum(f_Fx_j);
272     kontrolle2_z=sum(z_Fx_j);
273     %Kontrollen 3 sollen jeweils der Zahl an Datenpunkten für den
        jeweiligen
274     %Parameter entsprechen
275     kontrolle3_l=sum(l_j);
276     kontrolle3_m=sum(m_j);
277     kontrolle3_f=sum(f_j);
278     kontrolle3_z=sum(z_j);
279     %Xi-Quadrat berechnen
280     Xi_l_sq_j=((l_j-l_Fx_j).^2)./l_Fx_j;
281     Xi_l_sq=sum(Xi_l_sq_j);
282     Xi_l_sq_alpha=chi2inv(1-a,n_kl_l-1);
283
284     Xi_m_sq_j=((m_j-m_Fx_j).^2)./m_Fx_j;
285     Xi_m_sq=sum(Xi_m_sq_j);
286     Xi_m_sq_alpha=chi2inv(1-a,n_kl_m-1);
287
288     Xi_f_sq_j=((f_j-f_Fx_j).^2)./f_Fx_j;
289     Xi_f_sq=sum(Xi_f_sq_j);
290     Xi_f_sq_alpha=chi2inv(1-a,n_kl_f-1);
291
292

```

```

293     Xi_z_sq_j=((z_j-z_Fx_j).^2)./z_Fx_j;
294     Xi_z_sq=sum(Xi_z_sq_j);
295     Xi_z_sq_alpha=chi2inv(1-a,n_kl_z-1);
296
297     ##
298     #####
299     ##NATAF MODEL
300     ##
301     #####
302
303     %Funktion zur Berechnung der Korrelation im Gaußraum
304     function y=rhodash(s_i,s_j,r_ij)
305     y=( log(1+r_ij*s_i*s_j) )/( sqrt( log(1+(s_i^2))*log(1+(s_j^2)) ) );
306     endfunction
307
308     %Korrelationen im Gaußraum ermitteln
309     rho_lm=rhodash(s_l,s_m,r_lm);
310     rho_lf=rhodash(s_l,s_f,r_lf);
311     rho_lz=rhodash(s_l,s_z,r_lz);
312     rho_mf=rhodash(s_m,s_f,r_mf);
313     rho_mz=rhodash(s_m,s_z,r_mz);
314     rho_fz=rhodash(s_f,s_z,r_fz);
315
316     %Korrelationsmatrix im Gaußraum
317     R=[1, rho_lm, rho_lf, rho_lz;
318     rho_lm, 1, rho_mf, rho_mz;
319     rho_lf, rho_mf, 1, rho_fz;
320     rho_lz, rho_mz, rho_fz, 1];
321     lamda_R=eig(R);
322
323     %Cholesky Zerlegung der Korrelationsmatrix
324     L=chol(R);
325
326     %Erzeuge unkorrelierte, mittelwertfreie Zufallszahlen im Gaußraum
327     %(standardisiert!)
328     u=stdnormal_rnd(4,N);
329
330     %Korreliere die Variablen im Gaußraum mit der inversen Cholesky
331     Matrix L'
332     %(standardisiert aber korreliert!)
333     v=(L')*u;
334
335     %Transformiere nun korrelierte Variablen vom Gaußraum in den l,m,f,z-
336     Raum
337     %(mache Standardisierung 'rückgängig')
338     v_l=v(1,:);
339     v_m=v(2,:);
340     v_f=v(3,:);
341     v_z=v(4,:);
342     x_l=m_l*exp(v_l*s_l);
343     x_m=m_m*exp(v_m*s_m);
344     x_f=m_f*exp(v_f*s_f);
345     x_z=m_z*exp(v_z*s_z);
346
347     %Kontrolle - Errechne Korrelationsmatrix im l,m,f,z-Raum
348     r_lm_ko=corr(x_l,x_m);
349     r_lf_ko=corr(x_l,x_f);
350     r_lz_ko=corr(x_l,x_z);
351     r_mf_ko=corr(x_m,x_f);

```

```

347     r_mz_ko=corr(x_m,x_z);
348     r_fz_ko=corr(x_f,x_z);
349
350     ##
351     #####
352     ##ERMITTLUNG DER KRITISCHEN UEBERFAHRTSGESCHWINDIGKEITEN
353     ##
354     #####
355     %Ausschluss von allen Punkten (=Bruecken), deren Laenge 5m
356     unterschreitet
357     x_kontr=x_l<l_grenz; %setzt eine 0 an jede Stelle, wo die Laenge <
358     l_grenz in m betraegt
359     x_kontr2=x_kontr==0; %setzt eine 1 an jede Stelle, wo die Laenge <5m
360     betraegt
361     x_l_par=x_kontr2.*x_l; %setze jene Elemente 0, wo die Brueckenlaenge
362     l_grenz unterschreitet
363     x_m_par=x_kontr2.*x_m; %setze jene Elemente 0, wo die Brueckenlaenge
364     l_grenz unterschreitet
365     x_f_par=x_kontr2.*x_f; %setze jene Elemente 0, wo die Brueckenlaenge
366     l_grenz unterschreitet
367     x_z_par=x_kontr2.*x_z; %setze jene Elemente 0, wo die Brueckenlaenge
368     l_grenz unterschreitet
369
370     x_l_par(x_l_par==0)=[]; %setze jene Elemente 0, wo die Brueckenlaenge
371     l_grenz unterschreitet
372     x_m_par(x_m_par==0)=[]; %setze jene Elemente 0, wo die Brueckenlaenge
373     l_grenz unterschreitet
374     x_f_par(x_f_par==0)=[]; %setze jene Elemente 0, wo die Brueckenlaenge
375     l_grenz unterschreitet
376     x_z_par(x_z_par==0)=[]; %setze jene Elemente 0, wo die Brueckenlaenge
377     l_grenz unterschreitet
378
379     %%Ermittlung der kritischen Geschwindigkeiten fuer das MLM
380
381     %Laengen ueber Puffer fuer alle Zuege
382     %Railjet
383     d_RJ=26.5; %in m
384     %Delta-m fuer alle Zuege (vgl. Diplomarbeit Stollwitzer S.23 ff.)
385     %l_RJ8WOHNETW=8*(16.5+2*2.5)+7*5=207m
386     %Summe(Radsatzmassen)_RJ8WOHNETW=8*4*1900=60800 kg
387     %delta_m_RJ=Summe(Radsatzmassen)_RJ8WOHNETW/l_RJ8WOHNETW=293.72 kg
388     =0.29372 t/m
389     delta_m_RJ=0.29372; %t/m, Railjet 2 Loks
390     %Initialisiere Felder fuer die kritische Geschwindigkeit fuer alle
391     Zuege
392     v_cr_MLM_RJ=[];
393     v_cr_DIM_RJ=[];
394     %Initialisiere Felder zum abspeichern der ersten 10 kritischen
395     Geschwindigkeiten
396     % zur Kontrolle
397     v_kontr_cr_MLM=[];
398     v_kontr_cr_DIM=[];
399
400     %Ermittle kritische Geschwindigkeiten fuer alle Zuege
401     for zug=1:1 %1...RJ, 2...ICE, 3...ETR
402
403     v_cr_MLM=[];

```

```

389     v_cr_DIM=[];
390
391     switch zug
392     case 1
393         d=d_RJ;
394         delta_m=delta_m_RJ;
395     end
396
397
398     %Berechnung von v_crit
399     for j=1:N_v_cr
400         v_cr_MLM(j,:)=(d*x_f_par/j)*3.6;
401     endfor
402
403     %%Ermittlung der kritischen Geschwindigkeiten fuer das DIM
404
405     %linearen Zusammenhang von m und f ermitteln
406     beta=sum( (m-mu_m).*(f-mu_f) )/( sum( (m-mu_m).^2 ) );
407     alpha=mu_f-beta*mu_m;
408     f_regr_m_x=alpha+beta*x;
409     ##f_regr_m=alpha+beta*m;
410
411
412
413     %Delta-f aus linearer Regression ermitteln fuer alle Zuege
414     delta_f=beta*delta_m;
415
416     %Berechnung der geänderten Frequenzen fuer das DIM
417     f_DIM=x_f_par+delta_f;
418
419     %Berechnung von v_cr in km/h
420     for j=1:N_v_cr
421         v_cr_DIM(j,:)=(d*f_DIM/j)*3.6;
422     endfor
423
424     %Zur Kontrolle: Abspeichern der ersten 10 kritischen
425         Geschwindigkeiten in Feld
426     v_kontr_cr_MLM=v_cr_MLM;
427     v_kontr_cr_DIM=v_cr_DIM;
428
429     %Es sollen im weiteren nur die ersten drei kritischen
430         Geschwindigkeiten sowie
431     %die ersten zwei kritischen Geschwindigkeiten unter 350 km/h
432         berechnet werden.
433     %Alle anderen kritischen Geschwindigkeiten werden ausgeschlossen
434     v_lim=350; %in km/h
435     v_cr_MLM_copy=[];
436     v_cr_DIM_copy=[];
437
438     %Schleife ueber alle Tragwerke
439     for q=1:length(x_l_par) %...q=Tragwerksnummer
440
441         %MLM:
442         v_cr_MLM_copy_q=[];
443         loopactive=1;
444         index_q=0;
445         rows_q=0;
446         for d=1:N_v_cr
447             if (v_cr_MLM(d,q)<=v_lim)
448                 while (loopactive==1)

```

```

446     index_q=d;
447     loopactive=0;
448     endwhile
449     endif
450     endfor
451
452     if (index_q<=(N_v_cr_keep+1)) %q==1 bis q==4 %%OK
453     rows_q=[1:1:(N_v_cr_keep+N_v_cr_keep_kl_350)];
454     v_cr_MLM_copy_q=v_cr_MLM(rows_q,q);
455     v_cr_MLM_copy=[v_cr_MLM_copy, v_cr_MLM_copy_q];
456     elseif ((index_q+N_v_cr_keep_kl_350-1)>(N_v_cr))%q==N_v_cr
457     rows_q=[1:1:N_v_cr_keep]; %%OK
458     rows_q=[rows_q, [(N_v_cr-N_v_cr_keep_kl_350+1):1:N_v_cr]];
459     v_cr_MLM_copy_q=v_cr_MLM(rows_q,q);
460     v_cr_MLM_copy=[v_cr_MLM_copy, v_cr_MLM_copy_q];
461     else %sonst
462     rows_q=[1:1:N_v_cr_keep];
463     rows_q=[rows_q, [index_q:1:(index_q+N_v_cr_keep_kl_350-1)]];
464     v_cr_MLM_copy_q=v_cr_MLM(rows_q,q);
465     v_cr_MLM_copy=[v_cr_MLM_copy, v_cr_MLM_copy_q];
466     endif
467     %DIM:
468     v_cr_DIM_copy_q=[];
469     loopactive=1;
470     index_q=0;
471     rows_q=0;
472     for d=1:N_v_cr
473     if (v_cr_DIM(d,q)<=v_lim)
474     while (loopactive==1)
475     index_q=d;
476     loopactive=0;
477     endwhile
478     endif
479     endfor
480
481     if (index_q<=(N_v_cr_keep+1)) %q==1 bis q==4 %%OK
482     rows_q=[1:1:(N_v_cr_keep+N_v_cr_keep_kl_350)];
483     v_cr_DIM_copy_q=v_cr_DIM(rows_q,q);
484     v_cr_DIM_copy=[v_cr_DIM_copy, v_cr_DIM_copy_q];
485     elseif ((index_q+N_v_cr_keep_kl_350-1)>(N_v_cr))%q==N_v_cr
486     rows_q=[1:1:N_v_cr_keep]; %%OK
487     rows_q=[rows_q, [(N_v_cr-N_v_cr_keep_kl_350+1):1:N_v_cr]];
488     v_cr_DIM_copy_q=v_cr_DIM(rows_q,q);
489     v_cr_DIM_copy=[v_cr_DIM_copy, v_cr_DIM_copy_q];
490     else %sonst
491     rows_q=[1:1:N_v_cr_keep];
492     rows_q=[rows_q, [index_q:1:(index_q+N_v_cr_keep_kl_350-1)]];
493     v_cr_DIM_copy_q=v_cr_DIM(rows_q,q);
494     v_cr_DIM_copy=[v_cr_DIM_copy, v_cr_DIM_copy_q];
495     endif
496     endfor %ENDE q...q=Tragwerksnummer
497
498     v_cr_MLM=[];
499     v_cr_DIM=[];
500     v_cr_MLM=v_cr_MLM_copy;
501     v_cr_DIM=v_cr_DIM_copy;
502
503     switch zug
504     case 1
505     v_cr_MLM_RJ=v_cr_MLM;

```

```

506     v_cr_DIM_RJ=v_cr_DIM;
507     end
508
509
510     endfor %ENDE zug
511
512     ##
513     #####
514     ##ERSTELLEN DER AUSGABEMATRIX DES PARAMETERFELDES
515     ##
516     #####
517     %Parameterfeld (fuer MLM geeignet)
518     parameter=[x_l_par ',x_m_par ',x_f_par ',x_z_par ',v_cr_MLM_RJ ',
519               v_cr_DIM_RJ '];
520     %Export
521     save("-ascii","parameterfeld.txt","parameter");
522     ##
523     #####
524     ##ERMITTLUNG DER GESCHWINDIGKEITSBEREICHE FUER DIE MLM UND DIM
525     ##
526     #####
527     zug=[];
528     for zug=1:1
529         %Inititalisiere Geschwindigkeitsfelder fuer MLM und DIM
530         v_MLM=[];
531         v_DIM=[];
532         plot_b_MLM=[];
533         plot_b_DIM=[];
534         %Schleife fuer g: g==1...MLM , g==2...DIM
535         for g=1:2
536             #####
537             %Angabe jener Zeilen (=Tragwerke) aus par, die berechnet werden
538             sollen
539             par_start=1; %Erste Zeile von Par, die berechnet werden soll
540             par_end=length(x_l_par); %Letzte Zeile von par, die berechnet werden
541             soll
542             %Maximale Anzahl der Geschwindigkeitsschritte pro kritischer
543             %Geschwindigkeit. Die Untergrenze der Geschwindigkeitsschritte ergibt
544             %sich aus der minimalen Schrittlaenge
545             #####num_step_v=30; %num_step_v wird jetzt nicht mehr festgelegt
546             sondern ergibt
547             %sich derzeit aus der Laenge der Geschwindigkeitsschritte
548             %Minimale Schrittlaenge fuer Geschwindigkeitsschritte eingeben
549             min_steplen=1; %in km/h
550             %maximale Intervallbreite um die kritische Geschwindigkeit
551             %Anmerkung: die Intervallbreite wird verkleinert, wenn sich zwei
552             Intervalle
553             %unterschiedlciher kritischer Geschwidnigkeiten beruehren wuerden

```

```

551     bound_v=75; %Intervall=[v_crit-bound_v, v_crit+bound_v]
552
553     %Anzahl der kritischen Geschwindigkeiten, die in parameterfeld.txt
           gegeben
554     %sind
555     num_v=5;
556
557     %jene Stelle(=Spaltennummer), an der die erste kritische
           Geschwindigkeit in der
558     %jeweiligen Zeile von par zu finden ist
559     switch zug
560     case 1 % RJ
561     switch g
562     case 1 %MLM
563     pos_v=5;
564     case 2 %DIM
565     pos_v=10;
566     end%ENDE switch g
567
568
569     end%ENDE switch zug
570     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ENDE EINGABEBLOCK
           %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
571
572     %Matrix, in die die Ergebnisse fuer MLM bzw DIM zwischengespeichert
           werden
573     v_MLMDIM=[];
574     %Matrix, in die die Ergebnisse fuer MLM bzw DIM fuer das j-te
           Tragwerk
575     %zwischengespeichert werden
576     v_MLMDIM_j=[];
577     %Erzeuge Intervalle um die kritischen Geschwindigkeiten mit einer
           Schleife
578     %k ist der Index der jeweiligen kritischen Geschwindigkeit
579     %Feld, das Geschwindigkeitsbereiche enthaelt
580     vdv_kmh_j=[];
581     %aktuelle Feldlaenge von vdv_kmh_j
582     len_vdv_kmh_j=[];
583     %Felder initialisieren, die die Indices der oberen und unteren
           Grenzen der
584     %Geschwindigkeitsbereiche fuer alle Bruecken enthalten
585     lower_b=[];
586     upper_b=[];
587     num_TW_b=[];
588
589     %Schleife fuer j: j...Nummer des jeweiligen Tragwerks (=
           Parameterpunktes im 4D)
590     for j=par_start:par_end
591     %Leeren der Ergenismatrix fuer das j-te Tragwerk
592     v_MLMDIM_j=[];
593     vdv_kmh_j=[];
594     %Leeren der obere und untere Grenze fuer das j-te Tragwerk
595     upper_b_j=[];
596     lower_b_j=[];
597     %Leeren weiterer Vektoren fuer das j-te Tragwerk
598     len_vdv_kmh_j=[];
599     num_TW_b_j=[];
600
601     %Schleife fuer k: k...Index der k-ten kritischen Geschwindigkeit des
           j-ten

```

```

602     %Tragwerks, wobei k einer Indexverschiebung um pos_v unterzogen wird.
603     for k=pos_v:(num_v-1+pos_v)
604         vdv_kmh_j_k=[];
605         step_v_k=[];
606
607
608         %Ermittlung der Differenzen der k-ten kritischen Geschwindigkeit zur
609             k+1
610         %und zur k-1 kritischen Geschwindigkeit
611         switch k
612             case pos_v
613                 delta_upper_k=2*bound_v;
614                 delta_lower_k=parameter(j,k)-parameter(j,(k+1));
615             case (num_v-1+pos_v)
616                 delta_upper_k=parameter(j,(k-1))-parameter(j,k);
617                 delta_lower_k=parameter(j,(k));
618             otherwise
619                 delta_upper_k=parameter(j,(k-1))-parameter(j,k);
620                 delta_lower_k=parameter(j,k)-parameter(j,(k+1));
621         end
622         %Kontrolle um negative Differenzen zu vermeiden
623         if (delta_upper_k<0 || delta_lower_k<0)
624             'Fehler: delta_upper_k oder delta_lower_k kleiner als 0'
625         end
626
627         %Intervallaenge bestimmen, je nachdem ob sich zwei kritische
628         %Geschwindigkeiten zu nahe kommen; bound_v wird in der EIngabe
629             definiert.
630         bound_v_upper_k=parameter(j,k)+bound_v;
631         bound_v_lower_k=parameter(j,k)-bound_v;
632
633         if delta_upper_k<(2*bound_v)
634             bound_v_upper_k=parameter(j,k)+delta_upper_k/2;
635         end
636         if delta_lower_k<(2*bound_v)
637             bound_v_lower_k=parameter(j,k)-delta_lower_k/2;
638         end
639         %Kontrolle um negative Geschwindigkeiten zu vermeiden
640         if bound_v_lower_k<=0
641             bound_v_lower_k=0.5;
642         end
643
644         %Schrittlaege im k-ten Geschwindigkeitsintervall bestimmen. Falls
645             die
646         %Schrittlaege unter einer gewaehlten Grenze liegt, wird sie auf
647             diese
648         %Grenze gesetzt.
649         %Fuer hohe kritische Geschwindigkeiten wird ein hoeherer
650             Schrittabstand
651         %gewaehlt, fuer niedrige kritische Geschwindigkeiten ein niedrigerer
652             Schrittabstand
653         if (parameter(j,k)>350)%(k<=pos_v+N_v_cr_keep-1)
654             step_v_k=10;
655         else
656             step_v_k=2;
657         endif
658         ##step_v_k=(bound_v_upper_k-bound_v_lower_k)/num_step_v;
659         if (step_v_k<=min_steplen)
660             step_v_k=min_steplen;

```

```

657     end
658
659     %Geschwindigkeitsfeld mit k-tem Intervall befüllen.
660     vdv_kmh_j_k=round([bound_v_lower_k:step_v_k:bound_v_upper_k]);
661     vdv_kmh_j = [vdv_kmh_j,vdv_kmh_j_k];           %
           Geschwindigkeitsbereich [km/h]
662
663     %Ermittle Anzahl der Punkte des jeweiligen Geschwindigkeitsintervalls
           fuer
664     %späetere Plots
665     %Indexverschiebung
666     r=k-pos_v+1;
667     %Feld, das die jeweiligen Laengen des k-ten Geschwindigkeitsbereiches
           enthaelt
668     len_vdv_kmh_j=[len_vdv_kmh_j, length(vdv_kmh_j_k)];
669     %upper_b und lower_b enthalten an der p-ten Stelle jeweils den Index
           der oberen
670     %bzw unteren Grenze des k-ten Geschwindigkeitsintervalls
671     upper_b_j=[upper_b_j,sum(len_vdv_kmh_j)];
672     lower_b_j=[lower_b_j,upper_b_j(r)-len_vdv_kmh_j(r)+1];
673
674     end %ENDE k
675
676     %Erstelle Zeilenvektor, der in allen Eintraegen die Tragwerksnummer j
           enthaelt,
677     %und so viele Eintraege hat, wie der Vektor der die
           Geschwindigkeitsintervalle
678     %enthaelt (=vdv_kmh_j)
679     num_TW_v=j*ones(1,length(vdv_kmh_j));
680     %Schreibe Tragwerksnummernvektor und den Vektor, der die
           Geschwindigkeit des
681     %j-ten Tragwerks enthaelt in eine Matrix
682     v_MLMDIM_j=[num_TW_v; vdv_kmh_j];
683     %Schreibe nun die Tragwerksnummern und Geschwindigkeitsbereiche des j
           -ten
684     %Tragwerks in eine Gesamtmatrix fuer alle Tragwerke
685     v_MLMDIM=[v_MLMDIM,v_MLMDIM_j];
686
687     %Erstelle Zeilenvektor, der in allen Eintraegen die Tragwerksnummer j
           enthaelt,
688     %und so viele Eintraege hat, wie der Vektor der die Ober- und
           Untergrenzen der
689     %Geschwindigkeitsintervalle enthaelt (=vdv_kmh_j)
690     num_TW_b_j=j*ones(1,length(upper_b_j));
691     %Schreibe nun auch die Vektoren, die die Indices der Ober- und
           Untergrenzen
692     %aller Geschwindigkeitsintervalle fuer das j-te Tragwerk enthalten in
           eine
693     %Matrix fuer alle Tragwerke
694     num_TW_b=[num_TW_b, num_TW_b_j];
695     lower_b=[lower_b, lower_b_j];
696     upper_b=[upper_b, upper_b_j];
697
698     end %ENDE j
699
700     %Erstelle zuerst ein Geschwindigkeitsfeld fuer das MLM g==1, danach
           fuer das DIM
701     %g==2; und erstelle auch Plotdatei, die fuer alle Tragwerke die
           Tragwerksnummer

```

```

702      %und die Ober- bzw. Untergrenzen der Geschwindigkeitsbereiche des j-
       ten
703      % Tragwerks enthaelt.
704      switch g
705      case 1 %MLM
706          v_MLM=[v_MLMDIM'];
707          plot_b_MLM=[num_TW_b', lower_b', upper_b'];
708      case 2 %DIM
709          v_DIM=[v_MLMDIM'];
710          plot_b_DIM=[num_TW_b', lower_b', upper_b'];
711      end
712
713      end %ENDE g
714
715      switch zug
716      case 1 %RJ
717          v_MLM_RJ=v_MLM;
718          v_DIM_RJ=v_DIM;
719          plot_b_MLM_RJ=plot_b_MLM;
720          plot_b_DIM_RJ=plot_b_DIM;
721      end%ENDE switch zug
722
723      endfor %ENDE zug
724
725      %Berechnung der Anzahl der vorhandenen Geschwindigkeitspunkte
726      %MLM
727      num_p_v_MLM_RJ=length(v_MLM_RJ);
728      %DIM
729      num_p_v_DIM_RJ=length(v_DIM_RJ);
730
731      ##
       #####
732      ##AUSGABE DER GESCHWINDIGKEITSINTERVALLE FUER DIE BERECHNUNG
733      ##
       #####
734
735      %Export
736      %RJ
737      save("-ascii","v_MLM_RJ.txt","v_MLM_RJ");
738      save("-ascii","v_DIM_RJ.txt","v_DIM_RJ");
739      %ICE
740
741      ##
       #####
742      ##ABSPEICHERN EINER PLOTDATEI, DIE INDICES ENTHAELT, DIE FUER WEITERE
       PLOTS IN
743      ## MATLAB BEIM DIM BZW MLM BENOETIGT WERDEN
744      ##
       #####
745
746      %Export
747      %RJ
748      save("-ascii","plot_b_MLM_RJ.txt","plot_b_MLM_RJ");
749      save("-ascii","plot_b_DIM_RJ.txt","plot_b_DIM_RJ");
750      %ICE
751

```

```

752      ##
          #####

753      ##ABSPEICHERN DER ZAHL DER TATSAECHLICH ERZEUGTEN PARAMETERPUNKTE
754      ##
          #####

755
756      %Es werden weiter oben jene Punkte des Parameterfeldes ausgeschlossen
          , deren
757      %Brueckenlaenge (=x_l) den Wert l_grenz unterschreitet. Nun soll
          sowohl die Zahl
758      %der tatsaechlich erzeugten Parameterpunkte als auch die Zahl der zu
          erzeugenden
759      %Parameterpunkte fuer eine weitere Analyse abgespeichert werden.
760
761
762      %Zahl der tatsaechlich erzeugten Parameterpunkte
763      M=length(x_l_par);
764      %Die Zahl der zu erzeugenden Parameterpunkte betraegt "N" - kann oben
          eingegeben
765      %werden
766      num_par=[N,M];
767
768      ####DIESEN BLOCK NUR AKTIVIEREN, WENN N MANUELL FESTGELEGT WIRD!!!!
769      ##save("-ascii","-append","num_par.txt","num_par");
770
771      ##
          #####

772      ##ABSCHAETZUNG FUER BERECHNUNGSZEIT ERSTELLEN
773      ##
          #####

774
775      %geschaetzte Berechnungszeit in Sekunden
776      t_ber_DIM_s=t_DIM*(num_p_v_DIM_RJ)/num_inst; %s
777      t_ber_MLM_s=t_MLM*(num_p_v_MLM_RJ)/num_inst; %s
778      %geschaetzte Berechnungszeit in Stunden
779      t_ber_DIM_h=t_ber_DIM_s/3600; %h
780      t_ber_MLM_h=t_ber_MLM_s/3600; %h
781      %geschaetzte Berechnungszeit in Tagen
782      t_ber_DIM_d=t_ber_DIM_h/24; %d
783      t_ber_MLM_d=t_ber_MLM_h/24; %d
784
785      ##
          #####

786      ##ABSOLUTE FEHLER DER KORRELATIONEN
787      ##
          #####

788      F_abs_lm=(r_lm_ko-r_lm);
789      F_abs_lf=(r_lf_ko-r_lf);
790      F_abs_lz=(r_lz_ko-r_lz);
791      F_abs_mf=(r_mf_ko-r_mf);
792      F_abs_mz=(r_mz_ko-r_mz);
793      F_abs_fz=(r_fz_ko-r_fz);

```

```
794      ##
          #####
795      ##RELATIVE FEHLER DER KORRELATIONEN
796      ##
          #####
797      F_lm=(r_lm_ko-r_lm)/r_lm;
798      F_lf=(r_lf_ko-r_lf)/r_lf;
799      F_lz=(r_lz_ko-r_lz)/r_lz;
800      F_mf=(r_mf_ko-r_mf)/r_mf;
801      F_mz=(r_mz_ko-r_mz)/r_mz;
802      F_fz=(r_fz_ko-r_fz)/r_fz;
```

Anhang B

Program Code zur Ergebnisauswertung

```
1      %
      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2      %#ERGENISAUSWERTUNG DER BERECHNUNGSERGEBNISSE VON DIM UND MLM
3      %
      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4
5      clear;
6      clear all;
7      clc;
8
9      %
10     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
11
12     %#EINGABE
13     %
14     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
15
16     %Herausfiltern aller Ergebnisse, die nicht in einem Intervall um eine
17     %gewuenschte kritische Geschwindigkeit liegen
18     %Intervall...I=[v_cr+lower_int;v_cr+upper_int]
19     stelle_v_cr_MLM=8; %jene Stelle in parameter, an der die gewuenschte
20     kritische Geschwindigkeit fuer MLM zu finden ist; AENDERUNG
21     191026:die stelle der erste kritischen geschwindigkeit unter 350
22     km/h angeben=8
23     stelle_v_cr_DIM=stelle_v_cr_MLM+5; %jene Stelle in parameter, an der
24     die gewuenschte kritische Geschwindigkeit fuer MLM zu finden ist
25     upper_int=10; % in km/h
26     lower_int=-10; %<0, in km/h
27
28     %Herausfiltern aller Ergebnisse, die nicht in einem Intervall um die
29     %erste
30     %kritische Geschwindigkeit liegen, die v_lim_o unterschreitet
31
32     %%%siehe unten, hier ist weiter unten im Code eine manuelle
33     %Anpassung
34     %%%notwendig, wenn mehr als 5 kritische Geschwindigkeiten vorhanden
35     %sind
36     %%%oder sich die Stelle in parameter aendert, an der die erste
37     %kritische
38     %%%Geschwindigkeit fuer jeweils MLM oder DIM zu finden ist
39
40     % Herausfiltern aller Geschwindigkeiten, die ueber v_kim_o und unter
41     % v_lim_u liegen bzw nur nach kritischen Geschwindigkeiten die in
42     % diesem
43     % Bereich liegen
44     v_lim_o=350; %in km/h
```



```

78      %Railjet
79      res_MLM_Railjet=[res_MLM_Railjet_1; res_MLM_Railjet_2];%importdata('
          res_MLM_Railjet.txt'); %Ergebnisdatei
80
81
82      % % Ergebnisse einlesen, die aus einer erneuten Berechnung von
          Tragwerken
83      % % stammen, bei denen urspruenglich keine Berechnungsergebnisse fur
          v<v_lim
84      % % vorhanden waren, weil die kritischen Geschwindigkeiten so gross
          waren
85      % %Railjet %TW 63_188_264_360_430_488_492_502_585
86      % %Railjet %TW 63
87      % res_MLM_Railjet_ers_1=importdata('res_MLM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_1.
          txt'); %Ergebnisdatei
88      % res_MLM_Railjet_ers_1(:,1)=63;
89      % %Railjet %TW 188
90      % res_MLM_Railjet_ers_2=importdata('res_MLM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_2.
          txt'); %Ergebnisdatei
91      % res_MLM_Railjet_ers_2(:,1)=188;
92      % %Railjet %TW 264
93      % res_MLM_Railjet_ers_3=importdata('res_MLM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_3.
          txt'); %Ergebnisdatei
94      % res_MLM_Railjet_ers_3(:,1)=264;
95      % %Railjet %TW 360
96      % res_MLM_Railjet_ers_4=importdata('res_MLM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_4.
          txt'); %Ergebnisdatei
97      % res_MLM_Railjet_ers_4(:,1)=360;
98      % %Railjet %TW 430
99      % res_MLM_Railjet_ers_5=importdata('res_MLM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_5.
          txt'); %Ergebnisdatei
100     % res_MLM_Railjet_ers_5(:,1)=430;
101     % %Railjet %TW 488
102     % res_MLM_Railjet_ers_6=importdata('res_MLM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_6.
          txt'); %Ergebnisdatei
103     % res_MLM_Railjet_ers_6(:,1)=488;
104     % %Railjet %TW 492
105     % res_MLM_Railjet_ers_7=importdata('res_MLM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_7.
          txt'); %Ergebnisdatei
106     % res_MLM_Railjet_ers_7(:,1)=492;
107     % %Railjet %TW 502
108     % res_MLM_Railjet_ers_8=importdata('res_MLM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_8.
          txt'); %Ergebnisdatei
109     % res_MLM_Railjet_ers_8(:,1)=502;
110     % %Railjet %TW 585
111     % res_MLM_Railjet_ers_9=importdata('res_MLM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_9.
          txt'); %Ergebnisdatei
112     % res_MLM_Railjet_ers_9(:,1)=585;
113     %
114     % %Ersetzen der entsprechenden Eintraege in res_MLM_Railjet durch
          Eintraege
115     % for u=1:9
116     %     switch u
117     %         case 1 %Tragwerk 63
118     %             n_ers=63;%res_MLM_Railjet_ers_1(1,1);
119     %         case 2 %Tragwerk 188
120     %             n_ers=188;
121     %         case 3 %Tragwerk 264
122     %             n_ers=264;
123     %         case 4 %Tragwerk 360

```

```

124      %           n_ers=360;
125      %           case 5 %Tragwerk 430
126      %           n_ers=430;
127      %           case 6 %Tragwerk 488
128      %           n_ers=488;
129      %           case 7 %Tragwerk 492
130      %           n_ers=492;
131      %           case 8 %Tragwerk 502
132      %           n_ers=502;
133      %           case 9 %Tragwerk 585
134      %           n_ers=585;
135      %       end
136      %
137      %       res_num=res_MLM_Railjet(:,1);
138      %       taker_vor=res_num<n_ers;
139      %       taker_nach=res_num>n_ers;
140      %       res_MLM_Railjet_vor=taker_vor.*res_MLM_Railjet;
141      %       res_MLM_Railjet_nach=taker_nach.*res_MLM_Railjet;
142      %       res_MLM_Railjet=[];
143      %
144      %       switch u
145      %           case 1
146      %               res_MLM_Railjet=[res_MLM_Railjet_vor;
147      %               res_MLM_Railjet_ers_1; res_MLM_Railjet_nach];
148      %           case 2
149      %               res_MLM_Railjet=[res_MLM_Railjet_vor;
150      %               res_MLM_Railjet_ers_2; res_MLM_Railjet_nach];
151      %           case 3
152      %               res_MLM_Railjet=[res_MLM_Railjet_vor;
153      %               res_MLM_Railjet_ers_3; res_MLM_Railjet_nach];
154      %           case 4
155      %               res_MLM_Railjet=[res_MLM_Railjet_vor;
156      %               res_MLM_Railjet_ers_4; res_MLM_Railjet_nach];
157      %           case 5
158      %               res_MLM_Railjet=[res_MLM_Railjet_vor;
159      %               res_MLM_Railjet_ers_5; res_MLM_Railjet_nach];
160      %           case 6
161      %               res_MLM_Railjet=[res_MLM_Railjet_vor;
162      %               res_MLM_Railjet_ers_6; res_MLM_Railjet_nach];
163      %           case 7
164      %               res_MLM_Railjet=[res_MLM_Railjet_vor;
165      %               res_MLM_Railjet_ers_7; res_MLM_Railjet_nach];
166      %           case 8
167      %               res_MLM_Railjet=[res_MLM_Railjet_vor;
168      %               res_MLM_Railjet_ers_8; res_MLM_Railjet_nach];
169      %           case 9
170      %               res_MLM_Railjet=[res_MLM_Railjet_vor;
171      %               res_MLM_Railjet_ers_9; res_MLM_Railjet_nach];
172      %       end
173      % end
174      % % % % % aus res_MLM_Railjet_ers_1
175      % % % % % n_ers=res_MLM_Railjet_ers_1(1,1);
176      % % % % % res_num=res_MLM_Railjet(:,1);
177      % % % % % taker_vor=res_num<n_ers;
178      % % % % % taker_nach=res_num>n_ers;
179      % % % % % res_MLM_Railjet_vor=taker_vor.*res_MLM_Railjet;
180      % % % % % res_MLM_Railjet_nach=taker_nach.*res_MLM_Railjet;
181      % % % % % res_MLM_Railjet=[];

```

```

174      % % % % res_MLM_Railjet=[res_MLM_Railjet_vor; res_MLM_Railjet_ers_1
      ; res_MLM_Railjet_nach];
175
176
177      % % % % % % % % % % % % % % % % % % % AENDERUNG 191026
178      % % % % % VARIANTE 1
179      % %Herausfiltern aller Ergebnisse, die nicht in einem Intervall um
      eine
180      % %gewuenschte kritische Geschwindigkeit liegen
181      % v_cr_MLM=parameter(:,stelle_v_cr_MLM); %krit Geschw in km/h
182      % n_ges=[];
183      % v_ges=[];
184      % a_ges=[];
185      % w_ges=[];
186      % vergleich=[];
187      % n_take=res_MLM_Railjet(:,1);
188      % v_take=res_MLM_Railjet(:,2);
189      % a_take=res_MLM_Railjet(:,3);
190      % w_take=res_MLM_Railjet(:,4);
191      % for b=1:length(parameter(:,1))
192      %
193      %     search_num=b*ones(length(v_take),1);
194      %     get_v=(n_take==search_num);
195      %     v_b=get_v.*v_take;
196      %     v_upper=v_cr_MLM(b)+upper_int;
197      %     v_lower=v_cr_MLM(b)+lower_int;
198      %     v_b(v_b>v_upper)=0;
199      %     v_b(v_b<v_lower)=0;
200      %     deleter=(v_b~=0);
201      %     n_b=deleter.*n_take;
202      %     a_b=deleter.*a_take;
203      %     w_b=deleter.*w_take;
204      %
205      %     n_b(n_b==0)=[];
206      %     v_b(v_b==0)=[];
207      %     a_b(a_b==0)=[];
208      %     w_b(w_b==0)=[];
209      %
210      %     n_ges=[n_ges; n_b];
211      %     v_ges=[v_ges; v_b];
212      %     a_ges=[a_ges; a_b];
213      %     w_ges=[w_ges; w_b];
214      %     b
215      % end
216      % % res_MLM_Railjet=[];
217      % res_MLM_Railjet_vcr4=[n_ges, v_ges, a_ges, w_ges];
218      %
219      % % % % % VARIANTE 1
220      % %Herausfiltern aller Ergebnisse, die nicht in einem Intervall um
      eine
221      % %gewuenschte kritische Geschwindigkeit liegen
222      % v_cr_MLM=parameter(:,(stelle_v_cr_MLM+1)); %krit Geschw in km/h
223      % n_ges=[];
224      % v_ges=[];
225      % a_ges=[];
226      % w_ges=[];
227      % vergleich=[];
228      % n_take=res_MLM_Railjet(:,1);
229      % v_take=res_MLM_Railjet(:,2);
230      % a_take=res_MLM_Railjet(:,3);

```

```

231     % w_take=res_MLM_Railjet(:,4);
232     % for b=1:length(parameter(:,1))
233     %
234     %     search_num=b*ones(length(v_take),1);
235     %     get_v=(n_take==search_num);
236     %     v_b=get_v.*v_take;
237     %     v_upper=v_cr_MLM(b)+upper_int;
238     %     v_lower=v_cr_MLM(b)+lower_int;
239     %     v_b(v_b>v_upper)=0;
240     %     v_b(v_b<v_lower)=0;
241     %     deleter=(v_b~=0);
242     %     n_b=deleter.*n_take;
243     %     a_b=deleter.*a_take;
244     %     w_b=deleter.*w_take;
245     %
246     %     n_b(n_b==0)=[];
247     %     v_b(v_b==0)=[];
248     %     a_b(a_b==0)=[];
249     %     w_b(w_b==0)=[];
250     %
251     %     n_ges=[n_ges; n_b];
252     %     v_ges=[v_ges; v_b];
253     %     a_ges=[a_ges; a_b];
254     %     w_ges=[w_ges; w_b];
255     %     b
256     % end
257     % % res_MLM_Railjet=[];
258     % res_MLM_Railjet_vcr5=[n_ges, v_ges, a_ges, w_ges];
259
260     %%%%VARIANTE 2
261     %Herausfiltern aller Ergebnisse, die nicht in einem Intervall um die
262     %erste
263     %kritische Geschwindigkeit liegen, die v_lim_o unterschreitet
264     v_cr_get_MLM=[];
265     v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM=[];
266     v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM_zweitkleinste=[];
267     for b=1:length(parameter(:,1))
268     v_cr_get_MLM=[v_cr_get_MLM; parameter(b,5), parameter(b,6), parameter
269     (b,7), parameter(b,8), parameter(b,9)];
270     end
271     v_cr_get_MLM(v_cr_get_MLM>v_lim_o)=0;
272     v_cr_get_MLM_zweitkleinste=v_cr_get_MLM;
273
274     for b=1:length(parameter(:,1))
275     v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM_b=max(v_cr_get_MLM(b,:));
276     v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM=[v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM;
277     v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM_b];
278
279     v_cr_get_MLM_zweitkleinste_b=v_cr_get_MLM_zweitkleinste(b,:);
280     v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM_zweitkleinste_b=max(
281     v_cr_get_MLM_zweitkleinste_b(v_cr_get_MLM_zweitkleinste_b~=max(
282     v_cr_get_MLM_zweitkleinste_b)));
283     v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM_zweitkleinste=[
284     v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM_zweitkleinste;
285     v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM_zweitkleinste_b];
286     end
287     %Alle Ergebnisse um die groesste kritische Geschwinigkeit unter 350
288     %kmh herauslesen
289     v_cr_MLM=v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM; %krit Geschw in km/h
290     n_ges=[];

```

```

283     v_ges=[];
284     a_ges=[];
285     w_ges=[];
286     vergleich=[];
287     n_take=res_MLM_Railjet(:,1);
288     v_take=res_MLM_Railjet(:,2);
289     a_take=res_MLM_Railjet(:,3);
290     w_take=res_MLM_Railjet(:,4);
291     for b=1:length(parameter(:,1))
292
293         search_num=b*ones(length(v_take),1);
294         get_v=(n_take==search_num);
295         v_b=get_v.*v_take;
296         v_upper=v_cr_MLM(b)+upper_int;
297         v_lower=v_cr_MLM(b)+lower_int;
298         v_b(v_b>v_upper)=0;
299         v_b(v_b<v_lower)=0;
300         deleter=(v_b~=0);
301         n_b=deleter.*n_take;
302         a_b=deleter.*a_take;
303         w_b=deleter.*w_take;
304
305         n_b(n_b==0)=[];
306         v_b(v_b==0)=[];
307         a_b(a_b==0)=[];
308         w_b(w_b==0)=[];
309
310         n_ges=[n_ges; n_b];
311         v_ges=[v_ges; v_b];
312         a_ges=[a_ges; a_b];
313         w_ges=[w_ges; w_b];
314         b
315     end
316     % res_MLM_Railjet=[];
317     res_MLM_Railjet_vcr4=[n_ges, v_ges, a_ges, w_ges];
318     %Alle Ergebnisse um die zweitgroesste kritische Geschwinigkeit unter
319         350 kmh herauslesen
320     v_cr_MLM=v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM_zweitkleinste; %krit Geschw in km/h
321     n_ges=[];
322     v_ges=[];
323     a_ges=[];
324     w_ges=[];
325     vergleich=[];
326     n_take=res_MLM_Railjet(:,1);
327     v_take=res_MLM_Railjet(:,2);
328     a_take=res_MLM_Railjet(:,3);
329     w_take=res_MLM_Railjet(:,4);
330     for b=1:length(parameter(:,1))
331
332         search_num=b*ones(length(v_take),1);
333         get_v=(n_take==search_num);
334         v_b=get_v.*v_take;
335         v_upper=v_cr_MLM(b)+upper_int;
336         v_lower=v_cr_MLM(b)+lower_int;
337         v_b(v_b>v_upper)=0;
338         v_b(v_b<v_lower)=0;
339         deleter=(v_b~=0);
340         n_b=deleter.*n_take;
341         a_b=deleter.*a_take;
342         w_b=deleter.*w_take;

```

```

342
343     n_b(n_b==0) = [];
344     v_b(v_b==0) = [];
345     a_b(a_b==0) = [];
346     w_b(w_b==0) = [];
347
348     n_ges=[n_ges; n_b];
349     v_ges=[v_ges; v_b];
350     a_ges=[a_ges; a_b];
351     w_ges=[w_ges; w_b];
352     b
353     end
354     % res_MLM_Railjet=[];
355     res_MLM_Railjet_vcr5=[n_ges, v_ges, a_ges, w_ges];
356
357     % %%%%VARIANTE 2
358     % %Herausfiltern aller Ergebnisse, die nicht in einem Intervall um die
359     % %kritische Geschwindigkeit liegen, die v_lim_o unterschreitet
360     % v_cr_get_MLM=[];
361     % v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM=[];
362     % for b=1:length(parameter(:,1))
363     %     v_cr_get_MLM=[v_cr_get_MLM; parameter(b,5), parameter(b,6),
364     %         parameter(b,7), parameter(b,8), parameter(b,9)];
365     % end
366     % v_cr_get_MLM(v_cr_get_MLM>v_lim_o)=0;
367     % for b=1:length(parameter(:,1))
368     %     v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM_b=max(v_cr_get_MLM(b,:));
369     %     v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM=[v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM;
370     %         v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM_b];
371     % end
372     % v_cr_MLM=v_cr_max_kl_v_lim_o_MLM; %krit Geschw in km/h
373     % n_ges=[];
374     % v_ges=[];
375     % a_ges=[];
376     % w_ges=[];
377     % vergleich=[];
378     % n_take=res_MLM_Railjet(:,1);
379     % v_take=res_MLM_Railjet(:,2);
380     % a_take=res_MLM_Railjet(:,3);
381     % w_take=res_MLM_Railjet(:,4);
382     % for b=1:length(parameter(:,1))
383     %     search_num=b*ones(length(v_take),1);
384     %     get_v=(n_take==search_num);
385     %     v_b=get_v.*v_take;
386     %     v_upper=v_cr_MLM(b)+upper_int;
387     %     v_lower=v_cr_MLM(b)+lower_int;
388     %     v_b(v_b>v_upper)=0;
389     %     v_b(v_b<v_lower)=0;
390     %     deleter=(v_b~=0);
391     %     n_b=deleter.*n_take;
392     %     a_b=deleter.*a_take;
393     %     w_b=deleter.*w_take;
394     %
395     %     n_b(n_b==0) = [];
396     %     v_b(v_b==0) = [];
397     %     a_b(a_b==0) = [];
398     %     w_b(w_b==0) = [];

```

```

399     %     n_ges=[n_ges; n_b];
400     %     v_ges=[v_ges; v_b];
401     %     a_ges=[a_ges; a_b];
402     %     w_ges=[w_ges; w_b];
403     %     b
404     % end
405     % res_MLM_Railjet=[];
406     % res_MLM_Railjet=[n_ges, v_ges, a_ges, w_ges];
407
408
409
410     %Suche jeweils maximale Beschleunigung und aus welcher kritischen
411     %Geschwindigkeit sie kommt
412     n_ges=[];
413     v_ges=[];
414     a_ges=[];
415     w_ges=[];
416     search_num=[];
417     n_take_vcr4=[];
418     v_take_vcr4=[];
419     a_take_vcr4=[];
420     w_take_vcr4=[];
421     n_take_vcr4=res_MLM_Railjet_vcr4(:,1);
422     v_take_vcr4=res_MLM_Railjet_vcr4(:,2);
423     a_take_vcr4=res_MLM_Railjet_vcr4(:,3);
424     w_take_vcr4=res_MLM_Railjet_vcr4(:,4);
425     n_take_vcr5=[];
426     v_take_vcr5=[];
427     a_take_vcr5=[];
428     w_take_vcr5=[];
429     n_take_vcr5=res_MLM_Railjet_vcr5(:,1);
430     v_take_vcr5=res_MLM_Railjet_vcr5(:,2);
431     a_take_vcr5=res_MLM_Railjet_vcr5(:,3);
432     w_take_vcr5=res_MLM_Railjet_vcr5(:,4);
433     switcher=[];
434     for k=1:length(parameter(:,1)) %Schleife über alle Tragwerke
435         %Tragwerk einlesen
436         search_num_vcr4=k*ones(length(n_take_vcr4),1);
437         get_n_vcr4=(n_take_vcr4==search_num_vcr4);
438         n_k_vcr4=get_n_vcr4.*n_take_vcr4;
439         v_k_vcr4=get_n_vcr4.*v_take_vcr4;
440         a_k_vcr4=get_n_vcr4.*a_take_vcr4;
441         w_k_vcr4=get_n_vcr4.*w_take_vcr4;
442         %Leere Eintraege in Vektoren loeschen um nur mit den jeweiligen
443         %Eintraegen fuer das jeweilige Tragwerk zu arbeiten
444         n_k_vcr4(n_k_vcr4==0)=[];
445         v_k_vcr4(v_k_vcr4==0)=[];
446         a_k_vcr4(a_k_vcr4==0)=[];
447         w_k_vcr4(w_k_vcr4==0)=[];
448         %Tragwerk einlesen
449         search_num_vcr5=k*ones(length(n_take_vcr5),1);
450         get_n_vcr5=(n_take_vcr5==search_num_vcr5);
451         n_k_vcr5=get_n_vcr5.*n_take_vcr5;
452         v_k_vcr5=get_n_vcr5.*v_take_vcr5;
453         a_k_vcr5=get_n_vcr5.*a_take_vcr5;
454         w_k_vcr5=get_n_vcr5.*w_take_vcr5;
455         %Leere Eintraege in Vektoren loeschen um nur mit den jeweiligen
456         %Eintraegen fuer das jeweilige Tragwerk zu arbeiten
457         n_k_vcr5(n_k_vcr5==0)=[];
458         v_k_vcr5(v_k_vcr5==0)=[];

```

```

459     a_k_vcr5(a_k_vcr5==0)=[];
460     w_k_vcr5(w_k_vcr5==0)=[];
461     %Maxima der Vertikalbeschleunigung fuer das jeweilige Tragwerk
462     %ermitteln
463     a_k_vcr4_max=max(abs(a_k_vcr4));
464     a_k_vcr5_max=max(abs(a_k_vcr5));
465     if (a_k_vcr4_max>=a_k_vcr5_max) %dann tritt die groesste
        Vertikalbeschleunigung bei vcr4 auf
466     a_k_max=a_k_vcr4_max;
467     switcher_k=1;
468     else
469     a_k_max=a_k_vcr5_max; %dann tritt die groesste Vertikalbeschleunigung
        bei vcr5 auf
470     switcher_k=0;
471     end
472     switch switcher_k
473     case 1 %vcr4 massgeblich
474     n_ges=[n_ges;n_k_vcr4];
475     v_ges=[v_ges;v_k_vcr4];
476     a_ges=[a_ges;a_k_vcr4];
477     w_ges=[w_ges;w_k_vcr4];
478     case 0 %vcr5 massgeblich
479     n_ges=[n_ges;n_k_vcr5];
480     v_ges=[v_ges;v_k_vcr5];
481     a_ges=[a_ges;a_k_vcr5];
482     w_ges=[w_ges;w_k_vcr5];
483     end
484     switcher=[switcher; switcher_k];
485     k
486     end
487     res_MLM_Railjet=[];
488     res_MLM_Railjet=[n_ges, v_ges, a_ges, w_ges];
489     % % % % % % % % % % % % % % % % % % % ENDE AENDERUNG 191026
490
491     % % % % % VARIANTE 3
492     % %Herausfiltern aller Ergebniswerte, bei denen die
493     % %Ueberfahrtsgeschwindigkeit v_lim_o uebersteigt
494     % search_v_gr_v_lim_o_MLM=res_MLM_Railjet(:,2);
495     % search_v_gr_v_lim_o_MLM(search_v_gr_v_lim_o_MLM>v_lim_o)=0;
496     % search_v_gr_v_lim_o_MLM(search_v_gr_v_lim_o_MLM~=0)=1;
497     % %Vektor der Tragwerksnummern
498     % n_MLM_R=search_v_gr_v_lim_o_MLM.*res_MLM_Railjet(:,1);
499     % n_MLM_R(n_MLM_R==0)=[];
500     % %Vektor der Geschwindigkeiten
501     % v_MLM_R=search_v_gr_v_lim_o_MLM.*res_MLM_Railjet(:,2);
502     % v_MLM_R(v_MLM_R==0)=[];
503     % %Vektor der Vertikalbeschleunigung
504     % a_MLM_R=search_v_gr_v_lim_o_MLM.*res_MLM_Railjet(:,3);
505     % a_MLM_R(a_MLM_R==0)=[];
506     % %Vektor der Durchbiegung
507     % w_MLM_R=search_v_gr_v_lim_o_MLM.*res_MLM_Railjet(:,4);
508     % w_MLM_R(w_MLM_R==0)=[];
509     % %Neubefuellen von res_MLM_Railjet weil wir
510     % res_MLM_Railjet=[];
511     % res_MLM_Railjet=[n_MLM_R, v_MLM_R, a_MLM_R, w_MLM_R];
512
513     % % % % % VARIANTE 4
514     % %Herausfiltern aller Ergebniswerte, bei denen die
515     % %Ueberfahrtsgeschwindigkeit v_lim_u unterschreitet
516     search_v_kl_v_lim_u_MLM=res_MLM_Railjet(:,2);

```

```

517     search_v_kl_v_lim_u_MLM(search_v_kl_v_lim_u_MLM<v_lim_u)=0;
518     search_v_kl_v_lim_u_MLM(search_v_kl_v_lim_u_MLM~=0)=1;
519     %Vektor der Tragwerksnummern
520     n_MLM_R=search_v_kl_v_lim_u_MLM.*res_MLM_Railjet(:,1);
521     n_MLM_R(n_MLM_R==0)=[];
522     %Vektor der Geschwindigkeiten
523     v_MLM_R=search_v_kl_v_lim_u_MLM.*res_MLM_Railjet(:,2);
524     v_MLM_R(v_MLM_R==0)=[];
525     %Vektor der Vertikalbeschleunigung
526     a_MLM_R=search_v_kl_v_lim_u_MLM.*res_MLM_Railjet(:,3);
527     a_MLM_R(a_MLM_R==0)=[];
528     %Vektor der Durchbiegung
529     w_MLM_R=search_v_kl_v_lim_u_MLM.*res_MLM_Railjet(:,4);
530     w_MLM_R(w_MLM_R==0)=[];
531     %Neubefuellen von res_MLM_Railjet weil wir
532     res_MLM_Railjet=[];
533     res_MLM_Railjet=[n_MLM_R, v_MLM_R, a_MLM_R, w_MLM_R];
534
535
536     %
537     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
538     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ---DIM
539     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
540
541     %#Ergebnisse DIM einlesen
542     %Railjet
543     res_DIM_Railjet_1=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_1.txt'); %
544     Ergebnisdatei
545     %Railjet
546     res_DIM_Railjet_2=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_2.txt'); %
547     Ergebnisdatei
548     %Railjet
549     res_DIM_Railjet_3=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_3.txt'); %
550     Ergebnisdatei
551     %Railjet
552     res_DIM_Railjet_4=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_4.txt'); %
553     Ergebnisdatei
554     %Railjet
555     res_DIM_Railjet_5=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_5.txt'); %
556     Ergebnisdatei
557     %Railjet
558     res_DIM_Railjet_6=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_6.txt'); %
559     Ergebnisdatei
560     res_DIM_Railjet_6(:,1)=res_DIM_Railjet_6(:,1)+735; %neue
561     Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
562     nummerieren begonnen wird
563     %Railjet
564     res_DIM_Railjet_7=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_7.txt'); %
565     Ergebnisdatei
566     res_DIM_Railjet_7(:,1)=res_DIM_Railjet_7(:,1)+735; %neue
567     Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
568     nummerieren begonnen wird
569     %Railjet
570     res_DIM_Railjet_8=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_8.txt'); %
571     Ergebnisdatei

```

```
559     res_DIM_Railjet_8(:,1)=res_DIM_Railjet_8(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
560     %Railjet
561     res_DIM_Railjet_9=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_9.txt'); %
        Ergebnisdatei
562     res_DIM_Railjet_9(:,1)=res_DIM_Railjet_9(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
563     %Railjet
564     res_DIM_Railjet_10=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_10.txt'); %
        Ergebnisdatei
565     res_DIM_Railjet_10(:,1)=res_DIM_Railjet_10(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
566     %Railjet
567     res_DIM_Railjet_11=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_11.txt'); %
        Ergebnisdatei
568     res_DIM_Railjet_11(:,1)=res_DIM_Railjet_11(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
569     %Railjet
570     res_DIM_Railjet_12=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_12.txt'); %
        Ergebnisdatei
571     res_DIM_Railjet_12(:,1)=res_DIM_Railjet_12(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
572     %Railjet
573     res_DIM_Railjet_13=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_13.txt'); %
        Ergebnisdatei
574     res_DIM_Railjet_13(:,1)=res_DIM_Railjet_13(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
575     %Railjet
576     res_DIM_Railjet_14=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_14.txt'); %
        Ergebnisdatei
577     res_DIM_Railjet_14(:,1)=res_DIM_Railjet_14(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
578     %Railjet
579     res_DIM_Railjet_15=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_15.txt'); %
        Ergebnisdatei
580     res_DIM_Railjet_15(:,1)=res_DIM_Railjet_15(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
581     %Railjet
582     res_DIM_Railjet_16=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_16.txt'); %
        Ergebnisdatei
583     res_DIM_Railjet_16(:,1)=res_DIM_Railjet_16(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
584     %Railjet
585     res_DIM_Railjet_17=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_17.txt'); %
        Ergebnisdatei
586     res_DIM_Railjet_17(:,1)=res_DIM_Railjet_17(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
587     %Railjet
588     res_DIM_Railjet_18=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_18.txt'); %
        Ergebnisdatei
```

```
589     res_DIM_Railjet_18(:,1)=res_DIM_Railjet_18(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
590     %Railjet
591     res_DIM_Railjet_19=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_19.txt'); %
        Ergebnisdatei
592     res_DIM_Railjet_19(:,1)=res_DIM_Railjet_19(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
593     %Railjet
594     res_DIM_Railjet_20=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_20.txt'); %
        Ergebnisdatei
595     res_DIM_Railjet_20(:,1)=res_DIM_Railjet_20(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
596     %Railjet
597     res_DIM_Railjet_21=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_21.txt'); %
        Ergebnisdatei
598     res_DIM_Railjet_21(:,1)=res_DIM_Railjet_21(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
599     %Railjet
600     res_DIM_Railjet_22=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_22.txt'); %
        Ergebnisdatei
601     res_DIM_Railjet_22(:,1)=res_DIM_Railjet_22(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
602     %Railjet
603     res_DIM_Railjet_23=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_23.txt'); %
        Ergebnisdatei
604     res_DIM_Railjet_23(:,1)=res_DIM_Railjet_23(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
605     %Railjet
606     res_DIM_Railjet_24=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_24.txt'); %
        Ergebnisdatei
607     res_DIM_Railjet_24(:,1)=res_DIM_Railjet_24(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
608     %Railjet
609     res_DIM_Railjet_25=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_25.txt'); %
        Ergebnisdatei
610     res_DIM_Railjet_25(:,1)=res_DIM_Railjet_25(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
611     %Railjet
612     res_DIM_Railjet_26=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_26.txt'); %
        Ergebnisdatei
613     res_DIM_Railjet_26(:,1)=res_DIM_Railjet_26(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
614     %Railjet
615     res_DIM_Railjet_27=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_27.txt'); %
        Ergebnisdatei
616     res_DIM_Railjet_27(:,1)=res_DIM_Railjet_27(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
617     %Railjet
618     res_DIM_Railjet_28=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_28.txt'); %
        Ergebnisdatei
```

```

619     res_DIM_Railjet_28(:,1)=res_DIM_Railjet_28(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
620     %Railjet
621     res_DIM_Railjet_29=importdata('res_DIM_Railjet_7W_mit_TW_29.txt'); %
        Ergebnisdatei
622     res_DIM_Railjet_29(:,1)=res_DIM_Railjet_29(:,1)+735; %neue
        Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File wieder mit 1 zu
        nummerieren begonnen wird
623
624
625     %Railjet
626     res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_1; res_DIM_Railjet_2;
        res_DIM_Railjet_3
627     res_DIM_Railjet_4; res_DIM_Railjet_5; res_DIM_Railjet_6;
        res_DIM_Railjet_7;
628     res_DIM_Railjet_8; res_DIM_Railjet_9; res_DIM_Railjet_10;
        res_DIM_Railjet_11;
629     res_DIM_Railjet_12; res_DIM_Railjet_13; res_DIM_Railjet_14;
        res_DIM_Railjet_15;
630     res_DIM_Railjet_16; res_DIM_Railjet_17; res_DIM_Railjet_18;
        res_DIM_Railjet_19;
631     res_DIM_Railjet_20; res_DIM_Railjet_21; res_DIM_Railjet_22;
        res_DIM_Railjet_23;
632     res_DIM_Railjet_24; res_DIM_Railjet_25; res_DIM_Railjet_26;
        res_DIM_Railjet_27
633     ; res_DIM_Railjet_28; res_DIM_Railjet_29];%importdata('
        res_DIM_Railjet.txt'); %Ergebnisdatei
634
635     % % Ergebnisse einlesen, die aus einer erneuten Berechnung von
        Tragwerken
636     % % stammen, bei denen urspruenglich keine Berechnungsergebnisse fur
        v<v_lim
637     % % vorhanden waren, weil die kritischen Geschwindigkeiten so gross
        waren
638     % %Railjet %TW 63_188_264_360_430_488_492_502_585
639     % %Railjet %TW 63
640     % res_DIM_Railjet_ers_1=importdata('res_DIM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_1.
        txt'); %Ergebnisdatei
641     % res_DIM_Railjet_ers_1(:,1)=63;
642     % %Railjet %TW 188
643     % res_DIM_Railjet_ers_2=importdata('res_DIM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_2.
        txt'); %Ergebnisdatei
644     % res_DIM_Railjet_ers_2(:,1)=188;
645     % %Railjet %TW 264
646     % res_DIM_Railjet_ers_3=importdata('res_DIM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_3.
        txt'); %Ergebnisdatei
647     % res_DIM_Railjet_ers_3(:,1)=264;
648     % %Railjet %TW 360
649     % res_DIM_Railjet_ers_4=importdata('res_DIM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_4.
        txt'); %Ergebnisdatei
650     % res_DIM_Railjet_ers_4(:,1)=360;
651     % %Railjet %TW 430
652     % res_DIM_Railjet_ers_5=importdata('res_DIM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_5.
        txt'); %Ergebnisdatei
653     % res_DIM_Railjet_ers_5(:,1)=430;
654     % %Railjet %TW 488
655     % res_DIM_Railjet_ers_6=importdata('res_DIM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_6.
        txt'); %Ergebnisdatei
656     % res_DIM_Railjet_ers_6(:,1)=488;

```

```

657      % %Railjet %TW 492
658      % res_DIM_Railjet_ers_7=importdata('res_DIM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_7.
        txt'); %Ergebnisdatei
659      % res_DIM_Railjet_ers_7(:,1)=492;
660      % %Railjet %TW 502
661      % res_DIM_Railjet_ers_8=importdata('res_DIM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_8.
        txt'); %Ergebnisdatei
662      % res_DIM_Railjet_ers_8(:,1)=502;
663      % %Railjet %TW 585
664      % res_DIM_Railjet_ers_9=importdata('res_DIM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_9.
        txt'); %Ergebnisdatei
665      % res_DIM_Railjet_ers_9(:,1)=585;
666      %
667      % %Ersetzen der entsprechenden Eintraege in res_DIM_Railjet durch
        Eintraege
668      % for u=1:9
669      %     switch u
670      %         case 1 %Tragwerk 63
671      %             n_ers=63;%res_DIM_Railjet_ers_1(1,1);
672      %         case 2 %Tragwerk 188
673      %             n_ers=188;
674      %         case 3 %Tragwerk 264
675      %             n_ers=264;
676      %         case 4 %Tragwerk 360
677      %             n_ers=360;
678      %         case 5 %Tragwerk 430
679      %             n_ers=430;
680      %         case 6 %Tragwerk 488
681      %             n_ers=488;
682      %         case 7 %Tragwerk 492
683      %             n_ers=492;
684      %         case 8 %Tragwerk 502
685      %             n_ers=502;
686      %         case 9 %Tragwerk 585
687      %             n_ers=585;
688      %     end
689      %
690      %     res_num=res_DIM_Railjet(:,1);
691      %     taker_vor=res_num<n_ers;
692      %     taker_nach=res_num>n_ers;
693      %     res_DIM_Railjet_vor=taker_vor.*res_DIM_Railjet;
694      %     res_DIM_Railjet_nach=taker_nach.*res_DIM_Railjet;
695      %     res_DIM_Railjet=[];
696      %
697      %     switch u
698      %         case 1
699      %             res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_vor;
        res_DIM_Railjet_ers_1; res_DIM_Railjet_nach];
700      %         case 2
701      %             res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_vor;
        res_DIM_Railjet_ers_2; res_DIM_Railjet_nach];
702      %         case 3
703      %             res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_vor;
        res_DIM_Railjet_ers_3; res_DIM_Railjet_nach];
704      %         case 4
705      %             res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_vor;
        res_DIM_Railjet_ers_4; res_DIM_Railjet_nach];
706      %         case 5
707      %             res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_vor;
        res_DIM_Railjet_ers_5; res_DIM_Railjet_nach];

```

```

708      %           case 6
709      %           res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_vor;
      res_DIM_Railjet_ers_6; res_DIM_Railjet_nach];
710      %           case 7
711      %           res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_vor;
      res_DIM_Railjet_ers_7; res_DIM_Railjet_nach];
712      %           case 8
713      %           res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_vor;
      res_DIM_Railjet_ers_8; res_DIM_Railjet_nach];
714      %           case 9
715      %           res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_vor;
      res_DIM_Railjet_ers_9; res_DIM_Railjet_nach];
716      %           end
717      %
718      % end
719      % % % % Ergebnisse einlesen, die aus einer erneuten Berechnung von
      Tragwerken
720      % % % % stammen, bei denen urspruenglich keine
      Berechnungsergebnisse fur v<v_lim_o
721      % % % % vorhanden waren, weil die kritischen Geschwindigkeiten so
      gross waren
722      % % % % Railjet %TW 63
723      % % % % res_DIM_Railjet_ers_1=importdata('
      res_DIM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_1.txt'); %Ergebnisdatei
724      % % % % Railjet %TW 188
725      % % % % res_DIM_Railjet_ers_2=importdata('
      res_DIM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_2.txt'); %Ergebnisdatei
726      % % % % Railjet %TW 264
727      % % % % res_DIM_Railjet_ers_3=importdata('
      res_DIM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_3.txt'); %Ergebnisdatei
728      % % % % Railjet %TW 360
729      % % % % res_DIM_Railjet_ers_4=importdata('
      res_DIM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_4.txt'); %Ergebnisdatei
730      % % % % Railjet %TW 585
731      % % % % res_DIM_Railjet_ers_5=importdata('
      res_DIM_Railjet_8W_ohne_TW_ers_5.txt'); %Ergebnisdatei
732      % % % % res_DIM_Railjet_ers_5(:,1)=res_DIM_Railjet_ers_5(:,1)+500; %
      neue Tragwerksnummer vergeben, da in diesem File (also im zweiten
      parameterfeld) wieder mit 1 zu nummerieren begonnen wird
733      % % % % Ersetzen der entsprechenden Eintraege in res_DIM_Railjet
      durch Eintraege
734      % % % % n_ers=[];
735      % % % % res_num=[];
736      % % % % taker_vor=[];
737      % % % % taker_nach=[];
738      % % % % for p=1:5
739      % % % %     switch p
740      % % % %     case 1
741      % % % %         n_ers=res_DIM_Railjet_ers_1(1,1);
742      % % % %     case 2
743      % % % %         n_ers=res_DIM_Railjet_ers_2(1,1);
744      % % % %     case 3
745      % % % %         n_ers=res_DIM_Railjet_ers_3(1,1);
746      % % % %     case 4
747      % % % %         n_ers=res_DIM_Railjet_ers_4(1,1);
748      % % % %     case 5
749      % % % %         n_ers=res_DIM_Railjet_ers_5(1,1);
750      % % % %     end
751      % % % %
752      % % % % res_num=res_DIM_Railjet(:,1);

```

```

753      % % % % %      taker_vor=res_num<n_ers;
754      % % % % %      taker_nach=res_num>n_ers;
755      % % % % %      res_DIM_Railjet_vor=taker_vor.*res_DIM_Railjet;
756      % % % % %      res_DIM_Railjet_nach=taker_nach.*res_DIM_Railjet;
757      % % % % %      res_DIM_Railjet=[];
758      % % % % %
759      % % % % %      switch p
760      % % % % %          case 1
761      % % % % %              res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_vor;
              res_DIM_Railjet_ers_1; res_DIM_Railjet_nach];
762      % % % % %          case 2
763      % % % % %              res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_vor;
              res_DIM_Railjet_ers_2; res_DIM_Railjet_nach];
764      % % % % %          case 3
765      % % % % %              res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_vor;
              res_DIM_Railjet_ers_3; res_DIM_Railjet_nach];
766      % % % % %          case 4
767      % % % % %              res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_vor;
              res_DIM_Railjet_ers_4; res_DIM_Railjet_nach];
768      % % % % %          case 5
769      % % % % %              res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_vor;
              res_DIM_Railjet_ers_5; res_DIM_Railjet_nach];
770      % % % % %      end
771      % % % % %
772      % % % % % end
773      % % % % % %Ersetzen des entsprechenden Eintraege in res_DIM_Railjet
              durch Eintraege
774      % % % % % %aus res_DIM_Railjet_XX_1
775      % % % % %
776      % % % % %
777      % % % % % n_ers=res_DIM_Railjet_ers_1(1,1);
778      % % % % % res_num=res_DIM_Railjet(:,1);
779      % % % % % taker_vor=res_num<n_ers;
780      % % % % % taker_nach=res_num>n_ers;
781      % % % % % res_DIM_Railjet_vor=taker_vor.*res_DIM_Railjet;
782      % % % % % res_DIM_Railjet_nach=taker_nach.*res_DIM_Railjet;
783      % % % % % res_DIM_Railjet=[];
784      % % % % % res_DIM_Railjet=[res_DIM_Railjet_vor; res_DIM_Railjet_ers_1
              ; res_DIM_Railjet_nach];

785
786
787      % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % AENDERUNG 191026
788      % % % % % % VARIANTE 1
789      % %Herausfiltern aller Ergebnisse, die nicht in einem Intervall um
              eine
790      % %gewuenschte kritische Geschwindigkeit liegen
791      % v_cr_DIM=parameter(:,stelle_v_cr_DIM); %krit Geschw in km/h
792      % n_ges=[];
793      % v_ges=[];
794      % a_ges=[];
795      % w_ges=[];
796      % vergleich=[];
797      % n_take=res_DIM_Railjet(:,1);
798      % v_take=res_DIM_Railjet(:,2);
799      % a_take=res_DIM_Railjet(:,3);
800      % w_take=res_DIM_Railjet(:,4);
801      % for b=1:length(parameter(:,1))
802      %
803      %         search_num=b*ones(length(v_take),1);
804      %         get_v=(n_take==search_num);

```

```

805 % v_b=get_v.*v_take;
806 % v_upper=v_cr_DIM(b)+upper_int;
807 % v_lower=v_cr_DIM(b)+lower_int;
808 % v_b(v_b>v_upper)=0;
809 % v_b(v_b<v_lower)=0;
810 % deleter=(v_b~=0);
811 % n_b=deleter.*n_take;
812 % a_b=deleter.*a_take;
813 % w_b=deleter.*w_take;
814 %
815 % n_b(n_b==0)=[];
816 % v_b(v_b==0)=[];
817 % a_b(a_b==0)=[];
818 % w_b(w_b==0)=[];
819 %
820 % n_ges=[n_ges; n_b];
821 % v_ges=[v_ges; v_b];
822 % a_ges=[a_ges; a_b];
823 % w_ges=[w_ges; w_b];
824 % b
825 % end
826 % % res_DIM_Railjet=[];
827 % res_DIM_Railjet_vcr4=[n_ges, v_ges, a_ges, w_ges];
828 %
829 % %Herausfiltern aller Ergebnisse, die nicht in einem Intervall um
      eine
830 % %gewuenschte kritische Geschwindigkeit liegen
831 % v_cr_DIM=parameter(:,(stelle_v_cr_DIM+1)); %krit Geschw in km/h
832 % n_ges=[];
833 % v_ges=[];
834 % a_ges=[];
835 % w_ges=[];
836 % vergleich=[];
837 % n_take=res_DIM_Railjet(:,1);
838 % v_take=res_DIM_Railjet(:,2);
839 % a_take=res_DIM_Railjet(:,3);
840 % w_take=res_DIM_Railjet(:,4);
841 % for b=1:length(parameter(:,1))
842 %
843 % search_num=b*ones(length(v_take),1);
844 % get_v=(n_take==search_num);
845 % v_b=get_v.*v_take;
846 % v_upper=v_cr_DIM(b)+upper_int;
847 % v_lower=v_cr_DIM(b)+lower_int;
848 % v_b(v_b>v_upper)=0;
849 % v_b(v_b<v_lower)=0;
850 % deleter=(v_b~=0);
851 % n_b=deleter.*n_take;
852 % a_b=deleter.*a_take;
853 % w_b=deleter.*w_take;
854 %
855 % n_b(n_b==0)=[];
856 % v_b(v_b==0)=[];
857 % a_b(a_b==0)=[];
858 % w_b(w_b==0)=[];
859 %
860 % n_ges=[n_ges; n_b];
861 % v_ges=[v_ges; v_b];
862 % a_ges=[a_ges; a_b];
863 % w_ges=[w_ges; w_b];

```

```

864     %      b
865     % end
866     % % res_DIM_Railjet=[];
867     % res_DIM_Railjet_vcr5=[n_ges, v_ges, a_ges, w_ges];
868
869     %%%%VARIANTE 2
870     %Herausfiltern aller Ergebnisse, die nicht in einem Intervall um die
871     %erste
872     %kritische Geschwindigkeit liegen, die v_lim_o unterschreitet
873     v_cr_get_DIM=[];
874     v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM=[];
875     v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM_zweitkleinste=[];
876     for b=1:length(parameter(:,1))
877         v_cr_get_DIM=[v_cr_get_DIM; parameter(b,5), parameter(b,6), parameter
878             (b,7), parameter(b,8), parameter(b,9)];
879     end
880     v_cr_get_DIM(v_cr_get_DIM>v_lim_o)=0;
881     v_cr_get_DIM_zweitkleinste=v_cr_get_DIM;
882
883     for b=1:length(parameter(:,1))
884         v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM_b=max(v_cr_get_DIM(b,:));
885         v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM=[v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM;
886             v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM_b];
887
888         v_cr_get_DIM_zweitkleinste_b=v_cr_get_DIM_zweitkleinste(b,:);
889         v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM_zweitkleinste_b=max(
890             v_cr_get_DIM_zweitkleinste_b(v_cr_get_DIM_zweitkleinste_b~=max(
891                 v_cr_get_DIM_zweitkleinste_b)));
892         v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM_zweitkleinste=[
893             v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM_zweitkleinste;
894             v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM_zweitkleinste_b];
895     end
896     %Alle Ergebnisse um die groesste kritische Geschwinigkeit unter 350
897     %kmh herauslesen
898     v_cr_DIM=v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM; %krit Geschw in km/h
899     n_ges=[];
900     v_ges=[];
901     a_ges=[];
902     w_ges=[];
903     vergleich=[];
904     n_take=res_DIM_Railjet(:,1);
905     v_take=res_DIM_Railjet(:,2);
906     a_take=res_DIM_Railjet(:,3);
907     w_take=res_DIM_Railjet(:,4);
908     for b=1:length(parameter(:,1))
909
910         search_num=b*ones(length(v_take),1);
911         get_v=(n_take==search_num);
912         v_b=get_v.*v_take;
913         v_upper=v_cr_DIM(b)+upper_int;
914         v_lower=v_cr_DIM(b)+lower_int;
915         v_b(v_b>v_upper)=0;
916         v_b(v_b<v_lower)=0;
917         deleter=(v_b~=0);
918         n_b=deleter.*n_take;
919         a_b=deleter.*a_take;
920         w_b=deleter.*w_take;
921
922         n_b(n_b==0)=[];
923         v_b(v_b==0)=[];

```

```

916     a_b(a_b==0)=[];
917     w_b(w_b==0)=[];
918
919     n_ges=[n_ges; n_b];
920     v_ges=[v_ges; v_b];
921     a_ges=[a_ges; a_b];
922     w_ges=[w_ges; w_b];
923     b
924     end
925     % res_DIM_Railjet=[];
926     res_DIM_Railjet_vcr4=[n_ges, v_ges, a_ges, w_ges];
927     %Alle Ergebnisse um die zweitgroesste kritische Geschwinigkeit unter
          350 kmh herauslesen
928     v_cr_DIM=v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM_zweitkleinste; %krit Geschw in km/h
929     n_ges=[];
930     v_ges=[];
931     a_ges=[];
932     w_ges=[];
933     vergleich=[];
934     n_take=res_DIM_Railjet(:,1);
935     v_take=res_DIM_Railjet(:,2);
936     a_take=res_DIM_Railjet(:,3);
937     w_take=res_DIM_Railjet(:,4);
938     for b=1:length(parameter(:,1))
939
940         search_num=b*ones(length(v_take),1);
941         get_v=(n_take==search_num);
942         v_b=get_v.*v_take;
943         v_upper=v_cr_DIM(b)+upper_int;
944         v_lower=v_cr_DIM(b)+lower_int;
945         v_b(v_b>v_upper)=0;
946         v_b(v_b<v_lower)=0;
947         deleter=(v_b~=0);
948         n_b=deleter.*n_take;
949         a_b=deleter.*a_take;
950         w_b=deleter.*w_take;
951
952         n_b(n_b==0)=[];
953         v_b(v_b==0)=[];
954         a_b(a_b==0)=[];
955         w_b(w_b==0)=[];
956
957         n_ges=[n_ges; n_b];
958         v_ges=[v_ges; v_b];
959         a_ges=[a_ges; a_b];
960         w_ges=[w_ges; w_b];
961         b
962         end
963         % res_DIM_Railjet=[];
964         res_DIM_Railjet_vcr5=[n_ges, v_ges, a_ges, w_ges];
965
966         % %%%%VARIANTE 2
967         % %Herausfiltern aller Ergebnisse, die nicht in einem Intervall um die
          erste
968         % %kritische Geschwindigkeit liegen, die v_lim_o unterschreitet
969         % v_cr_get_DIM=[];
970         % v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM=[];
971         % for b=1:length(parameter(:,1))
972         %     v_cr_get_DIM=[v_cr_get_DIM; parameter(b,5), parameter(b,6),
          parameter(b,7), parameter(b,8), parameter(b,9)];

```

```

973     % end
974     % v_cr_get_DIM(v_cr_get_DIM>v_lim_o)=0;
975     % for b=1:length(parameter(:,1))
976     %     v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM_b=max(v_cr_get_DIM(b,:));
977     %     v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM=[v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM;
978     %                               v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM_b];
979     % end
980     % v_cr_DIM=v_cr_max_kl_v_lim_o_DIM; %krit Geschw in km/h
981     % n_ges=[];
982     % v_ges=[];
983     % a_ges=[];
984     % w_ges=[];
985     % vergleich=[];
986     % n_take=res_DIM_Railjet(:,1);
987     % v_take=res_DIM_Railjet(:,2);
988     % a_take=res_DIM_Railjet(:,3);
989     % w_take=res_DIM_Railjet(:,4);
990     % for b=1:length(parameter(:,1))
991     %
992     %     search_num=b*ones(length(v_take),1);
993     %     get_v=(n_take==search_num);
994     %     v_b=get_v.*v_take;
995     %     v_upper=v_cr_DIM(b)+upper_int;
996     %     v_lower=v_cr_DIM(b)+lower_int;
997     %     v_b(v_b>v_upper)=0;
998     %     v_b(v_b<v_lower)=0;
999     %     deleter=(v_b~=0);
1000    %     n_b=deleter.*n_take;
1001    %     a_b=deleter.*a_take;
1002    %     w_b=deleter.*w_take;
1003    %
1004    %     n_b(n_b==0)=[];
1005    %     v_b(v_b==0)=[];
1006    %     a_b(a_b==0)=[];
1007    %     w_b(w_b==0)=[];
1008    %
1009    %     n_ges=[n_ges; n_b];
1010    %     v_ges=[v_ges; v_b];
1011    %     a_ges=[a_ges; a_b];
1012    %     w_ges=[w_ges; w_b];
1013    %     b
1014    % end
1015    % res_DIM_Railjet=[];
1016    % res_DIM_Railjet=[n_ges, v_ges, a_ges, w_ges];
1017
1018    %Suche jeweils maximale Beschleunigung und aus welcher kritischen
1019    %Geschwindigkeit sie kommt
1020    n_ges=[];
1021    v_ges=[];
1022    a_ges=[];
1023    w_ges=[];
1024    search_num=[];
1025    n_take_vcr4=[];
1026    v_take_vcr4=[];
1027    a_take_vcr4=[];
1028    w_take_vcr4=[];
1029    n_take_vcr4=res_DIM_Railjet_vcr4(:,1);
1030    v_take_vcr4=res_DIM_Railjet_vcr4(:,2);
1031    a_take_vcr4=res_DIM_Railjet_vcr4(:,3);

```

```

1032     w_take_vcr4=res_DIM_Railjet_vcr4(:,4);
1033     n_take_vcr5=[];
1034     v_take_vcr5=[];
1035     a_take_vcr5=[];
1036     w_take_vcr5=[];
1037     n_take_vcr5=res_DIM_Railjet_vcr5(:,1);
1038     v_take_vcr5=res_DIM_Railjet_vcr5(:,2);
1039     a_take_vcr5=res_DIM_Railjet_vcr5(:,3);
1040     w_take_vcr5=res_DIM_Railjet_vcr5(:,4);
1041     for k=1:length(parameter(:,1)) %Schleife über alle Tragwerke
1042         %Tragwerk einlesen
1043         search_num_vcr4=k*ones(length(n_take_vcr4),1);
1044         get_n_vcr4=(n_take_vcr4==search_num_vcr4);
1045         n_k_vcr4=get_n_vcr4.*n_take_vcr4;
1046         v_k_vcr4=get_n_vcr4.*v_take_vcr4;
1047         a_k_vcr4=get_n_vcr4.*a_take_vcr4;
1048         w_k_vcr4=get_n_vcr4.*w_take_vcr4;
1049         %Leere Eintraege in Vektoren loeschen um nur mit den jeweiligen
1050         %Eintraegen fuer das jeweilige Tragwerk zu arbeiten
1051         n_k_vcr4(n_k_vcr4==0)=[];
1052         v_k_vcr4(v_k_vcr4==0)=[];
1053         a_k_vcr4(a_k_vcr4==0)=[];
1054         w_k_vcr4(w_k_vcr4==0)=[];
1055         %Tragwerk einlesen
1056         search_num_vcr5=k*ones(length(n_take_vcr5),1);
1057         get_n_vcr5=(n_take_vcr5==search_num_vcr5);
1058         n_k_vcr5=get_n_vcr5.*n_take_vcr5;
1059         v_k_vcr5=get_n_vcr5.*v_take_vcr5;
1060         a_k_vcr5=get_n_vcr5.*a_take_vcr5;
1061         w_k_vcr5=get_n_vcr5.*w_take_vcr5;
1062         %Leere Eintraege in Vektoren loeschen um nur mit den jeweiligen
1063         %Eintraegen fuer das jeweilige Tragwerk zu arbeiten
1064         n_k_vcr5(n_k_vcr5==0)=[];
1065         v_k_vcr5(v_k_vcr5==0)=[];
1066         a_k_vcr5(a_k_vcr5==0)=[];
1067         w_k_vcr5(w_k_vcr5==0)=[];
1068         %Die Vertikalbeschleunigung aus jener kritischen Geschwindigkeit
1069         %auslesen, bei der beim DIM die maximale Vertikalbeschleunigung
            auftritt
1070         switcher_k=switcher(k);
1071         switch switcher_k
1072             case 1 %vcr4 massgeblich
1073                 n_ges=[n_ges;n_k_vcr4];
1074                 v_ges=[v_ges;v_k_vcr4];
1075                 a_ges=[a_ges;a_k_vcr4];
1076                 w_ges=[w_ges;w_k_vcr4];
1077             case 0 %vcr5 massgeblich
1078                 n_ges=[n_ges;n_k_vcr5];
1079                 v_ges=[v_ges;v_k_vcr5];
1080                 a_ges=[a_ges;a_k_vcr5];
1081                 w_ges=[w_ges;w_k_vcr5];
1082         end
1083     k
1084 end
1085 res_DIM_Railjet=[];
1086 res_DIM_Railjet=[n_ges, v_ges, a_ges, w_ges];
1087 % % % % % % % % % % % % % % % % % % % ENDE AENDERUNG 191026
1088
1089
1090

```

```

1091
1092      % %%%%VARIANTE 3
1093      % %Herausfiltern aller Ergebniswerte, bei denen die
1094      % %Ueberfahrts-geschwindigkeit v_lim_o uebersteigt
1095      % search_v_gr_v_lim_o_DIM=res_DIM_Railjet(:,2);
1096      % search_v_gr_v_lim_o_DIM(search_v_gr_v_lim_o_DIM>v_lim_o)=0;
1097      % search_v_gr_v_lim_o_DIM(search_v_gr_v_lim_o_DIM~=0)=1;
1098      % %Vektor der Tragwerksnummern
1099      % n_DIM_R=search_v_gr_v_lim_o_DIM.*res_DIM_Railjet(:,1);
1100      % n_DIM_R(n_DIM_R==0)=[];
1101      % %Vektor der Geschwindigkeiten
1102      % v_DIM_R=search_v_gr_v_lim_o_DIM.*res_DIM_Railjet(:,2);
1103      % v_DIM_R(v_DIM_R==0)=[];
1104      % %Vektor der Vertikalbeschleunigung
1105      % a_DIM_R=search_v_gr_v_lim_o_DIM.*res_DIM_Railjet(:,3);
1106      % a_DIM_R(a_DIM_R==0)=[];
1107      % %Vektor der Durchbiegung
1108      % w_DIM_R=search_v_gr_v_lim_o_DIM.*res_DIM_Railjet(:,4);
1109      % w_DIM_R(w_DIM_R==0)=[];
1110      % %Neubefuellen von res_DIM_Railjet weil wir
1111      % res_DIM_Railjet=[];
1112      % res_DIM_Railjet=[n_DIM_R, v_DIM_R, a_DIM_R, w_DIM_R];
1113
1114      %%%%VARIANTE 4
1115      %Herausfiltern aller Ergebniswerte, bei denen die
1116      %Ueberfahrts-geschwindigkeit v_lim_u unterschreitet
1117      search_v_kl_v_lim_u_DIM=res_DIM_Railjet(:,2);
1118      search_v_kl_v_lim_u_DIM(search_v_kl_v_lim_u_DIM<v_lim_u)=0;
1119      search_v_kl_v_lim_u_DIM(search_v_kl_v_lim_u_DIM~=0)=1;
1120      %Vektor der Tragwerksnummern
1121      n_DIM_R=search_v_kl_v_lim_u_DIM.*res_DIM_Railjet(:,1);
1122      n_DIM_R(n_DIM_R==0)=[];
1123      %Vektor der Geschwindigkeiten
1124      v_DIM_R=search_v_kl_v_lim_u_DIM.*res_DIM_Railjet(:,2);
1125      v_DIM_R(v_DIM_R==0)=[];
1126      %Vektor der Vertikalbeschleunigung
1127      a_DIM_R=search_v_kl_v_lim_u_DIM.*res_DIM_Railjet(:,3);
1128      a_DIM_R(a_DIM_R==0)=[];
1129      %Vektor der Durchbiegung
1130      w_DIM_R=search_v_kl_v_lim_u_DIM.*res_DIM_Railjet(:,4);
1131      w_DIM_R(w_DIM_R==0)=[];
1132      %Neubefuellen von res_DIM_Railjet weil wir
1133      res_DIM_Railjet=[];
1134      res_DIM_Railjet=[n_DIM_R, v_DIM_R, a_DIM_R, w_DIM_R];
1135
1136      %
1137      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
1138      %ERGEBNISSE IN ENTSPRECHENDE FORM BRINGEN
1139      %
1140      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
1141      %Laengen der Ergebnisdateien (Spaltenlaenge)
1142      len_MLM_R=length(n_MLM_R);
1143      len_DIM_R=length(n_DIM_R);
1144      %letzte Tragwerksnummer in Ergebnisdatei =Anzahl der Tragwerke in
1145      Ergebnisdatei

```

```

1145      %VORSICHT: DIE LETZTE TRAGWERKSNUMMER MUSS DER ANZAHL DER TRAGWERKE
           IN DER
1146      %ERGEBNISDATEI ENTSPRECHEN!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
1147      num_MLM_Railjet=res_MLM_Railjet(len_MLM_R,1);
1148      num_DIM_Railjet=res_DIM_Railjet(len_DIM_R,1);
1149
1150      %Maxima der Durchbiegung und Beschleunigung aus den Ergebnisdateien
           auslesen,
1151      %dem jeweiligen Tragwerk zuordnen und in ein Ergebnisfeld schreiben,
           das dann
1152      %geplottet bzw weiterverarbeitet werden kann
1153      ergebnisse_MLM=[];
1154      ergebnisse_DIM=[];
1155      for k=1:1 %1...Railjet
1156
1157      %Ergebnisfelder leeren
1158      ergebnisse_MLM=[];
1159      ergebnisse_DIM=[];
1160
1161      switch k
1162      case 1 %Railjet
1163      len_MLM=len_MLM_R;
1164      len_DIM=len_DIM_R;
1165      num_MLM=num_MLM_Railjet;
1166      num_DIM=num_DIM_Railjet;
1167      n_MLM=n_MLM_R;
1168      v_MLM=v_MLM_R;
1169      a_MLM=a_MLM_R;
1170      w_MLM=w_MLM_R;
1171      n_DIM=n_DIM_R;
1172      v_DIM=v_DIM_R;
1173      a_DIM=a_DIM_R;
1174      w_DIM=w_DIM_R;
1175
1176      otherwise
1177      'switch fehler, k ausserhalb des zulaessigen Bereiches'
1178      end
1179      for g=1:2 %1...MLM, 2...DIM
1180      switch g
1181      case 1 %MLM
1182      len=len_MLM;
1183      num=num_MLM;
1184      n=n_MLM;
1185      v=v_MLM;
1186      a=a_MLM;
1187      w=w_MLM;
1188      case 2 %DIM
1189      len=len_DIM;
1190      num=num_DIM;
1191      n=n_DIM;
1192      v=v_DIM;
1193      a=a_DIM;
1194      w=w_DIM;
1195      otherwise
1196      'switch fehler, g ausserhalb des zulaessigen Bereiches'
1197      end
1198      for j=1:num %j...Anzahl der Tragwerke aus den Ergebnisdateien
1199      selector=j*ones(len,1);
1200      selector(selector~=n)=0;
1201      chooser=selector/j;

```

```

1202     n_j=chooser.*n;
1203     v_j=chooser.*v;
1204     a_j=chooser.*a;
1205     w_j=chooser.*w;
1206
1207     n_j(n_j==0)=[];
1208     v_j(v_j==0)=[];
1209     a_j(a_j==0)=[];
1210     w_j(w_j==0)=[];
1211
1212     %Kontrolle um leere n_j,v_j,a_j,w_j
1213
1214
1215     a_max_j=max(a_j);
1216     w_max_j=max(w_j);
1217
1218     check=a_j;
1219     check(check~=a_max_j)=0;
1220     n_a_max_j=n_j(find(check));
1221     v_a_max_j=v_j(find(check));
1222
1223     switch g %1...MLM, 2...DIM
1224     case 1 %MLM
1225     ergebnisse_MLM=[ergebnisse_MLM; n_a_max_j(1), v_a_max_j(1), a_max_j
1226         (1), w_max_j(1)];
1227     case 2 %DIM
1228     ergebnisse_DIM=[ergebnisse_DIM; n_a_max_j(1), v_a_max_j(1), a_max_j
1229         (1), w_max_j(1)];
1230     otherwise
1231     'switch fehler, g ausserhalb des zulaessigen Bereiches'
1232     end %ENDE switch g
1233     end %ENDE j
1234     end %ENDE g
1235     switch k %Zug: 1...Railjet B_2
1236     case 1 %Railjet B_2
1237     ergebnisse_MLM_R=ergebnisse_MLM;
1238     ergebnisse_DIM_R=ergebnisse_DIM;
1239     otherwise %sonst: Fehlermeldung
1240     'switch fehler, k ausserhalb des zulaessigen Bereiches'
1241     end %ENDE switch k
1242     end %ENDE k
1243
1244     %
1245     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
1246
1247     %#LOESCHE TRAGWERKE MIT ERGEBNISSE UNTER 100 km/h
1248     %
1249     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
1250
1251     %Tragwerke bei denen die erste kritische Geschwindigkeit unter 100 km
1252     %/h
1253     %liegt und die daher von den Ergebnissen ausgeschlossen werden müssen
1254     %364, 466, 482, 689, 801, 816, 873
1255     TW_delete=[364, 466, 482, 689, 801, 816, 873]; %in aufsteigender
1256     Reihenfolge zu ordnen!!!!!!!!!!!!
1257     counter=0;
1258     for i=1:length(TW_delete)
1259     ergebnisse_MLM_R((TW_delete(i)+counter),:)=[];
1260     ergebnisse_DIM_R((TW_delete(i)+counter),:)=[];
1261     x_l_par((TW_delete(i)+counter),:)=[];

```



```

1296     F_2D_R_lfz_m=scatteredInterpolant(x_lfz_par(1:num),x_m_par(1:num),
1297         diff_a_max_R,'linear');
1297     F_2D_R_mfz_l=scatteredInterpolant(x_mfz_par(1:num),x_l_par(1:num),
1298         diff_a_max_R,'linear');
1298     %Erzeuge Bereich, auf dem die Interpolationsfunktion F_2D_R_lm_fz
1299     %ausgewertet
1300     %werden soll
1300
1301     %Maxima und Minima der Parameter bzw. der Produkte von Parametern
1302     x_l_par_max=max(x_l_par);
1303     x_l_par_min=min(x_l_par);
1304     x_m_par_max=max(x_m_par);
1305     x_m_par_min=min(x_m_par);
1306     x_f_par_max=max(x_f_par);
1307     x_f_par_min=min(x_f_par);
1308     x_z_par_max=max(x_z_par);
1309     x_z_par_min=min(x_z_par);
1310     %
1311     x_lm_par_max=max(x_lm_par);
1312     x_lm_par_min=min(x_lm_par);
1313     x_fz_par_max=max(x_fz_par);
1314     x_fz_par_min=min(x_fz_par);
1315     x_lf_par_max=max(x_lf_par);
1316     x_lf_par_min=min(x_lf_par);
1317     x_mz_par_max=max(x_mz_par);
1318     x_mz_par_min=min(x_mz_par);
1319     %
1320     x_lz_par_max=max(x_lz_par);
1321     x_lz_par_min=min(x_lz_par);
1322     x_mf_par_max=max(x_mf_par);
1323     x_mf_par_min=min(x_mf_par);
1324     x_lmf_par_max=max(x_lmf_par);
1325     x_lmf_par_min=min(x_lmf_par);
1326     x_lmz_par_max=max(x_lmz_par);
1327     x_lmz_par_min=min(x_lmz_par);
1328     x_lfz_par_max=max(x_lfz_par);
1329     x_lfz_par_min=min(x_lfz_par);
1330     x_mfz_par_max=max(x_mfz_par);
1331     x_mfz_par_min=min(x_mfz_par);
1332     %
1333     diff_a_max_R_max=max(diff_a_max_R);
1334     diff_a_max_R_min=min(diff_a_max_R);
1335
1336     %Grenzen fuer Interpolation und Plots
1337     x_l_par_max_gr=ceil(x_l_par_max);
1338     x_l_par_min_gr=round(x_l_par_min,-1);
1339     x_m_par_max_gr=ceil(x_m_par_max);
1340     x_m_par_min_gr=round(x_m_par_min,-1);
1341     x_f_par_max_gr=ceil(x_f_par_max);
1342     x_f_par_min_gr=round(x_f_par_min);
1343     x_z_par_max_gr=ceil(x_z_par_max);
1344     x_z_par_min_gr=round(x_z_par_min,-1);
1345     %
1346     x_lm_par_max_gr=ceil(x_lm_par_max);
1347     x_lm_par_min_gr=round(x_lm_par_min,-1);
1348     x_fz_par_max_gr=ceil(x_fz_par_max);
1349     x_fz_par_min_gr=round(x_fz_par_min,-1);
1350     x_lf_par_max_gr=ceil(x_lf_par_max);
1351     x_lf_par_min_gr=round(x_lf_par_min,-1);
1352     x_mz_par_max_gr=ceil(x_mz_par_max);

```

```

1353     x_mz_par_min_gr=round(x_mz_par_min,-1);
1354     %
1355     x_lz_par_max_gr=ceil(x_lz_par_max);
1356     x_lz_par_min_gr=round(x_lz_par_min,-1);
1357     x_mf_par_max_gr=ceil(x_mf_par_max);
1358     x_mf_par_min_gr=round(x_mf_par_min,-1);
1359     %
1360     x_lmf_par_max_gr=ceil(x_lmf_par_max);
1361     x_lmf_par_min_gr=round(x_lmf_par_min,-1);
1362     x_lmz_par_max_gr=ceil(x_lmz_par_max);
1363     x_lmz_par_min_gr=round(x_lmz_par_min,-1);
1364     x_lfz_par_max_gr=ceil(x_lfz_par_max);
1365     x_lfz_par_min_gr=round(x_lfz_par_min,-1);
1366     x_mfz_par_max_gr=ceil(x_mfz_par_max);
1367     x_mfz_par_min_gr=round(x_mfz_par_min,-1);
1368     %
1369     diff_a_max_R_max_gr=ceil(diff_a_max_R_max);
1370     diff_a_max_R_min_gr=round(diff_a_max_R_min);
1371
1372     %x-y-z grids
1373     feinheit_x=0.25;
1374     feinheit_y=0.25;
1375     %x,y,z fuer grid l-m
1376     x_gr_2D_l_m=[0:feinheit_x:x_l_par_max_gr]; %entspricht ca.
           Wertebereich von x_l_par
1377     y_gr_2D_l_m=[0:feinheit_y:x_m_par_max_gr]; %entspricht ca.
           Wertebereich von x_m_par
1378     [x_interp_2D_l_m,y_interp_2D_l_m]=meshgrid(x_gr_2D_l_m,y_gr_2D_l_m);
1379     %x,y,z fuer grid f-z
1380     x_gr_2D_f_z=[0:feinheit_x:x_f_par_max_gr]; %entspricht ca.
           Wertebereich von x_f_par
1381     y_gr_2D_f_z=[0:feinheit_y:x_z_par_max_gr]; %entspricht ca.
           Wertebereich von x_z_par
1382     [x_interp_2D_f_z,y_interp_2D_f_z]=meshgrid(x_gr_2D_f_z,y_gr_2D_f_z);
1383     %x,y,z fuer grid lm-fz
1384     x_gr_2D_lm_fz=[0:feinheit_x:x_lm_par_max_gr]; %entspricht ca.
           Wertebereich von x_lm_par
1385     y_gr_2D_lm_fz=[0:feinheit_y:x_fz_par_max_gr]; %entspricht ca.
           Wertebereich von x_fz_par
1386     [x_interp_2D_lm_fz,y_interp_2D_lm_fz]=meshgrid(x_gr_2D_lm_fz,
           y_gr_2D_lm_fz);
1387     %x,y,z fuer grid lf-mz
1388     x_gr_2D_lf_mz=[0:feinheit_x:x_lf_par_max_gr]; %entspricht ca.
           Wertebereich von x_lf_par
1389     y_gr_2D_lf_mz=[0:feinheit_y:x_mz_par_max_gr]; %entspricht ca.
           Wertebereich von x_mz_par
1390     [x_interp_2D_lf_mz,y_interp_2D_lf_mz]=meshgrid(x_gr_2D_lf_mz,
           y_gr_2D_lf_mz);
1391     %x,y,z fuer grid lz-mf
1392     x_gr_2D_lz_mf=[0:feinheit_x:x_lz_par_max_gr]; %entspricht ca.
           Wertebereich von x_lz_par
1393     y_gr_2D_lz_mf=[0:feinheit_y:x_mf_par_max_gr]; %entspricht ca.
           Wertebereich von x_mf_par
1394     [x_interp_2D_lz_mf,y_interp_2D_lz_mf]=meshgrid(x_gr_2D_lz_mf,
           y_gr_2D_lz_mf);
1395     %x,y,z fuer grid lmf-z
1396     x_gr_2D_lmf_z=[0:feinheit_x:x_lmf_par_max_gr]; %entspricht ca.
           Wertebereich von x_lmf_par
1397     y_gr_2D_lmf_z=[0:feinheit_y:x_z_par_max_gr]; %entspricht ca.
           Wertebereich von x_z_par

```

```

1398     [x_interp_2D_lmf_z, y_interp_2D_lmf_z]=meshgrid(x_gr_2D_lmf_z,
1399           y_gr_2D_lmf_z);
1400     %x,y,z fuer grid lmf-f
1401     x_gr_2D_lmz_f=[0:feinheit_x:x_lmz_par_max_gr]; %entspricht ca.
1402           Wertebereich von x_lmz_par
1403     y_gr_2D_lmz_f=[0:feinheit_y:x_f_par_max_gr]; %entspricht ca.
1404           Wertebereich von x_f_par
1405     [x_interp_2D_lmz_f, y_interp_2D_lmz_f]=meshgrid(x_gr_2D_lmz_f,
1406           y_gr_2D_lmz_f);
1407     %x,y,z fuer grid lfz-m
1408     x_gr_2D_lfz_m=[0:feinheit_x:x_lfz_par_max_gr]; %entspricht ca.
1409           Wertebereich von x_lmz_par
1410     y_gr_2D_lfz_m=[0:feinheit_y:x_m_par_max_gr]; %entspricht ca.
1411           Wertebereich von x_m_par
1412     [x_interp_2D_lfz_m, y_interp_2D_lfz_m]=meshgrid(x_gr_2D_lfz_m,
1413           y_gr_2D_lfz_m);
1414     %x,y,z fuer grid mfz-l
1415     x_gr_2D_mfz_l=[0:feinheit_x:x_mfz_par_max_gr]; %entspricht ca.
1416           Wertebereich von x_mfz_par
1417     y_gr_2D_mfz_l=[0:feinheit_y:x_l_par_max_gr]; %entspricht ca.
1418           Wertebereich von x_l_par
1419     [x_interp_2D_mfz_l, y_interp_2D_mfz_l]=meshgrid(x_gr_2D_mfz_l,
1420           y_gr_2D_mfz_l);
1421
1422     %x,y,z fuer grid lm-fz Tabelle
1423     x_gr_2D_lm_fz_tab=[0:25:1875];%:x_lm_par_max_gr]; %entspricht ca.
1424           Wertebereich von x_lm_par
1425     y_gr_2D_lm_fz_tab=[0:1:75];%:x_fz_par_max_gr]; %entspricht ca.
1426           Wertebereich von x_fz_par
1427     [x_interp_2D_lm_fz_tab, y_interp_2D_lm_fz_tab]=meshgrid(
1428           x_gr_2D_lm_fz_tab, y_gr_2D_lm_fz_tab);
1429
1430     %Werte Interpollationsfunktion F_2D_R_lm_fz auf Bereich aus
1431     diff_a_max_R_interp_2D_l_m=F_2D_R_l_m(x_interp_2D_l_m, y_interp_2D_l_m
1432     );
1433     diff_a_max_R_interp_2D_f_z=F_2D_R_f_z(x_interp_2D_f_z, y_interp_2D_f_z
1434     );
1435
1436     %
1437     diff_a_max_R_interp_2D_lm_fz=F_2D_R_lm_fz(x_interp_2D_lm_fz,
1438           y_interp_2D_lm_fz);
1439     diff_a_max_R_interp_2D_lf_mz=F_2D_R_lf_mz(x_interp_2D_lf_mz,
1440           y_interp_2D_lf_mz);
1441
1442     %
1443     diff_a_max_R_interp_2D_lz_mf=F_2D_R_lz_mf(x_interp_2D_lz_mf,
1444           y_interp_2D_lz_mf);
1445
1446     %
1447     diff_a_max_R_interp_2D_lmf_z=F_2D_R_lmf_z(x_interp_2D_lmf_z,
1448           y_interp_2D_lmf_z);
1449     diff_a_max_R_interp_2D_lmz_f=F_2D_R_lmz_f(x_interp_2D_lmz_f,
1450           y_interp_2D_lmz_f);
1451     diff_a_max_R_interp_2D_lfz_m=F_2D_R_lfz_m(x_interp_2D_lfz_m,
1452           y_interp_2D_lfz_m);
1453     diff_a_max_R_interp_2D_mfz_l=F_2D_R_mfz_l(x_interp_2D_mfz_l,
1454           y_interp_2D_mfz_l);
1455
1456
1457     %%Werte aus fuer spaeteres Tabellenwerk
1458     diff_a_max_R_interp_2D_lm_fz_tab=F_2D_R_lm_fz(x_interp_2D_lm_fz_tab,
1459           y_interp_2D_lm_fz_tab);
1460
1461     %Abspeichern in einer Textdatei

```

```

1435 %Abspeichern aller Ergebnisse in einer Textdatei
1436 xlswrite('diff_a_max_R_interp_2D_lm_fz_tab.xlsx',
          diff_a_max_R_interp_2D_lm_fz_tab);
1437
1438 %Dreidimensionale Interpolation: Es wird anhand der bekannten Daten
          eine
1439 %lineare Funktion auf  $R^3$  interpoliert. F_3D_R_lm_f_z ist eine
          dreidimensionale
1440 %Interpolation von diff_a_max_R
1441 F_3D_R_lm_f_z=scatteredInterpolant(x_lm_par(1:num),x_f_par(1:num),
          x_z_par(1:num),diff_a_max_R,'linear');
1442 F_3D_R_lm_f_z=scatteredInterpolant(x_l_par(1:num),x_m_par(1:num),
          x_fz_par(1:num),diff_a_max_R,'linear');
1443 %Erzeuge Bereich, auf dem die Interpolationsfunktion F_3D_R_lm_f_z
          ausgewertet
1444 %werden soll
1445 %x,y,z fuer grid lm-f-z
1446 x_gr_3D_lm_f_z=[0:25:x_lm_par_max_gr]; %entspricht ca. Wertebereich
          von x_lm_par
1447 y_gr_3D_lm_f_z=[0:1:x_f_par_max_gr]; %entspricht ca. Wertebereich
          von x_f_par
1448 z_gr_3D_lm_f_z=[0:0.2:x_z_par_max_gr]; %entspricht ca. Wertebereich
          von x_z_par
1449 [x_interp_3D_lm_f_z,y_interp_3D_lm_f_z,z_interp_3D_lm_f_z]=meshgrid(
          x_gr_3D_lm_f_z,y_gr_3D_lm_f_z,z_gr_3D_lm_f_z);
1450 diff_a_max_R_interp_3D_lm_f_z=F_3D_R_lm_f_z(x_interp_3D_lm_f_z,
          y_interp_3D_lm_f_z,z_interp_3D_lm_f_z);
1451 %x,y,z fuer grid l-m-fz
1452 x_gr_3D_l_m_fz=[0:1:x_l_par_max_gr]; %entspricht ca. Wertebereich von
          x_l_par
1453 y_gr_3D_l_m_fz=[0:1:x_m_par_max_gr]; %entspricht ca. Wertebereich
          von x_m_par
1454 z_gr_3D_l_m_fz=[0:1:x_fz_par_max_gr]; %entspricht ca. Wertebereich
          von x_fz_par
1455 [x_interp_3D_l_m_fz,y_interp_3D_l_m_fz,z_interp_3D_l_m_fz]=meshgrid(
          x_gr_3D_l_m_fz,y_gr_3D_l_m_fz,z_gr_3D_l_m_fz);
1456 diff_a_max_R_interp_3D_l_m_fz=F_3D_R_l_m_fz(x_interp_3D_l_m_fz,
          y_interp_3D_l_m_fz,z_interp_3D_l_m_fz);
1457
1458 %
          %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
1459 %#ABSPEICHERN DES GESAMTEN, ZUSAMMENGEFÜGTEN PARAMETERFELDES
1460 %
          %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
1461 save('parameterfeld_ges.txt','parameter','-ascii','-double','-
          tabs');
1462
1463 %
          %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
1464 %#PLOTTEN
1465 %
          %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
1466 %Groesse der Punkte
1467 scattersize=2;
1468 %FontSize
1469 fntsize=10;

```

```

1470
1471      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%PLOT 11a
1472      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
1473      %%lm-fz-Plot=2D Interpolation und lm-f-z-Plot=3D Interpolation
1474      %%herausgezoomter Plot
1475      figure;
1476      %2D Interpolation von diff_a_max_R
1477      hold on;
1478      %
1479      mesh(x_interp_2D_lm_fz,y_interp_2D_lm_fz,diff_a_max_R_interp_2D_lm_fz
1480           );
1481      scatter3(x_lm_par(1:num),x_fz_par(1:num),diff_a_max_R,scattersize,'
1482              filled','k');
1483      %
1484      set(gca,'fontsize',fntsze);
1485      set(gca,'XTick',[0:250:x_lm_par_max_gr]);
1486      xlim([0, x_lm_par_max_gr]);
1487      set(gca,'YTick',[0:20:x_fz_par_max_gr]);
1488      ylim([0, x_fz_par_max_gr]);
1489      set(gca,'ZTick',[-5:5:15]);
1490      zlim([-5, 15]);
1491      grid on;
1492      hold off;
1493      colormap jet;
1494      cb=colorbar('eastoutside');
1495      caxis([-5, 15]);
1496      set(cb, 'YTick',[-5:5:15]);
1497
1498      set(groot, 'defaulttextinterpreter','latex');
1499      set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter','latex');
1500      set(groot, 'defaultLegendInterpreter','latex');
1501      set(0, 'DefaultAxesFontWeight', 'normal', ...
1502            'DefaultAxesFontSize', 35, ...
1503            'DefaultAxesFontAngle', 'normal', ...
1504            'DefaultAxesTitleFontWeight', 'normal', ...
1505            'DefaultAxesTitleFontSizeMultiplier', 1);
1506      set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');
1507
1508      title("$\Delta a_{\max}(l,m,f,z)$ gem. Farbskala");
1509      xlabel("$l \cdot m$ in t");
1510      ylabel("$f \cdot z$ in Hz $\cdot$ %");
1511      zlabel("$\Delta a_{\max}(l,m,f,z)$ in m/s\textsuperscript{2}");
1512
1513      for q=0:11
1514      for t=0:11
1515      q_num=sprintf("%d",q);
1516      t_num=sprintf("%d",t);
1517      fig_name_qt_text= ["fig11a_", q_num, t_num];
1518      fig_name_qt=join(fig_name_qt_text,"");
1519      view(30+q*30,30+t*30);
1520      print('-dpng', fig_name_qt, '-r900');
1521      end
1522      end
1523      savefig(fig_name_qt);
1524      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ENDE PLOT 11a
1525      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
1526      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%PLOT 11b
1527      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
1528      %%lm-fz-Plot=2D Interpolation und lm-f-z-Plot=3D Interpolation

```

```

1525     %%herausgezoomter Plot
1526     figure;
1527     %%2D Interpolation von diff_a_max_R
1528     hold on;
1529     %
1530     mesh(x_interp_2D_lm_fz,y_interp_2D_lm_fz,diff_a_max_R_interp_2D_lm_fz
1531          );
1532     scatter3(x_lm_par(1:num),x_fz_par(1:num),diff_a_max_R,scattersze,'
1533             filled','k');
1534     %
1535     set(gca,'fontsize',fntsze);
1536     set(gca,'XTick',[0:100:500])
1537     xlim([0, 500]);
1538     set(gca,'YTick',[0:10:40])
1539     ylim([0, 40]);
1540     set(gca,'ZTick',[-5:5:15])
1541     zlim([-5, 15]);
1542     grid on;
1543     hold off;
1544     colormap jet;
1545     cb=colorbar('eastoutside');
1546     caxis([-5, 15]);
1547     set(cb, 'YTick',[-5:5:15]);
1548
1549     set(groot, 'defaulttextinterpreter','latex');
1550     set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter','latex');
1551     set(groot, 'defaultLegendInterpreter','latex');
1552     set(0, 'DefaultAxesFontWeight', 'normal', ...
1553           'DefaultAxesFontSize', 35, ...
1554           'DefaultAxesFontAngle', 'normal', ...
1555           'DefaultAxesTitleFontWeight', 'normal', ...
1556           'DefaultAxesTitleFontSizeMultiplier', 1);
1557     set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');
1558
1559     title("$\Delta a_{\max}(l,m,f,z)$ gem. Farbskala");
1560     xlabel("$l \cdot m$ in t");
1561     ylabel("$f \cdot z$ in Hz $\cdot$ \%");
1562     zlabel("$\Delta a_{\max}(l,m,f,z)$ in m/s\textsuperscript{2}");
1563
1564     for q=0:11
1565     for t=0:11
1566     q_num=sprintf("%d",q);
1567     t_num=sprintf("%d",t);
1568     fig_name_qt_text= ["fig11b_", q_num, t_num];
1569     fig_name_qt=join(fig_name_qt_text,"");
1570     view(30+q*30,30+t*30);
1571     print('-dpng', fig_name_qt, '-r900');
1572     end
1573     end
1574     savefig(fig_name_qt);
1575     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ENDE PLOT 11b
1576     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Anhang C

Program Code zur Einschränkung des Definitionsbereichs

```
1  ##
   #####
2  ##
   #####
3  #####EINSCHRAENKUNG DES DEFINITIONSBEREICHS
4  ##
   #####
5  ##
   #####
6  clear;
7  clear all;
8  clc;
9  pkg load statistics;
10
11  ##
   #####
12  ##EINGABEBEREICH
13  ##
   #####
14  %Konfidenzniveaus
15  a_l=0.02;
16  a_m=0.02;
17  a_f=0.02;
18  a_z=0.02;
19  ##a_lm=0.05;
20  ##a_fz=0.05;
21  ##
   #####
22  ##PARAMETERFELD EINLESEN
23  ##
   #####
24  %#Parameterfeld einlesen
25  ##parameter=importdata('parameterfeld.txt');
26  ##parameter_erv=importdata('parameterfeld_erv.txt');
27  ##parameter_erv_2=importdata('parameterfeld_erv_2.txt');
28  ##parameter=[parameter; parameter_erv; parameter_erv_2];
29  ##%Eintraege in Parameterfeld ersetzen, die aus einer neuen Berechnung
30  ##%einzelner Tragwerke stammt: TW 63_188_264_360_430_488_492_502_585
31  ##parameter_ers=importdata('parameterfeld_ers.txt');
32  ##parameter(63,:)=parameter_ers(1,:);
```

```

33     ##parameter(188,:)=parameter_ers(2,:);
34     ##parameter(264,:)=parameter_ers(3,:);
35     ##parameter(360,:)=parameter_ers(4,:);
36     ##parameter(430,:)=parameter_ers(5,:);
37     ##parameter(488,:)=parameter_ers(6,:);
38     ##parameter(492,:)=parameter_ers(7,:);
39     ##parameter(502,:)=parameter_ers(8,:);
40     ##parameter(585,:)=parameter_ers(9,:);
41     parameter=importdata('parameterfeld_1000_ges.txt');
42     %Stichprobenzahl
43     n=length(parameter(:,1));
44
45     %Brueckenlaenge in m
46     l=parameter(:,1);
47     %Brueckenmasse in t/m
48     m=parameter(:,2);
49     %Erste Eigenfrequenz in Hz
50     f=parameter(:,3);
51     %Daempfung (nach Norm) in %
52     z=parameter(:,4);
53     %Brueckenlaenge in m * Brueckenmasse in t/m
54     lm=l.*m; %in t, =Brueckenmasse
55     %Erste Eigenfrequenz in Hz * Daempfung (nach Norm) in %
56     fz=f.*z; %in Hz*
57
58     ##
59     #####
60     ##STOCHASTISCHE ANALYSE DER PUNKTE DES PARAMETERFELDES UND
61     EINSCHRAENKUNG DES
62     ##BEREICHES IM  $R^4$  FUER ZUKUENFTIGE ABSCHAETZUNGEN
63     ##
64     #####
65
66     %Plotbereich einstellen
67     x=[0:0.1:70];
68     x_2=[0.1:0.1:5000];
69
70     %Minima der Datenreihen
71     l_min=min(l);
72     m_min=min(m);
73     f_min=min(f);
74     z_min=min(z);
75     lm_min=min(lm);
76     fz_min=min(fz);
77
78     %Maxima der Datenreihen
79     l_max=max(l);
80     m_max=max(m);
81     f_max=max(f);
82     z_max=max(z);
83     lm_max=max(lm);
84     fz_max=max(fz);
85
86     %Mittelwerte
87     mu_l=mean(l);
88     mu_m=mean(m);
89     mu_f=mean(f);
90     mu_z=mean(z);
91     mu_lm=mean(lm);

```

```

88     mu_fz=mean(fz);
89
90     %Standardabweichungen
91     sig_l=std(l);
92     sig_m=std(m);
93     sig_f=std(f);
94     sig_z=std(z);
95     sig_lm=std(lm);
96     sig_fz=std(fz);
97
98     %Korrelationskoeffizienten
99     r_lm=corr(l,m);
100    r_lf=corr(l,f);
101    r_lz=corr(l,z);
102    r_mf=corr(m,f);
103    r_mz=corr(m,z);
104    r_fz=corr(f,z);
105    r_lmfz=corr(lm,fz);
106
107    %Lognormalverteilungen verschiedener Parameter errechnen
108    s_l=sqrt( log( ((sig_l/mu_l)^2)+1 ) );
109    m_l=mu_l*exp( -((s_l^2)/2) );
110    ##fx_l=lognpdf(x, log(m_l), s_l);
111
112    s_m=sqrt( log( ((sig_m/mu_m)^2)+1 ) );
113    m_m=mu_m*exp( -((s_m^2)/2) );
114    ##fx_m=lognpdf(x, log(m_m), s_m);
115
116    s_f=sqrt( log( ((sig_f/mu_f)^2)+1 ) );
117    m_f=mu_f*exp( -((s_f^2)/2) );
118    ##fx_f=lognpdf(x, log(m_f), s_f);
119
120    s_z=sqrt( log( ((sig_z/mu_z)^2)+1 ) );
121    m_z=mu_z*exp( -((s_z^2)/2) );
122    ##fx_z=lognpdf(x, log(m_z), s_z);
123
124    ##s_lm=sqrt( log( ((sig_z/mu_z)^2)+1 ) );
125    ##m_lm=mu_z*exp( -((s_z^2)/2) );
126    #####fx_z=lognpdf(x, log(m_z), s_z);
127
128
129
130
131    %Lineare Regressionen
132    %linearer Zusammenhang von l und m ermitteln
133    beta_lm=sum( (1-mu_l).*(m-mu_m) )/( sum( (1-mu_l).^2 ) );
134    alpha_lm=mu_m-beta_lm*mu_l;
135    f_regr_m_x=alpha_lm+beta_lm*x;
136    m_regr=alpha_lm+beta_lm*l;
137    %Vertauensbereich: Annahme - Fehler ist normalverteilt (ist er aber
138    nicht, deswegen Anpassung)
138    sig_f_regr_m_x=sqrt( (sum((m-m_regr).^2))/(n-2) )*sqrt( 1 + (1/n) + (((x
139    - mu_l).^2)/sum((1-mu_l).^2)) );
139    t_inv_a_m=tinv((1-(a_m/2)),(n-2));
140    f_l_vertr_o=f_regr_m_x+sig_f_regr_m_x*t_inv_a_m; %Vertauensbereich
141    obergrenze
141    f_l_vertr_u=f_regr_m_x-sig_f_regr_m_x*t_inv_a_m; %Vertauensbereich
142    Untergrenze
142    %Versatz/Anpassung der Oberen und unteren Vertauensbereichsgrenze um 10 t
143    /m bzw +7 t/m um sie besser an die Daten anzupassen

```

```

143 %Annahme: das reduziert zumindest die Wahrscheinlichkeit nicht, dass
      zukuenftige Werte innerhalb dieses Bereichs liegen
144 %wir waehlen also im Endeffekt einfach nach Augenmaß eine Grenzfunktion
      um den Parameterbereich einzuschraenken
145 f_l_vertr_o_ang=f_regr_m_x+sig_f_regr_m_x*t_inv_a_m+10; %Annahme +10 t/m
      kann die WHS, dass ein zukuenftiger Wert drinnen liegt ja nur erhö
      hen
146 f_l_vertr_u_ang=f_regr_m_x-sig_f_regr_m_x*t_inv_a_m+7; %Annahme: +7 t/m
      verringert die WHS nicht, dass ein zukuenftiger Wert drinnen liegt
147 f_l_vertr_o_ang(f_l_vertr_o_ang>60)=60; %passe an das Parameterfeld an,
      visuell
148 f_l_vertr_u_ang(f_l_vertr_u_ang<5)=5; %passe an das Parameterfeld an,
      visuell
149
150
151 %%%%%%linearen Zusammenhang von f und z ermitteln
152 beta_fz=sum( (f-mu_f).*(z-mu_z) )/( sum( (f-mu_f).^2 ) );
153 alpha_fz=mu_z-beta_fz*mu_f;
154 f_regr_z_x=alpha_fz+beta_fz*x;
155 z_regr=alpha_fz+beta_fz*f;
156 %Vertauensbereich: Annahme - Fehler ist normalerverteilt (ist er aber
      nicht, deswegen Anpassung)
157 %Standardabweichung der linearen Regression
158 sig_f_regr_z_x=sqrt( (sum((z-z_regr).^2))/(n-2) )*sqrt( 1 + (1/n) + (((x
      - mu_f).^2)/sum((f-mu_f).^2) ) );
159 t_inv_a_z=tinv((1-(a_z/2)),(n-2));
160 %Vertrauensbereich
161 f_f_vertr_o=f_regr_z_x+sig_f_regr_z_x*t_inv_a_z;
162 f_f_vertr_u=f_regr_z_x-sig_f_regr_z_x*t_inv_a_z;
163 %Versatz/Anpassung der Oberen und unteren Vertrauensbereichgrenze um +0%
      bzw +0.1 % um sie besser an die Daten anzupassen
164 %Annahme: das reduziert zumindest die Wahrscheinlichkeit nicht, dass
      zukuenftige Werte innerhalb dieses Bereichs liegen
165 %wir waehlen also im Endeffekt einfach nach Augenmaß eine Grenzfunktion
      um den Parameterbereich einzuschraenken
166 f_f_vertr_o_ang=f_regr_z_x+sig_f_regr_z_x*t_inv_a_z; %Annahme +0 % kann
      die WHS, dass ein zukuenftiger Wert drinnen liegt ja nur erhöhen
167 f_f_vertr_u_ang=f_regr_z_x-sig_f_regr_z_x*t_inv_a_z+0.1; %Annahme: +0.1
      % verringert die WHS nicht, dass ein zukuenftiger Wert drinnen
      liegt
168 f_f_vertr_o_ang(f_f_vertr_o_ang>3)=3;
169 f_f_vertr_u_ang(f_f_vertr_u_ang<0)=0;
170
171
172
173
174
175 %Fraktilwerte errechnen
176 l_o=logninv((1-(a_l/2)),log(m_l),s_l);
177 l_u=logninv((a_l/2),log(m_l),s_l);
178 l_u=5;
179 ##l_o_round=round(l_o*10)/10;
180 ##l_u_round=round(l_u*10)/10;
181 ##f_l_vertr_o_ang_gr=f_l_vertr_o_ang(find(x==l_o_round,1));
182 ##f_l_vertr_u_ang_gr=f_l_vertr_u_ang(find(x>=l_u_round,1));
183 f_o=logninv((1-(a_f/2)),log(m_f),s_f);
184 f_u=logninv((a_f/2),log(m_f),s_f);
185 ##lm_o=logninv((1-(a_lm/2)),log(m_lm),s_lm);
186 ##lm_u=logninv((a_lm/2),log(m_lm),s_lm);
187

```

```

188      %%%%%%Grenzfunktionen von l*m und f*z ermitteln - diese sind einfach
          visuell an das Parameterfeld angepasst
189      lm_o=max(f_l_vertr_o_ang)*l_o;
190      lm_u=min(f_l_vertr_u_ang)*l_u;
191      fz_o=max(f_f_vertr_o_ang)*f_o;
192      fz_u=min(f_f_vertr_u_ang)*f_u;
193      %obere Grenzfunktion: f(lm)=a_k/lm+b_k, a_k, b_k zu bestimmende
          Koeffizienten
194      %p_1, p_2 Eckpunkte des Parameterfeldes, das aus den Zusammenhaengen von
          l-m bzw z-f bestimmt wurde
195      c_k=0.85;
196      p_1=[lm_u+75, fz_o];
197      p_2=[lm_o, fz_u];
198      a_k=(p_1(2) - p_2(2))/( (1/p_1(1)^c_k) - (1/p_2(1)^c_k) );
199      b_k=p_1(2)-(a_k/p_1(1)^c_k);
200      f_gr_lmfz_o=(x_2.^(-c_k))*a_k + b_k;
201      %Abschneiden bei fz>70;
202      f_gr_lmfz_o(f_gr_lmfz_o>70)=70;
203      %untere Grenzfunktion
204      d_k=-17; %Versatz nach oben/unten
205      e_k=-290; %Versatz nach rechts/links
206      f_gr_lmfz_u=((x_2-e_k).^(-c_k))*a_k + b_k + d_k;
207      %Ausschließen von Werten <fz_u;
208      f_gr_lmfz_u(f_gr_lmfz_u<fz_u)=fz_u;
209      ##p_3=[0, 50];
210      ##p_4=[200, 0];
211      ##d_k=(p_4(2)-p_3(2))/(p_4(1)-p_3(1));
212      ##e_k=p_3(2)-d_k*p_3(1);
213      ##f_gr_lmfz_u=d_k*x_2+e_k;
214
215
216      ##
          #####
217      ##ABSCHAETZUNG DER WAHRSCHEINLICHKEIT DASS ZUKUENFTIGE PUNKTE INNERHALB
          DES FEST
218      ##GELEGTEN BEREICHES LIEGEN
219      ##
          #####
220
221      %Wahrscheinlichkeit, dass l innerhalb des Vertrauensbereiches liegt
222      P_l=1-a_l;
223      %Wahrscheinlichkeit, dass m innerhalb des Vertrauensbereiches liegt
224      P_m=1-a_m;
225      %Wahrscheinlichkeit, dass f innerhalb des Vertrauensbereiches liegt
226      P_f=1-a_f;
227      %Wahrscheinlichkeit, dass z innerhalb des Vertrauensbereiches liegt
228      P_z=1-a_z;
229      %Wahrscheinlichkeit, dass Parameterfunkt innerhalb des Bereiches liegt,
          der
230      %durch f_gr_lmfz_o und f_gr_lmfz_u abgegrenzt wird
231      %Grenzfunktionen an Paraeterpunkten auswerten:
232      f_gr_lmfz_o_par=(lm.^(-c_k))*a_k + b_k;
233      f_gr_lmfz_o_par(f_gr_lmfz_o_par>70)=70;
234      f_gr_lmfz_u_par=((lm-e_k).^(-c_k))*a_k + b_k + d_k;
235      %Ausschließen von Werten <fz_u;
236      f_gr_lmfz_u_par(f_gr_lmfz_u_par<fz_u)=fz_u;
237      %Wahrscheinlichkeit/Prozentsatz berechnen
238      check_1=fz<=f_gr_lmfz_o_par;

```

```
239     check_2=fz>=f_gr_lmfz_u_par;  
240     check_ges=check_1.*check_2;  
241     P_fz=sum(check_ges)/n;  
242     %Pfadwahrscheinlichkeit  
243     P_ges=P_l*P_m*P_f*P_z*P_fz;
```

Anhang D

Program Code zur Berechnung der Feder-Dämpfer-Modelle

Im Folgenden ist der Program Code zur Berechnung der Feder-Dämpfer-Modelle für die erste Zugkonfiguration – bestehend aus acht Reisezugwagen des Railjet – sowie den Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h bis 350 km/h abgedruckt.

```
1      %
      #####
2      % ##FEDER DAEMPFER MODELLE
3      %
      #####
4      clear;
5      clear all;
6      clc;
7
8      %Parameterfelder einlesen
9      parameter=importdata('parameter_ges_1000.txt');
10     %Ergebnisse aus dynamischen Berechnungen einladen
11     load('diff_a_max_R_8woTW_vcrm.mat');
12     diff_a_max_R_8WoTW_vcr1=diff_a_max_R;
13     load('diff_a_max_R_7wmTW_vcrm.mat');
14     diff_a_max_R_7WmTW_vcr1=diff_a_max_R;
15     %switcher einlesen, der angibt, welche v_cr die maximale
16     %Vertikalbeschleunigung liefert:....=1 wenn vcr4 maßgeblich, =0 wenn
        vcr5
17     %maßgeblich
18     load('switcher_8WoTW.mat');
19     switcher_8WoTW=switcher;
20     load('switcher_7WmTW.mat');
21     switcher_7WmTW=switcher;
22
23     %In Variablen schreiben
24     x_l_par=parameter(:,1); %in m
25     x_m_par=parameter(:,2); %in t/m
26     x_f_par=parameter(:,3); %in Hz
27     x_z_par=parameter(:,4); %in %
28     x_l=x_l_par;
29     x_m=x_m_par;
30     x_f=x_f_par;
31     x_z=x_z_par;
32
33     %kritische Geschwindigkeiten des MLM unter 350 km/h
34     vcr4=parameter(:,8);
35     vcr5=parameter(:,9);
36
37     %Radsatzmasse des Railjets
38     m_Radsatz=1900;%kg
39     %Brueckenparameter in mechanische Kenngroessen umrechnen
```

```

40  %modale Brueckenmasse(=halbe Brueckenmasse) + 2 Radsatzmassen
41  M_sdof=((x_l.*x_m*1000)/2); %in kg
42  M_mdof=((x_l.*x_m*1000)/2)+2*m_Radsatz; %in kg
43  %erste Eigenkreisfrequenz
44  OMEGA=2*pi*x_f; %in Hz
45  %modales Lehrsches Daempfungsmass=Daempfangsgrad=Tragwerksdaempfung,
46  %es gilt: c_modal=Zeta*M*omega_1_bruecke
47  ZETA=(x_z/100); %in "1"
48
49  %%Biegesteifigkeit
50  %%EI=(M.*(OMEGA.^2).*(x_l.^3))/(pi^4);
51
52  %Modale Federsteifigkeit
53  K_sdof=M_sdof.*(OMEGA.^2);
54  K_mdof=M_mdof.*(OMEGA.^2);
55  %%K=(pi^4)*EI./(2*(x_l.^3));
56
57  %
58  #####
59  %%MASSGEBLICHE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT
60  %
61  #####
62
63  %Berechne erneut die erste 50 kritischen Geschwindigkeiten für jedes
64  %Brückentragwerk
65
66  %Anzahl der kritischen Geschwindigkeiten die berechnet werden sollen
67  N_v_cr=50;
68  %Wagenlänge in m
69  d=26.5;
70  %Matrix, für Indizes der kritischen Geschwindigkeit
71  OnetoN_v_cr=[1:1:N_v_cr];
72
73  v_cr_MLM_tp=[];
74  index=[];
75  %Berechnung von v_crit
76  for j=1:N_v_cr
77  v_cr_MLM_tp(j,:)=(d*x_f_par/j)*3.6;
78  v_cr_MLM=v_cr_MLM_tp';
79  end
80  for j=1:length(parameter(:,1))
81  index(j,:)=OnetoN_v_cr;
82  end
83
84  %Berechnung der maßgeblichen v_cr
85  v_crm_8WoTW_j=[];
86  v_crm_7WmTW_j=[];
87  v_crm_8WoTW=[];
88  v_crm_7WmTW=[];
89  for j=1:length(parameter(:,1))
90  if (switcher_8WoTW(j)==1)
91  v_crm_8WoTW_j=vcr4(j);
92  else
93  v_crm_8WoTW_j=vcr5(j);
94  end
95  if (switcher_7WmTW(j)==1)
96  v_crm_7WmTW_j=vcr4(j);
97  else

```

```

96     v_crm_7WmTW_j=vcr5(j);
97     end
98     v_crm_8WoTW=[v_crm_8WoTW; v_crm_8WoTW_j];
99     v_crm_7WmTW=[v_crm_7WmTW; v_crm_7WmTW_j];
100    end
101    %bestimme den Index j derjenigen kritischen Geschwindigkeit, die für
        unter
102    %350 km/h maßgeblich ist
103    check1=v_cr_MLM;
104    check2=v_cr_MLM;
105    for j=1:length(parameter(:,1))
106        check1_j=check1(j,:);
107        check2_j=check2(j,:);
108        check1_j(round(check1_j,2)==round(v_crm_8WoTW(j),2))=1;
109        check1_j(check1_j~=1)=0;
110        check2_j(round(check2_j,2)==round(v_crm_7WmTW(j),2))=1;
111        check2_j(check2_j~=1)=0;
112
113        check1(j,:)=check1_j;
114        check2(j,:)=check2_j;
115    end
116    index_8WoTW=check1.*index;
117    index_7WmTW=check2.*index;
118
119    index_8WoTW_erg=[];
120    index_7WmTW_erg=[];
121    for j=1:length(index_8WoTW(:,1))
122        index_8WoTW_j=index_8WoTW(j,:);
123        index_7WmTW_j=index_7WmTW(j,:);
124        index_8WoTW_j(index_8WoTW_j==0)=[];
125        index_7WmTW_j(index_7WmTW_j==0)=[];
126
127        index_8WoTW_erg=[index_8WoTW_erg; index_8WoTW_j];
128        index_7WmTW_erg=[index_7WmTW_erg; index_7WmTW_j];
129    end
130    %
        #####
131    % ##SDOF - EINMASSENSCHWINGER
132    %
        #####
133    %Erregerkraft=1
134    F_sdof=100000; %in N
135
136    % % % % % !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
137    %kritisches Verhaeltnis Erregerkreisfrequenz zu Eigenkreisfrequenz
        eta_sdof=OMEGA_err/OMEGA
138    %je nachdem, ob für 8WoTW oder 7WmTW gilt: eta_sdof=one(..)./
        index_8WoTW_erg oder eta_sdof=ones(..)./index_7WmTW_erg
139    eta_sdof=ones(length(parameter(:,1)),1)./index_8WoTW_erg;%sqrt(1.-2.*(
        ZETA.^2)); %dimensionslos
        <-----
140
141    %dynamische Vergroesserungsfunktion
142    V_sdof=1 ./ sqrt( ( (1.-(eta_sdof.^2)).^2 ) + ( (2*ZETA.*eta_sdof).^2
        ) ); %dimensionslos
143    %maximale Vertikalbeschleunigung in Brückenmitte
144    a_max_sdof=(F_sdof*(eta_sdof.^2).*V_sdof)./M_sdof;

```

```

145
146 %
#####

147 % ##MDOF - MEHRMASSENSCHWINGER
148 %
#####

149 %Erregerkraft=1
150 F_mdof=100000; %in N
151
152 %Eigenschaften des Tilgers=Drehgestell
153 m_D=2800; %kg
154 k_p=1690000; %N/m
155 c_p=20000; %Ns/m
156
157 %Eigenkreisfrequenz des Tilgers
158 omega_D=sqrt(k_p/m_D);
159
160 %Dämpfungsgrad=Lehrsche Dämpfung=Dämpfung des Tilgers
161 zeta_D=c_p/(2*m_D*omega_D); % in "1"
162
163 %Abstimmung eta_mdof
164 % eta_mdof=[0.1:0.01:4];
165 %je nachdem, ob für 8WoTW oder 7WmTW gilt: eta_sdof=one(..)./
index_8WoTW_erg oder eta_sdof=ones(..)./index_7WmTW_erg
166 eta_mdof_ges=eta_sdof;
167
168 %Verstimmung kappa
169 kappa=omega_D./OMEGA;
170 n=numel(OMEGA);
171
172 %Massenverhaeltnis mu
173 mu=m_D./M_mdof;
174
175 % ####Ueberschreiben um mit Petersen Statik zu vergleichen
176 % ####ZETA=zeros(1000,1);
177 % ####zeta_D=0.05;
178 % ####mu=ones(1000,1)*0.1;
179 % ####kappa=ones(1000,1);
180
181 %Schleife über alle Bruecken=j von 1...n=1000
182 max_eta_sq_V_mdof=[];
183 eta_sq_V_mdof=[];
184 V_mdof=[];
185 for j=1:n %Anzahl aller Tragwerke des Parameterfeldes
186 eta_mdof=eta_mdof_ges(j);
187 kappa_j=kappa(j);
188 mu_j=mu(j);
189 ZETA_j=ZETA(j);
190 b1_j=(kappa_j^2)-(eta_mdof^2);
191 b2_j=2*eta_mdof*kappa_j*zeta_D;
192 b3_j=(eta_mdof^4)-(eta_mdof^2)*(1+kappa_j^2+mu_j*(kappa_j^2)+
4*kappa_j*zeta_D*ZETA_j)+(kappa_j^2);
193 b4_j=eta_mdof*(2*ZETA_j*((kappa_j^2)-(eta_mdof^2))+2*kappa_j*zeta_D
*(1-(eta_mdof^2)-mu_j*(eta_mdof^2)));
194 V_mdof_j=sqrt(((b1_j^2)+(b2_j^2))/((b3_j^2)+(b4_j^2)));
195
196 eta_sq_V_mdof_j=(eta_mdof^2)*sqrt(((b1_j^2)+(b2_j^2))/((b3_j^2)+(
b4_j^2)));

```

```

197 %   max_eta_sq_V_mdof_j=max(eta_sq_V_mdof_j);
198
199 V_mdof=[V_mdof;V_mdof_j];
200 eta_sq_V_mdof=[eta_sq_V_mdof; eta_sq_V_mdof_j];
201 %   max_eta_sq_V_mdof=[max_eta_sq_V_mdof; max_eta_sq_V_mdof_j];
202 end
203
204 a_max_mdof=((OMEGA.^2).*eta_sq_V_mdof_j*F_mdof)./K_mdof;
205
206 %
207     #####
208
209 % ##f-Faktor
210 %
211     #####
212
213 f_Faktor=a_max_sdof-a_max_mdof;
214 f_Faktor_7WmTW_vcr1=f_Faktor; %
215     <-----
216
217 f_Faktor_8WoTW_vcr1=1000*f_Faktor; %
218     <-----
219
220 %7WmTWvcr1
221 %
222     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
223
224 %#LOESCHE TRAGWERKE MIT ERGEBNISSE UNTER 100 km/h für 7WmTWvcr1
225 %
226     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
227
228 %Tragwerke bei denen die erste kritische Geschwindigkeit unter 100 km/h
229 %liegt und die daher von den Ergebnissen ausgeschlossen werden müssen
230 % 364, 466, 482, 689, 801, 816, 873
231 TW_delete=[364, 466, 482, 689, 801, 816, 873]; %in aufsteigender
232     Reihenfolge zu ordnen!!!!!!!!!!!!
233 counter=0;
234 for i=1:length(TW_delete)
235     f_Faktor_7WmTW_vcr1((TW_delete(i)+counter),:)=[];
236     counter=counter-1;
237 end
238 n_7WmTW=length(diff_a_max_R_7WmTW_vcr1);
239
240 %8WmTWvcr1
241 %
242     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
243
244 % %#LOESCHE TRAGWERKE MIT ERGEBNISSE UNTER 100 km/h
245 %
246     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
247
248 % %Tragwerke bei denen die erste kritische Geschwindigkeit unter 100 km/h
249 %
250 % %liegt und die daher von den Ergebnissen ausgeschlossen werden müssen
251 % %364, 466, 482, 689, 801, 816, 873
252 TW_delete=[364, 466, 482, 689, 801, 816, 873]; %in aufsteigender
253     Reihenfolge zu ordnen!!!!!!!!!!!!
254 counter=0;
255 for i=1:length(TW_delete)

```



```

238     f_Faktor_8WoTW_vcr1((TW_delete(i)+counter),:)=[];
239     counter=counter-1;
240     end
241
242
243     %
244     #####
245     % ##Lineare Korrelationen der Ergebnisse
246     %
247     #####
248
249     r_7WmTWvcr1_f=corr(f_Faktor_7WmTW_vcr1,diff_a_max_R_7WmTW_vcr1);
250     r_8WoTWvcr1_f=corr(f_Faktor_8WoTW_vcr1,diff_a_max_R_8WoTW_vcr1);
251     %
252     #####
253
254     % ##Interpolationskurve - Curve Fit
255     %
256     #####
257
258     %%%%%%%%%%% 7WmTW
259     f_fit_7WmTW_vcr1=fit(f_Faktor_7WmTW_vcr1,diff_a_max_R_7WmTW_vcr1,'poly3'
260     );
261     coeff_1=coeffvalues(f_fit_7WmTW_vcr1);
262     x_1=[-200:1:200];
263     f_7WmTW_vcr1=zeros(1,length(x_1));
264     for j=1:length(coeff_1)
265     f_7WmTW_vcr1=f_7WmTW_vcr1 + coeff_1(j)*(x_1.^(length(coeff_1)-j));
266     end
267     %Loeschen von allen Werten unter -50 m/s^2 fuer den f_Faktor weil
268     darunter
269     %sowieso circa konstante Verbesserung/Verschlechterung
270     loesch=-50; %-50 Wert Angeben, unter dem gelöscht wird
271     <-----
272
273     f_loesch_7WmTW_vcr1=f_Faktor_7WmTW_vcr1;
274     sel=loesch*ones(length(f_loesch_7WmTW_vcr1),1);
275     f_loesch_7WmTW_vcr1(f_loesch_7WmTW_vcr1<sel)=0;
276     f_Faktor_7WmTW_vcr1_WHS=f_loesch_7WmTW_vcr1; %!!!
277     f_Faktor_7WmTW_vcr1_WHS(f_Faktor_7WmTW_vcr1_WHS==0)=[];%!!!
278     del=f_loesch_7WmTW_vcr1;
279     del(del~=0)=1;
280     diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS=del.*diff_a_max_R_7WmTW_vcr1; %!!!
281     diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS(diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS==0)=[];%!!!
282     n_7WmTW_WHS=length(diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS);
283
284     f_7WmTW_vcr1_gr=zeros(1,length(f_Faktor_7WmTW_vcr1_WHS));
285     for j=1:length(coeff_1)
286     f_7WmTW_vcr1_gr=f_7WmTW_vcr1_gr + coeff_1(j)*((f_Faktor_7WmTW_vcr1_WHS')
287     .^(length(coeff_1)-j));
288     end
289
290     %%%%%%%%%%% 8WoTW
291     f_fit_8WoTW_vcr1=fit(f_Faktor_8WoTW_vcr1,diff_a_max_R_8WoTW_vcr1,'poly4'
292     );
293     coeff_2=coeffvalues(f_fit_8WoTW_vcr1);
294     x_2=[-200:1:200];
295     f_8WoTW_vcr1=zeros(1,length(x_2));
296     for j=1:length(coeff_2)

```

```

284     f_8WoTW_vcr1=f_8WoTW_vcr1 + coeff_2(j)*(x_2.^(length(coeff_2)-j));
285     end
286     %Loeschen von allen Werten unter -30 m/s^2 fuer den f_Faktor weil
        darunter
287     %sowieso Verschlechterung
288
289     f_loesch_8WoTW_vcr1=f_Faktor_8WoTW_vcr1;
290     sel=loesch*ones(length(f_loesch_8WoTW_vcr1),1);
291     f_loesch_8WoTW_vcr1(f_loesch_8WoTW_vcr1<sel)=0;
292     f_Faktor_8WoTW_vcr1_WHS=f_loesch_8WoTW_vcr1; %!!!
293     f_Faktor_8WoTW_vcr1_WHS(f_Faktor_8WoTW_vcr1_WHS==0)=[];%!!!
294     del=f_loesch_8WoTW_vcr1;
295     del(del~=0)=1;
296     diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS=del.*diff_a_max_R_8WoTW_vcr1; %!!!
297     diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS(diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS==0)=[];%!!!
298     n_8WoTW_WHS=length(diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS);
299
300     f_8WoTW_vcr1_gr=zeros(1,length(f_Faktor_8WoTW_vcr1_WHS));
301     for j=1:length(coeff_2)
302     f_8WoTW_vcr1_gr=f_8WoTW_vcr1_gr + coeff_2(j)*((f_Faktor_8WoTW_vcr1_WHS ')
        .^(length(coeff_2)-j));
303     end
304     %
        #####
305     % ##obere und Untere Grenzfunktionen
306     %
        #####
307
308
309     offset_7WmTW_o=10;
310     offset_7WmTW_u=2;
311     offset_8WoTW_o=3;
312     offset_8WoTW_u=1.5;
313
314     f_7WmTW_vcr1_gr_o=f_7WmTW_vcr1_gr+offset_7WmTW_o;
315     f_7WmTW_vcr1_gr_u=f_7WmTW_vcr1_gr-offset_7WmTW_u;
316
317     f_8WoTW_vcr1_gr_o=f_8WoTW_vcr1_gr+offset_8WoTW_o;
318     f_8WoTW_vcr1_gr_u=f_8WoTW_vcr1_gr-offset_8WoTW_u;
319
320     %Wahrscheinlichkeit/Prozentsatz berechnen, der TW die innerhalb der
        Grenzen
321     %liegen
322
323     % 7WmTW
324     check_1=diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS<=f_7WmTW_vcr1_gr_o';
325     check_2=diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS>=f_7WmTW_vcr1_gr_u';
326     check_ges=check_1.*check_2;
327     P_7WmTW=sum(check_ges)/n_7WmTW_WHS;
328     % 8WoTW
329     check_1=diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS<=f_8WoTW_vcr1_gr_o';
330     check_2=diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS>=f_8WoTW_vcr1_gr_u';
331     check_ges=check_1.*check_2;
332     P_8WoTW=sum(check_ges)/n_8WoTW_WHS;
333
334     %
        #####

```



```

335 % ##EXPORT
336 %
#####

337 save("-ascii","f_Faktor.txt","f_Faktor");
338
339 %
#####

340 % ##AUSGABE
341 %
#####

342 P_7WmTW
343 P_8WoTW
344
345 %
#####

346 % ##PLOTS
347 %
#####

348 gr_Mediane=100;
349 gr_Vertikale_x=50;
350 gr_Vertikale_y=100;
351
352 figure;
353 grid on;
354 hold on;
355 plot(f_Faktor_8WoTW_vcr1,diff_a_max_R_8WoTW_vcr1,','color','k',
      HandleVisibility','off');
356 % plot([-gr_Mediane, gr_Mediane], [-gr_Mediane, gr_Mediane]);
357 plot([-gr_Vertikale_x, -gr_Vertikale_x], [-gr_Vertikale_y,
      gr_Vertikale_y], 'color',[0.4, 0.7, 0.4], 'linewidth',1,
      HandleVisibility','off');
358 text(-gr_Vertikale_x+2,-2,'$\leftarrow 10^{\{3\}} \cdot \Delta a_{\{M-S-DOF,
      max\}}=-50$ m/s\textsuperscript{2}');
359 % plot(f_fit_8WoTW_vcr1,f_Faktor_8WoTW_vcr1,diff_a_max_R_8WoTW_vcr1);
360 plot(x_2,f_8WoTW_vcr1,'color',[0.1, 0.1, 0.4], 'DisplayName','
      Interpolationspolynom');
361 plot(x_2,f_8WoTW_vcr1+offset_8WoTW_o,'color',[0.9, 0.6, 0.1], '
      DisplayName','Grenzfunktionen');
362 plot(x_2,f_8WoTW_vcr1-offset_8WoTW_u,'color',[0.9, 0.6, 0.1], '
      HandleVisibility','off');

363
364 set(groot, 'defaulttextinterpreter','latex');
365 set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter','latex');
366 set(groot, 'defaultLegendInterpreter','latex');
367 set(0, 'DefaultAxesFontWeight', 'normal', ...
368 'DefaultAxesFontSize', 35, ...
369 'DefaultAxesFontAngle', 'normal', ...
370 'DefaultAxesTitleFontWeight', 'normal', ...
371 'DefaultAxesTitleFontSizeMultiplier', 1);
372 set(gca, 'fontsize',10);
373 xlim([-175,75]);
374 xticks([-175:25:75]);
375 ylim([-5,15]);
376 yticks([-5:2.5:15]);

```

```

377 xlabel('$10^{\{3\}} \cdot \Delta a_{\{M-S-DOF,max,s\}}$ in m/s\textsuperscript
      {2}');
378 ylabel('$\Delta a_{\{max,s\}}$ in m/s\textsuperscript{2}');
379 set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');
380 legend show;
381 hold off;
382 print('-dpng', 'fig4_8WoTW_vcrm', '-r900');

```

Im Folgenden ist der Program Code zur Berechnung der Feder-Dämpfer-Modelle für die zweite Zugkonfiguration – bestehend aus sieben Reisezugwagen des Railjet und einer Lok – sowie den Geschwindigkeitsbereich von 100 km/h bis 350 km/h abgedruckt.

```

1      %
      #####
2      % ##FEDER DAEMPFER MODELLE
3      %
      #####
4      clear;
5      clear all;
6      clc;
7
8      %Parameterfelder einlesen
9      parameter=importdata('parameter_ges_1000.txt');
10     %Ergebnisse aus dynamischen Berechnungen einladen
11     load('diff_a_max_R_8woTW_vcrm.mat');
12     diff_a_max_R_8WoTW_vcr1=diff_a_max_R;
13     load('diff_a_max_R_7wmTW_vcrm.mat');
14     diff_a_max_R_7WmTW_vcr1=diff_a_max_R;
15     %switcher einlesen, der angibt, welche v_cr die maximale
16     %Vertikalbeschleunigung liefert:....=1 wenn vcr4 maßgeblich, =0 wenn
      vcr5
17     %maßgeblich
18     load('switcher_8WoTW.mat');
19     switcher_8WoTW=switcher;
20     load('switcher_7WmTW.mat');
21     switcher_7WmTW=switcher;
22
23     %In Variablen schreiben
24     x_l_par=parameter(:,1); %in m
25     x_m_par=parameter(:,2); %in t/m
26     x_f_par=parameter(:,3); %in Hz
27     x_z_par=parameter(:,4); %in %
28     x_l=x_l_par;
29     x_m=x_m_par;
30     x_f=x_f_par;
31     x_z=x_z_par;
32
33     %kritische Geschwindigkeiten des MLM unter 350 km/h
34     vcr4=parameter(:,8);
35     vcr5=parameter(:,9);
36
37     %Radsatzmasse des Railjets
38     m_Radsatz=1900;%kg
39     %Brueckenparameter in mechanische Kenngroessen umrechnen
40     %modale Brueckenmasse(=halbe Brueckenmasse) + 2 Radsatzmassen
41     M_sdof=((x_l.*x_m*1000)/2); %in kg

```

```

42     M_mdof=((x_l.*x_m*1000)/2)+2*m_Radsatz; %in kg
43     %erste Eigenkreisfrequenz
44     OMEGA=2*pi*x_f; %in Hz
45     %modales Lehrsches Daempfungsmass=Daempfungsgrad=Tragwerksdaempfung,
46     %es gilt: c_modal=Zeta*M*omega_1_bruecke
47     ZETA=(x_z/100); %in "1"
48
49     % ##Biegesteifigkeit
50     % ##EI=(M.*(OMEGA.^2).*(x_l.^3))/(pi^4);
51
52     %Modale Federsteifigkeit
53     K_sdof=M_sdof.*(OMEGA.^2);
54     K_mdof=M_mdof.*(OMEGA.^2);
55     % ##K=(pi^4)*EI./(2*(x_l.^3));
56
57     %
58     #####
59     % ##MASSGEBLICHE KRITISCHE GESCHWINDIGKEIT
60     %
61     #####
62
63     %Berechne erneut die erste 50 kritischen Geschwindigkeiten für jedes
64     %Brückentragwerk
65
66     %Anzahl der kritischen Geschwindigkeiten die berechnet werden sollen
67     N_v_cr=50;
68     %Wagenlänge in m
69     d=26.5;
70     %Matrix, für Indizes der kritischen Geschwindigkeit
71     OnetoN_v_cr=[1:1:N_v_cr];
72
73     v_cr_MLM_tp=[];
74     index=[];
75     %Berechnung von v_crit
76     for j=1:N_v_cr
77         v_cr_MLM_tp(j,:)=(d*x_f_par/j)*3.6;
78         v_cr_MLM=v_cr_MLM_tp';
79     end
80     for j=1:length(parameter(:,1))
81         index(j,:)=OnetoN_v_cr;
82     end
83
84     %Berechnung der maßgeblichen v_cr
85     v_crm_8WoTW_j=[];
86     v_crm_7WmTW_j=[];
87     v_crm_8WoTW=[];
88     v_crm_7WmTW=[];
89     for j=1:length(parameter(:,1))
90         if (switcher_8WoTW(j)==1)
91             v_crm_8WoTW_j=vcr4(j);
92         else
93             v_crm_8WoTW_j=vcr5(j);
94         end
95         if (switcher_7WmTW(j)==1)
96             v_crm_7WmTW_j=vcr4(j);
97         else
98             v_crm_7WmTW_j=vcr5(j);
99         end

```

```

98     v_crm_8WoTW=[v_crm_8WoTW; v_crm_8WoTW_j];
99     v_crm_7WmTW=[v_crm_7WmTW; v_crm_7WmTW_j];
100    end
101    %bestimme den Index j derjenigen kritischen Geschwindigkeit, die für
102    %350 km/h maßgeblich ist
103    check1=v_cr_MLM;
104    check2=v_cr_MLM;
105    for j=1:length(parameter(:,1))
106        check1_j=check1(j,:);
107        check2_j=check2(j,:);
108        check1_j(round(check1_j,2)==round(v_crm_8WoTW(j),2))=1;
109        check1_j(check1_j~=1)=0;
110        check2_j(round(check2_j,2)==round(v_crm_7WmTW(j),2))=1;
111        check2_j(check2_j~=1)=0;
112
113        check1(j,:)=check1_j;
114        check2(j,:)=check2_j;
115    end
116    index_8WoTW=check1.*index;
117    index_7WmTW=check2.*index;
118
119    index_8WoTW_erg=[];
120    index_7WmTW_erg=[];
121    for j=1:length(index_8WoTW(:,1))
122        index_8WoTW_j=index_8WoTW(j,:);
123        index_7WmTW_j=index_7WmTW(j,:);
124        index_8WoTW_j(index_8WoTW_j==0)=[];
125        index_7WmTW_j(index_7WmTW_j==0)=[];
126
127        index_8WoTW_erg=[index_8WoTW_erg; index_8WoTW_j];
128        index_7WmTW_erg=[index_7WmTW_erg; index_7WmTW_j];
129    end
130    %
131    % #####
132    % ##SDOF - EINMASSENSCHWINGER
133    % #####
134    %Erregerkraft=1
135    F_s dof=100000; %in N
136
137    % % % % % !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
138    %kritisches Verhaeltnis Erregerkreisfrequenz zu Eigenkreisfrequenz
139    eta_s dof=OMEGA_err/OMEGA
140    %je nachdem, ob für 8WoTW oder 7WmTW gilt: eta_s dof=one(..)./
141    index_8WoTW_erg oder eta_s dof=ones(..)./index_7WmTW_erg
142    eta_s dof=ones(length(parameter(:,1)),1)./index_7WmTW_erg;%sqrt(1.-2.*(
143    ZETA.^2)); %dimensionslos
144    <-----
145
146    %dynamische Vergroesserungsfunktion
147    V_s dof=1 ./ sqrt( ( (1.-(eta_s dof.^2)).^2 ) + ( (2*ZETA.*eta_s dof).^2
148    ) ); %dimensionslos
149    %maximale Vertikalbeschleunigung in Brückenmitte
150    a_max_s dof=(F_s dof*(eta_s dof.^2).*V_s dof)./M_s dof;

```

```

146      %
          #####
147      % ##MDOF - MEHRMASSENSCHWINGER
148      %
          #####
149      %Erregerkraft=1
150      F_mdof=100000; %in N
151
152      %Eigenschaften des Tilgers=Drehgestell
153      m_D=2800; %kg
154      k_p=1690000; %N/m
155      c_p=20000; %Ns/m
156
157      %Eigenkreisfrequenz des Tilgers
158      omega_D=sqrt(k_p/m_D);
159
160      %Dämpfungsgrad=Lehrsche Dämpfung=Dämpfung des Tilgers
161      zeta_D=c_p/(2*m_D*omega_D); % in "1"
162
163      %Abstimmung eta_mdof
164      % eta_mdof=[0.1:0.01:4];
165      %je nachdem, ob für 8WoTW oder 7WmTW gilt: eta_sdof=one(..)./
          index_8WoTW_erg oder eta_sdof=ones(..)./index_7WmTW_erg
166      eta_mdof_ges=eta_sdof;
167
168      %Verstimmung kappa
169      kappa=omega_D./OMEGA;
170      n=numel(OMEGA);
171
172      %Massenverhaeltnis mu
173      mu=m_D./M_mdof;
174
175      % ####Ueberschreiben um mit Petersen Statik zu vergleichen
176      % ####ZETA=zeros(1000,1);
177      % ####zeta_D=0.05;
178      % ####mu=ones(1000,1)*0.1;
179      % ####kappa=ones(1000,1);
180
181      %Schleife über alle Bruecken=j von 1...n=1000
182      max_eta_sq_V_mdof=[];
183      eta_sq_V_mdof=[];
184      V_mdof=[];
185      for j=1:n %Anzahl aller Tragwerke des Parameterfeldes
186      eta_mdof=eta_mdof_ges(j);
187      kappa_j=kappa(j);
188      mu_j=mu(j);
189      ZETA_j=ZETA(j);
190      b1_j=(kappa_j^2)-(eta_mdof^2);
191      b2_j=2*eta_mdof*kappa_j*zeta_D;
192      b3_j=(eta_mdof^4)-(eta_mdof^2)*(1+kappa_j^2+mu_j*(kappa_j^2)+
          4*kappa_j*zeta_D*ZETA_j)+kappa_j^2);
193      b4_j=eta_mdof*(2*ZETA_j*((kappa_j^2)-(eta_mdof^2))+2*kappa_j*zeta_D
          *(1-(eta_mdof^2)-mu_j*(eta_mdof^2)));
194      V_mdof_j=sqrt(((b1_j^2)+(b2_j^2))/((b3_j^2)+(b4_j^2)));
195
196      eta_sq_V_mdof_j=(eta_mdof^2)*sqrt(((b1_j^2)+(b2_j^2))/((b3_j^2)+(
          b4_j^2)));
197      % max_eta_sq_V_mdof_j=max(eta_sq_V_mdof_j);

```

```

198
199 V_mdof=[V_mdof;V_mdof_j];
200 eta_sq_V_mdof=[eta_sq_V_mdof; eta_sq_V_mdof_j];
201 % max_eta_sq_V_mdof=[max_eta_sq_V_mdof; max_eta_sq_V_mdof_j];
202 end
203
204 a_max_mdof=((OMEGA.^2).*eta_sq_V_mdof_j*F_mdof)./K_mdof;
205
206 %
207 #####
208 % ##f-Faktor
209 %
210 #####
211
212 f_Faktor=a_max_sdof-a_max_mdof;
213 f_Faktor_7WmTW_vcr1=1000*f_Faktor; %
214 <-----
215
216 f_Faktor_8WoTW_vcr1=1000*f_Faktor; %
217 <-----
218
219 %7WmTWvcr1
220 %
221 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
222
223 %#LOESCHE TRAGWERKE MIT ERGEBNISSE UNTER 100 km/h für 7WmTWvcr1
224 %
225 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
226
227 %Tragwerke bei denen die erste kritische Geschwindigkeit unter 100 km/h
228 %liegt und die daher von den Ergebnissen ausgeschlossen werden müssen
229 % 364, 466, 482, 689, 801, 816, 873
230 TW_delete=[364, 466, 482, 689, 801, 816, 873]; %in aufsteigender
231 Reihenfolge zu ordnen!!!!!!!!!!!!
232 counter=0;
233 for i=1:length(TW_delete)
234 f_Faktor_7WmTW_vcr1((TW_delete(i)+counter),:)=[];
235 counter=counter-1;
236 end
237 n_7WmTW=length(diff_a_max_R_7WmTW_vcr1);
238
239 %8WmTWvcr1
240 %
241 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
242
243 % %#LOESCHE TRAGWERKE MIT ERGEBNISSE UNTER 100 km/h
244 %
245 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
246
247 % %Tragwerke bei denen die erste kritische Geschwindigkeit unter 100 km/
248 % h
249 % %liegt und die daher von den Ergebnissen ausgeschlossen werden müssen
250 % %364, 466, 482, 689, 801, 816, 873
251 TW_delete=[364, 466, 482, 689, 801, 816, 873]; %in aufsteigender
252 Reihenfolge zu ordnen!!!!!!!!!!!!
253 counter=0;
254 for i=1:length(TW_delete)
255 f_Faktor_8WoTW_vcr1((TW_delete(i)+counter),:)=[];

```

```

239     counter=counter-1;
240     end
241
242
243     %
244     #####
245     % ##Lineare Korrelationen der Ergebnisse
246     %
247     #####
248
249     r_7WmTWvcr1_f=corr(f_Faktor_7WmTW_vcr1,diff_a_max_R_7WmTW_vcr1);
250     r_8WoTWvcr1_f=corr(f_Faktor_8WoTW_vcr1,diff_a_max_R_8WoTW_vcr1);
251     %
252     #####
253
254     % ##Interpolationskurve - Curve Fit
255     %
256     #####
257
258     %%%%%%%%%%% 7WmTW
259     f_fit_7WmTW_vcr1=fit(f_Faktor_7WmTW_vcr1,diff_a_max_R_7WmTW_vcr1,'poly4'
260     );
261     coeff_1=coeffvalues(f_fit_7WmTW_vcr1);
262     x_1=[-200:1:200];
263     f_7WmTW_vcr1=zeros(1,length(x_1));
264     for j=1:length(coeff_1)
265     f_7WmTW_vcr1=f_7WmTW_vcr1 + coeff_1(j)*(x_1.^(length(coeff_1)-j));
266     end
267     %Loeschen von allen Werten unter -30 m/s^2 fuer den f_Faktor weil
268     darunter
269     %sowieso Verschlechterung
270     loesch=-50; %-30 Wert Angeben, unter dem gelöscht wird
271     <-----
272
273     f_loesch_7WmTW_vcr1=f_Faktor_7WmTW_vcr1;
274     sel=loesch*ones(length(f_loesch_7WmTW_vcr1),1);
275     f_loesch_7WmTW_vcr1(f_loesch_7WmTW_vcr1<sel)=0;
276     f_Faktor_7WmTW_vcr1_WHS=f_loesch_7WmTW_vcr1; %!!!
277     f_Faktor_7WmTW_vcr1_WHS(f_Faktor_7WmTW_vcr1_WHS==0)=[];%!!!
278     del=f_loesch_7WmTW_vcr1;
279     del(del~=0)=1;
280     diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS=del.*diff_a_max_R_7WmTW_vcr1; %!!!
281     diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS(diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS==0)=[];%!!!
282     n_7WmTW_WHS=length(diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS);
283
284     f_7WmTW_vcr1_gr=zeros(1,length(f_Faktor_7WmTW_vcr1_WHS));
285     for j=1:length(coeff_1)
286     f_7WmTW_vcr1_gr=f_7WmTW_vcr1_gr + coeff_1(j)*((f_Faktor_7WmTW_vcr1_WHS')
287     .^(length(coeff_1)-j));
288     end
289
290     %%%%%%%%%%% 8WoTW
291     f_fit_8WoTW_vcr1=fit(f_Faktor_8WoTW_vcr1,diff_a_max_R_8WoTW_vcr1,'poly4'
292     );
293     coeff_2=coeffvalues(f_fit_8WoTW_vcr1);
294     x_2=[-200:1:200];
295     f_8WoTW_vcr1=zeros(1,length(x_2));
296     for j=1:length(coeff_2)
297     f_8WoTW_vcr1=f_8WoTW_vcr1 + coeff_2(j)*(x_2.^(length(coeff_2)-j));

```

```

285     end
286     %Loeschen von allen Werten unter -30 m/s^2 fuer den f_Faktor weil
        darunter
287     %sowieso Verschlechterung
288
289     f_loesch_8WoTW_vcr1=f_Faktor_8WoTW_vcr1;
290     sel=loesch*ones(length(f_loesch_8WoTW_vcr1),1);
291     f_loesch_8WoTW_vcr1(f_loesch_8WoTW_vcr1<sel)=0;
292     f_Faktor_8WoTW_vcr1_WHS=f_loesch_8WoTW_vcr1; %!!!
293     f_Faktor_8WoTW_vcr1_WHS(f_Faktor_8WoTW_vcr1_WHS==0)=[];%!!!
294     del=f_loesch_8WoTW_vcr1;
295     del(del~=0)=1;
296     diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS=del.*diff_a_max_R_8WoTW_vcr1; %!!!
297     diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS(diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS==0)=[];%!!!
298     n_8WoTW_WHS=length(diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS);
299
300     f_8WoTW_vcr1_gr=zeros(1,length(f_Faktor_8WoTW_vcr1_WHS));
301     for j=1:length(coeff_2)
302         f_8WoTW_vcr1_gr=f_8WoTW_vcr1_gr + coeff_2(j)*((f_Faktor_8WoTW_vcr1_WHS')
            .^(length(coeff_2)-j));
303     end
304     %
            #####
305     % ##obere und Untere Grenzfunktionen
306     %
            #####
307
308
309     offset_7WmTW_o=3;
310     offset_7WmTW_u=1.5;
311     offset_8WoTW_o=3;
312     offset_8WoTW_u=1.5;
313
314     f_7WmTW_vcr1_gr_o=f_7WmTW_vcr1_gr+offset_7WmTW_o;
315     f_7WmTW_vcr1_gr_u=f_7WmTW_vcr1_gr-offset_7WmTW_u;
316
317     f_8WoTW_vcr1_gr_o=f_8WoTW_vcr1_gr+offset_8WoTW_o;
318     f_8WoTW_vcr1_gr_u=f_8WoTW_vcr1_gr-offset_8WoTW_u;
319
320     %Wahrscheinlichkeit/Prozentsatz berechnen, der TW die innerhalb der
        Grenzen
321     %liegen
322
323     % 7WmTW
324     check_1=diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS<=f_7WmTW_vcr1_gr_o';
325     check_2=diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS>=f_7WmTW_vcr1_gr_u';
326     check_ges=check_1.*check_2;
327     P_7WmTW=sum(check_ges)/n_7WmTW_WHS;
328     % 8WoTW
329     check_1=diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS<=f_8WoTW_vcr1_gr_o';
330     check_2=diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS>=f_8WoTW_vcr1_gr_u';
331     check_ges=check_1.*check_2;
332     P_8WoTW=sum(check_ges)/n_8WoTW_WHS;
333
334     %
            #####
335     % ##EXPORT

```

```

336 %
      #####

337 save("-ascii","f_Faktor.txt","f_Faktor");
338
339 %
      #####

340 % ##AUSGABE
341 %
      #####

342 P_7WmTW
343 P_8WoTW
344
345 %
      #####

346 % ##PLOTS
347 %
      #####

348 gr_Mediane=100;
349 gr_Vertikale_x=50;
350 gr_Vertikale_y=100;
351
352 figure;
353 grid on;
354 hold on;
355 plot(f_Faktor_7WmTW_vcr1,diff_a_max_R_7WmTW_vcr1,'.','color','k',
      HandleVisibility','off');
356 % plot([-gr_Mediane, gr_Mediane], [-gr_Mediane, gr_Mediane]);
357 plot([-gr_Vertikale_x, -gr_Vertikale_x], [-gr_Vertikale_y,
      gr_Vertikale_y], 'color',[0.4, 0.7, 0.4], 'linewidth',1,
      HandleVisibility','off');
358 text(-gr_Vertikale_x+2,-2,'$\leftarrow 10^{\{3\}} \cdot \Delta a_{\{M-S-DOF,
      max\}}=-50$ m/s\textsuperscript{\{2\}}');
359 % plot(f_fit_7WmTW_vcr1, f_Faktor_7WmTW_vcr1, diff_a_max_R_7WmTW_vcr1);
360 plot(x_1,f_7WmTW_vcr1,'color',[0.1, 0.1, 0.4], 'DisplayName',
      Interpolationspolynom');
361 plot(x_1,f_7WmTW_vcr1+offset_7WmTW_o,'color',[0.9, 0.6, 0.1],
      'DisplayName','Grenzfunktionen');
362 plot(x_1,f_7WmTW_vcr1-offset_7WmTW_u,'color',[0.9, 0.6, 0.1],
      HandleVisibility','off');

363
364 set(groot, 'defaulttextinterpreter','latex');
365 set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter','latex');
366 set(groot, 'defaultLegendInterpreter','latex');
367 set(0, 'DefaultAxesFontWeight', 'normal', ...
368 'DefaultAxesFontSize', 35, ...
369 'DefaultAxesFontAngle', 'normal', ...
370 'DefaultAxesTitleFontWeight', 'normal', ...
371 'DefaultAxesTitleFontSizeMultiplier', 1);
372 set(gca, 'fontsize',10);
373 xlim([-175,75]);
374 xticks([-175:25:75]);
375 ylim([-5,15]);
376 yticks([-5:2.5:15]);
377 xlabel('$\Delta a_{\{M-S-DOF,max,s\}}$ in m/s\textsuperscript{\{2\}}');
378 ylabel('$\Delta a_{\{max,s\}}$ in m/s\textsuperscript{\{2\}}');

```

```

379     set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');
380     legend show;
381     hold off;
382     print('-dpng', 'fig3_7WmTW_vcrm', '-r900');

```

Im Folgenden ist der Program Code zur Berechnung der Feder-Dämpfer-Modelle für die erste Zugkonfiguration sowie die erste kritische Geschwindigkeit abgedruckt.

```

1      %
          #####
2      % ##FEDER DAEMPFER MODELLE
3      %
          #####
4      clear;
5      clear all;
6      clc;
7
8      %Parameterfelder einlesen
9      parameter=importdata('parameter_ges_1000.txt');
10     %Ergebnisse aus dynamischen Berechnungen einladen
11     load('diff_a_max_R_8WoTW_vcr1.mat');
12     diff_a_max_R_8WoTW_vcr1=diff_a_max_R;
13     load('diff_a_max_R_7WmTW_vcr1.mat');
14     diff_a_max_R_7WmTW_vcr1=diff_a_max_R;
15
16     %In Variablen schreiben
17     x_l_par=parameter(:,1); %in m
18     x_m_par=parameter(:,2); %in t/m
19     x_f_par=parameter(:,3); %in Hz
20     x_z_par=parameter(:,4); %in %
21     x_l=x_l_par;
22     x_m=x_m_par;
23     x_f=x_f_par;
24     x_z=x_z_par;
25     %Radsatzmasse des Railjets
26     m_Radsatz=1900;%kg
27     %Brueckenparameter in mechanische Kenngroessen umrechnen
28     %modale Brueckenmasse (=halbe Brueckenmasse) + 2 Radsatzmassen
29     M_sdof=((x_l.*x_m*1000)/2); %in kg
30     M_mdof=((x_l.*x_m*1000)/2)+2*m_Radsatz; %in kg
31     %erste Eigenkreisfrequenz
32     OMEGA=2*pi*x_f; %in Hz
33     %modales Lehrsches Daempfungsmass=Daempfungsgrad=Tragwerksdaempfung,
34     %es gilt: c_modal=Zeta*M*omega_1_bruecke
35     ZETA=(x_z/100); %in "1"
36
37     % ##%Biegesteifigkeit
38     % ##EI=(M.*(OMEGA.^2).*(x_l.^3))/(pi^4);
39
40     %Modale Federsteifigkeit
41     K_sdof=M_sdof.*(OMEGA.^2);
42     K_mdof=M_mdof.*(OMEGA.^2);
43     % ##K=(pi^4)*EI./(2*(x_l.^3));
44
45     %
          #####

```

```

46 % ##SDOF - EINMASSENSCHWINGER
47 %
      #####
48 %Erregerkraft=1
49 F_sdof=100000; %in N
50 %kritisches Verhaeltnis Erregerkreisfrequenz zu Eigenkreisfrequenz
      eta_sdof=OMEGA_err/OMEGA
51 eta_sdof=ones(1000,1);%sqrt(1.-2.*(ZETA.^2)); %dimensionslos
52 %dynamische Vergroesserungsfunktion
53 V_sdof=1 ./ sqrt( ( (1.-(eta_sdof.^2)).^2 ) + ( (2*ZETA.*eta_sdof).^2
      ) ); %dimensionslos
54 %maximale Vertikalbeschleunigung in Brueckenmitte
55 a_max_sdof=(F_sdof*(eta_sdof.^2).*V_sdof)./M_sdof;
56
57 %
      #####

58 % ##MDOF - MEHRMASSENSCHWINGER
59 %
      #####

60 %Erregerkraft=1
61 F_mdof=100000; %in N
62
63 %Eigenschaften des Tilgers=Drehgestell
64 m_D=2800; %kg
65 k_p=1690000; %N/m
66 c_p=20000; %Ns/m
67
68 %Eigenkreisfrequenz des Tilgers
69 omega_D=sqrt(k_p/m_D);
70
71 %Dämpfungsgrad=Lehrsche Dämpfung=Dämpfung des Tilgers
72 zeta_D=c_p/(2*m_D*omega_D); % in "1"
73
74 %Abstimmung eta_mdof
75 eta_mdof=[0.1:0.01:4];
76
77 %Verstimmung kappa
78 kappa=omega_D./OMEGA;
79 n=numel(OMEGA);
80
81 %Massenverhaeltnis mu
82 mu=m_D./M_mdof;
83
84 % ####Ueberschreiben um mit Petersen Statik zu vergleichen
85 % ####ZETA=zeros(1000,1);
86 % ####zeta_D=0.05;
87 % ####mu=ones(1000,1)*0.1;
88 % ####kappa=ones(1000,1);
89
90 %Schleife über alle Bruecken=j von 1...n=1000
91 max_eta_sq_V_mdof=[];
92 eta_sq_V_mdof=[];
93 V_mdof=[];
94 for j=1:n
95 kappa_j=kappa(j);
96 mu_j=mu(j);
97 ZETA_j=ZETA(j);

```

```

98     b1_j=( (kappa_j^2) - (eta_mdof.^2) );
99     b2_j=2*eta_mdof*kappa_j*zeta_D;
100    b3_j=(eta_mdof.^4) - (eta_mdof.^2)*( 1 + kappa_j^2 + mu_j*(kappa_j^2)
        + 4*kappa_j*zeta_D*ZETA_j ) + (kappa_j^2);
101    b4_j=eta_mdof.*( 2*ZETA_j*((kappa_j^2)-(eta_mdof.^2)) + 2*kappa_j*
        zeta_D.*(1.-(eta_mdof.^2)-mu_j*(eta_mdof.^2)) );
102    V_mdof_j=sqrt( ((b1_j.^2) + (b2_j.^2))./((b3_j.^2)+(b4_j.^2)) );
103
104    eta_sq_V_mdof_j=(eta_mdof.^2).*sqrt( ((b1_j.^2) + (b2_j.^2))./((b3_j
        .^2)+(b4_j.^2)) );
105    max_eta_sq_V_mdof_j=max(eta_sq_V_mdof_j);
106
107    V_mdof=[V_mdof;V_mdof_j];
108    eta_sq_V_mdof=[eta_sq_V_mdof; eta_sq_V_mdof_j];
109    max_eta_sq_V_mdof=[max_eta_sq_V_mdof; max_eta_sq_V_mdof_j];
110    end
111
112    a_max_mdof=((OMEGA.^2).*max_eta_sq_V_mdof*F_mdof)./K_mdof;
113
114    %
        #####
115    % ##f-Faktor
116    %
        #####
117    f_Faktor=a_max_sdof-a_max_mdof;
118    f_Faktor_7WmTW_vcr1=f_Faktor;
119    f_Faktor_8WoTW_vcr1=f_Faktor;
120
121    %7WmTWvcr1
122    %
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
123    %#LOESCHE TRAGWERKE MIT ERGEBNISSE UNTER 100 km/h für 7WmTWvcr1
124    %
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
125    %Tragwerke bei denen die erste kritische Geschwindigkeit unter 100 km/h
126    %liegt und die daher von den Ergebnissen ausgeschlossen werden müssen
127    % 364, 689, 816, 873
128    TW_delete=[364, 689, 816, 873]; %in aufsteigender Reihenfolge zu ordnen
        !!!!!!!!!!!!!
129    counter=0;
130    for i=1:length(TW_delete)
131    f_Faktor_7WmTW_vcr1((TW_delete(i)+counter),:)=[];
132    counter=counter-1;
133    end
134    n_7WmTW=length(diff_a_max_R_7WmTW_vcr1);
135
136    %8WmTWvcr1
137    %
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
138    % %#LOESCHE TRAGWERKE MIT ERGEBNISSE UNTER 100 km/h
139    %
        %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
140    % %Tragwerke bei denen die erste kritische Geschwindigkeit unter 100 km/
        h
    
```



```

141 % %liegt und die daher von den Ergebnissen ausgeschlossen werden müssen
142 % %364, 466, 482, 689, 801, 816, 873
143 TW_delete=[364, 466, 689, 801, 816, 873]; %in aufsteigender Reihenfolge
      zu ordnen!!!!!!!!!!!!!!
144 counter=0;
145 for i=1:length(TW_delete)
146 f_Faktor_8WoTW_vcr1((TW_delete(i)+counter),:)=[];
147 counter=counter-1;
148 end
149
150
151 %
      #####

152 % ##Lineare Korrelationen der Ergebnisse
153 %
      #####

154 r_7WmTWvcr1_f=corr(f_Faktor_7WmTW_vcr1,diff_a_max_R_7WmTW_vcr1);
155 r_8WoTWvcr1_f=corr(f_Faktor_8WoTW_vcr1,diff_a_max_R_8WoTW_vcr1);
156 %
      #####

157 % ##Interpolationskurve - Curve Fit
158 %
      #####

159 %%%%%%%%%%% 7WmTW
160 f_fit_7WmTW_vcr1=fit(f_Faktor_7WmTW_vcr1,diff_a_max_R_7WmTW_vcr1,'poly4'
      );
161 coeff_1=coeffvalues(f_fit_7WmTW_vcr1);
162 x_1=[-100:1:200];
163 f_7WmTW_vcr1=zeros(1,length(x_1));
164 for j=1:length(coeff_1)
165 f_7WmTW_vcr1=f_7WmTW_vcr1 + coeff_1(j)*(x_1.^(length(coeff_1)-j));
166 end
167 %Loeschen von allen Werten unter -30 m/s^2 fuer den f_Faktor weil
      darunter
168 %sowieso Verschlechterung
169 loesch=0; %-30% Wert Angeben, unter dem gelöscht wird
170 f_loesch_7WmTW_vcr1=f_Faktor_7WmTW_vcr1;
171 sel=loesch*ones(length(f_loesch_7WmTW_vcr1),1);
172 f_loesch_7WmTW_vcr1(f_loesch_7WmTW_vcr1<sel)=0;
173 f_Faktor_7WmTW_vcr1_WHS=f_loesch_7WmTW_vcr1; %!!!
174 f_Faktor_7WmTW_vcr1_WHS(f_Faktor_7WmTW_vcr1_WHS==0)=[]; %!!!
175 del=f_loesch_7WmTW_vcr1;
176 del(del~=0)=1;
177 diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS=del.*diff_a_max_R_7WmTW_vcr1; %!!!
178 diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS(diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS==0)=[]; %!!!
179 n_7WmTW_WHS=length(diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS);
180
181 f_7WmTW_vcr1_gr=zeros(1,length(f_Faktor_7WmTW_vcr1_WHS));
182 for j=1:length(coeff_1)
183 f_7WmTW_vcr1_gr=f_7WmTW_vcr1_gr + coeff_1(j)*((f_Faktor_7WmTW_vcr1_WHS')
      .^(length(coeff_1)-j));
184 end
185
186 %%%%%%%%%%% 8WoTW
187 f_fit_8WoTW_vcr1=fit(f_Faktor_8WoTW_vcr1,diff_a_max_R_8WoTW_vcr1,'poly4'
      );

```

```

188     coeff_2=coeffvalues(f_fit_8WoTW_vcr1);
189     x_2=[-100:1:200];
190     f_8WoTW_vcr1=zeros(1,length(x_2));
191     for j=1:length(coeff_2)
192         f_8WoTW_vcr1=f_8WoTW_vcr1 + coeff_2(j)*(x_2.^(length(coeff_2)-j));
193     end
194     %Loeschen von allen Werten unter -30 m/s^2 fuer den f_Faktor weil
195     %darunter
196     %sowieso Verschlechterung
197     f_loesch_8WoTW_vcr1=f_Faktor_8WoTW_vcr1;
198     sel=loesch*ones(length(f_loesch_8WoTW_vcr1),1);
199     f_loesch_8WoTW_vcr1(f_loesch_8WoTW_vcr1<sel)=0;
200     f_Faktor_8WoTW_vcr1_WHS=f_loesch_8WoTW_vcr1; %!!!
201     f_Faktor_8WoTW_vcr1_WHS(f_Faktor_8WoTW_vcr1_WHS==0)=[];%!!!
202     del=f_loesch_8WoTW_vcr1;
203     del(del~=0)=1;
204     diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS=del.*diff_a_max_R_8WoTW_vcr1; %!!!
205     diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS(diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS==0)=[];%!!!
206     n_8WoTW_WHS=length(diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS);
207
208     f_8WoTW_vcr1_gr=zeros(1,length(f_Faktor_8WoTW_vcr1_WHS));
209     for j=1:length(coeff_2)
210         f_8WoTW_vcr1_gr=f_8WoTW_vcr1_gr + coeff_2(j)*((f_Faktor_8WoTW_vcr1_WHS ')
211             .^(length(coeff_2)-j));
212     end
213     %
214     #####
215
216     % ##obere und Untere Grenzfunktionen
217     %
218     #####
219
220     offset_7WmTW_o=10;
221     offset_7WmTW_u=2;
222     offset_8WoTW_o=10;
223     offset_8WoTW_u=2;
224
225     f_7WmTW_vcr1_gr_o=f_7WmTW_vcr1_gr+offset_7WmTW_o;
226     f_7WmTW_vcr1_gr_u=f_7WmTW_vcr1_gr-offset_7WmTW_u;
227
228     f_8WoTW_vcr1_gr_o=f_8WoTW_vcr1_gr+offset_8WoTW_o;
229     f_8WoTW_vcr1_gr_u=f_8WoTW_vcr1_gr-offset_8WoTW_u;
230
231     %Wahrscheinlichkeit/Prozentsatz berechnen, der TW die innerhalb der
232     %Grenzen
233     %liegen
234
235     % 7WmTW
236     check_1=diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS<=f_7WmTW_vcr1_gr_o';
237     check_2=diff_a_max_R_7WmTW_vcr1_WHS>=f_7WmTW_vcr1_gr_u';
238     check_ges=check_1.*check_2;
239     P_7WmTW=sum(check_ges)/n_7WmTW_WHS;
240
241     % 8WoTW
242     check_1=diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS<=f_8WoTW_vcr1_gr_o';
243     check_2=diff_a_max_R_8WoTW_vcr1_WHS>=f_8WoTW_vcr1_gr_u';
244     check_ges=check_1.*check_2;
245     P_8WoTW=sum(check_ges)/n_8WoTW_WHS;

```

```

241
242 %
      #####

243 % ##EXPORT
244 %
      #####

245 save("-ascii","f_Faktor.txt","f_Faktor");
246
247 %
      #####

248 % ##AUSGABE
249 %
      #####

250 P_7WmTW
251 P_8WoTW
252
253 %
      #####

254 % ##PLOTS
255 %
      #####

256 gr_Mediane=100;
257 gr_Vertikale_x=-0;
258 gr_Vertikale_y=100;
259
260 figure;
261 grid on;
262 hold on;
263 plot(f_Faktor_7WmTW_vcr1,diff_a_max_R_7WmTW_vcr1,','color','k','
      HandleVisibility','off');
264 % plot([-gr_Mediane, gr_Mediane], [-gr_Mediane, gr_Mediane]);
265 % plot([-gr_Vertikale_x, -gr_Vertikale_x], [-gr_Vertikale_y,
      gr_Vertikale_y], 'color',[0.4, 0.7, 0.4], 'linewidth',1, '
      HandleVisibility','off');
266 % text(-gr_Vertikale_x+2,-10,'$\leftarrow \Delta a_{M-S-DOF,max}=-30$ m/
      s\textsuperscript{2}');
267 % plot(f_fit_7WmTW_vcr1,f_Faktor_7WmTW_vcr1,diff_a_max_R_7WmTW_vcr1);
268 plot(x_1,f_7WmTW_vcr1,'color',[0.1, 0.1, 0.4], 'DisplayName', '
      Interpolationspolynom');
269 plot(x_1,f_7WmTW_vcr1+offset_7WmTW_o,'color',[0.9, 0.6, 0.1], '
      DisplayName', 'Grenzfunktionen');
270 plot(x_1,f_7WmTW_vcr1-offset_7WmTW_u,'color',[0.9, 0.6, 0.1], '
      HandleVisibility','off');

271
272 set(groot, 'defaulttextinterpreter','latex');
273 set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter','latex');
274 set(groot, 'defaultLegendInterpreter','latex');
275 set(0, 'DefaultAxesFontWeight', 'normal', ...
276 'DefaultAxesFontSize', 35, ...
277 'DefaultAxesFontAngle', 'normal', ...
278 'DefaultAxesTitleFontWeight', 'normal', ...
279 'DefaultAxesTitleFontSizeMultiplier', 1);
280 set(gca, 'fontsize',10);
281 xlim([0,60]);

```

```

282     xticks([0:10:60]);
283     ylim([-70,30]);
284     yticks([-70:10:30]);
285     xlabel('\Delta a_{M-S-DOF,max,p}$ in m/s\textsuperscript{2}');
286     ylabel('\Delta a_{max,p}$ in m/s\textsuperscript{2}');
287     set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');
288     legend show;
289     hold off;
290     print('-dpng', 'fig3_7WmTW_vcr1', '-r900');
291
292     figure;
293     grid on;
294     hold on;
295     plot(f_Faktor_8WoTW_vcr1,diff_a_max_R_8WoTW_vcr1, '.', 'color','k', '
        HandleVisibility','off');
296     % plot([-gr_Mediane, gr_Mediane], [-gr_Mediane, gr_Mediane]);
297     % plot([-gr_Vertikale_x, -gr_Vertikale_x], [-gr_Vertikale_y,
        gr_Vertikale_y], 'color',[0.4, 0.7, 0.4], 'linewidth',1, '
        HandleVisibility','off');
298     % text(-gr_Vertikale_x+2,-10, '$\leftarrow \Delta a_{M-S-DOF,max}=-30$ m/
        s\textsuperscript{2}');
299     % plot(f_fit_8WoTW_vcr1, f_Faktor_8WoTW_vcr1, diff_a_max_R_8WoTW_vcr1);
300     plot(x_2,f_8WoTW_vcr1, 'color',[0.1, 0.1, 0.4], 'DisplayName', '
        Interpolationspolynom');
301     plot(x_2,f_8WoTW_vcr1+offset_8WoTW_o, 'color',[0.9, 0.6, 0.1], '
        DisplayName', 'Grenzfunktionen');
302     plot(x_2,f_8WoTW_vcr1-offset_8WoTW_u, 'color',[0.9, 0.6, 0.1], '
        HandleVisibility','off');
303
304     set(groot, 'defaulttextinterpreter','latex');
305     set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter','latex');
306     set(groot, 'defaultLegendInterpreter','latex');
307     set(0, 'DefaultAxesFontWeight', 'normal', ...
308         'DefaultAxesFontSize', 35, ...
309         'DefaultAxesFontAngle', 'normal', ...
310         'DefaultAxesTitleFontWeight', 'normal', ...
311         'DefaultAxesTitleFontSizeMultiplier', 1);
312     set(gca, 'fontsize',10);
313     xlim([0,60]);
314     xticks([0:10:60]);
315     ylim([-70,30]);
316     yticks([-70:10:30]);
317     xlabel('\Delta a_{M-S-DOF,max,p}$ in m/s\textsuperscript{2}');
318     ylabel('\Delta a_{max,p}$ in m/s\textsuperscript{2}');
319     set(gcf, 'PaperPositionMode', 'auto');
320     legend show;
321     hold off;
322     print('-dpng', 'fig4_8WoTW_vcr1', '-r900');

```

Anhang E

Tabellarische Auswertung für die erste Zugkonfiguration

Für die erste Zugkonfiguration bestehend aus acht Reisezugwagen wird $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ tabellarisch in m/s^2 ausgegeben.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Table with 75 rows and 48 columns. Each cell contains a numerical value. The values are arranged in a grid that appears to be a sequence of numbers, possibly representing a data set or a specific mathematical pattern. The values range from approximately 0.07 to 0.37.

Anhang F

Tabellarische Auswertung für die zweite Zugkonfiguration

Für die zweite Zugkonfiguration bestehend aus sieben Reisezugwagen und einer Lok wird $\Delta a_{max,interp}(l, m, f, z)$ tabellarisch in m/s^2 ausgegeben.



Table with 75 rows and 48 columns. Columns are labeled 'lm' and '0' through '925'. Each cell contains a numerical value, likely representing a correlation coefficient or similar metric. The values are generally small, ranging from approximately -0.08 to 0.15.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Table with 75 rows and 48 columns. Each cell contains a numerical value representing a data point for a specific row and column index.